

Zabrze, 04.09.2026 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Radosława Wolnego pod tytułem
Badania eksperymentalne właściwości materiałowych tkanek miękkich kręgosłupa

1. Przedmiot rozprawy

Formalną podstawę opracowania stanowi uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Gdańskiej nr 40/2026 z dnia 17 czerwca 2026 r. przedstawiona w piśmie nr I.dz.571/WILiŚ/2026 z dn. 30.06.2026 r., otrzymanym dnia 09.07.2026 r. Recenzję przeprowadzono w oparciu o wymagania, które zostały określone w art. 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. - p.s.w.n. (Dz. U. 2024 r. poz. 1571 ze zm.). Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska mgr. inż. Radosława Wolnego pt. *Badania eksperymentalne właściwości materiałowych tkanek miękkich kręgosłupa*, której promotorem jest prof. dr hab. inż. Wojciech Witkowski, a promotorem pomocniczym dr inż. Angela Andrzejewska-Sroka. Rozprawa doktorska ma formę tematycznie spójnego zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopiśmie naukowych zgodnie z ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (art. 13 ust. 2).

Zagadnienia poruszane w niniejszym cyklu prac obejmują badania doświadczalne dotyczące wyznaczania właściwości mechanicznych tkanek miękkich kręgosłupa w warunkach *in vitro*. Badania koncentrują się na odpowiedzi mechanicznej więzadeł kręgosłupa i opony twardej otaczającej rdzeń kręgowy człowieka, z uwzględnieniem nieliniowości, anizotropii oraz wpływu prędkości odkształcenia, w formie przydatnej do identyfikacji praw konstytutywnych i zastosowań w modelowaniu numerycznym. W ramach pracy omówiono stosowane metody badań właściwości mechanicznych tkanek miękkich i dokonano ich ujednolicenia, co umożliwiło opracowanie własnej/autorskiej metody badań tkanek obejmującej jednoosiowe próby wytrzymałościowe przy obciążeniach quasi-statycznych i dynamicznych. Zwaliowana procedura badawcza, w tym autorskie rozwiązania badania próbek, umożliwiła uzyskanie właściwości materiałowych tkanek miękkich kręgosłupa, więzadeł i opony twardej, które stanowią cenne dane do budowy i kalibracji realistycznych modeli ciała człowieka.

Uważam, że tematyka rozprawy doktorskiej jest ważna i aktualna, gdyż poruszane są w niej zagadnienia dotyczące do końca niezbadanych właściwości mechanicznych tkanek w organizmie, mających bezpośrednie implikacje praktyczne w modelowaniu ciała człowieka. Praca uzupełnia badania doświadczalne tkanek ludzkich skupiające się na ich właściwościach mechanicznych, dostarczając zestawy danych materiałowych więzadeł i opony twardej kręgosłupa. Opracowane właściwości mechaniczne tkanek miękkich kręgosłupa mają duże znaczenie w modelowaniu ciała człowieka. Wciąż brakuje modeli ciała człowieka (Human Body Models - HBM), które umożliwiałyby wiarygodną symulację i analizę mechanizmów powstawania urazów podczas zdarzeń drogowych. Rezultaty mogą znaleźć zastosowanie w modelowaniu numerycznym i rozwoju HBM, a także przyczynić się do ujednolicenia identyfikacji praw konstytutywnych oraz właściwości biomechanicznych tkanek. Również ze względu na walory naukowo-aplikacyjne opracowania, które stanowi źródło niezwykle istotnej i przydatnej wiedzy o mechanizmach powstawania urazów podczas zdarzeń drogowych, stwierdzam, że rozprawa ta mieści się w obszarze naukowym dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport.

