



Wydział Inżynierii Biomedycznej
Katedra Biomechatroniki

dr hab. inż.

Wojciech Wolański
prof. PŚ

Zabrze, 08.05.2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Martynty Białeckiej
pod tytułem

Biomechaniczna analiza obciążeń stawu kolanowego podczas wykonywania testu izokinetycznego

Podstawę opracowania stanowi pismo Dziekana Wydziału Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej dra hab. inż. Olafa Ciszaka prof. PP nr DIM.075.91.2023 podyktowane uchwałą Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej nr 4/III/02/2023 z dnia 27.02.2023r. oraz dołączona do niego rozprawa doktorska mgr inż. Marty Białeckiej napisana pod opieką naukową dra hab. inż. Jacka Buśkiewicza oraz promotora pomocniczego dra Tomasza Walczaka.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Problematyka leczenia urazów narządu ruchu, a zwłaszcza stawów w tym stawu kolanowego i jego struktur (tkanki chrzęstnej, łąkotki), jest współcześnie rozważana i badana w szerokim zakresie naukowym i w różnych aspektach: chirurgiczno-ortopedycznym, biologicznym, fizjologicznym, a także biomechanicznym. We współczesnej ortopedii kładzie się duży nacisk na zabiegi małoinwazyjne (np. artroskopowe) i medycynę regeneracyjną np. szycie i augmentację łąkotki stawu kolanowego, aby w okresie jak najkrótszym od doznania urazu przywrócić prawidłową funkcjonalność stawu. Świadome zaplanowanie rehabilitacji i programów treningowych dla pacjentów po operacjach powinno uwzględniać wielkości obciążeń występujących w stawach podczas zalecanych czynności i ćwiczeń terapeutycznych. W tym sensie tematyka rozprawy doktorskiej jest aktualna, gdyż poruszane są w niej zagadnienia i zjawiska dotyczące obciążeń stawu kolanowego u osób operowanych ze względu na uszkodzenie łąkotki oraz analizowane są siły występujące pomiędzy powierzchniami stawowymi kości udowej i piszczelowej.

Szczególne znaczenia nabiera model biomechaniczny symulujący interakcje piszczelowo-udowe, w którym uwzględniona została budowa anatomiczna stawu kolanowego osoby badanej. W ujęciu mechanicznym takie modele powinny charakteryzować się odpowiednim naśladowaniem biologicznego układu i wiernie odwzorowywać jego budowę oraz funkcjonalność. W świetle obecnego stanu wiedzy, znane są opracowania opisujące i symulujące obciążenia stawu kolanowego. W znanych modelach SK głównie przyjmowane są uśrednione parametry anatomiczne (morfometryczne). Rzadko w modelach tych są uwzględniane indywidualne cechy morfometryczne badanej osoby, a jeszcze rzadziej są one sparametryzowane. Zastosowanie modeli symulujących fizjologiczny układ obciążenia pozwala na lepsze określenie właściwości biomechanicznych odpowiadającym tym stanom. W tym sensie, znajomość budowy stawu kolanowego i fizjologicznych warunków obciążeniowych jego struktur może przyczynić się do poprawy procesu leczenia poprzez dobór optymalnej rehabilitacji.

Pomimo aktualnie prowadzonych badań w wielu ośrodkach naukowych brakuje informacji w pełni określających i wyjaśniających wpływ czynników mechanicznych na wewnętrzny stan obciążenia stawu kolanowego, zwłaszcza sił stycznych i normalnych. Takiej próby podjęła się Doktorantka, która w pracy zaproponowała model zindywidualizowanego osobniczo biomechanicznego stawu kolanowego TFITIMD (ang. *Tibiofemoral Force Isokinetic Test Individual MRI Data*) uwzględniający parametry anatomiczne stawu badanej osoby. W następstwie tych badań modelowych dokonała oceny sił piszczelowo-udowych stawu kolanowego po rekonstrukcji łąkotki przyśrodkowej.



W tym kontekście dobór tematu pracy uważam za prawidłowy i aktualny, mieszczący się w ważnym i priorytetowym obszarze naukowym, który wpisuje się w dyscyplinę: inżynieria mechaniczna.

2. Struktura i zawartość rozprawy

Recenzowana praca została napisana na 124 stronach maszynopisu w formie zwartej monografii, która składa się z 7 rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim, bibliografii oraz spisu rysunków i tabel. Układ treści pracy został zaprezentowany w typowej kolejności i rozpoczyna się od rozdziału (1) Wprowadzenie. Kolejne rozdziały posiadają następujące tytuły: (2) Przegląd stanu wiedzy; (3) Cele i teza pracy; (4) Analiza przebiegu momentu sił mięśniowych w stawie kolanowym podczas badania izokinetycznego; (5) Opracowanie i walidacja zindywidualizowanego osobniczo modelu biomechanicznego stawu kolanowego (TFITIMD); (6) Analiza przebiegu siły piszczelowo-udowej u pacjentów po rekonstrukcji łąkotki w wybranych okresach pooperacyjnych; (7) Podsumowanie i kierunki dalszych badań. Bibliografia składa się z 104 pozycji literaturowych, a spis zawiera 34 rysunków i 14 tabel z wynikami.

Tematyka pracy doktorskiej obejmuje badania biomechaniczne zarówno doświadczalne, jak i modelowe dotyczące obciążeń stawu kolanowego podczas wykonywania testu izokinetycznego. W pierwszym rozdziale Autorka opisała kluczowe pojęcia i zagadnienia, wprowadzając czytelnika w kontekst badań i motywację do podjęcia tematu z perspektywy klinicznej. Natomiast, drugi rozdział stanowi opis aktualnego stanu wiedzy związanego z anatomią i biomechaniką stawu kolanowego w kontekście prowadzonych badań. Trzeci rozdział zawiera przesłanki i uzasadnienie podjętej tematyki na podstawie przeglądu literaturowego przedstawionego w rozdziale pierwszym i drugim dotyczącego modeli i testu izokinetycznego stawu kolanowego TISK. Następnie Doktorantka sformułowała cele i zadania badawcze oraz zdefiniowała tezę niniejszej rozprawy doktorskiej.

