

## **Funkcja ochronna bariery drogowej a pochłanianie energii uderzenia samochodu**

**LEON PROCHOWSKI**

Wojskowa Akademia Techniczna

W artykule dokonano analizy procesu wypełniania funkcji ochronnej przez bariery w ruchu drogowym, czyli odpowiedniego oddziaływania na pojazd, który uderzył w barierę oraz jednoczesnego pochłaniania energii uderzenia tego samochodu. Rozważono zagadnienie absorbowania (przez barierę) części energii kinetycznej uderzającego samochodu w skojarzeniu z przesunięciem poprzecznym bariery, jako skutkiem uderzenia. Przedstawiono obliczenia energii uderzenia i pracy przesunięcia bariery. Uzyskano liczbowe oszacowanie udziału pracy przesunięcia bariery w ogólnym bilansie energii uderzenia samochodów kategorii M1, z segmentu handlowego B i C, czyli samochodów dominujących w ruchu drogowym. Obliczenia wykonano dla betonowych barier drogowych, ustawianych na różnych podłożach. Wyznaczono analityczne zależności energii rozpraszanej na przesunięcie bariery od kąta i energii uderzenia samochodów z segmentów handlowych B i C. Odnoszą się one do różnorodnych podłoży, co umożliwia ich praktyczne wykorzystanie podczas planowania ustawiania barier i analizy zagrożeń bezpieczeństwa ruchu drogowego.

### **1. Wstęp**

Ochronne bariery drogowe w sytuacjach krytycznych zapobiegają przed zjechaniem samochodu poza wytyczone pasy ruchu, mogą wchodzić w bezpośredni kontakt z pojazdami, czyli wypełniają funkcje należące do obszaru bezpieczeństwa czynnego. W tej roli bariery powinny wykazywać wiele przeciwstawnych cech, które wynikają z ich funkcji, np. barier skrajnych lub rozdzielających pasy ruchu i jednocześnie minimalizujących skutki uderzenia samochodu. Oddzielnym zagadnieniem jest absorbowanie części energii kinetycznej uderzającego samochodu. Metodę badania właściwości użytkowych barier i wypełniania przez nie funkcji ochronnej ujęto w PN-EN 1317 [1]. Pochłanianie energii uderzenia samochodu przez bariery drogowe nie jest ich podstawowym zadaniem. Jednak widoczne są argumenty za korzystnym wpływem procesu pochłaniania energii uderzenia samochodu przez barierę na bezpieczeństwo ruchu drogowego [2].

Celem pracy jest analiza pewnych aspektów ochronnego działania bariery drogowej, a mianowicie wypełniania funkcji ochronnej z jednoczesnym pochłanianiem energii uderzenia samochodu w barierę. Rozważa się zagadnienie absorbowania części energii kinetycznej uderzającego samochodu w skojarzeniu z przesunięciem poprzecznym bariery, jako skutkiem tego uderzenia. Problem rozważa się w aspekcie użytkowania przestawnych (tymczasowych) barier betonowych, a w tym skutków ich ustawiania na różnych podłożach, stosownie do potrzeb ruchu drogowego.

## 2. Działanie barier ochronnych a pochłanianie energii uderzenia

Samochód uderzając w barierę, która składa się z segmentów o znacznych wymiarach i masie oraz połączonych przegubowo, może spowodować jej przesuwanie (tzw. efekt łańcucha). Można wyróżnić kilka głównych składników procesu rozpraszania energii uderzenia samochodu w barierę drogową, w rezultacie:

- deformacji nadwozia samochodu;
- obracania, unoszenia i zmiany kierunku ruchu samochodu;
- tarcia nadwozia samochodu o segmenty bariery;
- przesunięcia bariery.

Część z tych składników rozważono w pracach [3, 4, 5]. Obecnie uwaga zostanie skupiona na pracy tarcia o podłoże podczas przesuwania bariery drogowej w rezultacie uderzenia samochodu. Pociągając za sobą sąsiednie segmenty, przesuwanie powoduje rozproszenie części energii uderzenia samochodu.

Praktyka pokazuje, że betonowe bariery drogowe ustawia się z konieczności na różnych podłożach. Należy sądzić, że właściwości podłoża istotnie wpływają na zachowanie się bariery w czasie uderzenia samochodu.

