

Krzysztof WILDE<sup>1</sup>  
Kazimierz JAMROZ<sup>2</sup>  
Marcin BUDZYŃSKI<sup>3</sup>  
Dawid BRUSKI<sup>4</sup>  
Stanisław BURZYŃSKI<sup>5</sup>  
Jacek CHRÓŚCIELEWSKI<sup>6</sup>  
Łukasz PACHOCKI<sup>7</sup>  
Wojciech WITKOWSKI<sup>8</sup>

## SYMULACJE NUMERYCZNE STALOWEJ BARIERY OCHRONNEJ NA ŁUKU DROGI

W pracy wymieniono pewne czynniki związane z bezpieczeństwem ruchu drogowego, wskazując łuki poziome dróg jako miejsca, gdzie występuje istotna liczba groźnych w skutkach wypadków. W części pracy obejmującej symulacje numeryczne, zrealizowano serię badań spełniających warunki testu zderzeniowego TB11 ze zmiennym promieniem bariery. Oszacowano wpływ zróżnicowania geometrii na parametry bezpieczeństwa.

**Słowa kluczowe:** urządzenia BRD, ruch drogowy, bezpieczeństwo ruchu drogowego, badania numeryczne, zderzenia pojazdów, łuki poziome drogi, metoda elementów skończonych

### 1. Problem bezpieczeństwa w ruchu drogowym na łukach poziomych

W ostatnich dziesięciu latach w Polsce, w wypadkach drogowych śmierć poniosło blisko 65 tys. osób, a ponad 700 tys. zostało rannych. Każdego roku ofiarami wypadków staje się ponad 70 tys. uczestników ruchu drogowego.

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Krzysztof Wilde, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12 80-233 Gdańsk, +48583471891, krzysztof.wilde@wilis.pg.gda.pl

<sup>2</sup> Kazimierz Jamroz, Politechnika Gdańska

<sup>3</sup> Dawid Bruski, Politechnika Gdańska

<sup>4</sup> Marcin Budzyński, Politechnika Gdańska

<sup>5</sup> Stanisław Burzyński, Politechnika Gdańska

<sup>6</sup> Jacek Chróścielewski, Politechnika Gdańska

<sup>7</sup> Łukasz Pachocki, Politechnika Gdańska

<sup>8</sup> Wojciech Witkowski, Politechnika Gdańska

Ekspert Banku Światowego szacują, że Polska każdego roku traci 2,7% PKB z tytułu wypadków drogowych. W ostatnich latach, mimo zauważalnego spadku liczby ofiar śmiertelnych, nadal jest to ok. 3 tys. zabitych w wypadkach na całej sieci dróg. Wskaźnik demograficzny (liczba ofiar śmiertelnych w przeliczeniu na liczbę mieszkańców) na poziomie 10, sytuuje nasz kraj pod koniec rankingu krajów UE.

Czynników decydujących o występowaniu wypadków drogowych, a szczególnie ich ciężkości, jest wiele i można je pogrupować w systemie: człowiek, pojazd, droga i otoczenie. Dla lepszego zrozumienia i rozpoznania czynników drogowych mających wpływ na powstawanie wypadków konieczna jest budowa modeli miar bezpieczeństwa ruchu drogowego (brd). Takimi miarami mogą być: liczba wypadków, liczba ofiar, gęstość wypadków lub gęstość ofiar.

Budowa modeli miar brd wymaga zebrania wiarygodnych danych dotyczących z jednej strony statystyk wypadków i ich ofiar a z drugiej drogi i jej otoczenia oraz ruchu drogowego. Dużym problemem jest zebranie danych opisujących czynniki drogowe, szczególnie tych dotyczących parametrów geometrycznych drogi. Do takich danych można zaliczyć szerokość jezdni, parametry łuków poziomych i krętości drogi, parametry profilu (pochylenia, falistość). Dodatkowo będą to dane związane z otoczeniem dróg np. odległością przeszkód bocznych oraz wyposażeniem, szczególnie jeżeli chodzi o urządzenia brd – bariery, osłony energochłonne, terminale.

W modelach budowanych w Polsce brakuje przede wszystkim parametrów dotyczących łuków poziomych, pochyleń podłużnych oraz wyposażenia dróg, jako czynników mogących wpływać w znaczny sposób na miary brd. Znaczna część opisywanych modeli zawiera zmienne, w których ukryte są parametry geometryczne drogi, ale nie ma wskazanego ich konkretnego wpływu na brd.

