

Analiza wpływu prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę na obciążenia manekinów na przednich i tylnych fotelach

ANDRZEJ ŻUCHOWSKI¹

Wojskowa Akademia Techniczna

Streszczenie

Rozważono wpływ prędkości uderzenia samochodu osobowego w przeszkodę na obciążenia dynamiczne manekinów na przednich i tylnych fotelach. W tym celu wykorzystano wyniki 28 testów zderzeniowych, udostępnione w Internecie przez *National Highway Traffic Safety Administration (USA)*. Testy zderzeniowe 14 modeli samochodów prowadzone były przy dwóch wartościach prędkości uderzenia samochodu w barierę (40 i 56 km/h oraz 48 i 56 km/h). Pokazano wpływ prędkości zderzenia na opóźnienie samochodów i ich charakterystykę deformacji. Uwagę zwrócono na obciążenia kierowcy i pasażera na przednich fotelach (manekiny reprezentujące 50-centylowego mężczyznę oraz 5-centylową kobietę) oraz pasażerów na tylnych fotelach (manekiny reprezentujące 5-centylową kobietę oraz 6-letnie dziecko). Podczas oceny obciążeń manekinów wykorzystano wskaźniki biomechanicznej odporności ciała człowieka na skutki obciążeń udarowych, dotyczące głowy, szyi i klatki piersiowej. Na ich podstawie określono ryzyko obrażeń osób jadących. Ustalono, że zwiększenie prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę z 40 do 56 km/h zwiększa ryzyko poważnych obrażeń (AIS3+) 5-centylowej kobiety z 30÷60% do 35÷90%. Zwiększenie prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę z 48 do 56 km/h zwiększa ryzyko poważnych obrażeń 50-centylowego mężczyzny z 25÷40% do 30÷55%. Zwrócono uwagę, że skuteczność działania poduszki gazowej może zależeć od prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę.

Słowa kluczowe: wypadki drogowe, testy zderzeniowe, prędkość uderzenia, obciążenia manekinów, ryzyko obrażeń

1. Wprowadzenie

Prędkość jazdy istotnie wpływa na ryzyko wypadku drogowego i jego skutki. Podczas zderzenia występuje gwałtowna zmiana prędkości samochodu i im jest ona większa, tym poważniejszych obrażeń doznają uczestnicy wypadków. W opisie obrażeń uczestników wypadków drogowych

¹ Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, ul. Gen. Witolda Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, e-mail: andrzej.zuchowski@wat.edu.pl

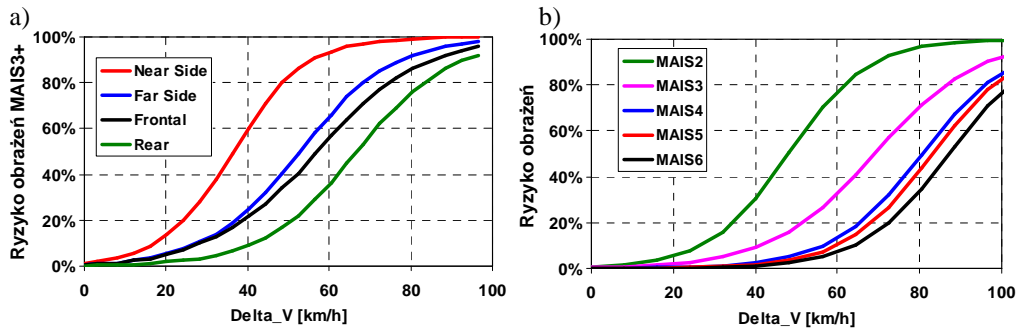
często stosowana jest sześciostopniowa skala *AIS* (*Abbreviated Injury Scale*), w której określonym obrażeniom przypisano wyrażony cyfrą stopień (tabela 1). Rozważając obrażenia obejmujące dany stopień i wyższe, stosuje się zapis AIS3+. Jeżeli występują liczne obrażenia, to stosowana jest skala *MAIS* (*Maximum AIS*) [12]. Korelację pomiędzy stopniem obrażeń *AIS*, a ryzykiem śmierci w następstwie tych obrażeń podano m.in. w [21].

W Polsce poszkodowanych w wypadkach drogowych dzieli się na lekko i ciężko rannych oraz zabitych (ciężko ranna jest osoba, która poniosła uszczerbek na zdrowiu na okres trwający dłużej niż 7 dni). Wśród poszkodowanych (zabici i ranni) w wypadkach drogowych w Polsce w latach 2005-2016 udział zabitych wynosił około 7,5%, a ciężko rannych 24,1% [15]. W tabeli 1 podano strukturę obrażeń poszkodowanych w wypadkach drogowych w USA, w 2005 roku [14]. Uwzględniono tu obrażenia AIS3+, chociaż w wypadkach drogowych dominują obrażenia lekkie i średnie (AIS1 i AIS2). Ze stopniem obrażeń ściśle związane są koszty ofiar wypadków. W tabeli 1 podano także względne koszty ofiary rannej w USA (z lat 1994, 2000 i 2010), w zależności od stopnia obrażeń (dla ofiary śmiertelnej przyjęto wartość 100). Koszt jednostkowy ofiary śmiertelnej w Polsce to około 1,5÷2,0 mln PLN, osoby ciężko rannej 2,21 mln PLN, a lekko rannej 0,019 mln PLN (koszt jednostkowy ofiary śmiertelnej jest tu mniejszy niż osoby ciężko rannej) [6, 23]. Zmniejszenie prędkości zderzenia zmniejsza ciężkość obrażeń, a tym samym koszty wypadku drogowego. Przykładowo w pracach [1, 16] oszacowano korzyści ekonomiczne, wynikające z wprowadzenia do samochodów systemu hamowania awaryjnego *AEB* (*Autonomous Emergency Braking*) oraz systemu kontroli ciśnienia w ogumieniu *TPMS* (*Tire Pressure Monitoring System*). Wiedza o wpływie prędkości zderzenia na obrażenia uczestników wypadków jest istotna podczas szacowania ryzyka wypadku (ustalenie limitów prędkości na drogach) oraz w organizacji systemu ratownictwa drogowego [2, 18].

