

**Sonia FALANA<sup>1</sup>, Karolina PIETROWSKA<sup>1</sup>, Kamil JOSZKO<sup>2</sup>, Wojciech WOLAŃSKI<sup>2</sup>**

Koło Naukowe „BIOKREATYWNI”, Politechnika Śląska, Zabrze  
Katedra Biomechatroniki, Politechnika Śląska, Zabrze

## **ANALIZA BEZPIECZEŃSTWA UCZESTNIKÓW WYPADKU DROGOWEGO**

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono analizę bezpieczeństwa pasażerów samochodu osobowego podczas zderzenia czołowego. Badania modelowe wykonano z wykorzystaniem oprogramowania MADYMO oraz modeli manekinów: osoby dorosłej (HYBRID III) oraz 6-letniego dziecka (PO6). Przeprowadzone symulacje numeryczne obejmowały różne warianty i konfiguracje mocowań pasów bezpieczeństwa. Ocenę skuteczności działania systemów bezpieczeństwa przeprowadzono na podstawie wyznaczonych parametrów kinematycznych i dynamicznych jak np. przyspieszenia głowy, momentów sił, a także kryteriów urazowości (HIC, NIC oraz  $N_{ij}$ ). Otrzymane wyniki wykazały, że im większa liczba mocowań pasów bezpieczeństwa tym mniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia poważnych obrażeń podczas wypadku drogowego.

**Słowa kluczowe:** analiza bezpieczeństwa, badania modelowe, pasy bezpieczeństwa, wypadek drogowy, kryteria urazowości

### 1. WSTĘP

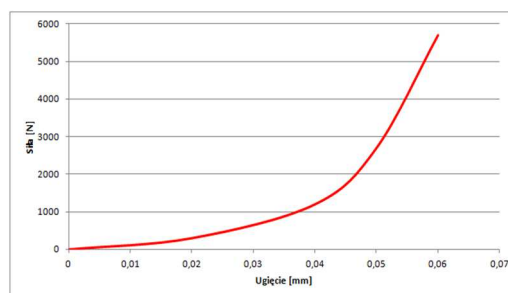
Wypadki drogowe w większości krajów wysokorozwiniętych nadal są najczęstszą przyczyną utraty życia i ciężkich obrażeń ciała u uczestników tych zdarzeń. Rokrocznie liczba wypadków maleje, jednakże ich skutki są wciąż zatrważające. Dlatego wciąż trwają prace nad poprawą bezpieczeństwa pasażerów, także tych najmłodszych, czyli dzieci [10]. W Polsce rocznie ma miejsce ponad 400 tysięcy kolizji i około 50 tysięcy wypadków, w których ginie około 5 tys. osób [12]. Nie bez powodu przepisy, akty prawne oraz wymagania dotyczące systemów bezpieczeństwa są coraz bardziej restrykcyjne. Należy zaznaczyć, że „system bezpieczeństwa” to zespół cech pojazdu, które mają na celu zmniejszenie skutków wypadku drogowego, bądź kolizji. Wyróżniamy bierne oraz aktywne systemy bezpieczeństwa. Do aktywnych systemów zalicza się: konstrukcję pojazdu, mającą m.in. zapewnić dobrą widoczność, układ hamulcowy wraz z systemem kontroli pojazdu, układ kierowniczy, zawieszenie oraz ogumienie. Wszystkie razem powinny zapewniać dobre prowadzenie i kierowność pojazdu oraz odpowiednią przyczepność kół z drogą [4]. Natomiast do biernych systemów zaliczyć można: pasy bezpieczeństwa (dwu-, trój- i czteropunktowe), foteliki samochodowe dla dzieci, poduszki powietrzne, zagłówki, elementy konstrukcji nadwozia –

strefy kontrolowanego zgniotu i wzmocnienia boczne [5]. Prawidłowe ich użytkowanie ma znaczący wpływ na bezpieczeństwo zarówno kierującego jak i pasażerów.