Liczne pozycje literatury wskazują na bezpośredni wpływ parametrów geometrii planu, profilu i wyposażenia drogi na poziom brd, do tej pory ze względu na trudność w uzyskaniu takich danych, nie są one w pełni wykorzystane w polskich modelach brd. Biorąc pod uwagę, że na łukach poziomych doszło w ostatnich 10 latach do ok. 10% wszystkich wypadków drogowych, w których śmierć poniosło ok. 14% wszystkich zabitych na polskich drogach, jest to bardzo istotne zagadnienie wymagające dokładnego rozpoznania. Analizy danych o zdarzeniach drogowych wskazują na bardzo poważny problem występowania przeszkód w otoczeniu dróg. Dane za lata 2007 – 2016 przedstawiają, że w wyniku wypadków na łukach ok. 45% wszystkich ofiar śmiertelnych zarejestrowanych na tym fragmencie sieci drogowej, miało miejsce przy uderzeniu w przeszkodę w pobliżu jezdni: słup, znak i przede wszystkim drzewo.

Parametry łuków poziomych i samo ich występowanie uznaje się za jeden z ważniejszych czynników wpływających na bezpieczeństwo ruchu drogowego. Wyniki badań tego zagadnienia [1, 2, 3] sugerują, że bezpieczeństwo związane z poruszaniem się po łukach poziomych wynika z trzech powiązanych ze sobą

kwestii: zaburzenie uwagi kierowcy, niedostosowanie prędkości do krzywizny oraz niewystarczająca szerokość pasa jezdni. Kolejnym ważnym czynnikiem uwzględnianym w badaniach jest stan nawierzchni w obrębie łuków poziomych [4].

Łuk w planie musi spełniać nie tylko kryteria bezpieczeństwa ruchu pojedynczego elementu drogi, ale również kryteria wynikające z faktu, że stanowi on integralną część drogi. Z tego względu dużą rolę w projektowaniu geometrycznym odgrywają metody oceny jednorodności dróg. Na podstawie wyników badań opracowano liczne modele prędkości i ryzyka wypadkowego, w zależności od krętości i falistości oraz innych cech drogi, takich jak: długość prostej poprzedzającej łuk w planie, szerokość jezdni, szerokość i rodzaj poboczy oraz wyposażenie drogi w urządzenia brd [5, 6, 7, 8]. Iloczyn stosunku wskaźnika liczby wypadków z rannymi na łuku do analogicznego wskaźnika na prostej oraz stosunku energii kinetycznej pojazdu na prostej do energii kinetycznej pojazdu na łuku stanowi tzw. współczynnik niejednorodności geometrycznej drogi [9]. Niezwykle istotne jest prawidłowe dobieranie parametrów dotyczących planu sytuacyjnego, w tym projektowanie strefy bezpieczeństwa oraz dobór urządzeń brd [10] aby zwiększyć bezpieczeństwo uczestników ruchu drogowego. Aby to osiągnąć niezbędne jest modelowanie wpływu parametrów geometrii drogi na miary bezpieczeństwa ruchu drogowego. Próby takiego modelowania podjęto w badaniach prowadzonych przez Politechnikę Gdańską [11]. Wskazano, że zastosowanie barier ochronnych między przeszkodami a krawędzią jezdni znacznie zmniejsza ryzyko wystąpienia wypadków z ofiarami ciężko rannymi lub śmiertelnymi. Dalszych badań wymaga jednak ocena wpływu występowania urządzeń brd dla samych łuków poziomych.

## 2. Przegląd wyników badań numerycznych i eksperymentalne

W pracy [12] przedstawiono porównanie wyników eksperymentalnych i numerycznych testu zderzeniowego TB32 (pojazd o masie 1500 kg, prędkości 110 km/h, kąt uderzenia 20°) z barierą SP-05/2 w łuku poziomym wklęsłym o promieniu  $R=150$  m w 4 wariantach różniących się prędkością nadjeżdżającego pojazdu, a także zastosowaną barierą. Badano 2 warianty bariery: bez nakładki oraz z nakładką energochłonną. We wnioskach zapisano, że w badaniu połowym bariery bez nakładki nie został spełniony warunek nakładany na tzw. pole wyjścia pojazdu po uderzeniu w barierę (tzw. exit box).

