

## Rozpraszanie energii kinetycznej samochodu przez przesuwaną betonową barierę drogową

JERZY WICHER

Przemysłowy Instytut Motoryzacji

W artykule przedstawiono analizę bilansu energetycznego, pozwalającą na ocenę ilości energii kinetycznej samochodu rozpraszanej przez drogową przesuwaną barierę betonową w fazie zderzenia. Pozwala to na pośrednią ocenę bezpieczeństwa kierowcy i pasażerów, ponieważ im większa ilość energii kinetycznej jest zamieniona na pracę tarcia przemieszczających się segmentów bariery i nadwozia samochodu, tym mniejsza jest deformacja nadwozia samochodu i mniejsze prawdopodobieństwo naruszenia przestrzeni przeżycia. W przykładzie obrazującym sposób wykorzystania zaproponowanej procedury jako dane wejściowe do obliczeń wykorzystano informacje z zamieszczonego w Internecie raportu FHWA/TX-02/4162-1. Analizę przeprowadzono dla eksperymentu opisanego w pierwszej części opracowania (test 441621-1).

### Wykaz ważniejszych oznaczeń

$A, B$	– współczynniki opisujące charakterystykę sztywności nadwozia samochodu
$a_B$	– średnie opóźnienie samochodu w czasie tarcia o boczną ścianę bariery
$b$	– szerokość segmentu bariery
$C$	– deformacja nadwozia samochodu
$d$	– długość drogi kontaktu samochodu z barierą
$E_k$	– początkowa energia kinetyczna samochodu uderzającego w barierę
$E_{swob}$	– energia związana ze swobodnym przemieszczeniem się samochodu po utracie kontaktu z barierą aż do chwili zatrzymania,
$g$	– przyspieszenie ziemskie
$h$	– wysokość segmentu bariery
$L$	– długość segmentu bariery
$M(\alpha)$	– moment w połączeniu segmentów bariery
$m$	– masa własna samochodu
$m_{Bi}$	– masa i-tego segmentu bariery
$s_B$	– długość drogi kontaktu samochodu z barierą
$s_i$	– przesunięcie środka masy i-tego segmentu bariery
$v$	– prędkość samochodu
$V_s$	– objętość segmentu bariery
$W_{\alpha i}$	– praca związana z obrotem i-tego segmentu bariery
$w_0$	– szerokość deformacji czołowej części nadwozia
$W_B$	– praca tarcia samochodu przemieszczającego się wzdłuż bocznych ścianek bariery
$W_D$	– energia rozproszona podczas deformacji nadwozia samochodu
$W_{BC}$	– całkowita praca związana z deformacją bariery

$W_{Pi}$	– praca wykonana w i-tym połączeniu segmentów bariery
$W_{Si}$	– praca tarcia związana z przesunięciem i-tego segmentu bariery
$\alpha_i$	– kąt obrotu, przy którym występuje początek ruchu obrotowego segmentu bariery
$\alpha_2$	– kąt obrotu, przy którym segment bariery kończy ruch obrotowy
$\alpha_{p0}$	– kąt obrotu, przy którym występuje początek narastania momentu w połączeniu segmentów bariery
$\alpha_{p1}$	– kąt obrotu, przy którym kończy się narastanie wartości momentu w połączeniu segmentów bariery
$\alpha_{p2}$	– kąt obrotu, przy którym segmenty bariery kończą ruch obrotowy względem siebie
$\alpha_i$	– kąt obrotu i-tego segmentu bariery
$\beta$	– kąt określający kierunek prędkości $v$ samochodu uderzającego w barierę
$\gamma$	– masa właściwa betonu
$\theta$	– kąt uderzenia samochodu w segment bariery
$\mu_0$	– statyczny współczynnik tarcia betonowego segmentu bariery o podłoże

## 1. Betonowe bariery przesuwne

Jednym z głównych zadań drogowych barier betonowych jest przeciwdziałanie zjechaniu samochodu poza krawędź pasma ruchu. Z punktu widzenia bezpieczeństwa istotne jest oszacowanie, jaka część energii kinetycznej samochodu będzie rozproszona przez barierę. Im więcej energii będzie rozproszone, tym mniejsza będzie deformacja nadwozia i większe prawdopodobieństwo nienaruszenia przestrzeni przeżycia (tj. przestrzeni, w której, mimo deformacji nadwozia, nie wystąpi niebezpieczny dla kierowcy i pasażerów kontakt z elementami samochodu).

Możliwość rozpraszania energii posiadają przesuwne bariery betonowe, które składają się z przegubowo połączonych ze sobą segmentów nieprzymocowanych trwale do podłoża. Segmenty te mogą przemieszczać się po nawierzchni drogi.

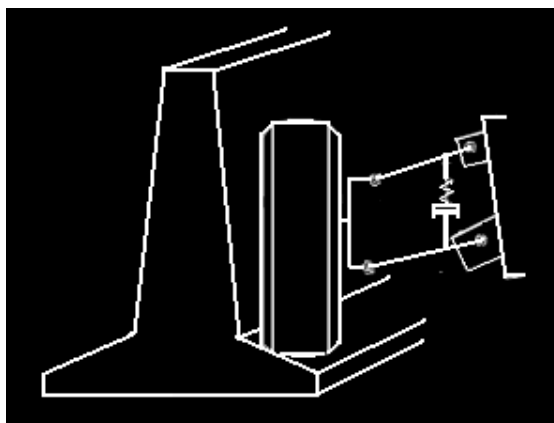
Nowoczesne betonowe bariery przesuwne powinny być tak zbudowane, aby samochód nie utracił w wyniku zderzenia stateczności, przemieszczał się na pewnym odcinku wzdłuż jej bocznej powierzchni i wrócił do właściwego kierunku ruchu po zderzeniu. W tym przypadku część energii kinetycznej samochodu zostanie zamieniona na pracę sił tarcia występujących między nadwoziem samochodu a boczną powierzchnią bariery. Jednocześnie przegubowe połączenia segmentów bariery umożliwiają ich przesuwajnie się, a kolejne segmenty, pociągając za sobą segmenty sąsiednie, powodują zamianę części energii kinetycznej samochodu na pracę tarcia bariery o podłoże. Efekt taki (zwany czasem „efektem łańcucha”) można uzyskać, jeżeli poszczególne elementy betonowej bariery przesuwnej będą miały odpowiednie wymiary i ciężar oraz będą połączone elastycznymi łącznikami. Ponadto system barier przesuwnych zmniejsza maksymalną wartość opóźnienia samochodu. Jak wiadomo wartość ta nie powinna przekraczać poziomu, powyżej którego następuje zadziałanie poduszki powietrznej. Jednocześnie zmniejsza się prawdopodobieństwo dachowania samochodu.