2. Charakterystyka rozprawy (cyklu publikacji)

W celu ubiegania się o stopień naukowy doktora w dyscyplinie naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport mgr inż. Radosław Wolny przedstawił, zgodnie z ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (art. 13 ust. 2), rozprawę doktorską w postaci tematycznie spójnego zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopiśmie naukowych. Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych obejmuje siedem artykułów:

[I] **Wolny R.**, Bruski D., Budzyński M., Pachocki L., Wilde K.: Influence of a Lighting Column in the Working Width of a W-Beam Barrier on TB51 Crash Test. *Materials* 2022, 15, 4926. <https://doi.org/10.3390/ma15144926>

[II] **Wolny R.**, Wiczenbach T., Andrzejewska A.J., Spodnik J.H.: Mechanical response of human thoracic spine ligaments under quasi-static loading: An experimental study, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Volume 151, 2024, 106404, ISSN 1751-6161, <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2024.106404>.

[III] **Wolny R.**, Wiczenbach T., Pachocki L., Wilde K., Rucka M.: The role of sand filler in enhancing the mechanical properties of polymethylmethacrylate composites, *Arch. Mech.* 77 (1), 53–66, 2025, DOI: 10.24423/aom.4599.

[IV] **Wolny R.**, Wiczenbach T., Pachocki L. et al. Experimental evaluation and constitutive modelling of cervical spine ligaments under low and high strain rates. *Sci Rep* 15, 40139 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-23918-8>.

[V] **Wolny R.**, Wiczenbach T., Rucka M. et al. Exploring the mechanical behavior of the spinal dura mater: experimental insights and measurement dilemmas. *Arch. Civ. Mech. Eng.* 26, 42 (2026). <https://doi.org/10.1007/s43452-025-01395-0>.

[VI] Wiczenbach T., **Wolny R.**, Sabik A., Pachocki Ł., Spodnik E., Witkowski W.: Transversely isotropic hyperelastic laws for 2D FEM modeling of human thoracic spine ligaments. *Sci Rep* 15, 39483 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-23016-9>.

[VII] Wiczenbach T., **Wolny R.**, Bruski D. et al., Mechanical properties of human spinal dura mater show rate dependency. *Sci Rep* 15, 23511 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08471-8>.

Z przedłożonymi osiągnięciami naukowymi łączą się również osiągnięcia projektowo-konstrukcyjne oraz technologiczne. Doktorant jest współautorem czterech zgłoszeń patentowych:

[P1] - Układ do pomiaru i sposób pomiaru wytrzymałości i/lub ruchomości łańcuchów biokinematycznych do odwzorowania rzeczywistej pracy fragmentów łańcucha biokinematycznego (zgłoszenie P.444805, 2023-05-09).

[P2] - Układ i sposób do pomiaru wytrzymałości i/lub ruchomości łańcuchów biokinematycznych do odwzorowania rzeczywistej pracy fragmentów łańcucha biokinematycznego (zgłoszenie P.443947, 2023-03-02).

[P3] – Uchwyt do mocowania próbek biologicznych, zwłaszcza próbek tkanek miękkich do badań wytrzymałościowych (zgłoszenie W. 132878, 2025-07-08).

[P4] – Układ do pomiaru i sposób pomiaru wytrzymałości i/lub ruchomości łańcuchów biokinematycznych do odwzorowania rzeczywistej pracy fragmentów łańcucha biokinematycznego (zgłoszenie P.443948, nr prawa wyłącznego Pat.248467, 2025-11-07).

Przedstawione do oceny osiągnięcia naukowe doktoranta dotyczą eksperymentalnych badań mechanicznych właściwości tkanek miękkich kręgosłupa, przede wszystkim więzadeł i opony twardej. Wybór doktoranta obszaru badawczego i ukierunkowanie w nim swojego rozwoju naukowego uważam za uzasadnione, gdyż stanowią one podstawę budowy realistycznych modeli mechanicznych tkanek, umożliwiających analizę mechanizmów powstawania urazów podczas zdarzeń drogowych. Rozprawa doktorska posiada formę cyklu powiązanych artykułów i składa się z 5 artykułów o autorstwie wiodącym oraz 2 publikacji powiązanych, w których kandydat był drugim autorem. W związku z tym,

w dalszej części recenzji dokonano oceny poszczególnych osiągnięć naukowych doktoranta, z uwzględnieniem jego wkładu autorskiego.