Stosowanie pasów bezpieczeństwa w samochodach osobowych i ich używanie przez uczestników wypadków jest jednym ze skutecznych sposobów zapobiegania urazom i zmniejszenia liczby ofiar. Należy jednak zaznaczyć, że nie zapewniają one pełnej ochrony. Zapięte pasy zmniejszą ryzyko uszkodzeń narządów wewnętrznych i części ciała w obrębie tułowia, jednak całkowicie nie eliminują obrażeń głowy oraz kręgosłupa szyjnego [6]. Natomiast najlepszą formą zabezpieczenia dzieci przed urazami w trakcie wypadku drogowego są foteliki bezpieczeństwa. Istnieje wiele rodzajów fotelików i sposobów ich mocowania w samochodzie osobowym. Pomimo wielu prac badawczych dotyczących bezpieczeństwa pasażerów pojazdów samochodowych [1],[7],[8],[9],[11] wydaje się, że jeszcze nie wszystkie aspekty bezpieczeństwa dzieci w pojazdach zostały rozpatrzone. Dlatego też, za główny cel pracy przyjęto ocenę skuteczności działania różnych wariantów mocowania pasów bezpieczeństwa i fotelika na podstawie kryteriów urazowości i ich wpływu na bezpieczeństwo pasażerów.

## 2. METODYKA BADAŃ

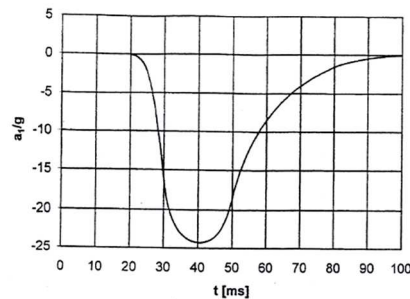
W ramach pracy przeprowadzono symulacje numeryczne wypadku drogowego-zderzenia czołowego, podczas których analizowano różne rodzaje pasów bezpieczeństwa i fotelików dziecięcych. Ocenę skuteczności działania tych systemów bezpieczeństwa dokonano na podstawie kryteriów urazowości. Rozpatrywane były dwa rodzaje pasów bezpieczeństwa osoby dorosłej oraz dwa sposoby mocowania fotelika dziecięcego. W przypadku osoby dorosłej dokonano analizy działania pasów w trzech wariantach: dwupunktowych oraz trójpunktowych z różną wysokością mocowania górnego punktu. Natomiast w przypadku analizy bezpieczeństwa dziecka rozpatrywano dwa sposoby mocowania fotelika dziecięcego: fotelik zamocowany pasami samochodowymi a dziecko zapięte pasami fotelika oraz dziecko i fotelik jednocześnie przypięte za pomocą pasa samochodowego. Ponieważ w pracy analizowano tylny przedział samochodu, w którym często nie stosuje się pasów bezpieczeństwa z napinaczem dlatego wybrano prosty system pasów. Pasy zostały zamodelowane jako element podatny o zadanej charakterystyce siłowo przemieszczeniowej (Rys.1).



**Rys. 1. Przebieg opóźnienia samochodu podczas zderzenia czołowego z nieruchomą przeszkodą [3]**

Symulacje zostały przeprowadzone w środowisku programu Madymo z wykorzystaniem modeli manekinów HYBRID III (50 centylowego mężczyzny) oraz PO6 (6-letniego dziecka). Model samochodu ograniczono do niezbędnych elementów, które uwzględniały modele fotela samochodowego, fotelika dziecięcego, podłogi oraz kokpitu. Wszystkie modele były przygotowywane w programie LS-Prepost, w którym dokonywano ich dyskretyzacji, a następnie eksportowano do programu Madymo. W tym programie przy użyciu metody multibody zostały zdefiniowane oddziaływania i połączenia pomiędzy elementami (kontakty,