Cechy bariery mogą być kształtowane poprzez szereg parametrów, do których można zaliczyć:

- kształt profilu poprzecznego segmentu,

- wysokość segmentu,
- wielkość siły tarcia powstającej między segmentem bariery i nawierzchnią drogi,
- strzałkę ugięcia bariery spowodowanej uderzeniem samochodu.

Segmenty bariery betonowych najczęściej posiadają tzw. przekrój F lub New Jersey. Dla takich przekrojów najechanie na dolną stopkę bariery pod niewielkim kątem (mniejszym niż  $10^0$ ) wywołuje oddziaływanie zawieszenia, a jednocześnie nie następuje uderzenie nadwozia w ścianę boczną (rys.1). Jeżeli kąt najazdu (uderzenia) jest duży, to może nastąpić uderzenie w boczną ścianę bariery.



Rys.1. Oddziaływanie zawieszenie podczas najechania na dolną stopkę bariery

Szczególnie ważną rolę odgrywa właściwe zaprojektowanie połączenia segmentów bariery, ponieważ cechy konstrukcyjne połączenia mają bezpośredni wpływ na wielkość bocznego przemieszczenia i obroty segmentów bariery. Połączenie o nieodpowiedniej podatności może spowodować zbyt dużą deformację nadwozia i większą, niż dopuszczalna, strzałkę ugięcia bariery.

W krajach Unii Europejskiej (w Polsce też) stosowany jest system DELTA BLOCK. Spełnia on wymogi normy PN-EN 1317-1 i PN-EN 1317-2. Każdy segment jest symetryczny, posiada z obu stron jednakowe elementy mocujące, co ułatwia montaż bariery. Segmenty DELTA BLOCK, oprócz siatki zbrojeniowej, posiadają wbudowane taśmy sprzęgające montowane w procesie produkcji, które pozwalają na łatwe połączenie segmentów lub szybkie usuwanie szkód wypadkowych przez prostą wymianę pojedynczych segmentów bez naruszania skuteczności działania bariery. Połączenie segmentów jest realizowane za pomocą połączenia J-J Hooks, które pozwala na łatwe i szybkie łączenie poszczególnych segmentów bariery przesuwnej. Połączenie zawiera dwa identyczne stalowe haki w kształcie litery J (stąd nazwa).

## 2. Rozpraszanie energii samochodu przez przesuwoną barierę betonową

Z punktu widzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego istotne jest wyznaczenie, jaka część energii kinetycznej samochodu  $E_k$  zostanie rozproszona w wyniku kontaktu samochodu z barierą. Decydujące znaczenie dla przebiegu tego procesu mają wymiary i masa segmentów bariery oraz konstrukcja ich połączeń, które mają wpływ na przesunięcie i obrót każdego przemieszczającego się segmentu. Jednocześnie część energii kinetycznej samochodu jest rozproszona w wyniku tarcia nadwozia samochodu przesuwającego się wzdłuż bocznych ścianek bariery. Pozostała część rozproszonej energii zamienia się na pracę deformacji nadwozia. Jeżeli suma tych energii jest mniejsza od początkowej energii kinetycznej samochodu, to samochód po utracie kontaktu z barierą będzie przemieszczał się aż do zatrzymania.

Równanie bilansu energetycznego ma postać:

$$E_k = \sum_i W_{ai} + \sum_i W_{Si} + \sum_i W_{Pi} + W_B + W_D + E_{swob} \quad (1)$$

gdzie:

$E_k$  – początkowa energia kinetyczna samochodu uderzającego w barierę,

$W_{ai}$  – praca związana z obrotem  $i$ -tego segmentu,

$W_{Si}$  – praca tarcia związana z przesunięciem  $i$ -tego segmentu,

$W_{Pi}$  – praca wykonana w  $i$ -tym połączeniu segmentów bariery,

$W_B$  – praca tarcia *samochodu* przesuwającego się wzdłuż bocznych ścianek bariery,

$W_D$  – energia rozproszona podczas deformacji nadwozia samochodu,

$E_{swob}$  – energia *związana* ze swobodnym przemieszczeniem się samochodu od chwili utraty *kontaktu z barierą* aż do chwili zatrzymania,

$i = 1, \dots, n$  – liczba segmentów bariery, które uległy przemieszczeniu.

W dalszych rozważaniach przyjęto następujące założenia:

- wszystkie segmenty bariery mają takie same wymiary geometryczne i są wykonane z tego samego materiału,
- przesunięte segmenty bariery nie przewróciły się i podczas całej fazy zderzenia z samochodem zachowują kontakt z podłożem,
- praca związana z uszkodzeniami segmentów bariery jest niewielka i może być pominięta w bilansie energetycznym.

## 3. Praca związana z obrotem $i$ -tego segmentu bariery

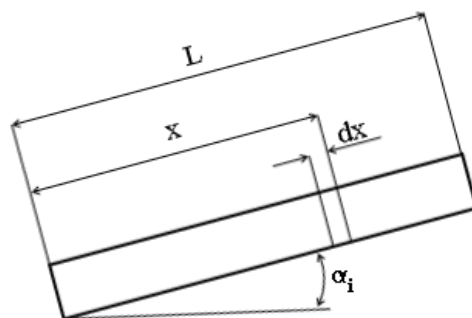
Przyjmijmy, że segment bariery jest reprezentowany przez równoległoscian o wymiarach  $b \times h \times L$ , gdzie:

$b$  – szerokość segmentu bariery,

$h$  – wysokość segmentu bariery,

$L$  – długość segmentu bariery.

W wyniku uderzenia samochodu  $i$ -ty segment bariery obraca się o kąt  $\alpha_i$  wokół połączenia z sąsiednim segmentem (rys.2).



Rys. 2. Obrót segmentu bariery o kąt  $\alpha_i$

Tabela 1. Wartości współczynników tarcia statycznego betonowego segmentu bariery o różne podłoża.