Każda publikacja ma unikalny profil badawczy. Pierwsza z nich [I] (*Influence of a Lighting Column in the Working Width of a W-Beam Barrier on TB51 Crash Test*) stanowi praktyczne wprowadzenie doktoranta w problematykę bezpieczeństwa ruchu drogowego i walidacji numerycznej. Wykazano w niej, że wskaźniki normowe (np. ASI, THIV), bazujące wyłącznie na akcelerometrach pojazdu, są niewystarczające do pełnej oceny biomechanicznego bezpieczeństwa człowieka, co uzasadniło potrzebę przejścia do modelowania numerycznego tkanek miękkich człowieka (modele HBM). Wkład i udział doktoranta (80%) przy jej powstaniu są największe. Doktorant odpowiadał za opracowanie i analizę surowych danych eksperymentalnych i numerycznych, przygotowanie wyników do interpretacji, sformułowanie wniosków oraz przygotowanie całego manuskryptu do publikacji.

Publikacja [II] (*Mechanical response of human thoracic spine ligaments under quasi-static loading: An experimental study*), w mojej ocenie, jest fundamentalną pracą całego cyklu. Dostarcza ona uporządkowanych danych dla pięciu typów więzadeł odcinka piersiowego kręgosłupa ludzkiego i wprowadza sprawdzony, odtwarzalny protokół badań *in vitro*. Wkład doktoranta jest znaczący (45%), gdyż brał udział w opracowaniu i zaplanowaniu metodologii, a także współtworzył stanowisko badawcze oraz system mocowania próbek w technologii druku 3D. Ponadto doktorant realizował eksperymenty *in vitro* i przetwarzał surowe dane autorską procedurą uśredniania krzywych opartą na punktach przejścia oraz redagował tekst i grafiki artykułu.

Podobną rolę doktorant również odgrywał w powstaniu publikacji [III] (*The role of sand filler in enhancing the mechanical properties of polymethylmethacrylate composites*). Jego wkład pracy o charakterze inżyneryjno-technologicznym przyczynił się do modyfikacji kompozytu PMMA poprzez dodanie piasku normowego, co zwiększyło moduł Younga żywicy mocującej, poprawiło stabilność osadzenia próbek biologicznych w maszynie i znacząco obniżyło koszty badań.

Moim zdaniem wiodącą publikacją w całym cyklu jest publikacja [IV] (*Experimental evaluation and constitutive modelling of cervical spine ligaments under low and high strain rates*). Przedstawiono w niej ustandaryzowany protokół badań eksperymentalnych więzadeł odcinka szyjnego kręgosłupa. Wykazano statystycznie istotną zależność właściwości mechanicznych (sztywności i modułu sprężystości) od prędkości odkształcenia ($0,5 \text{ s}^{-1}$ vs 50 s^{-1}) dla więzadeł PLL, LF i CL. Doktorant brał udział w planowaniu i opracowaniu metodologii eksperymentu, uczestniczył w testach, interpretacji i analizie danych, formułowaniu praw konstytutywnych, a także w pracach koncepcyjno-konsultacyjnych.

Kolejną publikacją o wysokiej wartości metrologicznej jest publikacja [V] (*Exploring the mechanical behavior of the spinal dura mater: experimental insights and measurement dilemmas*). Doktorant miał znaczny wkład (33%) w jej powstanie. Brał udział w opracowaniu metodologii i planowaniu badań, a także w zaprojektowaniu autorskiego adaptera do mocowania i formowania próbek (zgłoszonego jako wzór użytkowy W.132878). Uczestniczył w testach rozciągania (108 próbek) oraz w obliczeniach statystycznych uzyskanych danych. Doktorant również szczegółowo przeanalizował tzw. „dylematy pomiarowe”, udowadniając wpływ nanoszenia farbą stochastycznych wzorów plamek (spekli) na pomiar odkształceń metodą DIC i wyznaczany moduł sprężystości opony twardej. W pracy wykazano silną anizotropię opony twardej i podważono uproszczone założenie o jej nieściśliwości poprzez wyznaczenie współczynnika Poissona.

