

DARIUSZ BULKA¹

ORCID: 0000-0003-4425-8217

DANIEL WDOWICZ²

ORCID: 0000-0001-7334-8110

ROMAN PUTANOWICZ³

ORCID: 0000-0002-5480-8553

WYKORZYSTANIE I WSPIERANIE ROZWOJU PLATFORM SYMULACYJNYCH WYPOSAŻONYCH W MODELE BIOMECHANICZNE CIAŁA CZŁOWIEKA W CELU POPRAWY BEZPIECZEŃSTWA UCZESTNIKÓW RUCHU DROGOWEGO

Wstęp

Symulacje komputerowe są kluczowym elementem zarówno rekonstrukcji zdarzeń, jak i ich predykcji. W obszarze bezpieczeństwa wewnętrznego spotykamy się z wieloma sytuacjami o charakterze wypadków komunikacyjnych, zdarzeń kryminalnych, zdarzeń pożarowych czy podobnych, dla których komputerowa analiza ich przebiegu jest obecnie standardowym podejściem⁴. W środowiskach specjalistycznych, np. w przemyśle motoryzacyjnym, niektóre analizy są przenoszone w całości do środowisk wirtualnych⁵.

W analizie przebiegu tych zdarzeń często niezwykle istotnym elementem jest badanie znaczenia ludzi jako sprawców i uczestników oraz wpływu tych zdarzeń na życie i zdrowie.

¹ Mgr inż. Dariusz Bułka — CYBID sp. z o.o. sp.k.

Adres do korespondencji: <dariusz.bulka@cybid.com.pl>.

² Mgr inż. Daniel Wdowicz — Politechnika Wrocławska, CYBID sp. z o.o. sp.k.

Adres do korespondencji: <daniel.wdowicz@pwr.edu.pl>.

³ Dr inż. Roman Putanowicz — CYBID sp. z o.o. sp.k.

Adres do korespondencji: <roman.putanowicz@cybid.com.pl>.

⁴ S. Nogayeva, J. Gooch, N. Frascione, *The forensic investigation of vehicle–pedestrian collisions*, “Science & Justice”, Vol. 61(2), s. 112–118, DOI: 10.1016/j.scijus.2020.10.006; J. Wierciński, A. Reza (red.), *Wypadki drogowe. Vademecum biegłego sądowego*, Wydawnictwo Instytutu Ekspertyz Sądowych, Kraków 2011.

⁵ C. Klug, J. Ellway, *Technical Bulletin TB024. Pedestrian Human Model Certification 3.0.1*, European New Car Assessment Programme, November 2021.

Szczególną podgrupą analiz dotyczących zachowania człowieka są analizy odpowiedzi mechanicznej ciała człowieka na oddziaływania zewnętrzne, czyli tzw. analizy biomechaniczne. Uwzględnienie w symulacjach komputerowych oddziaływania różnych czynników na ciało człowieka jest bardzo skomplikowanym zagadnieniem. Składa się na to ogromna złożoność biomechaniczna człowieka — interakcja pomiędzy różnymi podsystemami, rozpiętość skal czasowych i przestrzennych zachodzących zjawisk, trudności uzyskiwania pomiarów i monitorowania przebiegu zdarzeń itp.⁶ Jednym ze sposobów rozwiązywania powyższych problemów jest budowa modeli matematycznych analizujących tylko wybrane aspekty — np. skupiając się przede wszystkim na biomechanice sportu lub biomechanice ruchu⁷, z ograniczonymi możliwościami modelowania zderzeń. Innym podejściem jest upraszczanie zjawisk poprzez nakładanie dalszych ograniczeń i uproszczeń, np. założenie nieodkształcalności ciała, idealizacja więzów, pomijanie aktywnej kontroli mięśni⁸.

W szczególności takie techniki są wykorzystywane w tzw. biomechanice zderzeń lub biomechanice udarowej⁹, czyli dziedzinie biomechaniki zajmującej się obciążeniami o krótkim czasie działania i znacznych amplitudach. Biomechanika zderzeń jest stosowana m.in. do celów analizy przebiegu zjawisk takich jak wypadki drogowe (w tym wypadki z pieszymi¹⁰, rowerzystami¹¹ lub użytkownikami hulajnog¹²), upadki z wysokości¹³ lub wypadki przy pracy¹⁴.

⁶ E.H. Knox i in., *Methods of accident reconstruction: Biomechanical and human factors considerations*, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE) 2015, 14–2015, DOI: 10.1115/IMECE2015-53666.

⁷ M. Damsgaard in., *Analysis of musculoskeletal systems in the AnyBody Modeling System*, "Simulation Modelling Practice and Theory" 2006, Vol. 14(8), s. 1100–1111, DOI: 10.1016/j.simpat.2006.09.001.

⁸ M. Jaškiewicz, D. Frej, M. Poliak, *Simulation of a Dummy Crash Test in Adams*, "Communications — Scientific Letters of the University of Zilina" 2022, Vol. 24(1), B20–B28, DOI:10.26552/com.C.2022.1.B20–B28; J. Wismans, J. Van Wijk, *Mathematical Models for the Assessment of Pedestrian Protection Provided by a Car Contour*, 9th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, 1982.

⁹ C. Rzymkowski, *Selected aspects of the experimental methods of impact biomechanics*, "Vibrations in Physical Systems" 2016, Vol. 27.