Tabela 1. Obrażenia w wypadkach drogowych oraz względne koszty ofiary rannej [3, 4, 13, 14]

Stopień obrażeń	Ciężkość obrażeń	Udział [%]	Względne koszty ofiary rannej		
		[14]	(1994 r.) [3]	(2000 r.) [4]	(2010 r.) [13]
AIS1	Lekkie		0,38	0,31	0,3
AIS2	Średnie		4,68	4,58	4,7
AIS3	Poważne	56	16,55	9,16	10,5
AIS4	Ciężkie	23	41,82	21,53	26,6
AIS5	Krytyczne	16	87,91	71,24	59,3
AIS6	Śmiertelne	5	100	100	100

Na podstawie danych z wypadków drogowych opracowywane są modele statystyczne, które umożliwiają ocenę wpływu prędkości zderzenia na ryzyko obrażeń uczestników wypadków drogowych [2, 16, 18]. Przykładowo na rysunku 1 podano modele dotyczące wypadków w USA z lat 1994-2002 (w miarę doskonalenia układów bezpieczeństwa w kolejnych generacjach samochodów modele takie ulegają zmianom). Na rysunku 1a podano funkcje opisujące wpływ zmiany prędkości samochodu podczas zderzenia (ΔV) na ryzyko obrażeń *MAIS3+* podczas różnych typów zderzeń (boczne, czołowe i tylne) [2]. Wartość ΔV decyduje o wartości opóźnienia podczas zderzenia, a tym samym o wartości sił bezwładności, działających na samochód i osoby jadące [19]. Najbardziej tragiczne są skutki uderzenia w bok samochodu po stronie osób siedzących (*Near Side*). Przykładowo przy $\Delta V=40$ km/h ryzyko obrażeń *MAIS3+* jest 60%. Podczas zderzenia czołowego (*Frontal*) oraz bocznego typu *Far Side* (osoby siedzą po stronie przeciwnej do uderzenia) ryzyko *MAIS3+* jest około 20%. Na rysunku 1b podano funkcje opisujące wpływ ΔV na ryzyko obrażeń osób jadących, od *MAIS2* do *MAIS6* (uwzględniono tu różne typy zderzeń) [16].



Rys. 1. Wpływ zmiany prędkości samochodu podczas zderzenia na ryzyko obrażeń [2, 16]

W pracy [19], na podstawie wyników kilkuset testów zderzeniowych [24], zaproponowano funkcje wiążące ryzyko obrażeń i prędkość czołowego uderzenia samochodu w sztywną barierę (samochody z lat 2000-2010). Na podstawie wskaźników obrażeń głowy i torsu ustalono, że zwiększenie prędkości z 40 km/h do 56 km/h zwiększa ryzyko ciężkich obrażeń (AIS4+) kierowcy i pasażera na przednim fotelu z 4-7% do 8-13%. Celem tej pracy jest ocena wpływu prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę na przyspieszenie głowy i torsu, siły i momenty działające na szyję oraz ugięcie klatki piersiowej manekinów. W analizie uwzględniono obciążenia manekinów na przednich i tylnych fotelach, ukazując je w powiązaniu z działaniem pasów bezpieczeństwa i poduszki gazowej. Cel pracy jest ukierunkowany na identyfikację czynników (prędkość zderzenia, ale także sylwetka kierowcy i pasażera oraz miejsce w samochodzie), decydujących o obrażeniach uczestników wypadku drogowego.

2. Wybór testów zderzeniowych do analizy

Ocenę wpływu prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę na obciążenia osób jadących przeprowadzono na podstawie wyników testów zderzeniowych, udostępnionych w Internecie przez *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA, USA). Wyniki testów NHTSA pobrano w postaci cyfrowej z [24]. Spośród dostępnych kilkuset testów zderzeniowych, do analizy prowadzonej zgodnie z celem pracy wyselekcjonowano te, w których takie same manekiny, w takich samych samochodach, badane były przy różnych wartościach prędkości uderzenia w barierę. Uwzględniono następujące kryteria podobieństwa samochodów: marka i model, typ nadwozia, rok produkcji, masa i wymiary, pojemność oraz sposób ustawienia silnika, rodzaj skrzyni biegów, rodzaj napędu, ustawienie fotela i manekina oraz siła napięcia taśmy pasa bezpieczeństwa przez napinacz. W efekcie rozważono wyniki badań 14 par nowych samochodów z lat 2001-2006, które w tabeli 2 zestawiono według typu nadwozia (hatchback, sedan, van, SUV). Testy dotyczyły zderzenia czołowego z barierą sztywną, z wyjątkiem testów T6 i T7, w których samochód uderzał w barierę deformowalną. Różnica masy samochodów w danej parze zwykle nie przekraczała 3%, a w przypadku dwóch par samochodów (T10 i T11) wynosiła 8÷9%. W trzech innych parach (T8, T9, T14) samochody różniły się rodzajem skrzyni biegów (ręczna, automatyczna) lub liczbą napędzanych osi. Podobieństwo właściwości czołowej strefy zgniotu samochodów potwierdzono na podstawie charakterystyk deformacji (por. rys. 3), sporządzonych w sposób opisany w [22].

W samochodach na przednich fotelach były manekiny Hybrid III F5 i M50 (5-centylowa kobieta i 50-centylowy mężczyzna). Nominalne wartości prędkości uderzenia samochodów w barierę były 40 i 56 km/h w testach T1÷T7 (manekiny F5) oraz 48 i 56 km/h w testach T8÷T14 (manekiny M50). Manekiny na przednich fotelach chronione były poduszkami gazowymi

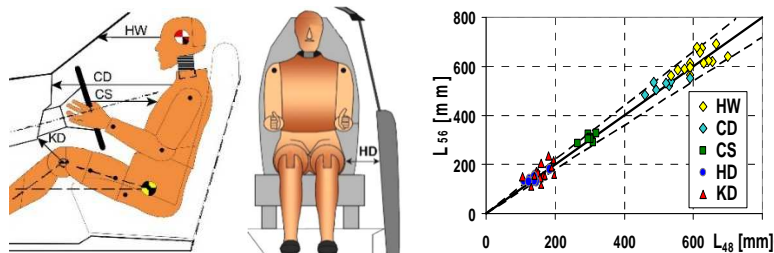
i miały zapięte pasy bezpieczeństwa (z napinaczami). W poszczególnych modelach samochodów napinacze napinały taśmę pasa siłą o wartości od 0,6 kN do 3,1 kN (por. rys. 8), natomiast w danej parze samochodów wartości tych sił były porównywalne (różnica poniżej 10%). Na tylnych fotelach (z prawej i lewej strony – miejsca P3 i P4) w testach T2 i T5 były manekiny 6YO (reprezentujące 6-letnie dziecko), a w testach T3, T6 i T7 manekiny F5 (w teście T3 manekin F5 był tylko na fotelu po lewej stronie). Manekiny 6YO były umieszczone w fotelikach (por. rys. 10) i zapięte pasem bezpieczeństwa (bez napinaczy). Manekiny 6YO na tych samych miejscach w każdej parze samochodów były na takich samych fotelikach, zatem obserwowane różnice obciążenia manekina są efektem zmiany prędkości uderzenia.

