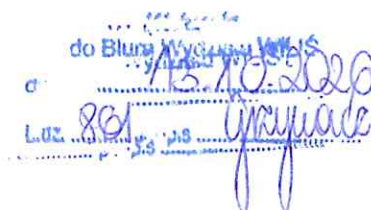


Prof. dr hab. inż. Celina Pezowicz
Wydział Mechaniczny
Politechnika Wrocławska
ul. Łukasiewicza 7/9
50-371 Wrocław

Wrocław, 24.08.2026 r.



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Radosława Wolnego „*Badania eksperymentalne właściwości materiałowych tkanek miękkich kręgosłupa*”

Promotor: Prof. dr hab. inż. Wojciech Witkowski

Promotor pomocniczy: dr inż. Angela Andrzejewska-Sroka

Podstawa opracowania recenzji: pismo nr I.dz.570/WILiŚ/2026 z dnia 30 czerwca 2026 r. Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej z prośbą o opracowanie recenzji.

1. ZAKRES ROZPRAWY

Przedłożona rozprawa doktorska dotyczy eksperymentalnej oceny właściwości mechanicznych tkanek miękkich kręgosłupa, w tym w szczególności więzadeł oraz opony twardej, i podejmuje problem istotny naukowo. Urazy i schorzenia kręgosłupa należą do częstych przyczyn bólu, prowadzą do ograniczenia sprawności fizycznej i absencji zawodowej, generując jednocześnie znaczne koszty leczenia, rehabilitacji oraz opieki długoterminowej. Szczegółowa charakterystyka właściwości mechanicznych tkanek miękkich jest niezbędna do poznania mechanizmów ich uszkodzeń, opracowywania modeli konstytutywnych i numerycznych kręgosłupa, a także w dalszej perspektywie doskonalenia metod leczenia.

Badania eksperymentalne właściwości wytrzymałościowych tkanek miękkich należą do szczególnie wymagających obszarów biomechaniki. Materiał ten wykazuje nieliniową, anizotropową i lepkosprężystą odpowiedź mechaniczną, a wyznaczane parametry zależą nie tylko od ich budowy i funkcji, lecz także od prędkości obciążania czy kierunku pobrania próbki. Niewielkie rozmiary próbek, ich nieregularna geometria, wysokie uwodnienie oraz możliwość uszkodzenia podczas preparatyki powodują, że nawet niewielkie różnice w sposobie pobierania, przechowywania, rozmrażania i nawadniania tkanki mogą wpływać na odpowiedź mechaniczną. Istotne trudności dotyczą także pozyskania i przygotowania materiału biologicznego, a dodatkowym problemem jest zmienność cech osobniczych dawców, takich jak wiek, płeć, stan zdrowia i stopień zmian degeneracyjnych. W konsekwencji wyniki badań charakteryzują się znacznym rozrzutem, który utrudnia jednoznaczną interpretację oraz porównywanie danych przedstawianych w literaturze tematu. Dodatkowe ograniczenia badań eksperymentalnych dotyczą zagadnień pomiarowych i analitycznych, w szczególności dokładnego wyznaczenia wymiarów i pola przekroju poprzecznego próbki oraz doboru techniki pomiarowej.

Brak pełnej standaryzacji wymienionych elementów sprawia, że dane dostępne w literaturze są często trudne do bezpośredniego porównania, a ich wykorzystanie do identyfikacji praw konstytutywnych i budowy modeli numerycznych wymaga daleko idącej ostrożności. Problem podjęty w rozprawie doktorskiej mgr. inż. Radosława Wolnego dotyczy zatem nie tylko samego wyznaczenia właściwości materiałowych wybranych tkanek miękkich kręgosłupa, lecz również opracowania takiego sposobu przygotowania próbek, prowadzenia eksperymentów oraz analizy wyników, który pozwoli uzyskać możliwie powtarzalne i użyteczne dane biomechaniczne.