W czwartym rozdziale przedstawiono metodykę badań stawu kolanowego na dynamometrze izokinetycznym oraz opracowano wzorcowy przebieg momentu sił mięśniowych dla całego zakresu ruchu rejestrowanego podczas TISK. Powstały wzorzec przebiegu momentu sił mięśniowych został opisany zestawem łatwo mierzalnych parametrów, które stanowiły odniesienie dla przebiegu momentu sił mięśniowych grupy klinicznej, którą stanowili pacjenci po operacji łąkotki przyśrodkowej stawu kolanowego metodą AMMS (zang. *Arthroscopic Meniscus Membrane Suturing*).

Natomiast, w rozdziale piątym zaprezentowano założenia modelu biomechanicznego stawu kolanowego oraz pomiary parametrów anatomicznych stawu kolanowego z obrazów MRI. Opracowany model umożliwił oszacowanie siły piszczelowo-udowej podczas wykonywania TISK na podstawie zarejestrowanego przez dynamometr izokinetyczny momentu sił mięśniowych oraz parametry anatomiczne badanej osoby. Na końcu rozdziału Autorka przedstawiła wyniki testu modelu dla danych pacjentów leczonych ze względu na uszkodzenie łąkotki przyśrodkowej oraz jego walidacji na podstawie porównania z danymi literaturowymi i wynikami modelu Nisella.

W rozdziale szóstym pozytywnie zwalidowany model TFITIMD posłużył do analizy siły piszczelowo-udowej w większej grupie osób operowanych ze względu na uszkodzenie łąkotki przyśrodkowej dla różnych okresów po zabiegu. W rozdziale tym dokonano oceny jakościowej przebiegu siły piszczelowo-udowej, a także wykazano zależność pomiędzy wartością tej siły a rejestrowanym momentem sił mięśniowych oraz budową anatomiczną stawu, a także zmiany wynikające z wdrożonej rehabilitacji pacjenta.

Natomiast, w rozdziale siódmym przedstawiono wnioski, które Doktorantka formułowała na podstawie otrzymanych wyników badań doświadczalnych i modelowych stawu kolanowego. Rozdział ten zawiera podsumowanie oraz zostały w nim również podkreślone oryginalne elementy rozprawy, a także przedstawiono kierunki dalszych badań.

Przedstawioną rozprawę doktorską pod względem poziomu edytorskiego oceniam bardzo pozytywnie. Należy przy tym podkreślić dbałość Doktorantki o stronę redakcyjną pracy, której dużą zaletą stanowi oprawa graficzna, co sprawia, że recenzowaną dysertację czyta się z dużą przyjemnością.

3. Wartość merytoryczna rozprawy

Po zapoznaniu się z treścią całej rozprawy można zauważyć, że w dominującej części zawiera badania eksperymentalne (doświadczenia) i modelowanie, które stanowią cenne źródło wiedzy szczególnie dotyczącej zjawisk fizycznych czy procesów fizjologicznych zachodzących w organizmach żywych. W tym kontekście przedstawiony przez Autorkę dobór metod badawczych w rozprawie doktorskiej do poznania wewnętrznych sił stawu kolanowego wskazuje na umiejętność samodzielnego i efektywnego prowadzenia pracy naukowej. Analizę stanu obciążenia Doktorantka przeprowadziła stosując autorski model, który pozytywnie zweryfikowany gwarantował uzyskanie wiarygodnych wyników i właściwą ich interpretację na tle literatury przedmiotu. Pozwoliło to na sformułowanie jasnych i poprawnych wniosków, które stanowiły przesłanki do spełnienia postawionej tezy.

Głównym zagadnieniem naukowym, które Doktorantka rozpatruje jest analiza sił występujących pomiędzy powierzchniami stawowymi kości udowej i piszczelowej podczas wykonywania testu izokinetycznego stawu kolanowego. W tym celu został zaproponowany biomechaniczny model zindywidualizowanego osobniczo stawu kolanowego uwzględniający anatomiczne parametry stawu, przez co odwzorowano warunki zbliżone do fizjologicznych. Prezentacja aktualnego stanu wiedzy w odniesieniu do podjętej tematyki pozwoliły Doktorantce określić potrzebę uzupełnienia wiedzy dotyczącej stosowania testu izokinetycznego stawu kolanowego TISK, zwłaszcza w praktyce klinicznej. Doktorantka zbadała obciążenia stawu kolanowego podczas wykonywania testu izokinetycznego wśród zdrowych osób oraz po operacji stawu kolanowego z uwzględnieniem zindywidualizowanych parametrów anatomicznych, co stanowi wyjątek w tego typu badaniach biomechanicznych. Realizacja zaplanowanego programu zadań badawczych stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autorki, których wyniki uzupełniają aktualny stan wiedzy dotyczący obciążeń stawu kolanowego, zwłaszcza wewnętrznych sił piszczelowo-udowych w aspekcie zastosowania ich w praktyce klinicznej, co uważam za poprawne i właściwe dla podjęcia tej tematyki.

Do istotnych i oryginalnych elementów rozprawy zaliczam:

- opracowanie przebiegu momentu sił mięśniowych stawu kolanowego podczas testu izokinetycznego wzorcowego dla osób zdrowych oraz u osób leczonych po uszkodzeniu łąkotki przyśrodkowej w ocenie procesu leczenia;
- opracowanie biomechanicznego modelu stawu kolanowego TFITIMD umożliwiającego szacowanie siły piszczelowo-udowej z uwzględnieniem parametrów anatomicznych badanej osoby;
- określenie cech morfometrycznych stawu kolanowego z obrazów MRI oraz powiązanie ich z obciążeniami fizjologicznymi struktur wewnętrznych.