W pracy [13] omówiono wyniki numeryczne symulacji zderzenia lekkiego pojazdu osobowego z barierą stalową umocowaną w poziomym łuku wklęsłym. Rozpatrywano 3 warunki początkowe: 40 km/h, 60 km/h oraz 80 km/h. Przyjęto kąt uderzenia pojazdu równy 45°. Otrzymano odpowiednio następujące wartości współczynnika ASI (wskaźnik intensywności przyspieszenia, ang. Acceleration Severity Index): 0,18, 0,32 i 0,51.



Praca [14] dotyczy symulacji zderzenia pojazdu z barierą betonową wklęsłą w poziomym łuku drogi. Badania numeryczne przeprowadzono dla trzech promieni: 50 m (wariant I), 100 m (wariant II) i 200 m (wariant III). Ponadto założono dwa przypadki: pojazd nadjeżdża z zewnętrznego pasa jezdni oraz drugi, gdy pojazd nadjeżdża z wewnętrznego pasa jezdni. Wyniki wskazały, że najbardziej niebezpiecznym przypadkiem jest zderzenie pojazdu z barierą zamontowaną na łuku o promieniu 50 m w wariacie najazdu z wewnętrznego pasa. Autorzy przedstawili wyniki wskazujące, że im większy promień łuku tym mniejsze wartości współczynnika ASI. Ponadto zauważono że w każdym z analizowanych przypadków promienia łuku, wartości ASI są mniejsze gdy pojazd nadjeżdża z zewnętrznego pasa jezdni.

Obszerne studium testów zderzeniowych bariery stalowej N2-W4-A na łuku drogi przedstawił Nycz [15]. Wykazał on, że bariera ochronna (skrajna) SP-05/2 z prowadnicą typu B ustawiona w łuku poziomym wklęsłym ( $R = 150\text{m}$ ) drogi klasy G, GP, S, A nie spełnia wszystkich warunków przyjęcia badania zderzeniowego TB11 i TB32. W pracy [15] pokazano autorską koncepcję poprawy tej sytuacji polegającą na dodaniu nakładki kompozytowo-pianowej.

Dokument [16] zawiera pewne informacje dotyczące stosowania barier linowych w łuku poziomym drogi. Na podstawie badań numerycznych zauważono, że uderzenie w wypukłą stronę łuku powoduje zwiększenie wygięcia bariery ze względu na spadek siły napinającej gdy dochodzi do wypięcia liny ze słupków. W takim wypadku liny przyjmują kształt wzdłuż cięciwy łuku zamiast wzdłuż łuku. Zaproponowano, że rozmieszczenie słupków w dużym rozstawie jest niewskazane w łukach o promieniu mniejszym niż 400 m. Bowiem większe ugięcie bariery (mimo zapewnienia odpowiednio szerokiego obszaru za barierą) niekorzystnie wpływa na zdolność bariery do przejścia nadjeżdżającego pojazdu i na możliwość prawidłowego jego wyprowadzenia po zderzeniu.

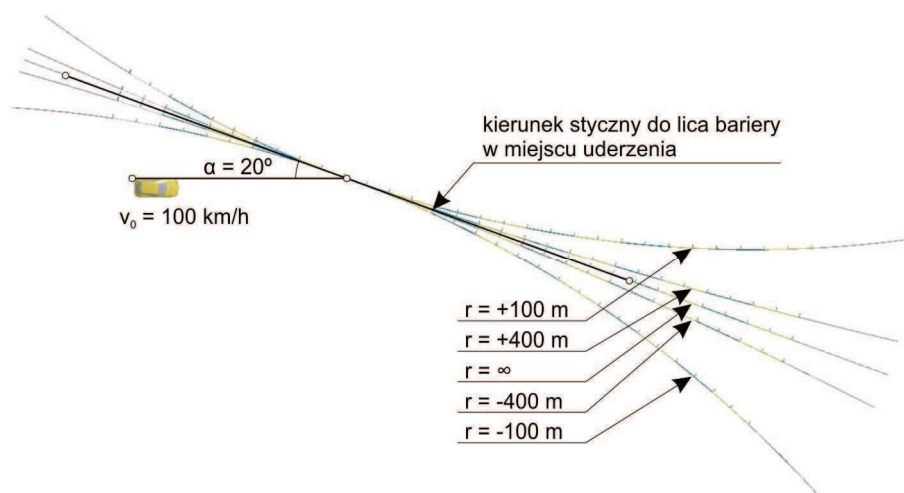
### 3. Program badań numerycznych

Na potrzeby niniejszej pracy przeprowadzono serię testów symulacyjnych, z zachowaniem normowych [17] wymagań testu TB11 (pojazd o masie 900 kg, uderzającego w barierę pod kątem  $20^\circ$ , z prędkością 100 km/h). W przypadku barier na łukach, kąt mierzony jest między prostą wzdłuż której porusza się pojazd przed uderzeniem, a prostą styczną do lica bariery w miejscu pierwszego kontaktu (w rzucie z góry), zob. rys. 1. Przeprowadzono 5 symulacji: dla odcinka prostego (promień  $r = \infty$ ), łuk wypukły ( $r = +100, +400\text{ m}$ ), łuk wklęsły ( $r = -100, -400\text{ m}$ ).

