

Dr hab. inż. Cezary Rzymkowski
Politechnika Warszawska
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej
ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa

Warszawa, 22 maja 2015 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Milanowicza
pt. *Modelowanie numeryczne wypadków przy pracy spowodowanych upadkami*

wykonana na zlecenie
Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego,
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa

Uwagi ogólne

W Polsce dochodzi do około 90 tysięcy wypadków przy pracy w ciągu roku. Istotną część stanowią upadki z wysokości, które często mają bardzo poważne skutki, łącznie ze śmiertelnymi. Aby możliwe było podejmowanie skutecznych środków redukujących ryzyko tej kategorii wypadków, konieczne jest lepsze poznanie ich przebiegu i przyczyn. Przedstawiona do oceny praca wpisuje się w nurt poszukiwania lepszych, niż dotychczas istniejące, metod rekonstrukcji wypadków z wysokości, co powinno doprowadzić do poprawy bezpieczeństwa tej grupy pracowników.

Treść i ocena rozprawy

Celem pracy było opracowanie numerycznego modelu ciała człowieka, jako narzędzia wspomagającego rekonstrukcje wypadków związanych z upadkiem z wysokości.

Tezę pracy Doktorant sformułował w następujący sposób:

„Modelowanie numeryczne ciała człowieka umożliwi, udoskonaloną w porównaniu ze stosowanymi obecnie, analizę przyczyn i skutków wypadków przy pracy spowodowanych upadkami z wysokości”.

Przedstawiona na 142 stronach rozprawa składa się z 7 rozdziałów, liczącego 88 pozycji spisu piśmiennictwa i 5 załączników.

We wstępie (rozdział pierwszy) Autor podkreśla znaczenie konieczności podejmowania prac mających na celu ograniczenie liczby i skutków wypadków przy pracy. Wskazuje na występujące często trudności z ustaleniem przebiegu i przyczyn wypadków, co ogranicza możliwość podejmowania skutecznych działań zapobiegawczych i proponuje wykorzystanie na potrzeby rekonstrukcji wypadków przy pracy nowego narzędzia, jakim jest symulacja komputerowa. Metoda ta stosowana jest od lat, z bardzo dobrym skutkiem, w przypadku rekonstrukcji wypadków drogowych. W zakresie badania wypadków przy pracy jest dotychczas stosowana w bardzo ograniczonym zakresie.

Rozdział drugi poświęcony jest przeglądowi stanu badań z zakresu związanego z tematyką rozprawy. Doktorant przedstawia, między innymi, historię rozwoju i zastosowań metod komputerowych na potrzeby badań dotyczących wypadków drogowych (a w efekcie opracowanie odpowiednich systemów poprawiających bezpieczeństwo użytkowników dróg). Wskazuje również na istniejące przykłady zastosowań (w ograniczonym zakresie) tych metod do analiz wypadków przy pracy.

Na podstawie przeprowadzonej analizy dostępnego oprogramowania i modeli ciała człowieka Doktorant formułuje słuszny wniosek, że istniejące modele (stworzone głównie do badań dotyczących poprawy bezpieczeństwa kierowców i pasażerów pojazdów samochodowych oraz pieszych i użytkowników jednośladów) wymagają modyfikacji przed ich wykorzystaniem do rekonstrukcji wypadków przy pracy. Stąd rozsądna decyzja Autora o dostosowaniu (dostępnego w środowisku komercyjnego pakietu symulacyjnego MADYMO) modelu pieszego poprzez opracowanie:

”

- nowego modelu kończyn górnych umożliwiającego symulację złamań,
- modelu głowy osłoniętej przemysłowym hełmem ochronnym,
- zestawu warunków początkowych dla symulacji procesu upadku.

”

Rozdział trzeci, to zdefiniowanie celu pracy, sformułowanie tezy oraz zaprezentowanie programu badań. Zarówno cel pracy, jak też teza nie budzą wątpliwości. Podobnie program badań, który udało się Autorowi z powodzeniem zrealizować, co przedstawił w dalszej części rozprawy.

Rozdziały czwarty („Opracowanie numerycznego modelu ciała człowieka na podstawie modelu *Pedestrian*”), piąty („Badania doświadczalne procesu upadku”) i szósty („Implementacja warunków początkowych upadku do numerycznego modelu ciała człowieka”) stanowią główną merytoryczną część rozprawy.

