

**dr inż. Artur Iluk**  
Politechnika Wrocławska  
Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn  
ul. Łukasiewicza 7/9  
50-371 Wrocław  
e-mail: artur.iluk@pwr.wroc.pl

## Metoda oceny sztywności pojazdu pod kątem zagrożenia eksplozją

**Słowa kluczowe:** pojazdy wojskowe, zagrożenie eksplozją, IED, sztywność struktury

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono nową metodę oceny sztywności struktury pojazdu pod kątem odporności na eksplozję miny. Metoda ta umożliwia ocenę konstrukcji szerokiej gamy pojazdów gąsienicowych i kołowych na wczesnym etapie procesu konstruowania pojazdu uwzględniając takie czynniki jak masa i sztywność kadłuba oraz prześwit pod pojazdem. Wynikiem zastosowania metody jest ocena zagrożenia kończyn dolnych wskutek lokalnej deformacji pojazdu dla każdego członka załogi.

### 1. Wstęp

Eksploatacja pojazdów wojskowych w warunkach zagrożenia eksplozjami min lub improwizowanych urządzeń wybuchowych (*Improvised Explosive Device - IED*) jest dużym zagrożeniem dla poruszających się w nich załóg. Ocena odporności takich pojazdów na eksplozję jest złożonym zadaniem, często możliwym do przeprowadzenia dopiero po zbudowaniu pojazdu [2]. Problem ten jest szczególnie istotny w odniesieniu do pojazdów wojskowych, jednak w dobie zagrożeń terrorystycznych w wielu przypadkach istnieje potrzeba analizowania pod tym kątem również bezpieczeństwa pojazdów cywilnych.

Bezpieczeństwo załogi należy rozpatrywać w wielu aspektach związanych z różnymi typami zagrożenia [11]. Najbardziej niebezpieczne i najtrudniejsze do zwalczania są zagrożenia związane z uszkodzeniem kończyn dolnych [8] i kręgosłupa [3, 7].

### 2. Opis problemu

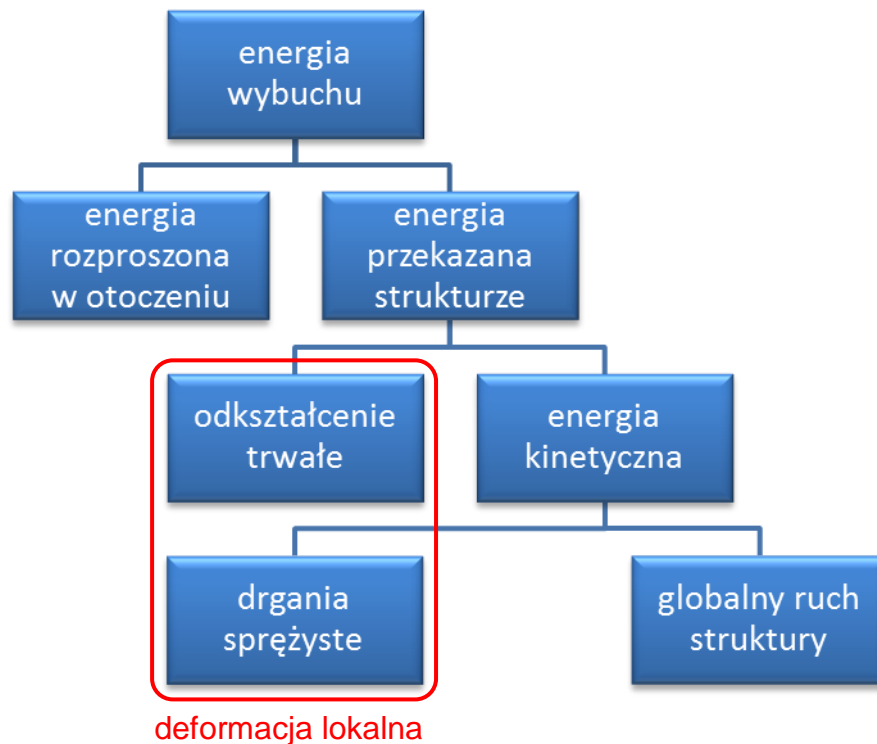
Proces przekazywania energii wybuchu na strukturę pojazdu przedstawiono schematycznie na rysunku 1. Znakomita większość energii chemicznej uwalnianej w procesie detonacji ładunku umieszczonego w podłożu jest przekazywana otoczeniu, tylko niewielka część przekazywana jest w postaci impulsu ciśnienia na strukturę pojazdu. Impuls ciśnienia  $I$  definiowany jest wzorem

$$I = \int_0^t p dt \quad (1)$$

gdzie  $t$  jest czasem trwania impulsu ciśnienia, zaś  $p$  – chwilową średnią wartością ciśnienia gazów działających na obciążaną powierzchnię.

