



**Daniel
Wdowicz**

Biomechanika zderzeń

Podejścia, źródła informacji, eksperymenty, modelowanie

Streszczenie

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane z metodami eksperymentalnymi i symulacyjnymi biomechaniki zderzeń. Podana została definicja biomechaniki zderzeń, jako szczególnej dziedziny na pograniczu nauk inżynierskich i medycznych. Przedstawiono koncepcyjny schemat działań związanych z prowadzeniem naukowych badań biomechanicznych. Omówione zostały pokrótce źródła wiedzy biomechanicznej, takie jak testy na zwierzętach, ochotnikach, zwłokach, manekinach oraz symulacje numeryczne. Dla każdego ze źródeł wiedzy wymieniono jego zalety oraz ograniczenia. Odnotowano, że chociaż badacze napotykają wiele wyzwań związanych z prowadzeniem eksperymentów i symulacji biomechanicznych, to istnieje duży potencjał w wykorzystaniu osiągnięć biomechaniki nie tylko w przemyśle, lecz także w rekonstrukcji wypadków.

Słowa kluczowe

Biomechanika zderzeń, eksperymenty, symulacje.

Otrzymano 25 lipca 2022 r., zatwierdzono do druku 20 listopada 2022 r.

DOI: 10.4467/15053520PnD.22.014.16984

1. Wstęp

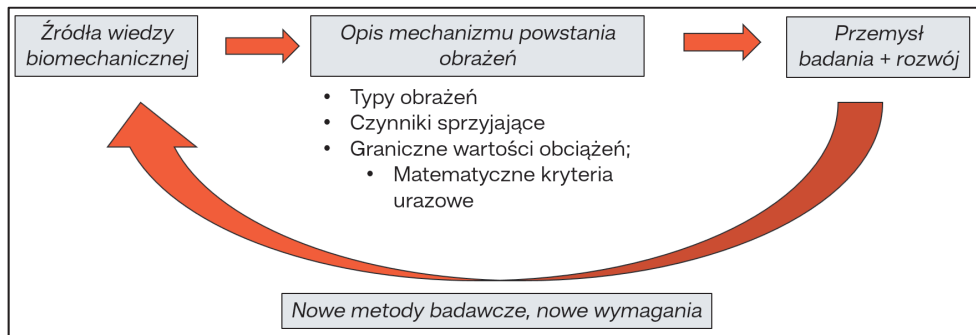
Jednym z często spotykanych w praktyce opiniodawczej pytań organów procesowych jest następujące sformułowanie: „w jakim stopniu zachowanie przez oskarżonego administracyjnie dozwolonego limitu prędkości wpłynęłoby na ograniczenie ryzyka śmierci pokrzywdzonego (...) który został potrącony (...) z prędkością zderzeniową rzędu 70 km/h?” [25]. Udzielenie odpowiedzi na to pytanie jest trudnym zagadnieniem, niemal zawsze wymagającym współpracy biegłego inżyniera z medykiem sądowym. Wsparciem w formułowaniu takich interdyscyplinarnych opinii może być szczególna dziedzina z dyscypliny inżynierii mechanicznej: biomechanika zderzeń.

Mgr inż. Daniel Wdowicz, Politechnika Wrocławska, CYBID sp. z o.o. sp. k., ORCID: 0000-0001-7334-8110.

Celem bieżącego artykułu jest przybliżenie metod badawczych biomechaniki zderzeń, potencjalnych korzyści, ale i problemów podejścia biomechanicznego do oceny bezpieczeństwa uczestników ruchu drogowego. Należy zarazem podkreślić, że niniejszy artykuł stanowi niejako wprowadzenie do kolejnych artykułów publikowanych w czasopiśmie *Paragraf na Drodze*, które były przedstawione w formie referatów w trakcie Konferencji „PIESZY – badania, dokumentacja, symulacje, bezpieczeństwo”¹, a tym samym nie prezentuje on wyczerpującego opisu zjawisk biomechanicznych.

2. Definicja

Biomechanika to nauka zajmująca się określaniem wpływu obciążeń mechanicznych na organizmy żywe, plasująca się na pograniczu inżynierii mechanicznej oraz medycyny. Składa się na nią wiele poddziedzin, m.in. biomechanika sportu (obciążenia powstające w trakcie chodu/wykonywania ćwiczeń), ergonomia, a nawet w pewnym zakresie bezpieczeństwo i higiena pracy. Szczególną dziedziną biomechaniki jest biomechanika zderzeń, ang. *impact biomechanics*, czyli nauka badająca wpływ obciążeń krótkotrwałych, najczęściej krótszych niż jedna sekunda [11]. Chociaż biomechanika zderzeń obejmuje także analizę zderzeń w sporcie (np. obrażenia głowy zawodników futbolu amerykańskiego) lub obrażeń spowodowanych upadkami na ziemię, to najczęściej jest ona stosowana do analizy obciążeń powstających w wyniku wypadków komunikacyjnych: drogowych oraz lotniczych. W niniejszym artykule pod pojęciem biomechanika rozumieć należy właśnie biomechanikę zderzeń ciała ludzkiego w ruchu drogowym.



Ryc. 1. Schemat działań związanych z prowadzeniem badań biomechanicznych.

