



**Stanisław
Walczak**

Wypadki z udziałem pieszych – możliwości rekonstrukcji w programie V-Sim 5.0

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki symulacji przebiegu rzeczywistych wypadków z udziałem niechronionych uczestników ruchu w nowej wersji programu V-Sim 5.0. W symulacjach wykorzystano wielobryłowy model pieszego. Przeanalizowano wpływ poszczególnych parametrów modelu, a także parametrów ruchu pieszego oraz względnego położenia pieszego i pojazdu w początkowej chwili potrącenia na uzyskane wyniki w postaci zasięgu wrzucenia pieszego na pojazd oraz odrzutu wzdłużnego pieszego.

Słowa kluczowe

Potrącenie pieszego, symulacja komputerowa, program V-Sim 5.0.

Otrzymano 23 sierpnia 2022 r., zatwierdzono do druku 28 listopada 2022 r.

DOI: 10.4467/15053520PnD.22.019.16989

1. Wstęp

W 2021 roku odnotowano 4755 wypadków z udziałem osób pieszych (20,8% ogółu), w których zginęło 527 pieszych (23,5% ogółu), a 4304 pieszych odniosło obrażenia ciała (16,3% ogółu). Najczęściej do wypadków z osobami pieszymi dochodziło w obszarze zabudowanym. Skutki wypadków mających miejsce w obszarze niezabudowanym były dużo bardziej tragiczne, gdyż w niemal co trzecim wypadku zginął człowiek, zaś w obszarze zabudowanym w co dwunastym. Najwięcej wypadków z udziałem pieszych i najtragiczniejsze ich skutki zanotowano w miesiącach jesienno-zimowych (październik–grudzień). Na taki stan rzeczy wpływ mają nasze warunki klimatyczne, a zwłaszcza gorsza widoczność przy wcześniej zapadającym zmierzchu [5].

Zastosowanie wielobryłowego modelu pieszego w programie symulacyjnym daje szerokie możliwości badania wypadków z udziałem pieszych nie tylko pod kątem ich rekonstrukcji, ale również analizowania czynników mających wpływ na powstanie i ciężkość obrażeń pieszego.

Dr inż. Stanisław Walczak, prof. PK, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, ORCID: 0000-0002-1300-7207.

Wielobryłowy model pieszego, w połączeniu z modelem pojazdu uwzględniającym rzeczywisty kształt nadwozia, jest narzędziem pozwalającym zrozumieć, w jaki sposób podczas wypadku mogło dojść do obrażeń pieszego. Informacje takie pozwalają również prowadzić prace zmierzające od zmniejszenia ciężkości obrażeń niechronionych uczestników ruchu drogowego [2].

Dane pochodzące z rzeczywistych wypadków drogowych z udziałem pieszych oraz prowadzone testy zderzeniowe z udziałem manekinów oraz zwłok służą jako ważne źródło informacji do oceny przydatności modeli pieszych w rekonstrukcji wypadków drogowych oraz oceny wiarygodności uzyskanych wyników, niezbędnej do procesowego wykorzystania symulacji komputerowej.

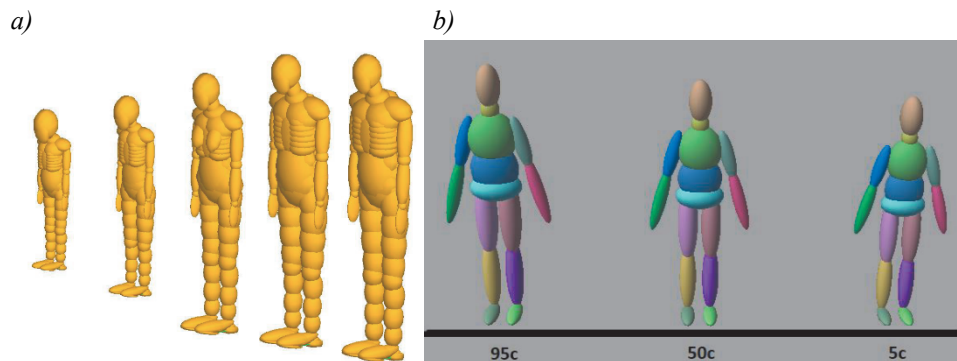
2. Modele pieszego stosowane w rekonstrukcji wypadków drogowych

Obecnie w literaturze najczęściej stosowanym modelem do rekonstrukcji wypadków z udziałem niechronionych uczestników ruchu jest wielobryłowy model pieszego MADYMO, opracowany przez TNO Automotive [4].

Elipsoidalne modele pieszego MADYMO dostępne są w pięciu rozmiarach:

- trzyletnie dziecko,
- sześciolatek,
- 5-centylowa kobieta,
- 50-centylowy mężczyzna,
- 95-centylowy mężczyzna.

Model MADYMO składa się z 52 ciał sztywnych podzielonych na siedem grup. Zewnętrzna powierzchnia modelu opisana jest przez 64 elipsoidy obrotowe oraz dwie płaszczyzny [3].



