



**Mirosław
Kędziński**

Wyniki symulacji biomechanicznych opracowanych za pomocą programów V-SIM i PC-Crash

Streszczenie

W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki symulacji biomechanicznych, uzyskanych za pomocą programu V-SIM i PC-Crash. W opracowanych przykładach przyjęto jednakowe główne parametry symulacji oraz wykorzystano uniwersalne i rzeczywiste sylwetki nadwozi pojazdów. Porównania dokonano na podstawie przykładów o różnym stopniu złożoności.

Słowa kluczowe

Wypadek drogowy, symulacja biomechaniczna, V-SIM, PC-Crash.

Otrzymano 30 września 2022 r., zatwierdzono do druku 13 listopada 2022 r.

DOI: 10.4467/15053520PnD.22.013.16962

1. Wstęp

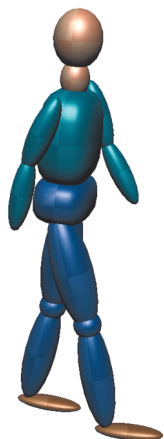
Obecnie w Polsce dostępne są dwa popularne programy symulacyjne zdarzeń drogowych wyposażone w wielobryłowy model ciała człowieka: PC-Crash i V-SIM. Modele wielobryłowe znajdują zastosowanie szczególnie w skomplikowanych analizach, gdy klasyczne metody analityczne nie mogą być zastosowane. Symulacje biomechaniczne, z racji uwzględnienia większej liczby indywidualnych parametrów zderzenia, pozwalają na większą precyzję rekonstrukcji zdarzeń drogowych. Jednak duża liczba modyfikowalnych parametrów takiej symulacji może powodować rozrzut wyników i wymaga od użytkownika większej kontroli podczas użycia tego narzędzia.

W niniejszym artykule przedstawiono zestawienie wyników symulacji potrącenia pieszego opracowanych za pomocą programów PC-Crash i V-SIM. Do tej analizy wykorzystano aktualnie najnowsze wersje obu programów, tj. PC-Crash 14.0 i V-SIM 5.0.39.

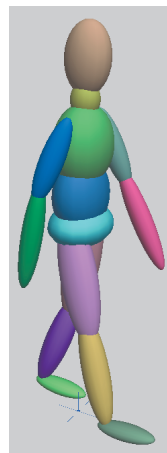
2. Wielobryłowe modele ciała człowieka

Zastosowany w programie PC-Crash wielobryłowy model ciała człowieka składa się z dwudziestu elipsoid połączonych dziewiętnastoma przegubami kulistymi (ryc. 1). Parametry geometryczne i mechaniczne tego układu zostały przyjęte w oparciu o parametry manekinów stosowanych w testach zderzeniowych [4]. Istniejący w programie moduł układu wielobryłowego umożliwia modyfikację wielkości jego parametrów, jak też zmianę m.in. rodzaju przegubów, czy też tworzenie dodatkowych połączeń [3, 5]. Należy jednak mieć na uwadze, iż modyfikacja tych parametrów musi mieć wiarygodne podstawy. Wielobryłowy model ciała człowieka w programie PC-Crash poza symulacją potrącenia pieszego umożliwia również jego wykorzystanie w licznych innych wariantach zdarzeń.

W programie V-SIM zastosowano natomiast wielobryłowy model ciała pieszego składający się z piętnastu segmentów połączonych przegubami kulistymi [1, 2] (ryc. 2).



Ryc. 1. Wielobryłowy model ciała człowieka zastosowany w programie PC-Crash.



Ryc. 2. Wielobryłowy model ciała człowieka zastosowany w programie V-Sim.

Opis modelu zastosowanego w programie V-SIM został w sposób bardziej szczegółowy przedstawiony w dwóch artykułach [1, 6]. Na potrzeby bieżącego artykułu warto zauważyć, że model wielobryłowy pieszego w programie V-SIM 5.0 wykorzystuje inny, bo bazujący na wielkości objętości wspólnej, algorytm kontaktu niż zastosowany w programie PC-Crash, który oparty jest na wielkości głębokości penetracji.