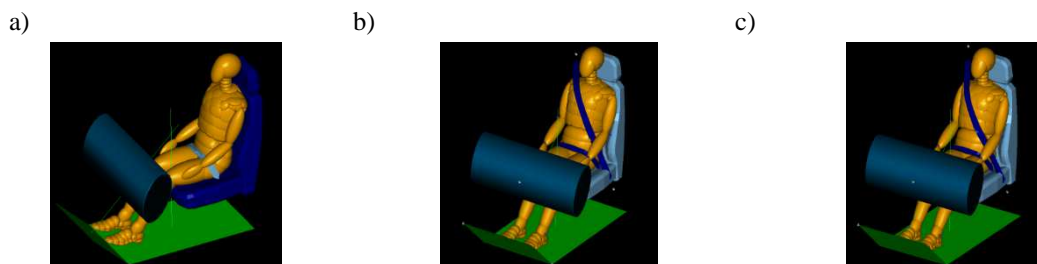
pary kinematyczny, jak np. między siedziskiem a oparciem fotela). Natomiast zadane w symulacjach warunki brzegowe odpowiadały symulowanemu zderzeniu czołowemu, które zdefiniowano przez przyspieszenie – opóźnienie (Rys. 2) działające na wszystkie elementy modelu w kierunku przednio-tylnym (oś Y).



Rys. 2. Przebieg opóźnienia samochodu podczas zderzenia czołowego z nieruchomą przeszkodą [3]

## 2.1. Model osoby dorosłej

Model osoby dorosłej został sformułowany w oparciu o model manekina HYBRID III (50 centylowego mężczyzny). Model manekina został umieszczony na fotelu pasażera w pozycji, która odzwierciedlała naturalną siedzącą pozycję człowieka w samochodzie. Następnie zostały zdefiniowane oddziaływania pomiędzy manekinem a elementami samochodu: fotelem, fotelem przed manekinem oraz podłogą. Model został uzupełniony systemem pasów, bezpieczeństwa dwu- oraz trójpunktowych. Mocowanie pasów trójpunktowych zostało ustawione w dwóch pozycjach: niższej i wyższej (z różnicą wysokości 15 cm). Natomiast pasy dwupunktowe były ustawione w pozycji odzwierciedlającej sytuację, gdy pasażer przekłada rękę nad pasem bezpieczeństwa. Zamodelowane warianty usadowienia modelu HYBRID III zostały przedstawione na rysunku Rys. 3.



Rys. 3. Pozycja manekina: a) z pasem dwupunktowym, b) z pasem trójpunktowym zamocowanym niżej, c) z pasem trójpunktowym zamocowanym wyżej

## 2.2. Model dziecka

Model dziecka został sformułowany w oparciu o model manekina PO6 (6 letniego dziecka). Również w tym przypadku rozważano dwa warianty usadowienia manekina P06. W pierwszym z nich manekin został umieszczony na podstawce, a w drugim w foteliku. Manekin został umieszczony w taki sposób, że jego ułożenie odzwierciedlało naturalną pozycję dziecka w samochodzie. Do opięcia manekina pasami w przypadku wariantu z podstawką wykorzystano pasy trójpunktowe. Natomiast w przypadku zastosowania fotelika, manekin został przypięty do fotelika pasami czteropunktowymi, a fotelik został przymocowany do fotela samochodowego pasami trójpunktowymi. Zdefiniowane warianty usadowienia dziecka w samochodzie zostały przedstawione na rysunku Rys. 4.



