

# BADANIA WYBRANYCH ASPEKTÓW BEZPIECZEŃSTWA BIERNEGO W POJAZDACH NARAŻONYCH NA EKSPLOZJE MIN

ARTUR ILUK<sup>1</sup>

Politechnika Wroclawska

## Streszczenie

Obciążenie pojazdu eksplozją, zwłaszcza pod eksplozją ładunku wybuchowego pod pojazdem (ang. Under Body Blast – UBB) jest specyficznym rodzajem zagrożenia bezpieczeństwa pasażerów. Ryzyko zranienia spowodowane przez wielką ilość energii przekazanej w krótkim czasie konstrukcji pojazdu i ciału pasażera. W artykule omówiono podobieństwa i różnice kolizji drogowych i obciążenia pojazdu eksplozją. Dynamiczne obciążenie ciała pasażera zostało przedstawione i oceniane przy użyciu biomechanicznego kryterium Dynamic Response Index (DRIZ). Intensywność obciążenia ciała mierzone za pomocą modelu DRIZ w kilku punktach na obciążanej konstrukcji pojazdu i na manekinie symulującym ciało pasażera. Przedstawiono przykładowe wyniki symulacji numerycznych obciążenia systemu pojazd-fotel-pasażer eksplozją.

**Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo bierne, detonacja pod pojazdem, symulacje numeryczne, MES

## 1. Wprowadzenie

Bezpieczeństwo bierne pojęciem używanym w kontekście wypadków drogowych. Takie wypadki są połączone z rozpraszaniem znacznej energii w krótkim czasie, bezpieczeństwo pasażerów ocenia się z wykorzystaniem kryteriów biomechanicznych. W przypadku obciążenia pojazdu eksplozją, najbardziej niebezpiecznym przypadkiem jest eksplozja pod centrum pojazdu – Under Body Blast (UBB), kiedy pojazd jest obciążony w przybliżeniu pod swoim środkiem ciężkości przez podmuch eksplozji miny lub improwizowanego ładunku wybuchowego (ang. Improvised Explosive Device – IED). Cały proces obciążania wykazuje podobieństwo do kolizji drogowego (rys. 1).

Energia wybuchu jest szybko uwalniana w procesie detonacji. Dla ładunków zakopanych w gruncie, gazowe produkty detonacji przekazują energię do podłoża. Wyrzucona gleba wraz z gazowymi produktami detonacji oraz poruszającą się w powietrzu falą uderzeniową oddziałują na dno pojazdu (rys. 1).

<sup>1</sup> Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, ul. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław,  
e-mail: artur.iluk@pwr.edu.pl, tel 713 202 847

Oddziaływanie na pasażerów są również podobne do kolizji drogowej. W wyniku szybkiej zmiany prędkości pojazdu, ciało ludzkie jest gwałtownie przyspieszane, co wiąże się ze znacznym ryzykiem urazów lub nawet śmierci. Istnieją jednakże istotne różnice między kolizją drogową i eksplozją pod pojazdem. Pierwsza z nich to kierunek uderzenia, który działa w przypadku wybuchu generalnie w kierunku pionowym, dość nietypowym dla klasycznych kolizji drogowych lub zderzeń pojazdów wojskowego z różnego typu barierami [1]. Wskutek tej różnicy mechanizmy urazów i kryteria biomechaniczne ich oceny są również różne.



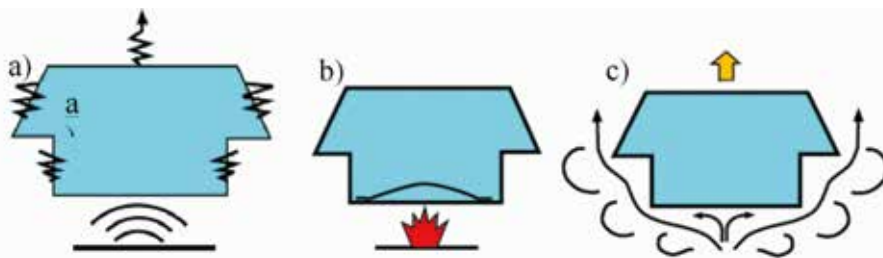
**Rys. 1. Test zderzeniowy samochodu osobowego (z lewej), test eksplozji pod pojazdem opancerzonym (z prawej)**

Inne różnice dotyczą samego procesu przenoszenia energii, opisanego poniżej. Pomimo tych różnic, środki przeciwdziałania i minimalizacji ryzyka uszkodzenia ciała pasażera, stosowane w przypadku eksplozji pod pojazdem, mieszczą się w definicji bezpieczeństwa biernego, które można określić jako zespół środków stosowanych w celu ograniczenia skutków wypadku.

