

Symulacje numeryczne testów zderzeniowych barier ochronnych

prof. dr hab. inż. Krzysztof Wilde,
mgr inż. Dawid Bruski,
dr inż. Stanisław Burzyński,
prof. dr hab. inż. Jacek Chróścielewski,
mgr inż. Łukasz Pachocki,
dr hab. inż. Wojciech Witkowski,
prof. nadzw. PG, Politechnika Gdańska

W pracy przedstawiono metodykę budowy modelu obliczeniowego ukierunkowanego na badania zderzeniowe w środowisku Metody Elementów Skończonych. Opisano etapy tworzenia takiego modelu, jego modyfikacji oraz sprawdzania poprawności przeprowadzonej symulacji, a także przedstawiono kilka autorskich przykładów zastosowania proponowanych obliczeń do badania barier ochronnych.

Liczba pojazdów na polskich drogach w ostatnich latach stale wzrasta. W 2006 roku liczba zarejestrowanych pojazdów wynosiła nieco ponad 18 mln, natomiast w 2017 roku osiągnęła prawie 29,2 mln [17, 18], podnosząc statystycznie prawdopodobieństwo zaistnienia kolizji drogowych. Chociażby z tego względu zwiększenie nacisku na zapewnienie bezpieczeństwa na drodze oraz w jej bezpośrednim otoczeniu jest jak najbardziej uzasadnione. Należy podkreślić, że w wyniku działań administracji drogowej w tym kierunku, mimo wzrostu liczby pojazdów, liczba wypadków drogowych oraz ofiar śmiertelnych tych wypadków systematycznie maleje. W 2007 roku odnotowano w Polsce ponad 49,5 tys. wypadków, w których zginęło ponad 5,5 tys. osób, natomiast w 2017 roku zarejestrowano już niecałe 33 tys. wypadków drogowych, w wyniku których śmierć poniosło nieco ponad 2,8 tys. osób.

Jednym ze sposobów poprawy bezpieczeństwa w ruchu drogowym jest stosowanie w miejscach szczególnie niebezpiecznych urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego, jakimi są m.in. bariery ochronne. Bariera nie jest urządzeniem neutralnym, ponieważ uderzenie w nią może być również zagrożeniem dla pasażerów pojazdu. Dlatego też należy stosować je wyłącznie tam, gdzie przewidywane konsekwencje wyjechania na pobocze niosą ze sobą większe zagrożenie niż uderzenie w barierę [19]. W tab. 1 zestawiono liczbę zdarzeń oraz ich skutki w wyniku najazdu pojazdu na barierę ochronną i dla porównania skutki najechania na drzewo, słup lub znak w latach 2016 oraz 2017. Do tej liczby zdarzeń należy dodać wiele drobnych kolizji z barierami, które nie zostały ujęte w statystykach. Takie zdarzenia skutkują nieznacznymi trwałymi deformacjami barier, które można powszechnie obserwować na drogach i autostradach.

Normy dotyczące badań zderzeniowych

Wymagania stawiane barierom ochronnym są regulowane przez normy [8]. W zależności od wersji tzw. testu zderzeniowego zmieniają się: prędkość zderzenia, kąt najazdu pojazdu na barierę, całkowita masa pojazdu oraz typ pojazdu. Na podstawie uzyskanych wyników z badań poligonowych określa się cechy funkcjonalne bariery, tj.: poziom powstrzymywania, szerokość pracującą oraz poziom intensywności zderzenia. Poziom powstrzymywania jest to zdolność bariery do powstrzymywania pojazdu, który najechał na tę barierę. Wyróżnia się cztery poziomy powstrzymywania, określane jako: mały (T), normalny (N), podwyższony (H, L)

SUMMARY

Numerical simulation as a support for testing the properties of safety barriers

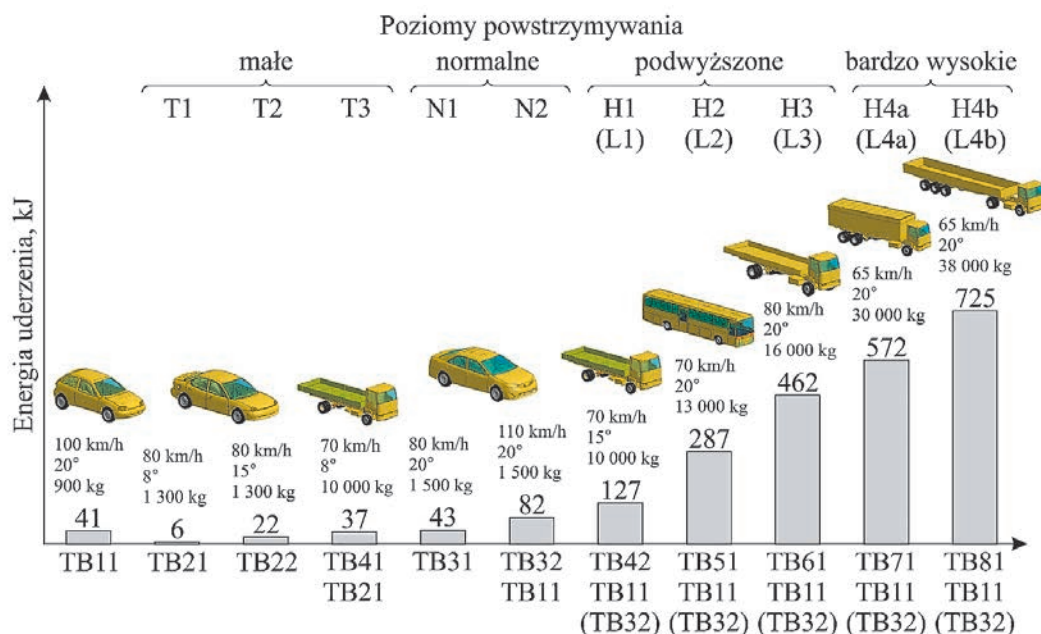
The paper presents the possibilities of using numerical simulation to test the properties of road safety equipment. Nowadays safety barriers must pass specialist crash tests, what allows them to be commonly used. Because of the high cost of crash tests, more and more manufacturers and other investigators of traffic barriers are supported by numerical simulations. The article presents the methodology of creating a numerical model of crash test as well as several examples of numerical calculations.