Rys. 4. Warianty usadowienia dziecka: a) przypięte pasami trójpunktowymi na podstawce, b) przypięte pasami do fotelika

## 2.2. Kontakty

W kolejnych etapach tworzenia modelu, zdefiniowano kontakty pomiędzy elementami, które mogą wchodzić w interakcję w trakcie symulacji wypadku samochodowego. W niniejszym modelu zdefiniowano kontakty pomiędzy manekinem a siedziskiem oraz pomiędzy manekinem a pasami bezpieczeństwa. W modelu uwzględniono również pary kinematyczne, których zakres stopni swobody odpowiada tym, które w rzeczywistości występują w fotelu samochodowym. Na łączeniu oparcia z siedziskiem zastosowano parę kinematyczną typu obrotowego o jednym stopniu swobody. Do pary kinematycznej przypisano charakterystykę sztywności, która ma odzwierciedlać rzeczywiste warunki pracy tego połączenia.

## 3. ANALIZA WYNIKÓW SYMULACJI

Obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone dla 200ms czasu trwania symulacji zderzenia czołowego samochodu z nieruchomą przeszkodą. Działanie opóźnienia rozpoczynało się w 20ms, co miało na celu ustabilizowanie manekinów na fotelach samochodowych. Natomiast w 50ms symulacji występowała maksymalna wartość opóźnienia wynosząca 25g. Sekwencja zdarzeń będąca efektem działania tego opóźnienia została przedstawiona w Tabeli 1. Wyznaczone wyniki pokazują różnice w zachowaniu się manekina HYBRYD III zapiętego w trzypunktowe pasy bezpieczeństwa w porównaniu z pasami dwupunktowymi. Również zauważalne różnice występują w przypadku zachowania się manekina PO6 pomiędzy wariantem usadowienia na podstawce a w foteliku dziecięcym.

Tabela 1. Położenia manekinów podczas symulacji

	Pasy dwupunktowe	Pasy trójpunktowe mocowane niżej	Pasy trójpunktowe mocowane wyżej	Podstawka	Fotelik
0 ms					
145ms					
200ms					

Ocenę skuteczności działania rozpatrywanych systemów bezpieczeństwa przeprowadzono na podstawie porównania i analizy obliczonych kryteriów urazowości dla manekina Hybryd III i PO6. W obu przypadkach brano pod uwagę kryteria urazowości głowy – HIC, kryteria urazowości szyi - NIC oraz wartości przyspieszeń i obciążeń (sił i momentów sił) działających na manekiny. W Tabeli 2 przedstawiono uzyskane wartości HIC dla manekina Hybryd III w zależności od wariantu pasów bezpieczeństwa (dwu- i trójpunktowych).

Uzyskane wartości HIC dla manekina Hybryd III pokazują, że wariant z trójpunktowymi pasami jest bezpieczniejszy od dwupunktowych. Potwierdzają to również uzyskane wartości sił kryterium urazowości szyi NIC. Wartość graniczna siły NIC wynosi 2800N [1]. Natomiast odnotowane największe wartości NIC w przypadku pasów dwupunktowych wynosiły odpowiednio: 2266.36N – NIC w ruchu zgięcia w tył, 6274.23N – NIC w ruchu zgięcia w przód, które znacznie wykracza poza bezpieczny limit.

**Tabela 2. Wartości kryteriów urazowości głowy HIC uzyskane dla manekina Hybryd III**

HIC	Pasy dwupunktowe	Pasy trójpunktowe mocowane niżej	Pasy trójpunktowe mocowane wyżej	Wartość graniczna
HIC <sub>15</sub>	10423	45.56	57.73	700
HIC <sub>36</sub>	10423	83.99	100.00	1000

Zarówno dla pasów trójpunktowych mocowanych niżej jak i wyżej otrzymane wartości mieszczą się w zakresie bezpiecznym – kolejno 400N i 328N dla NIC w ruchu zgięcia w tył oraz 645N i 667N dla NIC ruchu zgięcia w przód. Tym samym pasy dwupunktowe, czyli pozycja pasażera z przełożonym pasem ramiennym za plecy jest bardzo niebezpieczna. Konsekwencją tego jest uderzenie głowy o kokpit/deskę rozdzielczą samochodu i działanie bardzo dużych sił i momentów na kręgosłup szyjny. Świadczą o tym również otrzymane wartości znormalizowanych kryteriów urazowości szyi  $N_{ij}$  (Tabela 3) oraz momenty sił działające na odcinek szyjny kręgosłupa.