Pomimo, że główny cykl publikacji doktoranta składa się z 5 artykułów o wiodącym jego autorstwie (pierwszy autor), to dwie publikacje powiązane również uważam za równie ważne/istotne, choć w nich doktorant był drugim autorem. Publikacja [VI] (*Transversely isotropic hyperelastic laws for 2D FEM modeling of human thoracic spine ligaments*) stanowi bezpośrednie rozwinięcie i matematyczne ujęcie wyników przedstawionych w publikacji [II]. Pozwoliło to na sformułowanie modelu hipersprężystego materiału poprzecznie izotropowego dla więzadeł odcinka piersiowego kręgosłupa i jego walidację MES w środowiskach Abaqus i LS-Dyna. Rolą doktoranta było przygotowanie próbek, analiza surowych danych eksperymentalnych i ich dostosowanie do identyfikacji parametrów konstytutywnych.

Natomiast publikacja [VII] (*Mechanical properties of human spinal dura mater show rate dependency*) stanowi dopełnienie badań nad oponą twardą kręgosłupa. Wykazano w niej wrażliwość opony twardej na prędkość odkształcenia ($0,5 \text{ s}^{-1}$, 10 s^{-1} , 25 s^{-1}), również zaproponowano oraz zwalidowano lepko-hipersprężyste prawo konstytutywne opisujące właściwości tych tkanek. Także w tym przypadku doktorant odgrywał ważną rolę. Współtworzył plan badań eksperymentalnych, brał udział w realizacji testów dynamicznych z wykorzystaniem autorskiej infrastruktury badawczej.

Niezwykle mocną stroną osiągnięć doktoranta jest wymierny wkład w rozwój aparatury badawczej, potwierdzony ochroną własności intelektualnej. Doktorant zaprojektował urządzenie do pomiaru wytrzymałości i/lub ruchomości łańcuchów biokinematycznych [P4], osobiście je zbudował, a następnie iteracyjnie testował i walidował. Maszyna ta stała się kluczowym elementem stanowiska badawczego i umożliwiła realizację testów/badań prezentowanych w publikacjach [II], [IV] oraz [VII]. Doktorant współtworzył koncepcję i zaprojektował adaptory, które z powodzeniem zastosowano do mocowania delikatnych próbek opony twardej, zaprezentowane w Publikacjach [V] i [VII]. Rozwiązanie to zostało zastrzeżone wzorem użytkowym [P3] pn. *Uchwyt do mocowania próbek biologicznych, zwłaszcza próbek tkanek miękkich do badań wytrzymałościowych*. Ponadto, doktorant jest współtwórcą zgłoszeń patentowych [P1] oraz [P2]. Zaprojektował i zbudował urządzenia do badań ruchomości (Range of Motion – ROM) odcinka szyjnego kręgosłupa w płaszczyznach strzałkowej i poprzecznej, co pozwoliło na zainicjowanie badań walidacyjnych dla modeli HBM. Ponadto, Radosław Wolny wykazał się dużą aktywnością w realizacji i popularyzacji badań naukowych. Brał aktywny udział w roli wykonawcy w projekcie NCN OPUS (UMO-2020/37/B/ST8/03231) dotyczącym modelowania zniszczenia kręgosłupa szyjnego. Jako wykonawca w projekcie IDUB ARGENTUM (27/1/2022/IDUB/13b/Ag) brał udział w pracach nad sformułowaniem anizotropowego modelu opony twardej. Natomiast uzyskanie prestiżowego grantu badawczego w roli kierownika projektu NCN PRELUDIUM (UMO-2025/57/N/ST8/02862) pt. *Opona twarda poddana cyklicznym obciążeniom - opracowanie modelu reologicznego DURA-FORM*, stanowi wybitne i rzadko spotykane osiągnięcie, świadczące o dużej samodzielności naukowej doktoranta. Oprócz tego, doktorant uczestniczył w kilku konferencjach naukowych, podczas których prezentował wyniki realizowanych badań. Udział w prestiżowej, międzynarodowej konferencji *XI International Conference On Computational Bioengineering* potwierdza globalny zasięg i rozpoznawalność prowadzonych przez niego badań. Również uzyskanie nagrody za drugie najlepsze wystąpienie podczas *XVI Kopernikańskiego Seminarium Doktoranckiego*, w sekcji nauk fizycznych i technicznych, dowodzi jego umiejętności prezentacji i wysokiej oceny jego badań przez środowisko naukowe.