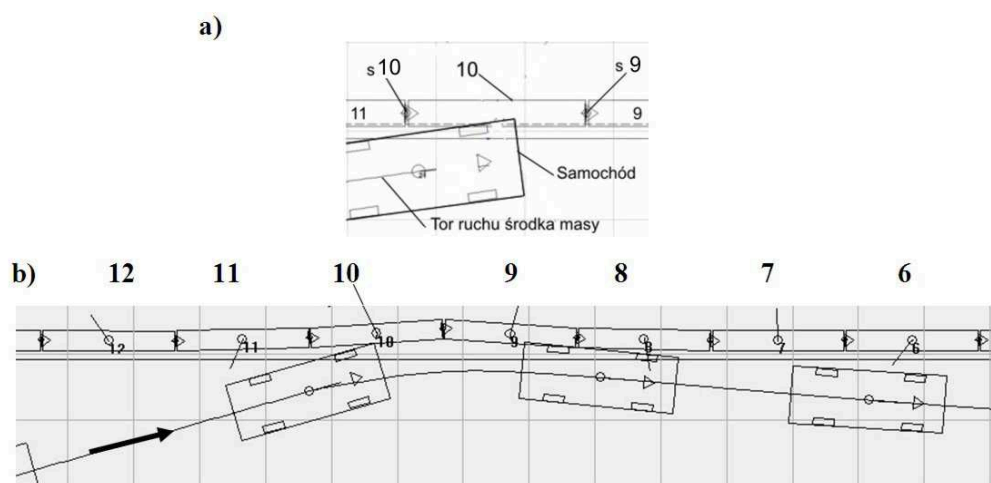
## 3. Model obliczeniowy i zakres badań

Model dynamiki procesu uderzenia samochodu w barierę betonową opracowano na podstawie publikacji [6, 7, 8] i przedstawiono w pracy [4]. Program PC Crash, który wykorzystano do zbudowania modelu, uwzględnia proces deformacji samochodu uderzającego, a połączone ze sobą segmenty bariery mogą ulegać przesuwaniu, obracaniu i przewracaniu [8]. Model uwzględnia barierę z 20 segmentów o długości 4 m i masie 2200 kg. Ich połączenia są przegubami o parametrach typowych dla barier stosowanych w Polsce i UE. Samochody uderzające w barierę wybrano z segmentu handlowego B i C, odpowiednio o masie 900 i 1500 kg. Ustalając szczegółowe warunki symulacji sytuacji drogowych, brano pod uwagę wymagania względem barier, ujęte w pracy [1, 9]. Na tej podstawie ustalono zakres prędkości uderzającego samochodu na 80 – 110 km/h. Przy niskich wartościach prędkości uderzenia samochodu osobowego, bariera praktycznie nie ulega przesunięciu.

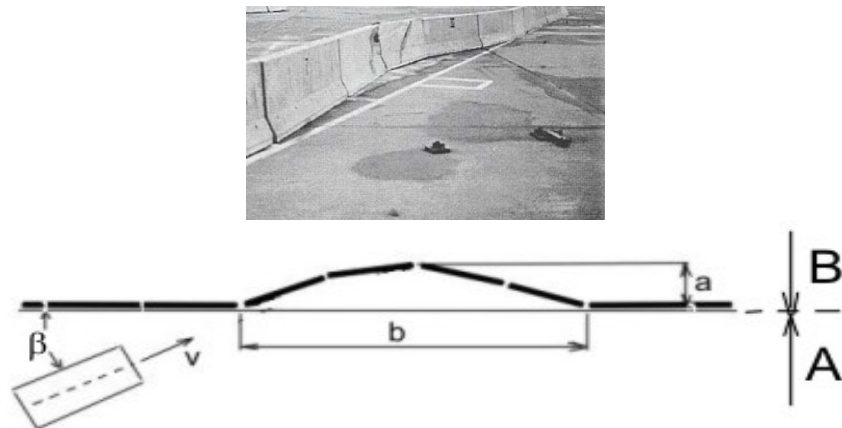
W czasie symulacji procesu uderzenia samochodu bariera, stanowiąca łańcuch kinematyczny połączonych przegubowo brył, czyli segmentów betonowych, przemieszcza się skutkiem działania przesuwanego się impulsu uderzenia. Na ruch segmentów

wpływają siły generowane w przegubach pomiędzy nimi, czyli w tzw. sprzęgach oraz praca tarcia między barierą a podłożem. Maksymalną wartość siły rozciągającej w sprzęgu przyjęto na 350 kN [4]. Po jej przekroczeniu następuje rozerwanie bariery.

Na rysunku 1a pokazano fragment obliczeń, w którym samochód uderza w segment nr 10. Widoczne są segmenty nr 9 – 11 oraz sprzęgi oznaczone s9 i s10. Rysunek 1b prezentuje końcowe położenie bariery oraz kilka sylwetek samochodu co 0,5 s. Maksymalne przesunięcie poprzeczne bariery (ugięcie bariery) jest mierzone od osi bariery w położeniu statycznym (przed uderzeniem samochodu) do najdalej odsuniętego od tej osi sprzęgu, po uderzeniu samochodu. Odległość ta jest mierzona zawsze prostopadłe do osi bariery w położeniu początkowym. Na rysunku 2 pokazano także rozgraniczenie między pasem nawierzchni drogowej A o współczynniku przyczepności  $\mu = 0,8$  oraz równoległym pasem B, na którym jest ustawiona bariera. Pas B charakteryzuje się wartością współczynnika tarcia między barierą a podłożem, dobranej z przedziału  $\mu_B = 0,2-0,8$ .



Rys. 1. Chwilowe położenie bariery i samochodu; a – początkowa chwila najazdu na barierę w środku segmentu nr 10, b – schematyczne pokazanie położenia segmentów nr 6 – 12 po uderzeniu samochodu pod kątem 16 stopni wraz z naniesionym torem ruchu środka masy i sylwetkami pojazdu co 0,5s.  
Fig. 1. Momentary barrier and car positions; a – initial moment of running into the barrier in the middle of segment no. 10, b – schematic presentation of position of segments no. 6 – 12 after the car impact at the angle of 16 degrees with plotted motion path of the centre of mass and vehicle outlines every 0,5 seconds.



Rys. 2. Położenie pracującej części bariery po uderzeniu samochodu oraz schemat pokazujący charakterystyczne wielkości, opisujące poprzeczne przesunięcie bariery; a - maksymalne przesunięcie poprzeczne bariery, b - długość odcinka pracującego bariery,  $\beta$  - kąt najazdu samochodu na barierę z prędkością v.

Fig. 2. Position of the working section of the barrier after the car impact and a diagram showing the characteristic values, describing transverse barrier displacement: a - maximum transverse barrier displacement, b - length of the barrier working section,  $\beta$  - angle of a car running into the barrier at the speed v.

#### 4. Obliczenia energii uderzenia i pracy przesunięcia bariery

Energia uderzenia może być dogodną podstawą podczas porównania wyników badań różnych barier i skutków uderzenia różnych samochodów [1, 10, 11]. Analizując funkcjonowanie barier drogowych, wykonano przykładowe obliczenia wartości energii uderzenia samochodu, czyli wskaźnika IS (Impact Severity), stosowanego m. in. w pracy [10].

$$IS = 0,5m(v \sin \beta)^2 \quad (1)$$

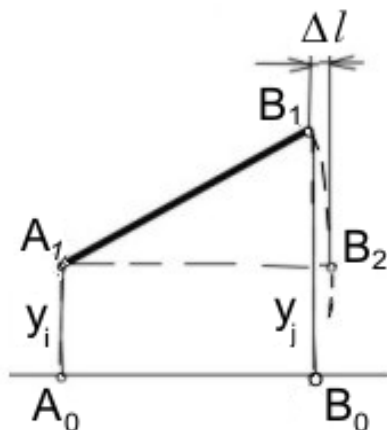
gdzie m jest masą samochodu, a v – prędkością uderzenia w barierę pod kątem  $\beta$ .

