

Streszczenie

Motywacje: Rosnąca w wielu dziedzinach inżynierii rola symulacji numerycznych, w tym w inżynierii bezpieczeństwa ruchu drogowego, sprawia, że coraz większe znaczenie mają modele ciała człowieka (Human Body Models - HBM), umożliwiające analizę mechanizmów powstawania urazów podczas zdarzeń drogowych. Mimo rozwoju takich narzędzi jak m.in. THUMS czy VIVA+, wiarygodność przewidywania urazów przy ich zastosowaniu ogranicza niedobór spójnych i porównywalnych danych eksperymentalnych, stanowiących podstawę do budowy i kalibracji realistycznych modeli mechanicznych tkanek.

Cel: Niniejszy cykl publikacji powstał w ramach projektu „*Modeling of failure of the human cervical spine in the course of the car collision with the road barrier*” (2020/37/B/ST8/03231) oraz „*Development of anisotropic, visco-hyperelastic constitutive law for modeling spinal dura mater of humans*” (27/1/2022/IDUB/13b/Ag). Celem rozprawy 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. Równoważnym celem było również eksperymentalne wyznaczenie 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.

Metodologia: Opracowano metodykę badań mechanicznych tkanek na podstawie analizy literatury oraz cyklu własnych badań pilotażowych na próbkach odzwierzęcych, obejmujących jednoosiowe próby wytrzymałościowe przy obciążeniach quasi-statycznych i dynamicznych. Zaprojektowano, zbudowano i przeprowadzono walidację autorskiej maszyny wytrzymałościowej przeznaczonej do jednoosiowych prób rozciągania, wyposażonej w komorę środowiskową utrzymującą warunki wilgotności i temperatury zbliżone do warunków *in vivo*. W badaniach właściwych przeprowadzono *in vitro* próby rozciągania tkanek ludzkiego kręgosłupa od 7 dawców (kobiety i mężczyźni, 60-90 lat. Analizowano więzadła kręgosłupa oraz oponę twardą przy różnych prędkościach odkształcenia. Badania opony twardej prowadzono w dwóch kierunkach (podłużnym/poprzecznym) zgodnych z orientacją tkanki w ciele człowieka. Łącznie przeanalizowano 270 próbek opony twardej oraz 590 próbek więzadeł. Dane pomiarowe przetwarzano w środowisku Python w celu wyznaczenia charakterystyk wytrzymałościowych opisanych za pomocą krzywych siła-wydłużenie oraz naprężenie-odkształcenie i ich charakterystycznych punktów.

Rezultaty: Uzyskano zestawy danych materiałowych tkanek miękkich kręgosłupa: więzadeł i opony twardej. Opracowano i przeprowadzono walidację ujednoliconej procedury badawczej, w tym autorskie rozwiązania mocowania próbek. Zaproponowano i porównano nową metodę pomiaru geometrii tkanek. Wyznaczono krzywe naprężenie-odkształcenie wraz z punktami charakterystycznymi i oceniono wrażliwość wyników na definicję odkształcenia. Dla więzadeł odcinka piersiowego uzyskano m.in. średnie siły zniszczenia rzędu ~190-480 N. Dla więzadeł szyjnych wykazano m.in. wpływ prędkości odkształcenia (0.5 vs 50 s^{-1}), m.in. wzrost modułu sprężystości w PLL i LF o ~86% i ~75%. Dla opony twardej m.in. potwierdzono zależność od prędkości odkształcenia (wzrost modułu z ~172 MPa przy 0.5 s^{-1} do ~269 MPa przy 25 s^{-1}) oraz silną anizotropię (moduł ~283 MPa podłużnie vs ~16 MPa poprzecznie).

Wnioski: Rozprawa dostarcza nowych danych materiałowych dla więzadeł kręgosłupa i opony twardej oraz poddaną walidacji ujednoliconą metodykę ich pozyskiwania, przetwarzania i analizy. Rezultaty mogą znaleźć zastosowanie w modelowaniu numerycznym i rozwoju HBM, a także potencjalnie w implantologii i medycynie. Odtwarzalny charakter metodyki może zwiększyć porównywalność wyników między laboratoriami i stanowi bazę do dalszej identyfikacji praw konstytutywnych oraz walidacji modeli biomechanicznych.

Abstract

Motivations: The growing role of numerical simulations across many fields of engineering, including road traffic safety engineering, has increased the importance of Human Body Models (HBMs), which enable the analysis of injury mechanisms during traffic events. Despite the development of advanced tools such as THUMS and VIVA+, the reliability of injury prediction using such models is still limited by the shortage of consistent and comparable experimental data needed for the development and calibration of realistic mechanical models of biological tissues.

Aim: This series of publications was prepared within the framework of the projects “*Modeling of failure of the human cervical spine in the course of the car collision with the road barrier*” (2020/37/B/ST8/03231) and “*Development of anisotropic, visco-hyperelastic constitutive law for modeling spinal dura mater of humans*” (27/1/2022/IDUB/13b/Ag). The aim of the dissertation was to develop and unify a methodology for in vitro mechanical testing of soft tissues of the spine, including test protocols, specimen preparation and fixation, test execution, geometry and deformation measurement, as well as data processing and analysis. An equally important objective was the experimental determination of the mechanical response of human spinal ligaments and spinal dura mater, taking into account nonlinearity, anisotropy, and strain-rate effects, in a form suitable for constitutive model identification and numerical applications.

Methodology: The testing methodology was developed on the basis of a literature review and a series of pilot studies conducted on animal specimens, including uniaxial tensile tests under quasi-static and dynamic loading conditions. A custom tensile testing machine for uniaxial tension tests was designed, built, and validated. The system was equipped with an environmental chamber maintaining humidity and temperature conditions close to those found in vivo. In the main experimental campaign, in vitro tensile tests were performed on human spinal tissues obtained from 7 donors (female and male, aged 60-90 years). Spinal ligaments and spinal dura mater were tested at different strain rates. The dura mater was examined in two directions (longitudinal and transverse), consistent with its orientation in the human body. In total, 270 dura mater specimens and 590 ligament specimens were analyzed. The measurement data were processed in the Python environment in order to determine mechanical characteristics described by force-elongation and stress-strain curves, together with their characteristic points.

Results: Material datasets were obtained for spinal soft tissues, including ligaments and spinal dura mater. A unified experimental procedure was developed and validated, including custom specimen fixation solutions. A new method for tissue geometry measurement was proposed and compared with alternative approaches. Stress-strain curves and their characteristic points were determined, and the sensitivity of the results to the definition of strain was evaluated. For thoracic spinal ligaments, average failure forces of approximately 190-480 N were obtained. For cervical ligaments, a clear strain-rate effect was demonstrated (0.5 vs 50 s^{-1}), including an increase in Young's modulus in the PLL and LF by approximately 86% and 75%, respectively. For the spinal dura mater, strain-rate dependency was also confirmed, with the modulus increasing from approximately 172 MPa at 0.5 s^{-1} to approximately 269 MPa at 25 s^{-1} , as well as pronounced anisotropy, with the modulus being approximately 283 MPa in the longitudinal direction and approximately 16 MPa in the transverse direction.

Conclusions: The dissertation provides new material data for spinal ligaments and spinal dura mater, as well as a validated and unified methodology for their acquisition, processing, and analysis. The results may be applied in numerical modelling and the development of HBMs, and potentially also in implantology and medicine. The reproducible character of the methodology may improve the comparability of results between laboratories and provide a basis for further constitutive model identification and validation of biomechanical models.