## 2. Proces transferu energii eksplozji

Proces przenoszenia energii można w przypadku eksplozji pod pojazdem podzielić na trzy fazy, przedstawione na rysunku 2. W pierwszej fazie po uderzeniu fali, produktów detonacji i wyrzuconego gruntu, fale sprężyste rozchodzą się z prędkością dźwięku w konstrukcji pojazdu, czego wynikiem są wibracje o dużej częstotliwości i amplitudzie. W powodu wysokiej prędkości propagacji fal sprężystych, czas trwania tej fazy wynosi kilka milisekund [2].

W drugiej fazie następuje deformacja dna pojazdu w wyniku odkształcenia plastycznego i drgań sprężystych w kierunku prostopadłym do płaszczyzny podłogi pojazdu. Etap ten wiąże się z ryzykiem uszkodzenia dolnych kończyn. Ostatnim etapem procesu jest globalny ruch całego pojazdu. Część przekazanej pojazdowi energii eksplozji jest przekształcana w energię kinetyczną pojazdu. Faza ta jest związana z ryzykiem uszkodzenia kręgosłupa wskutek przyspieszenia pionowego siedziska.



Rys. 2. Fazy procesu przekazywania energii po eksplozji pod pojazdem: propagacja fali sprężystej, b) lokalne odkształcenia dna c) globalny ruch pojazdu [3]

Różnica procesów transferu energii pomiędzy przypadkiem kolizji drogowej i obciążeniu eksplozją polega na sposobie przekazywania energii. W przypadku kolizji drogowej, kiedy masy obu pojazdów są zwykle tego samego rzędu wielkości, źródłem energii jest różnica energii kinetycznej uderzającego i uderzanego pojazdu. Różnica ta generuje pewną określoną ilość energii, która jest rozpraszana głównie poprzez proces plastycznego odkształcenia struktury obu obiektów.

Oddziaływanie fali uderzeniowej może być traktowane jako elastyczne oddziaływanie bardzo szybkiego obiektu o niewielkiej masie. Prędkość fali uderzeniowej w momencie uderzenia w pojazd może osiągnąć wartość kilku Machów. Masa ładunku wybuchowego odpowiadająca maksymalnemu, czwartemu poziomowi odporności według porozumienia standaryzacyjnego NATO STANAG 4569, wynosi 10 kg TNT [4]. Energia na wejściu procesu jest praktycznie nieograniczona, ponieważ w przypadku pojazdów minoodpornych, tylko kilka procent całkowitej energii chemicznej, uwolnionej w procesie detonacji, przekazywane jest konstrukcji pojazdu, pozostała część ulega rozproszeniu w otoczeniu. Ilość energii, która przekazana zostanie na obciążany pojazd nie jest w tym przypadku stała, może zmieniać się w szerokim zakresie, w zależności od masy pojazdu i geometrii jego dolnej części.

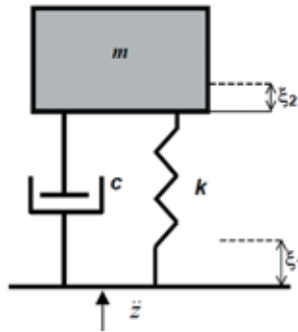
### 3. Kryteria biomechaniczne

Do oceny systemów bezpieczeństwa biernego, a w szczególności ryzyka uszkodzenia ciała, powszechnie stosowanym podejściem jest wykorzystanie kryteriów biomechanicznych. Do oceny zagrożenia eksplozją, podobnie jak w przypadku kolizji drogowych, uszkodzenia pojazdów nie są brane pod uwagę, oprócz wymogu zachowania integralności korpusu pojazdu. Utrata tej integralności mogłaby spowodować przedostawanie się produktów detonacji i fali uderzeniowej do wnętrza pojazdu.

Ze względu na inny kierunek działania obciążenia, stosowane kryteria są inne niż w przypadku kolizji drogowej. Obecnie stosowane kryteria są opisane w porozumieniu standaryzacyjnym NATO STANAG 4569, załącznik B [4].

Podstawowym zagrożeniem jest uraz kręgosłupa, ryzyko jego uszkodzenia jest oceniane za pomocą odpowiednich kryteriów biomechanicznych. Jak opisano w pracy [5],

najlepszym dostępnym obecnie modelem do oceny ryzyka uszkodzenia kręgosłupa piersiowo-lędźwiowego jest Dynamic Response Index (DRIZ) wprowadzony przez Stech'a i Payne'a [6]. Model ten został opracowany na potrzeby oceny ryzyka obrażeń podczas katapultowania pilotów samolotów. Podobny kierunek i profil obciążenia działającego na organizm człowieka umożliwi przyjęcie tego modelu do oceny skutków obciążenia eksplozją ładunku wybuchowego pod pojazdem. Ocena odpowiedzi organizmu pasażera na obciążenie dynamiczne opiera się na prostym układzie masa-sprężyna o jednym stopniu swobody, pokazanym na rysunku 3. Wskaźnik odpowiedzi dynamicznej, obliczany na podstawie znajomości przyspieszenia pionowego siedziska, opisano jako DRIZ.