Analizy biomechaniczne opierają się na logice przedstawionej na rycinie 1. Punktem wyjścia do analiz obciążeń działających na człowieka są badania – źródła wiedzy biomechanicznej. Do takich badań, szerzej opisanych w dalszej części artykułu, zaliczyć można m.in. badania na zwłokach i symulacje numeryczne. Wnio-

¹ Dalej w artykule zwanej Konferencją „PIESZY”.

ski z tych badań prowadzą do sformułowania opisu mechanizmu powstawania danego urazu. Przykładem takiego mechanizmu jest zjawisko nurkowania pod pasem biodrowym, ang. *submarining*. Dzięki badaniom biomechanicznym, do zjawiska przyporządkowane zostają typowe obrażenia (dla *submarining* – m.in. kompresja narządów jamy brzusznej) oraz czynniki sprzyjające wystąpieniu danego zjawiska (dla *submarining* – zbyt wysokie położenie odcinka biodrowego pasa bezpieczeństwa w stosunku do kołców biodrowych miednicy).

Ponadto, jeśli obciążenia dają się zarejestrować za pomocą dostępnej inżynierom aparatury, określone zostają graniczne wartości obciążeń (przyspieszeń liniowych, kątowych, sił i momentów), przy których następuje dane obrażenie. Na bazie analiz statystycznych wyników tych pomiarów inżynierowie określają tzw. matematyczne kryteria urazowe (ang. *injury criteria*), które będąc miarą prawdopodobieństwa wystąpienia obrażenia, są *de facto* sposobem na ilościowe opisanie ciężkości obrażeń w danej konfiguracji za pomocą pojedynczej wartości liczbowej. Stwarza to potencjał do liczbowego porównania między różnymi wariantami zderzenia:

- jeśli pas był niezapięty, to jak przebiegałoby zdarzenie, gdyby był zapięty?
- jeśli pas był źle poprowadzony, to jak przebiegałoby zdarzenie, gdyby był poprowadzony prawidłowo?

Kryteria urazowe nie będą w sposób szczegółowy omówione w niniejszym artykule, ale te najczęściej stosowane w przemyśle kryteria biomechaniczne można znaleźć w artykule Krzysztofa Kędziory [9]. Można jednak podać następujący przykład: obliczając kryterium biomechaniczne HIC w oparciu o przebieg czasowy przyspieszenia głowy, można porównać ze sobą dwie konfiguracje („dla konfiguracji z zapiętymi pasami, HIC wynosił 200, a w konfiguracji z niezapiętymi – HIC wynosił 700”), a opierając się na literaturze można spróbować określić prawdopodobieństwo wystąpienia urazu („dla wartości HIC=1000, wg opracowania [20], ryzyko obrażeń mózgu AIS 4+, tj. zagrażających życiu, wynosi 15%”).

Rezultatem opracowania szczegółowego opisu mechanizmów powstawania obrażeń jest zastosowanie tej wiedzy np. w przemyśle w celu oceny skuteczności różnych systemów bezpieczeństwa biernego (Regulaminy EKG ONZ, EuroN-CAP). Lepsze zrozumienie zjawiska może prowadzić do kolejnych badań, koncentrujących się na specyficznych aspektach danego zjawiska lub prowadzących do korekty poprzednio ustalonych kryteriów urazowych, tworząc sprzężenie zwrotne pokazane na ryc. 1. Jako przykład można podać sugerowaną przez niektórych badaczy rewizję kryterium obrażenia kości piszczelowej pochodzącego z 1984 r. (tzw. kryterium *Tibia Index*) z wartości granicznej 1,0 na 1,3 [14].

3. Źródła wiedzy biomechanicznej

Do źródeł wiedzy biomechanicznej można zaliczyć:

- studium przypadku,
- testy na zwierzętach,
- testy na ochotnikach,
- testy na zwłokach,
- testy z manekinami,
- symulacje numeryczne.

Można zarazem dokonać podziału tych źródeł na:

- źródła pochodzenia biologicznego (studium przypadku, testy na zwierzętach, ochotnikach, zwłokach),
- źródła wytworzone przez człowieka (manekiny, symulacje numeryczne).

Należy zarazem odnotować, że skuteczne narzędzia wytworzone przez człowieka mogą powstawać jedynie pod warunkiem dostępności źródeł pochodzenia biologicznego. Tym samym, dużym wyzwaniem dla biomechaników zderzeń jest np. zagadnienie biomechaniki ciąży – wytworzenie wysoce biozgodnych manekinów lub modeli komputerowych kobiety w ciąży jest bowiem utrudnione przez brak możliwości przeprowadzenia badań na ochotniczkach i brak dawców zwłok.

3.1. Studium przypadku

Studium przypadku, ang. *case study*, jest najbardziej oczywistym sposobem zdobycia wiedzy o mechanizmach powstawania obrażeń. Każda opinia interdyscyplinarna biegłego inżyniera i medyka sądowego stanowi na swój sposób oddzielne *case study* (łączenie śladów/danych o wypadku ze stwierdzonymi obrażeniami). Zebranie wielu analiz rzeczywistych przypadków może doprowadzić do jakościowego opisu mechanizmów powstania obrażeń (zidentyfikowanie czynników, które w wielu wypadkach doprowadziły do powstania obrażenia). Ograniczeniem studiów przypadku jest niepewność danych opisujących zdarzenie oraz brak opomiarowania poszczególnych organów ciała, przez co praktycznie niemożliwym jest bezpośrednio określenie granicznych wartości obciążeń.