Zasadniczy odcinek bariery ma długość 60 m na początku i końcu znajdując się 8-metrowe zakończenia, na długości których prowadnica bariery sprowadzo-

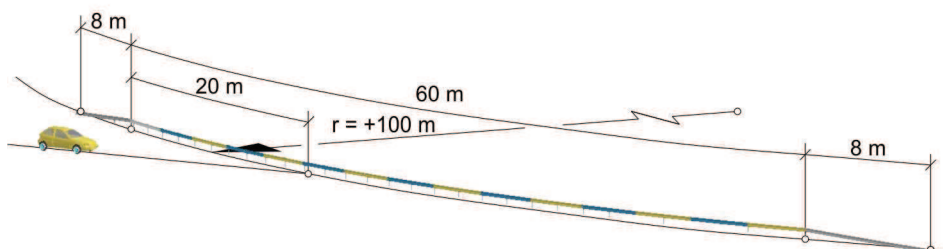


na jest do poziomu gruntu (rys. 2). Miejsce uderzenia w każdym z testów ulokowane jest w odległości 20 m od początku zasadniczej części bariery.



Rys. 1. Widok ogólny realizowanych symulacji

Fig. 1. Overall view of analyzed variants



Rys. 2. Wymiary analizowanej bariery drogowej – łuk o promieniu  $r = +100 \text{ m}$

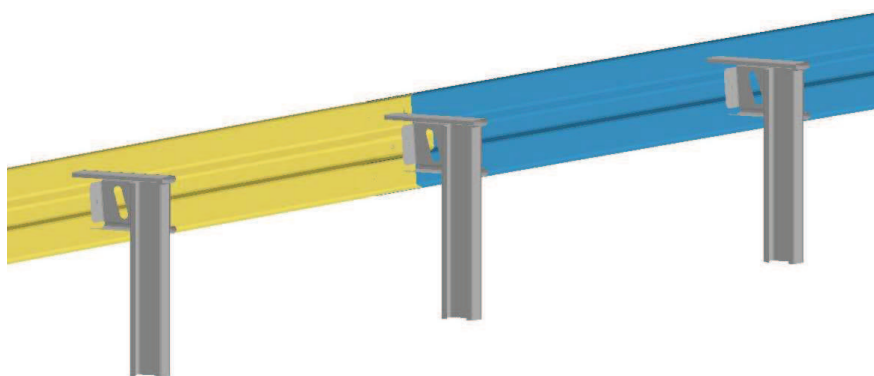
Fig. 2. Dimensions of the analyzed barrier – curve with radius  $r = +100 \text{ m}$

Symulacje przeprowadzono za pomocą systemu metody elementów skończonych Ls-Dyna R8.1.0 [18] w wersji MPP double precision na platformie sprzętowej klastra obliczeniowego Tryton zarządzanego przez Centrum Informatyczne TASK przy Politechnice Gdańskiej. Za możliwość korzystania z zasobów klastra Autorzy wyrażają swoją wdzięczność administracji TASK.

### 3.1. Opis modelu bariery

Model numeryczny drogowej bariery stalowej (rys. 3.) powstał na podstawie dokumentacji typowej konstrukcji, stosowanej przy drogach w naszym kraju (parametry N2/W4/A). Model numeryczny składa się z 544958 węzłów, 529031 powłokowych elementów skończonych oraz 956 objętościowych elementów skończonych (modelowanie łączników). Charakterystyczne wymiary elementów skończonych zawierają się w przedziale 8-12 mm (rys. 4.) Zastosowano elementy powłokowe 4-węzłowe, typu Belytschko-Tsay, o zredukowanym całkowaniu. W celu przewyciężenia problemu klepsydrowania, wprowadzono sztywnościowe tłumienie form pasożytniczych, dzięki czemu w analizach obserwowane są pomijalnie małe wartości energii form pasożytniczych.