Rys. 3. Schemat modelu DRIZ [5].

Równanie ruchu dla tego modelu to:

$$\ddot{z}(t) = \ddot{\delta} + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot \dot{\delta} + \omega_n^2 \cdot \delta \quad (1)$$

gdzie:

$\ddot{z}(t)$  – przyspieszenie pionowe siedziska

$\delta$  – kompresja systemu,  $\delta = \xi_1 - \xi_2$

$\zeta$  – współczynnik tłumienia,  $\zeta = \frac{c}{2 \cdot m \cdot \omega_n}$

$\omega_n$  – częstość drgań własnych układu,  $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$

Wartość DRIZ jest obliczana jako funkcja maksymalnej kompresji układu w czasie pełnego procesu obciążenia, częstości drgań i przyspieszenia ziemskie  $g$ :

$$DRIZ = \frac{\omega_n \cdot \delta_{max}}{g} \quad (2)$$

Wartości współczynnika tłumienia  $\zeta = 0.224$  i częstości drgań  $\omega_n = 52.9$  rad/s zostały wybrane przez Stecha do modelu jako wartości dla reprezentatywnej populacji pilotów

Air Force o średniej wieku 27,9 lat [6]. Wartość parametru DR<sub>Lz</sub> na poziomie 17,7 odnosi się do 10% ryzyka uszkodzenia kręgosłupa na poziomie drugim lub wyższym według skali AIS (ang. Abbreviated Injury Scale) zdefiniowanej w pracy [7]. Kryterium DR<sub>Lz</sub>, stosowane do testów poligonowych, jest przeznaczone do zastosowania z antropomorficznym manekinem pomiarowym (ang. Antropomorphic Test Device – ATD) typu Hybrid III. Wejściem do modelu jest przyspieszenie pionowe mierzone czujnikiem umieszczonym w okolicy mednicy manekina.

Urazy pasażerów pojazdów poddanych obciążeniu eksplozją analizowano w licznych pracach. Obciążenie kręgosłupa rozpatrywano w pracach [8] i [9] przy użyciu programu do obliczeń dynamicznych metodą elementów LS-DYNA [10] i programu MADYMO. Przekazywanie energii od fali uderzeniowej do konstrukcji pojazdu przedstawiono w [11], [12], [13]. Stwierdzono, że dla różnych profili obciążenia przyłożonego do podstawy siedzenia, głównym parametrem wpływającym na uraz kręgosłupa jest maksymalna prędkość podstawy przyspieszanego siedzenia.

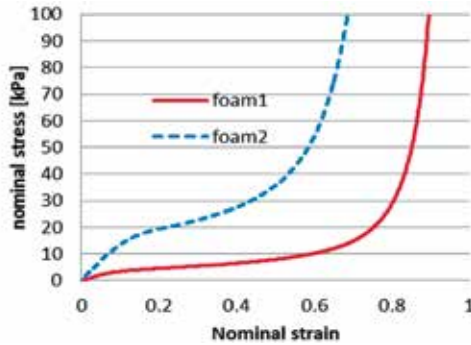
Drugim ważnym zagrożeniem zdrowia pasażera jest uraz kończyn dolnych wywołany uderzeniem w stopy podłogi deformującej się pod działaniem eksplozji. W tym przypadku, kryterium biomechaniczne zdefiniowano jako maksymalną siłę osiową w kości podudzia, równą 5,4 kN. Wartość ta związana jest z 10% ryzykiem uszkodzenia kończyny dolnej na poziomie AIS2+ [5]. Kryterium to wykorzystuje się z użyciem czujników siły zamontowanych w kończynach dolnych ATD.

## 4. Symulacje i wyniki

Badania numeryczne biernego bezpieczeństwa dla obciążenia pojazdu eksplozją przeprowadzono z użyciem programu LS-DYNA opartym metodzie jawnego całkowania równań ruchu [10]. Struktura 12,5 t pojazdu opancerzonego zamodelowano elementami powłokowymi, i bezpośrednio obciążono ciśnieniem fali uderzeniowej. Zmienne w czasie i przestrzeni pole ciśnienia opisano modelem obciążenia Kingery-Bulmash'a. Model ten uwzględnia takie parametry jak masa ładunku, odległość od obciążanej powierzchni oraz kąta padania fali. Program LS-DYNA umożliwia zdefiniowanie tego typu obciążenia z użyciem funkcji \*LOAD\_BLAST\_ENHANCED. W rzeczywistości ciśnienie obciążające pojazd silnie zależy od głębokości zakopania ładunku oraz kształtu przestrzeni pod pojazdem [9, 11], dlatego pole ciśnienia wykorzystane w symulacji skalibrowano na drodze pełnoskalowych testów poligonowych z użyciem makiet odwzorowujących kształt dna pojazdu. Proces kalibracji został opisany w pracy [9].