Biorąc powyższe pod uwagę, a także charakter badań oraz analizowane w nich zagadnienia dotyczące właściwości materiałowych tkanek miękkich kręgosłupa, uważam, że mieszczą się one w obszarze naukowym, który wpisuje się w dyscyplinę inżynieria lądowa, geodezja i transport. Osiągnięcia naukowe mgr. inż. Radosława Wolnego stanowią ponadprzeciętny dorobek naukowy, co potwierdza wysoka jakość prac opublikowanych w prestiżowych czasopismach często z wiodącym wkładem autorskim. Ponadto, opracowane autorskie metody i urządzenia umożliwiające przeprowadzenie badań właściwości mechanicznych tkanek biologicznych stanowiły istotę zgłoszeń patentowych i wzorów użytkowych, dzięki czemu metody podstawowych badań naukowych zyskały znaczenie użytkowe i osiągnęły wymiar aplikacyjny. Uwzględnienie jeszcze jego aktywności popularyzatorskiej stawia go w rzędzie wybitnie obiecujących młodych naukowców.

Stwierdzam również, że praca doktorska mgr. inż. Radosława Wolnego przedstawiona w tematycznie powiązanych artykułach naukowych pod wspólnym tytułem: „*Badania eksperymentalne właściwości materiałowych tkanek miękkich kręgosłupa*”, charakteryzuje się wysokim poziomem merytorycznym i spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. art. 187 ust. 3 – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity Dz. U. z 2024 r. poz. 1571 z późn. zm.), które może stanowić zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych. Tym samym, w zupełności został spełniony wymóg ustawowy niezbędny do uzyskania stopnia doktora.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy obejmującej cykl monotematycznych publikacji naukowych można zauważyć, że przewodnim tematem są badania doświadczalne/eksperymentalne właściwości materiałowe tkanek miękkich kręgosłupa. Przedstawione przez doktoranta główne cele do realizacji:

- C1 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.
- C2: pozyskanie danych materiałowych więzadeł i opony twardej kręgosłupa w postaci użytecznej do identyfikacji praw konstytutywnych i zastosowań w modelowaniu numerycznym.

uwzględniłem za słuszne i uzasadnione, bo w pełni oddają przedmiot rozprawy, którym było opracowanie i ujednolicenie metodyki badań mechanicznych tkanek miękkich kręgosłupa w warunkach *in vitro*, uwzględniając protokoły testów, przygotowanie i mocowanie próbek, przebieg testu, pomiar geometrii i odkształcenia oraz przetwarzanie i analizę danych. Ponadto, wyznaczone eksperymentalnie odpowiedzi mechaniczne więzadeł kręgosłupa i opony twardej otaczającej rdzeń kręgowy człowieka, z uwzględnieniem nieliniowości, anizotropii oraz wpływu prędkości odkształcenia, posłużyły do identyfikacji praw konstytutywnych i zastosowań w modelowaniu numerycznym. Uważam jednak, że można było oba cele zawrzeć w jednym: *opracowanie spójnego protokołu eksperymentalnego badań więzadeł kręgosłupa oraz opony twardej do identyfikacji praw konstytutywnych i zastosowań w modelowaniu numerycznym*, który obejmowałby wszystkie zagadnienia, począwszy od opracowania protokołu badań, ich realizacji, aż do sformułowania praw konstytutywnych i modeli. Jednakże zaprezentowany plan badawczy w pełni koreluje z wytyczonymi celami, co przełożyło się na poprawne organizowanie pracy naukowej oraz efektywne wykorzystanie narzędzi.