Poszczególne części bariery mają grubość 3 i 4 mm i wykonane są ze stali S235. W obliczeniach numerycznych zastosowano model konstytutywny materiału sprężysto-plastycznego z odcinkowo liniowym wzmocnieniem.



Rys. 3. Ogólny widok modeli numeryczny bariery

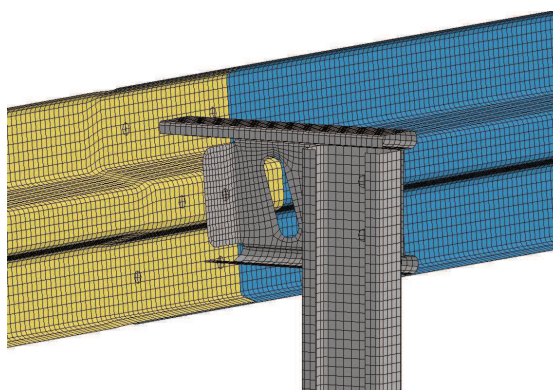
Fig. 3. Numerical model of barrier

### 3.2. Opis modelu pojazdu

Pojazd stosowany w symulacjach to Geo Metro (rys. 5.) który został pozyskany z zasobów projektu ROBUST (<http://www.vegvesen.no/s/robust/> dostęp 1.04.2017). Pojazd poddano drobnym modyfikacjom, między innymi poprawiono geometrię zbieżności kół, zmodyfikowano wybrane parametry numeryczne oraz zagęszczono dyskretyzację w kluczowych obszarach styku pojazdu z barierą. Masa pojazdu wynosi 929 kg, składa się on z 20089 węzłów i 16291 elementów skończonych różnych typów. W pobliżu środka ciężkości umiejscowiony jest akcelerometr, w formie bryły sztywnej i dedykowanego elementu skończonego, rejestrujący przyspieszenia w lokalnym układzie współrzędnych pojazdu.

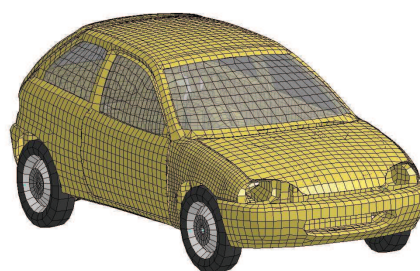
#### 4. Wyniki symulacji

Na rysunku 6. pokazano przebieg wykonanych symulacji. W lewej kolumnie zbiorczo zestawiono widok z góry wszystkich 5 testów. W prawej kolumnie pokazano szczegółowo przebieg testu z wklęsłą barierą o promieniu  $r = -100$  m. Test ten wyróżnia się spośród pozostałych trajektorią ruchu pojazdu. Samochód nie zostaje wyprowadzony z powrotem na pas ruchu, lecz wbija się w konstrukcję bariery i zostaje przez nią zatrzymany. Wiąże się to ze zniszczeniem początkowego 20-metrowego odcinka bariery. W pozostałych symulacjach pojazd został utrzymany w pasie ruchu, a poszczególne tory jazdy (zaznaczone linią ciągłą na rys. 6.) niewiele się od siebie różnią.