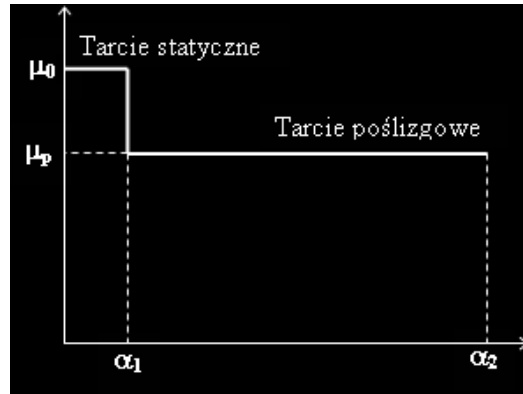
	$\mu_0$	Źródło
Beton – ziemia/skała	0,30	<a href="http://www.supercivild.com/FRICTION.htm">http://www.supercivild.com/FRICTION.htm</a>
Beton – suchy beton	0,65	<a href="http://www.supercivild.com/FRICTION.htm">http://www.supercivild.com/FRICTION.htm</a>
Beton – suchy beton	0,61	<a href="http://www.aspbase.com/doc/testing">http://www.aspbase.com/doc/testing</a>
Beton – suchy beton	0,7	<a href="http://www.concrete.org.uk/forum">http://www.concrete.org.uk/forum</a>
Beton – mokry beton	0,57	<a href="http://www.aspbase.com/doc/testing">http://www.aspbase.com/doc/testing</a>
Beton – sucha glina	0,40	<a href="http://www.supercivild.com/FRICTION.htm">http://www.supercivild.com/FRICTION.htm</a>
Beton – mokra glina	0,20	<a href="http://www.supercivild.com/FRICTION.htm">http://www.supercivild.com/FRICTION.htm</a>
Beton – mokry piasek	0,40	<a href="http://www.supercivild.com/FRICTION.htm">http://www.supercivild.com/FRICTION.htm</a>
Beton – mokry piasek	0,35 – 0,50	<a href="http://www.concrete.org.uk/forum">http://www.concrete.org.uk/forum</a>
Beton – suchy piasek	0,50 - 0,60	<a href="http://www.supercivild.com/FRICTION.htm">http://www.supercivild.com/FRICTION.htm</a>
Beton – piasek	0,60	<a href="http://klub.chip.pl/jizdeb/tablice">http://klub.chip.pl/jizdeb/tablice</a>
Beton – suchy żwir	0,50 - 0,60	<a href="http://www.supercivild.com/FRICTION.htm">http://www.supercivild.com/FRICTION.htm</a>
Beton – żwir	0,87	<a href="http://klub.chip.pl/jizdeb/tablice">http://klub.chip.pl/jizdeb/tablice</a>
Beton – sucha skała	0,60 – 0,70	<a href="http://www.supercivild.com/FRICTION.htm">http://www.supercivild.com/FRICTION.htm</a>
Beton – mokra skała	0,50	<a href="http://www.supercivild.com/FRICTION.htm">http://www.supercivild.com/FRICTION.htm</a>
Beton – beton	0,75	Concrete construction magazine; Sept. 1, 1992- (wg. producentów)
Beton – beton	0,80	Concrete construction magazine; Sept. 1, 1992- (wg. Precast/Prestressed Concrete Institute - Handbook)

W czasie obrotu segmentu bariery występuje siła tarcia  $T$  między jego dolną powierzchnią a nawierzchnią drogi, zależna od wartości współczynnika tarcia. Największa wartość tej siły występuje dla tarcia statycznego. Jest to siła równa co do wartości maksymalnej sile w kierunku możliwego ruchu, która nie wprawia jeszcze ciała w ruch. Może być wyznaczona z zależności  $T = \mu_0 \cdot N$ , gdzie  $N$  jest siłą, z jaką ciało naciska na podłoże, a  $\mu_0$  oznacza współczynnik tarcia statycznego.

Najczęściej przyjmuje się założenie, że z chwilą wprowadzenia ciała w ruch, wartość siły tarcia nie zależy od prędkości, a współczynnik tarcia poślizgowego  $\mu_p$  jest mniejszy od statycznego współczynnika tarcia  $\mu_0$ . Oznacza to, że wartość współczynnika tarcia zmienia się od wartości tarcia statycznego do wartości, jaką przyjmuje współczynnik tarcia poślizgowego.

Wartość współczynnika tarcia betonowego segmentu bariery o nawierzchnię zależy od rodzaju tej nawierzchni. W tabeli 1 przedstawiono wartości tych współczynników tarcia.

Przebieg zmienności współczynnika tarcia przedstawiony jest na rysunku 3.



Rys.3. Przebieg zmian wartości współczynnika tarcia podczas obrotu segmentu bariery

Przebieg zmian wartości współczynnika tarcia przedstawiony na rysunku 3 jest opisany za pomocą następującej funkcji:

$$\begin{aligned} \mu(\alpha) &= \mu_0 & \text{dla } \alpha \leq \alpha_1 \\ \mu(\alpha) &= \mu_p & \text{dla } \alpha_1 < \alpha \leq \alpha_2 \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

$\alpha_1$  – kąt obrotu, przy którym występuje początek ruchu obrotowego segmentu bariery,

$\alpha_2$  – kąt obrotu, przy którym segment bariery kończy ruch obrotowy.

Masa elementu o szerokości  $dx$   $i$ -tego segmentu bariery:  $dm_{Bi} = \gamma \cdot b \cdot h \cdot dx$ , gdzie  $\gamma$  – masa właściwa betonu.

Praca tarcia wykonana podczas przesunięcia  $i$ -tego segmentu bariery na drodze o długości  $\alpha_i x$ , (gdzie kąt  $\alpha_i$  jest w radianach):

$$W_{ai} = \gamma \cdot b \cdot h \cdot g \cdot \alpha_i \int_0^L x \cdot dx \int_0^{\alpha^2} \mu(\alpha) \cdot d\alpha = \gamma \cdot b \cdot h \cdot g \cdot \alpha_i \cdot \frac{L^2}{2} \cdot \int_0^{\alpha^2} \mu(\alpha) \cdot d\alpha \quad (3)$$

Masa  $i$ -tego segmentu bariery

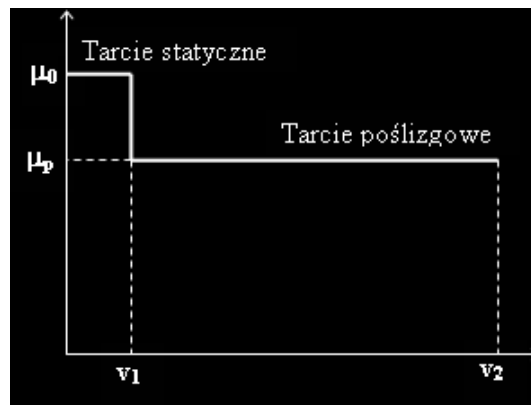
$$m_{Bi} = \gamma b h L \quad (4)$$

zatem

$$W_{ai} = 0,5 \cdot m_{Bi} \cdot g \cdot L \cdot \int_0^{\alpha^2} \mu(\alpha) \cdot d\alpha \quad (5)$$

#### 4. Praca związana z postępowym przesunięciem $i$ -tego segmentu bariery

Praca potrzebna na wykonanie postępowego ruchu segmentu bariery zależy od wartości siły tarcia działającej między dolną powierzchnią segmentu bariery a nawierzchnią drogi. Siła ta jest równa iloczynowi ciężaru segmentu bariery i współczynnika tarcia. Podobnie jak w przypadku ruchu obrotowego segmentu, trzeba uwzględnić różnicę między wartościami współczynników tarcia statycznego i poślizgowego. Przebieg zmian jest taki jak na rysunku 3 z tym, że na osi poziomej zmienną jest prędkość liniowa środka masy segmentu bariery (rys. 4).