Rozprawa ma charakter interdyscyplinarny i mieści się na pograniczu biomechaniki tkanek, mechaniki eksperymentalnej oraz modelowania matematycznego i można ją zaliczyć do szeroko rozumianej dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Przedłożona rozprawa nie ma formy klasycznej monografii. Zasadnicze osiągnięcie naukowe przedstawiono jako cykl pięciu współautorskich artykułów naukowych oznaczonych jako PI-PV, opublikowanych w latach 2022-2026. Cykl ten został uzupełniony dwiema publikacjami powiązanymi, oznaczonymi jako PVI i PVII z 2025 roku. Łącznie dokumentacja rozprawy obejmuje zatem siedem artykułów naukowych. W publikacjach PI-PV mgr inż. Radosław Wolny jest pierwszym autorem, natomiast w publikacjach PVI i PVII drugim autorem. Zgodnie z przedstawionymi oświadczeniami o wkładzie autorskim Doktorant uczestniczył w opracowaniu koncepcji i metodyki badań, prowadzeniu eksperymentów, analizie i przetwarzaniu danych, przygotowaniu modeli oraz opracowaniu manuskryptów.

Na zasadniczy cykl rozprawy składają się następujące publikacje:

1. **PI:** R. Wolny, D. Bruski, M. Budzyński, L. Pachocki, K. Wilde, *Influence of a Lighting Column in the Working Width of a W-Beam Barrier on TB51 Crash Test*, „Materials”, 2022, 15, 4926, DOI: 10.3390/ma15144926.
2. **PII:** R. Wolny, T. Wiczenbach, A.J. Andrzejewska, J.H. Spodnik, *Mechanical response of human thoracic spine ligaments under quasi-static loading: An experimental study*, „Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials”, 2024, 151, 106404, DOI: 10.1016/j.jmbbm.2024.106404.
3. **PIII:** R. Wolny, T. Wiczenbach, L. Pachocki, K. Wilde, M. Rucka, *The role of sand filler in enhancing the mechanical properties of polymethylmethacrylate composites*, „Archives of Mechanics”, 2025, 77(1), 53–66, DOI: 10.24423/aom.4599.
4. **PIV:** R. Wolny, T. Wiczenbach, L. Pachocki, A. Andrzejewska-Sroka, A. Sabik, B. Meronk, K. Daszkiewicz, M. Rucka, W. Witkowski, E. Spodnik, J.H. Spodnik, I. Krypets, P. Łuczkiewicz, K. Wilde, *Experimental evaluation and constitutive modelling of cervical spine ligaments under low and high strain rates*, „Scientific Reports”, 2025, 15, 40139, DOI: 10.1038/s41598-025-23918-8.
5. **PV:** R. Wolny, T. Wiczenbach, M. Rucka, W. Witkowski, J.H. Spodnik, E. Spodnik, L. Pachocki, *Exploring the mechanical behavior of the spinal dura mater: experimental insights and measurement dilemmas*, „Archives of Civil and Mechanical Engineering”, 2026, 26, 42, DOI: 10.1007/s43452-025-01395-0.

Publikacjami powiązanymi, rozwijającymi wyniki zasadniczego cyklu, są:

6. **PVI:** T. Wiczenbach, R. Wolny, A. Sabik, L. Pachocki, E. Spodnik, W. Witkowski, *Transversely isotropic hyperelastic laws for 2D FEM modeling of human thoracic spine ligaments*, „Scientific Reports”, 2025, 15, 39483, DOI: 10.1038/s41598-025-23016-9.
7. **PVII:** T. Wiczenbach, R. Wolny, D. Bruski, K. Daszkiewicz, W. Kolczyk, J.H. Spodnik, I. Krypets, L. Pachocki, *Mechanical properties of human spinal dura mater show rate dependency*, „Scientific Reports”, 2025, 15, 23511, DOI: 10.1038/s41598-025-08471-8.

Struktura części opisowej rozprawy

W części poprzedzającej syntezę publikacji Doktorant przedstawił główny problem badawczy, cele rozprawy oraz opracowane elementy metodyki eksperymentalnej. Jako dwa zasadnicze cele wskazał opracowanie spójnego protokołu badań mechanicznych tkanek miękkich kręgosłupa in vitro oraz pozyskanie danych materiałowych dla więzadeł i opony twardej, przeznaczonych do identyfikacji praw konstytutywnych i wykorzystania w modelowaniu numerycznym.

W rozdziale 3 Doktorant przedstawił kolejno pięć publikacji stanowiących zasadniczy cykl rozprawy. Każdą z nich omówił według podobnego schematu, obejmującego wprowadzenie do problemu, metodykę, najważniejsze wyniki oraz wnioski. Kolejny rozdział poświęcono charakterystyce wkładu autorskiego Doktoranta oraz określeniu znaczenia poszczególnych publikacji dla realizacji celów rozprawy. Zaprezentowano również chronologiczny przebieg prac, obejmujący przygotowanie infrastruktury badawczej, stopniowe dopracowywanie protokołu eksperymentalnego oraz zasadnicze badania tkanek.