W rozdziale czwartym, Doktorant uzasadnia wybór wykorzystanego oprogramowania (systemu MADYMO, jednego z najbardziej zaawansowanych systemów do symulacji układów mechanicznych i biomechanicznych, oferującego obszerną bazę typowych modeli manekinów i ciała człowieka) oraz wybór modelu ciała człowieka (model wielomasowy *Pedestrian* z bazy MADYMO) stanowiącego podstawę do opracowania modelu docelowego. Następnie, po zwięzłym omówieniu metod modelowania i obliczeń numerycznych stanowiących podstawę systemu MADYMO, prezentuje własne modyfikacje/rozbudowę modelu *Pedestrian*, w szczególności w zakresie kończyn (tak aby możliwa była symulacja złamań pod wpływem obciążeń towarzyszących upadkowi z wysokości) oraz głowy (uwzględnienie hełmu ochronnego). W rozdziale tym opisane zostały również kryteria odporności biomechanicznej, niezbędne do oceny możliwych skutków wypadku.

Istotnym elementem pracy, opisanym w rozdziale piątym, były badania eksperymentalne, które posłużyły do sformułowania warunków początkowych do późniejszych eksperymentów numerycznych z wykorzystaniem systemu MADYMO i odpowiednio przystosowanego do analizy upadków z wysokości modelu ciała człowieka. Ponieważ, z oczywistych względów (zagrożenia zdrowia i życia), nie było możliwe przeprowadzenie badań eksperymentalnych w warunkach rzeczywistych (upadku z wysokości), Doktorant wykorzystał technologię rzeczywistości wirtualnej do symulacji środowiska, w którym realizowany był scenariusz utraty równowagi i upadku z wysokości. Badane osoby zajmowały miejsce na uchyłnej

platformie, która w niespodziewanym momencie przechylała się doprowadzając do utraty równowagi i zainicjowania upadku. Badani byli bezpieczni — platforma umieszczona była zaledwie 40 cm nad podłogą, dodatkowo uczestnicy eksperymentu byli zabezpieczeni przed upadkiem uprzężą stosowaną w czasie prac na wysokości. Zbliżone do rzeczywistych wrażenia pracy na wysokości zapewniło zastosowywanie zakładanych na głowę wyświetlaczy HMD z generowanym sztucznie widokiem z podestu rusztowania znajdującego się na wysokości 20 m. Analiza kinematyki ciała badanych tuż po rozpoczęciu symulowanego „upadku”, zarejestrowanej za pomocą systemu Vicon, umożliwiła uwzględnienie reakcji człowieka na utratę równowagi w czasie pracy na wysokości, przy opracowania warunków początkowych, do numerycznej rekonstrukcji konkretnych wypadków.

W rozdziale szóstym przedstawiono wykorzystanie w praktyce opracowanego i opisanego w rozdziale czwartym, modelu ciała człowieka oraz warunków początkowych (uzyskanych na podstawie badań doświadczalnych, przedstawionych w rozdziale piątym) do przeprowadzenia rekonstrukcji konkretnego wypadku, w którym jeden z pracowników wykonujących prace dekarские upadł z wysokości 10 metrów ponosząc śmierć na miejscu. W wyniku przeprowadzonych badań numerycznych Doktorant odtworzył prawdopodobny przebieg wypadku od chwili utraty równowagi, uzyskując dobrą zgodność obliczonych biomechanicznych wskaźników obrażeń z wynikami sekcji zwłok ofiary wypadku, a także zgodność położenia/konfiguracji ciała po upadku. Przeprowadzone dodatkowe badania numeryczne wskazały na istotne znaczenie prawidłowego zadania warunków początkowych, uwzględniających kinematykę ciała w początkowej fazie upadku (tuż po utracie równowagi). Nierealistycznie wysokie wartości wskaźnika HIC_{15} oraz siły poprzecznej działającej na szyję, wskazują na konieczność poprawy modelu w tym zakresie, w przypadku jego wykorzystywania w przyszłości. Zauważyć należy, że Autor dostrzega problem i podkreśla w dalszej części rozprawy konieczność wprowadzenia — w ramach przyszłych prac — niezbędnych korekt w celu udoskonalenia modelu.

Rozdział siódmy zawiera podsumowanie uzyskanych wyników i propozycje przyszłych badań mogących doprowadzić do jeszcze lepszych rozwiązań. Doktorant — słusznie — stwierdza, że cel pracy został osiągnięty a postawiona teza udowodniona. Zauważając również pewne niedoskonałości wskazuje na kierunki możliwego rozwoju opracowanego modelu i metodologii postępowania.

Liczące 88 pozycji piśmiennictwo zostało dobrane prawidłowo i dobrze reprezentuje aktualny stan wiedzy w dziedzinie będącej przedmiotem recenzowanej rozprawy.

Całości pracy dopełnia 5 załączników, zawierających dane wykorzystane na potrzeby realizacji pracy, które mogą stanowić również cenne źródło informacji w przypadku prowadzenia dalszych prac, zarówno przez Autora, jak też innych badaczy.

Podsumowanie — znaczące elementy rozprawy

Praca dotyczy istotnego zagadnienia polegającego na poprawie bezpieczeństwa w czasie prac na wysokości, poprzez opracowanie nowej metody i „narzędzia” do rekonstrukcji upadków z wysokości.