Tabela 2. Dane o samochodach i manekinach na fotelach przednich (V – prędkość uderzenia)

Nr testów	V [km/h]	Typ nadwozia, rok produkcji	Masa [kg]	Nr testów	V [km/h]	Typ nadwozia, rok produkcji	Masa [kg]
Samochody z manekinami F5				Samochody z manekinami M50			
T1	40,3	Hatchback, 2006	1675	T8	47,1	Sedan, 2001	1347
	56,1		1696		56,8		1341
T2	40,3	Sedan, 2005	1752	T9	47,3	Sedan, 2001	1702
	56,5		1758		56,2		1691
T3	40,3	Sedan, 2006	1801	T10	47,8	Sedan, 2004	1794
	56,9		1802		57,1		1635
T4	40,1	Sedan, 2005	2034	T11	47,6	Sedan, 2004	1842
	55,8		2034		56,5		1693
T5	39,0	Van, 2005	2268	T12	47,4	Sedan, 2001	1866
	56,0		2259		56,5		1914
T6*	40,1	SUV, 2005	1771	T13	47,8	SUV, 2003	2301
	56,6		1768		56,2		2271
T7*	40,3	SUV, 2005	1774	T14	47,6	SUV, 2004	2369
	56,5		1774		56,6		2367

* - bariera deformowalna

Przemieszczenia i obciążenia manekina podczas uderzenia samochodu w przeszkodę istotnie zależą od początkowego ustawienia manekina [9]. Dlatego na etapie wyboru testów zderzeniowych do analizy sprawdzono, czy manekiny w poszczególnych parach samochodów są podobnie rozmieszczone na fotelach. W tym celu porównano zaznaczone na rysunku 2 odległości pomiędzy manekinem a elementami wnętrza kabiny. W poszczególnych parach samochodów z manekinami F5 różnice tych odległości nie przekraczały 15 mm (testy wykonano w laboratorium *PMG Technologies*, Kanada).

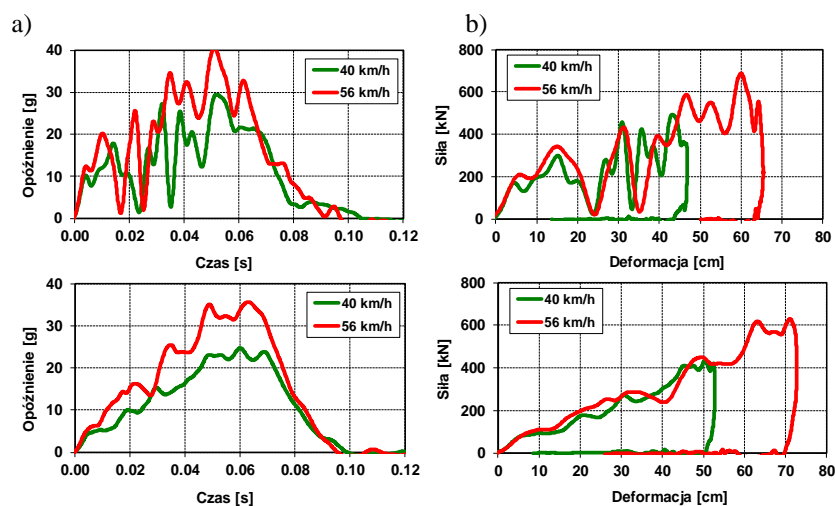


Rys. 2. Wymiary opisujące ustawienie manekina w samochodzie - linie przerywane na wykresie określają przedział $\pm 10\%$ (na podstawie [24])

Testy zderzeniowe z manekinami M50 wykonywane były w różnych laboratoriach (w USA i Kandzie), stąd różnice w ustawieniu manekinów M50 podczas testów przy wartościach prędkości 48 i 56 km/h są większe niż w przypadku manekinów F5. Na rysunku 2 skojarzono wartości odległości HW, CD, CS, HD i KD manekinów M50 w samochodach (na przednich fotelach), badanych przy prędkości 48 km/h (L_{48}) oraz 56 km/h (L_{56}). Różnice pomiędzy wymiarami HW, CD, CS w samochodzie badanym przy prędkości 48 i 56 km/h nie były większe niż 10%. Fotele przednie w samochodach z manekinami M50 były ustawione w położeniu centralnym, a fotele z manekinami F5 były przesunięte do przodu. W efekcie odległość CS torsu manekina F5 od koła kierownicy była mniejsza (183÷270 mm) niż manekina M50 (265÷326 mm). Odległość CS jest ważna np. ze względu na skuteczność działania poduszki gazowej, co będzie opisane w dalszej części pracy.

3. Wpływ prędkości zderzenia na opóźnienie samochodu i manekinów

Ciężkie obrażenia człowieka w samochodzie podczas zderzenia są zwykle skutkiem uderzenia ciała o elementy kabiny. Pas bezpieczeństwa i poduszka gazowa ograniczają przemieszczenia ciała, jednak są źródłem siły bezwładności, która może powodować groźne przemieszczenia i uderzenia organów wewnętrznych. Są one tym bardziej niebezpieczne, im większe są wartość opóźnienia (przyspieszenia) samochodu i czas jego działania. Oczywiście zwiększenie prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę powoduje zwiększenie jego opóźniania, mimo iż rośnie deformacja czołowej strefy zgniotu, czyli droga na której samochód zatrzymuje się. Głębokość deformacji czołowej strefy zgniotu zależy także od sztywności samochodu w miejscu kontaktu z przeszkodą, w tym od rozmieszczenia zespołów układu napędowego oraz osprzętu silnika w komorze silnikowej, masy samochodu oraz od właściwości przeszkody [22].

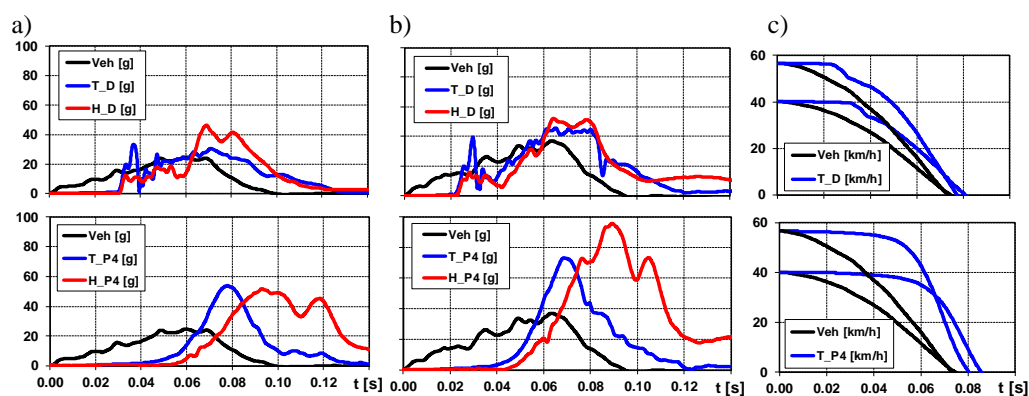


Rys. 3. Realizacje opóźnienia samochodów i ich charakterystyka deformacji (testy T1 i T6)

Na rysunku 3a podano realizacje opóźnienia samochodów z testów T1 i T6, przy prędkości uderzenia w barierę 40 i 56 km/h (energia kinetyczna samochodu przy 56 km/h jest dwa razy większa niż przy 40 km/h). Charakteryzują się one dynamicznymi zmianami wartości, przy czym maksymalna wartość opóźnienia samochodu w teście T1 (hatchback, bariera sztywna) przy prędkości 40 km/h jest 30 g, a przy prędkości 56 km/h osiąga 40 g. W teście T6 (SUV, bariera deformowalna) jest odpowiednio 24 g i 35 g. Czas działania opóźnienia przy obu wartościach

prędkości jest podobny (faza deformacji do około 0,07 s i faza restytucji 0,07÷0,10 s), co potwierdza, że parametr ΔV (rys. 1) decyduje o wartości opóźnienia samochodu podczas zderzenia. Właściwości strefy zgniotu opisywane są zwykle za pomocą charakterystyki deformacji, która przedstawia zależność siły zgniatającej nadwozia od deformacji czołowej strefy zgniotu [22]. Przykład z rysunku 3b potwierdza podobieństwo charakterystyki deformacji par samochodów w testach T1 i T6, czyli obciążenia manekinów oceniano w takich samych samochodach, co jest kluczowe dla celu pracy.