Przedstawione w rozprawie badania umożliwiły Doktorantce sformułowanie przekonujących spostrzeżeń i wniosków, które poparte uzyskanymi wynikami stanowią potwierdzenie przyjętej tezy. W rozprawie wykazano przydatność TISK oraz modelu TFITIMD w praktyce klinicznej do szacowania wartości piszczelowo-udowej wśród osób po operacji regeneracji łąkotki przyśrodkowej. Doktorantka zauważa również potrzebę prowadzenia dalszych badań dla pełnego zrozumienia stanu obciążenia stawu kolanowego podczas testu izokinetycznego w kontekście doboru optymalnych parametrów rehabilitacji wśród innych grup pacjentów.

4. Uwagi szczegółowe i krytyczne

Praca zredagowana jest poprawnie w sposób zrozumiały z właściwą systematyką rozwiązywanych zagadnień. Jakość opracowania naukowego świadczy o dużej dojrzałości naukowej Autorki. Dowodem jest samodzielność w generowaniu programu badawczego (logiczny i kompleksowy) i jego realizacji, aż do wyciągania konstruktywnych wniosków z proponowaniem kierunku dalszych działań. Pod dyskusję podałbym jednak założoną tezę badawczą, która jest jedynie uogólnionym rozwinięciem celu pracy. W mojej opinii przyjęta teza jest oczywista i nie wymaga dowodzenia, gdyż nie wykracza poza zakres i cel pracy doktorskiej. Przyjęty cel: „*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 SK*” wyznacza istotny i trafny kierunek prowadzonych przez Doktorantkę badań, a uzyskane wyniki są potwierdzeniem słuszności oraz poprawności przyjętych do realizacji zadań badawczych. Jedynie, można by uznać treść tezy za drugą część celu, co stanowiłoby kompletność podejmowanych badań.

Praca zawiera pewne fragmenty wymagające dyskusji i wyjaśnienia ze względu na ujęte skróty myślowe lub zawarte ograniczenia, które nie uwzględniono w części opisowej poszczególnych rozdziałów. Przykładem są przebiegi momentu sił mięśniowych wyznaczone podczas testu izokinetycznego stawu kolanowego prezentowane w rozdziale 4. (Rys. 4.2.1, Rys. 4.2.2, Rys. 4.2.3, Rys. 4.3.1). W mojej opinii brakuje wyjaśnienia dlaczego przebieg momentu sił mięśniowych jest przedstawiony dla trzech powtórzeń, a nie jednego powtórzenia reprezentatywnego (średkowego). Poza tym, opis tabeli 4.3.1 ze względu na podział na dwie części jest mało precyzyjny. Lepszym wariantem byłoby przedstawienie danych osób badanych w dwóch tabelach z podziałem na kobiety i mężczyzn. Praca zawiera również fragmenty treści odwołujące się do rozdziałów, które występują później, co utrudnia zrozumienie myśli przewodniej bieżących zagadnień. Ponadto, stosowanie „podsumowania” do każdego rozdziału, a nawet do podrozdziałów, umniejsza znaczenie całościowego podsumowania przedstawionego w rozdziale 7. Lepiej byłoby gdyby Doktorantka zamiast podsumowania prezentowała wnioski do analizowanych tematów.

Niezrozumiałe jest także, dlaczego wśród sformułowanych 9 parametrów charakteryzujących przebieg momentu sił mięśniowych w TISK nie uwzględniony został kąt nachylenia zbrocza narastającego momentu sił mięśniowych prostowników SK (?) dla zakresu od 60% do 70% Tr. W prezentowanej formie na Rys. 4.2.3, parametry zaznaczone są na ostatnim zakresie czasu trwania Tr, co sugeruje, że odnoszą się właśnie do tego trzeciego powtórzenia. Jednakże, z opisu każdy parametr odnosi się do innego zakresu Tr, a ponadto błędnie oznaczono procentowy czas trwania testu TISK przyjmując, że Tr oznacza procentowy czas trwania powtórzenia. Wymagałoby to szerszego omówienia i rozróżnienia sytuacji zginania i prostowania dla pojedynczego powtórzenia od testu składającego się z kilku powtórzeń, na co w recenzji wcześniej zwrócono uwagę.

Przeprowadzona przez Dyplomantkę analiza przebiegu momentu sił mięśniowych w stawie kolanowym podczas TISK w całym zakresie ruchu osób zdrowych oraz po zabiegu regeneracji łąkotki przyśrodkowej i otrzymane wyniki dostarczają cennych informacji, lecz niektóre wnioski wymagają wyjaśnienia. Przykładem jest interpretacja parametru kąta θ (kąta nachylenia zbrocza narastającego momentu sił mięśniowych zginaczy, obliczony dla zakresu od 95% do 100% Tr), którego wzrost wartości tłumaczony jest zmęczeniem osoby badanej w fazie końcowej testu. O tyle jest to nie zrozumiałe, że pozostałe parametry kątowe wykazują odmienną tendencję przy zmęczeniu badanej osoby. W mojej opinii, błędnie został określony kąt θ , gdyż jego wartość wyznaczana jest względem osi pionowej (osi wartości momentu), a pozostałych parametrów kątowych wartości określane są względem osi poziomej (osi czasu). Stąd różna interpretacja zmian parametrów kątowych dla całego zakresu testu TISK.