W tabeli 1 zamieszczono liczby charakteryzujące istotny wpływ kąta najazdu na wartości energii uderzenia samochodu w barierę.

Tabela 1. Przykładowe wartości energii uderzenia samochodu w barierę.  
Table 1. Examples of car and barrier collision energy values.

Samochód	Kąt uderzenia, stopnie	Energia uderzenia, kJ
Masa 900 kg; prędkość v = 100 km/h	8	6,7
	16	26,4
	24	57,4
Masa 1500 kg; prędkość v = 110 km/h	24	115,8

Praca przesunięcia bariery zależy od jej przemieszczenia i rodzaju podłoża. Wobec połączenia wszystkich segmentów bariery ze sobą poprzez sprzęgi, poprzeczne przesuwanie wywołuje także ruch wzdłużny niektórych segmentów (oczywiście uwzględniono tu także konieczny luz występujący w połączeniach, czyli luz w sprzęgach). Na rysunku 3 pokazano schemat do obliczania wzdłużnego przesunięcia  $\Delta l$  na segmencie przesuniętej części bariery. Na rysunku tym  $A_0B_0$  jest rzutem odcinka  $A_1B_1$  (o długości równej długości segmentu bariery) na linię wyznaczającą położenie osi bariery w stanie początkowym, czyli przed uderzeniem samochodu.



Rys. 3. Schemat do obliczania wzdłużnego przesunięcia segmentu bariery.  
Fig. 3. A diagram for calculation of the longitudinal barrier segment displacement.

Na przykładzie z rysunku 3 obliczono przesunięcie wzdłużne:

$$\Delta l_{ij} \cong l_B - \sqrt{l_B^2 - (y_i - y_j)^2} \quad (2)$$

gdzie:  $y_i, y_j$  są miarami poprzecznego przesunięcia sprzęgów ( $i, j$ ) bariery, oraz

$$A_0A_1 = y_i, \quad B_0B_1 = y_j, \quad l_B = A_1B_1 = A_1B_2, \quad \Delta l \rightarrow \Delta l_{ij}$$

Praca przesuwania wzdłużnego pojedynczego segmentu wynosi:

$$L_{Bi} = A_{Bi} \gamma_B \mu_B \quad (3)$$

gdzie:

$$A_{Bi} = l_B \Delta l_i, \quad \Delta l_i = \Delta l_{ij} - l_{ui};$$

$l_{ui}$  jest wartością luzu w  $i$ -tym sprzęgu;

$\mu_B$  - współczynnik tarcia między barierą i podłożem;

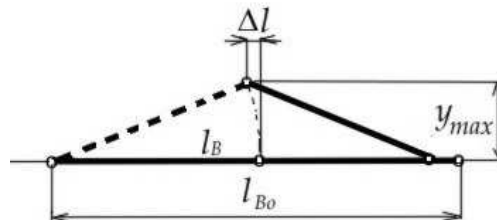
$\gamma_B$  - jednostkowy ciężar bariery, np. w N/m.

Wykorzystując rysunek 3 obliczono pole poprzecznego przesunięcia segmentu bariery:

$$A_{Ai} \cong \frac{y_i + y_j}{2} \sqrt{l_B^2 - (y_i - y_j)^2} \quad \text{dla } i \neq j \quad (4)$$

a następnie pracę sił tarcia podczas przesuwania poprzecznego pojedynczego segmentu:

$$L_{Bi} = A_{Ai} \gamma_B \mu_B \quad (5)$$



Rys. 4. Schemat do obliczenia pracy przesunięcia wzdłużnego dwóch segmentów.  
Fig. 4. A diagram for calculation of longitudinal displacement work of two segments.

Tabela 2. Wyniki obliczeń dla bariery z 20 segmentów o długości 4 m, na podłożu o współczynniku tarcia  $\mu_B = 0,6$ .

Table 2. Calculation results for the barrier consisting of 20 segments, 4 m long, on the ground with friction coefficient  $\mu_B = 0,6$ .

$y_{MAX}$ , m	$l_{Bo}$ , m	$\Delta l$ , m	Pole przesunięcia wzdłużnego lewej i prawej części bariery, m <sup>2</sup>	Praca przesunięcia wzdłużnego, kJ
0,25	8	0,004m	0	Obliczone przesunięcie jest mniejsze od luzu w sprzęgu
0,5		0,015	$0,12 \times 2 = 0,24$	0,80
1		0,062	$0,768 \times 2 = 1,54$	5,06

W tabeli 2 zestawiono wyniki przykładowego obliczeniowego, jak na rysunku 4. Przyjęto w tych obliczeniach, że maksymalna wartość przemieszczenia poprzecznego  $y_{max}$  tak samo wpływa na przesunięcie lewej i prawej części bariery. Luz w połączeniach poszczególnych segmentów przyjęto o wartości  $\pm 0,005$  m. Zestawienie wartości pracy przesunięcia wzdłużnego (tab. 2) i przesunięcia poprzecznego (tab. 3) pokazuje na decydujące znaczenie wartości tej ostatniej. W większości obserwowanych sytuacji uderzenia samochodu, praca przesunięcia wzdłużnego nie przekracza 10% pracy przesunięcia poprzecznego segmentów bariery.

Tabela 3. Wartości przykładowe pola i pracy przesunięcia poprzecznego bariery na podłożu o współczynniku tarcia  $\mu_B = 0,6$ .Table 3. Examples of field and work values of the transverse barrier displacement on the ground with friction coefficient  $\mu_B = 0,6$ .