¹⁰ F.A.O. Fernandes, R.J.A. de Sousa, M. Ptak, *Head injury simulation in road traffic accidents*, Cham: Springer 2018.; D. Wdowicz, M. Ptak, *Numerical Approaches to Pedestrian Impact Simulation with Human Body Models: A Review*, "Archives of Computational Methods in Engineering" 2023, DOI:10.1007/s11831-023-09949-2.

¹¹ M. Paudel i in., *A computational study on the basis for a safe speed limit for bicycles on shared paths considering the severity of pedestrian head injuries in bicyclist-pedestrian collisions*, "Accident Analysis and Prevention" 2022, Vol. 176, DOI:10.1016/j.aap.2022.106792.

¹² M. Ptak i in., *Analysis of electric scooter user kinematics after a crash against SUV*, "PLOS ONE" 2022, Vol. 17 (1 January), DOI: 10.1371/journal.pone.0262682.

¹³ G. Pascoletti i in., *A multibody simulation of a human fall: Model creation and validation*, "Procedia Structural Integrity" 2019, Vol. 24, s. 337–348, DOI: 10.1016/j.prostr.2020.02.031; W. Wach, J. Unarski, *Fall from height in a stairwell — mechanics and simulation analysis*, "Forensic Science International" 2014, Vol. 244, s. 136–151, DOI:10.1016/j.forsciint.2014.08.018.

¹⁴ M. Milanowicz, P. Budziszewski, K. Kędzior, *Numerical analysis of passive safety systems in forklift trucks*, "Safety Science" 2018, Vol. 101, s. 98–107, DOI:10.1016/j.ssci.2017.07.006; M. Milanowicz, P. Budziszewski, *Numerical reconstruction of the real-life fatal accident at work: A case study*, "Lecture Notes in Computer Science" (including sub-

Istnieje wiele modeli biomechanicznych ciała człowieka, jednak część z nich jest rozwijanych wyłącznie na potrzeby pojedynczych badań i uniwersalność ich zastosowania bywa ograniczona. Model matematyczny ciała człowieka, aby był przydatny na co dzień dla specjalistów z dziedziny bezpieczeństwa wewnętrznego (biegłych sądowych, oficerów policji), nie może być rozwijany i stosowany w próżni — taki model musi być częścią kompletnej platformy symulacyjnej.

Określenie platforma symulacyjna nie ma jednej ugruntowanej definicji. W artykule pod tym pojęciem rozumiany jest zestaw rozwiązań informatycznych — programów, bibliotek, API (*Application Programming Interface*), formatów danych, zaprojektowanych z jednej strony tak, by dostarczyć użytkownikowi maksymalnie efektywnych narzędzi do rozwiązywania problemów w określonym obszarze zastosowań, a z drugiej strony ułatwiających dalszą rozbudowę, modyfikacje oraz utrzymanie. Przeniesienie uwagi z jednego narzędzia komputerowego na cały „ekosystem” narzędzi jest obecnie jednym z kluczowych elementów nowoczesnych rozwiązań dla symulacji komputerowych, w tym dla symulacji w obszarze bezpieczeństwa.

Praktyka analiz rzeczywistych zdarzeń wskazuje bowiem, że:

- bardzo często w analizie zagadnień bezpieczeństwa mamy do czynienia z połączeniem zdarzeń o różnym charakterze, np. wymagających rekonstrukcji mechanicznej połączonej z analizą kryminalistyczną (np. analizą plam krwawych) lub połączenia modelowania zachowania pieszego z dynamiką ruchu samochodu wykonującego skomplikowany manewr,
- spójna platforma symulacyjna obniża koszty użytkowania (utrzymanie oprogramowania, szkolenia, uproszczenie zarządzania danymi),
- wspólna dla różnych obszarów zastosowań platforma symulacyjna pozwala obniżyć koszty implementacji w tym szczególnie koszty testowania.

Platforma CYBID

Wspomniane powyżej uwarunkowania były podstawą dla rozwijania wielobryłowego modelu ciała ludzkiego w ramach projektu: *Wielobryłowy model ciała człowieka do analizy wypadków drogowych*, Nr: POIR.01.01.01-00-0758/16.

Podstawowym obszarem zastosowań stworzonego modelu są symulacje dynamiki ciała człowieka jako pieszego lub pasażera pojazdu w dowolnych zdarzeniach drogowych (np. potrącenia czy kolizje). Z uwagi na zaprojektowaną uniwersalność modelu może on być również dostosowany do analiz innego typu, takich jak na przykład wypadki przy pracy (upadki z wysokości) czy zdarzenia kryminalne (uderzenia, popchnięcia).

W przypadku modelu ciała człowieka prawidłowość jego działania została poddana walidacji, bazując na porównaniu z rzeczywistymi wypadkami¹⁵ oraz z opisanymi w literaturze przedmiotu badaniami eksperymentalnymi

series Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) 2013, Vol. 8026 LNCS (Issue PART 2, s. 101–110), DOI: 10.1007/978-3-642-39182-8_12.

¹⁵ D. Bułka i in., *Nowy model wielobryłowy pieszego do symulacji zderzeń*, „Paragraf Na Drodze” 2021, numer specjalny.

na tkance ludzkiej¹⁶. Odpowiedź modelu dodatkowo zweryfikowano na bazie porównania z innym programem symulacyjnym. W obu programach dla podobnej sytuacji drogowej (wzrost i masa komputerowych modeli ciała pieszego, model samochodu, prędkość kolizyjna, warunki hamowania) wykonano numeryczną symulację potrącenia pieszego. Analizując wyniki symulacji, zauważono zbliżone odpowiedzi obu programów w zakresie odległości odrzutu wzdłużnego ciała pieszego (tj. dystansu przebytego od punktu potrącenia do miejsca spoczynku ciała) oraz wysokości lotu ciała pieszego¹⁷.

