

Dr inż. Andrzej Żuchowski

Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu
Wydział Mechaniczny
Wojskowa Akademia Techniczna
00-908 Warszawa
ul. Gen. S. Kaliskiego 2
E-mail: andrzej.zuchowski@wat.edu.pl

Ocena wpływu prędkości zderzenia na ryzyko obrażeń kierowcy i pasażera samochodu osobowego

Słowa kluczowe: wypadki drogowe, testy zderzeniowe, prędkość zderzenia, ryzyko obrażeń

Streszczenie: Rozważono wpływ prędkości uderzenia samochodu osobowego w przeszkodę na ryzyko obrażeń kierowcy oraz pasażera na przednim fotelu. W tym celu wykorzystano wyniki kilkuset testów zderzeniowych, udostępnionych w Internecie przez *National Highway Traffic Safety Administration (USA)*. Uwagę skupiono na czołowe uderzenie samochodu w sztywną barierę. Podczas oceny obciążeń manekinów wykorzystano wskaźniki obrażeń głowy HIC_{36} oraz torsu C_{Acc} , które oblicza się na podstawie wypadkowego przyspieszenia działającego na głowę i tors manekina. Oddzielnie rozważono obciążenia manekina reprezentującego 50-centylowego mężczyznę (M50) oraz 5-centylową kobietę (F5). Przeprowadzono statystyczną ocenę wyników testów zderzeniowych, której celem było określenie dominujących wartości wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} oraz ryzyka ciężkich obrażeń kierowcy i pasażera przy danej prędkości zderzenia. Ryzyko obrażeń obliczono na podstawie dostępnych w literaturze tzw. *funkcji ryzyka obrażeń*. Ustalono, że zwiększenie prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę z 25 km/h do 56 km/h zwiększa ryzyko ciężkich obrażeń (AIS4) kierowcy i pasażera z 2 do 10%. Zaproponowano funkcje wiążące ryzyko obrażeń i prędkość zderzenia.

1. Wprowadzenie

Prędkość jazdy jest podstawowym parametrem eksploatacyjnym samochodu. Uwzględniana jest podczas projektowania dróg i ulic, decyduje o czasie podróży, ale jednocześnie wpływa na ryzyko wypadku drogowego i jego skutki. Powszechnie stosowanym środkiem poprawy bezpieczeństwa na drogach są przepisy ograniczające prędkość jazdy. Jednak często jest to środek nieskuteczny, bowiem wielu kierowców nie akceptuje tych ograniczeń i nie stosuje się do nich. W Unii Europejskiej 40÷50% kierowców przekracza prędkość dopuszczalną na danym odcinku drogi, przy czym 10÷20% kierowców o 10 km/h i więcej [22]. Z badań prowadzonych w Polsce w latach 2013-2014 wynika, że około 30% kierowców przekracza dopuszczalną prędkość o więcej niż 10 km/h [2]. Rozwój środków nadzoru powoduje, że udział wypadków spowodowanych nadmierną prędkością w ostatnich latach maleje, od 31% w 2007 r. do 26% w 2014 r. W odniesieniu do liczby zabitych jest to zmiana od 47% do 39%.

Na etapie doboru prędkości dopuszczalnej oraz sposobu jej nadzorowania uwzględnia się wiele czynników związanych m.in. z geometrią i widocznością drogi, stanem nawierzchni, natężeniem ruchu i jego strukturą. Ważny jest także wpływ prędkości jazdy na skutki wypadku [5, 21]. Coraz częściej stosowane w samochodach urządzenia rejestrujące parametry ruchu (*Event Data Recorder*) ułatwiają ocenę relacji pomiędzy prędkością zderzenia a obrażeniami osób jadących [3, 4, 8, 9]. Natomiast nadal trudnym zadaniem jest prognozowanie obrażeń człowieka na podstawie pomierzonych obciążeń, jakie działają na manekiny pomiarowe podczas testów zderzeniowych samochodów.