Rys.4. Przebieg zmian wartości współczynnika tarcia podczas przesunięcia segmentu bariery

Przebieg zmian wartości współczynnika tarcia jest opisany za pomocą następującej funkcji:

$$\begin{aligned} \mu(v) &= \mu_0 & \text{dla } v \leq v_1 \\ \mu(v) &= \mu_p & \text{dla } v_1 < v \leq v_2 \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie:

- $v_1$  – prędkość środka masy segmentu bariery, przy której występuje początek ruchu postępowego,
- $v_2$  – prędkość środka masy segmentu bariery, przy której następuje koniec ruchu postępowego.

Praca tarcia  $W_{Si}$  potrzebna do przesunięcia i-tego segmentu bariery

$$W_{Si} = m_{Bi} \cdot g \cdot s_i \cdot \int_0^{v_2} \mu(v) \cdot dv \quad (7)$$

gdzie:

- $s_i$  – odległość przemieszczenia środka masy i-tego segmentu bariery.

Masa i-tego segmentu bariery określona jest za pomocą wzoru (4).

### 5. Praca wykonana w połączeniu segmentów bariery

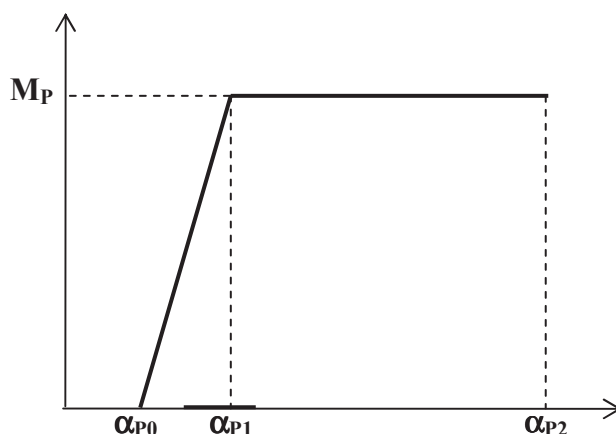
Praca  $W_{Pi}$  wykonana w i-tym połączeniu segmentów bariery

$$W_{Pi} = \int_0^{\alpha P^2} M(\alpha) d\alpha \quad (8)$$

Charakterystyka połączenia segmentów bariery związana jest z kątem obrotu sąsiednich segmentów i może być opisana jako zależność wartości momentu  $M$  od kąta obrotu  $\alpha$ , tzn.  $M(\alpha)$ . Początkowy obrót związany z luzem powstanie przy zerowej wartości momentu. Po wykasowaniu luzu następuje wzrost momentu do jego wartości maksymalnej. Praca wykonana w połączeniu segmentów zależy od wartości kąta po zakończeniu ruchu obrotowego segmentów.

Przebieg zmian wartości momentu w funkcji kąta obrotu przedstawiony jest na rysunku 5.





Rys.5. Przebieg zmian wartości momentu w połączeniu segmentów bariery

gdzie:

- $\alpha_{p0}$  – kąt obrotu, przy którym występuje początek narastania momentu w połączeniu segmentów bariery,
- $\alpha_{p1}$  – kąt obrotu, przy którym kończy się narastanie wartości momentu w połączeniu segmentów bariery,
- $\alpha_{p2}$  – kąt obrotu, przy którym segmenty bariery kończą ruch obrotowy względem siebie.

Przebieg zmian momentu w połączeniu segmentów bariery jest opisany za pomocą następującej funkcji:

$$\begin{aligned}
 M(\alpha) &= 0 && \text{dla } \alpha \leq \alpha_{p0}; \\
 M(\alpha) &= M_p / (\alpha_{p1} - \alpha_{p0}) \cdot \alpha && \text{dla } \alpha_{p0} < \alpha \leq \alpha_{p1}; \\
 M(\alpha) &= M_p && \text{dla } \alpha > \alpha_{p1}
 \end{aligned} \tag{9}$$

## 6. Praca, jaką wykonuje samochód przemieszczający się wzdłuż bocznej ściany bariery

Jeżeli samochód po uderzeniu w barierę nie odbije się, ale będzie przemieszczał się wzdłuż jej bocznej ściany, to siła tarcia nadwozia samochodu o barierę spowoduje zmniejszenie prędkości jego ruchu. Siłę tę można oszacować, jeżeli znana będzie siła nacisku nadwozia samochodu i współczynnik tarcia między boczną powierzchnią nadwozia i boczną powierzchnią bariery. Jednak wyznaczenie wartości siły nacisku jest trudne. Dlatego łatwiejsze jest wyznaczenie wykonanej podczas tego ruchu pracy tarcia  $L_B$  wykorzystując pomiar średniego opóźnienia  $a_h$  samochodu oraz długość drogi kontaktu samochodu z barierą. W tym przypadku

$$W_B = m \cdot a_B \cdot s_B \quad (10)$$

gdzie:

$m$  – masa samochodu,

$a_B$  – średnie opóźnienie samochodu w czasie tarcia o boczną ścianę bariery

$s_B$  – długość drogi kontaktu samochodu z barierą.