Keywords: road safety equipment, road safety barrier, FEM, LS-DYNA

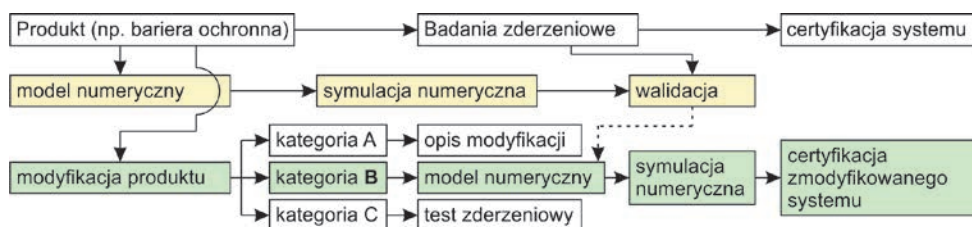
i bardzo wysoki (H4, L4). Na rys. 1 przedstawiono energię kinetyczną pojazdu przed uderzeniem (brana jest pod uwagę pozioma i prostopadła do lica bariery składowa prędkości pojazdu) w zależności od przyjętego badania zderzeniowego i poziomu powstrzymywania. Poniżej osi poziomej w pierwszym rzędzie zapisano nazwę normową danego testu, pod nią zaś zapisano nazwy kolejnych testów, które musi przejść bariera, aby przypisać jej dany poziom powstrzymywania. Na przykład poziom powstrzymywania (podwyższony) H1 otrzymuje bariera, która przeszła pomyślnie nie tylko test TB42 (prędkość: 70 km/h, kąt: 15°, pojazd: 10 000 kg), ale także test TB11 (100 km/h, 20°, 900 kg). Szerokość pracująca to miara zdolności bariery do deformacji podczas zderzenia. Określa się ją jako odległość pomiędzy powierzchnią czołową lica bariery przed zderzeniem a maksymalnie odsuniętą częścią bariery lub pojazdu od tej powierzchni w czasie zderzenia. Szerokość ta pozwala określić, jaka przestrzeń za barierą powinna pozostać wolna do ewentualnej przeszkody znajdującej się za nią. Poziom intensywności zderzenia pozwala ocenić wpływ zderzenia na osoby będące w pojeździe. Określa się go na podstawie tzw. wskaźnika intensywności przyspieszenia (ASI) oraz teoretycznej prędkości głowy w czasie zderzenia (THIV). Oprócz spełnienia określonych wymogów zapisanych we wzmiankowanych normach dotyczących wymienionych powyżej parametrów podczas testu sprawdzane są również inne warunki zachowania się bariery ochronnej (np. identyfikuje się odłączone elementy o masie powyżej 2 kg) oraz pojazdu (np. warunek pola odbicia tzw. *exit box* czy wskaźnik

Najechanie na	Wypadki				Zabici				Ranni			
	2016 rok		2017 rok		2016 rok		2017 rok		2016 rok		2017 rok	
	liczba	%	liczba	%	liczba	%	liczba	%	liczba	%	liczba	%
drzewo	1870	5,6	1667	5,1	425	14,0	376	13,3	2278	5,6	1957	5,0
słup, znak	578	1,7	555	1,7	59	1,9	71	2,5	679	1,7	657	1,7
barierę	397	1,2	352	1,1	33	1,1	39	1,4	496	1,2	424	1,1
wszystkie wypadki	33 664	100	32 760	100	3026	100	2831	100	40 766	100	39 466	100

Tab. 1. Liczba oraz skutki najechania pojazdu na przeszkodę w latach 2016 i 2017 w Polsce [17, 18]



Rys. 1. Energia uderzenia w zależności od przyjętego badania zderzeniowego i poziomu powstrzymywania



Rys. 2. Symulacje numeryczne w procesie certyfikacji zmodyfikowanych produktów

odkształcenia kabiny pojazdu VCDI). Warto zaznaczyć, że powyższe normy nie stawiają warunków odnośnie do: geometrii, wymiarów ani materiałów barier ochronnych, inaczej mówiąc: nie definiują samej bariery.