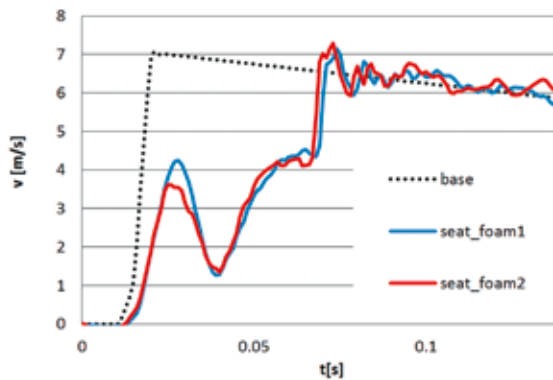
W pojeździe umieszczono model fotela przeciwybuchowego. Fotel wyposażony jest w 5-punktowe pasy bezpieczeństwa oraz układ ograniczający przyspieszenia pionowe działające na pasażera oparty na pianie aluminiowej, materiale o doskonałych właściwościach pochłaniania energii [14]. Model systemu fotel-pasażer sprawdzono w pierwszej fazie symulacji oddzielnie, używając uproszczonych profili przyspieszenia pionowego. Zbadany został wpływ sztywności pianek poduszki siedziska na obciążenie kręgosłupa pasażera. Symulacje przeprowadzono z użyciem pianek o dwóch sztywnościach. Użyte pianki

są piankami stosowanych w produkcji siedzisk do pojazdów wojskowych. Charakterystyki mechaniczne badanych pianek zmierzono w teście ściskania, wyniki przedstawiono na rysunku 4.

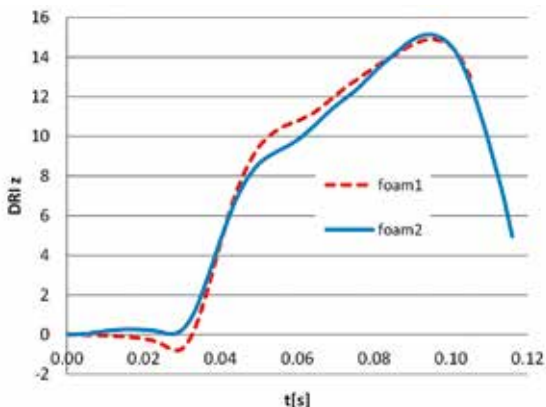


Rys. 4. Charakterystyka sztywności dwóch typów pianek siedziska wykorzystanych w symulacji

Wyniki symulacji z piankami o różnej sztywności wykazały brak istotnego wpływu na ruch ciała człowieka oraz wartości parametru DR<sub>1z</sub>. Uzyskane prędkości pionowe ciała oraz profile DR<sub>1z</sub> przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Przy wysokim poziomie przyspieszenia, siły generowane w trakcie kompresji pianki są zbyt małe, aby w znaczącym stopniu przyspieszyć ciało przed kontaktem ze stalową strukturą fotela. Użycie z fotela pianki poduszki o znacząco wyższej sztywności wpłynęłoby bardzo negatywnie na komfort pasażerów.



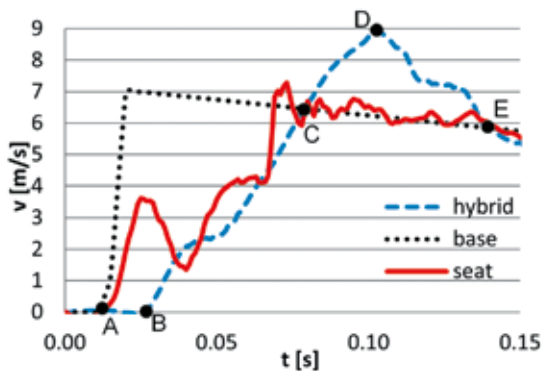
Rys. 5. Prędkość pionowa podstawy fotela (base) i tłumionej części fotela dla dwóch rodzajów pianki siedziska



Rys. 6. Wpływ sztywności analizowanych pianek poduszki siedziska na wartości parametru DRIZ

Na rysunku 7 przedstawiono profile prędkości pionowej pojazdu, siedziska i modelu pasażera. Prędkość pionowa manekina Hybrid III mierzona była w okolicy miednicy. Ciało pasażera jest przyspieszane, jednak zmiana jego prędkości nie wynika tylko z działania układu tłumiącego energię wybuchu. Duży wpływ na profil prędkości ma podatność struktury fotela i poduszki siedziska.