3. Warunki i przebieg symulacji

3.1. Parametry symulacji

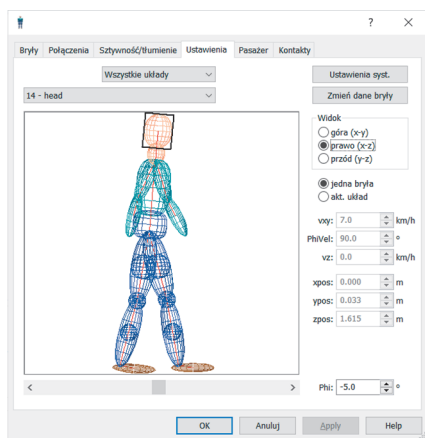
W celu sprawdzenia działania obu wielobryłowych modeli ciała człowieka i porównania otrzymanych wyników, opracowano w obu programach analogiczne symulacje o różnym stopniu złożoności:

- potrącenie centralne, pojazd niehamowany w chwili pierwszego kontaktu,
- potrącenie narożnikowe, pojazd niehamowany w chwili pierwszego kontaktu,
- potrącenie narożnikowe, pojazd hamowany, w fazie dynamicznego skrętu w chwili pierwszego kontaktu,

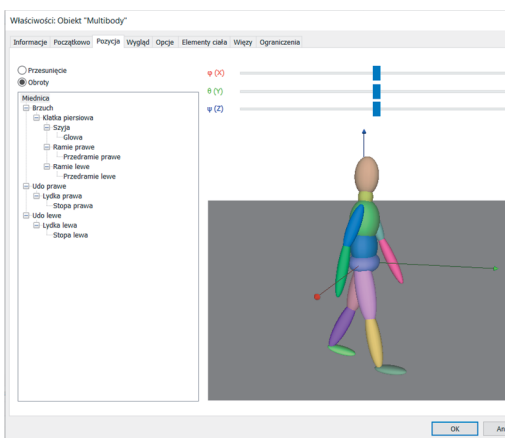
W celu zachowania porównywalnych warunków początkowych symulacji w obu programach przyjęto następujące, główne parametry modelu wielobryłowego:

- masa pieszego 80 kg,
- wzrost pieszego 1,74 m,
- współczynnik tarcia ciała o podłoże $\mu = 0,6$,
- współczynnik tarcia ciała o pojazd $\mu = 0,3$,
- współczynnik restytucji V-SIM $k = 0,3$, PC-Crash $k = 0,316$ (w tym przypadku nie ujednolicono wartości i pozostawiono parametry domyślne).

We wszystkich przykładach zamodelowano zbliżone pierwotne ułożenie ciała pieszego (ryc. 3 i 4).



Ryc. 3. Okno ustawień ułożenia modelu wielobryłowego w programie PC-Crash.



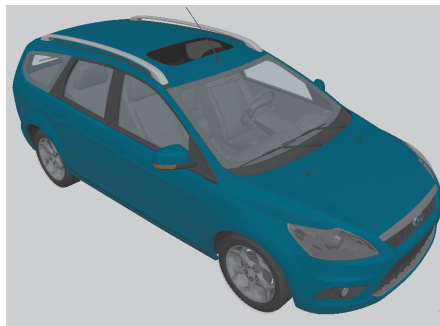
Ryc. 4. Okno ustawień pozycji modelu wielobryłowego w programie V-SIM.

Z baz danych pojazdów przyjęto ten sam model pojazdu, lecz ze względu na niewielkie różnice poszczególnych wartości masowo-geometrycznych ujednolicono je.

Na przyjęte modele pojazdów nałożono rzeczywiste sylwetki nadwozi (ryc. 5 i 6). Są to sylwetki bierne, przedstawiające wygląd nadwozia, które nie mają wpływu na kontakt modelu pieszego z pojazdem.



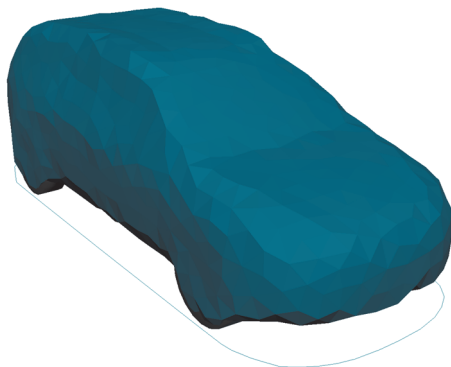
Ryc. 5. Rzeczywista, trójwymiarowa sylwetka samochodu w programie PC-Crash.