Symulacje numeryczne badań zderzeniowych

Przeprowadzenie polowego badania zderzeniowego jest kosztowne i czasochłonne. Do jego wykonania niezbędne są specjalistyczny poligon doświadczalny wyposażony w dedykowaną aparaturę pomiarową oraz obsługa odpowiednio wykwalifikowanej kadry. Jeśli bariera ma być testowana pod kątem dopuszczenia do użytku, to taki test musi przeprowadzić tzw. instytucja notyfikowana [19]. W czasie badania niszczone są kilkudziesięciometryrowy odcinek bariery oraz pojazd, który musi mieć ważne badanie techniczne i być dopuszczony do ruchu. Dlatego też rozwiązania, które obniżą koszty realizacji procedury certyfikacji barier, są poszukiwane. Symulacje numeryczne nie zastąpią badań poligonowych, ale mogą je uzupełnić na przykład na etapie projektowania lub w pracach przy modyfikacji istniejących systemów powstrzymywania. Symulacje numeryczne umożliwiają, relatywnie tanie, badania parametryczne, czyli analizy różnych konfiguracji układu (pojazd – bariera – środowisko), dając jednocześnie możliwość dokładnego prześledzenia przebiegu zderzenia i precyzyjny wgląd w mechanikę zachodzących zjawisk, które nie są osiągalne w testach doświadczalnych. Do przeprowadzania symulacji można zastosować metodę elementów skończonych (MES). Jednym z programów bazujących na tej metodzie jest komercyjny system LS-DYNA, który jest rozwijany od 1976 roku przez grupę analityków pod kierunkiem Johna Hallquista [4]. Jest to skuteczne narzędzie powszechnie uznane i stosowane na całym świecie do przeprowadzania symulacji szybkozmiennych zjawisk dynamicznych, przy użyciu tzw. jawnych (ang. *explicit*) algorytmów całkowania równań ruchu. Badania numeryczne pozwalają na uwzględnienie wpływu wielu czynników, takich jak np.: warunki pogodowe,

warunki gruntowe, stan nawierzchni. Dodatkowo można również uwzględnić wpływ czasu oraz warunków eksploatacji na funkcjonalność barier ochronnych, np. poprzez zadanie wstępnej deformacji i ewentualnych efektów uszkodzeń bariery czy degradacji jej materiałów rejestrowanych na obiektach rzeczywistych.

Symulacje numeryczne badań zderzeniowych są przedmiotem wielu prac naukowo-badawczych. Liczne publikacje przedstawiają rezultaty badań numerycznych dotyczących barier ochronnych, np. [2, 3, 13-16]. Wiarygodne wyniki uzyskuje się z symulacji, które przeszły proces walidacji i aktualizacji parametrów modelu na danych z rzeczywistych testów zderzeniowych. Przykład takich rozważań można znaleźć np. w pracy [13], gdzie badano wpływ rozstawu słupków oraz położenia wysokościowego przewodnicy na funkcjonalność stalowej bariery drogowej. Potwierdzono bardzo dobrą zgodność wyników obliczeń z pomiarami pozyskanymi z rzeczywistego testu. Innym przykładem jest publikacja [14], w której przeprowadzono wirtualne testy zderzeniowe TB11 oraz TB42 i zwalidowano je, korzystając z danych pomiarowych pozyskanych doświadczalnie.

Prawne uwarunkowania wykorzystania symulacji numerycznych do certyfikowania barier ochronnych

Symulacje numeryczne, zgodnie z normą EN1317 część 5 [9], mogą w pewnych przypadkach być podstawą certyfikacji barier ochronnych, które zostały poddane pewnej modyfikacji. Powyższa norma określa trzy kategorie modyfikacji istniejącego systemu bariery ochronnej, które zostały przedstawione w tab. 2.

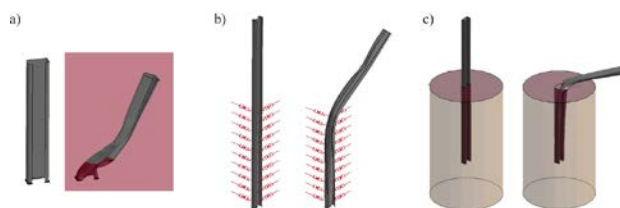
Modyfikacja w zakresie kategorii A wymaga jedynie opisu proponowanych zmian. W przypadku kategorii B należy przedstawić pisemny raport zawierający m.in.: specyfikację bariery, obliczenia oraz/lub wyniki badań porównane do pierwotnych wartości. W ramach tej kategorii można wykonać obliczenia numeryczne, które mogą być podsta-