Ryc. 1. Porównanie wyglądu zewnętrznego modeli pieszego stosowanych w rekonstrukcji wypadków drogowych: a) wielobryłowy model pieszego MADYMO, opracowany przez TNO Automotive, b) model pieszego opracowany przez CYBID.

Wielobryłowy model pieszego zastosowany w programie V-Sim 5.0 składa się z 15 ciał sztywnych (członów), połączonych więzami kulistymi (stawami). W modelu tym wprowadzono wieloliniowe charakterystyki oporu ruchu kąтового w stawach i określono zakresy: swobodnego ruchu, ruchu utrudnionego i ruchu nieanatomicznego [8].

Istnieje możliwość symulowania zderzenia pieszego z pojazdem lub z powierzchnią terenu, a także elementów ciała pieszego między sobą. Ruch modelu realizowany jest jako ruch sylwetki kinematycznej i do chwili aktywacji obliczeń dynamicznych model nie ma napięcia mięśniowego, mogącego utrzymać jego sylwetkę w pozycji spionizowanej. Z chwilą aktywacji obliczeń dynamicznych model osuwa się pod wpływem grawitacji i/lub uderza o pojazd. Jako chwilę aktywacji można zadać chwilę pierwszego zetknięcia się modelu z przeszkodą lub arbitralnie ustalony czas aktywacji, przy czym opcja arbitralnej aktywacji obliczeń dynamicznych pozwala na zwiększenie nacisku na powierzchnię i zamodelowanie potknięć.

3. Możliwości wykorzystania modelu człowieka w rekonstrukcji wypadków drogowych

Wielobryłowy model człowieka może być zastosowany w rekonstrukcji wypadków drogowych w celu określenia lub weryfikacji:

- położenia miejsca potrącenia pieszego względem jezdni,
- prędkości ruchu pojazdu,
- prędkości ruchu pieszego.

Należy zaznaczyć, że program symulacyjny, nawet z najbardziej zaawansowanym wielobryłowym modelem pieszego to tylko narzędzie, które nie zastąpi szczegółowej analizy materiału dowodowego. Uzyskane na podstawie komputerowej symulacji wyniki zależą od danych wejściowych, ustalonych na podstawie rzeczowego materiału dowodowego.

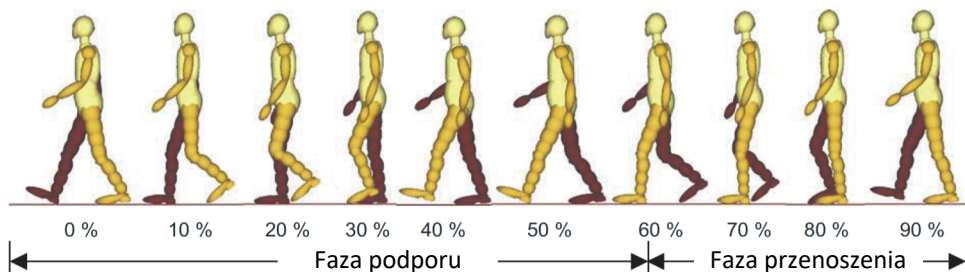
Obrażenia pieszego, zasięg wrzucenia na pojazd oraz odrzut wzdłużny pieszego zależą od bardzo wielu czynników, z których najbardziej istotne to:

- prędkość zderzeniowa pojazdu,
- prędkość ruchu pieszego,
- względne ustawienie pieszego i pojazdu w początkowej chwili potrącenia.

Usytuowanie pieszego względem pojazdu w zasadniczy sposób wpływa na kinematykę przebiegu zderzenia [4]. Istotne jest również określenie fazy ruchu pieszego w chwili potrącenia, ponieważ podczas ruchu pieszego zmienia się pozycja poszczególnych części ciała oraz wysokość położenia środka masy względem jezdni. Zmiany te zależą od formy ruchu. W rekonstrukcji wypadków drogowych rozróżnia się następujące formy ruchu [4]:

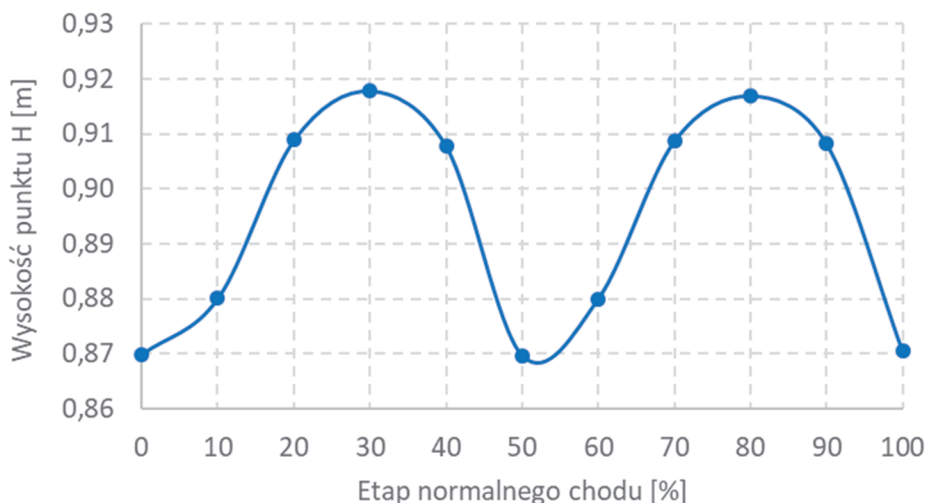
- chód (wolny, normalny, szybki),
- bieg,
- pędzenie.