Doktorant przeprowadził szeroki przegląd literatury dotyczącej bezpieczeństwa ruchu drogowego. Na tej podstawie zauważył, że mimo stałego rozwoju systemów ochrony wypadki drogowe wciąż generują dużą liczbę ofiar śmiertelnych i ciężkich obrażeń. Podkreślił przy tym, że kluczowe znaczenie odgrywa doskonalenie modeli ciała człowieka (HBM), takich jak THUMS czy VIVA+. W te spostrzeżenia wpisują się założenia i cele rozprawy, która podejmuje istotny problem braku spójnych i porównywalnych danych eksperymentalnych. Dane te są niezbędne do kalibracji realistycznych modeli mechanicznych tkanek kręgosłupa. W tym kontekście badania przedstawione w rozprawie mają kluczowe znaczenie dla poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego, koncentrując się na dwóch głównych płaszczyznach: doskonaleniu komputerowych modeli ciała człowieka oraz analizie interakcji pojazdów z infrastrukturą drogową. Dodatkowo badania pozwalają lepiej zrozumieć biomechanikę opony twardej i więzadeł, co jest kluczowe dla przewidywania ryzyka uszkodzenia rdzenia kręgowego w sytuacjach ekstremalnych.

Rozprawa dostarcza unikatowych parametrów mechanicznych (siły zniszczenia, sztywności, nieliniowości) dla więzadeł i opony twardej kręgosłupa. Zaprezentowane badania wyróżniają się rzadko spotykaną w literaturze liczebnością próbek obejmujących łącznie aż 590 próbek więzadeł kręgosłupa piersiowego i szyjnego oraz 270 próbek opony twardej. Eksperymenty dostarczyły precyzyjnych danych charakteryzujących zachowanie badanych struktur. Wyznaczono krzywe siła-wydłużenie dla pięciu więzadeł piersiowych i szyjnych (ALL, PLL, CL, LF, ISL+SSL). Wykazano, że tkanki kręgosłupa reagują inaczej przy gwałtownych obciążeniach dynamicznych (typowych dla wypadków) niż w warunkach statycznych. Przykładowo, wyższe prędkości odkształcenia/deformacji (50 s^{-1}) powodują drastyczny wzrost sztywności i modułu sprężystości więzadeł PLL (o ok. 86%) oraz LF (o ok. 75%). Wykazano wzrost modułu opony twardej z $\sim 172 \text{ MPa}$ przy prędkości odkształcenia $0,5 \text{ s}^{-1}$ do $\sim 269 \text{ MPa}$ przy prędkości 25 s^{-1} . Udowodniono również, że opona twarda wykazuje skrajną anizotropię – jej moduł sprężystości w kierunku podłużnym wynosi średnio $\sim 283 \text{ MPa}$, podczas gdy

w kierunku poprzecznym zaledwie ~ 16 MPa. Ponadto, wyznaczono pozorną funkcję Poissona (apparent Poisson function), co podważa powszechnie stosowane w symulacjach uproszczone założenie o nieściśliwości opony twardej.

Część badań bezpośrednio dotyczy infrastruktury, co ma fundamentalne znaczenie dla optymalizacji drogowych systemów ochronnych. Wpływ przeszkód w szerokości pracującej barier, jak umieszczenie słupa oświetleniowego zbyt blisko bariery energochłonnej może doprowadzić do jej wadliwego działania. W badaniach zderzeniowych z autobusem udowodniono, że słup może uniemożliwić prawidłowe wypięcie się prowadnicy bariery, co powoduje jej dociśnięcie do ziemi i stworzenie rampy, po której pojazd forsuje zabezpieczenie zamiast zostać zatrzymanym. Badania te podkreślają, że dwa systemy bezpieczeństwa (bariera i słup), które są bezpieczne osobno, mogą tworzyć śmiertelne zagrożenie, gdy są zainstalowane w niewłaściwy sposób.