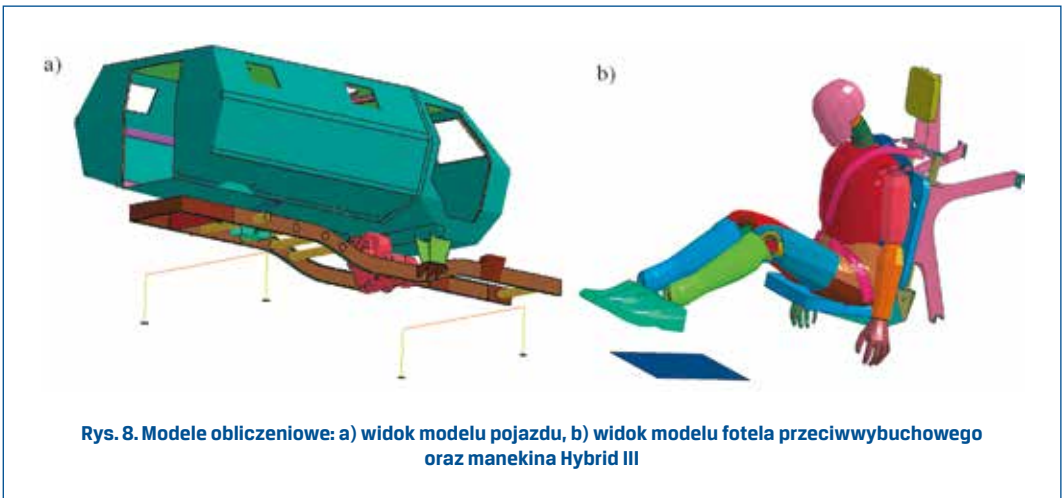
Fala odkształcenia struktury pojazdu dociera do postawy fotela w punkcie A. W punkcie B zakończona jest kompresja poduszki siedziska i na ciało pasażera zaczyna wywierać siłę struktura nośna fotela, rozpoczyna się przyspieszanie pasażera. W punkcie C, prędkość ruchomej części fotela osiąga prędkość podstawy fotela. Energia odkształcenia sprężystego zgromadzona w konstrukcji fotela jest uwalniana i nadal przyspiesza ciało pasażera w kierunku dachu. W punkcie D pasy bezpieczeństwa zatrzymują ruch ciała, zaś w punkcie E proces tłumienia jest zakończony i ciało podąża za ruchem pojazdu.



Rys. 7. Prędkość pionowa podstawy fotela (base), siedziska (seat) i modelu pasażera (hybrid) dla zmiany prędkości pionowej pojazdu o 7 m/s i siły tłumiącej 10 kN

Prędkość ciała pasażera w punkcie D jest 35% większa niż prędkość pojazdu. Podkreśla to rolę pasów bezpieczeństwa, które powinny zatrzymać ciało w ruchu w górę, aby zminimalizować ryzyko urazów głowy i szyi. Ponadto, wskutek kompresji poduszki siedziiska między punktami A i B powstaje luz pomiędzy ciałem i pasami bezpieczeństwa, co zwiększa z kolei odległość pomiędzy punktami C i D. Ciało jest zatrzymywane później, co zwiększa ryzyko uderzenia głowy w dach pojazdu.

Dla pełnej symulacji wykorzystano model numeryczny zawierający pojazd i fotel przeciwybuchowy. Widok modelu pojazdu został przedstawiony na rysunku 8a.



**Rys. 8. Modele obliczeniowe: a) widok modelu pojazdu, b) widok modelu fotela przeciwybuchowego oraz manekina Hybrid III**

Ostatnim elementem modelu był odkształcalny model manekina pomiarowego Hybrid III, wyposażony w czujniki przyspieszenia i siły do pomiaru parametrów biomechanicznych podczas wybuchu. Widok modelu manekina w fotelu tłumiącym energię wybuchu pokazano na rysunku 8b.

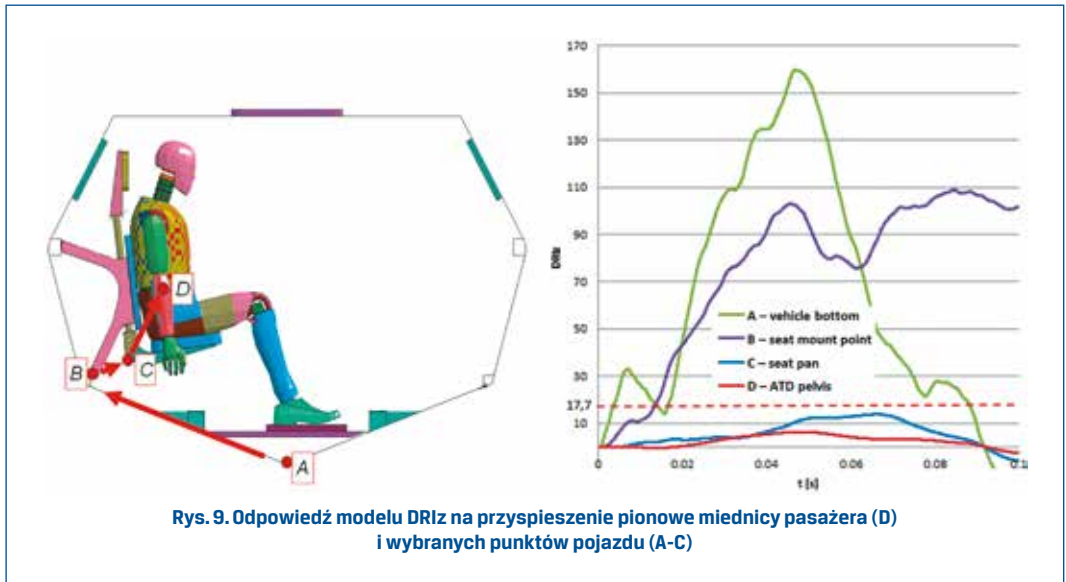
Wyniki symulacji dostarczyły użytecznych informacji, niezbędnych do optymalizacji kształtu i struktury pojazdu. Z punktu widzenia biomechaniki, pełna symulacja eksplozji pod pojazdem pozwoliła na wyznaczenie profili przyspieszenia podstawy fotela. Przyspieszenia mierzone na miednicy manekina oceniano w wykorzystaniu modelu DR1z.