W celu ułatwienia definiowania pozycji pieszego w początkowej chwili potrącenia oraz badania wpływu ustawienia sylwetki pieszego względem pojazdu na przebieg procesu potrącenia pieszego, w literaturze zdefiniowano antropometryczne charakterystyki pieszego w poszczególnych etapach normalnego chodu [6].



Ryc. 2. Antropometryczne charakterystyki pieszego w poszczególnych etapach normalnego chodu [4].

Należy zwrócić uwagę na to, że w poszczególnych etapach ruchu pieszego w sposób istotny zmienia się wysokość sylwetki względem jezdni, mierzona np. położeniem punktu H [6], który jest teoretycznym położeniem biodra pieszego, czyli punktem obrotu między częścią tułowia a górną częścią nogi. Zmiany te wpływają w sposób zasadniczy na długość rozwinięcia pieszego na pojeździe.



Ryc. 3. Wysokość sylwetki pieszego względem jezdni mierzona położeniem punktu H (opracowanie na podstawie [6]).

4. Przykłady zastosowania programu V-Sim do rekonstrukcji rzeczywistych wypadków

W celu zbadania możliwości zastosowania programu V-Sim 5.0 do rekonstrukcji rzeczywistych wypadków z udziałem pieszych, a w szczególności określenia prędkości kolizyjnej pojazdu, przeprowadzono symulację przebiegu dwóch rzeczywistych wypadków drogowych, w których prędkość kolizyjną pojazdu można było wyznaczyć również inną metodą.

4.1. Potrącenie pieszego przez samochód Volkswagen Golf

W analizowanym zdarzeniu spionizowany pieszy przechodził z lewej strony jezdni na prawą, patrząc zgodnie z kierunkiem ruchu samochodu i był zwrócony prawym bokiem do nadjeżdżającego samochodu.

Obraz uszkodzeń pojazdu pokazano na rycinie 4. Na pojeździe zmierzono długość rzeczywistego rozwinięcia pieszego, czyli odległość od podłoża do miejsca uderzenia głowy pieszego, mierzoną po obrysie pojazdu [7], która wynosiła $l_{pd} = 2,55$ m.



Ryc. 4. Uszkodzenia samochodu Volkswagen Golf powstałe w wyniku potrącenia pieszego.

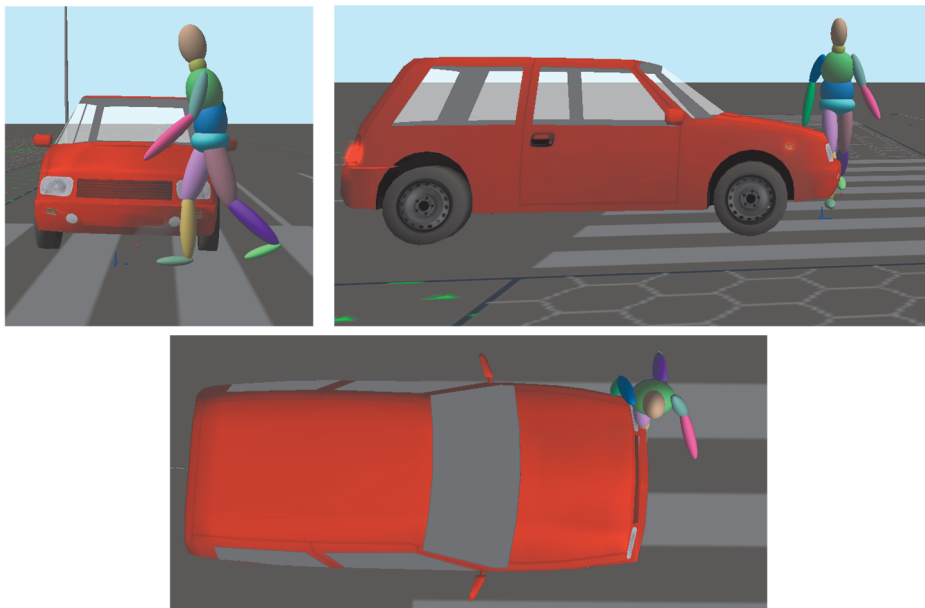
Dla analizowanego zdarzenia przeprowadzono w programie V-Sim 5.0 symulację potrącenia pieszego przez samochód Volkswagen Golf. Na podstawie analizy obrażeń pieszego, przeprowadzonej przez medyka sądowego, do symulacji wybrano ustawienie pieszego względem pojazdu odpowiadające etapowi 10% normalnego ruchu pieszego według ryciny 2.