Powyższe aspekty modelu czynią go jednym z ważniejszych elementów programu CYBID V-SIM będącego częścią platformy symulacyjnej znajdującej zastosowanie w rozwiązywaniu problemów bezpieczeństwa wewnętrznego. Platforma ta zawiera szerokie możliwości w zakresie modelowania środowiska symulacji (m.in. w celu odtworzenia otoczenia, w którym doszło do zdarzenia, w tym elementów oświetlenia¹⁸) oraz modelowania pojazdów mechanicznych¹⁹.

Rycina 1

Przykład środowiska symulacji zamodelowanego w platformie symulacyjnej V-SIM



Źródło: zdjęcie udostępnione przez CYBID

Program zawiera także istotne funkcjonalności pozwalające na wykorzystanie bezpośrednio materiału dowodowego takiego jak zarejestrowane za pomocą tachimetru położenie śladów, nagrania wideo²⁰ lub chmury punktów ze skanerów 3D (rycina 2).

¹⁶ D. Wdowicz, D. Bułka, *Model ciała człowieka CYBID Multibody Pieszy. Specyfikacja, generator modelu, prace badawcze nad rozwojem modelu*, „Paragraf Na Drodze” 2022, nr 3, s. 41–56, DOI: 10.4467/15053520PnD.22.016.16986.

¹⁷ M. Kędzierski, *Wyniki symulacji biomechanicznych opracowanych za pomocą programów V-SIM i PC-Crash*, „Paragraf Na Drodze” 2022, nr 2, s. 91–102, DOI: 10.4467/15053520PnD.22.013.16962.

¹⁸ K. Kędziora, S. Cichoński, K. Ruchała, *Założenia modelowania oświetlenia w programie V-SIM 5.0*, „Paragraf Na Drodze” 2021, nr 4.

¹⁹ W. Grzegożek, P. Świder, *Nowy program do symulacji ruchu pojazdów i zderzeń “V-SIM”. Wstępna ocena przydatności do celów ekspertyzy sądowej*, „Paragraf Na Drodze” 2003, nr 8, <<https://cybid.com.pl/wp-content/uploads/2020/04/Nowy-Program-V-SIM.pdf>>, 4 października 2023 r.

²⁰ W. Winiarska, K. Kędziora, *Rekonstrukcja potrącenia pieszego, udokumentowane na nagraniu wideo, przy wykorzystaniu programu Photorect 2.0*, „Paragraf Na Drodze” 2022, nr 3, s. 71–88, DOI: 10.4467/15053520pnd.22.018.16988.

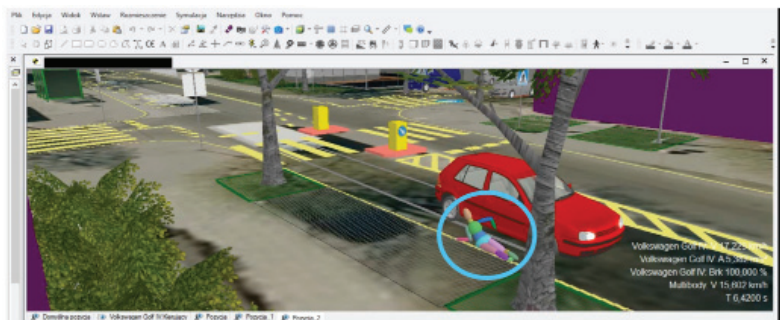
Rycina 2
Chmura punktów zarejestrowana skanerem 3D wykorzystana do wizualizacji miejsca zdarzenia drogowego w ramach symulacji ruchu pojazdu uwzględniającej zjawiska dynamiczne



Źródło: zdjęcie udostępnione przez CYBID

Dzięki możliwościom kompletnej platformy symulacyjnej, model ciała człowieka znalazł zastosowanie w praktyce rekonstrukcji wypadków drogowych z pieszymi²¹.

Rycina 3
Model wielobryłowy ciała człowieka (zaznaczony kółkiem, widoczny koło pojazdu) wykorzystany w ramach platformy symulacyjnej V-SIM (W tym przypadku zastosowany jest do wykonania symulacji potrącenia pieszego i porównania jej z rzeczywistym przypadkiem potrącenia)



Źródło: zdjęcie udostępnione przez CYBID

Platforma symulacyjna z modelem ciała człowieka została także zaprojektowana pod kątem badań o dużej skali. W biomechanice zderzeń często stosowaną techniką jest uruchamianie wielu tysięcy symulacji²², każdej

²¹ R. Janczur, J. Zawaleń, *Rekonstrukcja i analiza przebiegu wypadku z udziałem pieszego przy wykorzystaniu programu V-SIM 5.0 — przykłady*, „Paragraf Na Drodze” 2022, nr 3, DOI: 10.4467/15053520PnD.22.010.16959; S. Walczak, *Wypadki z udziałem pieszych — możliwości rekonstrukcji w programie V-Sim 5.0*, „Paragraf Na Drodze” 2022, nr 3, s. 89–102, DOI: 10.4467/15053520PnD.22.019.16989.