Opracowany model TFITIMD przedstawiony jest przez Dyplomantkę jako dwuwymiarowy parametryczny model stawu kolanowego o jednym stopniu swobody, pomimo że w założeniach przyjmuje ruchowy punkt kontaktu pomiędzy powierzchnią kości udowej i piszczelowej (O, str. 63) oraz prezentując na Rys. 5.2.1 przemieszczenie punktu O w zależności od kąta wyprostu stawu kolanowego $c(\varphi)$. W tej sytuacji nasuwa się pytanie: czy na pewno opracowany model jest modelem o jednym stopniu swobody? Jednak, dla przyjętych założeń Doktorantka formułuje dwa dynamiczne równania dla ruchu postępowego (5.3.1) i obrotowego (5.3.5). Jest to właściwe podejście dla ruchu płaskiego stawu kolanowego, w którym podczas zgięcia i wyprostu stawu odbywają się jednocześnie dwa rodzaje ruchów: obrotowy oraz ślizgowy (postępowy). Doktorantka zaznaczyła w przeglądzie literaturowym określając staw kolanowy jako ślizgowy staw zawiasowy. Zatem, prawidłowym jest określanie, że opracowany model TFITIMD jest dwuwymiarowy lub płaski.

Przeprowadzona weryfikacja modelu posiada charakter ilościowy, lecz nie ujmuje to wartości otrzymanych wyników w zestawieniu z danymi literaturowymi, pomimo wykazywania różnic. Opracowany model biomechaniczny uwzględni indywidualne cechy anatomiczne stawu oraz znormalizowany względem masy ciała i przeliczony względem wysokości ciała moment sił mięśniowych TISK. Szkoda, że Doktorantka nie spróbowała oszacować wewnętrznego obciążenia stawu kolanowego uwzględniając oprócz płciowości również cechy fizyczne badanych osób jak np. obwód uda czy zawartość tkanki tłuszczowej. Pozwoliłoby to na zobiektywizowanie wyników, gdyż osoby objęte badaniem stanowiły grupę sportowców (piłkarzy) czynnych zawodowo. Dodatkowym ograniczeniem jest tylko możliwość stosowania modelu tylko do wyprostu kolanowego podczas TISK. Dlatego sugeruję w dalszym rozwoju modelu możliwość uwzględnienia wewnętrznych obciążeń stawu kolanowego wynikających z różnych aktywności dnia codziennego.

Ogólnie, przeprowadzone analizy obciążeń stawu kolanowego osób bez urazu oraz osób po zabiegu regeneracji łąkotki przyśrodkowej z zastosowaniem modelu TFITIMD dostarczają cennych informacji, które umożliwiają ocenę procesu leczenia oraz dobór parametrów TISK w trakcie rehabilitacji. Wartościowe jest to, że Doktorantka zaprezentowała, oprócz uśrednionych wyników dla różnych pacjentów, indywidualne wyniki dla pacjentów w okresach pooperacyjnych tj. 6, 12, oraz 24 miesiące od regeneracji łąkotki przyśrodkowej. Takie podejście daje lepszy obraz lekarzowi o postępach rehabilitacji i powrocie danej osoby do pełnej sprawności. Nie mniej jednak, Doktorantka nie przedstawiła możliwości aplikacyjnych modelu do praktyki klinicznej, więc nasuwa się pytanie czy planowane jest opracowanie algorytmu komputerowego, który w sposób automatyczny będzie wyznaczał siły wewnętrzne stawu kolanowego dla danego pacjenta.

W pracy zauważalne są nieliczne błędy natury redakcyjnej, do których można zaliczyć m. in.:

- dzielenia wyrazów na ostatnim miejscu w wersie, często na końcu strony lub pomiędzy stronami;
- stosowanie anglojęzycznych opisów rysunków zamiast polskich np. rys. 2.1.2, rys. 2.2.1, rys. 2.2.4, rys. 2.3.1, rys. 2.4.1;
- występowanie w pracy słabej jakości rysunków, która może wynikać z ich pomniejszenia, dlatego utrudniony jest odczyt opisów i ich interpretacja, jak np. rys. 2.2.2;
- brak spisu symboli występujących w pracy, gdyż zauważono stosowanie podobnych lub takich samych symboli dla różnych wielkości, jak np. SD i σ dla odchylenia standardowego, czy symbol β stosowany jako kąt nachylenia więzadła rzepki do osi długiej piszczeli oraz kąt nachylenia zbroca opadającego momentu sił mięśniowych prostowników SK, to samo dotyczy symboli α i γ ;
- różne oznaczenia dla tej samej siły, rysunek 5.3.1 zawiera opis siły stycznej piszczelowo-udowej jako F_{FT} , a w równaniach ruchu modelu SK tą samą siłę przedstawiono jako F_{TF} ;

Małym mankamentem pracy jest jej układ, który osobiście zmieniłbym umieszczając streszczenia pracy na jej końcu. Pozostałe drobne uwagi i błędy redakcyjne zostały zaznaczone w tekście pracy i przekazane Autorce.

5. Ocena końcowa

Podsumowując, uważam, że Pani mgr inż. Marta Białecka w sposób oryginalny analizuje wewnętrzny stan obciążenia stawu kolanowego, co świadczy o dobrej wiedzy Doktorantki w szerokim zakresie m.in. anatomii, (bio)mechaniki, czy metod badawczych narządu ruchu. Na szczególne podkreślenie zasługuje opracowanie autorskiego modelu stawu kolanowego zindywidualizowanego osobniczo TFIFIMD, który umożliwia wyznaczenie składowych pomiędzy powierzchniami stawowymi kości udowej i piszczelowej oraz zastosowanie go do analizy obciążenia SK u pacjentów po rekonstrukcji łąkotki. Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do planowania leczenia/rehabilitacji i być pomocne przy doborze parametrów testu izokinetycznego TISK gwarantujące optymalne warunki terapii, gdyż TISK generuje jedno z większych spotykanych obciążeń stawu kolanowego. Jednocześnie zwracając uwagę na samą sylwetkę Doktorantki w aktywności naukowej, czego przykładem są wystąpienia konferencyjne oraz publikacje współautorskie, pragnę podkreślić ambicje i walory młodego naukowca. Doktorantka legitymizuje się sześcioma oryginalnymi publikacjami oraz dwoma publikacjami pokonferencyjnymi ujętymi w bazie JCR i indeksowanymi przez WoS/Scopus. Reasumując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Marty Białeckiej spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. 2020r. poz.85) i wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Wojciech Wołoski