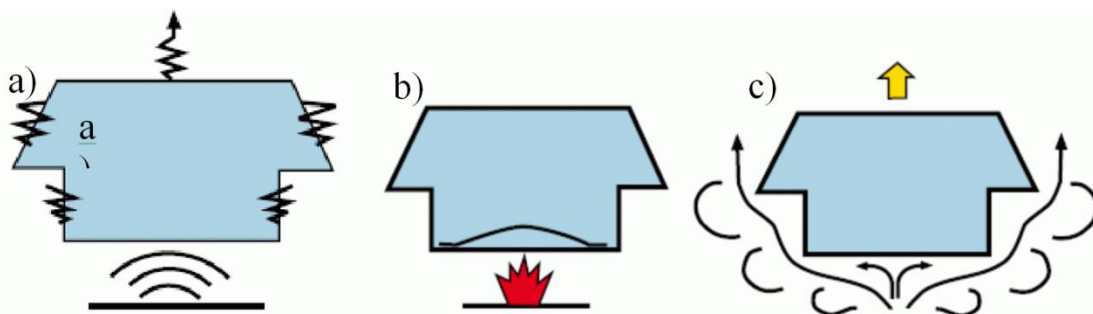
Energię przekazywaną strukturze można rozpatrywać jako dwa strumienie energii. Jeden z nich ulega rozproszeniu poprzez trwałe odkształcenia struktury, drugi przekazany jest strukturze w postaci energii kinetycznej. Z kolei energię kinetyczną można podzielić na

energię odkształceń sprężystych, które są wzbudzone uderzeniem fali w postaci drgań zgodnie z jej częstotliwościami drgań własnych, oraz na globalny ruch struktury, rozumiany tu jako zmiana wektora prędkości środka ciężkości całego pojazdu względem otoczenia wskutek eksplozji.



Rys. 1. Schemat procesu przekazywania energii wybuchu na strukturę

Fazy przekazywania energii eksplozji przedstawiono schematycznie na rysunku 2. Drgania o dużej częstotliwości wywołane w pierwszej fazie uderzeniem fali propagują z prędkością dźwięku w całej strukturze, co może powodować uszkodzenia doraźne mniej wytrzymałych elementów. Ze względu na dużą prędkość fali sprężystej, czas trwania tej fazy jest bardzo krótki, rzędu kilku milisekund.

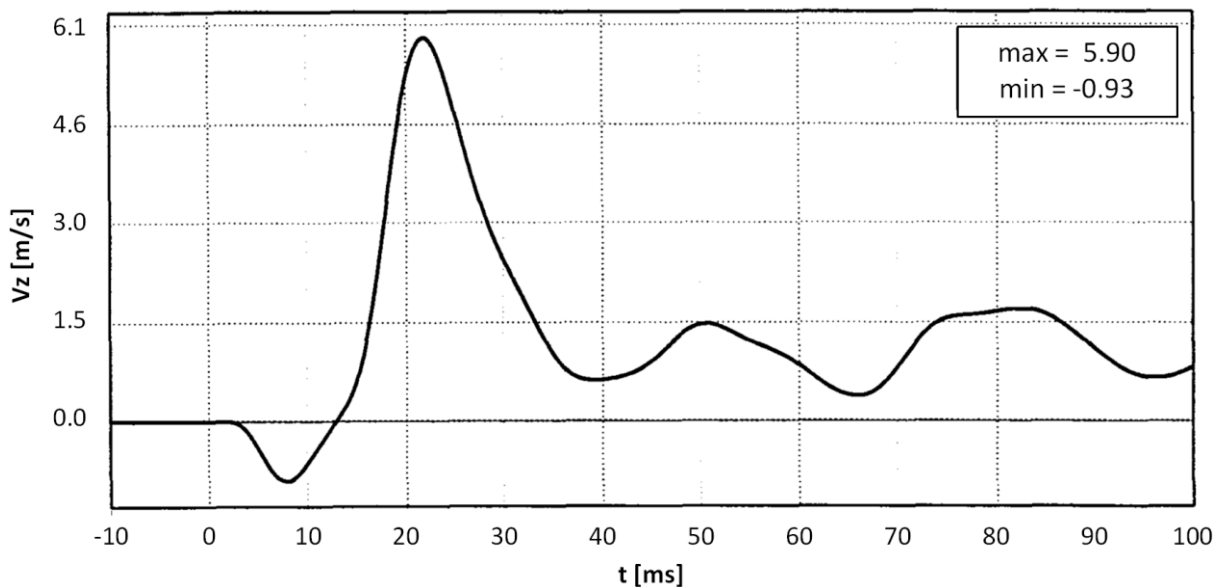


Rys. 2. Obciążenie pojazdu eksplozją miny: a) propagacja fal sprężystych, b) lokalna deformacja struktury, c) globalny ruch pojazdu [6]

W drugiej fazie następuje lokalna deformacja dolnej części pojazdu, na którą składają się odkształcenia trwałe oraz drżania sprężyste w proporcjach zależnych od wytrzymałości struktury. W pojazdach o małej wytrzymałości dominują odkształcenia trwałe, w pojazdach strukturalnie odpornych na eksplozję pod pojazdem mogą dominować odkształcenia sprężyste.