²² T. Zou i in., *Methods, upper limit and reason for reducing pedestrian ground contact*

o różnym zestawie parametrów, w celu uzyskania informacji o możliwym z punktu widzenia fizyki przebiegu danego zdarzenia. CYBID V-SIM oferuje takie możliwości za pomocą dodanego do niego interfejsu skryptowego²³, za pomocą którego użytkownik znający podstawy programowania jest w stanie wygenerować dane liczbowe lub zrzuty ekranu. Tak wygenerowane wyniki symulacji mogą pomóc w rozpatrywaniu setek wariantów danego zdarzenia, aby określić najbardziej prawdopodobny scenariusz lub utworzyć rozległe bazy danych dające się wykorzystać np. w algorytmach uczenia maszynowego lub sztucznej inteligencji.

Potencjał badawczy — współpraca naukowców, służb oraz programistów

Potrzeba wyposażenia platformy CYBID V-SIM w model ciała człowieka wynikała z potrzeb praktyków oraz naukowców w kraju i na świecie. Środowiska badawcze w innych krajach europejskich i światowych bardzo często korzystają ze środowisk symulacyjnych do analiz zdarzeń drogowych. Poniżej omówione zostaną przykładowe badania.

Badacze z Niemiec²⁴ analizowali niemiecką bazę danych o wypadkach GIDAS (ang. *German In-Depth Accident Study*; niemieckie szczegółowe studium wypadków). Analizowany przez badaczy wycinek bazy zawierał szczegółowe dane o ponad 8000 wypadków z niechronionymi uczestnikami ruchu drogowego (pieszymi, motocyklistami, rowerzystami). W tej bazie danych znajdowały się nie tylko szkice policyjne, pomiary skanerami 3D, ale także dane o obrażeniach odniesionych przez poszkodowanych, określone za pomocą skali AIS, (ang. *Abbreviated Injury Scale*)²⁵. Skala AIS pozwala na opisanie obrażeń za pomocą wartości numerycznych, co wspomaga proces analizy baz danych o obrażeniach. Przykładowo — złamany mostek określony został jako AIS2 (obrażenie umiarkowane), a przerwanie wątroby określone zostałoby jako AIS5 (obrażenie krytyczne)²⁶. Narzędziem wspomagającym badaczy z Niemiec był austriacki pakiet symulacyjny PC-CRASH. Badanie finalnie dostarczyło wielu informacji m.in. na temat typów obrażeń, jakie ponoszą niechronieni uczestnicy ruchu drogowego oraz

injury by controlling vehicle braking, "International Journal of Crashworthiness" 2022, Vol. 27(4), s. 1140–1151, DOI: 10.1080/13588265.2021.1910399.

²³ D. Wdowicz, D. Bułka, *Model...*, wyd. cyt., s. 41–56.

²⁴ D. Otte, M. Jänsch, C. Haasper, *Injury protection and accident causation parameters for vulnerable road users based on German In-Depth Accident Study GIDAS*, "Accident Analysis & Prevention" 2012, Vol. 44(1), s. 149–153, DOI: 10.1016/j.aap.2010.12.006.

²⁵ L. Greenspan, B.A. McLellan, H. Greig, *Abbreviated injury scale and injury severity score: A scoring chart*, "Journal of Trauma — Injury, Infection and Critical Care" 1985, Vol. 25(1), s. 60–64, DOI:10.1097/00005373-198501000-00010.

²⁶ Skala AIS w literaturze polskojęzycznej została omówiona m.in. w pozycjach: J. Wierciński, A. Reza (red.), *Wypadki...*, wyd. cyt.; G. Teresiński (red.), *Medycyna sądowa. Tom 1. Tanatologia i traumatologia sądowa*, PZWL, Warszawa 2019; J. Wicher i in., *Podstawa rekonstrukcji wypadków drogowych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.

jaki jest związek między zachowaniem uczestnika ruchu oraz ryzykiem odniesienia poważnych obrażeń wybranych segmentów ciała.

Podobne w założeniach było badanie przeprowadzone w Chinach²⁷ wykorzystujące bazę danych CIDAS (ang. *China In-Depth Accident Study*; chińskie szczegółowe studium wypadków). W tym przypadku, z wykorzystaniem platformy symulacyjnej przeprowadzono analizy komputerowe w celu określenia różnic w przebiegu wypadków między kierującymi rowerami elektrycznymi oraz pieszymi. Następnie, drogą symulacji numerycznych, badacze przeprowadzili teoretyczne analizy przebiegu wypadków z bazy CIDAS, ale tym razem stosując w symulacjach różne modele systemów AEB (ang. *Autonomous Emergency Braking System*, system autonomicznego hamowania awaryjnego). Określono wpływ, jaki zastosowanie takich systemów miałyby na ryzyko odniesienia śmiertelnych obrażeń przez niechronionych uczestników ruchu. Podobne badania mogą pomóc producentom samochodów w rozwijaniu algorytmów detekcji pieszych.

Badacze ze Stanów Zjednoczonych²⁸ wykonali badania bezpieczeństwa 6-letniego dziecka wewnątrz samochodu za pomocą oprogramowania symulacyjnego LS-DYNA oraz numerycznego modelu dziecka siedzącego na podstawie samochodowej. Analizowali oni setki symulacji dla różnych pozycji dziecka na podstawie samochodowej oraz różnej geometrii i parametrów uproszczonych modeli fotelików (przeanalizowano 700 różnych fotelików). Na bazie swoich badań opracowali nowe rekomendacje m.in. odradzające używania podstawek nadmuchiwanych lub podstawek o zbyt krótkiej długości siedziska. Te analizy były możliwe dzięki zbudowanemu systemowi automatycznego generowania modeli podstawek i modeli dzieci oraz ustawiania i uruchamiania symulacji.