Wymagania normatywne dotyczące testów zderzeniowych samochodów określają zwykle jedną wartość prędkości testowej (np. Regulaminy ECE ONZ nr 44, 80, 94, 95). Wyniki badań laboratoryjnych, w których oceniano wpływ prędkości zderzenia na obciążenia osób jadących są rzadko publikowane. Wynika to zapewne z kosztów takich badań. W celu ich ograniczenia niekiedy ten sam egzemplarz samochodu uderza w przeszkodę przy kilku wartościach prędkości. Przykładowo w pracy [14] opisano wyniki badań obciążeń kierowcy samochodu osobowo-terenowego przy prędkości zderzenia 4, 10 i 43 km, a w pracy [20] autobusu przy prędkości około 4, 7 i 30 km/h. Częściej prezentowane są wyniki badań modelowych. W pracach [10, 12] analizowano obciążenia modeli manekinów przy prędkości zderzenia 70÷90 km/h, czyli znacznie większej niż w typowych testach zderzeniowych (30÷64 km/h). Wyniki badań wpływu prędkości zderzenia samochodów służą do oceny skuteczności urządzeń bezpieczeństwa biernego, ale także do prognozowania obrażeń kierowcy na potrzeby aktywowania systemu e-Call (systemu automatycznego powiadamiania o wypadku) [12] lub szacowania kosztów wypadków drogowych [10].

Celem pracy jest ocena wpływu prędkości uderzenia samochodu w sztywną przeszkodę na obciążenia dynamiczne kierowcy i pasażera na przednim fotelu. Stanowią one podstawę do oceny ryzyka obrażeń osób jadących. Obliczono je na podstawie dostępnych w literaturze tzw. *funkcji ryzyka obrażeń*, uwzględniających obciążenia głowy i klatki piersiowej (torsu) manekinów. W pracy wykorzystano wyniki testów zderzeniowych, udostępnionych w Internecie przez *National Highway Traffic Safety Administration* [24]. Wyniki oceny ryzyka obrażeń, prowadzonej na podstawie wyników badań laboratoryjnych, odniesiono do danych z wypadków drogowych. Cel pracy jest ukierunkowany na identyfikację czynników konstrukcyjnych i eksploatacyjnych, decydujących o obciążeniach pasażerów podczas wypadku drogowego oraz konieczności minimalizacji tych obciążeń.

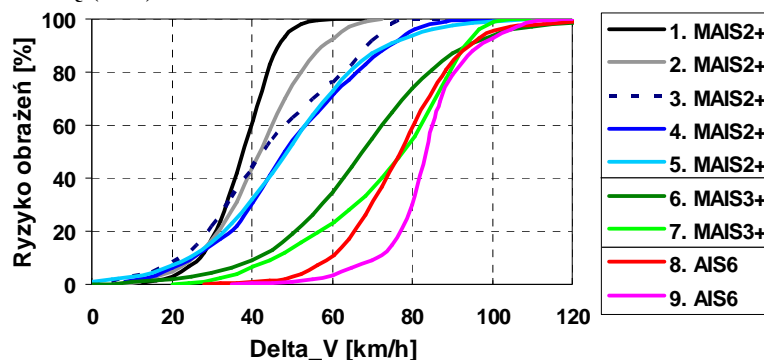
2. Prędkość zderzenia a skutki wypadku drogowego

Skutki wypadku drogowego zależą od wielu czynników, związanych z parametrami ruchu i rodzajem pojazdu, właściwościami drogi i jej otoczenia (rodzaj przeszkody) oraz człowiekiem (cechy antropometryczne, wiek, stan zdrowia). Są to głównie prędkość uderzenia w przeszkodę (lub inny samochód), kierunek uderzenia (czołowe, boczne), rodzaj urządzeń ochronnych zastosowanych w samochodzie. Ważne są także masa i wzrost osoby jadącej, jej miejsce w samochodzie oraz pozycja na fotelu [15, 25, 28]. Liczne badania pokazują, że skuteczność urządzeń ochronnych zależy od staranności ich stosowania (np. odpowiednie ułożenie i napięcie taśmy pasa bezpieczeństwa, odpowiedni fotelik dla dziecka) [29]. Dlatego ocena wpływu prędkości zderzenia (jednego z wielu czynników) na skutki zderzenia wymaga zachowania podczas badań niezmiennych innych czynników.