Opóźnienie działające na osoby jadące (manekiny) tylko częściowo zależy od opóźnienia samochodu. Decydujące znaczenie ma oddziaływanie pasa bezpieczeństwa i poduszki gazowej, które ograniczają ruch ciała względem samochodu. Przykładowo na rysunku 4 zestawiono realizację opóźnienia wzdłużnego samochodu (działającego w kierunku jazdy) oraz wypadkowego opóźnienia głowy i torsu manekinów (F5) na fotelu kierowcy i na tylnym fotelu za kierowcą (miejsce P4), przy prędkości uderzenia w barierę 40 i 56 km/h (testy T6).



Rys. 4. Realizacje opóźnienia działającego na samochód (Veh), tors (T) oraz głowę (H) manekina F5 na fotelu kierowcy (D) oraz na tylnym fotelu (P4) w testach T6; a) prędkość 40 km/h, b) prędkość 56 km/h, c) realizacje prędkości samochodu i torsu manekina

Maksymalna wartość opóźnienia samochodu (linie „Veh”) jest znacznie mniejsza niż opóźnienie manekina, zwłaszcza na tylnym fotelu. Jest to efekt zwłoki działania pasa bezpieczeństwa - dopóki taśma pasa nie zostanie napięta, to manekiny przemieszczają się względem foteli z prędkością początkową, mimo że samochód już zwalnia po uderzeniu w barierę. Stan ten dobrze ilustrują realizacje prędkości samochodu i torsu manekina, pokazane na rysunku 4c (wyznaczono je całkując realizacje opóźnienia). Manekin na fotelu kierowcy (D) jest tu chroniony przez pas bezpieczeństwa z napinaczami, dlatego jego ruch opóźniony rozpoczyna się wyraźnie wcześniej niż manekina na tylnym fotelu (P4), gdzie pas nie ma napinacza.

W efekcie wartości opóźnienia torsu i głowy manekina na fotelu kierowcy są znacznie mniejsze niż manekina na tylnym fotelu. W przykładzie podanym na rysunku 4 zwiększenie prędkości zderzenia z 40 km/h do 56 km/h (wzrost o 40%) spowodowało zwiększenie maksymalnej wartości opóźnienia:

- samochodu: z 25 g do 37 g (wzrost o 48%);
- torsu: kierowcy z 33 g do 46 g (wzrost o 39%), pasażera P4 z 54 g do 73 g (wzrost o 35%);
- głowy: kierowcy z 46 g do 52 g (wzrost o 13%), pasażera P4 z 52 g do 94 g (wzrost o 81%).

4. Analiza wskaźników obrażeń

W prowadzonej dalej ocenie wpływu prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę na obciążenia manekinów wykorzystano wyniki pomiarów następujących wielkości: przyspieszenie głowy i klatki piersiowej (torsu), siły i momenty sił działających na szyję oraz ugięcie klatki piersiowej. Na ich podstawie obliczono wskaźniki obrażeń:

- HIC_{15} , wskaźnik obrażeń głowy (*Head Injury Criterion*);
- N_{ij} , wskaźnik obrażeń szyi (*Neck Injury Criterion*);
- C_{Acc} , maksymalne wypadkowe przyspieszenie torsu [g], w czasie co najmniej 3 ms;
- C_{max} , maksymalne ugięcie klatki piersiowej [mm].

Wartości wskaźnika HIC_{15} obliczono na podstawie przyspieszenia głowy manekina [5, 11]:

$$HIC_{15} = \max \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} a_G(t) dt \right]^{2.5} \cdot (t_2 - t_1) \quad (1)$$

gdzie:

$a_G(t)$ - wypadkowe przyspieszenie środka masy głowy manekina w g;

$\Delta t = t_2 - t_1$ - przedział czasu w sekundach, w którym występują największe wartości przyspieszenia głowy, przy czym $\Delta t \leq 15 \text{ ms}$.

Wypadkowe przyspieszenie głowy i torsu obliczono z realizacji, pomierzonych w trzech, wzajemnie prostopadłych kierunkach. Wartości wskaźnika N_{ij} obliczono z zależności [5, 11]:

$$N_{ij} = \frac{F_z}{F_{zc}} + \frac{M_{Ocy}}{M_{yc}} \quad (2)$$

gdzie:

F_z, M_{Ocy} – siła osiowa (F_T, F_C – ściskanie, rozciąganie) i skorygowany moment zginający szyję względem osi Oy (M_E, M_F – zginanie w ruchu do przodu, do tyłu),

F_{zc}, M_{yc} – wartości krytyczne sił F_T i F_C oraz momentów M_E i M_F .

Graniczne wartości wskaźników oraz obciążeń szyi z zależności (2), podano w tabeli 3.

Tabela 3. Graniczne wartości wskaźników obrażeń [5, 11, 17]

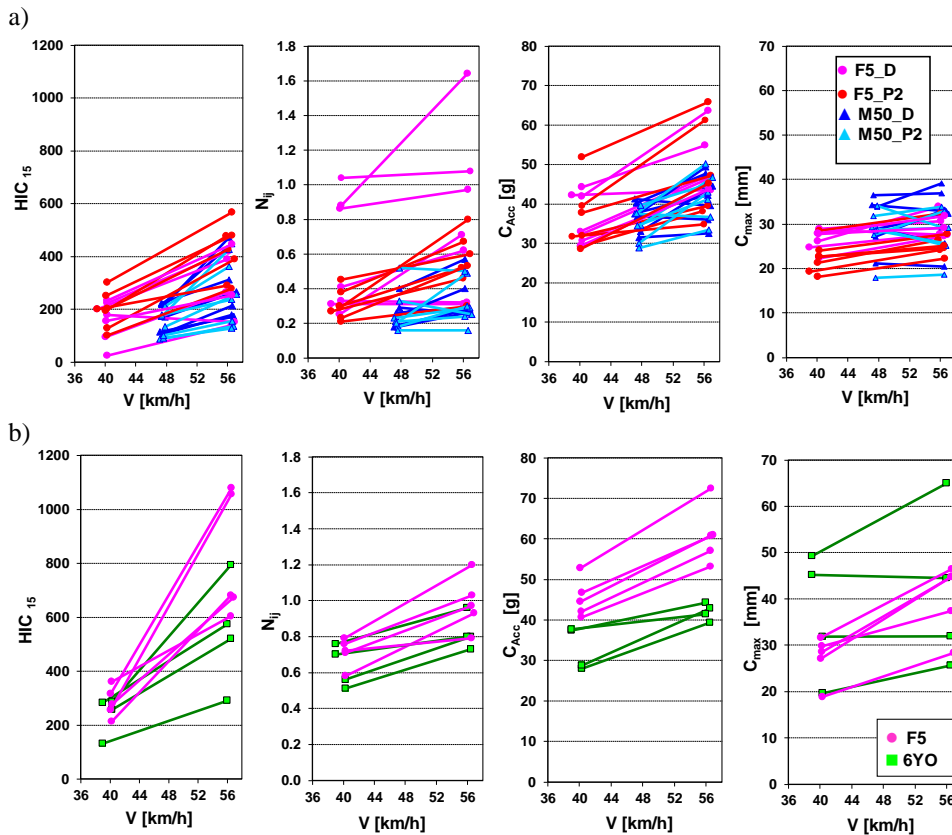
Manekin	HIC_{15}	N_{ij}	F_T [N]	F_C [N]	M_F [Nm]	M_E [Nm]	C_{Acc} [g]	C_{max} [mm]
M50	700	1,0	6806	6160	310	135	60	63
F5			4287	3880	155	67		52
6YO			3080	2820	96	42		40