Pierwszą odnotowaną w historii ofiarą śmiertelną wypadku drogowego z 1869 r. była Mary Ward z Irlandii [7]. Z kolei, jednym z pierwszych szerzej zakrojonych inżyniersko-medycznych *case studies* było m.in. przeprowadzone w 1942 r. przez pilota-inżyniera Hugh De Havena studium przypadków upadków z wysokości [6].

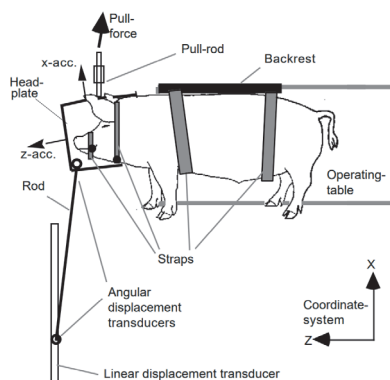
3.2. Testy na zwierzętach

Testy na zwierzętach stanowiły cenne dodatkowe źródło wiedzy biomechanicznej. Zaletą testów na zwierzętach była dostępność osobników o podobnej ana-

tomii (powtarzalność testów), możliwość opomiarowania ciała (także w sposób inwazyjny) oraz przeprowadzenie testów w warunkach wysokich obciążeń. Wadą takich testów były oczywiste różnice w budowie ciała zwierząt i ludzi, zatem testy na zwierzętach były najczęściej wykonywane na ssakach z rzędu naczelnych (np. badania wpływu pasów na małpy w ciąży [5]; ryc. 2) oraz przy koncentracji na wybranych organach zbliżonych anatomicznie do ludzkich (np. badania odcinka szyjnego świń pod kątem analizy zjawiska *whiplash* [23]; ryc. 3). Ze względów humanitarnych oraz problemów ze skalowaniem wyników w odniesieniu do ludzi, obecnie praktycznie nie wykonuje się biomechanicznych testów zderzeniowych na żywych zwierzętach.



Ryc. 2. Badania na ciężarnych pawianach [5].



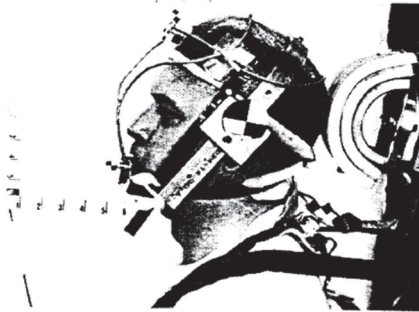
Ryc. 3. Maszyna do eksperymentów whiplash na świńkach [23].

3.3. Testy na ochotnikach

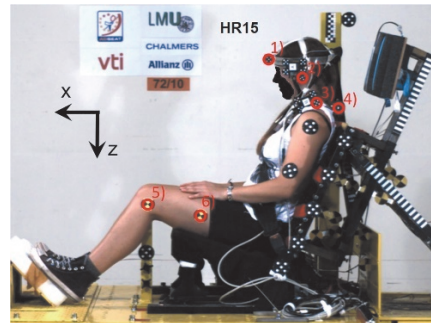
Prekursorem prowadzenia testów biomechanicznych na ochotnikach był pułkownik Sił Powietrznych Stanów Zjednoczonych John Stapp. W latach 40. i 50. XX wieku prowadził i uczestniczył jako ochotnik w licznych testach eksperymentalnych mających na celu sprawdzenie granicznych wartości obciążeń, jakie jest w stanie przetrzymać ciało pilota. Jako pasażer sań z napędem raketowym, przeżył on rekordowe przeciążenie o wartości 46 g. Jako wyraz wdzięczności za jego wkład w rozwój biomechaniki zderzeń, jedna z najbardziej znanych na świecie biomechanicznych konferencji została nazwana *Stapp Car Crash Conference*.

Testy Johna Stappa były o tyle wyjątkowe, że większość testów na ochotnikach jest zazwyczaj jednak prowadzonych dla obciążeń poniżej progu bólu. Jako przykład bardziej „typowych” testów na ochotnikach można przytoczyć pracę L. Patricka i H. Mertza z 1971 r., w ramach której L. Patrick (promotor doktoratu H. Mertza) brał udział jako ochotnik w badaniach na temat odpowiedzi dynamicz-

nej odcinka szyjnego [15] (ryc. 4) oraz szwedzkie badania opublikowane w 2021 r. z 50-centylowymi ochotniczkami, symulujące zderzenia pojazdów od tyłu [2] (ryc. 5).



Ryc. 4. Badania dynamiczne odcinka szyjnego kręgosłupa [15].



Ryc. 5. Badania w konfiguracji najechania od tyłu [2].

Ograniczeniem testów na ochotnikach jest brak możliwości badania wpływu obciążeń powyżej progu bólu. Innym ograniczeniem, ale z drugiej strony zaletą, jest obecność reakcji aktywnej ciała ochotników na obciążenia. Może to wywoływać bardziej realistyczną reakcję ciała, zwłaszcza w porównaniu z testami na bezwładnych zwłokach/manekinach, z drugiej zaś strony – w zależności od procedury eksperymentalnej – uczestnicy mogą spodziewać się zderzenia i stosować reakcję obronną niespotykaną np. w większości przypadków rzeczywistego najechania od tyłu.