Możliwości przeprowadzania takich analiz istnieją technicznie również w Polsce, m.in. korzystając z opracowanego w polskiej platformie symulacyjnej V-SIM modelu wielobryłowego ciała człowieka.

Perspektywy wykorzystania platform symulacyjnych w zakresie biomechaniki zderzeń

Poza potrzebami pojedynczych dochodzeń, platformy symulacyjne mogą posłużyć do zbadania jeszcze wielu zjawisk w zakresie bezpieczeństwa ruchu drogowego. Biomechanika zderzeń bowiem „jeszcze się nie skończyła” — poza dotychczasowymi zagadnieniami, takimi jak bezpieczeństwo kierujących oraz pieszych, badacze identyfikują już nowe problemy, do których należą:

— bezpieczeństwo kobiet — w przeciwieństwie do lat 70. ubiegłego wieku, gdy powstawała wiedza o bezpieczeństwie wewnątrz samochodu,

²⁷ Q. Chen i in., *A comparison study of car-to-pedestrian and car-to-E-bike accidents: Data source: The China in-depth accident study (CIDAS)*, “SAE Technical Papers” 2014, Vol. 1, DOI: 10.4271/2014-01-0519.

²⁸ J. Forman i in., *Investigation of factors influencing submarining mitigation with child booster seats*, “Traffic Injury Prevention” 2023, Vol. 24(1), s. 75–81, DOI: <https://doi.org/10.1080/15389588.2022.2153594>.

- obecnie odsetek kobiet kierowców jest niemal równy mężczyznom. Dzisiejsze badania wskazują, że bezpieczeństwo kobiet w autach pozostaje tematem wymagającym szczególnej uwagi²⁹;
- wprowadzenie pojazdów autonomicznych — w których to pasażerowie zajmować mogą nowe pozycje, w tym leżące lub obrócone pod kątem względem kierunku ruchu pojazdu. (Sprawia to, że dotychczasowe systemy bezpieczeństwa — poduszki powietrzne, 3-punktowe pasy samochodowe — przestają być efektywne)³⁰;
 - otyłość — badania wskazują, że osoby otyłe są znacznie mniej bezpieczne w samochodach niż osoby szczupłe³¹ — w niektórych konstrukcjach pojazdów pasy bezpieczeństwa oferują bardzo ograniczone zabezpieczenia dla osób o masie ciała powyżej 120 kg,
 - nowe pojazdy — mikromobilność (np. hulajnogi elektryczne), popularność SUV-ów — badacze wskazują na kwestie bezpieczeństwa wynikające z nowych konstrukcji pojazdów³² oraz zmiany przyzwyczajeń społeczeństwa.

Rozwój platform symulacyjnych działa na zasadzie sprzężenia zwrotnego — pojawienie się nowych danych i zidentyfikowanie nowych problemów powinno prowadzić do wprowadzenia nowych platform lub modyfikacji tych już istniejących. Te z kolei mogą prowadzić do lepszego zrozumienia problemów i pozyskiwania danych o większym stopniu niezawodności. Należy przy tym odnotować, że platformy symulacyjne są najbardziej skuteczne:

- gdy zostały stworzone na podstawie wysokiej jakości danych,
- gdy analizy bazujące na gotowych już platformach są oparte na wysokiej jakości danych.

Na bazie doświadczeń zebranych z zagranicy można zaobserwować, że za sukcesem zarówno procesu gromadzenia danych, jak i następujących po nim analiz opartych na symulacjach komputerowych stoi często skoordynowana współpraca wielu środowisk. Wspomniane wyżej bazy danych GIDAS i CIDAS nie zawierają wyłącznie statystyk (jak np. opracowywane przez Policję polską raporty roczne³³ lub raporty Polskiego Obserwatorium Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego (Instytut Transportu Samochodowego)³⁴, ale pozwalają na uzyskanie szczegółowych danych

²⁹ M.L. Brumbelow, J.S. Jermakian, *Injury risks and crashworthiness benefits for females and males: Which differences are physiological?*, "Traffic Injury Prevention" 2022, Vol. 23(1), s. 11–16, DOI: 10.1080/15389588.2021.2004312; J. Forman i in., *Automobile injury trends in the contemporary fleet: Belted occupants in frontal collisions*, "Traffic Injury Prevention" 2019, Vol. 20(6), s. 607–612, DOI: doi.org/10.1080/15389588.2019.1630825.

³⁰ R. Richardson i in., *Kinematic and Injury Response of Reclined PMHS in Frontal Impacts*, "Stapp Car Crash Journal" 2020, Vol. 64, s. 83–153, DOI: 10.4271/2020-22-0004.

³¹ R.W. Kent, J.L. Forman, O. Bostrom, *Is there really a cushion effect: A biomechanical investigation of crash injury mechanisms in the obese*, "Obesity" 2010, Vol. 18(4), s. 749–753, DOI: 10.1038/oby.2009.315.

³² M. Ptak i in., *Analysis...*, wyd. cyt.