W kolejnych symulacjach zwiększano prędkość pojazdu, tak aby uzyskać uderzenie głowy pieszego w dach pojazdu w miejscu odpowiadającym rzeczywistości. Najlepsze odwzorowanie uzyskano dla prędkości pojazdu wynoszącej 63 km/h, przy domyślnym współczynniku tarcia pomiędzy pieszym a pojazdem wynoszącym 0,5.

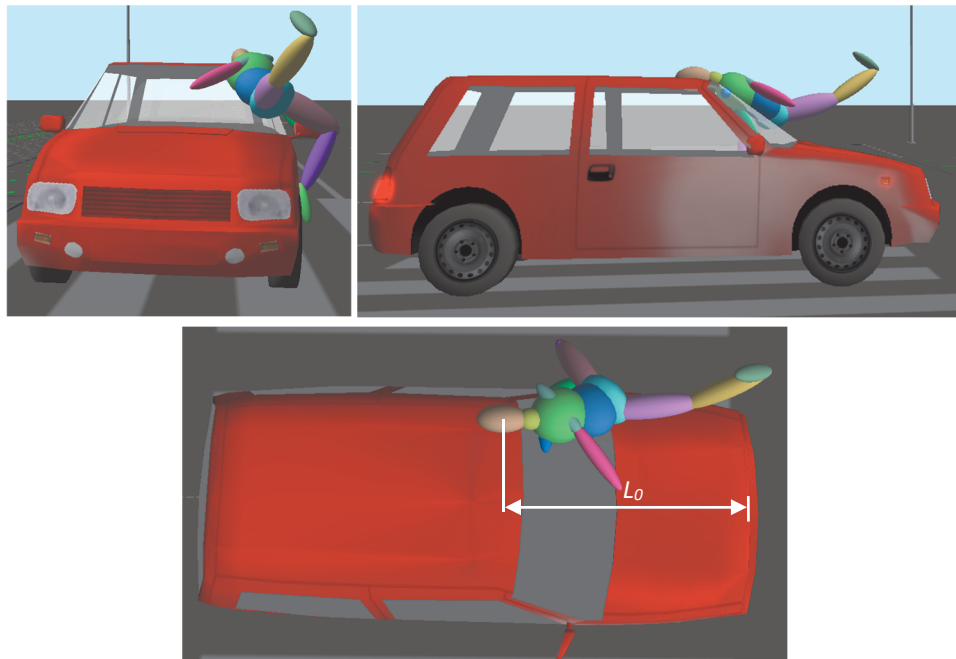
Założone położenie pieszego względem pojazdu w początkowej chwili potrącenia pokazano na rycinie 5, natomiast uzyskane w symulacji położenie pieszego w chwili uderzenia jego głowy w dach pokazano na rycinie 6.

W wyniku przeprowadzonych symulacji stwierdzono, że dla stałej prędkości pojazdu, uzyskana długość rozwinięcia pieszego na pojeździe oraz odrzut wzdłużny pieszego jest funkcją współczynnika tarcia pomiędzy pieszym a pojazdem oraz orientacji pieszego względem pojazdu w początkowej chwili potrącenia.

Ponieważ bezpośrednio w programie V-Sim nie ma możliwości pomiaru długości rozwinięcia pieszego na pojeździe, do dalszych analiz wykorzystano odległość uderzenia głowy pieszego od zderzaka przedniego mierzoną w rzucie z góry L_0 (ryc. 6).



Ryc. 5. Położenie pieszego względem pojazdu w początkowej chwili potrącenia.



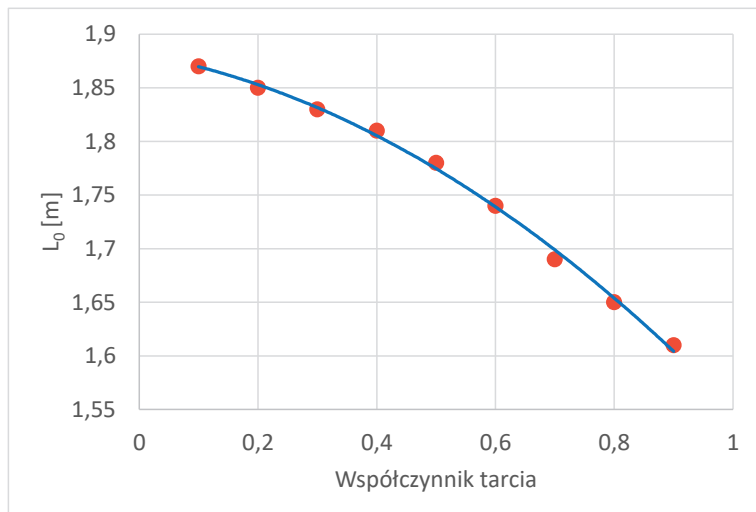
Ryc. 6. Położenie pieszego względem pojazdu w chwili uderzenia głowy w pojazd.