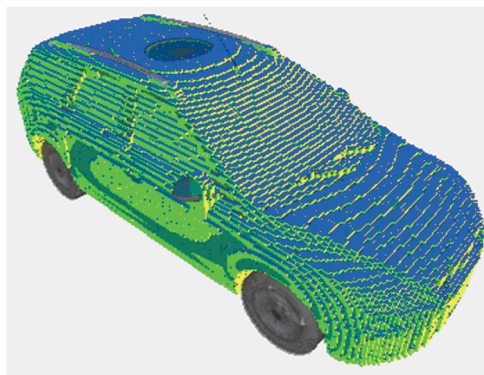
Ryc. 6. Rzeczywista, trójwymiarowa sylwetka samochodu w programie V-SIM.

Rzeczywiste, bierne sylwetki wybranych modeli pojazdów są nowością w programie V-Sim i są podstawą do tworzenia czynnych sylwetek trójwymiarowych wykorzystywanych w symulacji biomechanicznej.

Konstrukcje czynnych sylwetek pojazdów w obu programach różnią się. W programie PC-Crash sylwetka zbudowana jest z niewielkich striangulowanych powierzchni (ryc. 7), natomiast w programie V-SIM sylwetka złożona jest z wokseli o zadanej wielkości (ryc. 8).



Ryc. 7. Czynna, trójwymiarowa sylwetka samochodu w programie PC-Crash.



Ryc. 8. Czynna, trójwymiarowa sylwetka samochodu w programie V-SIM.

3.2. Potrącenie centralne

Opracowując symulacje potrącenia centralnego przyjęto następujące parametry:

- krok całkowania 0,1 ms,
- prędkość pieszego 7,0 km/h (orientacja wektora prędkości 90°),
- położenie początkowe środka masy pieszego $x = 0,0$ m, $y = 0,0$ m,
- prędkość pojazdu 50,0 km/h (orientacja wektora prędkości 0°),
- położenie początkowe środka masy pojazdu $x = -2,3$ m, $y = 0,0$ m,
- rozpoczęcie hamowania w chwili potrącenia (czas narastania siły hamowania $t = 0,3$ s; opóźnienie hamowania $a_h = 7,0$ m/s²).

Dla przyjętych parametrów oczekiwaną odległość odrzutu wzdłużnego ciała oszacowano w oparciu o badania Kühnela i Schultza. Wartość ta wynosi 17,2 m (ryc. 9).

RWD - Potrącenie pieszego - krok 9 [potracenie.paa]

Wyznacz prędkość pojazdu tuż przed uderzeniem

$$v_k = v' \left(1 + \frac{m_p}{m_v + m_p} \right) = 12.82 \text{ [m/s]} = 46.16 \text{ [km/h]}$$

gdzie:

masa pieszego:

m_p : [kg]

masa pojazdu:

m_v : [kg]

v' : 12.12 [m/s] = 43.64 [km/h]

Jeżeli została spełniona warunki: samochód osobowy, pełne potrącenie dorosłego, hamowanie na całym odcinku s z a_{k2} zmianą 4.5=8.0 m/s², sprawdź czy powyższej obliczona prędkość v_k mieści się w przedziale wynikającym z badań Kühnela (1980) i Schultza (1996):

$$v_{k,c} < = \frac{-0.0783 + \sqrt{0.0783^2 + 4 \cdot 0.0052 \cdot z_w}}{2 \cdot 0.0783} = 50 \pm 5 \text{ [km/h]}$$

gdzie:

odległość odrzutu pieszego:

s_w : [m]

W przypadku ratującej niezgodności sprawdź poprawność przyjętych danych, a zwłaszcza położenie punktu K.

< Wstecz Dalej > Anuluj Pomoc

Ryc. 9. Odległość odrzutu wzdłużnego ciała pieszego obliczona w oparciu o badania Kühnela i Schultza w programie RWD – Potrącenie pieszego.