### 7. Praca deformacji nadwozia samochodu

Z równania bilansu energetycznego (1) wynika, że praca deformacji nadwozia

$$W_D = E_k - \left( \sum_i W_{ci} + \sum_i W_{Si} + \sum_i W_{Pi} + W_B + E_{swob} \right) \quad (1a)$$

gdzie:

$E_k$  – początkowa energia kinetyczna samochodu uderzającego w barierę

$W_{ci}$  – praca związana z obrotem  $i$ -tego segmentu,

$W_{Si}$  – praca tarcia związana z przesunięciem  $i$ -tego segmentu,

$W_{Pi}$  – praca wykonana w  $i$ -tym połączeniu segmentów bariery,

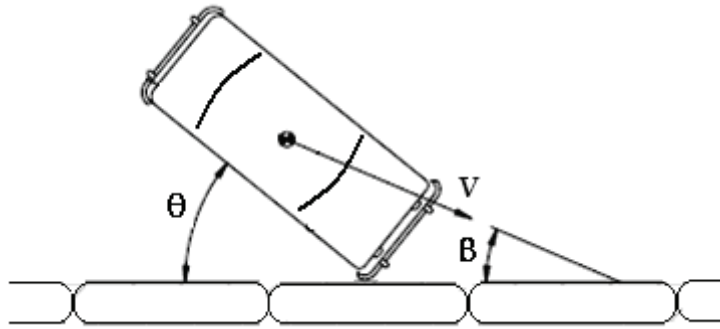
$W_B$  – praca tarcia samochodu przemieszczającego się wzdłuż bocznych ścianek bariery,

$W_D$  – energia rozproszona podczas deformacji nadwozia samochodu,

$E_{swob}$  – energia związana ze swobodnym przemieszczeniem się samochodu po utracie kontaktu z barierą aż do chwili zatrzymania,

$i = 1, \dots, n$  – liczba segmentów bariery, które uległy przemieszczeniu.

Do wyznaczenia pracy deformacji nadwozia samochodu potrzebne jest ustalenie wartości kąta uderzenia samochodu w barierę. Jeżeli samochód oprócz prędkości liniowej wykonuje obrót wokół osi pionowej, to kierunek prędkości  $v$  określony przez kąt  $\beta$  jest inny niż kąt  $\theta$  określający położenie nadwozia samochodu w stosunku do ściany bocznej bariery (rys.6). W praktyce różnica ta jest niewielka, tzn.  $\beta \approx \theta$ . Do dalszej analizy przyjęto właśnie taką sytuację.



Rys.6. Kąty uderzenia samochodu w barierę

Do wyznaczenia pracy deformacji nadwozia  $W_D$  można wykorzystać model opracowany przez Campbell'a [3] i rozwinięty przez Mc Henry'ego [5]. Istotnym założeniem jest przyjęcie, że siła  $F(C)$  powodująca deformację  $C$  nadwozia samochodu może być zapisana jako zależność liniowa w postaci:

$$F(C) = A + B \cdot C \quad (11)$$

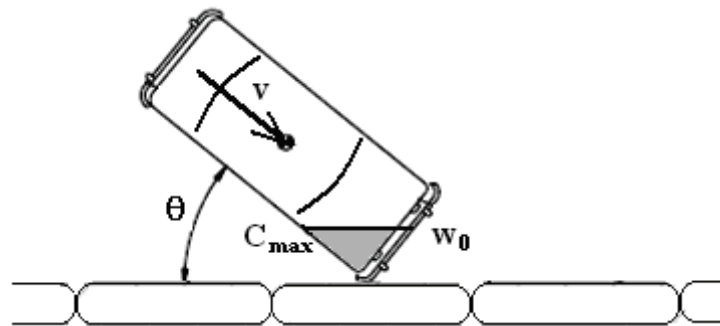
gdzie:

- $A, B$  – współczynniki opisujące charakterystykę sztywności nadwozia samochodu,
- $C$  – deformacja nadwozia samochodu.

Praca deformacji nadwozia

$$W_D = \int_0^{w_0} \int_0^{w_0 C} F(C) \cdot dC \cdot dw \quad (12)$$

gdzie  $w_0$  oznacza szerokość deformacji czołowej części nadwozia (rys.7).

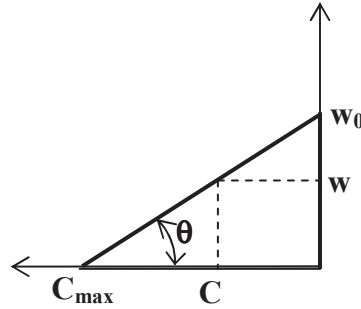


Rys.7. Obszar deformacji nadwozia samochodu po zakończeniu fazy zderzenia

Do wyznaczenia ilości energii rozproszonej podczas deformacji nadwozia samochodu istotne są wymiary charakteryzujące obszar deformacji. Nie jest istotne czy deformacja ta nastąpiła w wyniku zderzenia z barierą sztywną, podatną czy też innym samochodem.

Po podstawieniu zależności (11) na siłę  $F(C)$  do wyrażenia (12) będzie:

$$W_C = \int_0^{w_0} \int_0^C (A + B \cdot C) \cdot dC \cdot dw = \int_0^{w_0} \left( A \cdot C + \frac{1}{2} B \cdot C^2 \right) \cdot dw \quad (13)$$



Rys.8. Zależności geometryczne do wyznaczenia głębokości deformacji  $C$

Z rysunku 8 wynikają następujące relacje:

$$w_0 = C_{max} \cdot \operatorname{tg} \theta \quad (14)$$

$$C = C_{max} - \frac{w}{\operatorname{tg} \theta} \quad (15)$$

Po uwzględnieniu powyższych zależności otrzymamy:

$$\begin{aligned} W_D &= \int_0^{w_0} \left[ A \cdot \left( C_{max} - \frac{w}{\operatorname{tg} \theta} \right) + \frac{1}{2} B \cdot \left( C_{max} - \frac{w}{\operatorname{tg} \theta} \right)^2 \right] \cdot dw \\ &= \int_0^{w_0} \left[ A \cdot C_{max} - \frac{A}{\operatorname{tg} \theta} \cdot w + \frac{1}{2} B \cdot C_{max}^2 - \frac{B \cdot C_{max}}{\operatorname{tg} \theta} \cdot w + \frac{B}{2 \operatorname{tg}^2 \theta} \cdot w^2 \right] \cdot dw \\ &= A \cdot C_{max} \cdot w_0 - \frac{A}{2 \operatorname{tg} \theta} \cdot w_0^2 + \frac{1}{2} B \cdot C_{max}^2 \cdot w_0 - \frac{B \cdot C_{max}}{2 \operatorname{tg} \theta} \cdot w_0^2 + \frac{B}{6 \operatorname{tg}^2 \theta} \cdot w_0^3 \end{aligned} \quad (16)$$

Po uwzględnieniu zależności (14) będzie:

$$\begin{aligned}
 W_D &= A \cdot C_{max}^2 \cdot tg\theta - \frac{A}{2tg\theta} \cdot (C_{max} \cdot tg\theta)^2 + \frac{1}{2} B \cdot C_{max}^3 \cdot tg\theta \\
 &- \frac{B \cdot C_{max}}{2tg\theta} \cdot (C_{max} \cdot tg\theta)^2 + \frac{B}{6tg^2\theta} \cdot (C_{max} \cdot tg\theta)^3 \\
 &= \frac{1}{2} A \cdot C_{max}^2 \cdot tg\theta + \frac{1}{6} B \cdot C_{max}^3 \cdot tg\theta
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Jeśli zatem znana będzie wartość maksymalnej deformacji  $C_{max}$ , to po oszacowaniu wartości współczynników  $A$  i  $B$  można będzie obliczyć pracę deformacji  $W_D$  nadwozia samochodu.