3.4. Testy na zwłokach

Biomechaniczne testy na zwłokach różnią się w pewnych aspektach od np. wykorzystania zwłok dawców przez akademie medyczne w celach edukacyjnych. W celu przeprowadzenia testów biomechanicznych na zwłokach wymagana jest nie tylko zgoda dawców ciał, ale także odpowiednio przygotowane laboratorium badawczo-zderzeniowe i personel specjalizujący się w opomiarowaniu ciała ludzkiego w sposób inwazyjny (np. poprzez umieszczenie tensometrów na żebrach lub przyspieszoniometry wewnątrz czaszki). Niebagatelną kwestią jest także zabezpieczenie zwłok, gdyż bardzo często zwłoki do testów zderzeniowych nie mogą być wcześniej poddane zabiegom utrwalającym w celu zagwarantowania realistycznej odpowiedzi dynamicznej ciała w trakcie testu. Wymaga to zatem wypracowanych, a zarazem w pełni etycznych procedur pozyskiwania zwłok dawców oraz gotowości laboratorium do przeprowadzenia wybranego testu w przeciągu od kilkunastu do kilkudziesięciu godzin od zgonu dawcy. Ośrodków prowadzących obecnie takie badania jest niewiele na świecie i zaliczyć można do nich *Center for Applied Biomechanics* w Virginii oraz *IFSTTAR* w Marsylii.

Testy na zwłokach można podzielić na testy pełnej skali (ang. *full-scale tests*) (ryc. 6 i 7) oraz testy na pojedynczych członach (ang. *component tests*). Testy pełnej skali mają na celu przedstawienie zachowania całego ciała w wybranych konfiguracjach, np. potrącenia pieszego lub zderzenia czołowego ze zwłokami jako kierowcą. Najczęstszym rezultatem tych testów jest opis kinematyki ruchu ciała (przesunięcie głowy/klatki piersiowej/miednicy w czasie) na bazie analizy poklatkowej nagrań video lub opis dynamiki zderzenia poszczególnych członów, np. zderzenia głowy pieszego z szybą czołową, dzięki odczytom z przyspieszeniometry montowanych wewnątrz ciała.

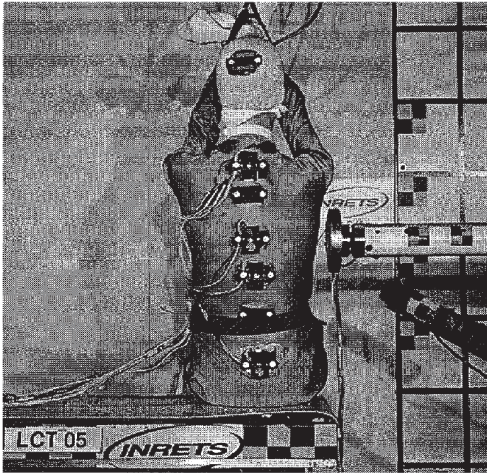


Ryc. 6. Zwłoki przygotowane do testów pełnej skali – potrącenie pieszego przez pojazd osobowy [22].

Testy na komponentach służą zbadaniu odpowiedzi dynamicznej poszczególnych członów ciała człowieka uderzonych z określonego kierunku (czołowo, ukośnie, z boku). Wśród testów na komponentach można wymienić m.in. testy zrzucenia segmentu ciała (ang. *drop test*) oraz testów z bijakami (ang. *impactor tests*). Testy *drop test* polegają na upuszczeniu wybranego segmentu (często głowy) wyposażonego w przyspieszeniometry z określonej wysokości na wybraną powierzchnię. Odczyty z przyspieszeniometry, w połączeniu z analizą poklatkową, mogą posłużyć do określenia sztywności danego kontaktu. W przypadku testów z bijakami, wybrany człon ciała, np. klatka piersiowa, jest uderzany tzw. bijakiem (ang. *impactor*), stanowiącym sztywną, płaską lub cylindryczną powierzchnię na końcu napędzanego tłoka². Rezultatem badania są wówczas rodzaje obrażeń odnotowane w trakcie autopsji, ale także pomiary na mechanizmie bijaka. Uzyskując informację o wychyleniu tłoka oraz zarejestrowanej na tłoku sile oporu, można określić charakterystykę sztywności wybranego segmentu. Dane takie są następnie

² Bijaki opisane w bieżącym rozdziale należy rozumieć jako urządzenia służące do badania właściwości mechanicznych zwłok. Różnią się one w budowie i zastosowaniu od bijaków *headform impactors* (symulujących uderzenie głowy pieszego) lub *upper/lower legform impactors* (symulujących uderzenie uda lub podudzia pieszego) wykorzystywanych np. w protokołach EuroNCAP do badań nadwozi pojazdów.

wykorzystywane w celu dobrania materiałów dla sztucznych odpowiedników ciała człowieka, tj. manekinów lub modeli numerycznych.



Ryc. 7. Zwłoki w konfiguracji testu na komponencie – uderzenie klatki piersiowej z boku [24].

Kwestia prowadzenia badań na zwłokach na potrzeby badań w motoryzacji była kontrowersyjnym tematem w oczach opinii publicznej, np. w Niemczech w latach 90. ubiegłego wieku [17]. Argument za wykorzystywaniem ciał ochotniczych dawców zwłok pozostaje jednak podtrzymywany przez niektórych badaczy, ponieważ nadal istnieją obszary, które nie zostały szerzej zbadane (np. zachowanie ciała ludzkiego w konfiguracjach *out-of-position*, mogących wystąpić w trakcie jazdy pojazdami autonomicznymi), a których nawet nowoczesne manekiny mogą potencjalnie nie być w stanie w sposób wierny odtworzyć. Brak badań na zwłokach może także utrudnić rozwijanie nowych modeli manekinów – twórcom manekinów pozostaje opierać się wówczas na wynikach testów z lat 70.–90. ubiegłego wieku, w których – co oczywiste – stosowano starszą technologię pomiarową.