³³ E. Symon, *Wypadki drogowe w Polsce w 2021 roku*, <<https://statystyka.policja.pl/st/ruch-drogowy/76562,wypadki-drogowe-raporty-roczne.html>>, 4 września 2023 r.

³⁴ P. Skoczyński, *Bezpieczeństwo ruchu drogowego w Polsce w 2022 roku. Analiza danych o wypadkach drogowych*, 2022 r., <

o każdym pojedynczym wypadku, łącznie z informacją AIS o odniesionych obrażeniach na poszczególnych segmentach ciała. Wymaga to oczywiście skoordynowanej współpracy:

- policji oraz lekarzy — wspólnie gromadzących dane o wypadkach i korelując je z danymi o obrażeniach,
- rekonstruktorów — odtwarzających sytuacje drogowe, przy których doszło do danego wypadku,
- naukowców — przetwarzających bazy danych w celu określenia korelacji czynników z efektami (np. wykonywanych manewrów z prawdopodobieństwem obrażeń),
- inżynierów-programistów — tworzących oprogramowanie symulacyjne,
- władz, organizacji konsumenckich, podmiotów z przemysłu — wywierających presję na gromadzenie wartościowych danych oraz wykorzystujących je do poprawy bezpieczeństwa drogowego.

Biomechanika zderzeń jest dziedziną wiedzy, w której badacze mają bardzo ograniczone możliwości badań eksperymentalnych, przez co nigdy nie dysponują wystarczającą ilością danych³⁵ — i każda nowa baza danych jest niezwykle cenna. Jeśli doszłoby w Polsce do utworzenia oficjalnej platformy wymiany danych o krajowych wypadkach, to taka inicjatywa byłaby bardzo ważnym i często wykorzystywanym źródłem wiedzy na temat bezpieczeństwa drogowego na arenie międzynarodowej.

Szeroka perspektywa rozwoju platform symulacyjnych

Patrząc na całokształt potrzeb badań z wykorzystaniem platform symulacyjnych, a nie tylko w kontekście biomechaniki zderzeń, można zidentyfikować wiele kierunków rozwoju oprogramowania. W szczególności, aby w pełni wykorzystać efekt synergii ze współpracy różnych środowisk zaangażowanych w zagadnienia bezpieczeństwa wewnętrznego, ostateczne rozwiązania już na etapie projektowania powinny uwzględniać:

- opracowanie lub wykorzystanie otwartych standardów gromadzenia danych (np. dane o infrastrukturze drogowej, dane o pojazdach, dane o wypadkach),
- promowanie rozwiązań całościowych pozwalających na konstruowanie potoków przetwarzania danych — od gromadzenia danych na miejscu zdarzenia, poprzez opracowywanie dokumentacji miejsca zdarzenia, rekonstrukcję i analizę zdarzenia, po archiwizację danych i metadanych,
- promowanie rozwiązań gwarantujących dostęp do danych walidacyjnych lub gotowych zwalidowanych modeli numerycznych w celu zapewnienia wymaganej jakości oferowanych rozwiązań,

ads/2023/09/Stan-BRD-2022.pdf>, 4 września 2023 r.

³⁵ D. Wdowicz, *Biomechanika zderzeń. Podejścia, źródła informacji, eksperymenty, modelowanie*, „Paragraf Na Drodze” 2022, nr 3, s. 9–23, DOI: 10.4467/15053520pnd.22.014.16984.

— prace nad nowymi technologiami, np. takimi jak kosymulacje, pozwalającymi na osiągnięcie jeszcze większej wierności w modelowaniu numerycznym zachodzących zjawisk fizycznych³⁶, prace nad technologiami *Virtual Reality* i *Augmented Reality* ułatwiającymi z jednej strony prezentowanie rezultatów skomplikowanych symulacji, a z drugiej strony wspierających szkolenia kadr³⁷.

Podsumowanie

Powyższe rozwiązania nie tylko ułatwiają pracę specjalistom w dziedzinie rekonstrukcji wypadków komunikacyjnych, ale także — szczególnie w aspekcie prezentowania uzyskanych danych — upraszczają komunikację specjalistów ze społeczeństwem. Możliwość przedstawienia w wirtualnej rzeczywistości realnego, „wiernego fizyce” przebiegu zdarzeń — i konsekwencji zachowań niezgodnych z prawem — może pomóc w zrozumieniu konieczności przestrzegania zasad ruchu drogowego. Przykładowo, drogą symulacji można łatwo przedstawić, jakie fizyczne ograniczenia mają systemy hamowania w pojazdach (jakie maksymalne opóźnienia hamowania mogą osiągać) i w konsekwencji — jaka prędkość pozwoliłaby na zatrzymanie się pojazdu przed przejściem dla pieszych w przypadku wtargnięcia pieszego na jezdnię. Tym samym, platformy symulacyjne, poza istotną korzyścią dla analityków i specjalistów, mogą znaleźć także szerokie zastosowanie w edukacji społecznej.