Rozdział 5 zawiera bardziej szczegółowy opis rozwiązań metodycznych, które nie zostały w pełni przedstawione w załączonych artykułach. Doktorant opisał konstrukcję stanowiska do badań quasi-statycznych i dynamicznych, sposób korekcji przemieszczenia elementu obciążającego z uwzględnieniem podatności układu badawczego oraz procedurę kalibracji stanowiska w warunkach obciążeń dynamicznych.

Prezentowano także zagadnienie wyznaczania geometrii więzadeł, w tym próbę zastosowania prawa Archimedesesa do określania objętości tkanki i szacowania pola jej przekroju poprzecznego. Doktorant wskazał przy tym zarówno potencjalne zalety, jak i znaczną niepewność oraz ograniczoną powtarzalność własnej metody, co świadczy o dużej świadomości wyzwań jakie stoją przed badaczem w realizacji zadań eksperymentalnych. W rozdziale 6 przedstawiono podsumowanie rozprawy i perspektywy dalszych badań.

Omówienie publikacji stanowiących cykl naukowy:

Publikacja PI dotyczy wpływu słupa oświetleniowego ustawionego w strefie odkształcania bariery drogowej na jej działanie podczas zderzenia autobusu. Autorzy wykorzystali wyniki rzeczywistego testu zderzeniowego oraz opracowali model numeryczny tego zdarzenia. Porównanie wyników eksperymentalnych i symulacji wykazało, że obecność słupa zakłóciła działanie bariery, która nie zatrzymała autobusu ani nie przekierowała jego ruchu.

Chociaż publikacja stanowi wartościowe opracowanie z zakresu bezpieczeństwa drogowego i walidacji modeli zderzeniowych, nie odnosi się bezpośrednio do głównej tematyki rozprawy. Nie analizowano w niej odpowiedzi biomechanicznej człowieka ani zachowania jego tkanek pod wpływem obciążenia. Związek publikacji z rozprawą ma zatem charakter pośredni i wynika z ogólnego kontekstu urazów komunikacyjnych oraz doświadczenia Doktoranta w analizie i walidacji modeli numerycznych.

Stąd też uważam, że nie do końca uzasadnione jest wprowadzenie tego artykułu do cyklu naukowego rozprawy.

Publikacja PII stanowi pierwszą pracę bezpośrednio dotyczącą głównego problemu rozprawy. Analizie poddano 100 preparatów typu kość-więzadło-kość z odcinka piersiowego kręgosłupa, obejmujących więzadła podłużne przednie i tylne, więzadło żółte, więzadła torebkowe stawów międzywyrostkowych oraz kompleks więzadeł międzykolcowych i nadkolcowych. Próby jednoosiowego rozciągania prowadzono z prędkością odkształcenia $0,5 \text{ s}^{-1}$, w kontrolowanych warunkach temperatury i wilgotności. Wyznaczono siłę niszczącą i wydłużenie przy zniszczeniu oraz opracowano charakterystyki siła-wydłużenie, wyróżniając trzy typowe zakresy odpowiedzi mechanicznej więzadeł: początkowy (*toe region*), liniowy i przed-zniszczeniowy. Wykazano również istotne różnice pomiędzy poszczególnymi rodzajami więzadeł.

Sam podział charakterystyk na wymienione zakresy jest powszechnie stosowany w badaniach mechanicznych tkanek miękkich i nie stanowi istotnej nowości. Wartością pracy jest natomiast jego systematyczne zastosowanie do licznej grupy preparatów oraz opracowanie uśrednionych charakterystyk odpowiedzi mechanicznej słabo dotychczas scharakteryzowanych więzadeł piersiowych.

Uzyskane wyniki opisują przede wszystkim podstawową odpowiedź mechaniczną tkanek, ponieważ przedstawiono je jako zależności siła w funkcji wydłużenia, bez bezpośredniego wyznaczenia pola przekroju poprzecznego niezbędnego do obliczenia naprężenia. Dopiero w publikacji PVI analizę rozszerzono o zależności naprężenie nominalne-wydłużenie, wykorzystane do identyfikacji parametrów modeli konstytutywnych. Początkowe pole przekroju oszacowano jednak pośrednio, na podstawie zmierzonych długości więzadeł i zależności geometrycznych zaczerpniętych z literatury.