Opracowując symulacje dla założonych przykładowych parametrów uwzględniono prawdopodobne – z punktu widzenia biomechaniki – ułożenie ciała pieszego bezpośrednio przed potrąceniem. Zaobserwowano wyraźną czułość obu modeli wielobryłowych na zmianę ułożenia ciała w chwili potrącenia. Zmiana występuje nawet w przypadku nieznacznego odchylenia kąтового jednego z elementów modelu pieszego. Niemniej jednak przy zbliżonych wizualnie pozycjach pieszego w chwili pierwszego kontaktu uzyskane wyniki odrzutu wzdłużnego w obu symulacjach były bardzo zbliżone. Nieco większe różnice występowały w przypadku odrzutu poprzecznego. Zwykle w symulacjach opracowanych w programie V-SIM odrzut poprzeczny i podrzut pionowy¹ były większe od analogicznych wartości uzyskanych w symulacji opracowanej za pomocą programu PC-Crash.

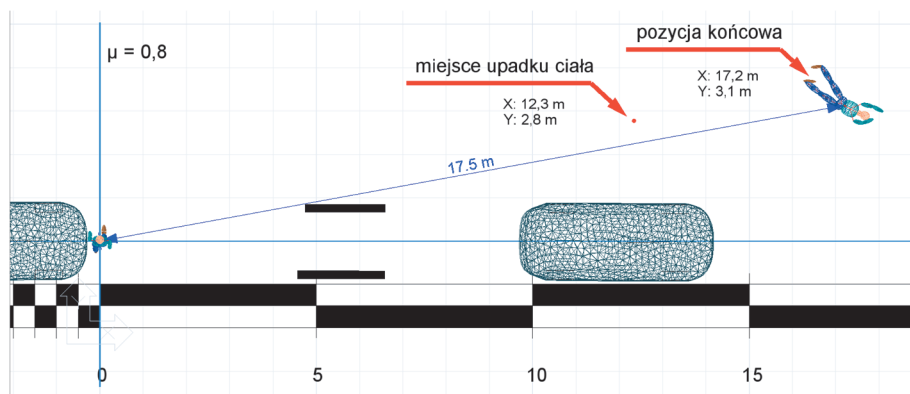
¹ Wysokość wyrzucenia manekina ponad poziom podłoża.

Chcąc odczytać wielkość pionowego podrzutu ciała pieszego należy wygenerować wykres pionowego przemieszczenia konkretnego elementu modelu wielobryłowego, gdyż programy nie umożliwiają wyświetlenia wykresu przemieszczenia środka ciężkości. W tym przypadku w programie PC-Crash wybrano wykres przemieszczenia bioder, a w programie V-SIM miednicy.

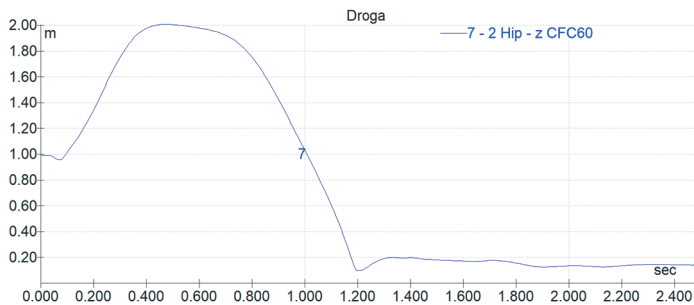
Poniżej przedstawiono wybrane wartości poszczególnych symulacji potrącenia centralnego w formie tabelarycznej (tab. 1) i przykładowe rysunki płaskie (ryc. 10–13).

Tabela 1. Wybrane wyniki z symulacji potrącenia centralnego.