W kolejnych symulacjach przeanalizowano, jak zmienia się odległość uderzenia głowy pieszego od zderzaka przedniego mierzoną w rzucie z góry (L_0) oraz odrzut wzdłużny pieszego (S_0) w funkcji współczynnika tarcia, przy stałej prędkości uderzenia wynoszącej 63 km/h. Przeanalizowano zmianę współczynnika tarcia w przedziale od 0,1 do 0,9. Uzyskane zależności odległości uderzenia głowy pieszego od zderzaka przedniego mierzonej w rzucie z góry (L_0) oraz odrzutu wzdłużnego pieszego (S_0) w funkcji współczynnika tarcia pokazano odpowiednio na rycinach 7 i 8.

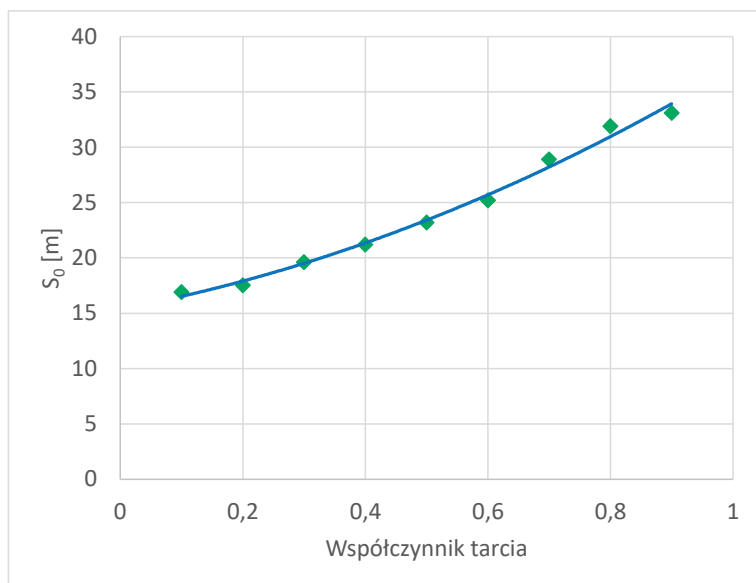
Dla porównania, na stanowisku doświadczalnym, wyznaczono wartości statycznego i kinematycznego współczynnika tarcia pomiędzy stalową płytą pokrytą dwuwarstwowym lakierem samochodowym a płytką pokrytą różnymi materiałami, z których wykonana jest odzież. Uzyskane współczynniki tarcia przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości statycznego i kinematycznego współczynnika tarcia materiałów, z których wykonana jest odzież

Materiał	Współczynnik tarcia statycznego	Współczynnik tarcia kinetycznego
	μ_s	μ_k
Jeans	0,35	0,27
Bawełna	0,32	0,26

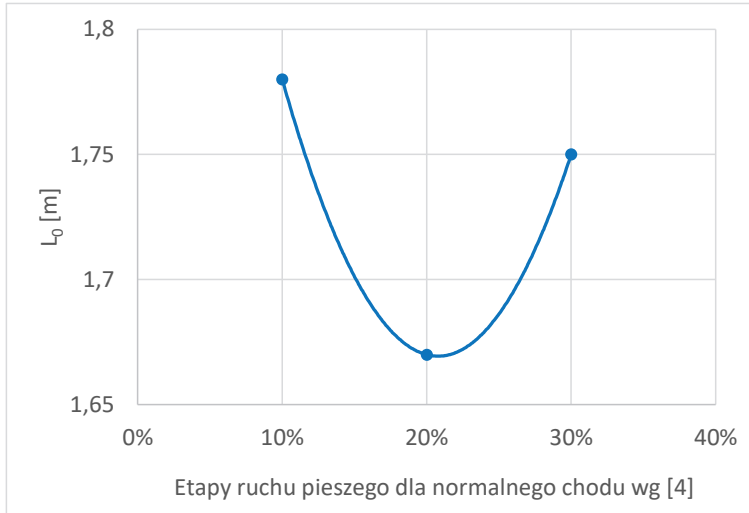


Ryc. 7. Zależności odległości uderzenia głowy pieszego od zderzaka przedniego, mierzonej w rzucie z góry w funkcji współczynnika tarcia pomiędzy ciałem a nadwoziem pojazdu.