Wiarygodność uzyskanego opisu materiałowego zależy zatem od trafności przyjętych założeń, a brak bezpośredniego pomiaru przekroju badanych próbek pozostaje istotnym ograniczeniem.

Kolejna praca odbiega od głównych celów rozprawy, jednakże jej wyniki wykorzystane są w dalszych pracach badawczych i tak **publikacja PIII** dotyczy opracowania materiału służącego do osadzania próbek biologicznych w elementach mocujących. Zbadano warianty kompozytu na bazie żywicy PMMA o różnej zawartości piasku oraz materiał bez wypełniacza. Przeprowadzono próby jednoosiowego rozciągania z pomiarem odkształceń metodą cyfrowej korelacji obrazu (DIC), badania urabialności oraz analizy numeryczne. Dodatek piasku zwiększył wartość modułu Younga, lecz jednocześnie zmniejszył wytrzymałość na rozciąganie i odkształcenie przy zniszczeniu. Wariant o największej zawartości wypełniacza wykazał najwyższą sztywność przy zachowaniu akceptowalnej urabialności.

Praca ta nie dotyczy bezpośrednio właściwości tkanek miękkich, ale może być uznana za ważne ogniwo cyklu, odnoszące się do stabilnego mocowania próbek typu BLB (*bone–ligament–bone*).

Artykuł PIV przedstawia badania więzadeł odcinka szyjnego kręgosłupa przy różnych prędkościach odkształcenia 0,5 i 50 s⁻¹. Materiał pozyskano od siedmiu dawców w wieku 70–90 lat i obejmował on 15 więzadeł ALL, 17 PLL, 13 LF oraz 29 CL. Próbki przygotowano jako kompleksy BLB, dodatkowo wzmacniane i osadzone w mieszaninie żywicy Technovit 3040 z piaskiem (przygotowanej na podstawie badań zaprezentowanych w pracy PIII). Początkowe pole przekroju poprzecznego więzadeł oszacowano pośrednio na podstawie pomiarów długości wykonanych na zdjęciach oraz zależności między długością a polem przekroju (zależność zaczerpnięta z literatury). W pracy wykazano istotny wzrost sztywności i modułu sprężystości wraz ze zwiększeniem prędkości odkształcenia dla więzadeł PLL, LF i CL, natomiast dla ALL nie stwierdzono podobnego efektu. Dane przeliczono do postaci zależności naprężenie nominalne–wydłużenie i wykorzystano do identyfikacji parametrów poprzecznie izotropowego modelu lepko-hipersprężystego.

Publikacja łączy rozwiniętą metodykę eksperymentalną z charakterystyką mechaniczną tkanek i modelowaniem konstytutywnym, stanowiąc jedno z najważniejszych elementów rozprawy. Istotnym ograniczeniem jest natomiast brak bezpośredniego pomiaru pola przekroju badanych próbek, co wprowadza niepewność do wyznaczanych wartości naprężeń i modułu sprężystości. Pozostałe ograniczenia obejmują stosunkowo małe liczebności grup, jednoosiowy charakter badań oraz pozyskanie materiału biologicznego wyłącznie od osób starszych.

Kontynuacją prac badawczych nad właściwościami mechanicznymi tkanek miękkich kręgosłupa jest **publikacja PV**, która dotyczy właściwości mechanicznych opony twardej rdzenia kręgowego oraz wpływu procedury pomiarowej na wyznaczane parametry. Zbadano 108 próbek pobranych od siedmiu dawców, wyciętych w kierunku podłużnym i obwodowym. Porównano próbki pokryte wzorem umożliwiającym pomiar metodą cyfrowej korelacji obrazu, próbki niepokryte oraz preparaty poddane i niepoddane wcześniejszemu kondycjonowaniu. Przeprowadzone badania nie wykazały istotnego wpływu zastosowanego kondycjonowania na parametry mechaniczne, co jest istotnym wnioskiem dla prowadzenia tych złożonych badań. Stwierdzono natomiast, że naniesienie farby wymaganej do pomiaru DIC zwiększało wyznaczony wartość modułu sprężystości. Wielkość modułu określone na podstawie lokalnych odkształceń (DIC) były większe od wartości obliczonych z przemieszczenia trawersy. Po korekcie oszacowano moduł na około 283 MPa w kierunku podłużnym i 16 MPa w kierunku obwodowym, potwierdzając silną anizotropię opony.