Piśmiennictwo

- Bloch J.: *EN 1317 and the CE mark. Current Advances in Road Infrastructure Safety Equipment*, Greece, 12-13.02.2015 r.
- Borkowski W., Hryciów Z., Rybak P., Wysocki J.: *Numerical simulation of the standard TB11 and TB32 tests for a concrete safety barrier*. „Journal of KONES Powertrain and Transport”, Vol. 17, 4/2010, s. 63-71.
- Klasztorny M., Zielonka K., Nycz D.B., Posuniak P., Romanowski R.K.: *Experimental validation of simulated TB32 crash tests for SP-05/2 barrier on horizontal concave arc without and with composite overlay*. „Archives of Civil and Mechanical Engineering”, 18/2018, s. 339-355.
- LS-DYNA Theory Manual. LSTC, <http://www.lstc.com/download/manuals>.
- National Crash Analysis Center, <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html> (data dostępu: 10.03.2016 r.).
- National Highway Traffic Safety Administration, <https://www.nhtsa.gov/crash-simulation-vehicle-models> (data dostępu: 29.06.2017 r.).
- PD CEN/TR 16303-1-4:2012 *Road Restraint Systems – Guidelines for computational mechanics of crash testing against vehicle restraint system*.
- PN-EN 1317-1-2:2010 *Systemy ograniczające drogę*.
- PN-EN 1317-5+A2:2012 *Systemy ograniczające drogę – część 5: Wymagania w odniesieniu do wyrobów i ocena zgodności dotyczące systemów powstrzymujących pojazd*.

Kategoria	Zmiana	Opis
A	Nieznaczna	Modyfikacje, które nie wymagają żadnych mechanicznych zmian w systemie powstrzymującym pojazd. Przykład: ponowne malowanie bariery
B	Umiarkowana	Modyfikacja jednego lub więcej elementów systemu, dla której efekt na działanie systemu powstrzymującego może zostać określony za pomocą statycznej lub dynamicznej analizy lub przez inne odpowiednie środki. Przykład: bariera metalowa, w której zwiększono długość podłużnic, bariera linowa, w której długość odcinka pomiędzy zakotwieniami zostaje zmniejszona
C	Znaczna	Modyfikacja wykraczająca poza zakres modyfikacji A lub B. Przykład: bariera metalowa, w której zmieniono rodzaj lub gatunek metalu

Tab. 2. Kategorie modyfikacji systemów powstrzymujących pojazd [9]



Rys. 3. Odzworowanie warunków brzegowych (widok ogólny oraz deformacja po teście zderzeniowym: a) sztywne zamocowanie słupka – utwierdzenie 10 cm poniżej terenu, kolorem czerwonym zaznaczono poziom terenu, b) podłoże w formie zestawu odpowiednio dobranych podpór sprężystych, c) grunt w obszarze oddziaływania słupka opisuje ośrodek ciągły o postaci bryły w kształcie walca, tzw. „doniczka”

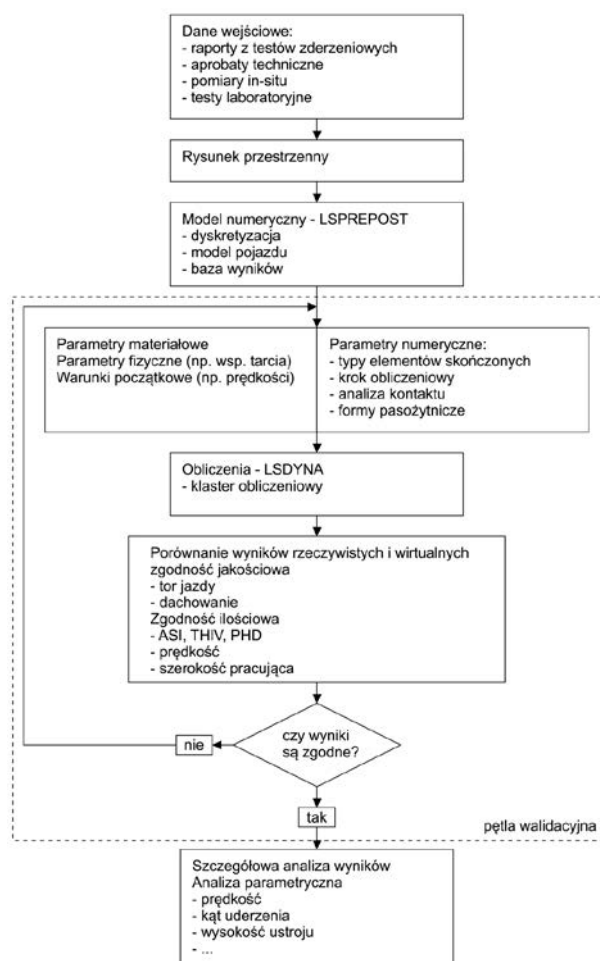
wą uzyskania certyfikacji dla zmodyfikowanego produktu. Aby uzyskać certyfikację systemu zmodyfikowanego dla kategorii C, należy przeprowadzić poligonowe badanie zderzeniowe. W celu certyfikacji produktu zmodyfikowanego na podstawie symulacji numerycznych należy wykonać tzw. model numeryczny oryginalnego (pierwotnego) systemu powstrzymującego, który uzyskał certyfikat na podstawie rzeczywistych badań zderzeniowych. Model ten musi pozytywnie przejść proces walidacji zgodnie z normami PD CEN/TR 16303:2012 *Road restraint systems – Guidelines for computational mechanics of crash testing against vehicle restraint system* [7]. Do tak przygotowanego modelu numerycznego wprowadza się modyfikacje mieszczące się w ramach kategorii B, a następnie wykonuje się symulacje numeryczne, na podstawie których zmodyfikowany produkt uzyskuje certyfikację. Schemat (wg [1]) procesu certyfikacji zmodyfikowanych systemów barier ochronnych na podstawie symulacji numerycznych przedstawia rys. 2. Takie podejście pozwala ograniczyć liczbę kosztownych testów zderzeniowych. Norma zaznacza, że każde obliczenia, w których wykorzystuje się modele komputerowe, powinny być potwierdzone przez niezależną stronę trzecią.