W ocenie obrażeń poszkodowanych w wypadkach drogowych często stosowana jest sześciostopniowa skala *AIS* (*Abbreviated Injury Scale*), w której określonym obrażeniom przypisano wyrażony cyfrą stopień. Wyższy stopień oznacza większe zagrożenie dla życia. Rozważając obrażenia obejmujące co najmniej dany stopień np. AIS3 i wyższe, stosuje się zapis AIS3+. W opisie poszkodowanych z licznymi obrażeniami stosowana jest skala *MAIS* (*Maximum AIS*) [17].

Na podstawie analizy danych z wypadków drogowych opracowywane są modele statystyczne, które umożliwiają ocenę wpływu prędkości zderzenia na ryzyko obrażeń osób jadących. Na podstawie kilku prac z lat 2003-2012 [4, 8, 9, 16, 18, 23] na rysunku 1 zestawiono funkcje ryzyka obrażeń osób jadących (wyniki regresji logistycznej), które dotyczą zderzenia czołowego (obszar zderzenia tzw. *overlap* powyżej 25% i kąt uderzenia w zakresie $\pm 30^\circ$). Poszczególne linie na wykresie opisują ryzyko obrażeń MAIS2+, MAIS3+ oraz AIS6 (śmiertelne). Obrażenia klasyfikowane są jako MAIS2, gdy wystąpi np.

wstrząśnienie mózgu, pęknięcie żuchwy, pęknięcie sklepienia czaszki, złamanie 2-3 żeber, złamanie mostka. Obrazy MAIS3 to np. wstrząśnienie mózgu z utratą przytomności, złamanie szczęki lub podstawy czaszki, stłuczenie płuc lub serca, złamanie 4 i więcej żeber po jednej stronie [12, 17, 21]. Niektóre dane o uwzględnionych na rysunku 1 wypadkach zestawiono w tabeli 1. Dotyczą one kierowcy oraz pasażera na przednim fotelu (mężczyźni i kobiety w różnym wieku), zapiętych pasem bezpieczeństwa, podczas zderzenia czołowego samochodu osobowego: z innym samochodem osobowym (S-S), z samochodem ciężarowym (S-C) lub z przeszkodą (S-P).



Rys.1. Ryzyko obrażeń kierowcy i pasażera na przednim fotelu podczas zderzenia czołowego (opis linii podano w tabeli 1)

Tabela 1. Dane o wypadkach uwzględnionych w ocenie ryzyka obrażeń na rysunku 1

Nr linii na rys.1	Stopień obrażeń	Liczba poszkodowanych	Rodzaj zderzenia	Kraj	Źródło
1	MAIS2+	11 (D+FP)*	S-C	Szwecja	[18]
2		55 (D+FP)	S-S	Szwecja	
3		30 mężczyzn i 12 kobiet (D)		Australia	[9]
4		64 (D+FP)		Szwecja	[8]
5		MAIS3+	145 (D+FP)	S-S (88%), S-P (12%)	USA
6	15 (D+FP)		S-S	Szwecja	[8]
7				Wielka Brytania	[16]
8	AIS6	64 (D)	S-S	Szwecja	[23]
9		brak danych			

*) D – kierowca, FP – pasażer na przednim fotelu

Zmianę prędkości samochodu podczas zderzenia ΔV ustalano na podstawie danych z urządzeń rejestrujących parametry ruchu samochodów (CPR - *Crash Pulse Recorder*, EDR - *Event Data Recorder*), montowanych w niektórych samochodach już od 1992 roku [9]. Podczas zderzenia czołowego dwóch samochodów A i B, jadących z prędkościami V_A i V_B , zmiana prędkości samochodów zależy od ich masy m_A i m_B , co wynika z zasady zachowania pędu [21]:

$$\begin{aligned} \Delta V_A &= (V_A + V_B) \cdot m_B / (m_A + m_B) \\ \Delta V_B &= (V_A + V_B) \cdot m_A / (m_A + m_B) \end{aligned} \quad (1)$$