Sposób wyznaczenia wielkości deformacji dla dowolnego odkształcenia opisany jest w instrukcji programu *Cash 3 Analyzer* oraz w wielu publikacjach poświęconych zderzeniom samochodów. Źródłową publikacją na ten temat jest publikacja [5].

Wartości współczynników  $A$  i  $B$  można oszacować na podstawie wyników badań doświadczalnych. Podstawowym źródłem informacji o wartościach  $A$  i  $B$  są wyniki testów zderzeniowych publikowane w Internecie na stronach WWW Amerykańskiej Agencji NHTSA (*National Highway Traffic Safety Administration*). Dane takie można też znaleźć w *Accident Reconstruction Journal*. Można też skorzystać z wartości  $A$  i  $B$  uśrednionych dla poszczególnych kategorii samochodów.

W tabeli 2 przedstawiono wartości parametrów  $A$  i  $B$  dla kategorii samochodów osobowych wg klasyfikacji amerykańskiej: mini, subcompact, compact, intermediate i van [11].

Tabela 2. Wartości współczynników  $A$  i  $B$

Parametr	Mini	Subcompact	Compact	Intermediate	Van
Rozstaw osi [m]	2,05-2,40	2,40-2,58	2,58-2,80	2,80-2,98	2,76-3,30
Rozstaw kół [m]	1,29	1,38	1,49	1,57	1,71
Długość [m]	4,05	4,44	4,98	5,40	4,66
Szerokość [m]	1,54	1,70	1,84	1,95	2,00
Masa [kg]	1000	1386	1610	1928	1952
UP – $A$ [N/m]	52 900	45 400	55 500	62 300	67100
UP – $B$ [N/m <sup>2</sup> ]	320 000	300 000	390 000	230 000	870000
UT – $A$ [N/m]	64 100	68 500	71 800	62 500	52500
UT – $B$ [N/m <sup>2</sup> ]	260 000	280 000	300 000	90 000	380000
UB – $A$ [N/m]	13 500	24 500	30 300	25 000	-
UB – $B$ [N/m <sup>2</sup> ]	260 000	460 000	390 000	340 000	-

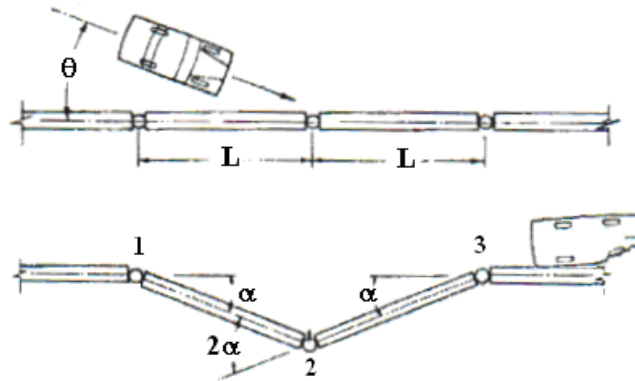
UP – uderzenie w przód, UT – uderzenie w tył, UB – uderzenie w bok

## 8. Analiza porównawcza poszczególnych rodzajów energii rozpraszanej podczas uderzenia samochodu w przesuwную barierę betonową

Celem przedstawionych niżej obliczeń jest pokazanie sposobu postępowania podczas wykonywania analizy bilansu energetycznego uderzenia samochodu w przesuwную barierę betonową

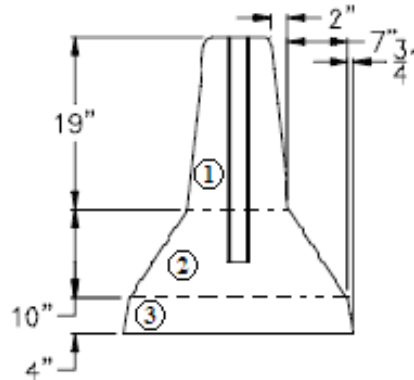
Do przeprowadzenia analizy wykorzystane zostały dane z eksperymentu, opublikowane w raporcie FHWA/TX-02/4162-1. Analizę przeprowadzono dla eksperymentu opisanego w pierwszej części opracowania (test 441621-1) [1], [2].

W eksperymencie wykorzystano samochód Chevrolet 2500 pickup truck (rok produkcji 1996) o masie własnej  $m=2105$  kg. W wyniku uderzenia wystąpił obrót dwóch segmentów bariery (rys.9).



Rys.9. Schemat przesunięcia segmentów bariery

Masę segmentu bariery wyznaczono na podstawie wymiarów geometrycznych segmentu i masy właściwej betonu. Każdy segment miał długość  $L=9,14$  m (30 ft). Wymiary bocznego przekroju segmentu bariery przedstawione są na rysunek 10.



Rys.10. Wymiary przekroju poprzecznego segmentu bariery (w calach) [1], [2]

Niepodaną na rysunku 10, ale potrzebną do obliczenia powierzchni przekroju poprzecznego, szerokość podstawy segmentu oszacowano na podstawie wartości innych wymiarów i założeniu, że na rysunku 10 są zachowane proporcje. W taki sposób ustalono, że szerokość podstawy segmentu wynosi 24,5', czyli 0,62 m. Powierzchnia przekroju bocznego została wyznaczona jako suma pól trzech trapezów ①, ②, ③ i wynosi  $A_s=0,25 \text{ m}^2$ . Każdy segment miał długość  $L=9,14 \text{ m}$  (30 ft). Zatem objętość segmentu bariery  $V_s=2,29 \text{ m}^3$ . Masę i-tego segmentu bariery oszacowano wyznaczając iloczyn objętości segmentu i masy właściwej betonu, z którego wykonany był segment. Przyjmując, że masa właściwa betonu  $\gamma=2500 \text{ kg/m}^3$ , otrzymano  $m_{Bi}=\gamma V_s=2500 \text{ kg/m}^3 \cdot 2,29 \text{ m}^3=5722 \text{ kg}$ .

Uderzenie samochodu w barierę spowodowało rozproszenie energii związane z przesunięciami segmentów bariery, tarcie w połączeniach segmentów bariery, tarcie nadwozia samochodu o boczną ścianę bariery oraz deformację nadwozia samochodu.