Wartości wskaźników HIC_{15} , N_{ij} , C_{Acc} oraz C_{max} w funkcji prędkości zderzenia zilustrowano na rysunku 5. Linie na wykresach łączą punkty dotyczące manekinów z danej pary samochodów, badanych przy dwóch wartościach prędkości uderzenia w barierę (przy prędkości 40 i 56 km/h w testach z manekinami F5 i 6YO oraz przy prędkości 48 i 56 km/h w testach z manekinami M50). Potwierdzono, że obciążenia manekinów F5 na przednich fotelach, gdzie są poduszki gazowe i pasy z napinaczami, są zwykle mniejsze niż manekinów na tylnych fotelach [21] (por. także rys. 4).

W większości par samochodów mamy większe wartości wskaźników przy większej prędkości zderzenia. Odnosząc wartości wskaźników obrażeń (rys. 5) do ich wartości granicznych

(tabela 3) ustalono, że wartości graniczne wskaźników dla manekinów M50 na fotelach przednich nie zostały przekroczone w żadnym teście. Zmiana prędkości uderzenia z 48 km/h na 56 km/h w testach z manekinami M50 najbardziej wpłynęła na zwiększenie obciążenia głowy. W przypadku manekinów F5 i 6YO wartości graniczne wskaźnika:

- HIC_{15} zostały przekroczone tylko przy prędkości 56 km/h w przypadku trzech spośród dziewięciu manekinów na tylnych fotelach (F5 i 6YO);
- N_{ij} zostały przekroczone przy prędkości 40 km/h w przypadku jednego spośród siedmiu manekinów F5 na miejscu kierowcy, a przy prędkości 56 km/h w przypadku dwóch spośród siedmiu manekinów F5 na miejscu kierowcy oraz w przypadku dwóch spośród pięciu manekinów F5 na tylnych fotelach;
- C_{Acc} zostały przekroczone tylko przy prędkości 56 km/h w przypadku trzech spośród dziewięciu manekinów F5 na fotelach przednich oraz w przypadku trzech spośród pięciu manekinów F5 na fotelach tylnych;
- C_{max} zostały przekroczone przy obu prędkościach 40 i 56 km/h w przypadku dwóch spośród czterech manekinów 6YO na tylnych fotelach.

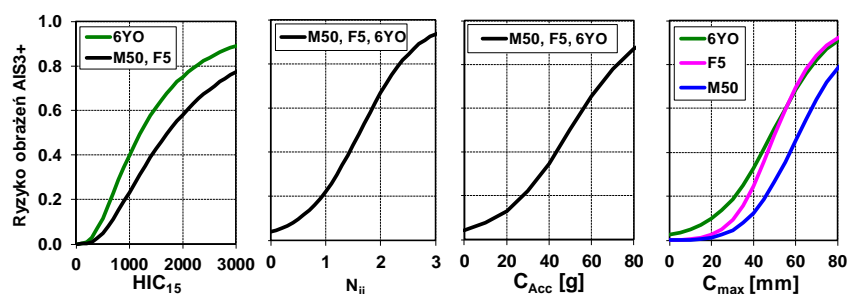


Rys. 5. Wartości wskaźników obrażeń w funkcji prędkości zderzenia;
 a) manekiny F5 i M50 na fotelu kierowcy (D) i na fotelu obok kierowcy (P2)
 b) manekiny F5 i 6YO na tylnych fotelach

Uwagę zwraca to, że w niektórych samochodach wartości wskaźników nie zwiększyły się a zmalały przy większej prędkości zderzenia. Dotyczy to zwłaszcza ugięcia klatki piersiowej (C_{max}) manekinów M50. Ugięcie klatki piersiowej jest powodowane oddziaływaniem na nią taśmy pasa i poduszki gazowej. Istotna jest tu wartość siły nacisku, ale także miejsce jej przyłożenia, np. wstępne ułożenie i sposób przemieszczania się taśmy pasa względem manekina (por. rys. 10). Ponadto charakterystyka dynamicznego uginania klatki piersiowej jest silnie nieliniowa. Przykładowo po obciążeniu klatki piersiowej manekina M50 siłą około 4 kN jej ugięcie narasta od około 15 mm do 35 mm, przy niewielkim zwiększeniu siły nacisku [8].

5. Wpływ prędkości zderzenia na ryzyko obrażeń kierowcy i pasażerów

Ważnym problemem w biomechanice urazów jest ocena relacji między ciężkością obrażeń a wartościami obciążeń mechanicznych, które powodują dane obrażenia. Dzięki znajomości takich relacji mamy możliwość powiązania wyników testów zderzeniowych, w których mierzone są obciążenia manekinów, z obrażeniami, jakie mogą wystąpić u człowieka podczas wypadku drogowego. Do oceny ryzyka obrażeń wykorzystano funkcje ryzyka podane na rysunku 6. Funkcja ryzyka obrażeń głowy jest taka sama dla manekinów M50 i F5. Funkcja ryzyka obrażeń szyi jest taka sama dla wszystkich manekinów, bowiem wskaźnik N_{ij} obliczany jest przy wykorzystaniu granicznych wartości sił i momentów działających na szyję, które są różne dla poszczególnych manekinów (por. tabela 3). Funkcja ryzyka obrażeń klatki piersiowej, ze względu na C_{Acc} jest taka sama dla wszystkich manekinów.