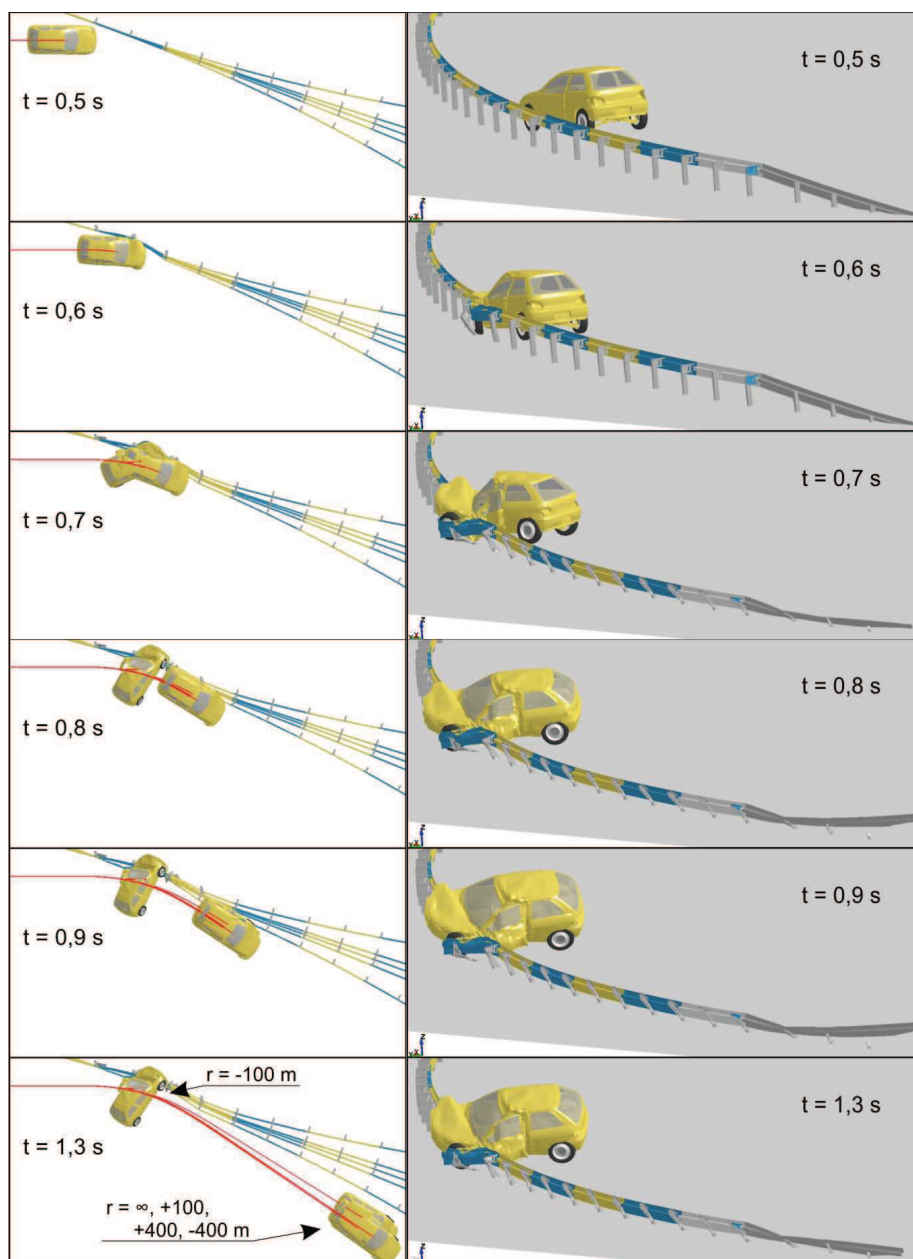
Rys. 4. Szczegół dyskretyzacji bariery

Fig. 4. Close-up view on detail of barrier



Rys. 5. Widok ogólny i dyskretyzacja modelu pojazdu Geo Metro

Fig. 5. Overall view of the Geo Metro vehicle



Rys. 6. Przebieg symulacji. Lewa kolumna: zestawienie zrealizowanych zadań (zaznaczono ślad środka ciężkości). Prawa kolumna: zadanie  $r = -100$  m

Fig. 6. Simulation. Left column: calculated variants (shown is the trajectory of the mass center). Right column: variant  $r = -100$  m



W tabeli 1. zestawiono uzyskane wskaźniki (zob. [17]) ASI, THIV, PHD,  $W_m$  (szerokość pracująca) i  $W_n$  (znormalizowana szerokość pracująca). Tylko w teście  $r = -100$  m zanotowano wartości, które nie kwalifikują bariery do uzyskania poziomu intensywności zderzenia A, w pozostałych testach ten poziom uzyskano ( $ASI \leq 1,0$ ,  $PHD \leq 20$  g oraz  $THIV \leq 33$  km/h). Nieznaczne są również różnice w uzyskanej szerokości pracującej, która w 4 z 5 testów pozwala zaliczyć barierę do poziomu szerokości pracującej W3.

Przebiegi czasowe funkcji ASI (rys. 7.) wyraźnie wskazują na występowanie w większości przypadków dwóch maksimum lokalnych, które można skojarzyć z najeżdżaniem przez pojazd na kolejne słupki bariery (rys. 8.).