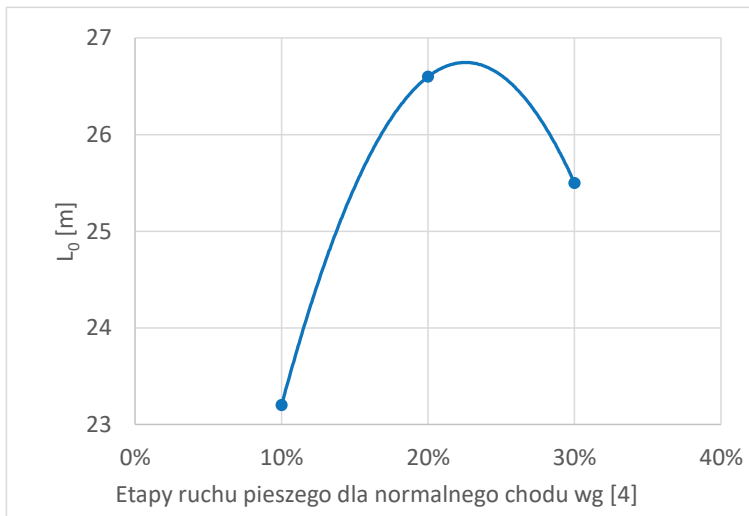


Ryc. 8. Zależności odrzutu wzdłużnego pieszego w funkcji współczynnika tarcia pomiędzy ciałem a nadwoziem pojazdu.

Zależności odległości uderzenia głowy pieszego od zderzaka przedniego, mierzonej w rzucie z góry (L_0) oraz odrzutu wzdłużnego (S_0) od orientacji pieszego względem pojazdu w początkowej chwili potrącenia, dla trzech kolejnych faz ruchu pieszego, pokazano rycinach 9 i 10.



Ryc. 9. Zależność odległości uderzenia głowy pieszego od zderzaka przedniego, mierzona w rzucie z góry dla kolejnych faz ruchu pieszego.



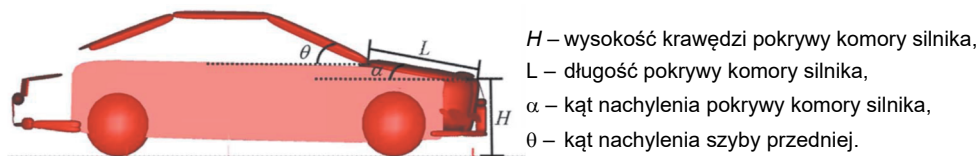
Ryc. 10. Zależność odrzutu wzdłużnego dla kolejnych faz ruchu pieszego.

Z przeprowadzonych symulacji wynika również, że zmiana współczynnika sztywności nadwozia w przedziale $\pm 50\%$ wartości domyślnej zapisanej w programie V-SIM 5.0, nie wpływa w istotny sposób na odległość uderzenia głowy pieszego od zderzaka przedniego oraz na odrzut wzdłużny pieszego.

Badania symulacyjne przedstawione w pracy [7] wskazują, że dynamika potrącenia pieszego, a w szczególności długość rozwinięcia pieszego i odrzut wzdłużny zależą również od wymiarów charakterystycznych nadwozia, takich jak

wysokość krawędzi pokrywy komory silnika oraz jej długość, kąt nachylenia pokrywy komory silnika oraz kąt pochylenia szyby czołowej. Wymiary te pokazano na rycinie 11.

Z tego powodu do symulacji potrącenia pieszego należy wybierać model 3D pojazdu, odpowiadający, w zakresie powyższych parametrów, rzeczywistemu pojazdowi.



Ryc. 11. Parametry geometryczne przodu samochodu osobowego [7].

4.2. Potrącenie pieszego przez samochód Skoda Fabia

W analizowanym przykładzie spionizowana piesza przechodziła z lewej strony jezdni na prawą, patrząc zgodnie z kierunkiem ruchu samochodu i była zwrócona prawym bokiem do nadjeżdżającego samochodu. Jak wynika z nagrania zarejestrowanego przez kamerę monitoringu, bezpośrednio przed potrąceniem pieszka zatrzymała się i lewą nogą wykonała krok w lewą stronę. Obraz uszkodzeń pojazdu oraz ustawienie pieszego względem pojazdu bezpośrednio przed potrąceniem pokazano na rycinie 12.

Na pojeździe zmierzono rzeczywistą długość rozwinięcia pieszego, która wynosiła 1,9 m. Zasięg wrzucenia, tj. odległość uderzenia głowy pieszego w szybę czołową od zderzaka, mierzona w rzucie z góry, wynosił 1,3 m.

W kolejnych symulacjach zwiększano prędkość pojazdu, tak aby uzyskać uderzenie głowy pieszego w szybę czołową pojazdu w miejscu odpowiadającym rzeczywistemu. Najlepsze odwzorowanie uzyskano dla prędkości pojazdu wynoszącej 52 km/h.