W trzeciej fazie działania eksplozji następuje rozpędzenie całej struktury. Trwa ona dłużej niż faza druga ze względu na znacznie większą bezwładność całego pojazdu niż bezwładność samego dna pojazdu. Należy tutaj zaznaczyć, że ruch globalny struktury wywołany eksplozją może nakładać się na ruch struktury przed eksplozją, na przykład na prędkość postępową pojazdu znajdującego się w ruchu w momencie najechania na minę. W przypadku znacznej składowej postępowej prędkości, przemieszczenie pojazdu nad eksplodującym ładunkiem wybuchowym może być na tyle duże, że impuls ciśnienia rozkłada się na większej powierzchni dna. Z punktu widzenia bezpieczeństwa jest to zjawisko korzystne, ponieważ zmniejsza koncentrację energii oraz lokalną deformację. Efekt ten nasila się wraz ze wzrostem głębokości zakopania ładunku, co przedłuża czas przekazywania energii. W przypadku detonacji powierzchniowej, lub dla ładunków zakopanych bardzo płytko, czas przekazywania energii na nadwozie jest zbyt krótki, aby prędkość pojazdu miała wpływ na obciążenie eksplozją powierzchni struktury.

Zagrożenie dla kończyn dolnych związane jest z drugą fazą, lokalną deformacją struktury. Obciążenie kończyn dolnych jest skutkiem ruchu pionowego podłogi, którego kluczowymi parametrami ze względu na zagrożenie kończyn dolnych jest prędkość pionowa oraz maksymalne ugięcie. Przykładowy wykres prędkości pionowej podłogi pojazdu podczas eksplozji pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Przykładowy wykres prędkości pionowej podłogi pojazdu podczas eksplozji miny [1]

Na rysunku widoczny jest duży skok prędkości podłogi w początkowej fazie obciążenia, który jest skutkiem deformacji plastycznej oraz sprężystej podłogi pojazdu (faza druga na rysunku 2). Po nim następuje seria sprężystych drgań podłogi wokół prędkości średniej odpowiadających globalnej, pionowej prędkości pojazdu (faza trzecia, rys. 2).

Podstawowymi parametrami wpływającym na ugięcie podłogi jest masa ładunku, odległość pomiędzy ładunkiem a dnem pojazdu, masa pojazdu oraz sztywność struktury pojazdu. O ile masa pojazdu ma zasadniczy wpływ na ruch globalny pojazdu (rysunek 2c), to sztywność w powiązaniu z masą określa wielkość lokalnej deformacji struktury (rysunek 2b). Zależność pomiędzy masą, sztywnością a zagrożeniem kończyn dolnych schematycznie przedstawiono na rysunku 4.

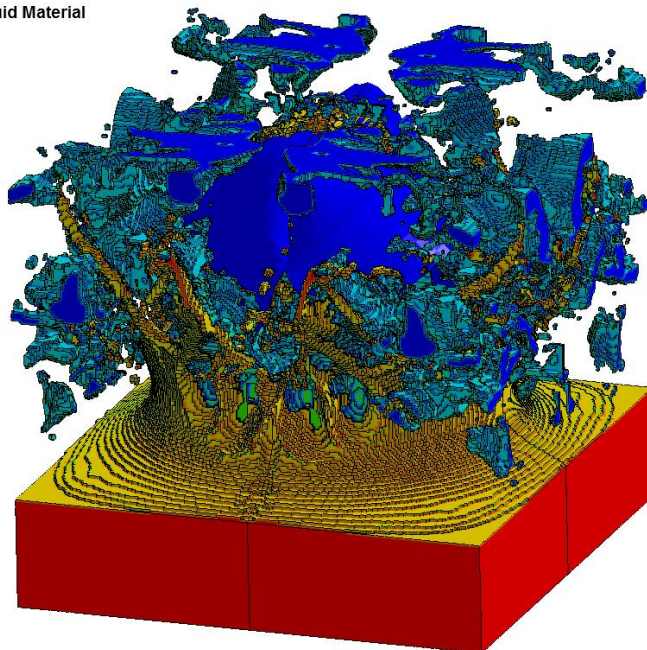
	mała masa ↓	duża masa ↓
mała sztywność →	duża prędkość globalna duże deformacje lokalne (HMMWV)	mała prędkość globalna duże deformacje lokalne (ciężki pojazd gaśnicowy)
duża sztywność →	duża prędkość globalna małe deformacje lokalne (opancerzony pojazd kołowy)	mała prędkość globalna małe deformacje lokalne (MRAP)