Zakładając, że czas trwania fazy zderzenia jest taki sam dla obu pojazdów (około 0,1÷0,2 s), to ΔV stanowi o opóźnieniu samochodu a tym samym o wartości sił bezwładności, działających na samochód i osoby jadące, czyli określa intensywność zderzenia. Z zależności (1) wynika, że większe opóźnienie działa na samochód o mniejszej masie. Jeżeli samochody mają jednakową masę, to $\Delta V_A = \Delta V_B = 0,5 \cdot (V_A + V_B)$. W przypadku uderzenia samochodu z prędkością V w nieruchomą i nieodkształcalną przeszkodę $\Delta V \approx V$.

Przedstawione na rysunku 1 wyniki potwierdzają silną zależność ryzyka obrażeń od ΔV . W zakresie obrażeń MAIS2+ potwierdzono, że czołowe zderzenie samochodu

osobowego z ciężarowym jest bardziej niebezpieczne niż z samochodem osobowym (linie nr 1 i 2). Uwagę zwracają:

- dość znaczne różnice w przebiegach linii dotyczących danego stopnia obrażeń (wyjątkiem są tu linie 4 i 5, gdzie mamy podobne funkcje ryzyka MAIS2+ z badań wypadków w Szwecji i USA);
- linie ryzyka 6 i 7 (MAIS3+) są dość blisko linii 8 i 9 (AIS6), czyli w miejscu gdzie spodziewane są linie dotyczące obrażeń AIS4 i AIS5;
- podobne przebiegi linii 7 i 8, gdy $\Delta V > 70$ km/h, choć linie te dotyczą różnych stopni obrażeń (MAIS3+ oraz AIS6).

Takie rezultaty potwierdzają trudności w opracowaniu funkcji (modeli), które opisywałyby zależność ryzyka obrażeń od prędkości zderzenia, a mała liczba uwzględnionych w analizie wypadków (tabela 1), niekorzystnie wpływa na reprezentatywność tych funkcji. Przedziały ufności dla niektórych z podanych tu funkcji ryzyka podano w [4, 16].

Widoczne na rysunku 1 różnice w przebiegach linii ryzyka, dotyczących tego samego stopnia obrażeń, mogą wynikać z innych czynników niż wymienione wyżej kryteria podobieństwa wypadków. Przykładowo w analizowanych wypadkach brały udział samochody produkowane w różnych latach, czyli różniące się standardem układów bezpieczeństwa biernego. Wszystkie poszkodowane osoby miały zapięty pas bezpieczeństwa, jednak brak jest informacji o konstrukcji tych pasów (napinacze, ograniczniki napięcia), która ma bardzo duży wpływ na obciążenia, a tym samym na obrażenia osoby chronionej [27]. Ważny jest także wiek i cechy antropometryczne kierowcy i pasażera [3, 13].

3. Wskaźniki do oceny ryzyka obrażeń

Obrażenia kierowcy i pasażerów podczas wypadku drogowego są skutkiem obciążeń dynamicznych, wynikających z gwałtownego zatrzymania samochodu. Obciążenia te mierzone są w testach zderzeniowych głównie jako przyspieszenia i siły, działające na elementy manekina. Dalej uwagę skupiono na przyspieszeniu głowy i klatki piersiowej (torsu) manekinów, reprezentujących 50-centylowego mężczyznę (M50) oraz 5-centylową kobietę (F5). Wykorzystano dwa wskaźniki:

- HIC_{36} , wskaźnik obrażenia głowy (*Head Injury Criterion*), obliczany w czasie do 36 ms;
- C_{Acc} , maksymalne wypadkowe przyspieszenie torsu [g], działające co najmniej 3 ms.