**Tabela 3. Porównanie znormalizowanych kryteriów urazowości szyi  $N_{ij}$  otrzymanych dla manekina Hybryd III**

	Pasy dwupunktowe	Pasy trójpunktowe mocowane niżej	Pasy trójpunktowe mocowane wyżej	Wartość graniczna
$N_{TE}$	0,65	0,21	0,24	1
$N_{TF}$	1,69	0,31	0,31	1
$N_{CE}$	0,51	0,23	0,26	1
$N_{CF}$	1,23	0,14	0,12	1

Analizę bezpieczeństwa dziecka przewożonego w samochodzie na podstawce oraz w foteliku dziecięcym dokonano również na podstawie porównania wartości kryteriów urazowości uzyskanych dla manekina PO6. Wyznaczone na podstawie przyspieszeń głowy wartości kryterium urazowości głowy HIC (Tabela 4) wskazują jednoznacznie, że wariant z fotelikiem jest bezpieczniejszy od podstawki. W przypadku zastosowania fotelika wartości HIC są trzykrotnie mniejsze od stosowania podstawki. Należy jednak zaznaczyć, że w obu przypadkach uzyskane kryteria HIC nie przekroczyły granicznej wartości.

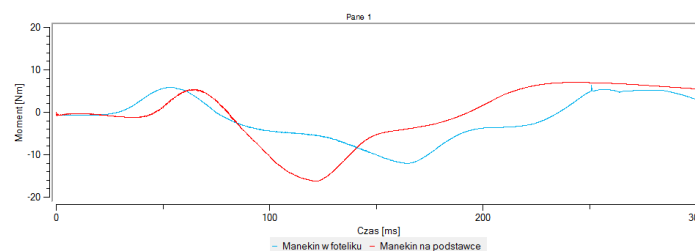
**Tabela 4. Porównanie kryteriów urazowości głowy HIC15 i HIC36 uzyskanych dla manekina PO6**

HIC	Podstawka	Fotelik	Wartość graniczna
HIC <sub>15</sub>	29,35	7,17	700
HIC <sub>36</sub>	55,18	16,83	1000

O wystarczającym poziomie bezpieczeństwa dziecka na podstawce i w foteliku podczas wypadku świadczą również uzyskane wartości znormalizowanego kryterium urazowości szyi  $N_{ij}$ . Wyznaczone maksymalne wartości w każdym przypadku wskaźnika  $N_{ij}$  dla manekina na podstawce oraz dla manekina w foteliku nie przekroczyły wartości granicznej (Tabela 5). Również wartości momentów sił działających na odcinek szyjny kręgosłupa są porównywalne w obu przypadkach posadowienia manekina PO6 (Rys. 5). Jednakże, większe wartości momentów sił występują u manekina w przypadku zastosowania podstawki. Może to wynikać z faktu, że dziecko przypięte jest tylko pasem samochodowym. Ten układ nie zapewnia dostatecznego „trzymania” i jest mniej sztywny od fotelika zamocowanego do fotela samochodu.

**Tabela 5. Porównanie wartości kryteriów urazowości  $N_{ij}$  uzyskanych dla manekina PO6**

$N_{ij}$	Podstawka	Fotelik	Wartość graniczna
$N_{TE}$	0,13	0,16	1
$N_{TF}$	0,23	0,14	1
$N_{CE}$	0,01	0,07	1
$N_{CF}$	0,02	0,02	1