Bibliografia

1. Brumbelow M.L., Jermakian J.S., *Injury risks and crashworthiness benefits for females and males: Which differences are physiological?*, „Traffic Injury Prevention” 2022, Vol. 23(1), DOI: 10.1080/15389588.2021.2004312.
2. Bułka D. i in., *Nowy model wielobryłowy pieszego do symulacji zderzeń*, „Paragraf Na Drodze” 2021, numer specjalny.
3. Chen Q. i in., *A comparison study of car-to-pedestrian and car-to-E-bike accidents: Data source: The China in-depth accident study (CIDAS)*, „SAE Technical Papers” 2014, Vol. 1, DOI: 10.4271/2014-01-0519.
4. Damsgaard M. i in., *Analysis of musculoskeletal systems in the AnyBody Modeling System*, „Simulation Modelling Practice and Theory” 2006, Vol. 14(8), DOI: 10.1016/j.simpat.2006.09.001.
5. Fernandes F.A.O., de Sousa R.J.A., Ptak, M., *Head injury simulation in road traffic accidents*, Cham: Springer 2018.
6. Forman J. i in., *Investigation of factors influencing submarining mitigation with child booster seats*, „Traffic Injury Prevention” 2023, Vol. 24(1), DOI: 10.1080/15389588.2022.2153594.

³⁶ X. Zhao i in., *Co-Simulation Platform for Modeling and Evaluating Connected and Automated Vehicles and Human Behavior in Mixed Traffic*, „SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles” 2022, Vol. 5(4), s. 12–25, DOI: 10.4271/12-05-04-0025.

³⁷ M. Weißmann i in., *Creating an Interactive Urban Traffic System for the Simulation of Different Traffic Scenarios*, „Applied Sciences” 2023, Vol. 13(10), s. 6020, DOI:10.3390/app13106020.

7. Forman J. i in., *Automobile injury trends in the contemporary fleet: Belted occupants in frontal collisions*, "Traffic Injury Prevention" 2019, Vol. 20(6), DOI: 10.1080/15389588.2019.1630825.
8. Greenspan L., McLellan B.A., Greig H., *Abbreviated injury scale and injury severity score: A scoring chart*, "Journal of Trauma — Injury, Infection and Critical Care", Vol. 25(1), DOI: 10.1097/00005373-198501000-00010.
9. Grzegożek W., Świder P., *Nowy program do symulacji ruchu pojazdów i zderzeń "V-SIM". Wstępna ocena przydatności do celów ekspertyzy sądowej*, „Paragraf Na Drodze” 2003, nr 8, <<https://cybid.com.pl/wp-content/uploads/2020/04/Nowy-Program-V-SIM.pdf>>, 4 października 2023 r.
10. Janczur R., Zawaleń J., *Rekonstrukcja i analiza przebiegu wypadku z udziałem pieszego przy wykorzystaniu programu V-SIM 5.0 — przykłady*, „Paragraf Na Drodze” 2022, nr 3, DOI: 10.4467/15053520PnD.22.010.16959.
11. Jaśkiewicz M., Frej D., Poliak M., *Simulation of a Dummy Crash Test in Adams*, "Communications — Scientific Letters of the University of Zilina" 2022, Vol. 24(1), DOI: 10.26552/com.C.2022.1.B20-B28.
12. Kędzierski M., *Wyniki symulacji biomechanicznych opracowanych za pomocą programów V-SIM i PC-Crash*, „Paragraf Na Drodze” 2022, nr 2, DOI: 10.4467/15053520PnD.22.013.16962.
13. Kędziora K., Cichocki S., Ruchała K., *Założenia modelowania oświetlenia w programie V-SIM 5.0.*, „Paragraf Na Drodze” 2021, nr 4.
14. Kent R.W., Forman J.L., Bostrom O., *Is there really a cushion effect: A biomechanical investigation of crash injury mechanisms in the obese*, "Obesity" 2010, Vol. 18(4), DOI: 10.1038/oby.2009.315.
15. Klug C., Ellway J., *Technical Bulletin TB024. Pedestrian Human Model Certification 3.0.1*, European New Car Assessment Programme, November 2021.
16. Knox E.H. i in., *Methods of accident reconstruction: Biomechanical and human factors considerations*, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE) 2015, 14–2015, DOI: 10.1115/IMECE2015-53666.
17. Milanowicz M., Budziszewski P., *Numerical reconstruction of the real-life fatal accident at work: A case study*, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) 2013, Vol. 8026 LNCS (Issue PART 2), DOI: 10.1007/978-3-642-39182-8_12.
18. Milanowicz M., Budziszewski P., Kędzior K., *Numerical analysis of passive safety systems in forklift trucks*, "Safety Science" 2018, Vol. 101, s. 98–107, DOI: 10.1016/j.ssci.2017.07.006.
19. Nogayeva S., Gooch J., Frascione N., *The forensic investigation of vehicle–pedestrian collisions: A review*, "Science & Justice" 2021, Vol. 61(2), DOI: 10.1016/j.scijus.2020.10.006.
20. Otte D., Jänsch M., Haasper C., *Injury protection and accident causation parameters for vulnerable road users based on German In-Depth Accident Study GIDAS*, "Accident Analysis & Prevention" 2012, Vol. 44(1), DOI: 10.1016/j.aap.2010.12.006.
21. Pascoletti G. i in., *A multibody simulation of a human fall: Model creation and validation*, "Procedia Structural Integrity" 2019, Vol. 24, DOI: 10.1016/j.prostr.2020.02.031.
22. Paudel M. i in., *A computational study on the basis for a safe speed limit for bicycles on shared paths considering the severity of pedestrian head injuries in bicyclist-pedestrian collisions*, "Accident Analysis and Prevention" 2022, Vol. 176, DOI: 10.1016/j.aap.2022.106792.
23. Ptak M. i in., *Analysis of electric scooter user kinematics after a crash against SUV*, "PLoS ONE" 2022, Vol. 17 (1 January), DOI: 10.1371/journal.pone.0262682.
24. Richardson R. i in., *Kinematic and Injury Response of Reclined PMHS in Frontal Impacts*, "Stapp Car Crash Journal" 2020, Vol. 64, DOI: 10.4271/2020-22-0004.
25. Rzymkowski C., *Selected aspects of the experimental methods of impact biomechanics*, "Vibrations in Physical Systems" 2016, Vol. 27.
26. Skoczyński P., *Bezpieczeństwo ruchu drogowego w Polsce w 2022 roku. Analiza danych o wypadkach drogowych*, 2022 r., <<https://obserwatoriumbrd.pl/wp-content/uploads/2023/09/Stan-BRD-2022.pdf>>, 4 października 2023 r.).
27. Symon E., *Wypadki drogowe w Polsce w 2021 roku*, 2022, <<https://statystyka.policja.pl/st/ruch-drogowy/76562,wypadki-drogowe-raporty-rocne.html>>, 4 października 2023 r.