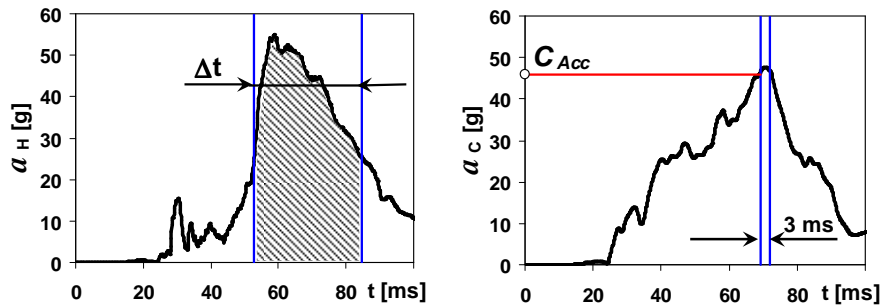
Wskaźnik HIC_{36} obliczany jest na podstawie przyspieszenia głowy i czasu jego działania [1, 21]:

$$HIC_{36} = \max \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} a_H(t) dt \right]^{2.5} \cdot (t_2 - t_1) \quad (2)$$

gdzie:

$a_H(t)$ - wypadkowe przyspieszenie [g] środka masy głowy manekina (filtracja *CFC1000*), obliczane ze składowych pomierzonych w trzech, wzajemnie prostopadłych kierunkach, $\Delta t = t_2 - t_1 \leq 0,036$ s - przedział czasu [s], w którym występują największe wartości $a_H(t)$.

Wskaźnik C_{Acc} wyznaczany jest z realizacji wypadkowego przyspieszenia torsu $a_C(t)$, przy czym jego składowe, pomierzone w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach, przefiltrowano filtrem *CFC180* [1]. Na rysunku 2 podano przykład realizacji wypadkowego przyspieszenia głowy i torsu. Linie niebieskie określają przedział czasu, w jakim obliczane są wskaźniki. Zakreskowane pole pod linią $a_H(t)$ oznacza wartość całki z wyrażenia (2).



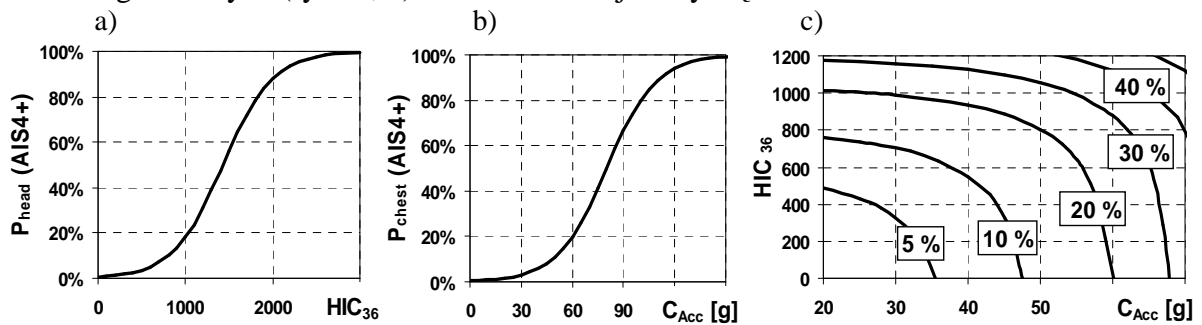
Rys.2. Wypadkowe przyspieszenie głowy i torsu manekina (przykład)

Wartości wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} wykorzystano do obliczenia ryzyka (prawdopodobieństwa) obrażeń głowy i torsu. W tym celu wykorzystano funkcje ryzyka (*Injury Risk Curves*) ciężkich obrażeń (AIS4+) głowy i torsu [1, 11, 25]:

$$P_{head}(AIS4+) = \{1 + \exp[5,02 - 0,00351 \cdot HIC_{36}]\}^{-1} \quad (3)$$

$$P_{chest}(AIS4+) = \{1 + \exp[5,55 - 0,0693 \cdot C_{Acc}]\}^{-1} \quad (4)$$

Funkcje ryzyka obrażeń, wyrażonego w procentach, podano na rysunku 3. Wartości graniczne wskaźników dla manekinów M50 i F5 są $HIC_{36} = 1000$ i $C_{Acc} = 60$ g [1, 21]. Ryzyko ciężkich obrażeń AIS4+ głowy i torsu nie przekracza wówczas 20%, natomiast silnie narasta powyżej wartości granicznych (rys.3a, b). Te same funkcje dotyczą manekinów M50 i F5.