Przedstawione w pracy doktoranta wyniki badań stanowią bazę do projektowania bezpieczniejszych pojazdów, systemów ochrony oraz inteligentniejszej infrastruktury drogowej, która realnie chroni uczestników ruchu przed skutkami wypadków. Wyróżniającymi i najważniejszymi elementami tej pracy są w istocie opracowanie i ujednolicenie spójnego, odtwarzalnego protokołu eksperymentalnego dla badań *in vitro* tkanek biologicznych oraz identyfikacja i formułowanie praw konstytutywnych ich właściwości materiałowych. Kluczowym osiągnięciem doktoranta było stworzenie autorskiego, unikalnego warsztatu badawczego rozwiązującego dotychczasowe problemy metrologiczne opisywane w literaturze. Opracował specjalistyczną maszynę wytrzymałościową do prób rozciągania quasi-statycznego oraz dynamicznego, wyposażoną w autorską komorę pozwalającą na prowadzenie testów w warunkach zbliżonych do panujących *in vivo*. Ponadto przygotował i zwalidował autorską metodykę przygotowywania i mocowania próbek biologicznych (typu *bone-ligament-bone*). Jego autorskie rozwiązania (zbrojenia i adaptery) umożliwiają wyeliminowanie poślizgu w uchwytach i pęknięcia kości, a także skracają czas i obniżają koszty badań.

Podsumowując, doktorant zrealizował założone cele naukowe oraz sformułował przekonujące spostrzeżenia i wnioski, które poparł uzyskanymi wynikami przedstawionymi w przedłożonych publikacjach. W rozprawie wskazano możliwość praktycznego zastosowania wyników do tworzenia modeli ciała człowieka. Doktorant również zauważa potrzebę prowadzenia dalszych badań eksperymentalnych i modelowych więzadeł i opony twardej kręgosłupa. W tym kontekście doktorant rozważa interdyscyplinarne/holistyczne podejście do identyfikacji zjawisk i mechanicznej odpowiedzi tych struktur biologicznych na dynamiczne obciążenia celem osiągnięcia wiarygodniejszych, bardziej realistycznych wyników.

4. Uwagi szczegółowe i krytyczne

Analizując cykl siedmiu publikacji stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej mgr. inż. Radosława Wolnego można wskazać kilka słabych stron oraz wyzwań badawczych, szczególnie w kontekście spójności tematycznej i metodologicznej całego zbioru. Najpoważniejszym zarzutem jest niespójność tematyczna i niejednorodność badań we wszystkich publikacjach. Artykuł [I] dotyczy testów zderzeniowych bariery drogowej ze słupem oświetleniowym w skali makro, podczas gdy sześć pozostałych publikacji koncentruje się na biomechanice tkanek (badania laboratoryjne *in vitro*, identyfikacja modeli konstytutywnych). Artykuł o infrastrukturze drogowej wydaje się tematycznie odległy. Choć Autor łączy go z bezpieczeństwem ruchu drogowego, w cyklu brakuje „ogniwa spajającego” – publikacji, w której dokonano by przeglądu modeli HBM, a parametry wyznaczone dla tkanek (artykuły [III], [IV], [V] i [VII]) zostałyby bezpośrednio zaimplementowane w modelu HBM użytego w teście zderzeniowym. Na podstawie wnikliwej analizy treści artykułów zauważyłem, że występują pewne kwestie wymagające dyskusji i wyjaśnienia, które nie zostały uwzględnione w procesie publikacyjnym poszczególnych artykułów, ze względu na częściowe prezentowanie w nich badań ujętych cyklem publikacji.