Cel pracy został osiągnięty a teza udowodniona.

Za oryginalny wkład doktoranta, można uznać:

- zaproponowanie zastosowania metod symulacji komputerowej do rekonstrukcji wypadków związanych z upadkami z wysokości,
- rozbudowę modelu ciała człowieka stworzonego na potrzeby badania wypadków drogowych do wersji niezbędnej do symulacji upadku z wysokości,
- opracowanie metody i przeprowadzenie bezpiecznych badań doświadczalnych zachowania się osób pracujących na wysokości w chwili utraty równowagi, przy połączeniu elementów rzeczywistych (badani tracą równowagę i rozpoczynają spadanie) z elementami zanurzeniowej rzeczywistości wirtualnej (dzięki HMD z wizualizacją warunków rzeczywistego środowiska pracy na wysokości),
- wykorzystanie wyników z badań doświadczalnych, wspomnianych wyżej, do opracowania kinematycznych warunków początkowych do symulacji numerycznych — to osiągnięcie zasługuje na szczególne podkreślenie.

Sposób sformułowania celu, przyjęcie tezy, opracowania planu badań i ich przeprowadzenia oraz analiza uzyskanych wyników i sformułowanie wniosku świadczą o tym, że Doktorant, mgr inż. Marcin Milanowicz, posiada umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a także ogólną wiedzę w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska.

Uwagi krytyczne

Praca napisana i zredagowana jest bardzo starannie. Recenzent nie zgłasza istotnych zastrzeżeń.

Doktorant nie ustrzegł się jednak, oprócz kilku literówek i niezręczności gramatycznych, również drobnych niedociągnięć merytorycznych, które warto byłoby usunąć, np. przed publikacją pracy w całości lub części (do czego Recenzent bardzo zachęca), ważniejsze wymieniono poniżej:

- str. 7^{11*}: stwierdzenie „We współczesnych rekonstrukcjach wypadków bardzo często korzysta się z numerycznych modeli ciała człowieka [12], [13]. Modele te opracowywane są najczęściej na podstawie rzeczywistych (materialnych) manekinów ATD” nie jest ścisłe i może wprowadzać czytelnika w błąd,
- str. 14₆: powinno być „hyper-elipsoida” zamiast „elipsoida”,
- str. 20⁷: stwierdzenie „Im mniejszy jest krok czasowy tym dokładność obliczeń będzie większa” jest prawdziwe tylko do pewnego stopnia (zbyt mały krok całkowania również może wpływać niekorzystnie na dokładność obliczeń),
- str. 24: w podpisie Tabeli 3. należałoby dodać informację, dla którego połączenia w szyi podawane są poszczególne wartości,
- str. 43: wiarygodność modelu złamania kończyny górnej poprawiłaby ocena poprawności przewidywania urazów przy wykorzystaniu tego modelu, gdyby został sprawdzony

* Indeks górny po numerze strony oznacza numer linii liczony od początku strony, indeks dolny od końca.

dla większej liczby rzeczywistych wypadków (prawdopodobnie Doktorant nie miał dostępu do danych z innych wypadków, stąd uwaga ta jest uwagą "na przyszłość"),

str. 44₃: na końcu zdania „Jego masa i wymiary odpowiadają 50 centyłowemu mężczyźnie populacji amerykańskiej”, dla uściślenia, warto dodać „przełomu lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych XX wieku”,

str. 48: Tabela 13. — należałoby dodać informację o układzie współrzędnych, względem którego wyznaczono podane momenty bezwładności.

W załącznikach 2-5 Autor przyjął automatyczne dopasowanie zakresów na osiach pionowych dla przedstawionych tam wykresów, podobnie różnią się niektóre zakresy poziomych osi czasu. W przypadku ponownej publikacji tych danych warto byłoby rozważyć pewne ujednoczenie/pogrupowanie przyjętych zakresów.

Wniosek końcowy

Przedstawione uwagi krytyczne nie mają istotnego znaczenia dla mojej bardzo pozytywnej oceny rozprawy jako całości.

Doktorant zaprezentował oryginalne, nowatorskie rozwiązanie ważnego zagadnienia dotyczącego poprawy bezpieczeństwa na stanowisku pracy. Wykazał się dużą sprawnością w zakresie właściwego planowania i prowadzenia badań naukowych z wykorzystaniem zarówno metod obliczeniowych, jak też badań doświadczalnych oraz efektywnego wykorzystania wyników obu metod dla uzyskania „wartości dodanej”.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 65, poz. 595, z późn. zm.) oraz wnoszę o dopuszczenie rozprawy mgra inż. Marcina Milanowicza pt. *Modelowanie numeryczne wypadków przy pracy spowodowanych upadkami* do publicznej obrony.



/Cezary Rzymkowski/