Masa samochodu, prędkość uderzenia	Kąt uderzenia, stopnie	Maksymalne przesunięcie, $y_{MAX}$ , m	Pole przesunięcia, $m^2$	Praca przesunięcia poprzecznego, kJ
Masa 900 kg; $v = 100$ km/h	8	0,04	0,20	0,66
	16	0,22	1,08	3,56
	24	0,43	2,60	8,58
Masa 1500 kg; $v = 110$ km/h	24	0,70	5,72	18,87

## 5. Wyniki obliczeń

Wykorzystując zweryfikowany w publikacji [4] model dynamiki uderzenia samochodu osobowego w barierę betonową, wykonano obliczenia ułatwiające ocenę wypełniania funkcji ochronnej przez barierę na podstawie zależności pomiędzy:

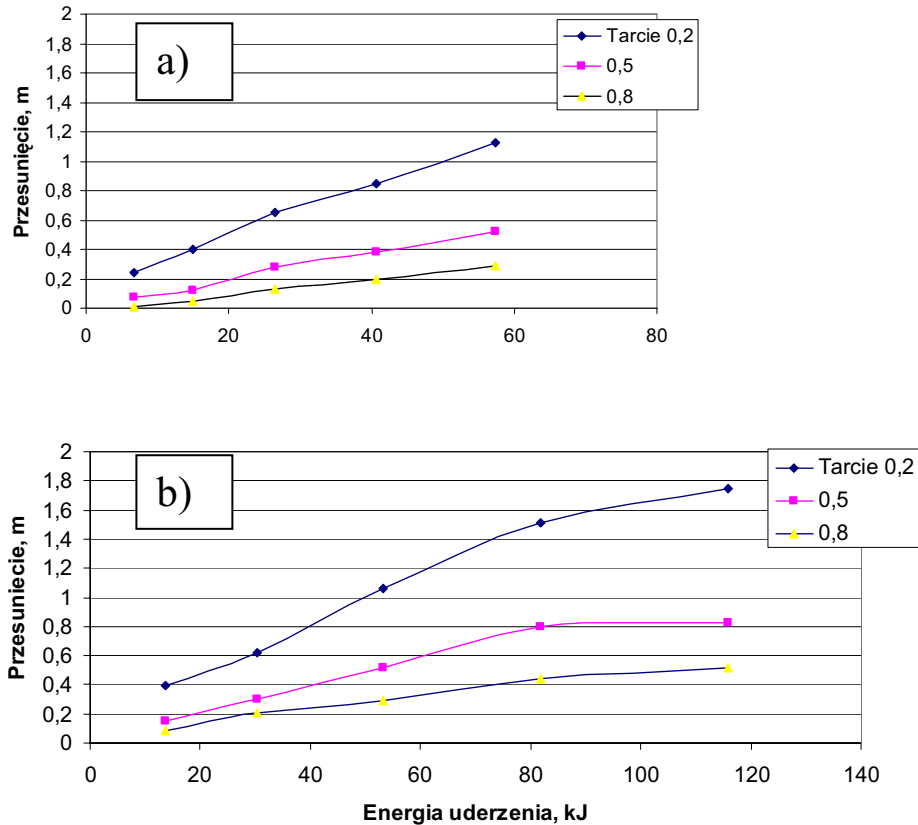
- energią uderzenia samochodu a maksymalnym przesunięciem poprzecznym bariery;
- energią uderzenia a pracą przesunięcia bariery;
- kątem uderzenia samochodu w barierę a pracą jej przesunięcia.

Badania modelowe przeprowadzono, biorąc pod uwagę ustawianie barier betonowych (przestawnych) na różnych podłożach, stosownie do aktualnych potrzeb organizacji i bezpieczeństwa ruchu drogowego.

### 5.1. Energia uderzenia a przesunięcie poprzeczne bariery

Maksymalne przesunięcie poprzeczne bariery podczas uderzenia samochodu wskazuje na jej zdolność do wypełniania funkcji ochronnej, czyli oddziaływania na uderzający samochód. Rezultaty tego oddziaływania są kompromisem pomiędzy podatnością bariery, zdolnością do ślizgowego wyprowadzenia samochodu na korzystny tor ruchu i pochłaniania części jego energii uderzenia. Wstępną analizę przesunięcia poprzecznego bariery w rezultacie uderzenia samochodu przedstawiono w pracach [4, 5]. Przesunięcie poprzeczne bariery ma bezpośredni wpływ na powstawanie zagrożenia bezpieczeństwa ruchu drogowego, bo obszar przesunięcia może być jednocześnie ingerencją w sąsiedni pas ruchu lub naruszać skrajnię drogi.

Na rysunku 5 zestawiono wyniki obliczeń, które pokazują zależność maksymalnego przesunięcia bariery od energii uderzenia samochodów z segmentu handlowego B i C z prędkością 100 i 110 km/h. Obliczenia wykonano dla trzech różnych podłoży, na których ustawiono barierę. Brano pod uwagę wartości kąta uderzenia od 8 do 24 stopni.



Rys. 5. Zależność przesunięcia poprzecznego bariery od energii uderzenia samochodu; a – samochód o masie 900 kg, b – samochód o masie 1500 kg.

Fig. 5. Dependence of the transverse barrier displacement on the car impact energy: a – 900 kg car, b - 1500 kg car.

Wyniki obliczeń, pokazane na rysunku 5, wskazują na narastanie przesunięcia poprzecznego bariery wraz ze wzrostem energii uderzenia. Zależność między przesunięciem poprzecznym a energią uderzenia jest bliska liniowej w szerokim przedziale wartości współczynnika tarcia  $\mu_B = 0,2 - 0,8$  i energii uderzenia do 80 kJ.