W analizowanych przypadkach przyspieszenie miednicy było stosunkowo niskie, ze względu na korzystną budowę pojazdu. Osłona przeciwybuchowa umieszczona jest w nim nie pod ramą nośną, lecz nad nią, co zwiększa odległość od punktu detonacji i minimalizuje ilość energii, jaką wybuch przekazuje pojazdowi. Porównanie obu rozwiązań zostało omówione w pracy [9].

Sam profil przyspieszenia, zwłaszcza maksymalne przyspieszenie nie może być stosowany do oceny ryzyka, ponieważ ryzyko obrażeń silnie zależy od czasu trwania obciążenia. Ponadto profil przyspieszenia pojazdu wskutek wzbudzenia przy uderzeniu fali drgań w bardzo szerokim paśmie częstotliwości, jest trudny do oceny. Zamiast klasycznego



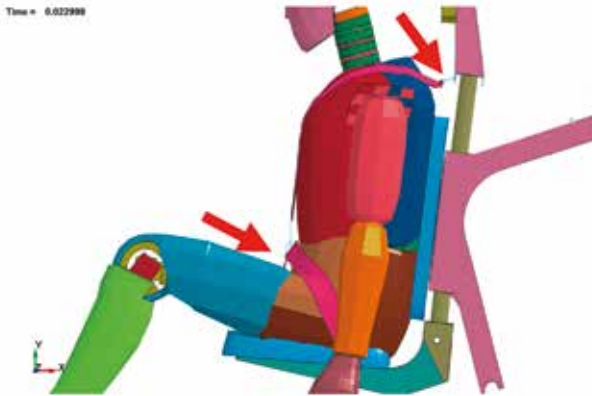
podejścia polegającego na filtrowaniu sygnału przyspieszenia z użyciem filtra dolnoprzepustowego, do oceny zmian przyspieszenia na drodze pomiędzy punktem uderzenia fali, a ciałem pasażera, zastosowano to samo narzędzie, które jest stosowane jako biomechaniczne kryterium oceny zagrożenia – model DR1z. Działanie tego modelu jest w istocie zbliżone do działania filtra dolnoprzepustowego, jednak dodatkowo uwzględnia on dynamikę ciała ludzkiego.



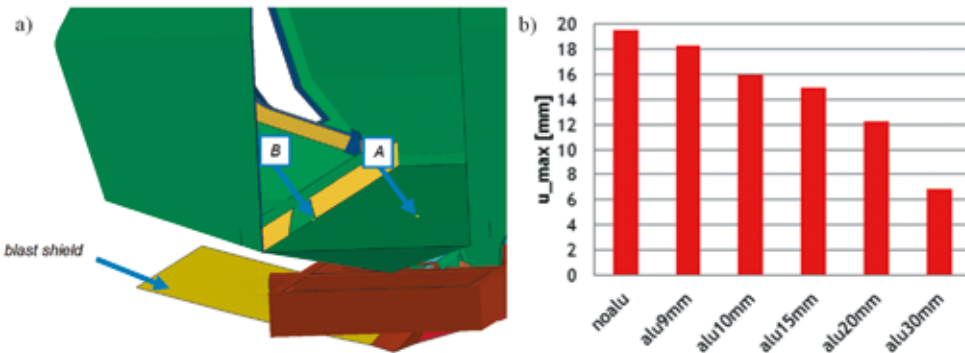
Rys. 9. Odpowiedź modelu DR1z na przyspieszenie pionowe miednicy pasażera (D) i wybranych punktów pojazdu (A-C)