Rys.3. Ryzyko ciężkich obrażeń (AIS4+) głowy i torsu manekinów M50 i F5 (a i b) oraz linie ryzyka P_{comb} (c)

Obciążenia głowy i torsu zwykle nie zmieniają się w podobnym stopniu po zmianie warunków testu zderzeniowego, np. po zmianie prędkości zderzenia. Dlatego do oceny obciążeń manekinów wykorzystano wskaźnik całkowitego ryzyka obrażeń P_{comb} (*combined injury probability criterion*) [1, 11]:

$$P_{comb} = 1 - (1 - P_{head}) \cdot (1 - P_{chest}) = P_{head} + P_{chest} - P_{head} \cdot P_{chest} \quad (5)$$

W dalszej części pracy wykorzystano podany na rysunku 3c wykres $HIC_{36} = f(C_{Acc})$, gdzie poszczególne linie określają wartości HIC_{36} i C_{Acc} , przy których wartości wskaźnika $P_{comb}(AIS4+)$, czyli ryzyka ciężkich obrażeń ciała, są odpowiednio 5, 10, 20, 30 i 40%.

4. Wybór testów zderzeniowych do analizy

Podczas analizy wpływu prędkości zderzenia na obciążenia dynamiczne kierowcy i pasażera wykorzystano wyniki testów zderzeniowych udostępnione w Internecie przez *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) [24]. W bazie danych NHTSA znajdują się wyniki ponad 7000 testów zderzeniowych samochodów z lat 1965-2016, prowadzonych w różnych warunkach badań (rodzaj zderzenia, typ bariery, prędkość zderzenia itp.). Uwagę zwrócono na czołowe uderzenie samochodu w sztywną, płaską barierę, ustawioną prostopadle do kierunku jazdy (rys.4).



Rys.4. Zderzenie czołowe samochodu ze sztywną barierą [24]

Z bazy danych NHTSA wybrano testy zderzeniowe samochodów produkowanych w latach 1990-2010, w których manekiny na przednich fotelach miały zapięte pasy bezpieczeństwa i chronione były przez czołową poduszkę gazową (rys.4). Pominięto najnowsze samochody, bowiem od 2011 roku w bazie danych NHTSA podawane są wartości wskaźnika HIC_{15} ($\Delta t \leq 15 ms$), którym zastąpiono wskaźnik HIC_{36} ($\Delta t \leq 36 ms$).

Prędkość uderzania samochodu w barierę jest tylko jednym z wielu czynników, wpływających na obciążenia manekinów. Dlatego do dalszej analizy wyniki testów zderzeniowych podzielono na kilka grup w taki sposób, aby ograniczyć wpływ innych czynników na rezultat oceny prowadzonej zgodnie z celem pracy. Pierwsze dwie grupy wyników (danych) uzyskano grupując testy zderzeniowe ze względu na rok produkcji samochodu (standard zastosowanych układów bezpieczeństwa biernego):

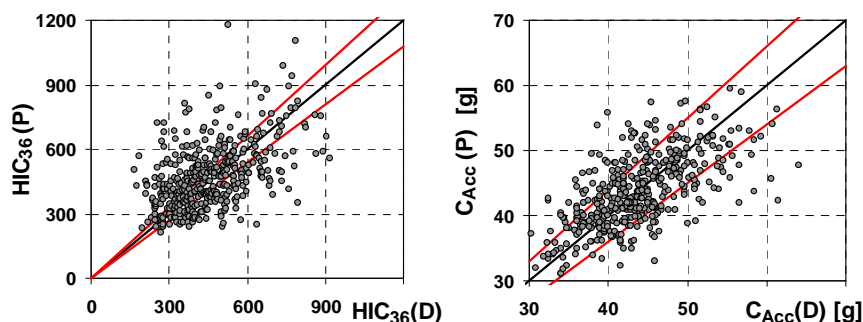
- modele produkowane w latach 1990-1999;
- modele produkowane w latach 2000-2010.