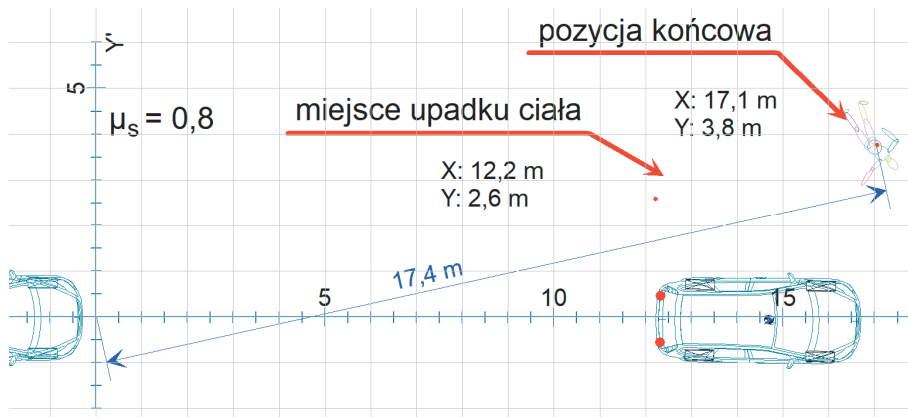
Nr symulacji i program	Odrzut wzdłużny [m]	Odrzut poprzeczny [m]	Podrzut miednicy/bioder [m]	Uwagi
1. PC-Crash	17,2	3,2	0,9	nadwozie domyślne
2. V-SIM	17,2	3,0	1,2	nadwozie kombi
3. PC-Crash	17,2	3,1	1,1	nadwozie rzeczywiste
4. V-SIM	16,7	3,8	1,2	nadwozie rzeczywiste
5. PC-Crash	17,0	2,8	1,0	korekta prawego uda o +5°
6. V-SIM	17,1	3,8	1,1	korekta prawego ramienia



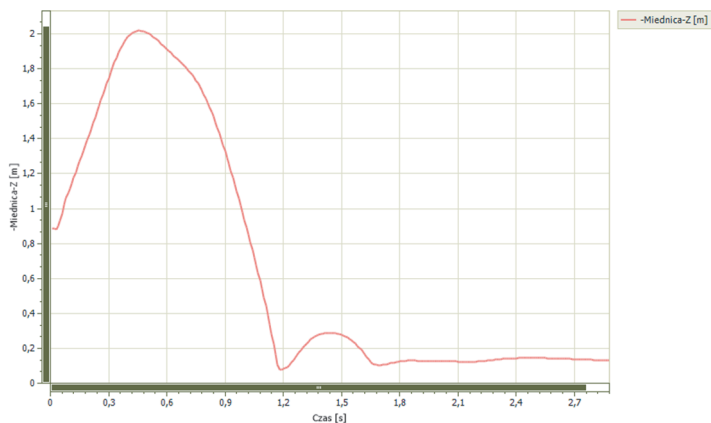
Ryc. 10. Rysunek płaski symulacji nr 3 potrącenia centralnego opracowanej w programie PC-Crash.



Ryc. 11. Przykładowy wykres pionowego przemieszczenia bioder (symulacja nr 3, program PC-Crash).



Ryc. 12. Rysunek płaski symulacji nr 6 potrącenia centralnego opracowanej w programie V-SIM.



Ryc. 13. Przykładowy wykres pionowego przemieszczenia miednicy (symulacja nr 4, program V-SIM).

3.3. Potrącenie narożnikowe

Kolejnym wariantem symulacji było potrącenie narożnikowe, w przypadku którego istotny wpływ na wynik mają składowe poprzeczne impulsu uderzenia wynikające z kształtu nadwozia.

W tej symulacji, w celu uzyskania efektu kontaktu narożnikowego, zmieniono jedynie położenie poprzeczne pojazdu ($x = -2,3$ m, $y = 0,7$ m). Pozostałe parametry nie uległy zmianie.

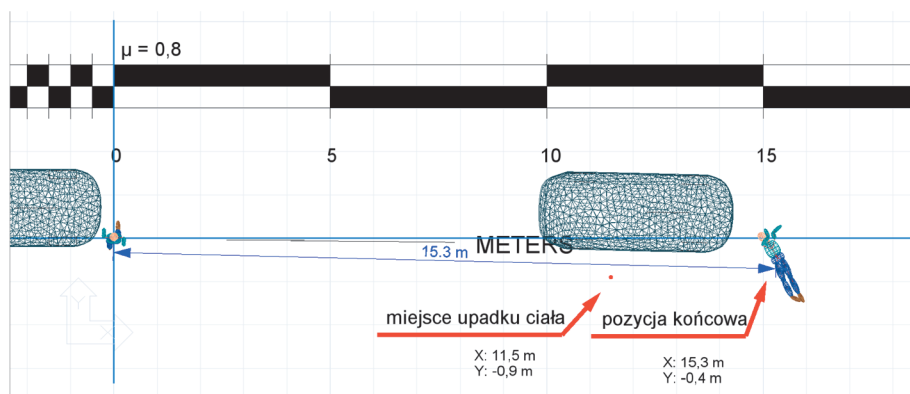
W tym przypadku zaobserwowano istotny wpływ kształtu nadwozia na odrzut ciała pieszego. W obu programach uzyskano różne wyniki przy zastosowaniu sylwetek uniwersalnych i rzeczywistych. Zastosowanie rzeczywistych aktywnych sylwetek pojazdów w obu programach umożliwiło uzyskanie zbliżonych wyników.