Tworzenie modelu numerycznego

Tworzenie tzw. prototypu modelu obliczeniowego testu zderzeniowego jest procesem czasochłonnym (w odróżnieniu od jego kolejnego wariantowania), wymagającym specjalistycznej wiedzy z zakresu: teorii i mechaniki konstrukcji, dyskretyzacji MES, równań konstytutywnych, metod całkowania dynamicznych równań ruchu itp. Podstawowy model badania zderzeniowego najczęściej zawiera następujące komponenty:

- system urządzenia powstrzymującego (model bariery ochronnej wraz z gruntem),
- pojazd,
- powierzchnię, po której porusza się pojazd,
- dodatkowe elementy (np. obiekt ustawiony w szerokości pracującej).

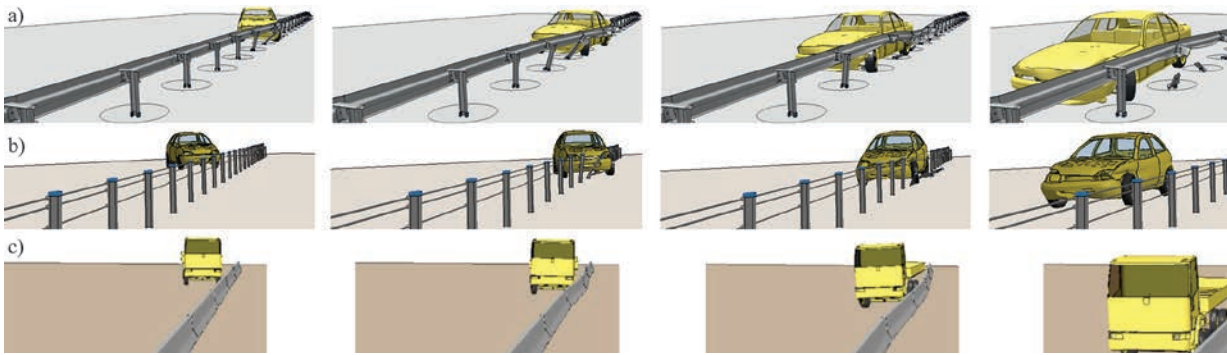
Nowoczesne oprogramowania komputerowe pozwalają na efektywne tworzenie modeli numerycznych różnych obiektów. Możliwe jest wierne odtworzenie wielu rodzajów bariery ochronnej. Z punktu widzenia problematyki poruszanej w tej pracy obiektem badań jest bariera, więc jej model jest najistotniejszym składnikiem układu w symulacji testu zderzeniowego i stąd należy odtwo-



Rys. 4. Schemat budowy układu/modelu obliczeniowego testu zderzeniowego

żyć go z jak największą starannością. Utworzony model bariery należy wzbogacić o podłoże/grunt, w którym zagłębione są słupki bariery (rys. 3). W przypadku barier mostowych zamiast gruntu występuje potrzeba odwzorowania kapy chodnikowej z systemem mocowania do niej bariery za pomocą śrub.

Następnym, ważnym i niezbędnym składnikiem do stworzenia układu obliczeniowego jest model numeryczny pojazdu. Ponieważ celem symulacji badań zderzeniowych jest analiza pracy bariery i np. wprowadzonych w jej strukturze modyfikacji, a nie szczegółowa analiza zachowania pojazdu, w większości prac badawczych w tym zakresie wykorzystuje się opracowane przez inne jednostki badawcze modele zakupione lub pozyskane ze źródeł internetowych (*open source*). Przykładami baz pojazdów są te udostępnione przez National Crash Analysis Centre (NCAC, obecnie niedostępna) [5] oraz National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) [6]. Stosowanie ogólnodostępnych modeli pojazdów jest zasadne, gdyż opracowanie własnego modelu nie jest obszarem badań inżynierii lądowej i wymaga dużej wiedzy na temat budowy pojazdu oraz sposobu działania jego podukładów. Należy jednak zaznaczyć, że w większości przypadków te dostępne modele wymagają modyfikacji lub poprawy, której celami są dostosowanie ich do potrzeb planowa-



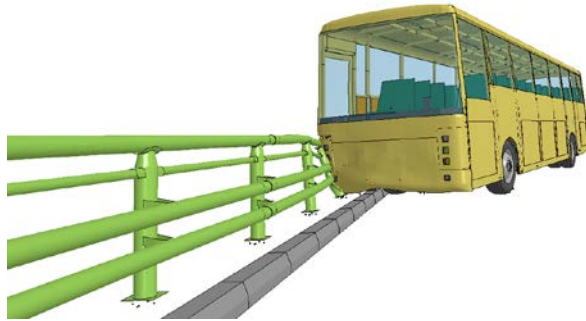
Rys. 5. Wizualizacja symulacji testu zderzeniowego dla: a) bariery stalowej, b) bariery linowej, c) bariery betonowej

nych do realizacji testów zderzeniowych i wymogów zawartych w normach [7, 8] oraz eliminacja nieprawidłowości z zakresu MES występujących relatywnie często w oryginalnej wersji.