**Rys. 5. Porównanie momentów sił działających w odcinku szyjnym kręgosłupa u manekina PO6**

#### 4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzona symulacja zderzenia czołowego samochodu z nieruchomą przeszkodą oraz analiza bezpieczeństwa wykazała, że systemy bezpieczeństwa oraz sposób ich używania odgrywają bardzo ważną rolę i wpływają na poziom bezpieczeństwa oraz urazowość uczestników wypadku. Na podstawie wyznaczonych kryteriów urazowości określono skuteczność działania różnych ustawień pasów bezpieczeństwa. Uzyskane wyniki jednoznacznie pokazują, że pasy trójpunktowe są bezpieczne jedynie wtedy, gdy są one prawidłowo użytkowane. Przekładanie pasa ramiennego za plecy lub zbyt luźna jego części sprawia duże ryzyko poważnego urazu, tak jak w przypadku pasów dwupunktowych. Otrzymane wyniki wskazują również, że punkt mocowania pasów trójpunktowych ma duży wpływ na bezpieczeństwo osób podróżujących. Porównując do siebie wyniki dla pasów trójpunktowych mocowanych niżej i wyżej można stwierdzić, że lepsze wyniki zostały uzyskane dla pasów mocowanych niżej, ponieważ pas przebiega większej odległości od odcinaka szyjnego kręgosłupa a to przekłada się na mniejsze wartości sił generowane w tym

segmencie kręgosłupa. To wskazuje, że należy mieć na uwadze dopasowanie wysokości mocowania pasa do wzrostu, co może przyczynić się obniżenia ryzyka obrażeń. Analizując siły oraz momenty sił występujące w odcinku szyjnym u manekina HYBRYD III można zauważyć, że duże ich wartości są związane z uderzeniem głowy w kokpit lub zagłówek fotela. Największe wartości zaobserwowano w momencie uderzenia głowy o kokpit w przypadku pasów dwupunktowych. Natomiast pasy trójpunktowe generują duże siły i momenty w czasie ruchu powrotnego, gdy głowa uderza w zagłówek fotela. Na podstawie tych danych można stwierdzić, że również poprawne ustawienie fotela i zagłówek może pozytywnie wpływać na obniżenie ryzyka dużych obrażeń.

Wyniki przeprowadzonych symulacji umożliwiły także określić poziom bezpieczeństwa dzieci przewożonych w foteliku lub na podstawce podczas wypadku samochodu. Ocenę skuteczności działania oraz poziomu ochrony tych urządzeń dokonano na podstawie analizy kryteriów urazowości manekina P06, a tym samym ryzyka wystąpienia obrażeń u sześciolatniego dziecka. Biorąc pod uwagę wszystkie wyznaczone wartości kryteriów urazowości (HIC oraz  $N_{ij}$ ) można zauważyć, że zarówno podstawka jak i fotelik mocowany do fotela pasami trójpunktowymi zapewniają zadowalające bezpieczeństwo dzieciom podczas podróży. W obu przypadkach uzyskane wyniki są bardzo porównywalne, a maksymalne wartości kryteriów nie przekraczają przyjętych norm. Pomimo tego, iż oba sposoby zabezpieczenia dzieci w trakcie podróży zapewniają odpowiedni poziom ochrony, to bezpieczniejszy jest fotelik dziecięcy mocowany do kanapy samochodu, gdyż do przypięcia dziecka używane są pasy czteropunktowe. Potwierdzają to również uzyskane momenty sił działające w odcinku szyjnym kręgosłupa u manekina P06. Dziecko na podstawce zapięte jest jedynie pasami samochodowymi i dlatego w tym wariancie efekt działania opóźnienia jest znacznie większy, a więc także ryzyko urazu. Natomiast w wariancie, gdy dziecko w foteliku przypięte jest czteropunktowymi pasami, a fotelik mocowany jest do fotela przy użyciu pasów samochodowych wpływ opóźnienia jest mniejszy. Dlatego zaleca się stosowanie fotelików dziecięcych z systemem ISOFIX, który zapewnia sztywniejsze zamocowanie.