Wyznaczono również tzw. pozorną funkcję Poissona, której wartości znacznie przekraczały 0,5. Interpretacja ta wymaga ostrożności, ponieważ nie uwzględnia bezpośrednio zmian grubości próbki. Wartością pracy jest przede wszystkim wykazanie dużej wrażliwości wyników na sposób przygotowania materiału badawczego i metodę pomiaru odkształcenia.

Publikacje powiązane - prace te stanowią bezpośrednie rozwinięcie wyników przedstawionych odpowiednio w publikacjach PII i PV, potwierdzając możliwość ich dalszego wykorzystania w identyfikacji parametrów modeli konstytutywnych więzadeł oraz opony twardej.

Publikacja PVI stanowi bezpośrednie rozwinięcie publikacji PII. Wykorzystano w niej dane eksperymentalne dotyczące więzadeł odcinka piersiowego kręgosłupa, przeliczając je do postaci zależności naprężenie nominalne w funkcji odkształcenia. Początkowe pola przekroju oszacowano pośrednio na podstawie zmierzonych długości więzadeł i zależności geometrycznych zaczerpniętych z literatury.

Porównano trzy poprzecznie izotropowe modele hipersprężyste, w których energię odkształcenia rozdzielono na udział macierzy i włókien. Odpowiedź macierzy opisano funkcjami Neo-Hooke'a, Mooneya–Rivlina lub Yeoha, natomiast udział włókien wielomianem czwartego stopnia. Modele zaimplementowano w programach Abaqus i LS-DYNA za pomocą podprogramów użytkownika, stosując elementy powłokowe. Wykazano, że model z funkcją Yeoha zapewnia najlepsze dopasowanie analityczne do uzyskanych danych eksperymentalnych, lecz w symulacjach krótkich więzadeł prowadził do nadmiernego usztywnienia poprzecznego i zawyżenia wartości sztywności całej próbki. Korzystniejszą zgodność z wynikami eksperymentalnymi uzyskano dla modeli z funkcjami Neo-Hooke'a i Mooneya–Rivlina.

Istotnym wnioskiem pracy jest wykazanie, że jakość dopasowania do krzywych eksperymentalnych nie stanowi wystarczającego kryterium oceny przydatności modelu w obliczeniach MES.

Publikacja PVII rozwija badania opony twardej o wpływ prędkości odkształcenia. Badania wykonano na 45 próbkach podłużnych pozyskanych od sześciu dawców, przy prędkościach 0,5, 10 i 25 s⁻¹. Zastosowano autorskie stanowisko oraz adapter analogiczny do wykorzystanego w publikacji PV. Wykazano wzrost modułu sprężystości z około 172 MPa przy 0,5 s⁻¹ do ponad 269 MPa przy 25 s⁻¹ oraz zaproponowano model lepko-hipersprężysty opisujący zależność odpowiedzi mechanicznej od prędkości obciążania. Istotnym ograniczeniem pracy jest to, że wszystkie próbki badane przy 10 s⁻¹ pochodziły od jednego dawcy i głównie z odcinka piersiowego, podczas gdy pozostałe grupy obejmowały materiał od różnych dawców. Efekt prędkości może być zatem częściowo powiązany z różnicami osobniczymi i miejscem pobrania próbek.

Aplikacyjny wymiar rozprawy podkreślają również zgłoszenie patentowe stanowiska do quasi-statycznych i dynamicznych badań rozciągania preparatów biologicznych (P.443948) oraz zgłoszenie wzoru użytkowego adaptera do formowania i mocowania próbek opony twardej (W.132878). Rozwiązania te wspierają przygotowanie materiału badawczego i prowadzenie eksperymentów na niewielkich preparatach tkankowych.

Przestawiony układ zasadniczego nurtu rozprawy, tj. od rozpoznania problemów metodycznych, przez rozwój infrastruktury i protokołu eksperymentalnego, po badania tkanek miękkich oraz opracowanie modeli konstytutywnych, stanowi logiczny ciąg postępowania badawczego.

Recenzowana rozprawa mieści się w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport, a podjętą w niej problematykę można zaliczyć do istotnego nurtu rozwoju współczesnej biomechaniki eksperymentalnej i obliczeniowej. Szczególne znaczenie ma ukierunkowanie badań na standaryzację metod wyznaczania właściwości mechanicznych

tkanek miękkich oraz przygotowanie wiarygodnych danych materiałowych do zastosowania w modelach numerycznych człowieka i analizach mechanizmów urazów kręgosłupa.

2. OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY

W przedstawionej do recenzji rozprawie Doktorant podjął problem eksperymentalnego wyznaczania właściwości mechanicznych więzadeł kręgosłupa oraz opony twardej, z uwzględnieniem możliwości wykorzystania uzyskanych danych w modelowaniu konstytutywnym i numerycznym. Wybór problematyki jest uzasadniony ograniczoną dostępnością danych dotyczących tych tkanek, szczególnie ich odpowiedzi na obciążenia dynamiczne, oraz trudnościami w porównywaniu wyników uzyskiwanych przy różnych procedurach badawczych.

Na podstawie analizy stanu wiedzy Doktorant sformułował dwa cele główne pracy:

1. *Opracowanie spójnego protokołu eksperymentalnego badań więzadeł kręgosłupa oraz opony twardej. Protokół obejmuje przygotowanie i mocowanie próbek, przebieg testu, pomiar geometrii i odkształcenia, przetwarzanie i analizę danych.*
2. *Pozyskanie danych materiałowych więzadeł i opony twardej kręgosłupa w postaci użytecznej do identyfikacji praw konstytutywnych i zastosowań w modelowaniu numerycznym.*

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy chciałabym zaliczyć:

- Opracowanie i konsekwentne stosowanie kompleksowej metodyki badań mechanicznych tkanek miękkich kręgosłupa, obejmującej przygotowanie, mocowanie i kondycjonowanie preparatów, kontrolę warunków środowiskowych, prowadzenie prób przy różnych prędkościach odkształcenia oraz ujednolicone przetwarzanie wyników. Na szczególne podkreślenie zasługuje zaprojektowanie i wykonanie stanowiska umożliwiającego prowadzenie quasi-statycznych i dynamicznych prób rozciągania niewielkich preparatów biologicznych.
- Pozyskanie i usystematyzowanie danych eksperymentalnych opisujących odpowiedź mechaniczną więzadeł odcinka piersiowego i szyjnego kręgosłupa oraz opony twardej, co ma szczególną wartość wobec nadal ograniczonej liczby danych dotyczących więzadeł piersiowych i dynamicznego obciążenia tkanek pochodzących od starszych dawców.
- Identyfikację parametrów modeli lepko-hipersprężystych opisujących nieliniową i zależną od prędkości odkształcenia odpowiedź więzadeł szyjnych oraz opony twardej. Powiązanie danych eksperymentalnych z modelowaniem konstytutywnym pozwoliło odwzorować charakterystyki badanych tkanek w analizowanym zakresie odkształceń. Wyznaczone zestawy parametrów stanowią podstawę do dalszego rozwijania modeli numerycznych kręgosłupa poddawanych obciążeniom dynamicznym.
- Ilościowe scharakteryzowanie anizotropii opony twardej oraz określenie wpływu procedury pomiarowej na wyznaczone właściwości mechaniczne. Wykazano istotnie różnice wartości modułu sprężystości i naprężenia przy zniszczeniu w zależności od kierunku pobrania materiału (podłużnym niż obwodowym). Stwierdzono również, że warstwa farby nanoszona na tkankę w trakcie do pomiarów metodą cyfrowej korelacji obrazu (DIC) zwiększa sztywność próbki, a lokalny pomiar odkształcenia prowadzi do

uzyskania wyższych wartości modułu Younga niż pomiar oparty na przemieszczeniu trawersy. Istotnym osiągnięciem metodycznym było opracowanie procedury ujednolicenia wyników poprzez korektę wpływu warstwy farby i zastosowanej metody pomiaru, przy uwzględnieniu niepewności związanej z tymi korektami.

- Wykazanie, że jakość dopasowania modelu konstytutywnego do danych eksperymentalnych nie jest wystarczającym kryterium jego przydatności w obliczeniach MES. Porównano trzy modele hipersprężyste więzadeł piersiowych. Stwierdzono, że model wykorzystujący funkcję Yeoha, mimo najlepszego dopasowania do krzywych eksperymentalnych, może prowadzić do zawyżenia przewidywanej sztywności krótkich próbek więzadeł w analizach numerycznych.
- Umiejętne wykorzystanie zróżnicowanych metod eksperymentalnych, metrologicznych, statystycznych i numerycznych do realizacji postawionych zadań badawczych oraz konsekwentne rozwijanie procedury badawczej na podstawie problemów identyfikowanych podczas kolejnych etapów badań.