Wykonując symulację w programie V-SIM należy mieć na uwadze, iż model pojazdu nie uwzględnia przekazania pędu pojazdowi i nie występuje spadek jego prędkości w wyniku zderzenia.

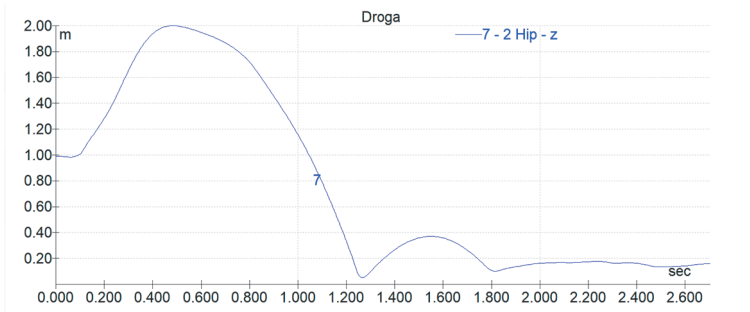
Poniżej przedstawiono wybrane wartości poszczególnych symulacji potrącenia narożnikowego w formie tabelarycznej (tab. 2) i przykładowe rysunki płaskie (ryc. 14–17).

Tabela 2. Wybrane wartości symulacji potrącenia narożnikowego.

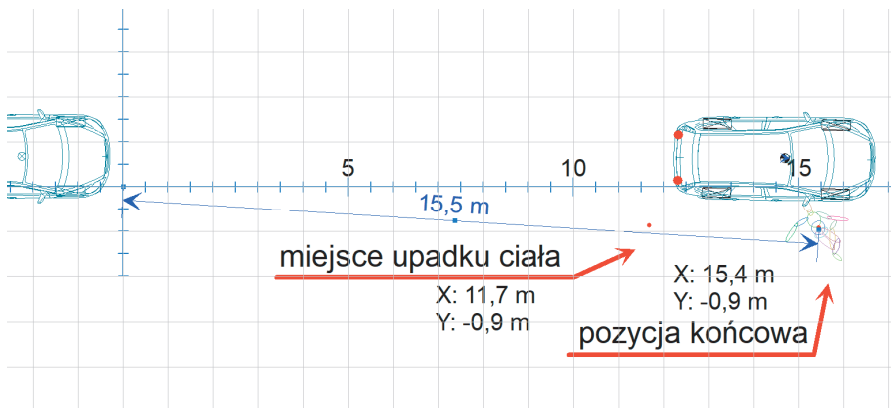
Nr symulacji i program	Odrzut wzdłużny [m]	Odrzut poprzeczny [m]	Podrzut miednicy/bioder [m]	Uwagi
7. PC-Crash	18,2	2,6	1,1	nadwozie domyślne
8. V-SIM	19,9	-1,1	1,3	nadwozie kombi
9. PC-Crash	15,3	-0,4	1,0	nadwozie rzeczywiste
10. V-SIM	15,4	-0,9	1,2	nadwozie rzeczywiste



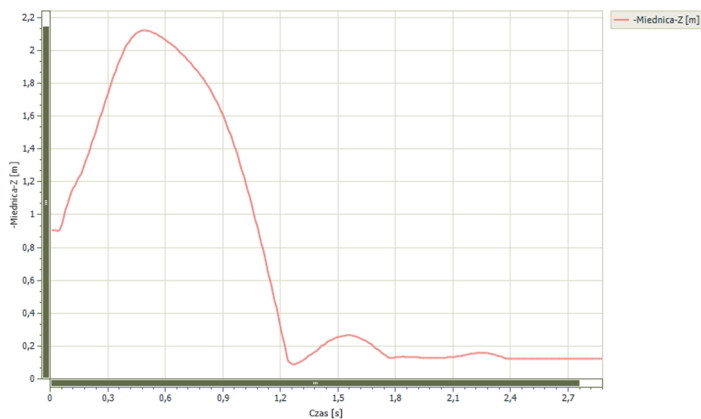
Ryc. 14. Rysunek płaski symulacji nr 9 potrącenia narożnikowego opracowanej w programie PC-Crash.