Zabrze, 08.05.2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Marty Białeckiej
pod tytułem

Biomechaniczna analiza obciążeń stawu kolanowego podczas wykonywania testu izokinetycznego

Podstawę opracowania stanowi pismo Dziekana Wydziału Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej dra hab. inż. Olafa Ciszaka prof. PP nr DIM.075.91.2023 podyktowane uchwałą Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej nr 4/III/02/2023 z dnia 27.02.2023r. oraz dołączona do niego rozprawa doktorska mgr inż. Marty Białeckiej napisana pod opieką naukową dra hab. inż. Jacka Buśkiewicza oraz promotora pomocniczego dra Tomasza Walczaka.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Problematyka leczenia urazów narządu ruchu, a zwłaszcza stawów w tym stawu kolanowego i jego struktur (tkanki chrzęstnej, łąkotki), jest współcześnie rozważana i badana w szerokim zakresie naukowym i w różnych aspektach: chirurgiczno-ortopedycznym, biologicznym, fizjologicznym, a także biomechanicznym. We współczesnej ortopedii kładzie się duży nacisk na zabiegi małoinwazyjne (np. artroskopowe) i medycynę regeneracyjną np. szycie i augmentację łąkotki stawu kolanowego, aby w okresie jak najkrótszym od doznania urazu przywrócić prawidłową funkcjonalność stawu. Świadome zaplanowanie rehabilitacji i programów treningowych dla pacjentów po operacjach powinno uwzględniać wielkości obciążeń występujących w stawach podczas zalecanych czynności i ćwiczeń terapeutycznych. W tym sensie tematyka rozprawy doktorskiej jest aktualna, gdyż poruszane są w niej zagadnienia i zjawiska dotyczące obciążeń stawu kolanowego u osób operowanych ze względu na uszkodzenie łąkotki oraz analizowane są siły występujące pomiędzy powierzchniami stawowymi kości udowej i piszczelowej.

Szczególne znaczenie nabiera model biomechaniczny symulujący interakcje piszczelowo-udowe, w którym uwzględniona została budowa anatomiczna stawu kolanowego osoby badanej. W ujęciu mechanicznym takie modele powinny charakteryzować się odpowiednim naśladowaniem biologicznego układu i wiernie odwzorowywać jego budowę oraz funkcjonalność. W świetle obecnego stanu wiedzy, znane są opracowania opisujące i symulujące obciążenia stawu kolanowego. W znanych modelach SK głównie przyjmowane są uśrednione parametry anatomiczne (morfometryczne). Rzadko w modelach tych są uwzględniane indywidualne cechy morfometryczne badanej osoby, a jeszcze rzadziej są one sparametryzowane. Zastosowanie modeli symulujących fizjologiczny układ obciążenia pozwala na lepsze określenie właściwości biomechanicznych odpowiadającym tym stanom. W tym sensie, znajomość budowy stawu kolanowego i fizjologicznych warunków obciążeniowych jego struktur może przyczynić się do poprawy procesu leczenia poprzez dobór optymalnej rehabilitacji.

Pomimo aktualnie prowadzonych badań w wielu ośrodkach naukowych brakuje informacji w pełni określających i wyjaśniających wpływ czynników mechanicznych na wewnętrzny stan obciążenia stawu kolanowego, zwłaszcza sił stycznych i normalnych. Takiej próby podjęła się Doktorantka, która w pracy zaproponowała model zindywidualizowanego osobniczo biomechanicznego stawu kolanowego TFITIMD (ang. *Tibiofemoral Force Isokinetic Test Individual MRI Data*) uwzględniający parametry anatomiczne stawu badanej osoby. W następstwie tych badań modelowych dokonała oceny sił piszczelowo-udowych stawu kolanowego po rekonstrukcji łąkotki przyśrodkowej.

W tym kontekście dobór tematu pracy uważam za prawidłowy i aktualny, mieszczący się w ważnym i priorytetowym obszarze naukowym, który wpisuje się w dyscyplinę: inżynieria mechaniczna.

2. Struktura i zawartość rozprawy

Recenzowana praca została napisana na 124 stronach maszynopisu w formie zwartej monografii, która składa się z 7 rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim, bibliografii oraz spisu rysunków i tabel. Układ treści pracy został zaprezentowany w typowej kolejności i rozpoczyna się od rozdziału (1) Wprowadzenie. Kolejne rozdziały posiadają następujące tytuły: (2) Przegląd stanu wiedzy; (3) Cele i teza pracy; (4) Analiza przebiegu momentu sił mięśniowych w stawie kolanowym podczas badania izokinetycznego; (5) Opracowanie i walidacja zindywidualizowanego osobniczo modelu biomechanicznego stawu kolanowego (TFITIMD); (6) Analiza przebiegu siły piszczelowo-udowej u pacjentów po rekonstrukcji łąkotki w wybranych okresach pooperacyjnych; (7) Podsumowanie i kierunki dalszych badań. Bibliografia składa się z 104 pozycji literaturowych, a spis zawiera 34 rysunków i 14 tabel z wynikami.

Tematyka pracy doktorskiej obejmuje badania biomechaniczne zarówno doświadczalne, jak i modelowe dotyczące obciążeń stawu kolanowego podczas wykonywania testu izokinetycznego. W pierwszym rozdziale Autorka opisała kluczowe pojęcia i zagadnienia, wprowadzając czytelnika w kontekst badań i motywację do podjęcia tematu z perspektywy klinicznej. Natomiast, drugi rozdział stanowi opis aktualnego stanu wiedzy związanego z anatomią i biomechaniką stawu kolanowego w kontekście prowadzonych badań. Trzeci rozdział zawiera przesłanki i uzasadnienie podjętej tematyki na podstawie przeglądu literaturowego przedstawionego w rozdziale pierwszym i drugim dotyczącego modeli i testu izokinetycznego stawu kolanowego TISK. Następnie Doktorantka sformułowała cele i zadania badawcze oraz zdefiniowała tezę niniejszej rozprawy doktorskiej.