Biorąc pod uwagę wyniki wszystkich wariantów symulacji wypadku drogowego można stwierdzić, że stosowane systemy bezpieczeństwa w pojazdach samochodowych są coraz skuteczniejsze. Należy jednak pamiętać, że nie chronią one całkowicie pasażerów i na ryzyko wystąpienia urazu mają również wpływ inne czynniki. Jak wykazano w niniejszym artykule nieprawidłowe stosowanie pasów może być przyczyną poważnych konsekwencji. Przekładanie części ramiennej trójpunktowego pasa bezpieczeństwa za plecy zmienia ten pas w dwupunktowy i stwarza duże ryzyko urazu podczas wypadku. Dlatego bardzo ważne jest dostosowanie systemów bezpieczeństwa do cech antropometrycznych użytkownika.

## LITERATURA

- [1] Burkacki M., Jozsko K., Gzik M.: Biomechaniczna analiza wypadku samochodowego z zastosowaniem urządzenia typu HANS podpierającego głowę oraz odcinek szyjny kręgosłupa kierowcy. "Aktualne Problemy Biomechaniki" 2013, nr 7, s. 15-16.
- [2] Eppinger R., Sun E., Bandak F., Haffner M., Khaewpong N., Maltese M.: Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint Systems. National Transportation Biomechanics Research Center (NTBRC). 1999
- [3] Gumuła S., Łągiewka L., A Method Of Impact And Inertia Force Reduction During Collisions Between Physical Objects. Results Of Experimental Investigations, Journal of Technical Physics. 48 (1), ss. 13-27.
- [4] <http://www.info-samochody.pl/> (dostęp: 11.01.2016).
- [5] <http://www.program.ratowniczy.pl/index.php?id=121> (dostęp: 11.01.2016).

- [6] Jozsko K., Wolański W., Burkacki M., Suchoń S., Zielonka K., Muszyński A., Gzik M.: Biomechanical analysis of injuries of rally driver with head supporting device, *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 2016, Vol. 18 no. 4, p.159-169.
- [7] Jozsko K., Wolański W., Gzik M., Żuchowski A., Badania eksperymentalne i modelowe skuteczności ochrony pasażerów na tylnych fotelach samochodów osobowych podczas wypadku drogowego. *Modelowanie Inżynierskie*, 2015, tom 25, nr 56, s. 48-57.
- [8] Sohr S., Hofmann H., Kutschenreuter S., Ruck H.: Influence of HIII 5% Dummy Tolerances on Positioning and Test Results in Out-Of-Position Load Cases According to the FMVSS 208. In: *The 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) June 18-21, 2007; Lyon, France 2007*, p. 1-8
- [9] Tanaka Y., Yonezawa H.: Responses of Hybrid III 3YO and Q3 Dummies in Various CRSs Tested Using ECE R44 Impact Conditions. In: *The 21th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), June 15-18, Stuttgart, Germany 2009*, p. 23-29.
- [10] Wicher J., *Biomechanika obrażeń w kolizjach drogowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej: Mechanika*, 2000, nr 71, s. 27-47.
- [11] Wicher J.: *Biomechanika obrażeń w kolizjach drogowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanika*, 2000, nr 71, s. 27-47.
- [12] <http://www.statystyka.policja.pl/st/wybrane-statystyki> (dostęp: 11.01.2016).

## **THE SAFETY ANALYSIS OF CAR ACCIDENT PARTICIPANTS**

Abstract: The safety analysis of the vehicle passengers during frontal collision was presented in this paper. Model researches were performed using Madymo software with models of adult dummy (HYBRID III) and 6-year-old child dummy (P06). The various options and configurations of safety belts were considered in numerical simulations. The evaluation of the effectiveness of the safety systems was based on the kinematic and dynamic parameters, such as: acceleration of the head, force moments and Injury Criteria (HIC, NIC and  $N_{ij}$ ). The obtained results showed that the increasing number of safety belt anchorages cause decreasing probability of serious injury during car accident.