Rys. 4. Zależność pomiędzy masą i sztywnością pojazdu a zagrożeniem kończyn dolnych

Zastosowanie dodatkowej osłony pod pojazdem może zmniejszyć lokalną deformację, ale jednocześnie zmniejsza odległość od ładunku. Jest to szczególnie niekorzystne w pojazdach o małym prześwicie.

Ocena stopnia zagrożenia kończyn dolnych możliwa jest na drodze kosztownych testów poligonowych z użyciem manekinów badawczych [12]. Kryterium biomechanicznym jest w takim przypadku maksymalna siła osiowa w podudziu. Podobne testy można przeprowadzać na drodze symulacyjnej, jednak obliczenia tego typu są złożone i niezbyt dobrze nadają się do oceny pojazdu na etapie projektowania [4]. Pełna symulacja zagrożenia wymaga modelowania procesu eksplozji ładunku wybuchowego w gruncie, propagacji fali uderzeniowej wraz z produktami detonacji i wyrzuconym gruntem w powietrzu. Przykład symulacji detonacji ładunku 10 kg TNT w gruncie na głębokości 10 cm wykonanej z użyciem metody MM-ALE pokazano na rysunku 5.

Time = 0.0067998  
Contours of Dominant Fluid Material  
max IP. value  
min=1, at elem# 694294  
max=3, at elem# 699490



Rys. 5. Symulacja eksplozji ładunku wybuchowego zakopanego w podłożu z wykorzystaniem metody MM-ALE

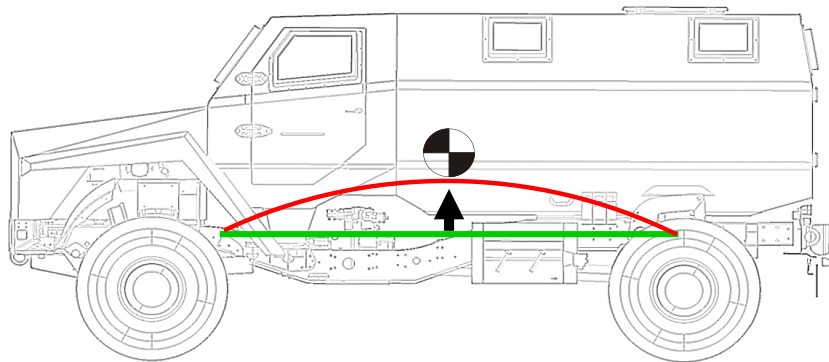
W dostępnej literaturze brak jest metody pozwalającej na ocenę lokalnej deformacji pojazdu w wyniku eksplozji miny lub IED pod pojazdem bez przeprowadzania pełnej symulacji eksplozji. Metoda taka, uwzględniająca kluczowe z punktu widzenia

bezpieczeństwa parametry całego systemu obejmującego detonujący ładunek oraz strukturę pojazdu, pozwoliłaby na wstępną ocenę pojazdu pod kątem tego typu zagrożeń.

### 3. Metoda

Deformacja lokalna dna pojazdu determinowana jest masą pojazdu oraz sztywnością dna w kierunku pionowym. Maksymalna siła działająca statycznie na dno pojazdu w danym punkcie ograniczona jest do siły powodującej oderwanie jednego lub dwóch kół od podłoża. Wynika z tego, że maksymalną siłę można wyrzucić naciskając na dno dokładnie pod środkiem ciężkości pojazdu, co przedstawiono schematycznie na rysunku 6. Jest to też jednocześnie miejsce uznawane za najbardziej niebezpieczny punkt detonacji pod pojazdem [12].

Powierzchnia, na którą działają produkty detonacji oraz wyrzucony eksplozją grunt, w większości przypadków jest położona w pewnej odległości od stóp pasażera. Może to wynikać z występowania podwójnej podłogi, zastosowania elastycznych mat separujących stopy od właściwej podłogi pojazdu lub z zastosowania dodatkowych osłon umieszczanych pod podłogą pojazdu.