W czwartym rozdziale przedstawiono metodykę badań stawu kolanowego na dynamometrze izokinetycznym oraz opracowano wzorcowy przebieg momentu sił mięśniowych dla całego zakresu ruchu rejestrowanego podczas TISK. Powstały wzorzec przebiegu momentu sił mięśniowych został opisany zestawem łatwo mierzalnych parametrów, które stanowiły odniesienie dla przebiegu momentu sił mięśniowych grupy klinicznej, którą stanowili pacjenci po operacji łąkotki przyśrodkowej stawu kolanowego metodą AMMS (zang. *Arthroscopic Meniscus Membrane Suturing*).

Natomiast, w rozdziale piątym zaprezentowano założenia modelu biomechanicznego stawu kolanowego oraz pomiary parametrów anatomicznych stawu kolanowego z obrazów MRI. Opracowany model umożliwił oszacowanie siły piszczelowo-udowej podczas wykonywania TISK na podstawie zarejestrowanego przez dynamometr izokinetyczny momentu sił mięśniowych oraz parametry anatomiczne badanej osoby. Na końcu rozdziału Autorka przedstawiła wyniki testu modelu dla danych pacjentów leczonych ze względu na uszkodzenie łąkotki przyśrodkowej oraz jego walidacji na podstawie porównania z danymi literaturowymi i wynikami modelu Nisella.

W rozdziale szóstym pozytywnie zwalidowany model TFITIMD posłużył do analizy siły piszczelowo-udowej w większej grupie osób operowanych ze względu na uszkodzenie łąkotki przyśrodkowej dla różnych okresów po zabiegu. W rozdziale tym dokonano oceny jakościowej przebiegu siły piszczelowo-udowej, a także wykazano zależność pomiędzy wartością tej siły a rejestrowanym momentem sił mięśniowych oraz budową anatomiczną stawu, a także zmiany wynikające z wdrożonej rehabilitacji pacjenta.

Natomiast, w rozdziale siódmym przedstawiono wnioski, które Doktorantka formułowała na podstawie otrzymanych wyników badań doświadczalnych i modelowych stawu kolanowego. Rozdział ten zawiera podsumowanie oraz zostały w nim również podkreślone oryginalne elementy rozprawy, a także przedstawiono kierunki dalszych badań.

Przedstawioną rozprawę doktorską pod względem poziomu edytorskiego oceniam bardzo pozytywnie. Należy przy tym podkreślić dbałość Doktorantki o stronę redakcyjną pracy, której dużą zaletą stanowi oprawa graficzna, co sprawia, że recenzowaną dysertację czyta się z dużą przyjemnością.

3. Wartość merytoryczna rozprawy

Po zapoznaniu się z treścią całej rozprawy można zauważyć, że w dominującej części zawiera badania eksperymentalne (doświadczenia) i modelowanie, które stanowią cenne źródło wiedzy szczególnie dotyczącej zjawisk fizycznych czy procesów fizjologicznych zachodzących w organizmach żywych. W tym kontekście przedstawiony przez Autorkę dobór metod badawczych w rozprawie doktorskiej do poznania wewnętrznych sił stawu kolanowego wskazuje na umiejętność samodzielnego i efektywnego prowadzenia pracy naukowej. Analizę stanu obciążenia Doktorantka przeprowadziła stosując autorski model, który pozytywnie zweryfikowany gwarantował uzyskanie wiarygodnych wyników i właściwą ich interpretację na tle literatury przedmiotu. Pozwoliło to na sformułowanie jasnych i poprawnych wniosków, które stanowiły przesłanki do spełnienia postawionej tezy.

Głównym zagadnieniem naukowym, które Doktorantka rozpatruje jest analiza sił występujących pomiędzy powierzchniami stawowymi kości udowej i piszczelowej podczas wykonywania testu izokinetycznego stawu kolanowego. W tym celu został zaproponowany biomechaniczny model zindywidualizowanego osobniczo stawu kolanowego uwzględniający anatomiczne parametry stawu, przez co odwzorowano warunki zbliżone do fizjologicznych. Prezentacja aktualnego stanu wiedzy w odniesieniu do podjętej tematyki pozwoliły Doktorantce określić potrzebę uzupełnienia wiedzy dotyczącej stosowania testu izokinetycznego stawu kolanowego TISK, zwłaszcza w praktyce klinicznej. Doktorantka zbadała obciążenia stawu kolanowego podczas wykonywania testu izokinetycznego wśród zdrowych osób oraz po operacji stawu kolanowego z uwzględnieniem zindywidualizowanych parametrów anatomicznych, co stanowi wyjątek w tego typu badaniach biomechanicznych. Realizacja zaplanowanego programu zadań badawczych stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autorki, których wyniki uzupełniają aktualny stan wiedzy dotyczący obciążeń stawu kolanowego, zwłaszcza wewnętrznych sił piszczelowo-udowych w aspekcie zastosowania ich w praktyce klinicznej, co uważam za poprawne i właściwe dla podjęcia tej tematyki.

Do istotnych i oryginalnych elementów rozprawy zaliczam:

- opracowanie przebiegu momentu sił mięśniowych stawu kolanowego podczas testu izokinetycznego wzorcowego dla osób zdrowych oraz u osób leczonych po uszkodzeniu łąkotki przyśrodkowej w ocenie procesu leczenia;
- opracowanie biomechanicznego modelu stawu kolanowego TFITIMD umożliwiającego szacowanie siły piszczelowo-udowej z uwzględnieniem parametrów anatomicznych badanej osoby;
- określenie cech morfometrycznych stawu kolanowego z obrazów MRI oraz powiązanie ich z obciążeniami fizjologicznymi struktur wewnętrznych.