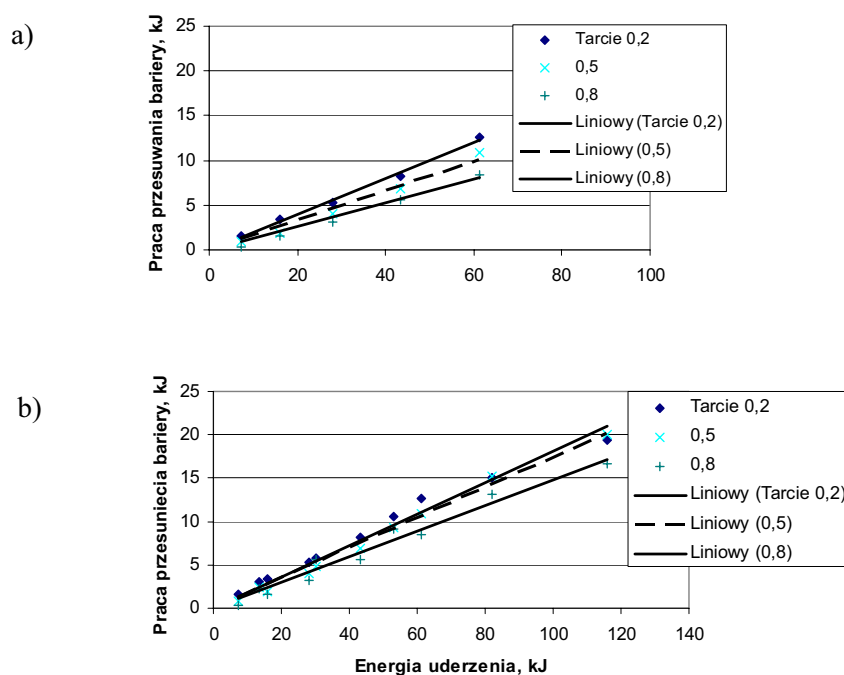
### 5.2. Energia uderzenia a praca przesunięcia bariery

Relacja pomiędzy energią uderzenia a pracą tarcia przesuwanej bariery pokazuje możliwości rozpraszania energii kinetycznej samochodu. Na rysunku 6 widoczne są relacje dla dwóch przedziałów wartości energii uderzenia, a mianowicie:

- 8 – 60 kJ przy uderzeniu samochodu z segmentu B;
- 10 – 120 kJ przy uderzeniu samochodu z segmentu C.



W obu tych przedziałach zaznaczono punktowe wyniki obliczeń modelowych oraz przebieg funkcji aproksymującej zależność pracy przesunięcia bariery od energii uderzenia samochodów z dwóch segmentów handlowych.



Rys. 6. Zależność pracy przesunięcia bariery od energii uderzenia samochodu; a – samochód z segmentu B, b – samochód z segmentu C.

Fig. 6. Dependence of the barrier displacement work on the car impact energy: a – B segment car, b – C segment car.

Przebiegi liniowej funkcji aproksymującej  $y = ax$  charakteryzują się wysoką wartością współczynnika zbieżności aproksymacji  $R^2$  (tab. 4) [12]. Jednocześnie otrzymane przebiegi wielomianu aproksymującego przechodzą przez punkt (0, 0), co jest zgodne z fizyczną interpretacją bilansu energii analizowanego procesu.

Tabela 4. Równania funkcji aproksymującej zależność pracy przesunięcia bariery (y w kJ) od energii uderzenia (x w kJ) z rysunku 6 i wartości współczynnika zbieżności.

Table 4. Equations of the function approximating the dependence of the barrier displacement work (y in kJ) on the impact energy (x in kJ) from figure 6 and the convergence coefficient values.

Samochód	$\mu_B = 0,2$	$R^2$	$\mu_B = 0,5$	$R^2$	$\mu_B = 0,8$	$R^2$
Masa 900 kg,	$y = 0,184x$	0,998	$y = 0,153x$	0,998	$y = 0,125x$	0,944
Masa 1500 kg	$y = 0,182x$	0,978	$y = 0,174x$	0,991	$y = 0,149x$	0,970

Na podstawie przeprowadzonych badań modelowych uderzenia samochodów z segmentu handlowego B i C z prędkością 80 – 110 km/h w barierę ustawioną na różnych podłożach, dokonano oceny wpływu współczynnika tarcia  $\mu_B$  na skuteczność rozpraszania energii uderzenia. Wyniki obliczeń, uśrednione za samochody z obu segmentów handlowych, zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wpływ współczynnika tarcia bariery o podłoże na rozpraszanie energii uderzenia  
Table 5. The influence of the barrier friction coefficient on the impact energy dissipation.

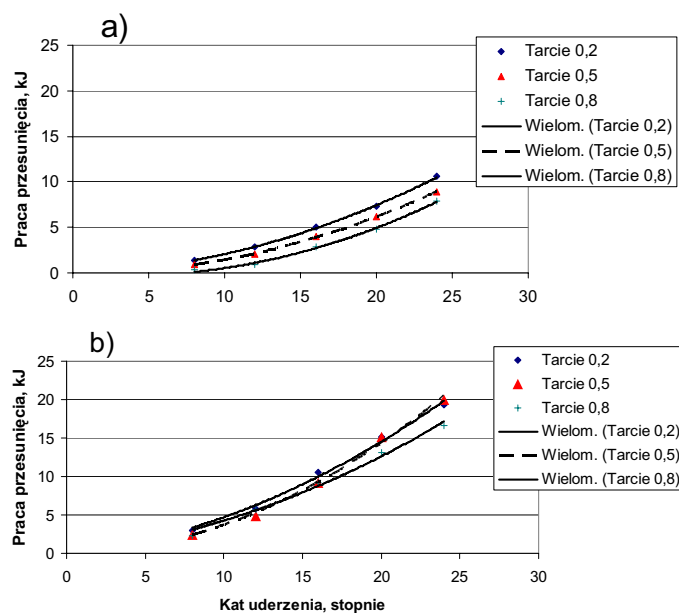
Wartości współczynnika tarcia	Współczynnik kierunkowy liniowej aproksymacji wyników, jak w tabeli 4	Procent energii rozpraszanej, obliczony względem energii uderzenia
0,2	0,17 – 0,20	17 – 20
0,5	0,15 – 0,18	15 – 18
0,8	0,12 – 0,15	12 - 15

Zestawienie pokazuje, że udział procentowy energii rozpraszanej na przesuwaniu bariery w całkowitej energii uderzenia zależy głównie od podłoża, na którym ustawiono barierę i jest możliwy do prognozowania podczas analizy bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz rekonstrukcji wypadków drogowych.