Rys. 6. Schemat deformacji lokalnej dna pojazdu wywołanej eksplozją

Wraz ze wzrostem odchylenia kierunku padania fali na powierzchnię od kierunku prostopadłego, ciśnienie oraz impuls ciśnienia maleją. Związek pomiędzy impulsem ciśnienia padającego  $I_s$ , impulsem ciśnienia odbitego  $I_r$ , a kątem padania fali  $\theta$  można opisać w sposób podany w pracy [9]

$$I_{r,\theta} = I_r \cos^2(\theta) + I_s(1 + \cos(\theta) - 2 \cos^2(\theta)) \quad (2)$$

Impuls ciśnienia odbitego  $I_r$  działający na dno pojazdu może być opisany zależnością zdefiniowaną w [5], opartą na doświadczalnych badaniach powierzchniowych eksplozji ładunków wybuchowych. Wartość impulsu uzależniona jest od skalowanej odległości  $Z$  opisanej wzorem Hopkinsona-Cranza

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (3)$$

wiążącej odległość od środka ładunku wybuchowego  $R$  [m] z masą ładunku  $W$  [kg]. Zależność wartości impulsu ciśnienia padającego i odbitego od skalowanej odległości można opisać wzorem

$$I_{s,r} = \exp(A + B \ln(Z) + C \ln(Z)^2 + D \ln(Z)^3 + E \ln(Z)^4) W^{1/3} \quad (4)$$

gdzie  $Z$  wyrażono w  $[m/kg^{1/3}]$ , zaś  $I_s, I_r$  w  $[Pa \cdot s]$ . Wartości parametrów  $A, B, C, D$  i  $E$  dla impulsu ciśnienia padającego  $I_s$  podano w [10]. Wartości dla ciśnienia odbitego  $I_r$  wyznaczone na podstawie zależności zawartych w pracy [5]. Wartości liczbowe parametrów zestawiono w tabeli 1.

**Tabela 1. Wartości parametrów opisujących impuls ciśnienia padającego  $I_s$  i odbitego  $I_r$  w funkcji skalowanej odległości  $Z$  [10]**

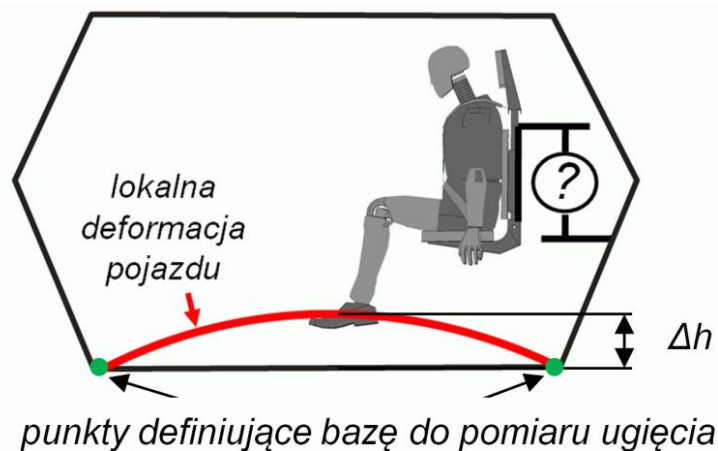
	$A$	$B$	$C$	$D$	$E$	Uwagi
$I_s$	5,522	1,117	0,6	-0,292	-0,087	dla $Z$ w zakresie 0,2÷0,96
$I_s$	5,466	-0,308	-1,464	1,362	-0,432	dla $Z$ w zakresie 0,96÷23,8
$I_r$	6,775	-1,346	0,102	-0,0112	0	dla $Z$ w zakresie 0,2÷100

Zdefiniujmy miarę zagrożenia dla kończyn dolnych jako parametr  $S$  proporcjonalny do ugięcia pionowego  $\Delta h$  powierzchni obciążonej ciśnieniem fali uderzeniowej do początkowej odległości  $h$  tej powierzchni od stóp pasażera. Współczynnikiem proporcjonalności jest tu impuls ciśnienia fali odbitej  $I_{r\theta}$  uwzględniający pochylenie powierzchni obciążonej ciśnieniem względem kierunku padania fali.

$$S = I_{r\theta} \frac{\Delta h}{h} \quad (5)$$

Parametr ten umożliwia ocenę zagrożenia wskutek lokalnej deformacji dna pojazdu dla różnych klas pojazdów bez konieczności przeprowadzania pełnych symulacji eksplozji. Uwzględnia on takie czynniki, jak prześwit pod pojazdem, masę ładunku, geometrię i sztywność dna pojazdu oraz początkową odległość stóp od miejsca uderzenia fali.

