

## Streszczenie

Głównymi celami niniejszej rozprawy doktorskiej były opracowanie nowego modelu matematycznego upadku człowieka do przodu na wyciągnięte ramiona i jego symulacja w środowisku Mathematica, jak również opracowanie własnego modelu numerycznego głównych kości całej kończyny górnej człowieka włącznie z połączeniami anatomicznymi między nimi uwzględniającego niejednorodność właściwości materiałowe oszacowane na podstawie obrazowania techniką tomografii komputerowej i jego analiza wytrzymałościowa w środowisku Ansys.

W pierwszej części pracy doktorskiej dotyczącej modelowania matematycznego przedstawiono stosunkowo prosty model upadku człowieka typu "jak miotła", tzn. do przodu na wyciągnięte i wyprostowane kończyny górne, bez zgięć w stawach kolanowych, biodrowych i łokciowych. Model ten zbudowany został w oparciu o obrotowy płaski dwuczłonowy układ mechaniczny o dwóch stopniach swobody z nieliniowym modelem kontaktu. Symulacje numeryczne modelu zaimplementowanego w środowisku Mathematica przeprowadzone dla parametrów mechanicznych opisujących ciało konkretnego człowieka uzyskanych na podstawie TK i własnych badań eksperymentalnych stosunkowo dobrze zgadzają się z wynikami numerycznymi i doświadczalnymi przedstawianymi w literaturze, zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym. Zaproponowany model upadku do przodu pozwala oszacować składową pionową siłę reakcji podłoża dla różnych scenariuszy upadków, dla różnych kątów pomiędzy ramionami a podłożem w chwili uderzenia czy też dla różnych prędkości chodu człowieka tuż przed upadkiem. Uzyskane przebiegi siły GRF mogą być przydatne do dalszej analizy numerycznej stanów przejściowych modelu kości kończyny górnej jako obciążenia siłowe działające na rozważany układ biomechaniczny. Ponadto, znajomość sił dynamicznych działających na kończynę górną jest przydatna, a czasami wręcz niezbędna w leczeniu i rehabilitacji po urazach, podczas projektowania protez, a także np. w optymalizacji procesu treningu sportowego.

Należy jednak zaznaczyć, że przedstawiony w tej pracy model upadku człowieka do przodu na kończyny górne ma pewne ograniczenia. Przede wszystkim, ruch kończyn górnych w stawie łokciowym jak i sprężysto-tłumiące właściwości w stawie barkowym nie zostały uwzględnione. Ponadto, nie uwzględniono składowej poziomej siły działającej na kończyny górne podczas upadku. Niemniej jednak, wspomniane tutaj ograniczenia mogą być tematem przyszłych badań i modyfikacji przedstawionego modelu upadku.

W drugiej części pracy dotyczącej modelowania (rozdział 6) zaproponowano numeryczny model ludzkiej kończyny górnej jako jeden złożony układ biomechaniczny składający się z wszystkich trzech głównych kości kończyny górnej, czyli kości ramiennej, kości promieniowej i kości łokciowej. W celu zapewnienia ich wzajemnego połączenia wprowadzono kontakt typu bonded w stawie łokciowym oraz nadgarstkowym. Anatomiczne połączenie kości promieniowej oraz łokciowej błoną międzykostną przedramienia zamodelowano przy użyciu sprężyn i tłumików wiskotycznych. Do opracowania i analizy tego układu wykorzystano współczesne

narzędzia komputerowe takie jak środowiska Mimics oraz Ansys. Głównym celem przeprowadzonego procesu modelowania i uzyskanych dzięki niemu wyników było lepsze zrozumienie mechaniki powstawania urazów kości kończyn górnych podczas upadku do przodu na wyprostowane ręce. W przeprowadzonych w programie Ansys symulacjach numerycznych zbudowanego modelu kości kończyny górnej wykorzystano zarówno przebiegi czasowe siły reakcji podłoża występujące podczas procesu upadku do przodu na wyprostowane ramiona dostępne w literaturze, jak i przebiegi siły GRF uzyskane w wyniku symulacji opracowanego modelu upadku. Analizę dynamiczną przeprowadzono dla różnych konfiguracji kości przedramienia. Do oceny zachowania się kości poddanych zadanemu obciążeniu zastosowano kryterium naprężeń zredukowanych obliczonych wg hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego oraz kryterium maksymalnych odkształceń. I chociaż wszystkie trzy kości kończyny górnej modelowane były przy założeniu liniowych własności sprężystych materiału, to zastosowane uproszczenie nie powinno znacząco wpłynąć na zdolność proponowanego modelu do przewidywania miejsc złamania i wyężenia związanego z uszkodzeniem kości promieniowej pod obciążeniem wynikającym z upadku z przodu.

Przeprowadzona analiza wytrzymałościowa dla trzech różnych konfiguracji kości kończyny górnej wykazała między innymi, że dla pronacji będącej typową konfiguracją kości przedramienia podczas upadku do przodu, najbardziej narażona na złamanie jest kość promieniowa. Wykazano także, że kryterium maksymalnych odkształceń może być bardziej przydatne do przewidywania potencjalnych miejsc złamań kości kończyny niż kryterium wyężeniowe naprężeń zredukowanych. Oszacowane miejsca ewentualnych złamań kości zgadzają się jakościowo z innymi wynikami numerycznymi i/lub eksperymentalnymi innych badaczy prezentowanymi w literaturze. Dodatkowo, uzyskane wyniki wskazują, że kierunek działania na kończynę górną obciążenia, ma duży wpływ na możliwość wystąpienia urazów kości. Oznacza to, że upadki z pozycji stojącej na wyciągnięte ramiona generują wartości siły GRF, które mogą przekraczać granice wytrzymałości na złamanie kości promieniowej człowieka. I chociaż uzyskane wyniki numeryczne nie zostały porównane z własnymi badaniami eksperymentalnymi pod względem jakościowym i ilościowym, to jednak uzyskane wyniki pokazują, że przedstawiony model zapewnia realistyczną ocenę odkształcenia kości promieniowej, wytrzymałości na złamanie i oceny miejsca pęknięcia kości podczas różnych scenariuszy upadek do przodu.

17.11.2017  
Rafał Biesiadu