### 5.3. Kąt uderzenia w barierę a praca jej przesunięcia

Poszukuje się relacji pomiędzy wartością kąta uderzenia samochodu w barierę a rozpraszaniem energii tego uderzenia w rezultacie przesunięcia bariery. Już wstępne wyniki obliczeń pokazały, że poszukiwana relacja jest mocno zależna od masy uderzającego samochodu. Przykładowy przebieg linii na rysunku 7 jest podobny do linii na rysunku 8, na którym pokazano ogólny (paraboliczny) charakter zależności energii uderzenia oraz pracy przesuwania bariery od kąta najazdu samochodu na barierę.

Pokazane na rysunku 7 linie aproksymacji wielomianem drugiego stopnia charakteryzują się wysokimi wartościami współczynnika zbieżności modelu aproksymacji z wynikami obliczeń (por. tab. 6). Linie te we wszystkich rozważanych przypadkach zbiegają się do punktu (0, 0).



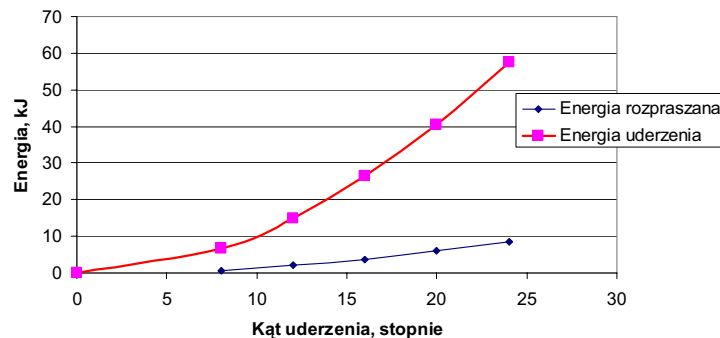
Rys. 7. Wyniki obliczeń i aproksymacja zależności energii rozpraszanej na pracę przesunięcia bariery od kąta uderzenia samochodów z prędkością  $v=100 - 110$  km/h w barierę; a - samochód z segmentu B, b - samochód z segmentu C.

Fig. 7. Calculation results and approximation of dependence of energy dissipated by the barrier displacement work on the car impact angles at the speed of  $v=100 - 110$  km/h; a – B segment car, b - C segment car.

Tabela 6. Aproksymacja zależności energii rozpraszanej na przesuwanie bariery ( $y$  w kJ) od kąta uderzenia samochodu ( $\beta$  w stopniach).

Table 6. Approximation of dependence of energy dissipated by the barrier displacement ( $y$  in kJ) on the car impact angle ( $\beta$  in degrees).

Współczynnik tarcia bariery	Samochód o masie 900 kg	$R^2$	Samochód o masie 1500 kg	$R^2$
0,2	$y = 0,016 \beta^2 + 0,041\beta$	0,999	$y = 0,025 \beta^2 + 0,220 \beta$	0,992
0,5	$y = 0,016 \beta^2 - 0,016\beta$	0,999	$y = 0,034 \beta^2 + 0,028 \beta$	0,994
0,8	$y = 0,019 \beta^2 - 0,140 \beta$	0,996	$y = 0,020 \beta^2 + 0,220 \beta$	0,990



Rys. 8. Przykład relacji pomiędzy kątem uderzenia a energią uderzenia i energią rozpraszoną na przesuwaniu bariery; masa samochodu 900 kg,  $v=100$  km/h,  $\mu_B = 0,5$ .

Fig. 8. Examples of relations between the impact angle and the impact energy and the energy dissipated by the barrier displacement; car weight of 900 kg,  $v=100$  km/h,  $\mu_B = 0,5$ .

Przeprowadzone obliczenia obejmowały uderzenia samochodu w barierę pod kątem 8 – 24 stopni, czyli w nieco szerszym zakresie niż określają to europejskie wymagania normatywne [1]. Podczas uderzenia samochodów osobowych pod kątem 25 i więcej stopni często następuje przewracanie segmentów bariery, najazd samochodu na barierę lub jego wywracanie [11]. Zatem otrzymane zależności opisują sytuacje, w których bariera dobrze wypełnia swoją funkcję ochronną. Z kolei praktyka ruchu drogowego dowodzi, że najczęstsze wartości kąta uderzenia samochodów w barierę są w przedziale 5-10 stopni [10, 13].

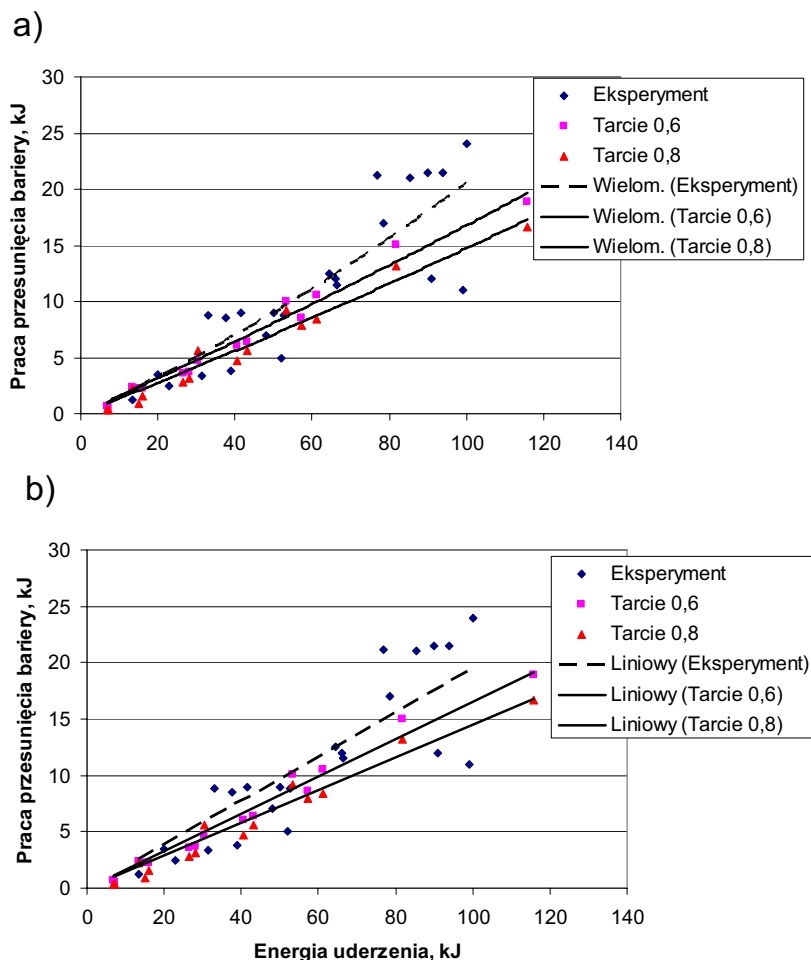
## 6. Próba weryfikacji eksperymentalnej