Podsumowując, oceniana rozprawa wnosi istotny wkład poznawczy i metodyczny do badań biomechanicznych tkanek miękkich kręgosłupa oraz wykazuje potencjał aplikacyjny. Doktorant połączył rozwój procedur eksperymentalnych z charakterystyką odpowiedzi mechanicznej więzadeł i opony twardej oraz identyfikacją parametrów modeli konstytutywnych. Szczególną wartość stanowi rozpoznanie wpływu prędkości odkształcenia, kierunku obciążenia i techniki pomiarowej na uzyskiwane wyniki, a także wykazanie ograniczeń oceny modeli materiałowych wyłącznie na podstawie jakości dopasowania do danych eksperymentalnych. Praca wpisuje się w nurt badań ukierunkowanych na doskonalenie metod wyznaczania właściwości mechanicznych tkanek oraz zwiększanie wiarygodności ich opisu numerycznego. Uzyskane rezultaty mogą wspierać rozwój modeli kręgosłupa wykorzystywanych w analizach mechanizmów urazów, z uwzględnieniem warunków badań i specyfiki populacji dawców.

3. UWAGI KRYTYCZNE I DYSKUSYJNE

Chciałabym przedstawić pewne wątpliwości i uwagi krytyczne, które nasunęły mi się po zapoznaniu się z recenzowaną pracą. Najważniejsze z nich to:

1. Jako pierwszy cel rozprawy Doktorant wskazał opracowanie spójnego protokołu eksperymentalnego badań więzadeł kręgosłupa oraz opony twardej. Nie przedstawiono jednak tego protokołu w sposób całościowy, a opis metodyki pozostaje rozproszony w poszczególnych publikacjach, co utrudnia ocenę jego spójności i oryginalności. Należałoby przedstawić uporządkowany protokół obejmujący kolejne etapy badań, zastosowane metody i techniki oraz zasady przetwarzania wyników, ze wskazaniem elementów wspólnych i procedur dostosowanych do specyfiki badanych tkanek. Wyjaśnienia wymaga również, co stanowi o spójności zaproponowanego postępowania oraz które jego elementy są oryginalne w porównaniu z rozwiązaniami opisanymi w literaturze.
2. W analizie nie uwzględniono wpływu budowy strukturalnej więzadeł i opony twardej na ich odpowiedź mechaniczną. Nie przeprowadzono oceny orientacji i pofałdowania

włókien kolagenowych, zawartości elastyny, uwodnienia oraz stopnia zmian degeneracyjnych. Czynniki te mogą w znacznym stopniu wyjaśniać różnice pomiędzy rodzajami więzadeł, poziomami anatomicznymi i poszczególnymi dawcami. Jest to szczególnie istotne w przypadku materiału pochodzącego od osób starszych. W konsekwencji uzyskane zależności mają przede wszystkim charakter fenomenologiczny, bez bezpośredniego powiązania odpowiedzi mechanicznej z mikrostrukturą tkanki. Zasadne jest zatem pytanie, które elementy budowy wewnętrznej Doktorant uważa za najważniejsze dla wyjaśnienia obserwowanych różnic i w jaki sposób mogłyby one zostać uwzględnione w dalszych badaniach?