Ryc. 15. Wykres pionowego przemieszczenia bioder (symulacja nr 9, program PC-Crash).



Ryc. 16. Rysunek płaski symulacji nr 10 potrącenia narożnikowego opracowanej w programie V-SIM.



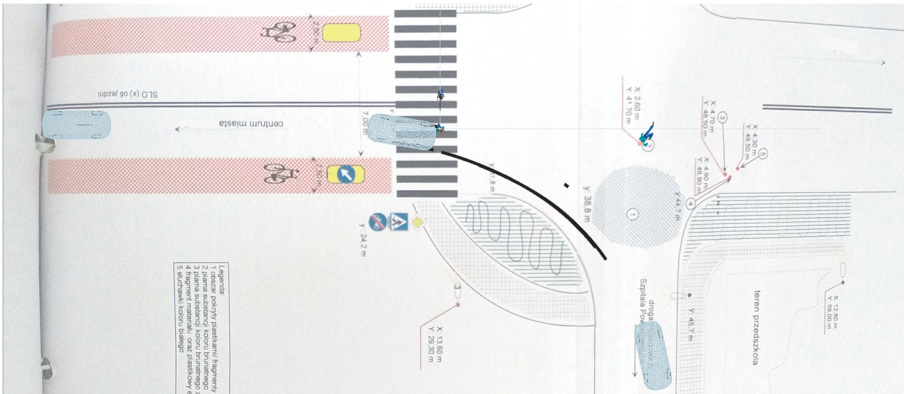
Ryc. 17. Wykres pionowego przemieszczenia miednicy (symulacja nr 10, program V-SIM).

3.4. Analiza rzeczywistego zdarzenia

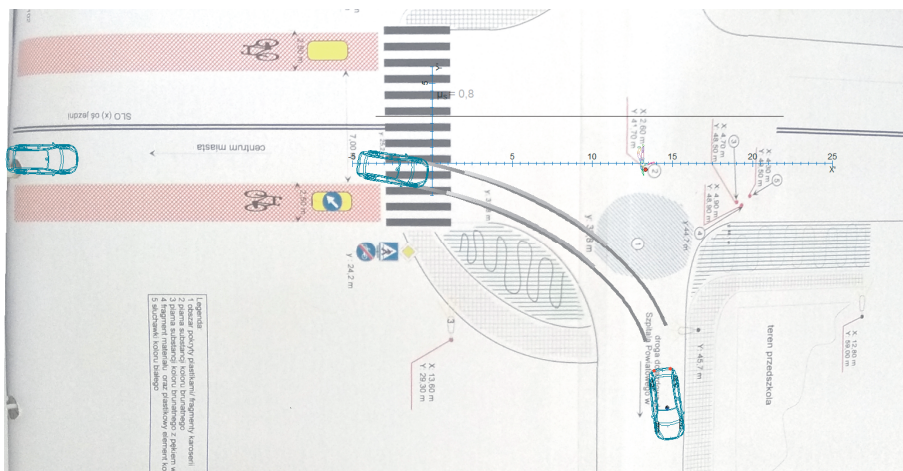
Na zakończenie oba modele wielobryłowego ciała człowieka wykorzystano do weryfikacji miejsca potrącenia pieszej podczas rzeczywistego wypadku drogowego.

W analizowanym przypadku zasób dowodów materialnych nie pozwalał na ustalenie położenia pieszej w chwili potrącenia i należało dokonać weryfikacji istniejącej wersji. Mechanizm potrącenia był szczególnie złożony z uwagi na potrącenie narożnikowe i ruch samochodu w fazie gwałtownego skrętu i hamowania. Z tych względów analityczne metody nie miały zastosowania. Podjęto więc próbę ustalenia, czy przy prędkości kolizyjnej samochodu wynoszącej 50 km/h i prędkości pieszej w zakresie normalnego kroku prawdopodobne było, że w chwili potrącenia znajdowała się ona w obrębie przejścia dla pieszych. Jako parametr kontrolny biomechanicznej symulacji potrącenia przyjęto rozkład śladów kontaktu z ciałem pieszej na przodzie samochodu oraz powypadkowe położenie pieszej i samochodu.