Badania eksperymentalne barier drogowych prowadzą przede wszystkim ich producenci, ale wyniki tych badań nie są łatwo dostępne. Wśród dostępnych wyników badań np. [10, 13, 14, 15], dominują opracowania związane z doskonaleniem konstrukcji barier, a mało jest prac, w których analizie poddano zachowanie się samochodu po uderzeniu w barierę. Na podstawie pracy [10] opracowano zestawienie wyników umieszczonych tam eksperymentów (por. punkty na rys. 9) z wynikami obliczeń wykonanych z wykorzystaniem modelu opisanego w rozdziale 3.

Tabela 7. Zestawienie charakterystycznych wartości, opisujących badania eksperymentalne o zakresie bliskim do analizowanych wcześniej badań modelowych.

Table 7. Specification of characteristic values, describing experimental tests performed within a scope close to the previously analyzed model tests.

Źródło	Masa samochodów, kg	Prędkość uderzenia, km/h	Kąt najazdu, stopnie	Masa jednostkowa bariery, kg/m
Eksperyment [10]	880 - 1200	60 - 94	13 - 25	500 – 690
Badania własne	900 - 1500	80 - 110	8 - 24	550



Rys. 9. Zestawienie wyników badań eksperymentalnych z wynikami obliczeń oraz ich aproksymacja, a – aproksymacja wielomianem drugiego stopnia, b – aproksymacja liniowa.

Fig. 9. Comparison of the experimental test results with calculation results and their approximation a – approximation by the secondary polynomial, b – linear approximation.

Na rysunku 9 widoczne są punkty odpowiadające результатам testów eksperymentalnych oraz wyniki obliczeń wykonanych dla samochodów o masie 900 – 1500 kg (por. tab. 7). W czasie badań eksperymentalnych bariery były ustawione na nawierzchni betonowej. Zatem zestawiono z nimi wyniki obliczeń, które wykonano dla bariery ustawionej też na podłożu o podobnych właściwościach. Wartości współczynnika tarcia ( $\mu_B = 0,6$ ) dla nawierzchni betonowej pokrytej piaskiem i  $\mu_B = 0,8$  dla czystej powierzchni betonowej) ustalono na podstawie pracy [16].

Pole rozrzutu wyników badań eksperymentalnych na rysunku 9 jest dość duże, ale układa się ono tak, że wyniki obliczeń komputerowych w większości są skupione

w centralnej części pola rozrzutu wyników eksperymentu. Ten charakterystyczny fakt dobrze potwierdza przebieg funkcji aproksymujących na rysunku.

Tabela 8. Aproksymacja wyników badań eksperymentalnych i obliczeń wielomianem pierwszego i drugiego stopnia, gdzie  $y$  jest pracą przesunięcia bariery w kJ, a  $x$  jest energią uderzenia samochodu w kJ.  
Table 8. Approximation of experimental test results and calculation results by the primary and secondary polynomials; where  $y$  is the barrier displacement work in kJ, and  $x$  is the car impact energy in kJ.

Źródło wyników	Aproksymacja wielomianem drugiego stopnia	$R^2$	Masa samochodów, kg	Aproksymacja liniowa	$R^2$
Eksperyment [10]	$y = 0,0005x^2 + 0,155x$	0,740	880 - 1200	$y = 0,194x$	0,731
Obliczenia, tarcie 0,6	$y = 0,0001x^2 + 0,156x$	0,980	900 - 1500	$y = 0,165x$	0,979
Obliczenia, tarcie 0,8	$y = 0,0001x^2 + 0,135x$	0,963	900 - 1500	$y = 0,145x$	0,961

Tabela 8 zawiera funkcje analitycznej aproksymacji zależności energii rozpraszanej na pracę przesuwania bariery od energii uderzenia samochodów z segmentu handlowego B i C, obliczone na podstawie wyników badań eksperymentalnych i modelowych. Funkcje te na rysunku 9 przebiegają blisko siebie, mimo iż do porównania wykorzystano wyniki badań prowadzonych na barierach o różnej wartości masy jednostkowej (tab. 7). Jednocześnie pokazano możliwości aproksymacji wyników obliczeń w postaci wielomianu pierwszego i drugiego stopnia. W obu przypadkach osiągnięto wysokie wartości współczynnika zbieżności  $R^2$  [12], co potwierdza dobrą jakość uzyskanej aproksymacji.

Rysunek 9 także potwierdza, że wykorzystywany model dynamiki ruchu samochodu i bariery oraz dobrane charakterystyki materiałowe i deformacji zderzeniowej oraz oddziaływań zewnętrznych dają w sumie wyniki bliskie rezultatom testów eksperymentalnych.