Oddzielnie rozważono wskaźniki dotyczące kierowcy i pasażera, ponieważ obciążenia takich samych manekinów na różnych miejscach w samochodzie mogą się znacznie różnić [25, 28]. Przykładowo na rysunku 5 skojarzono wartości wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} , dotyczące manekina M50 na fotelach kierowcy i pasażera (422 testy, samochody z lat 2000-2010, prędkość 56 km/h). Różnice w wartościach wskaźnika HIC_{36} dla kierowcy i pasażera:

- nie przekraczają $\pm 10\%$ w 111 testach (26% wyników jest pomiędzy liniami czerwonymi);
- są większe niż $\pm 20\%$ w 211 testach (50% testów).

Różnice w wartościach wskaźnika C_{Acc} dla kierowcy i pasażera są następujące:

- nie przekraczają $\pm 10\%$ w 274 testach (65% wyników jest pomiędzy liniami czerwonymi);
- są większe niż $\pm 20\%$ w 31 testach (7% testów).

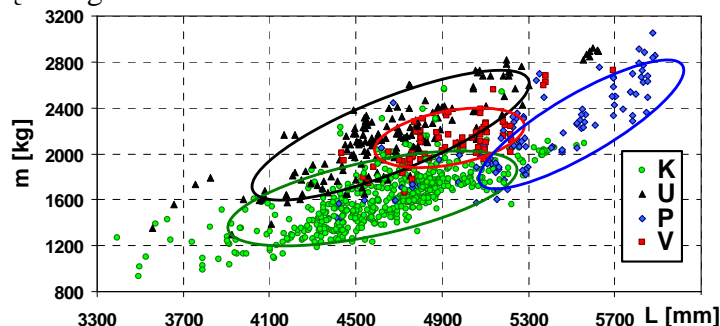


Rys.5. Skojarzenie wartości wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} , obliczonych dla manekina M50 na fotelu kierowcy (D) i pasażera (P); samochody z lat 2000-2010 (56 km/h)

Samochody osobowe różnią się konstrukcją czołowej strefy zgniotu, która istotnie wpływa na proces jej deformacji po uderzeniu w przeszkodę, a tym samym na opóźnienie samochodu [26]. Dlatego dalszy podział testów zderzeniowych na grupy uwzględniał typ samochodu. Największą liczbę stanowiły samochody „klasyczne” (61% testów, masa samochodu podczas testu zderzeniowego 932 ± 2562 kg), do których zaliczono samochody o nadwoziu typu hatchback, sedan, coupe, kombi i kabriolety. Samochody te mają podobną konstrukcję nadwozia samonośnego. Ponadto uwzględniono następujące typy samochodów:

- terenowo-rekreacyjne, o wzmocnionym układzie nośnym, napęd zwykle 4x4 (20% testów, masa 1298÷2917 kg),
- pikapy, o ramowej konstrukcji nośnej (11% testów, masa 1447÷3054 kg),
- vany (8% testów, masa 1661÷2721 kg, w tym minivany).

W celu zobrazowania różnic pomiędzy tymi czterema typami samochodów, na rysunku 6 skojarzono ich masę i długość.



Rys.6. Skojarzenie masy (m) i długości (L) samochodów osobowych (na podstawie [24]);
K - klasyczne, U - terenowo-rekreacyjne, P - pikapy, V – vany

W prowadzonej dalej analizie uwzględniono:

- 788 testów z manekinami Hybrid III M50 na fotelach przednich (w 55 testach z lat 1990-1995 na miejscu pasażera był manekin Hybrid II);
- 125 testów z manekinami Hybrid III F5 na fotelach przednich.

W tabeli 2 podano informację o liczbie testów przy danej prędkości zderzenia, z podziałem na roczniki i typy samochodów (wg klasyfikacji NHTSA) oraz rodzaj manekina. Dominują testy realizowane przy nominalnej prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę 40, 48 oraz 56 km/h (25, 30 i 35 mil/h), przy czym prędkość zderzenia samochodu z manekinem M50 była najczęściej 56 km/h a z manekinem F5 48 km/h. Rzeczywista prędkość uderzenia samochodu w przeszkodę zwykle nie różniła się o więcej niż ± 1 km/h od prędkości nominalnej.