Wyniki obu symulacji uwzględniających przyjęte założenia wykazały, iż w danych warunkach piesza mogła znajdować się w rejonie przejścia dla pieszych w chwili jej potrącenia. Wyniki uzyskane w obu programach były zbliżone do siebie, różnica odrzutu wzdłużnego wynosiła 0,5 m, a poprzecznego 0,7 m. Poniżej przedstawiono wyniki tych symulacji (ryc. 18 i 19).



Ryc. 18. Symulacja rzeczywistego potrącenia opracowana w programie PC-Crash.



Ryc. 19. Symulacja rzeczywistego potrącenia opracowana w programie V-SIM.

Powyższy przykład wskazuje, iż w praktyce rekonstrukcyjnej występują złożone przypadki zdarzeń, w których mogą być zastosowane jedynie metody symulacyjne.

4. Konkluzje

Przeprowadzone symulacje wykazują dużą zgodność wyników uzyskanych za pomocą dwóch, różnych wielobryłowych modeli pieszych, szczególnie w kwestii odległości odrzutu wzdłużnego ciała pieszego.

Oba modele są czułe na zmianę ułożenia poszczególnych elementów ciała. Mając na uwadze, iż w rekonstrukcji zdarzeń zwykle nieznana jest rzeczywista pozycja pieszego w chwili potrącenia, celowym wydaje się przeprowadzenie kilku symulacji uwzględniających pozycje prawdopodobne z punktu widzenia biomechaniki.

Przyjęty do symulacji kształt nadwozia ma wpływ na odrzut ciała pieszego. Szczególnie w przypadku potrącenia narożnikowego wskazane jest zastosowanie rzeczywistej sylwetki nadwozia pojazdu. Przyjęcie takiego kształtu indywidualizuje analizę konkretnego wypadku.

Wielobryłowe modele ciała pieszego sprawdzają się szczególnie w skomplikowanych analizach, gdy klasyczne metody analityczne nie mogą być zastosowane.

Przedstawione w niniejszym opracowaniu zestawienie wyników symulacji opiera się na ograniczonej liczbie symulacji i nie należy ich traktować jako wyniku badań statystycznych. Ewentualne zastosowanie optymalizatora umożliwiającego zadanie prawdopodobnego zakresu ułożenia ciała pieszego w chwili pierwszego kontaktu umożliwiłoby określenie pełnego rozkładu wyników.

Bibliografia

1. Bułka, D., Wdowicz, D., Putanowicz, R., Kędziora, K. (2021). Nowy model wielobryłowy pieszego do symulacji zderzeń. *Paragraf na Drodze*, numer specjalny. Kraków: Wydawnictwo Instytutu Ekspertyz Sądowych.
2. CYBID V-SIM 5.0. *Symulacja ruchu i zderzeń pojazdów samochodowych. Instrukcja użytkownika*.
3. PC-Crash. *A Simulation Program for Vehicle Accidents. Operating and Technical Manual*. Version 14.0.
4. Wach, W. (1999). Wprowadzenie do symulacji biomechanicznej. *Paragraf na Drodze*, 12.
5. Wach, W. (2001). *PC-Crash Program do symulacji wypadków drogowych. Poradnik użytkownika*. Kraków: Wydawnictwo Instytutu Ekspertyz Sądowych.
6. Wdowicz, D., Bułka, D. (w druku). Model pieszego CYBID Multibody. Specyfikacja, generator modelu, prace badawcze nad rozwojem modelu. *Paragraf na Drodze*.

* * *

Preliminary results of biomechanical simulations using V-SIM and PC-Crash software

Abstract

The article presents preliminary results of biomechanical simulations carried out using V-SIM and PC-Crash software packages. In both environments similar simulation parameters were adopted. Both universal and real vehicle body shapes were used. The comparison between the two software packages was done based on examples of different levels of complexity.

Key words

Road accident, V-SIM and PC-Crash software packages, biomechanical simulation.