28. Teresiński G. (red.), *Medycyna sądowa. Tom 1. Tanatologia i traumatologia sądowa*, PZWL, Warszawa 2019.
29. Wach W., Unarski J., *Fall from height in a stairwell — mechanics and simulation analysis*, "Forensic Science International" 2014, Vol. 244, DOI: 10.1016/j.forsciint.2014.08.018.
30. Walczak S., *Wypadki z udziałem pieszych — możliwości rekonstrukcji w programie V-Sim 5.0*, „Paragraf Na Drodze” 2022, nr 3, DOI: 10.4467/15053520PnD.22.019.16989.
31. Wdowicz D., *Biomechanika zderzeń. Podejścia, źródła informacji, eksperymenty, modelowanie*, „Paragraf Na Drodze” 2022, nr 3, DOI: 10.4467/15053520pnd.22.014.16984.
32. Wdowicz D., Bułka D., *Model ciała człowieka CYBID Multibody Pieszy. Specyfikacja, generator modelu, prace badawcze nad rozwojem modelu*, „Paragraf Na Drodze” 2022, nr 3, DOI: 10.4467/15053520PnD.22.016.16986.
33. Wdowicz D., Ptak M., *Numerical Approaches to Pedestrian Impact Simulation with Human Body Models: A Review*, "Archives of Computational Methods in Engineering" 2023, DOI: 10.1007/s11831-023-09949-2.
34. Weißmann M. i in., *Creating an Interactive Urban Traffic System for the Simulation of Different Traffic Scenarios*, "Applied Sciences", Vol. 13(10), DOI: 10.3390/app13106020.
35. Wicher J. i in., *Podstawy rekonstrukcji wypadków drogowych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.
36. Wierciński J., Reza A. (red.), *Wypadki drogowe. Vademecum biegłego sądowego*. Wydawnictwo Instytutu Ekspertyz Sądowych, Kraków 2011.
37. Winiarska W., Kędziora K., *Rekonstrukcja potrącenia pieszego, udokumentowanego na nagraniu wideo, przy wykorzystaniu programu Photorect 2.0*, „Paragraf Na Drodze” 2022, nr 3, DOI: 10.4467/15053520pnd.22.018.16988.
38. Wismans J., Van Wijk J., *Mathematical Models for the Assessment of Pedestrian Protection Provided by a Car Contour*, 9th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, 1982.
39. Zhao X. i in., *Co-Simulation Platform for Modeling and Evaluating Connected and Automated Vehicles and Human Behavior in Mixed Traffic*, "SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles" 2022, Vol. 5(4), DOI: 10.4271/12-05-04-0025.
40. Zou T. i in., *Methods, upper limit and reason for reducing pedestrian ground contact injury by controlling vehicle braking*, "International Journal of Crashworthiness" 2022, Vol. 27(4), DOI: 10.1080/13588265.2021.1910399.

DOI: 10.5604/1.3001.0054.3592

[http://dx.doi.org/ 10.5604/1.3001.0054.3592](http://dx.doi.org/10.5604/1.3001.0054.3592)

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo wewnętrzne, wypadki drogowe, biomechanika, platformy symulacyjne, V-SIM, symulacja komputerowa, baza danych o wypadkach, edukacja społeczna

Streszczenie: Celem artykułu jest przedstawienie istotności wykorzystania platform symulacyjnych w celu poprawy bezpieczeństwa uczestników ruchu drogowego oraz analizy zagadnień ogólnie związanych z obszarem bezpieczeństwa wewnętrznego. Przyczynkiem do tej dyskusji jest wprowadzenie modelu ciała człowieka na potrzeby programu CYBID V-SIM będącego elementem szerszej platformy symulacyjnej. Autorzy przedstawiają przykłady badań z zakresu bezpieczeństwa drogowego, w których platformy symulacyjne były wykorzystywane. Wskazane są powody stojące za koniecznością dalszego rozwoju platform symulacyjnych. Jako podsumowanie, na bazie doświadczeń z symulacyjnych badań zagranicznych, autorzy odnotowują, że istnieje duży potencjał we współpracy służb oraz środowisk naukowych. Taka współpraca mogłaby służyć np. celom utworzenia polskiej szczegółowej bazy danych o wypadkach drogowych, uwzględniającej informacje o obrażeniach przydatne z punktu widzenia biomechaniki zderzeń oraz medycyny sądowej, a także edukacji społecznej.