Na rysunku 9 pokazano reakcje DR1z modelu na pionowe przyspieszenia w wybranych punktach pojazdu i na miednicy pasażera. Podczas transferu energii w konstrukcji pojazdu, profil DR1z jest silnie spłaszczony, co odpowiada obrazuje rozpraszanie energii. Najbardziej znaczący spadek poziomu DR1z jest widoczny pomiędzy punktem B (punkt montowania fotela) i C (siedzisko fotela) w działania urządzenia tłumiącego energię wybuchu, zamontowanego w konstrukcji fotela. Dodatkowe tłumienie między punktami C i D (miednica pasażera) jest efektem podatności poduszki siedzenia i elastyczności struktury manekina Hybrid III. Końcowy poziom DR1z (punkt D) stosowany jako kryterium biomechaniczne uszkodzenia kręgosłupa jest znacznie poniżej poziomu 17,7 odpowiadającemu 10% ryzyku zranienia typu AIS 2+.

W symulacji pełnego układu pojazd-fotel-pasażer, podobnie jak w symulacji uproszczonego układu fotel-pasażer, zaobserwowano zjawisko luzowania się pasów bezpieczeństwa. Pomimo dokładnego dopasowania pasów, po początkowym uderzeniu, bezwładność manekina powodowała pełną kompresję poduszki siedziska. W rezultacie, pasy barkowe i biodrowe były luzowane (rys. 10). Efekt ten wskazuje, wskazane byłoby stosowanie napinaczy pasów bezpieczeństwa w celu utrzymania pasażera w odpowiedniej pozycji i uniknięcia powstawania luzów. Pomimo pionowego kierunku obciążenia, napinacze w przypadku eksplozji pod pojazdem mogą być równie istotne, jak w wypadkach drogowych [15].



Rys. 10. Luzy w pasach bezpieczeństwa powstające w wyniku ściskania poduszki siedziska podczas wybuchu



Rys. 11. Wyniki symulacji numerycznej: a) punkty wykorzystane do pomiaru ugięcia podłogi, b) wpływ grubości osłony przeciwybuchowej na ugięcia płyty podłogi

Sztywność struktury płyty podłogowej ma znaczący wpływ na obciążenie dolnych kończyn [5]. Po uderzeniu fali w pojazd, podłoga zaczyna drgać. Symulacje numeryczne pozwalają na przeanalizowanie różnych konfiguracji konstrukcji podłogi oraz dodatkowe osłony umieszczone między dnem pojazdu a punktem detonacji. Przykładowe wyniki takiej analizy dla przeciwybuchowych osłon wykonanych ze stopu aluminium o różnej grubości przedstawiono na rysunku 11b. Ugięcie maksymalne  $u_{max}$  mierzono jako maksymalne względne przemieszczenie punktu lokalizacji stóp pasażera (punkt A, rys 11a) względem punktu mocowania fotela (punkt B, rys. 11a).

Wyniki symulacji zastosowano w procesie projektowania konstrukcji opancerzonego pojazdu przedstawionego na rysunku 12. Struktura pojazdu oraz konstrukcja foteli przeciwybuchowych zostały opracowane z wykorzystaniem przedstawionej metodologii. Sztywność oraz parametry układu tłumiącego fotela zostały dostosowane do sztywności pojazdu.



**Rys. 12.** Opancerzony pojazd GermaZ G-10 o zwiększonej odporności na eksplozje min (po lewej) i prototyp fotela tłumiącego energię wybuchu (po prawej)



**Rys. 13.** Badanie odporności pojazdu GermaZ G10 i bezpieczeństwa pasażerów w testach poligonowych

Poziom bezpieczeństwa biernego załogi oraz odporności struktury samego pojazdu na eksplozje został zweryfikowany eksperymentalnie. Przeprowadzono serię testów poligonowych z wykorzystaniem ładunków o masie odpowiadającej najwyższemu, IV poziomowi zabezpieczenia przeciwwinowego według STANAG 4569 [4, 16]. Ładunki detonowano w różnych miejscach pod pojazdem. Przykładowy widok pojazdu podczas testu przedstawiono na rysunku 13. Wyniki testów potwierdziły zachowanie integralności struktury pojazdu oraz poprawne działanie fotela przeciwwybuchowego.

## 5. Wnioski

Bezpieczeństwo bierne w przypadku eksplozji pod pojazdem zostało przeanalizowane na drodze symulacji numerycznych. Podczas obciążenia warunki są zbliżone do warunków kolizji drogowych, występują jednak różnice w kierunku działania obciążenia, oraz w konsekwencji w używanych do oceny zagrożenia kryteriach biomechanicznych.

Największym wyzwaniem w modelowaniu jest wiarygodne określenie obciążenia wybuchem. Proces detonacji materiału wybuchowego, zwłaszcza dla ładunków umieszczonych w gruncie, w znacznie bardziej skomplikowany niż prosty transfer energii kinetycznej w przypadku kolizji drogowej. W pracy wykorzystano model obciążenia Kingery-Bulmash'a kalibrowany z wykorzystaniem pełnoskalowych testów poligonowych.