Ograniczeniem testów na zwłokach jest brak reakcji aktywnej ciała człowieka na zderzenie, co w rzeczywistych wypadkach może mieć znaczenie dla uzyskiwanych obrażeń (np. dla osoby kierującej pojazdem). Innym problemem jest wiek dawców, ponieważ z reguły są to osoby starsze. Osoby młode giną najczęściej w sposób gwałtowny, w wyniku wypadków lub ciężkich chorób, co niejednokrotnie uniemożliwia wykorzystanie ich zwłok do celów badań biomechanicznych (obecność złamań lub osłabienie własności wytrzymałościowych tkanek).

3.5. Manekiny zderzeniowe

Testy z manekinami zderzeniowymi są podstawą badań bezpieczeństwa w przemyśle motoryzacyjnym. Ich zaletą jest powtarzalność eksperymentów (zarówno osobników, jak i lokalizacji opomiarowania na ciele), a wadą – uproszczona budowa ciała oraz brak reakcji aktywnej.

Większość manekinów wykorzystywanych w ramach norm lub testów konsumenckich jest zaprojektowana z myślą o konkretnym zastosowaniu (np. Hybrid III – zderzenia czołowe; EuroSID-2 – zderzenia boczne). Znajduje to także odzwierciedlenie w ich budowie. Dla przykładu, miednica popularnego manekina Hybrid III 50-centylowego uniemożliwia stosowanie go jako pieszego (ryc. 8).



Ryc. 8. Manekin do zderzeń czołowych – Hybrid III 50th. Źródło: Humanetics.

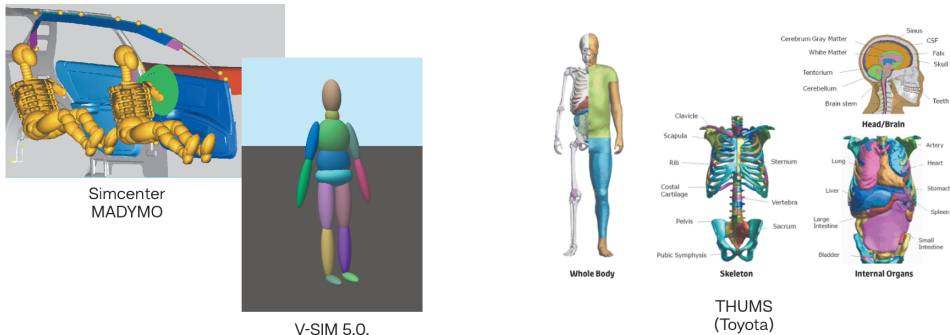
Mówiąc o manekinach zderzeniowych, warto także wspomnieć o impaktorach *headform* lub *legform*, czyli niejako zamiennikach odpowiednio głowy lub kończyny dolnej, wykorzystywanych przy testowaniu nadwozi pojazdów w ramach procesu certyfikacji pojazdów (np. regulamin UN ECE R127) lub w badaniach konsumenckich (np. EuroNCAP).

3.6. Modele numeryczne

Modele numeryczne ciała człowieka można podzielić na modele tworzone metodami układów wielocłonowych (zwanymi także metodami układów wielobryłowych, wielomasowych z ang. *multibody systems methods*) oraz tworzone metodami elementów skończonych (tzw. modele *MES* oraz *FEM* i *FE* z ang. *finite element methods models*).

Filozofia modeli wieloczłonowych opiera się na tworzeniu łańcucha kinematycznego składającego się z brył sztywnych połączonych parami kinematycznymi (ryc. 9). Modele wieloczłonowe cechują się niskim czasem obliczeń oraz znacznym stopniem uproszczeń, co ułatwia przygotowanie oraz przeprowadzanie symulacji z ich wykorzystaniem. Przykładem oprogramowania wykorzystującego modele wieloczłonowe ciała człowieka jest MADYMO (obecna nazwa: Simcenter MADYMO), rozwijane w kolejności chronologicznej przez instytut TNO w Holandii [27], Tass International B.V., a obecnie przez Siemens Digital Industries Software. Jest ono dedykowane głównie do celów zaawansowanych analiz badawczych, często na potrzeby przemysłu motoryzacyjnego. Modele wielobryłowe są zapewne znane Czytelnikom także z programów rekonstrukcyjnych, m.in. z programów V-SIM 5.0 [1] i PC-Crash [16].

Modele MES opierają się na dyskretyzacji wybranego obiektu za pomocą siatki małych deformowalnych elementów o określonych własnościach wytrzymałościowych. Modele MES cechują się możliwością bardzo wiernego odwzorowania geometrii i własności wytrzymałościowych materiałów, a co za tym idzie – dokładnością obliczeń, jednak ich obsługa lub naprawa błędów w modelu wymaga dużych umiejętności. Obliczenia z modelami MES są również bardzo czasochłonne, co najczęściej czyni ich wykorzystanie w rekonstrukcji wypadków nieopłacalnym. Oprogramowaniem wykorzystującym metody MES jest m.in. LS-DYNA, ABAQUS, a jednym z obecnie popularnych dedykowanych modeli ciała człowieka jest opracowany przez firmę Toyota model THUMS [8].