Zgodnie z rysunkiem 9 należy wyznaczyć następujące składniki bilansu energetycznego:

- $W_\alpha$  – praca tarcia związana z obrotem 2 segmentów bariery,
- $W_{P123}$  – praca wykonana w 1, 2 i 3 połączeniu segmentów bariery,
- $W_B$  – praca tarcia samochodu przemieszczającego się wzdłuż bocznej ściany bariery,
- $W_D$  – praca deformacji nadwozia samochodu.

Do obliczenia pracy tarcia związanej z obrotem i-tego segmentu bariery wykorzystano wzór (5). Przyjęto parametry funkcji tarcia  $\mu(\alpha)$  przedstawionej na rysunku 3. Korzystając z danych zamieszczonych w tabeli 1 oszacowano:  $\mu_0=0,7$ ;  $\mu_p=0,5$ . Oba segmenty bariery obróciły się o kąt  $\alpha_2=12^\circ$ . Do obliczeń przyjęto ponadto wartość  $\alpha_f=0,5^\circ$ . Zatem przebieg zmian tarcia jest opisany za pomocą następującej funkcji:  $\mu(\alpha)=0,7$  dla  $\alpha \leq 0,5^\circ$  oraz  $\mu(\alpha)=0,5$  dla  $0,5^\circ \leq \alpha \leq 12^\circ$ . Po wykonaniu obliczeń praca tarcia obu segmentów  $W_\alpha=54906 \text{ J}$ .

Praca  $W_{P123}$  wykonana w połączeniach 1, 2 i 3 obróconych segmentów bariery została wyznaczona na podstawie wzoru (8). Przyjęto następujące parametry funkcji momentu  $M(\alpha)$  przedstawionej na rysunku 5:

- kąt, przy którym następuje wykasowanie luzu  $\alpha_{p0}=2^\circ$  (dla każdego połączenia),
- kąt, przy którym połączenie osiąga maksymalny moment oporu  $\alpha_{p1}=3^\circ$  (dla każdego połączenia),
- kąt obrotu połączenia 1 i 3:  $\alpha_{p1,3}=12^\circ$ ,
- kąt obrotu połączenia 2:  $\alpha_{p2}=24^\circ$ .

Zatem przebieg zmian momentu w połączeniach segmentów bariery jest opisany za pomocą następującej funkcji:  $M(\alpha)=0$  dla  $\alpha \leq 2^0$ ;  $M(\alpha)=M_P/1^0$  dla  $2^0 < \alpha \leq 3^0$ ;  $M(\alpha)=M_P$  dla  $\alpha > 3^0$ .

Wartość momentu  $M_P$  oszacowano w następujący sposób. Przyjmując sztywność kątową połączenia  $k_\alpha = 1000 \text{ Nm/1}^0$  otrzymamy:

$$M_P = k_\alpha (\alpha_{P1} - \alpha_{P0}) = 1000 \text{ Nm/1}^0 \cdot (3^0 - 2^0) = 1000 \text{ Nm}.$$

Po wykonaniu obliczeń praca wykonana w połączeniach 1, 2, 3 segmentów bariery  $W_{P123} = 720 \text{ J}$ .

Praca tarcia samochodu przemieszczającego się wzdłuż bocznych ścianek bariery została wyznaczona na podstawie wzoru (10). Masa własna samochodu  $m = 2105 \text{ kg}$ .

Wyznaczone w eksperymencie średnie opóźnienie samochodu przed utratą kontaktu z barierą wynosiło  $a_B = 0,6g = 5,88 \text{ m/s}^2$ . Ponieważ  $a_B \approx \Delta v / \Delta t$ , zatem spadek prędkości samochodu wynikający z tarcia o boczną ścianę bariery  $\Delta v = a_B \cdot \Delta t$ . Wg danych z eksperymentu czas kontaktu samochodu z barierą  $\Delta t \approx 1,6 \text{ s}$ . Na podstawie oszacowanej wartości opóźnienia i czasu kontaktu samochodu z barierą wyznaczono spadek prędkości samochodu podczas kontaktu z barierą

$$\Delta v = a_B \cdot \Delta t = 5,88 \text{ m/s}^2 \cdot 1,6 \text{ s} = 9,4 \text{ m/s}.$$

Prędkość samochodu w chwili rozpoczęcia tarcia nadwozia samochodu o boczną ścianę bariery  $v = 28,16 \text{ m/s}$ . Zatem prędkość samochodu po upływie czasu  $\Delta t$ , wynosi

$$v_k = v - \Delta v = 28,16 \text{ m/s} - 9,4 \text{ m/s} = 18,76 \text{ m/s}.$$

Średnia prędkość na tym odcinku

$$v_{sr} = 0,5 \cdot (v + v_k) = 0,5 \cdot (28,16 + 18,76) \text{ m/s} = 23,46 \text{ m/s}.$$

Zatem odległość, jaką przejechał samochód w czasie  $\Delta t$  wynosi

$$s_B = v_{sr} \cdot \Delta t = 23,46 \text{ m/s} \cdot 1,6 \text{ s} = 37,5 \text{ m}.$$

Uwzględniając powyższe dane praca tarcia samochodu przemieszczającego się wzdłuż bocznych ścianek bariery

$$W_B = m \cdot a_B \cdot s_B = 2105 \text{ kg} \cdot 5,88 \text{ m/s}^2 \cdot 37,5 \text{ m} = 464152 \text{ J}.$$

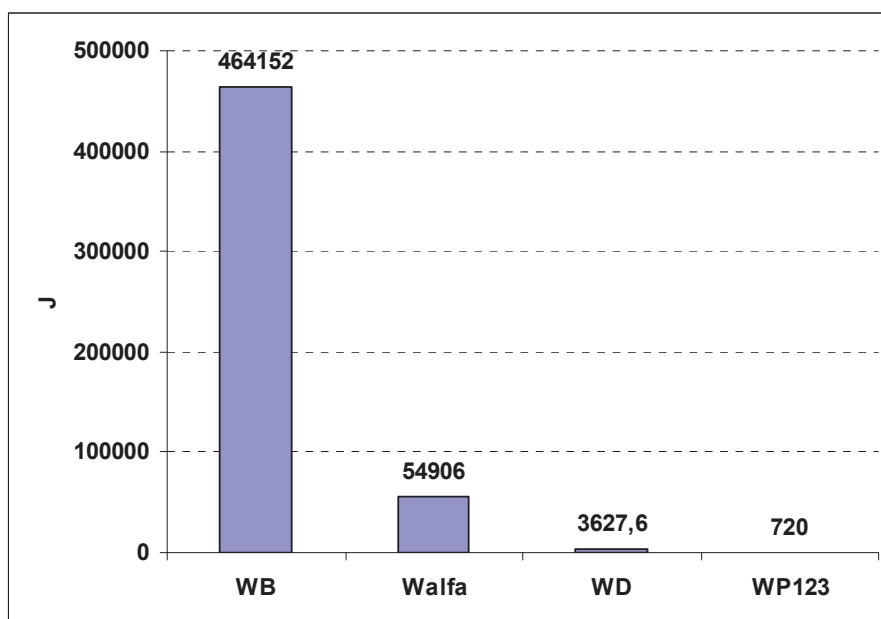
Do wyznaczenia pracy deformacji nadwozia wykorzystany został wzór (17). Na podstawie danych z eksperymentu [1], [2] ustalono następujące wartości.