Rys. 6. Funkcje ryzyka obrażeń (AIS3+) głowy, szyi i torsu manekinów M50, F5 i 6YO [7, 10]

Na podstawie wartości wskaźników HIC_{15} , N_{ij} , C_{Acc} i C_{max} (rys. 5) oraz funkcji ryzyka obrażeń (rys. 6), obliczono ryzyko obrażeń AIS3+ głowy, szyi i klatki piersiowej, odpowiednio P_{HIC15} , P_{Nij} , P_{CAcc} oraz P_{Cmax} . Ryzyko obrażeń głowy (P_{HIC15}) kierowcy nie przekracza 4% a pasażera na przednim fotelu 7%, niezależnie od rodzaju manekina i prędkości zderzenia. Ryzyko obrażeń szyi (P_{Nij}) manekinów M50 jest 5÷11% przy obu wartościach prędkości (48 i 56 km/h). Wartości ryzyka obrażeń szyi manekinów F5 są wyraźnie większe i wynoszą 6÷24% przy prędkości 40 km/h i 7÷50% przy 56 km/h. Ryzyko obrażeń klatki piersiowej, uwzględniające jej przyspieszenie (P_{CAcc}), jest kilka razy większe niż wynikające z ugięcia (P_{Cmax}). W przypadku manekinów F5 na fotelach przednich:

- ryzyko P_{CAcc} jest 21÷41% przy prędkości 40 km/h i 40÷70% przy prędkości 56 km/h;
- ryzyko P_{Cmax} jest 2÷8% przy prędkości 40 km/h i 3÷14% przy prędkości 56 km/h.

Dla manekinów M50 na fotelach przednich:

- ryzyko P_{CAcc} jest 21÷37% przy prędkości 48 km/h i 25÷50% przy prędkości 56 km/h;
- ryzyko P_{Cmax} jest 1÷9% przy prędkości 48 km/h i 1÷11% przy prędkości 56 km/h.

Ryzyko obrażeń pasażerów na tylnych fotelach jest większe niż na fotelach przednich. Ryzyko obrażeń głowy P_{HIC15} przy prędkości 40 km/h nie przekracza 3%, a przy prędkości 56 km/h jest

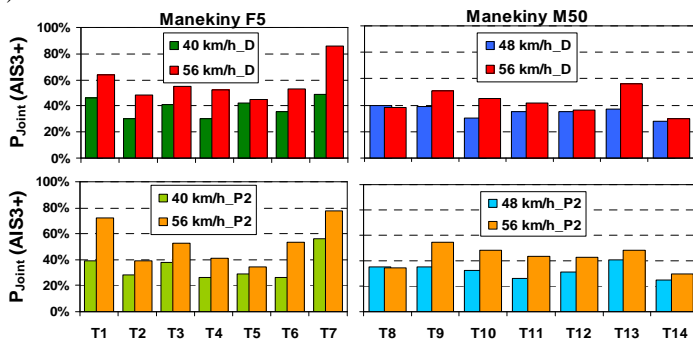
8÷28%. Ryzyko obrażeń szyi P_{Nij} jest 10÷16% przy prędkości 40 km/h oraz 16÷30% przy 56 km/h. Największe wartości ryzyka obrażeń manekinów na tylnych fotelach dotyczą klatki piersiowej. Dla manekina F5 wynikają one z opóźnienia klatki piersiowej: P_{CAcc} jest 20÷54% przy prędkości 40 km/h oraz 34÷80% przy 56 km/h. W jednym z testów (T5, 56 km/h) ugięcie klatki piersiowej manekina 6YO jest aż 65 mm, co daje ryzyko poważnych obrażeń 76%.

Ryzyko śmierci lub kalectwa osoby, która doznała wielu urazów jest większe, niż gdyby obrażenia dotyczyły tylko jednej części ciała. Uwzględnia to wskaźnik ryzyka P_{Joint} (*Joint Probability of Injury*), który wyraża całkowite ryzyko obrażeń [7]:

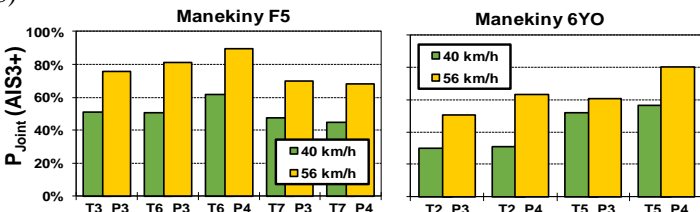
$$P_{Joint} = 1 - (1 - P_{HIC_{15}}) \cdot (1 - P_{Nij}) \cdot (1 - P_{Chest}) \quad (3)$$

Jako ryzyko obrażeń klatki piersiowej P_{Chest} przyjęto większą z wartości P_{CAcc} i P_{Cmax} (P_{Cmax} wykorzystano tylko do manekina 6YO, bowiem dla F5 i M50 zawsze było $P_{CAcc} > P_{Cmax}$). Wyniki obliczeń ryzyka poważnych obrażeń P_{Joint} (AIS3+) osób na fotelach przednich (D i P2) w testach T1-T14 podano na rysunku 7a, a pasażerów na fotelach tylnych (P3 i P4) na rysunku 7b (manekiny F5 w testach T3, T6 i T7 oraz 6YO w testach T2 i T5). Wartości ryzyka obrażeń osób na przednich fotelach przy prędkości uderzenia 56 km/h są tu porównywalne z danymi z rzeczywistych wypadków drogowych (rys. 1a).

a)



b)

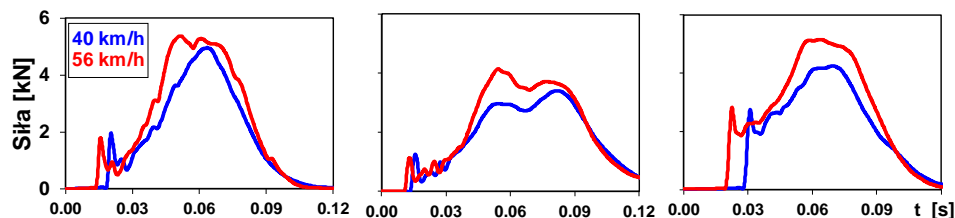


Rys. 7. Wpływ prędkości zderzenia na ryzyko obrażeń AIS3+; a) kierowcy (D) i pasażera (P2), b) pasażerów na tylnych fotelach (P3 i P4)

Wpływ zmiany prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę na zmianę ryzyka obrażeń jest różny w poszczególnych samochodach. Przykładowo zwiększenie prędkości uderzenia z 40 km/h do 56 km/h zwiększa ryzyko poważnych (AIS3+) obrażeń 5-centylowej kobiety na fotelu kierowcy o 3% w testach T5, o 18% w testach T1, T2, T6 oraz o 36% w testach T7. Natomiast zwiększenie prędkości uderzenia z 48 km/h do 56 km/h nie zmienia ryzyka poważnych obrażeń 50-centylowego mężczyzny na fotelu kierowcy w testach T8, T12, T14 lub powoduje wzrost tego ryzyka o 15-19% w testach T10 i T13.