3. Badany materiał tkankowy więzadeł jak i opony twardej pochodził od dość ograniczonej liczby dawców, szczególnie w pracy PII, gdzie 100 preparatów pobrano jedynie od czterech osób. Większa liczba próbek nie jest w takim przypadku równoważna większej liczbie niezależnych obserwacji, ponieważ wiele preparatów pochodziło od tego samego dawcy.
Zastosowane analizy statystyczne nie uwzględniały w pełni hierarchicznej struktury danych, w której próbki są zagnieżdżone w obrębie dawcy i poziomu anatomicznego. Może to prowadzić do zawyżenia efektywnej liczebności próby oraz istotności statystycznej części porównań. Zasadne byłoby zastosowanie modeli mieszanych z dawcą jako efektem losowym. Wyjaśnienia wymaga również, w jaki sposób zależność pomiędzy próbkami pochodzącymi od tego samego dawcy mogła wpłynąć na przedstawione wnioski.
4. W rozprawie Doktorant przedstawił zagadnienie wyznaczania geometrii więzadeł, w tym próbę zastosowania metody wypornościowej opartej na prawie Archimedesesa. Zaletą tego podejścia jest brak konieczności przyjmowania regularnego kształtu przekroju oraz wyeliminowanie miejscowego ściskania tkanki występującego podczas pomiarów suwmiarką lub śrubą mikrometryczną. Metoda ta pozwala jednak wyznaczyć jedynie uśrednione pole przekroju, bez informacji o jego lokalnych zmianach, istotnych dla obliczania naprężeń i interpretacji miejsca zniszczenia próbki. Wynik pomiaru może ponadto zależeć od sposobu wyodrębnienia badanego fragmentu, obecności tkanek towarzyszących oraz stopnia uwodnienia tkanki. W jaki sposób Doktorant kontrolował wpływ tych czynników na uzyskiwane wyniki oraz czy przeprowadził walidację zaproponowanej metody z wykorzystaniem niezależnej metody referencyjnej?
5. W publikacji PV wysokie wartości pozornej funkcji Poissona zinterpretowano jako przesłankę występowania zmian objętości opony twardej i zakwestionowania założenia o jej bliskiej nieściśliwości. Na jakiej podstawie sformułowano taki wniosek, skoro metodą DIC mierzono odkształcenia jedynie w dwóch kierunkach leżących w płaszczyźnie próbki, bez pomiaru zmiany jej grubości, niezbędnego do wyznaczenia zmiany objętości? Proszę również wyjaśnić, w jaki sposób korekcja modułu sprężystości o wpływ powłoki „malarskiej” doprowadziła do zmiany wartości funkcji Poissona, skoro została ona zdefiniowana wyłącznie na podstawie rozciągnięć podłużnego i poprzecznego.
6. Przyjęta metodyka badawcza opierała się przede wszystkim na próbach jednoosiowego rozciągania, podczas gdy w warunkach fizjologicznych więzadła i opona twarda pracują

w złożonych, wieloosiowych stanach obciążenia. W jakim zakresie wyznaczone parametry materiałowe mogą być stosowane do opisu zachowania więzadeł i opony twardej w warunkach fizjologicznych oraz jakie dodatkowe badania należałoby przeprowadzić do ich weryfikacji?

7. Większość dawców stanowiły osoby starsze, w wieku około 70-90 lat. Uzyskane parametry materiałowe odnoszą się więc przede wszystkim do tej grupy wiekowej. Ich zastosowanie w modelach osób młodszych, zwłaszcza w analizach urazów komunikacyjnych i sportowych, wymaga uzasadnienia, ponieważ wiek wpływa na strukturę kolagenu, uwodnienie czy sprężystość. W jaki sposób wyniki uzyskane dla tkanek wykazujących zmiany związane ze starzeniem, a potencjalnie również zmiany zwyrodnieniowe, można odnieść do osób młodych? Jakie przesłanki uzasadniają wykorzystanie tych parametrów w modelach ich tkanek?

Przedstawione uwagi w niczym nie umniejszają pozytywnej oceny merytorycznej recenzowanej rozprawy doktorskiej.

4. WNIOSEK KOŃCOWY

Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Radosława Wolnego pt.: „Badania eksperymentalne właściwości materiałowych tkanek miękkich kręgosłupa” stanowi wartościowe opracowanie naukowe, wnoszące istotny wkład poznawczy i metodyczny do biomechaniki eksperymentalnej. Doktorant opracował i zastosował metodykę badań mechanicznych więzadeł kręgosłupa oraz opony twardej, a uzyskane dane eksperymentalne wykorzystał do identyfikacji parametrów modeli konstytutywnych. Szczególną wartość rozprawy stanowi analiza wpływu procedur pomiarowych na wyznaczane właściwości mechaniczne tkanek oraz ocena przydatności modeli materiałowych w obliczeniach numerycznych.

Przedstawione osiągnięcia potwierdzają umiejętność Doktoranta w rozwiązywaniu złożonych problemów badawczych, projektowania eksperymentów oraz stosowania metod pomiarowych, analitycznych i numerycznych. Uzyskane rezultaty mogą stanowić podstawę dalszego rozwoju modeli biomechanicznych kręgosłupa, szczególnie w odniesieniu do odpowiedzi tkanek osób starszych na obciążenia dynamiczne.

Biorąc pod uwagę przedstawiony do zaopiniowania materiał, wagę podjętego zagadnienia oraz potwierdzone kompetencje badawcze Pana mgr. inż. Radosława Wolnego, uważam, że przedłożona rozprawa może stanowić podstawę do rozpatrzenia wniosku o nadanie Doktorantowi stopnia doktora w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport. Wobec spełnienia wymogów określonych w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz.U. 2024 poz. 1571, z późn. zm.) wnoszę o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony opiniowanej rozprawy.