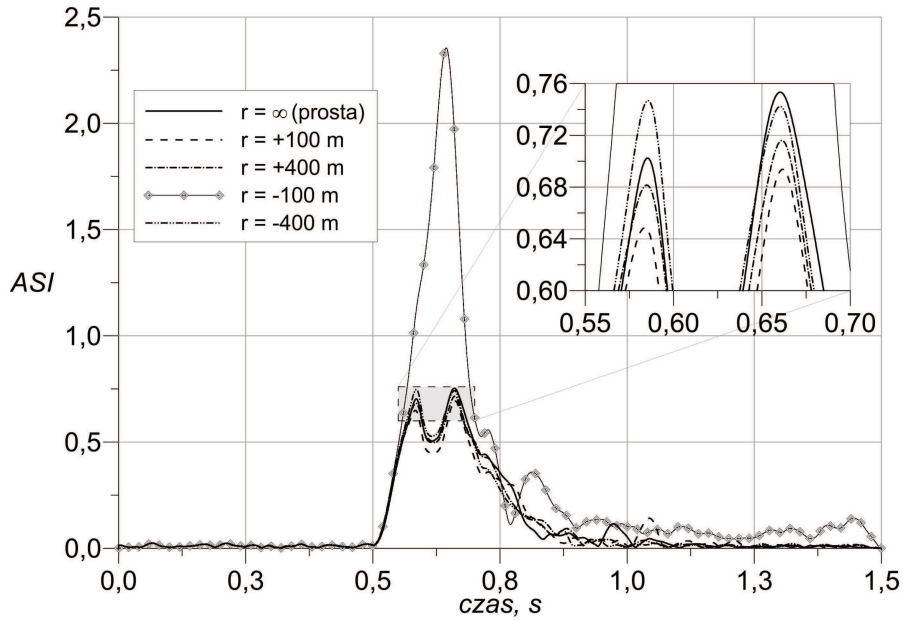
Tabela 1. Liczbowe wyniki symulacji

Table 1. Parameters obtained in simulations

Zadanie	ASI, -	THIV, km/h	PHD, g	$W_m$ , mm	$W_n$ (poziom), mm
$r = \infty$	0,75	22,8	15,4	793	800 (W3)
$r = +100$ m	0,69	22,5	16,8	807	814 (W3)
$r = +400$ m	0,72	23,2	16,6	814	822 (W3)
$r = -100$ m	2,35	61,3	29,1	1404	1420 (W5)
$r = -400$ m	0,75	24,1	17,8	813	820 (W3)

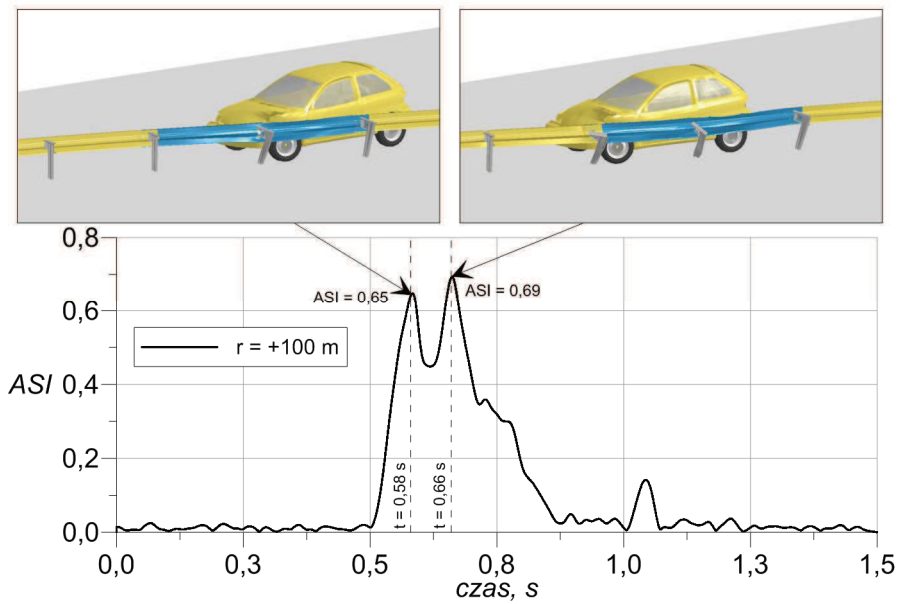
## 5. Uwagi końcowe

W pracy wskazano główne czynniki związane z bezpieczeństwem ruchu drogowego. Jednym z nich jest nieuniknione występowanie łuków poziomych o różnych parametrach. Podjęto próbę oszacowania wpływu zmiany promienia bariery drogowej na parametry bezpieczeństwa uzyskane w teście zderzeniowym TB11, poprzez wykonanie serii symulacji numerycznych. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że na zachowanie bariery mają wpływ zarówno promień jej wygięcia, jak i sposób jej wygięcia (wklęsła lub wypukła). Zderzenie z wklęsłą barierą o małym promieniu może prowadzić do znacznych obrażeń uczestników wypadku, natomiast w innych rozpatrywanych przypadkach uzyskano parametry w zakresie „bezpiecznym”.