Elastyczność modelu numerycznego pozwala sprawdzić wielu aspektów bezpieczeństwa biernego, takich jak wytrzymałość i integralność struktury pojazdu, lub skuteczność tłumiących wybuch foteli współpracujących z odkształcanym energią eksplozji pojazdem. Oprócz standardowego sprawdzenia z użyciem kryteriów biomechanicznych określonych w STANAG 4569 załącznik B, możliwa jest szczegółowa analiza całego procesu przyspieszenia ciała pasażera, pracy konstrukcji fotela oraz identyfikacja istotnych z punktu widzenia bezpieczeństwa zjawisk. Ciekawym wynikiem symulacji eksplozji pod pojazdem jest uwypuklenie znaczenie napięcia pasów bezpieczeństwa. Brak napinacza pasów bezpieczeństwa prowadzi, w wyniku ściskania poduszki siedziska, do wytworzenia luzów, które mają niekorzystny wpływ na ruch ciała. Luzy te zwiększają ryzyko uderzenia głową w dach pojazdu, co w przypadku pojazdów wojskowych o ograniczonej wysokości wnętrza jest zjawiskiem bardzo niebezpiecznym.

Wykorzystanie symulacji numerycznych jest bardzo przydatne w procesie projektowania pojazdów zagrożonych eksplozjami min i improwizowanych ładunków wybuchowych oraz w ocenie bezpieczeństwa biernego pasażerów tych pojazdów. Warunkiem koniecznym jest doświadczalna weryfikacja modeli obliczeniowych. Korzystanie z tego narzędzia może znacznie zmniejszyć koszty badań eksperymentalnych.

## Literatura

- [1] Hryciów Z., Borkowski W., Rybak P., Wysocki J., Wiśniewski A.: *Experimental researches of safety of armoured personel carrier crew during collision with obstacle*, Arch. Automot. Eng. Motoryz., vol. 61, no. 3, 2013.
- [2] Saska P., Krzystała E., Mężyk A.: *An analysis of an explosive shock wave impact onto military vehicles of contemporary warfare.*: J. KONES Powertrain Transp., vol. 18, no. 1, 2011.
- [3] Ogorkiewicz R. M.: *Shaping up for the Fight: Vehicle Designs Take on Challenge of Mine Warfare.*: Jane's International Defence Review, Coulsdon, pp. 60-65, 2009.
- [4] NATO, STANAG 4569: *Protection Levels for Occupants of Logistic and Light Armoured Vehicles*, Ed. 1," 2004.
- [5] Research and Technology Organisation of NATO, Technical Report TR-HFM-090, *Test Methodology for Protection of Vehicle Occupants against Anti-Vehicular Landmine Effects*, 2007.
- [6] Payne P. R., Stech E. L., *Dynamic Models of the Human Body*, AMRL-TR-66-157, Wright-Patterson Air Force Base, 1969.
- [7] Gennarelli T.A., Wodzin E., *The Abbreviated Injury Scale*, Association for the Advancement of Automotive Medicine Publisher, Barrington, 2005.
- [8] Kendale A., Americas T., Jategaonkar R., Shkoukani M., *Study of occupant responses in a mine blast using MADYMO*, Model. Simulation, Test. Valid. Symp., pp. 1-13, 2009.
- [9] Iluk A.: *Porównanie dwóch koncepcji pojazdu minoodpornego opartego na komercyjnym podwoziu*, Biul. WAT, vol. 59, no. 4, pp. 281-294, 2010.
- [10] Hallquist J. O., *LS-DYNA theory manual*. Livermore Software Technology Corporation, 2006, ISBN 0-9778540-0-0
- [11] Barnat W.: *Experimental and numerical study of influence of incidence angle of shock wave created by explosive charge on the steel plate*, Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci., vol. 62, no. 1, Jan. 2014.
- [12] Toussaint G.: Durocher, R. *Finite element simulation using SPH particles as loading on typical light armoured vehicles*, 10<sup>th</sup> International LS-DYNA Users Conference, 2008.
- [13] Baranowski P., Małachowski J.: *Numerical investigations of terrain vehicle tire subjected to blast wave*, Journal of Kones Powertrain and Transport, 18 (1), pp. 23-30, 2011.
- [14] Iluk A.: *Global stability of an aluminum foam stand-alone energy absorber*, Arch. Civ. Mech. Eng., vol. 13, no. 2, pp. 137-143, 2013.
- [15] Żuchowski A., Wicher J.: *Influence of the pre-tightening of seat belts on the loads acting on rear seat occupants during a frontal collision.*: Arch. Automot. Eng. Motoryz., vol. 60, no. 2, 2013.
- [16] *Procedures for Evaluating the Protection Level of Logistic and Light Armoured Vehicles*, AEP-55 Volume 2 Edition 1, 2006.