Kolejnym elementem układu jest powierzchnia, po której poruszać się będzie pojazd. Powierzchni tej należy przypisać wartości współczynników tarcia pomiędzy ogumieniem pojazdu a nawierzchnią drogi oraz inne pożądane właściwości.

Ostatnim komponentem układu do symulacji testów zderzeniowych są dodatkowe elementy, do których zaliczają się m.in. różnego rodzaju objekty lub przeszkody mogące wpływać na przebieg zderzenia. Na przykład mogą to być słup oświetleniowy lub słup bramownicy drogowej znajdujący się w jej szerokości pracującej czy też osłony przeciwoślńniowe zamontowane na barierze.

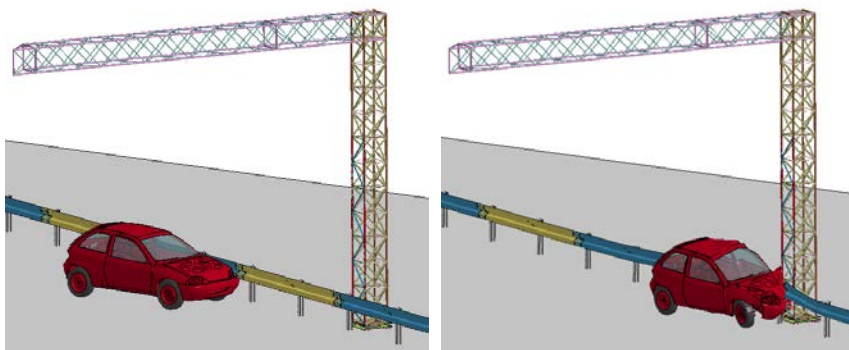
Ogólny schemat postępowania przy tworzeniu modelu obliczeniowego testu zderzeniowego pokazano na rys. 4. W pierwszym kroku należy opracować dane wejściowe, wykorzystując różne źródła, takie jak np. projekt i rysunki techniczne, pliki typu CAD, na podstawie których można odtworzyć geometrię układu oraz określić, z jakich materiałów wykonano system bariery. Kolejne dane pozyskane są jako wyniki z rzeczywistego badania zderzeniowego tej samej klasy co analizowany problem. Te dane posłużą w jednej ze wstępnych wersji obliczeń jako potwierdzenie (w procesie walidacji) poprawności opracowanego modelu całego układu oraz technik prowadzonej symulacji. Po zebraniu tych danych można przystąpić do budowania przestrzennej geometrii systemu bariery ochronnej w ujęciu graficznym (np. AutoCAD). W kolejnym kroku należy wyeksportować poszczególne elementy do preprocesorów programów Metody Elementów Skończonych, m.in. Ls-PrePost (pre- i postprocesor programu LS-DYNA), ABAQUS CAE, Hypermesh. Przy ich użyciu dokonuje się dyskretyzacji układu na elementy skończone. Siatki elementów skończonych stworzone w środowisku innym niż Ls-PrePost należy wprowadzić do środowiska Ls-PrePost, w którym tworzony jest zasadniczy model MES, tj. np. nadawane są: grubości, właściwości materiałowe, warunki brzegowe itp. W ostateczności powstaje tzw. plik k (*.k lub *.key) stanowiący pakiet wsadowy do jądra obliczeniowego programu LS-DYNA. Modyfikacjom w modelu obliczeniowym (układzie) mogą podlegać parametry podzielone na dwie grupy: fizyczne i numeryczne. Do pierwszej grupy należy zaliczyć te parametry, które są elementem teorii konstrukcji niezależnym od sposobu modelowania oraz mają jasną interpretację fizyczną (np.: parametry materiałowe, współczynniki tarcia, wartość obciążeń, prędkość początkowa). Do drugiej grupy zalicza się parametry ściśle związane z metodą rozwiązania problemu (tu MES ze schematami całkowania w dziedzinie czasu), np.: charakterystyka siatki dyskretyzacyjnej, typy elementów skończonych, parametry algorytmów kontaktu, sposoby kontroli form zeroenergetycznych, długość kroku całkowania itp. Wartości parametrów z tej grupy wynikają z warunków potrzebnych do speł-



Rys. 6. Wizualizacja symulacji testu zderzeniowego TB51 – bariera mostowa

nienia odpowiednich kryteriów zbieżności i stabilności stosowanych metod numerycznych związanych z dyskretyzacją po przestrzeni i w dziedzinie czasu.