Rys. 7. Przebiegi czasowe wskaźnika ASI

Fig. 7. Time history of ASI

Rys. 8. Przebieg czasowy wskaźnika ASI dla przypadku  $r = +100$  m, wybrane chwile czasoweFig. 8. Time history of ASI for case  $r = +100$  m, selected time steps

### Podziękowania

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

### Literatura

- [1] Bella F. Coordination of horizontal and sag vertical curves on two-lane rural roads: Driving simulator study. *IATSS Research*, 39(1):51-57, 2015.
- [2] Charlton S. G. The role of attention in horizontal curves: A comparison of advance warning, delineation, and road marking treatments. *Accident Analysis & Prevention*, 39(5):873-885, 2007.
- [3] Elvik R.. International transferability of accident modification functions for horizontal curves. *Accident Analysis & Prevention*, 59:487-496, 2013.
- [4] Mondal S., Lucet Y., Hare W.. Optimizing horizontal alignment of roads in a specified corridor. *Computers & Operations Research*, 64:130-138, 2015.
- [5] NCHRP Report 500 Volume 7: A guide for reducing collisions on horizontal curves.
- [6] Low costs treatments of horizontal curve safety. Federal Highway Administration. 2006.
- [7] Khan G., Bill A. R., Chiturri M. and Noyce D. A. Horizontal Curves, Signs, and Safety. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*.
- [8] Zegeer C. V., Stewart R. J., Council F. M., and Reinfurt D. W. Cost-Effective Geometric Improvements for Safety Upgrading of Horizontal Curves. Report FHWA-RD-90-021. FHWA, Washington, D.C., 1991.
- [9] Kempa J. Charakterystyki ruchu swobodnego na krzywoliniowych odcinkach dróg w planie. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego Bydgoszcz 2008.
- [10] Jamieson NJ., Waibl G., Davies, R. Use of roadside barriers versus clean zones. NZ Transport Agency. Research Report, New Zeland.
- [11] Budzyński M., Jamroz K., Jeliński Ł., Antoniuk M.: Why are trees still such a major hazard to drivers in Poland?, W: 6th Transport Research Arena (TRA), 2016, ELSEVIER SCIENCE BV.
- [12] Kłasztorny M., Zielonka K., Nycz D.B., Posuniak P., Romanowski R.: Eksperymentalne i symulacyjne testy zderzeniowe bariery SP-05/2 w łuku poziomym wklęsłym, XIV Konferencja Naukowo-Techniczna Techniki Komputerowe w Inżynierii 2016.
- [13] Nasution R.P., Siregar R.A., Fuad K., Adom A.H.: The Effect of ASI (Acceleration Severity Index) to Different Crash Velocities, Proceedings of International Conference on Applications and Design in Mechanical Engineering (ICADME) 11–13 October 2009, Batu Ferringhi, Penang, Malaysia.
- [14] Borkowski W., Hryciów Z., Rybak P., Wysocki J.: Analiza skuteczności betonowych barier ochronnych na łuku drogi. *Przegląd Mechaniczny LXXI (7-8)*, 2012, s. 21-24.
- [15] Nycz D.: Modelowanie i badania numeryczne testów zderzeniowych bariery klasy N2-W4-A na łukach dróg. 2015, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa.



- [16] Guidance for the Selection, Use, and Maintenance of Cable Barrier Systems, NCHRP REPORT 711, 2012.
- [17] PE-EN 1317-1/8, Systemy ograniczające drogę - Część 1-8. Polska Norma (części przygotowane i w trakcie przygotowania).
- [18] Livermore Software Technology Corporation, 7374 Las Positas Road, Livermore, CA 94551, www.lstc.com.

## NUMERICAL SIMULATIONS OF CURVED ROAD STEEL BARRIER

### Summary

The paper presents main factors related to traffic safety, indicating road curves as places of occurrence of significant number of fatal accidents. In the numerical simulations, a series of tests with variable radius of barrier in the TB11 crash test was performed. The effect of differentiation of barrier geometry on safety parameters was assessed.

**Keywords:** road safety devices, numerical simulations, crash tests, road curves, Finite Element Method

*Przesłano do redakcji: 20.04.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 01.09.2017 r.*