6. Wpływ prędkości zderzenia na przemieszczenia manekinów

Ruch torsu ograniczony jest przez poduszkę gazową oraz pas bezpieczeństwa, przy czym skuteczność działania pasa bezpieczeństwa jest tym większa, im wcześniej zostanie on napięty. Na rysunku 8 podano realizacje siły rozciągającej taśmę pasa, która była napięta za pomocą napinacza. Przy prędkości 56 km/h napinacze napięły taśmę pasa wcześniej niż przy 40 km/h, bowiem przy większej prędkości zderzenia samochód szybciej osiąga progową wartość opóźnienia, wykorzystywaną przez sterownik napinaczy. Różny czas działania napinaczy jest widoczny zwłaszcza w samochodach z testów T6, które uderzały w barierę deformowalną, a opóźnienie samochodu narastało wolniej, niż podczas uderzenia w barierę sztywną (por. rys.3).



Rys. 8. Realizacje siły rozciągającej taśmę pasa kierowcy (manekin F5) w testach T1, T2 i T6

Ważną rolę w kształtowaniu obciążeń głowy, szyi i torsu manekina ma szybkość napełniania i opróżniania poduszki gazowej. Istotne są także: prędkość i pochylenie głowy oraz stan napełnienia poduszki w chwili kontaktu z manekinem oraz miejsce kontaktu głowy z poduszką. Czynniki te zależą od rozmiaru manekina i jego ustawienia na fotelu. Oddziaływanie poduszki gazowej na manekiny F5 i M50 jest różne, gdyż głowa manekina F5 jest bliżej koła kierownicy niż głowa manekina M50 (o około 100 mm; fotel z manekinem F5 był w skrajnym przednim położeniu). Ponadto głowy manekinów F5 i M50 są na różnej wysokości, a ich masa odpowiednio 3,7 kg i 4,5 kg. Skuteczność działania poduszki gazowej może zależeć także od prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę. Na rysunku 9 pokazano położenie głowy manekina (kierowca) względem poduszki w następujących fazach (od lewej):

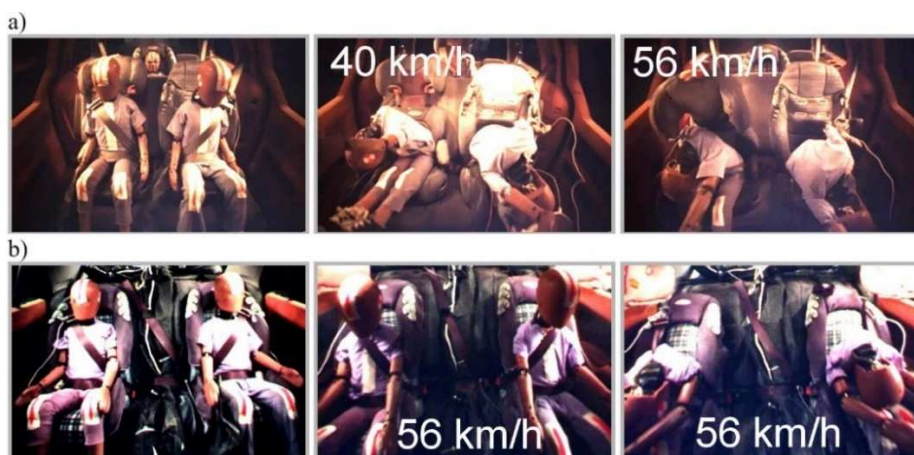
- początek kontaktu z poduszką,
- maksymalne przemieszczenie głowy do przodu,
- koniec kontaktu głowy z poduszką (przemieszczenie głowy do tyłu).

Wykorzystano tu filmy z testów tego samego modelu samochodu m.in. z testu T8. Rysunek 9a dotyczy manekina M50 przy prędkości uderzenia samochodu w barierę 32 i 48 km/h. W obu przypadkach głowa manekina uderza tu w napełnioną poduszkę, choć przy prędkości 48 km/h napełnienie poduszki w chwili jej kontaktu z głową jest mniejsze. Dekompresja poduszki przy prędkości 32 km/h rozpoczyna się, gdy głowa jest w ruchu powrotnym w kierunku oparcia fotela. Dekompresja poduszki przy prędkości 48 km/h rozpoczyna się jeszcze podczas ruchu głowy do przodu, co łagodzi uderzenie o poduszkę. Ważne tu jest, że przy maksymalnym przemieszczeniu głowy do przodu poduszka nadal pozostaje częściowo napełniona. Rysunek 9b dotyczy manekina F5 przy prędkości uderzenia samochodu w barierę 32 i 56 km/h. W obu przypadkach głowa manekina, który siedzi blisko koła kierownicy (fotel w przednim położeniu), uderza w rozwijającą się poduszkę. Przy prędkości 32 km/h głowa zostaje odrzucona przez poduszkę, która ulega tu bardzo małej deformacji. Przy prędkości 56 km/h głowa powoduje znaczne ugięcie poduszki, której dekompresja rozpoczyna się w końcowej fazie ruchu głowy do przodu.



Rys. 9. Przemieszczenia manekina względem poduszki w tym samym modelu samochodu (opracowano na podst. [24]); a) manekin M50, prędkość 32 i 48 km/h; b) manekin F5, prędkość 32 i 56 km/h

Na tylnych fotelach zwykle są przewożone dzieci. Przemieszczenia manekinów na tylnych fotelach nie są ograniczone poduszką gazową, a pasy bezpieczeństwa nie mają napinaczy. Skuteczność pasa bezpieczeństwa zależy od rodzaju zastosowanego urządzenia ochronnego dla dziecka [20]. Na rysunku 10 pokazano przemieszczenia manekinów 6YO.



Rys. 10. Przemieszczenia manekinów 6YO na tylnych fotelach (opracowano na podst. [24]); a) samochody w testach T5 (40 i 56 km/h); b) samochód w teście T2 (56 km/h)

Rysunek 10a przedstawia manekiny w samochodach z testów T5 tuż przed uderzeniem w barierę oraz przy maksymalnym pochyleniu głowy, przy prędkości uderzenia samochodu w barierę 40 i 56 km/h. Manekiny są tu na różnych fotelikach, jednak w obu przypadkach taśma pasa zsuwa się z barku, co umożliwia znaczne przemieszczenie manekina. W efekcie głowa manekina siedzącego z lewej strony uderza o udo, zarówno w teście przy prędkości uderzenia 40 km/h, jak i przy 56 km/h. Ugięcie klatki piersiowej manekinów jest tu większe (45÷65 mm) niż dopuszczalne, określone w tabeli 3.

Na rysunku 10b mamy manekiny w samochodzie z testu T2 podczas zderzenia przy prędkości 56 km/h (w kolejności od lewej: przed zderzeniem, początek ruchu manekinów i maksymalne przemieszczenie manekinów). Oba manekiny są na takich samych fotelikach. Taśma pasa jest w prowadnicy oparcia fotelika i nie zsuwa się z barku na ramię, ale z klatki piersiowej pod szyję (środkowa fotografia na rysunku 10b). Przy prędkości 40 km/h wystąpiły podobne przemieszczenia manekina oraz taśmy pasa. Ugięcie klatki piersiowej manekinów w testach T2 jest znacznie mniejsze niż w testach T5, gdzie pas zsuwał się w dół klatki piersiowej, mocno naciskając na żebra.