- kąt uderzenia samochodu w barierę  $\theta = 25,2^0$ ,
- maksymalna deformacja nadwozia samochodu  $C_{max} = 0,8 \text{ m}$ ,
- współczynniki modelu zderzenia (wg tab.2)  $A = 25 \text{ 000 N/m}$ ;  $B = 340 \text{ 000 N/m}^2$

Po wykonaniu obliczeń  $W_D = 3627,6 \text{ J}$ .

Porównanie wartości poszczególnych rodzajów utraconej energii przedstawiono jest na rysunku 11.





Rys.11. Porównanie wartości poszczególnych rodzajów utraconej energii

Przedstawione w artykule wzory pozwalają na oszacowanie wartości różnych składników bilansu energii rozpraszanej podczas uderzenia samochodu w przesuwaną barierę betonową. Z obliczeń wykonanych na podstawie danych zaczerpniętych z badań opisanych w raporcie FHWA/TX-02/4162-1 wynika, że:

- Dominujący udział w ilości rozpraszanej energii ma praca tarcia nadwozia samochodu przemieszczającego się wzdłuż bocznych ścianek bariery. Wynika stąd, że ważnym elementem projektowania segmentów bariery przesuwnej jest zapewnienie nieodbijania się samochodu po uderzeniu. Jest to związane z prawidłowym zaprojektowaniem połączenia segmentów bariery przesuwnej, które powinno spowodować powstanie tzw. „efektu łańcucha”.
- Znacząca ilość energii jest rozproszona przez przesuwne segmenty bariery, co potwierdza zasadność stosowania przesuwnych barier betonowych.
- Wpływ deformacji nadwozia w bilansie energetycznym jest mało znaczący. Należy jednak przypomnieć, że istotny jest dla kierowcy i pasażerów sposób deformacji nadwozia. Nadwozie powinno być tak skonstruowane, aby zminimalizować możliwość naruszenia tzw. przestrzeni przeżycia, która w samochodach osobowych jest tożsama z objętością kabiny.
- Pomijalnie mała jest ilość energii rozpraszanej w połączeniach segmentów bariery oznacza to, że najważniejszym elementem dobrze zaprojektowanego połączenia jest stworzenie warunków pozwalających na nieodrywanie

nadwozia samochodu od bocznej ściany bariery, czyli spowodowanie zaistnienia tzw. „efektu łańcucha”. Zjawisko to ma silny wpływ na pracę tarcia nadwozia, której wartość jest dominująca w bilansie rozpraszanej energii.

Artykuł powstał w wyniku prac prowadzonych w ramach projektu badawczo-rozwojowego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego „System betonowych barier ochronnych i rozpraszających energię zderzenia samochodu do dróg o dużym natężeniu ruchu i wysokim zagrożeniu wypadkowym” Kierownik projektu: prof. dr hab. inż. Waław Borkowski (PBR 187/WAT/2007).

### Literatura

- [1]. Bligh R.P., Bullard D.L., Jr., Menges W.L., [et al.]: *Evaluation of Texas Grid-Slot Portable Concrete Barrier System*, Texas Department of Transportation, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, April 2002.
- [2]. Bligh R.P., Sheikh N.M., Menges W.L., [et al.]: *Development Of Low-Deflection Precast Concrete Barrier*, Report 0-4162-3, Project Title: *Evaluation of Barrier Systems and Placement Issues*, Texas Department of Transportation, Federal Highway Administration, January 2005.
- [3]. Campbell K. L.: *Energy basis for collision severity*, SAE paper 740565, 1974.
- [4]. Jiang T., Grzebieta R.H., Zhao X.L.: *Predicting impact loads of a car crashing into a concrete roadside safety barrier*, Int. Journ. Crash, Vol.9, No.1, pp. 45-63.
- [5]. McHenry, R. R.: *Computer program for reconstruction of highway accidents*, SAE paper 730980, 1973.
- [6]. Michie J. D., Ross H. E., Jr., Sicking D. L., [et al.]: *Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features*, NCHRP Report 350, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. 1993.
- [7]. Michie, J. D., NCHRP Report 115: *Guardrail Performance and Design*, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C. 1971.
- [8]. Polska Norma PN-EN 1317-1: *Systemy ograniczające drogę - Część 1: Terminologia i ogólne kryteria metod badań*.
- [9]. Polska Norma PN-EN 1317-2: *Systemy ograniczające drogę – Część 2: Klasy działania, kryteria przyjęcia badań zderzeniowych i metody badań barier ochronnych*.
- [10]. *Portable concrete traffic barrier for maintenance operations*, report FHWA/TX-05/0-4692-1, May 2005.
- [11]. Prochowski L., Unarski J., Wach W., [i in.]: *Podstawy rekonstrukcji wypadków drogowych*, WKiŁ, Warszawa 2008.
- [12]. Wicher J., Kosacki T.: *Czy ochronne bariery drogowe mogą być przyjazne dla kierowców?* Artykuł problemowy, III Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy bezpieczeństwa w pojazdach samochodowych”, Zeszyty Naukowe Nr 71, Kielce 2002 s.63-96.
- [13]. 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, 18-19.06.2008.
- [14]. Wicher J.: *Bezpieczeństwo samochodów i ruchu drogowego*, WKiŁ Warszawa.
- [15]. Wicher J.: *Dynamic Performance of Car Impact into Concrete Road Barriers*, *Studies, Research and Development in Applied Sciences*, XVIIth German-Polish Scientific Seminar, Köln, 2005, pp.36-39.
- [16]. Wicher J.: *Rekonstrukcja zderzenia samochodu z drogową barierą betonową*, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*, 2(57)/2005, Politechnika Warszawska, Warszawa 2005, str.13-19.