Ryc. 9. Przykłady modeli numerycznych ciała człowieka – po lewej, modele wielobryłowe, po prawej – model MES.

Modele numeryczne ciała człowieka dają najszersze możliwości tworzenia eksperymentów zderzeniowych dla dowolnych konfiguracji i warunków początkowych. Ułatwione jest także wprowadzanie opomiarowania, a co za tym idzie – rejestrowanie obciążeń działających na dowolny segment ciała w trakcie zderzenia. Znaczącą korzyścią tych modeli jest aspekt finansowy – powtórzenie testu kompu-

terowego jest znacznie tańsze niż przeprowadzenie pełnowymiarowego testu z manekinem. Należy jednak odnotować, że najbardziej zaawansowane modele komputerowe manekinów lub ciała człowieka potrafią kosztować kilkadziesiąt tysięcy euro za pojedynczy model (plus koszty samego oprogramowania). Ponadto, opracowanie wiernego modelu danego pojazdu wchodzącego w interakcję z pieszym jest zadaniem nietrywialnym, wymagającym szeroko zakrojonych, często kosztownych badań wytrzymałościowych. Temat ten, zwłaszcza w kontekście rekonstrukcji wypadków drogowych, został poruszony m.in. na Konferencji „PIESZY” [10, 16] oraz we wcześniejszych publikacjach wydawanych na łamach czasopisma *Paragraf na Drodze* [28].

3.7. Bazy danych

Przydatnym źródłem wiedzy biomechanicznej stanowiącym połączenie wielu z wymienionych wyżej metod są bazy danych o rzeczywistych wypadkach. Mowa tu nie tylko o statystykach policyjnych, których przykładem są raporty roczne udostępniane przez Polską Policję [12], ale rozbudowanych bazach łączących dane zarówno policyjno-inżynierskie, jak i medyczne. Wymienić można tu m.in. GIDAS i CIDAS, czyli, odpowiednio, *German In-Depth Accident Study* i *China In-Depth Accident Study*. Analizy danych z tych baz były przedmiotem wielu badań np. o tematyce ochrony niechronionych uczestników ruchu drogowego [3, 18]. W literaturze przedmiotu [26] opisano także przykłady wykorzystania dostępnych bezpłatnie baz danych w praktyce rekonstrukcji (np. amerykańskich baz NASS-CDS/CISS).

Mówiąc o bazach danych warto wymienić także stronę *Crash Simulation Vehicle Models* prowadzoną przez amerykańską agencję rządową NHTSA (*National Highway Traffic Safety Administration*). Na ww. stronie udostępnione zostały numeryczne modele pojedynczych pojazdów wraz z umieszczonymi w nich manekinami oraz raporty z walidacji. Te modele pojazdów mogą być wykorzystywane do symulacji we wspomnianych w rozdziale 3.6. programach symulacyjnych LS-DYNA lub MADYMO. Przykład wykorzystania jednego z takich modeli pojazdów (model MES Ford Econoline 1999 r.) przedstawiono w artykule [28].

Dodatkowym źródłem wiedzy mogą być komercyjnie udostępniane bazy wyników testów zderzeniowych z manekinami osób pieszych, takie jak baza *crashtest-service.com* [4]. Innym sposobem na uzyskanie informacji o zakresie bezpieczeństwa biernego oferowanego przez pojazdy może być analiza wyników testów konsumenckich (np. EuroNCAP). Ocena w skali „gwiazdkowej” i procentowej, informacje o wyposażeniu (np. o systemie aktywnej pokrywy silnika) lub uwagi w raporcie testowym mogą stanowić przydatną informację z punktu widzenia biomechaniki pasażerów lub pieszych.

4. *Badania biomechaniczne – wyzwania i osiągnięcia*

Wiedza zgromadzona przez wiele lat z badań biomechanicznych stanowi podstawę wielu osiągnięć w zakresie bezpieczeństwa biernego uczestników ruchu drogowego. Do zjawisk zidentyfikowanych przez biomechaników i pozostających nieustannym obszarem ich zainteresowań należą m.in.:

- mechanizm nurkowania pod pasem biodrowym (*submarining*);
- zjawisko *whiplash* i metody ochrony;
- zagadnienie *out-of-position* (położenie ciała względem pasa bezpieczeństwa, położenie głowy względem poduszek powietrznych);
- bezpieczeństwo dzieci w samochodach.

Naturalnie, jest to zaledwie wycinek z wielu zagadnień biomechanicznych, których poznanie umożliwiły metody badawcze opisane w bieżącym artykule.

Należy podkreślić, że temat nurkowania oraz *out-of-position* staje się istotny zwłaszcza w epoce rozwoju pojazdów autonomicznych. Pasażerowie mogą w przyszłości decydować się na podróże w pozycjach pochylonych/póллеżących, co wznaga efekt nurkowania, lub obracać fotele względem osi pionowej, przez co systemy pasów bezpieczeństwa projektowane głównie do zabezpieczenia przed zderzeniami czołowymi mogą stawać się nieskuteczne.

Każde z osiągnięć biomechaniki oznacza jednak zmaganie się z wieloma wyzwaniami. Jednym z nich jest kwestia problemu ze źródłami wiedzy biomechanicznej. Inherentna dla ciała ludzkiego zmienność osobnicza sprawia, że o wystąpieniu obrażeń możemy mówić tylko w kategoriach prawdopodobieństwa. Przykładowo, badanie Kressa i innych [13] wykazało, że krytyczna siła kompresji kości udowej mieści się w granicach od 3 do 10 kN, w zależności od osobnika oraz typu obciążenia. Dla omówionych tam eksperymentów z obciążeniem dynamicznym (czyli w warunkach adekwatnych dla sytuacji wypadku drogowego), średnia wartość siły krytycznej wynosi 5,27 kN, a odchylenie standardowe 2,47 kN.