7. Podsumowanie

Analiza wyników 28 testów zderzeniowych (14 modeli samochodów) umożliwiła ocenę wpływu prędkości zderzenia na ryzyko obrażeń osób na przednich i tylnych fotelach. Uwzględniono trzy wartości prędkości czołowego uderzenia samochodów w barierę: 40, 48 i 56 km/h, co wynikało z dostępności wyników testów zderzeniowych [24]. Przy większej prędkości uderzenia w barierę czołowa strefa zgniotu samochodu ulega większej deformacji, jednak zwiększa się wartość opóźnienia samochodu. Jego wartość maksymalna jest znacznie mniejsza niż wartość maksymalna opóźnienia manekina, bowiem ruch manekina względem fotela wynika z działania urządzeń zabezpieczających (pas bezpieczeństwa i poduszka gazowa). Przykładowo w testach T6 (rys. 4) maksymalna wartość opóźnienia głowy manekina F5 na tylnym fotelu jest około 2 razy większa niż maksymalna wartość opóźnienia samochodu przy prędkości uderzenia 40 km/h i ponad 2,5 razy większa przy prędkości 56 km/h.

Wyniki pomiarów obciążeń manekinów wykorzystano do obliczenia wskaźników obrażeń, a następnie ryzyka poważnych obrażeń AIS3+. O wartości ryzyka obrażeń P_{Joint} decydują obciążenia torsu, niezależnie od prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę. Uogólniając uzyskane wyniki ustalono, że zwiększenie prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę z 40 km/h do 56 km/h zwiększa ryzyko poważnych obrażeń AIS3+:

- 5-centylowej kobiety na przednich fotelach z 25÷55% do 35÷85%;
- 5-centylowej kobiety na tylnych fotelach z 45÷60% do 70÷90%;
- 6-letniego dziecka na tylnych fotelach z 30÷55% do 50÷80%.

Zwiększenie prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę z 48 do 56 km/h zwiększa ryzyko poważnych obrażeń 50-centylowego mężczyzny na przednich fotelach z 25÷40% do 30÷55%.

Niezależnie od wartości prędkości uderzenia samochodu w barierę widoczne jest nieprawidłowe działanie pasa bezpieczeństwa, przytrzymującego manekin 6YO na foteliku, w obu modelach badanych samochodów. Pasy zsuwają się z barku na ramię (w testach T2) lub pod szyję (w testach T5). Zwrócono także uwagę, że skuteczność działania poduszki gazowej w ochronie 5-centylowej kobiety może zależeć od prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę. Zbyt wczesne uderzenie głową o poduszkę może powodować znaczne obciążenia głowy i szyi.

Literatura

- [1] Anderson R, Doecke S, Mackenzie J, Ponte G. Potential Benefits of Autonomous Emergency Braking Based on In-Depth Crash Reconstruction and Simulation. The 23th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Paper Number 13-0152. Seoul 2013.
- [2] Augenstein J, Perdeck E, Stratton J, Lehman W, Digges K, Bahouth G. Characteristics of Crashes that Increase the Risk of Serious Injuries. 47th Annual Proceedings Association for the Advancement of Automotive Medicine. Lisbon, 2003: pp. 561-576
- [3] Blincoe L, J. The economic cost of motor vehicle crashes 1994. NHTSA Technical Report DOT HS 808 425, USA 1996.
- [4] Blincoe L, Seay A, Zaloshnja E, Miller T R, Romano E, Luchter S, Spicer R. The Economic Impact of Motor Vehicle Crashes 2000, NHTSA Technical Report DOT HS 809 446. Washington 2002.
- [5] Cichos D, Otto M, Zölsch S, Clausnitzer S, Vetter D, Pfeiffer G, de Vogel D, Schaar O. Crash analysis criteria description. Arbeitskreis Messdatenverarbeitung Fahrzeugsicherheit. Germany 2011.
- [6] Jażdżik-Osmólska A et al. Metodologia i wycena kosztów wypadków drogowych na sieci dróg w Polsce na koniec roku 2011. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Warszawa 2012.
- [7] New Car Assessment Program. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Federal Register Vol. 73, No. 134. USA 2008.
- [8] Nusholtz G, Xu L, Berliner J. Evaluation of the Hybrid III 10-year-old Dummy Chest Response in the Sled Test Environment. SAE 2010-01-0137, 2010.
- [9] Prochowski L, Żuchowski A. Analysis of the influence of passenger position in a car on a risk of injuries during a car accident. Eksploatacja i Niezawodność-Maintenance and Reliability 2014; 16(3): 360-366.
- [10] Proposed Amendment to FMVSS No 213 Frontal Test Procedure, NHTSA, USA, 2002.
- [11] SAE J1727, Calculation Guidelines for Impact Testing, 2010.
- [12] Schmitt K U, Niederer P F, Muser M H, Walz F. Trauma biomechanics. Accidental injury in traffic and sports. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.
- [13] Spicer R S, Miller T R. Uncertainty Analysis of Quality Adjusted Life Years Lost. Final Report to the National Highway Traffic Safety Administration. Pacific Institute for Research and Evaluation. 2010.
- [14] Stitzel J D, Kilgo P, Schmotzer B, Gabler H C, Meredith J W, A Population-Based Comparison of Ciren and NASS Cases Using Similarity Scoring. 51st Annual Proceedings Association for the Advancement of Automotive Medicine. Melbourne, 2007.
- [15] Symon E. Wypadki drogowe w Polsce (2001-2017); (<http://statystyka.policja.pl>).
- [16] Tire Pressure Monitoring System FMVSS No. 138 – Final Regulatory Impact Analysis, U.S Department of Transportation. Washington, 2005.
- [17] U.S. Department of Transportation NHTSA, Laboratory Test Procedure, TP208-14, 2008.
- [18] Wicher J. Is it worth limiting the travel speed? The Archives of Automotive Engineering 2015; 69(4): 105-114.

- [19] Żuchowski A. Analysis of the influence of the impact speed on the risk of injury of the driver and front passenger of a passenger car. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2016; 18 (3): 436–444, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2016.3.16>.
- [20] Żuchowski A. Influence of the type of a child restraint system used on the kinematics and loads of a child in a motorcar during a frontal impact. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*. 2013; 61(3): 65–79.
- [21] Żuchowski A. Risk of injury for the front and rear seat passengers of the passenger cars in frontal impact. *Journal of KONES Powertrain and Transport* 2012; 19(3): 507-518.
- [22] Żuchowski A. The use of energy methods at the calculation of vehicle impact velocity. *The Archives of Automotive Engineering* 2015; 68(2): 85-111.
- [23] Żukowska J, Piskorz K, Radzikowski T. Stan bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz działania realizowane w tym zakresie w 2014 r. Krajowa Rada BRD, Warszawa 2015.
- [24] National Highway Traffic Safety Administration [cited 01 Mar 2018]. Available from www.nhtsa.gov.