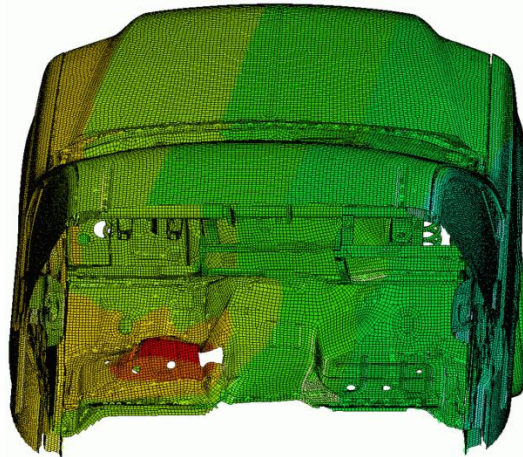
Próba statycznego ugięcia dna pojazdu w wybranych punktach powoduje sprężystą lub sprężysto-plastyczną deformację struktury pojazdu. Pomiar ugięcia statycznego  $\Delta h$  wymaga przyjęcia bazy pomiarowej związanej z pojazdem. Ze względu na fakt, że zagrożenie stóp związane jest z ruchem podłogi względem bryły nadwozia, jako baza do pomiaru ugięcia powinny zostać użyte najbliższe punkty o dużej sztywności w kierunku pionowym, np. dolne części ścian bocznych pojazdu. Sposób wykonania pomiaru pokazano schematycznie na rysunku 7.



**Rys. 7. Sposób pomiaru statycznego ugięcia dna pojazdu**

#### 4. Wyniki

Pomiar ugięcia statycznego można wykonać na pojeździe rzeczywistym lub za pomocą modelu numerycznego. Na rysunku 8 przedstawiono przykładowy pomiar sztywności pionowej dna pojazdu Ford F250. Ugięcie statyczne wynosi w tym wypadku 132 mm, następuje znaczna deformacja plastyczna płyty podłogowej.



Rys. 8. Lokalna deformacja statyczna pojazdu Ford F250 pod stopami kierowcy, maksymalne ugięcie statyczne (kolor czerwony) równe 132 mm, duże deformacje plastyczne

Wartości parametru  $S$  zostały wyznaczone dla kilku wybranych pojazdów. Obliczeń dokonano dla pojazdu typu pickup (Ford F250), dla pojazdu gaśnicowego o masie 33 Mg oraz opancerzonego pojazdu kołowego o masie 12,5 Mg w wersji z dodatkową osłoną umieszczoną pod rama nośną oraz bez osłony. Analizowane pojazdy przedstawiono na rysunku 9. Wyniki obliczeń z podstawowymi parametrami pojazdów zestawiono w tabeli 2.



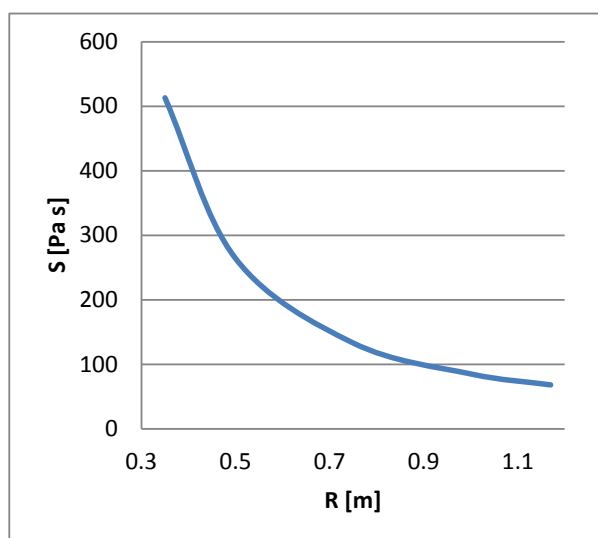
Rys. 9. Analizowane pojazdy

Tabela 2. Zestawienie wyników obliczeń dla wybranych pojazdów

typ pojazdu	pickup	gaśnicowy	kołowy	kołowy z osłoną
$M$ [Mg]	2,6	33	12,5	12,5
$\Delta h$ [mm]	132	7	3	11
$h_s$ [mm]	25	175	170	520
$R$ [m]	0,65	0,57	1,17	0,82
$W$ [kg]	0,5	6	10	10
$Z$ [m/kg <sup>1/3</sup> ]	0,65	0,31	0,54	0,38
$\theta$ [stopnie]	0	0	17	17
$S$ [Pa s]	<b>4735</b>	<b>332</b>	<b>68</b>	<b>139</b>