Przed przystąpieniem do fazy obliczeń zasadniczych należy przeprowadzić obliczenia pilotażowe, których zadaniem jest kontrola zgodności uzyskanych wyników potwierdzających poprawność opracowanego modelu wirtualnego. Nieodzownym składnikiem wiarygodnego badania numerycznego jest faza walidowania modelu obliczeniowego odniesiona do wyników ilościowych i jakościowych testów poligonowych. Aby sprawdzić, czy symulacja odpowiada rzeczywistości, potrzebna jest analiza porównawcza parametrów, takich jak: szerokość pracująca, ugięcie dynamiczne, ASI, THIV, długość styku pojazdu z barierą oraz ocena trajektorii ruchu pojazdu. Sprawdzeniu w symulacji podlega również zgodność uszkodzeń bariery, np.: liczba słupków odłączonych od bariery i kolejność ich niszczenia, poziom jej uszkodzenia itp. Dokładny opis przebiegu procesu weryfikacji modelu oraz jego walidacji określają normy europejskie PD CEN/TR 16303:2012 [7]. Dokładniejsze porównanie może być zrealizowane za pomocą dodatkowych pomiarów (np. pomiar bariery po badaniu przy zastosowaniu skanera laserowego i porównanie deformacji z symulacji numerycznej) lub przy wykorzystaniu specjalnego oprogramowania, np. Roadside Safety Verification and Validation Program [11], służący do porównywania krzywych czasowych wyników eksperymentalnych i numerycznych. Stosowanie tego programu pozwala ograniczyć wpływ subiektywnej opinii osoby oceniającej rezultaty i jednocześnie wprowadza pożądany składnik ilościowy oceny wyników numerycznych. Należy zaznaczyć, że w procesie walidacji ze względu na liczne czynniki losowe pojawiające się w trakcie testów poligonowych przyjmowany jest tylko pewien założony i akceptowalny poziom zgodności modelu obliczeniowego z rzeczywistością. Wynika to z istoty zderzeniowego testu poligonowego, ponieważ z punktu widzenia nauki eksperymentalnej niestety ma on tylko charakter incydentalnego badania technicznego, tutaj z powodu braku możliwości ograniczenia czynników losowych jego wyniki nie spełniają warunku powtarzalnej dokładności ilościowej eksperymentu laboratoryjnego (podobnie jak ma to miejsce w niektórych działach biometrii, np. [12]). Stąd konstruowanie rozwiązań podnoszących ten poziom jest możliwe, ale nie ma uzasadnienia, bowiem z jednej



Rys. 7. Wizualizacja symulacji w początkowej fazie uderzenia w barierę kończąca się kolizją z konstrukcją wsporczą



Fot. 1. Konstrukcja wsporcza w szerokości pracującej bariery

10. Repozytorium projektu ROBUST, <http://www.vegvesen.no/s/robust/> (data dostępu: 1.10.2016 r.).
11. RSVVP, <http://roadsafellc.com/NCHRP22-24/RSVVP/> (data dostępu: 10.05.2018 r.).
12. Tadeusiewicz R., Izworski A., Majewski J.: *Biometria*. Kraków 1993.
13. Teng T., Liang C., Tran T.: *Effect of various W-beam guardrail post spacing and rail heights on safety performance*. „Advances in Mechanical Engineering”, vol. 7, 11/2015, s. 1-16.
14. Vasenjak M., Borovinšek M., Ren Z.: *Computational simulations of road safety barriers using LS-DYNA*, 6. LS-DYNA Anwenderforum, Frankenthal, DYNAMore GmbH, 2007, s. 1-8.
15. Wilde K., Burzyński S., Bruski D., Chróścielewski J., Witkowski W.: *TB 11 test for short w-beam road barrier*, 11. LS-DYNA European LS-DYNA Conference 2017, Salzburg, Austria, DYNAMore GmbH, 2007, s. 1-10.
16. Wilde K., Jamroz K., Bruski D., Budzyński M., Burzyński S., Chróścielewski J., Witkowski W.: *Curb-to-Barrier Face Distance Variation in a TB51 Bridge Barrier Crash Test Simulation*. „Archives of Civil Engineering”, 63/2017, s. 187-199.
17. *Wypadki drogowe w Polsce w 2016 roku*. Komenda Główna Policji, Biuro Ruchu Drogowego, Warszawa 2017.
18. *Wypadki drogowe w Polsce w 2017 roku*. Komenda Główna Policji, Biuro Ruchu Drogowego, Warszawa 2018.
19. *Wytyczne stosowania drogowych barier ochronnych na drogach krajowych*. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2010.

strony wymaga zaangażowania nieproporcjonalnie dużych środków, zaś z drugiej będzie odnosić się tylko i wyłącznie do konkretnego testu polowego, którego powtórzenie z zachowaniem wysokiego poziomu szczegółowości, tak jak wypadku drogowego, ze względu na czynniki losowe nigdy nie jest możliwe w praktyce. Model obliczeniowy układu z określonym typem bariery, który przeszedł poprawnie proces walidacji, może być użyty do symulacji dalszych analiz technicznych w formie studium parametrycznego, dotyczącego np. dopuszczalnych zmian geometryczno-materiałowych w różnych warunkach kinematyki uderzenia pojazdu, np. przy zmianie prędkości i/lub kąta najechania.