Przedstawione w rozprawie badania umożliwiły Doktorantce sformułowanie przekonujących spostrzeżeń i wniosków, które poparte uzyskanymi wynikami stanowią potwierdzenie przyjętej tezy. W rozprawie wykazano przydatność TISK oraz modelu TFITIMD w praktyce klinicznej do szacowania wartości piszczelowo-udowej wśród osób po operacji regeneracji łąkotki przyśrodkowej. Doktorantka zauważa również potrzebę prowadzenia dalszych badań dla pełnego zrozumienia stanu obciążenia stawu kolanowego podczas testu izokinetycznego w kontekście doboru optymalnych parametrów rehabilitacji wśród innych grup pacjentów.

4. Uwagi szczegółowe i krytyczne

Praca zredagowana jest poprawnie w sposób zrozumiały z właściwą systematyką rozwiązywanych zagadnień. Jakość opracowania naukowego świadczy o dużej dojrzałości naukowej Autorki. Dowodem jest samodzielność w generowaniu programu badawczego (logiczny i kompleksowy) i jego realizacji, aż do wyciągania konstruktywnych wniosków z proponowaniem kierunku dalszych działań. Pod dyskusję podałbym jednak założoną tezę badawczą, która jest jedynie uogólnionym rozwinięciem celu pracy. W mojej opinii przyjęta teza jest oczywista i nie wymaga dowodzenia, gdyż nie wykracza poza zakres i cel pracy doktorskiej. Przyjęty cel: „*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 powierzchnię SK*” wyznacza istotny i trafny kierunek prowadzonych przez Doktorantkę badań, a uzyskane wyniki są potwierdzeniem słuszności oraz poprawności przyjętych do realizacji zadań badawczych. Jedynie, można by uznać treść tezy za drugą część celu, co stanowiłoby kompletność podejmowanych badań.

Praca zawiera pewne fragmenty wymagające dyskusji i wyjaśnienia ze względu na ujęte skrótowo myślowe lub zawarte ograniczenia, które nie uwzględniono w części opisowej poszczególnych rozdziałów. Przykładem są przebiegi momentu sił mięśniowych wyznaczone podczas testu izokinetycznego stawu kolanowego prezentowane w rozdziale 4. (Rys. 4.2.1, Rys. 4.2.2, Rys. 4.2.3, Rys. 4.3.1). W mojej opinii brakuje wyjaśnienia dlaczego przebieg momentu sił mięśniowych jest przedstawiony dla trzech powtórzeń, a nie jednego powtórzenia reprezentatywnego (średniego). Poza tym, opis tabeli 4.3.1 ze względu na podział na dwie części jest mało precyzyjny. Lepszym wariantem byłoby przedstawienie danych osób badanych w dwóch tabelach z podziałem na kobiety i mężczyzn. Praca zawiera również fragmenty treści odwołujące się do rozdziałów, które występują później, co utrudnia zrozumienie myśli przewodniej bieżących zagadnień. Ponadto, stosowanie „podsumowania” do każdego rozdziału, a nawet do podrozdziałów, umniejsza znaczenie całościowego podsumowania przedstawionego w rozdziale 7. Lepiej byłoby gdyby Doktorantka zamiast podsumowania prezentowała wnioski do analizowanych tematów.

Niezrozumiałe jest także, dlaczego wśród sformułowanych 9 parametrów charakteryzujących przebieg momentu sił mięśniowych w TISK nie uwzględniony został kąt nachylenia z boku narastającego momentu sił mięśniowych prostowników SK (?) dla zakresu od 60% do 70% Tr. W prezentowanej formie na Rys. 4.2.3, parametry zaznaczone są na ostatnim zakresie czasu trwania Tr, co sugeruje, że odnoszą się właśnie do tego trzeciego powtórzenia. Jednakże, z opisu każdy parametr odnosi się do innego zakresu Tr, a ponadto błędnie oznaczono procentowy czas trwania testu TISK przyjmując, że Tr oznacza procentowy czas trwania powtórzenia. Wymagałoby to szerszego omówienia i rozróżnienia sytuacji zginania i prostowania dla pojedynczego powtórzenia od testu składającego się z kilku powtórzeń, na co w recenzji wcześniej zwrócono uwagę.

Przeprowadzona przez Dyplomantkę analiza przebiegu momentu sił mięśniowych w stawie kolanowym podczas TISK w całym zakresie ruchu osób zdrowych oraz po zabiegu regeneracji łątki przyśrodkowej i otrzymane wyniki dostarczają cennych informacji, lecz niektóre wnioski wymagają wyjaśnienia. Przykładem jest interpretacja parametru kąta θ (kąta nachylenia z boku narastającego momentu sił mięśniowych zginaczy, obliczony dla zakresu od 95% do 100% Tr), którego wzrost wartości tłumaczony jest zmęczeniem osoby badanej w fazie końcowej testu. O tyle jest to nie zrozumiałe, że pozostałe parametry kątowe wykazują odmienną tendencję przy zmęczeniu badanej osoby. W mojej opinii, błędnie został określony kąt θ , gdyż jego wartość wyznaczana jest względem osi pionowej (osi wartości momentu), a pozostałych parametrów kątowych wartości określane są względem osi poziomej (osi czasu). Stąd różna interpretacja zmian parametrów kątowych dla całego zakresu testu TISK.

Opracowany model TFITIMD przedstawiony jest przez Dyplomantkę jako dwuwymiarowy parametryczny model stawu kolanowego o jednym stopniu swobody, pomimo że w założeniach przyjmuje ruchowy punkt kontaktu pomiędzy powierzchnią kości udowej i piszczelowej (O, str. 63) oraz prezentując na Rys. 5.2.1 przemieszczenie punktu O w zależności od kąta wyprostu stawu kolanowego $c(\varphi)$. W tej sytuacji nasuwa się pytanie: czy na pewno opracowany model jest modelem o jednym stopniu swobody? Jednak, dla przyjętych założeń Doktorantka formułuje dwa dynamiczne równania dla ruchu postępowego (5.3.1) i obrotowego (5.3.5). Jest to właściwe podejście dla ruchu płaskiego stawu kolanowego, w którym podczas zgięcia i wyprostu stawu odbywają się jednocześnie dwa rodzaje ruchów: obrotowy oraz ślizgowy (postępowy). Doktorantka zaznaczyła w przeglądzie literaturowym określając staw kolanowy jako ślizgowy staw zawiasowy. Zatem, prawidłowym jest określanie, że opracowany model TFITIMD jest dwuwymiarowy lub płaski.