Wszystkie badania eksperymentalne na tkankach ludzkich (ligamenty i opona twarda) zostały przeprowadzone na próbkach pobranych od osób w wieku od 70 do 90 lat. Tkanki osób starszych wykazują inne właściwości (zmiany degeneracyjne, mniejsza zawartość wody), niż tkanki osób młodszych, stąd wyniki mają ograniczoną uniwersalność. Choć doktorant uzasadnia to potrzebą ochrony „starszych uczestników ruchu”, brak grupy porównawczej (osób młodych) uniemożliwia stworzenie kompleksowego profilu biomechanicznego struktur kręgosłupa dla ogółu populacji. Również występuje brak zapewnienia równowagi płci w badaniach opony twardej (artykuł [V]). Widoczna znaczna dysproporcja w liczbie próbek pobranych od kobiet i mężczyzn (81 próbek od kobiet vs 27 od mężczyzn) może wpływać na wiarygodność wniosków biomechanicznych badań kręgosłupa dotyczących różnic międzypłciowych. Ponadto, pominięcie szczegółowej analizy geometrycznej przekroju poprzecznego (cross-section) więzadeł piersiowych w początkowych badaniach (artykuł [II]) utrudnia pełne zrozumienie relacji naprężenie-odkształcenie. Choć ta słabość została zauważona przez doktoranta i częściowo naprawiona w późniejszych artykułach cyklu (zastosowanie metod CAD i DIC), to powoduje pewną niespójność metodologiczną wewnątrz całego przewodu doktorskiego.

Wszystkie testy mechaniczne tkanek miękkich ograniczono do jednoosiowego rozciągania (uproszczony stan obciążenia). W rzeczywistych warunkach wypadku drogowego kręgosłup i opona twarda podlegają złożonym stanom obciążeń: skręcaniu, zginaniu i ścinaniu. Brak badań wieloosiowych (biaxial) ogranicza możliwość pełnej walidacji zaproponowanych modeli visco-hyperelastic w warunkach trójwymiarowych, co jest istotne dla zaawansowanych modeli HBM.

W publikacji dotyczącej optymalizacji materiału mocującego (PMMA z piaskiem), doktorant wskazuje na rozbieżności (do 20%) między wynikami modelowymi a eksperymentalnymi dla mniejszych zawartości wypełniacza. Jeśli model numeryczny nie w pełni oddaje rzeczywisty rozkład cząstek piasku i osiadanie (sedymentację), osłabia to metodologiczną stronę przygotowania próbek biologicznych, która jest fundamentem dla wyników w pozostałych artykułach.

Wskazane uwagi nie obniżają jednak wysokiej wartości merytorycznej całej rozprawy, a recenzowane artykuły przeszły rygorystyczny proces recenzji w czołowych czasopismach naukowych, co świadczy o rzetelnym ich przygotowaniu.

5. Ocena końcowa

Reasumując, uważam, że dysertacja mgr. inż. Radosława Wolnego przedstawiona w formie tematycznie spójnego zbioru powiązanych tematycznie publikacji opublikowanych w czasopismach naukowych stanowi cenne i oryginalne interdyscyplinarne opracowanie naukowe. Doktorant w sposób nowatorski połączył zaawansowane metody eksperymentalne oraz zaawansowane modelowanie numeryczne MES w celu rozwiązania kluczowych problemów bezpieczeństwa ruchu drogowego. Oryginalność przejawia się przede wszystkim w opracowaniu i ujednoliceniu metodyki eksperymentalnych badań biomechanicznych, która stanowi gotowy i sprawdzony protokół badawczy, możliwy do wdrożenia w innych ośrodkach naukowych. Pragnę również zaakcentować szeroki zakres zrealizowanych badań, dostarczających unikalnych i wiarygodnych danych materiałowych dla więzadeł kręgosłupa szyjnego, piersiowego oraz opony twardej, które rozszerzają i ubogacają literaturę przedmiotu oraz stanowią bezcenny fundament dla rozwoju nowej generacji cyfrowych modeli ciała człowieka stosowanych w symulacjach wypadków drogowych.

Konkludując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Radosława Wolnego spełnia warunki 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 Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Gdańskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Jednocześnie biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny pracy oraz wybitny dorobek publikacyjny doktoranta, w wielu aspektach znacznie przewyższający wymagania ustawowe, a także zwracając uwagę na jego aktywność naukową i samodzielność badawczą wnioskuję o jej wyróżnienie.

Wolowski