Przykłady autorskich badań symulacyjnych

Najpowszechniejszym rodzajem barier opisywanym w literaturze, które bada się przy wykorzystaniu symulacji numerycznych, są bariery z prowadnicą stalową. Przykład autorskiej symulacji testu zderzeniowego TB32 ze stalową barierą ochronną klasy N2-W4-A przedstawiono na rys. 5a. Opracowany model obliczeniowy układu do badania zderzeniowego zawiera 457 467 węzłów siatki dyskretnej i 437 535 elementów skończonych. W symulacjach zastosowano model pojazdu opracowany przez Transpolis (poprzednio LIER, Francja), który został poddany pewnym dostosowawczym modyfikacjom autorskim. Charakterystyczne wymiary powłokowych elementów skończonych zawierają się w przedziale 10-15 mm. Przykład innej autorskiej symulacji zderzenia pojazdu osobowego z barierą linową w teście TB11 przedstawiono na rys. 5b. Model pojazdu zaczerpnięto z repozytorium projektu ROBUST [10] i poddano go pewnym zmianom mającym na celu wyeliminowanie nieprawidłowości występujących w oryginalnej wersji. Symulacje dotyczące bariery linowej mają swoją specyfikę. Bowiem występują tu dodatkowe trudności w procesie modelowania tego silnie nieliniowego geometrycznego układu związane z poprawnym odwzorowaniem pracy liny, sposobu jej naprężenia oraz redukcji niepożądanych efektów numerycznych towarzyszących symulacji szybkiego napinania liny, poprzedzającej właściwą symulację uderzenia w niepojazd. Problemy te nie występują w przypadku innych rodzajów barier.

Coraz częściej dokonuje się prób symulacji zachowania elementów barier betonowych [2]. Najczęściej stosuje się je jako bariery tymczasowe bądź w miejscach wymagających większego zabezpieczenia, np. pylon czy przyczółek mostowy. Przykład własnej symulacji testu zderzeniowego TB41 bariery betonowej przedstawiono na rys. 5c. W opracowaniu zastosowano model materiału betonu *MAT_159_CSCM, który umożliwił analizę propagacji rys [4] powstałych w wyniku uderzenia, a następnie identyfikacji ich położenia. Wirtualny pojazd wykorzystany w tej symulacji został pobrany z publicznych zasobów NHTSA [6]. Wprowadzono w nim kilka modyfikacji, m.in. poprawę dyskretyzacji układu oraz całkowitą zmianę sposobu modelowania opon pojazdu, które w oryginalnej

wersji wykazywały efekt zwiększonej sztywności niedopuszczalnej w symulacji testów zderzeniowych. Ważnym aspektem podczas modelowania systemów betonowych jest przyjęcie odpowiednich współczynników tarcia statycznego oraz dynamicznego bariery o podłoże oraz pomiędzy innymi częściami składowymi tworzących obiekt. Wynika to z faktu, że bariery betonowe mogą być ustawione bez fundamentowania i powiązania z podłożem, powstrzymują one pojazd głównie poprzez swoją bezwładność (masę), przejmując energię kinetyczną i rozpraszając ją m.in. poprzez tarcie. Dlatego bariery betonowe są bardzo sztywne, co w efekcie zderzenia pojazdu z nimi zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia poważnych urazów u pasażerów.

Modelowanie układu bariery mostowej wymaga odmiennego podejścia do odwzorowania podłoża, tj. zamocowania słupków oraz uwzględnienia krawężnika. W większości barier mostowych występuje zakończenie słupków w formie blachy czołowej, poprzez którą są one przytwierdzone do kapy mostowej za pomocą kotew. Rys. 6 pokazuje początkowe stadium uderzenia autobusu w barierę mostową w teście TB51.

Symulacje numeryczne pozwalają również na analizę sytuacji nieujętych w normach, ale występujących w rzeczywistości na drogach. Przykładem może być tu konstrukcja wsporcza umieszczona w szerokości pracującej bariery (fot. 1). Należy zaznaczyć, że jest to sytuacja nieprawidłowa z punktu widzenia projektowego i wykonawczego. Niestety tego typu rozwiązania występują często na szlakach komunikacyjnych, stwarzając poważne zagrożenie dla uczestników ruchu drogowego. Zobrazowanie wyników symulacji numerycznej takiego zdarzenia przedstawia rys. 7.

Podsumowanie

Wykorzystanie symulacji numerycznych do prowadzenia autonomicznych, wirtualnych badań zderzeniowych oraz jako suplement testów poligonowych staje się coraz powszechniejsze. Dzięki tego typu symulacjom można szczegółowo prześledzić przebieg zachodzących zjawisk dynamicznych, wnikając w detale niedostępne żadnymi innymi metodami, oraz z dużą dokładnością określić wiele parametrów opisujących funkcjonowanie systemu bariery ochronnej. W pracy przedstawiono metodykę budowy modelu obliczeniowego ukierunkowanego na badania zderzeniowe w środowisku Metody Elementów Skończonych. Opisano etapy tworzenia takiego modelu, jego modyfikacji oraz sprawdzania poprawności przeprowadzonej symulacji, a także przedstawiono kilka autorskich przykładów zastosowania proponowanych obliczeń do badania barier ochronnych. □

Praca została wykonana w ramach projektu „Urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego” (nr umowy DZP/RID-1-67/13/NCBR/2016). Obliczenia wykonano na komputerach Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej.

Artykuł został opublikowany w wydaniu 6/2018 „Magazynu Autostrady”.