Przeprowadzona weryfikacja modelu posiada charakter ilościowy, lecz nie ujmuje to wartości otrzymanych wyników w zestawieniu z danymi literaturowymi, pomimo wykazywania różnic. Opracowany model biomechaniczny uwzględnia indywidualne cechy anatomiczne stawu oraz znormalizowany względem masy ciała i przeliczony względem wysokości ciała moment sił mięśniowych TISK. Szkoda, że Doktorantka nie spróbowała oszacować wewnętrznego obciążenia stawu kolanowego uwzględniając oprócz płciowości również cechy fizyczne badanych osób jak np. obwód uda czy zawartość tkanki tłuszczowej. Pozwoliłoby to na zobiektywizowanie wyników, gdyż osoby objęte badaniem stanowiły grupę sportowców (piłkarzy) czynnych zawodowo. Dodatkowym ograniczeniem jest tylko możliwość stosowania modelu tylko do wyprostu kolanowego podczas TISK. Dlatego sugeruję w dalszym rozwoju modelu możliwość uwzględnienia wewnętrznych obciążeń stawu kolanowego wynikających z różnych aktywności dnia codziennego.

Ogólnie, przeprowadzone analizy obciążeń stawu kolanowego osób bez urazu oraz osób po zabiegu regeneracji łąkotki przyśrodkowej z zastosowaniem modelu TFITIMD dostarczają cennych informacji, które umożliwiają ocenę procesu leczenia oraz dobór parametrów TISK w trakcie rehabilitacji. Wartościowe jest to, że Doktorantka zaprezentowała, oprócz uśrednionych wyników dla różnych pacjentów, indywidualne wyniki dla pacjentów w okresach pooperacyjnych tj. 6, 12, oraz 24 miesiące od regeneracji łąkotki przyśrodkowej. Takie podejście daje lepszy obraz lekarzowi o postępach rehabilitacji i powrocie danej osoby do pełnej sprawności. Nie mniej jednak, Doktorantka nie przedstawiła możliwości aplikacyjnych modelu do praktyki klinicznej, więc nasuwa się pytanie czy planowane jest opracowanie algorytmu komputerowego, który w sposób automatyczny będzie wyznaczał siły wewnętrzne stawu kolanowego dla danego pacjenta.

W pracy zauważalne są nieliczne błędy natury redakcyjnej, do których można zaliczyć m. in.:

- dzielenia wyrazów na ostatnim miejscu w wersie, często na końcu strony lub pomiędzy stronami;
- stosowanie anglojęzycznych opisów rysunków zamiast polskich np. rys. 2.1.2, rys. 2.2.1, rys. 2.2.4, rys. 2.3.1, rys. 2.4.1;
- występowanie w pracy słabej jakości rysunków, która może wynikać z ich pomniejszenia, dlatego utrudniony jest odczyt opisów i ich interpretacja, jak np. rys. 2.2.2;
- brak spisu symboli występujących w pracy, gdyż zauważono stosowanie podobnych lub takich samych symboli dla różnych wielkości, jak np. SD i σ dla odchylenia standardowego, czy symbol β stosowany jako kąt nachylenia więzadła rzepki do osi długiej piszczeli oraz kąt nachylenia zbroca opadającego momentu sił mięśniowych prostowników SK, to samo dotyczy symboli α i γ ;
- różne oznaczenia dla tej samej siły, rysunek 5.3.1 zawiera opis siły stycznej piszczelowo-udowej jako F_{FT} , a w równaniach ruchu modelu SK tą samą siłę przedstawiono jako F_{TF} ;

Małym mankamentem pracy jest jej układ, który osobiście zmieniłbym umieszczając streszczenia pracy na jej końcu. Pozostałe drobne uwagi i błędy redakcyjne zostały zaznaczone w tekście pracy i przekazane Autorce.

5. Ocena końcowa

Podsumowując, uważam, że Pani mgr inż. Marta Białecka w sposób oryginalny analizuje wewnętrzny stan obciążenia stawu kolanowego, co świadczy o dobrej wiedzy Doktorantki w szerokim zakresie m.in. anatomii, (bio)mechaniki, czy metod badawczych narządu ruchu. Na szczególne podkreślenie zasługuje opracowanie autorskiego modelu stawu kolanowego zindywidualizowanego osobniczo TFIFIMD, który umożliwia wyznaczenie składowych pomiędzy powierzchniami stawowymi kości udowej i piszczelowej oraz zastosowanie go do analizy obciążenia SK u pacjentów po rekonstrukcji łąkotki. Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do planowania leczenia/rehabilitacji i być pomocne przy doborze parametrów testu izokinetycznego TISK gwarantujące optymalne warunki terapii, gdyż TISK generuje jedno z większych spotykanych obciążeń stawu kolanowego. Jednocześnie zwracając uwagę na samą sylwetkę Doktorantki w aktywności naukowej, czego przykładem są wystąpienia konferencyjne oraz publikacje współautorskie, pragnę podkreślić ambicje i walory młodego naukowca. Doktorantka legitymizuje się sześcioma oryginalnymi publikacjami oraz dwoma publikacjami pokonferencyjnymi ujętymi w bazie JCR i indeksowanymi przez WoS/Scopus. Reasumując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Marty Białeckiej spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. 2020r. poz.85) i wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Wojciech Wołoszka