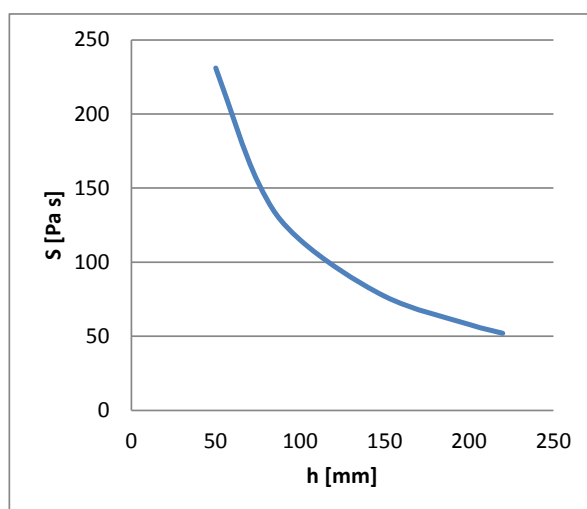
Obliczeń dokonano dla różnych mas ładunków. Wyniki wskazują, że detonacja ładunku 0,5 kg TNT pod pojazdem typu pickup stanowi znacznie większe zagrożenie niż detonacja 10 kg pod minoodpornym pojazdem kołowym. Pojazd gaśnicowy ze względu na dużą masę oraz płaskie dno o stosunkowo niewielkiej sztywności jest mniej odporny na detonację 6 kg TNT niż znacznie lżejszy kołowy pojazd o większym prześwicie. Wartość parametru  $S$  dla pojazdu kołowego z dodatkową osłoną w kształcie litery „V” jest wyższa, co jest skutkiem przyjęcia większego impulsu ciśnienia oraz małej sztywności osłony. Czynniki te są na tyle niekorzystne, że nie niweluje ich znacznie większa odległość obciążanej powierzchni dodatkowej osłony od stóp pasażera.

Na rysunku 10 pokazano wpływ zmiany prześwitu pod pojazdem na wartość parametru  $S$ . Widoczny jest bardzo duży wpływ prześwitu, zwłaszcza w zakresie poniżej 0,5 m charakterystycznym dla pojazdów gaśnicowych.



Rys. 10. Wpływ prześwitu  $R$  pod pojazdem kołowym na wartość parametru  $S$  dla ładunku 10 kg TNT i kąta pochylenia 17 stopni

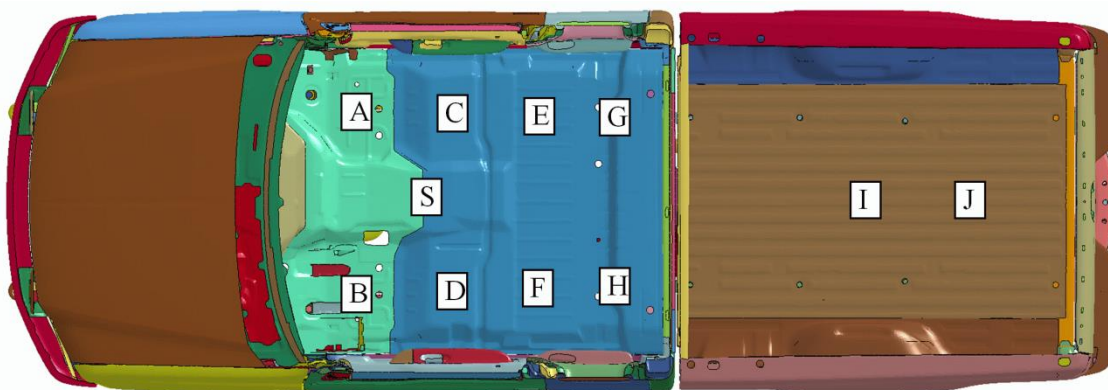
Na rysunku 11 pokazano wpływ odległości stóp od punktu uderzenia fali na wartość parametru  $S$ . W okolicy wartości 170 mm widoczny jest istotny wpływ zmiany odległości  $h$  na zagrożenie kończyn dolnych.



Rys. 11. Wpływ odległości  $h$  stóp od punktu uderzenia fali na wartość parametru  $S$  dla pojazdu kołowego, ładunku 10 kg TNT i kąta pochylenia 17 stopni



Przedstawiona metoda pozwala ocenić zagrożenie powodowane przez lokalną deformację dla różnych miejsc w obrębie tego samego pojazdu, np. zagrożenie dla poszczególnych pasażerów. W tym celu należy z użyciem opisanej wcześniej metody zmierzyć lokalną sztywność dna pod stopami poszczególnych osób. Przykład takiej analizy wykonanej w różnych punktach dla pojazdu Ford F250 pokazano na rysunku 12. Wartości parametru  $S$  dla detonacji ładunku 500 g TNT wyznaczone na podstawie pomiaru sztywności w wybranych punktach zestawiono w tabeli 3.



Rys. 12. Położenie punktów pomiaru lokalnego ugięcia dna, Ford F250.