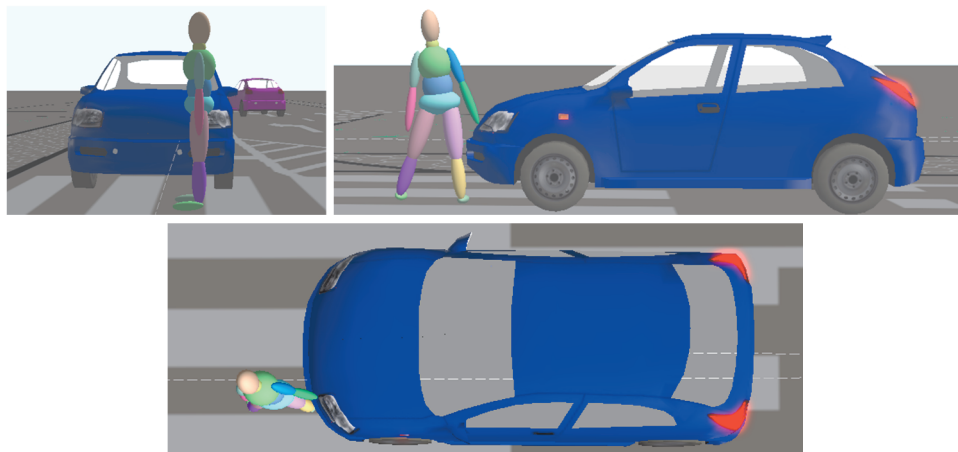
Rzeczywistą prędkość pojazdu w początkowej chwili potrącenia wyznaczono na podstawie analizy nagrania wideo zarejestrowanego przez kamerę monitoringu. Prędkość ta wynosiła 54 ± 5 km/h.

Założone na podstawie analizy zapisu wideo położenie pieszego względem pojazdu w początkowej chwili potrącenia pokazano na rycinie 13, natomiast uzyskane z symulacji położenie pieszego względem samochodu w chwili uderzenia głowy pieszego w szybę czołową pokazano na rycinie 14.

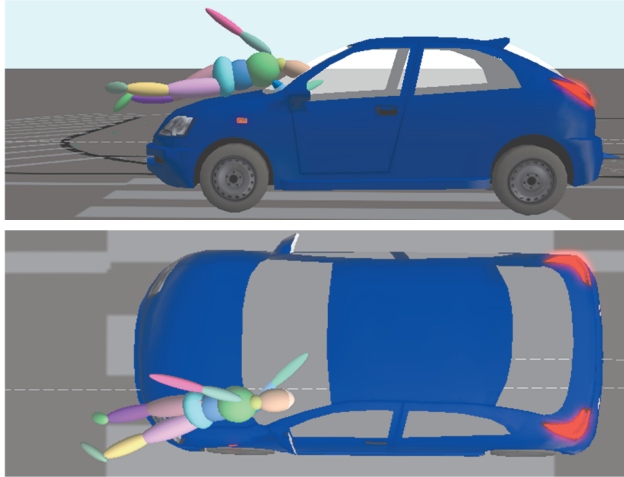


Ryc. 12. Obraz uszkodzeń samochodu Skoda Fabia oraz ustawienie pieszej względem pojazdu bezpośrednio przed potrąceniem.

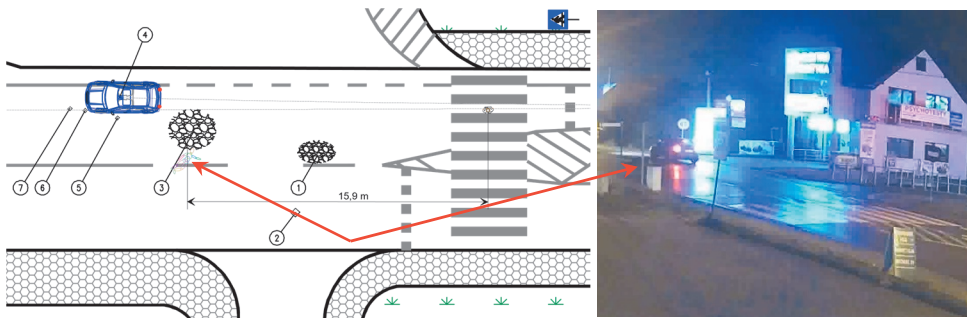
Fragment szkicu miejsca zdarzenia oraz widok pojazdu i pieszej bezpośrednio po potrąceniu zarejestrowany przez kamerę monitoringu pokazano na rycinie 15. Uzyskany z symulacji odrzut wzdłużny pieszej wynosił 16 m, natomiast odrzut poprzeczny wynosił 2,5 m. Na miejscu zdarzenia ustalono, że rzeczywisty odrzut wzdłużny pieszej wynosił 16,5 m natomiast odrzut poprzeczny wynosił ok. 2,7 m.



Ryc. 13. Położenie pieszej względem pojazdu w początkowej chwili potrącenia ustalone na podstawie monitoringu.



Ryc. 14. Uzyskane z symulacji położenie pieszej względem samochodu w chwili uderzenia głowy pieszej w szybę czołową.



Ryc. 15. Fragment szkicu miejsca zdarzenia z zaznaczeniem uzyskanego z symulacji położenia pieszej po potrąceniu oraz widok pojazdu i pieszej bezpośrednio po potrąceniu zarejestrowany przez kamerę monitoringu.