## 7. Podsumowanie

Skuteczne połączenie możliwości wypełniania funkcji ochronnych w ruchu drogowym z jednoczesnym rozpraszaniem części energii uderzenia na pracę tarcia przesuwnej bariery jest możliwe. W ten sposób można rozproszyć od 12 do 20% energii uderzenia w przestawną barierę drogową. Procent rozpraszanej energii jest zależny od tarcia między barierą a podłożem. Oczywiście, zbyt małe tarcie nie jest korzystne, bo przemieszczenia bariery podczas uderzenia samochodu są zbyt duże [4]. Jednocześnie warto dodać, że we wszystkich analizowanych wariantach obliczeń przyjęty model bariery wypełnił swoją funkcję ochronną i nie stwierdzono przypadków przewrócenia segmentów lub rozerwania bariery. Także wartości maksymalnego przesunięcia poprzecznego bariery, ustawionej na podłożach o tarcu  $\mu_B \geq 0,5$  nie przekraczają 0,85 m, spełniając stosowne wymagania ujęte w pracy [1].

Obliczenia wykonano dla betonowych barier drogowych, ustawianych na różnych podłożach. Otrzymano analityczne zależności energii rozpraszanej na przesunięcie

bariery od kąta i energii uderzenia samochodów. Ważnym aspektem uzyskanych wyników jest jednorodny charakter opisywanych zależności, zaobserwowany w szerokim przedziale zmian energii uderzenia dla najliczniej występujących na drogach kategorii samochodów (kategoria M1, segmenty handlowe B i C). Odnoszą się one do różnorodnych podłoży, co umożliwi ich praktyczne wykorzystanie.

Przeprowadzone obliczenia potwierdziły przydatność opracowanego modelu do analizy sytuacji krytycznych w ruchu drogowym. Uzyskane zależności ułatwiają prognozę zachowania się samochodów w sytuacjach krytycznych oraz podczas rekonstrukcji wypadków. Wyniki obliczeń przesunięcia poprzecznego bariery oraz rozpraszanej przy tym energii od uderzenia pojazdów ułatwiają planowanie ustawienia barier oraz ocenę wpływu tego ustawienia na bezpieczeństwo ruchu drogowego.

### Literatura

- [1] *Systemy ograniczające drogę - część 1: Terminologia i ogólne kryteria metod badań; część 2: Klasy działania, kryteria przyjęcia badań zderzeniowych i metody badań barier ochronnych*, PN – EN 1317.
- [2] WICHER J., KOSACKI T.Ł.: *Czy ochronne bariery drogowe mogą być przyjazne dla kierowców?* III Konferencja „Problemy bezpieczeństwa w pojazdach samochodowych”. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2002.
- [3] COON B. A., REID J.: *Reconstruction techniques for energy-absorbing guardrail end terminals*. Accident Analysis and Prevention vol. 38, 2006.
- [4] PROCHOWSKI L.: *Analysis of displacement of concrete barrier on impact of a vehicle. Theoretical model and experimental validation*. Journal of Kones 2010, vol. 17, No. 4.
- [5] WICHER J., PROCHOWSKI L.: *Pochłanianie energii i zmniejszenie prędkości ruchu samochodu w czasie uderzenia w barierę drogową*, IV Konferencja Naukowo-Szkoleniowa „Rozwój techniki samochodowej a ubezpieczenia komunikacyjne”, Radom 2008.
- [6] PROCHOWSKI L.: *Pojazdy samochodowe. Mechanika ruchu*. wyd. II, WKiŁ, Warszawa 2008.
- [7] PROCHOWSKI L., UNARSKI J., WACH W., WICHER J.: *Pojazdy samochodowe, Podstawy rekonstrukcji wypadków drogowych*. WKiŁ, Warszawa 2008.
- [8] WACH W.: *Symulacja wypadków drogowych w programie PC Crash*. IES, Kraków 2009.
- [9] MIKOŁAJKÓW L.: *Urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego w polskiej praktyce drogowej*. Infrastruktura, nr 1-2/2006.
- [10] NAVIN F., KŁYMCHUK R., ROMILLY D., [ET AL.]: *Reconstruction of accidents involving highway barriers*. SAE 930656.
- [11] ROSS H. E., SICKING D. L., ZIMMER R. A., [ET AL.]: *Recommended procedures for the safety performance evaluation of highway features*. NCHRP Report 350, National Academy Press, Washington 1993.
- [12] *Poradnik inżyniera. Matematyka (praca zbiorowa)*. WNT, Warszawa 1986.
- [13] GRZEBIETA R. H., ZOU R., JIANG T., [ET AL.]: *Roadside hazard and barrier crashworthiness issues confronting vehicle and barrier manufactures and government regulators*. 19 Conference ESV Washington 2005.
- [14] FALLER R. K., ROHDE J. R., ROSSON B. T., [ET AL.]: *Development of a TL-3 F- Shape Temporary Concrete Median Barrier*. Report TRP-03-64-96, University of Nebraska–Lincoln, USA 1996 (<http://engineering.unl.edu/specialty-units/MWRSF/MwRSF-Downloads/Temp Barrier /TRP-03-64-96.pdf>).
- [15] MACDONALD D. J., KIRK A. R.: *Precast concrete barrier crash testing*. FHWA Final Report SPR330, USA 2001.
- [16] JACKOWSKI J.: *Określenie współczynnika tarcia pomiędzy barierą betonową i podłożem*. Sprawozdanie z badań, WAT, Warszawa 2009.

## **Protective function of the road barrier and the car impact energy absorption**

### **S u m m a r y**

The analysis of the protective function of the barrier in the road traffic has been performed. Proper influence on a car hitting the barrier and simultaneous absorption of the impact energy has been analyzed. The issue of absorption (by the barrier) of kinetic energy generated by a hitting car has been considered in relation to the transverse barrier displacement as a result of collision. Calculations of the impact energy and the barrier displacement work have been presented. Numerical estimation of the share of the barrier displacement work in a general impact energy balance for the M1 category cars, commercial segment B and C, i.e. the most common cars in the road traffic, has been obtained. Calculations have been performed for the concrete road barriers placed on different grounds. Analytical dependences of energy dissipated by the barrier displacement on the impact angle and energy of the cars from commercial segments B and C have been determined. They refer to various grounds and allow for practical use when planning barrier arrangement and analyzing road traffic safety issues.

*Praca naukowa, finansowana ze środków na naukę w latach 2007 – 2010 jako projekt rozwojowy*