Tabela 3. Wartości parametru  $S$  dla detonacji ładunku 500 g TNT pod pojazdem Ford F250, w nawiasach położenie punktów wg rysunku 12

lewa strona [mm]	środek [mm]	prawa strona [mm]	opis
4735 (B)	-	2475 (A)	stopy przód
	4232 (S)		środek masy pojazdu
2116 (D)	-	1721 (C)	siedziska przód
2690 (F)	-	3192 (E)	stopy tył
1542 (H)	-	1470 (G)	siedziska tył
-	1112 (I)	-	bagażnik
-	1040 (J)	-	bagażnik

Lokalne ugięcie, a co za tym idzie stopień zagrożenia, jest znacząco różny w różnych miejscach pojazdu. Pomimo największej siły obciążającej występującej pod środkiem ciężkości, wyższe wartości ugięcia wystąpiły pod stopami kierowcy, co jest skutkiem obecności w tym miejscu zmniejszających sztywność wycięć w płycie podłogowej. Rozkład deformacji dla tego przypadku pokazano na rysunku 8.

Przykład ten ilustruje zdolność metody do oceny konstrukcji pojazdu pod kątem odporności na lokalną deformację wskutek eksplozji pod pojazdem. Ocena może obejmować nie tylko pojazd jako całość, ale również poszczególne obszary konstrukcji.

## 5. Podsumowanie

Przedstawiona metoda pozwala ocenić sztywność projektowanej lub istniejącej konstrukcji pod kątem odporności na lokalną deformację spowodowaną eksplozją pod pojazdem. Parametr  $S$  opisujący w pewnym stopniu zagrożenie kończyn dolnych może być użyty do porównania odporności różnych pojazdów, co w przypadku innych metod wymaga wykonania pełnych analiz z symulacją eksplozji lub niezwykle kosztownych prób

poligonowych. Możliwość oceny konstrukcji na wczesnym etapie projektowania pozwala na zwiększenie strukturalnej odporności pojazdu na eksplozje. Dodatkową zaletą jest możliwość oceny odporności pojazdu w dowolnym miejscu, co pozwala oszacować zagrożenie kończyn dolnych dla każdego członka załogi oddzielnie.

W obecnej postaci metoda umożliwia tylko porównywanie stopnia zagrożenia pomiędzy różnymi pojazdami lub pomiędzy poszczególnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi nadwozia i osłon. Do bezpośredniej oceny zagrożenia konieczna jest analiza pełnego systemu pojazd-człowiek z wykorzystaniem kryteriów biomechanicznych.

## Literatura

1. Alem N.M., Strawn G.D. Evaluation of an Energy Absorbing Truck Seat for Increased Protection from Landmine Blasts, U.S. Army Research Laboratory, Report no. 96-06, 1996.
2. Iluk A. Metody numeryczne w procesie konstruowania terenowego pojazdu minoodpornego. *Górnictwo Odkrywkowe* 2010; 51: 320-324.
3. Iluk A. Selected aspects of the control of the human body motion in the vehicle subjected to the blast load. *IRCOBI Conference Proceedings, Dublin 2012*; 391–404.
4. Iluk A. Wybrane aspekty kształtowania odporności przeciwminowej terenowego pojazdu opancerzonego. *Zeszyty Naukowe - Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Łądowych im. gen. T. Kościuszki* 2010; 42; 109–120.
5. Kingery C.N. Airblast Parameters verses Distance for Hemispherical TNT Surface Burst, U.S. Army Aberdeen Proving Ground, Report no. 1344, 1999.
6. Ogorkiewicz R.M. Shaping up for the Fight: Vehicle Designs Take on Challenge of Mine Warfare. *Jane's International Defence Review* 2009.
7. Ragel B., Allred D., Brevard S., Davis R., Frank, E. Spine: Fractures of the Thoracolumbar Spine Sustained by Soldiers in Vehicles Attacked by Improvised Explosive Devices. *Spine* 2009; 34:2400–2405.
8. Ramasamy A., Masouros S., Newell N. In-vehicle extremity injuries from improvised explosive devices: current and future foci. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* 2011; 366:160–70.
9. Randers-Pehrson G. Airblast Loading Model for DYNA2D and DYNA3D, USA Army Research Laboratory, Technical Report no. 1310, 1997.
10. Swisdak M. Simplified Kingery airblast calculations, Naval Surface Warfare Center, Twenty-Sixth DOD Explosives Safety Seminar, 1994.
11. Vališ D., Vintř Z., Malach J. Selected aspects of physical structures vulnerability – state-of-the-art. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2012; 14:189–194.
12. North Atlantic Treaty Organization, AEP-55: Procedures for Evaluating the Protection Level of Logistic and Light Armoured Vehicles, Volume 2 Edition 1, 2006.