5. Podsumowanie

Podczas rekonstrukcji wypadków z udziałem pieszych, a w szczególności symulacji przebiegu takiego zdarzenia z wykorzystaniem wielobryłowego modelu człowieka, kluczowe jest prawidłowe określenie położenia pieszego względem pojazdu w początkowej chwili potrącenia. Do tego celu może być potrzebna analiza obrażeń pieszego dokonana przez medyka sądowego.

Położenie pieszego względem pojazdu w zasadniczy sposób wpływa na uzyskane w symulacji parametry dotyczące długości rozwinięcia pieszego na pojeździe oraz odrzutu wzdłużnego. Wielkości te mają bezpośredni wpływ na dokładność określenia prędkości zderzeniowej pojazdu.

Prędkość zderzeniową pojazdu podczas potrącenia pieszego można określić za pomocą wielokrotnych symulacji, w których doprowadza się do zgodności z rzeczywistymi takie parametry jak miejsce uderzenia głowy pieszego w pojazd i/lub odrzut wzdłużny pieszego. Parametry te zależą nie tylko od położenia pieszego względem pojazdu w początkowej chwili potrącenia, ale również od współczynnika tarcia pomiędzy pieszym a nadwoziem pojazdu oraz pomiędzy pieszym a nawierzchnią jezdni. Wraz ze wzrostem współczynnika tarcia pomiędzy ciałem pieszego a nadwoziem samochodu zmniejsza się odległość od zderzaka do miejsca uderzenia głowy w nadwozie – dla analizowanego przykładu od 1,85 m dla 0,2 do 1,65 m dla 0,8. Wraz ze wzrostem współczynnika tarcia pomiędzy ciałem pieszego a nadwoziem samochodu bardzo istotnie rośnie natomiast odległość odrzutu wzdłużnego – dla analizowanego przykładu od 17,5 m dla 0,2 do 32 m dla 0,8.

Konieczne są dalsze prace badawcze dotyczące weryfikacji wielobryłowego modelu pieszego, a szczególnie określenia niepewności uzyskanych wyników, która jest istotna ze względu na procesowe wykorzystanie wyników symulacji.

Wyniki symulacji wykazują, że przebieg potrącenia pieszego, a w szczególności długość rozwinięcia pieszego i odrzut wzdłużny zależą również od wymiarów charakterystycznych nadwozia pojazdu takich jak: wysokość krawędzi pokrywy komory silnika oraz jej długość, kąt nachylenia pokrywy komory silnika oraz kąt pochylenia szyby czołowej. Z tego powodu do symulacji potrącenia pieszego należy wybierać model 3D pojazdu odpowiadający, w zakresie powyższych parametrów, rzeczywistemu pojazdowi.

Bibliografia

- [1] Linder, A., Douglas, C., Clark, A. P., Fildes, B. N., Yang, J., Otte, D. (2005). Mathematical Simulations of Real-World Pedestrian-Vehicle Collisions. *Proceedings – 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Washington, D.C., June 6–9.
- [2] Lista nowych funkcjonalności V-SIM 5.0. Pobrane z: <https://cybid.com.pl/wp-content/uploads/2022/01/V-SIM-5.0-zestawienie-funkcjonalno%C5%9Bci-1.pdf> (dostęp: 1.06.2022 r.).
- [3] *MADYMO Human Body Models Manual*. Release 7.7. June 2017.
- [4] Shang, S., Masson, C., Llari, M., Py, M., Ferrand, Q., Arnoux, P. J., Simms, C. (2021). The predictive capacity of the MADYMO ellipsoid pedestrian model for pedestrian ground contact kinematics and injury evaluation. *Accident Analysis & Prevention*, 149.
- [5] Symon, E. (2022). *Wypadki drogowe w Polsce w 2021 roku*. Komenda Główna Policji. Warszawa.
- [6] Untaroiu, C. D., Meissner, M. U., Crandall, J. R., Takahashi, Y., Okamoto, M., Ito, O. (2009). Crash reconstruction of pedestrian accidents using optimization techniques. *International Journal of Impact Engineering*, 36 (2), 210–219.
- [7] Wierciński, J., Reza, A. (red.). (2006). *Wypadki drogowe. Vademecum biegłego sądowego*. Kraków: Wydawnictwo Instytutu Ekspertyz Sądowych.

- [8] Yin, S., Li, J., Xu, J. (2017). Exploring the mechanisms of vehicle front-end shape on pedestrian head injuries caused by ground impact. *Accident Analysis and Prevention*, 106, 285–296.

* * *

Pedestrian-Car Accident – possibility of reconstruction in V-Sim 5.0 program

Abstract

The article presents the results of a simulation of real pedestrian-car accidents in the new version of the V-Sim 5.0 program. The new multibody pedestrian model was employed in the simulations. The analysis covers the effect of individual model parameters as well as the parameters of pedestrian's motion and the relative pedestrian-vehicle position at the initial moment of the collision on the obtained results including the range of the pedestrian's being thrown onto the vehicle and his longitudinal recoil are analyzed.

Key words

Pedestrian-vehicle collisions, computer simulations, V-Sim 5.0. software.