Wyzwaniem pozostaje także stronniczość danych, np. wspomniane wyżej wykorzystywanie do testów zderzeniowych zwłok dawców głównie w starszym wieku. Niesie to za sobą znaczne konsekwencje, gdyż na bazie wielu takich eksperymentów tworzone są modele manekinów lub modele komputerowe.

Dla twórców modeli ciała człowieka wyzwanie stanowi zamodelowanie zjawisk fizycznych. Na przestrzeni lat badacze oferowali różne podejście do modelowania zderzeń ciał albo złamań kości. Tworząc model, autorzy muszą pamiętać o ich potencjalnym zastosowaniu i powiązanych z nim wymaganiach. Czasem wprowadzenie znacznego stopnia uproszczenia jest wystarczające, jeśli akceptowalnemu stopniowi biozgodności modelu towarzyszy łatwa obsługa oraz szybkość obliczeń.

5. Konkluzje

Biomechanika zderzeń to nauka, która wykorzystując szeroką gamę narzędzi jest w stanie zapewnić inżynierom, badaczom oraz rekonstruktorom wiedzę o zachowaniu ciała człowieka w trakcie wypadku drogowego. Przeprowadzając eksperymenty zderzeniowe lub korzystając z wiedzy literaturowej można podjąć próbę określenia (często wykorzystując wprost wartości liczbowe), która z konfiguracji jest prawdopodobnie bardziej szkodliwa dla uczestników zdarzenia. Wiedza ta w znacznym stopniu posłużyła do określenia wymagań, jakie stawiają producentom samochodów prawodawcy i organizacje konsumenckie w ramach swoich norm i protokołów testowych.

Istnieje znaczny, wciąż nie w pełni wykorzystany, potencjał w zastosowaniu wiedzy biomechanicznej w rekonstrukcji zdarzeń drogowych. Należy jednak pamiętać, że jednym zagadnieniem jest projektowanie pojazdów z myślą o ochronie większości populacji, a innym analiza konkretnego zdarzenia z danym osobnikiem o nieznanych parametrach wytrzymałościowych jego ciała. Eksperymenty lub symulacje biomechaniczne mogą wspomóc ocenę wybranych scenariuszy zdarzenia, ale nie powinny przesądzać o kategorii wystąpienia któregośkolwiek scenariusza. Ponadto, zdaniem autora, znajomość przez biegłego inżyniera biomechanicznych mechanizmów powstawania obrażeń takich jak *submarining* czy pozycja *out-of-position* jest bardzo przydatna, jednak powinna być jedynie wiedzą wspierającą, a nie zastępującą interdyscyplinarną opinię realizowaną przy współpracy z biegłym medykiem sądowym.

Bibliografia

- [1] Bułka, D., Wdowicz, D., Putanowicz, R., Kędziora, K. (2021). Nowy model wielobryłowy pieszego do symulacji zderzeń. *Paragraf na Drodze*, numer specjalny.
- [2] Carlsson, A., Horion, S., Davidsson, J., Schick, S., Linder, A., Hell, W., Svensson, M. Y. (2021). Dynamic Responses of Female Volunteers in Rear Impact Sled Tests at Two Head Restraint Distances. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9 (1), 62-b-68. DOI: 10.3389/fbioe.2021.684003.
- [3] Chen, Q., Chen, Y., Bostrom, O., Ma, Y., Liu, E. (2014). 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*, 1. DOI: 10.4271/2014-01-0519.
- [4] Crash Test Database. (2022). Pobrano z: <https://www.crashtest-service.com/en/database/> (dostęp: 24.11.2022 r.).
- [5] Crosby, W. M., Snyder, R. G., Snow, C. C., Hanson, P. G. (1968). Impact injuries in pregnancy. I. Experimental studies. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 101 (1), 100–108. DOI: 10.1016/0002-9378(68)90492-4.
- [6] De Haven, H. (2000). Mechanical analysis of survival in falls from heights of fifty to one hundred and fifty feet. 1942. *Injury Prevention: Journal of the International Society for Child and Adolescent Injury Prevention*, 6 (1), 62–68. DOI: 10.1136/ip.6.1.62-b.

- [7] Fallon, I., O'Neill, D. (2005). The world's first automobile fatality. *Accident Analysis and Prevention*, 37 (4), 601–603. DOI: 10.1016/j.aap.2005.02.002.
- [8] Iwamoto, M., Kisanuki, Y., Watanabe, I., Furusu, K., Miki, K., & Hasegawa, J. (2002). Development of a finite element model of the total human model for safety (THUMS) and application to injury reconstruction. *Proceedings of the International IRCOBI Conference*.
- [9] Kędziora, K. (w druku). Metody inżynierskiej analizy obrazów z wykorzystaniem liczbowych kryteriów biomechanicznych. *Paragraf na Drodze*.
- [10] Kędziora, K. (2022). Problemy modelowania właściwości materiałów w zastosowaniu do konstruowania pojazdów i rekonstrukcji wypadków drogowych (prezentacja). *Konferencja „PIESZY – Badania, Dokumentacja, Symulacje, Bezpieczeństwo”*.
- [11] King, A. I. (2017). *The Biomechanics of Impact Injury: Biomechanical Response, Mechanisms of Injury, Human Tolerance and Simulation* (s. 4–5). Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-49792-1.
- [12] Wypadki drogowe – raporty roczne. (2022). Pobrano z: <https://statystyka.policja.pl/st/ruch-drogowy/76562,Wypadki-drogowe-raporty-roczne.html> (dostęp: 24.11.2022 r.).
- [13] Kress, T. A., Snider, J. N., Porta, D. J., Fuller, P. M., Wasserman, J. F., Tucker, G. V. (1993). Human femur response to impact loading. *Proceedings of the International Research Council on the Biomechanics of Injury Conference*, 21 (s. 93–104).
- [14] Kuppa, S., Wang, J., Haffner, M., Eppinger, R. (2001). Lower Extremity Injuries and Associated Injury Criteria. *National Highway Traffic Safety Administration, USA*. Pobrano z: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2001-06-0160/> (dostęp 24.11.2022 r.).
- [15] Mertz, H. J., Patrick, L. M. (1971). Strength and response of the human neck. *SAE Technical Papers*, 2903–2928. DOI: 10.4271/710855.
- [16] Moser, A., Steffan, H., Kasanický, G. (1999). The pedestrian model in PC-Crash – The introduction of a multi body system and its validation. *SAE Technical Papers*, 794–802. DOI: 10.4271/1999-01-0445.
- [17] New York Times. (1993). *German University Said to Use Corpses in Auto Crash Tests*. The New York Times. Pobrane z: <https://www.nytimes.com/1993/11/24/world/german-university-said-to-use-corpses-in-auto-crash-tests.html> (dostęp: 14.11.2022 r.).
- [18] Crash Simulation Vehicle Models. (2022). Pobrane z: <https://www.nhtsa.gov/crash-simulation-vehicle-models> (dostęp: 24.11.2022 r.).
- [19] Otte, D., Jänsch, M., Haasper, C. (2012). Injury protection and accident causation parameters for vulnerable road users based on German In-Depth Accident Study GIDAS. *Accident Analysis & Prevention*, 44 (1), 149–153. DOI: 10.1016/j.aap.2010.12.006.
- [20] Prasad, P., Melvin, J. W., Huelke D. F., King, A. I., Nyquist, G. W. (1985). Head. Chapter 1. In *Review of biomechanical impact response and injury in the automotive environment*. UMTRI.
- [21] Ptak, M. (2022). Modele numeryczne ciała człowieka w rekonstrukcji wypadków (prezentacja). *Konferencja „PIESZY – Badania, Dokumentacja, Symulacje, Bezpieczeństwo”*.
- [22] Shang, S., Masson, C., Teeling, D., Py, M., Ferrand, Q., Arnoux, P. J., Simms, C. (2020). Kinematics and dynamics of pedestrian head ground contact: A cadaver study. *Safety Science*, 127, 104684. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104684.

- [23] Svensson, M. Y., Aldman, B., Hansson, H. A., Lövsund, P., Seeman, T., Suneson, A., Örtengren, T. (1993). Pressure effects in the spinal canal during whiplash extension motion – a possible cause of injury to the cervical spinal ganglia. *Proceedings of the International Research Committee on the Biomechanics of Impacts (IRCOBI) Conference, Eindhoven, Netherlands* (s. 189–200).
- [24] Talantikite, Y., Bouquet, R., Ramet, M., Guillemot, H., Robin, S., Voiglio, E. (1998). Human thorax behaviour for side impact: Influence of impact mass and velocities. *Proceedings of the Conference on the Enhanced Safety of Vehicles* (s. 1542–1549).
- [25] Teresiński, G., Unarski, J., Wach, W. (2019). Kryteria prawdopodobieństwa obrażeń. W: Teresiński G. (red.). *Medycyna sądowa. Tom 1. Tanatologia i traumatologia sądowa* (s. 764–771). Warszawa: Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich.
- [26] Teresiński, G. (2021). Wykorzystanie badań testowych, zależności statystycznych i baz danych w rekonstrukcji wypadków drogowych. W: Teresiński G. (red.). *Medycyna sądowa. Tom 3. Opiniowanie i kliniczna medycyna sądowa* (s. 568–603). Warszawa: Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich.
- [27] Van Wijk, J., Wismans, J., Maltha, J., Wittebrood, L. (1983). MADYMO pedestrian simulations. *SAE Technical Papers*. DOI: 10.4271/830060.
- [28] Zębala, J., Kwieciński, K., Ptak, M. (2019). Wjazd pod naczepe – metody obliczania EES. *Paragraf na Drodze*, numer specjalny.

* * *

Impact biomechanics. Approaches, information sources, experiments and modeling

Abstract

The aim of the article was to present an overview of experimental methods in impact biomechanics. The definition of impact biomechanics as a special branch combining engineering and medical sciences is provided, together with a conceptual scheme of biomechanics research in the pipeline. Various sources of biomechanical data are briefly described, such as animal testing, volunteer testing, cadaver and anthropomorphic test devices (dummy) testing and numerical simulations. Advantages and drawbacks of each of these information sources are discussed. Many challenges related to conducting biomechanical experiments and simulations are indicated. However, there is a great potential for utilizing the accomplishments of impact biomechanics not only in industrial applications, but also in the practice of road accident reconstruction.

Key words

Impact biomechanics, experimental methods, simulations.