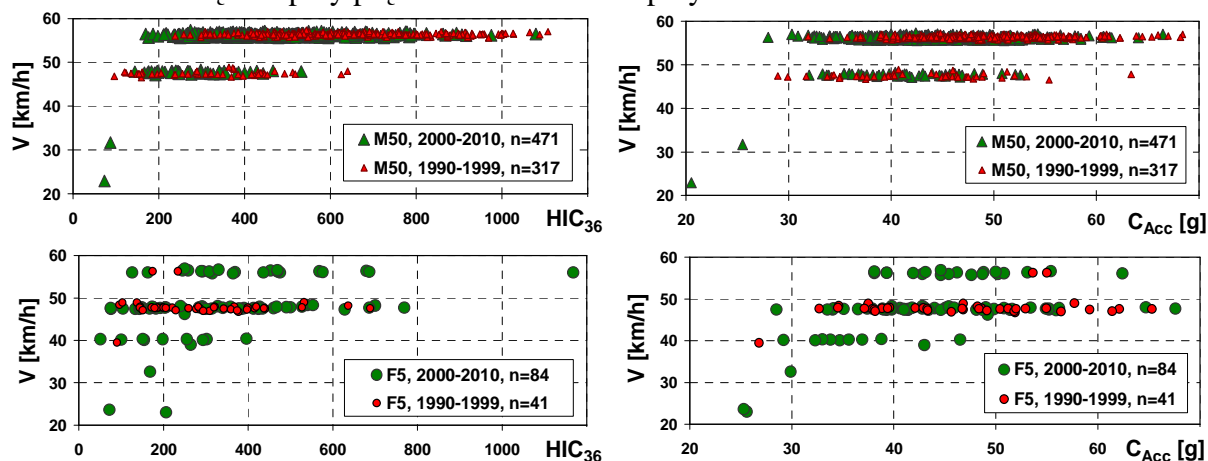
Tabela 2. Liczba testów zderzeniowych uwzględnionych w analizie
(K - klasyczne, U - terenowo-rekreacyjne, P - pikapy, V – vany i minivany)

Prędkość zderzenia	Roczniki samochodów	K		U		P		V		Razem	
		M50	F5	M50	F5	M50	F5	M50	F5	M50	F5
<40 km/h	2000-2010	2	3	0				2	3		
	1990-1999	0	1	0				0	1		
40 km/h	2000-2010	0	7	0	0	0	1	0	2	0	10
	1990-1999	28	30	9	1	3	4	6	3	46	38
48 km/h	2000-2010	40	37	2	3	3	5	2	4	47	49
	1990-1999	171	2	41	0	29	0	30	0	271	2
56 km/h	2000-2010	218	16	127	0	50	2	27	4	422	22
	Razem	459	96	179	4	85	12	65	13	788	125

5. Wstępna ocena wpływu prędkości zderzenia na obciążenia manekinów

Na tym etapie analizy uwzględniono wszystkie typy samochodów (rys. 6). Na rysunku 7 zestawiono wartości wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} w zależności od prędkości uderzenia samochodu w barierę. Dotyczą one manekinów M50 i F5 na fotelu kierowcy. Uwagę zwraca bardzo duży rozrzut wartości wskaźników przy danej prędkości uderzenia samochodu w barierę, niezależnie od lat produkcji samochodów oraz rodzaju manekina. Przykładowo wartości wskaźnika HIC_{36} dla manekina M50, przy prędkości uderzenia samochodu w barierę 56 km/h, zawierają się w przedziale 176÷1079 (samochody z lat 2000-2010). Taki rezultat

wskazuje na bardzo różną skuteczność urządzeń ochronnych w samochodach. Wpływ prędkości uderzenia samochodu w barierę jest bardziej widoczny w obciążeniach manekina M50 niż F5. Wartości wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} dla manekina F5 występują w podobnym przedziale przy prędkości 48 i 56 km/h (samochody z lat 2000-2010). W przypadku manekina M50 wartości maksymalne wskaźnika HIC_{36} są około dwukrotnie większe przy prędkości 56 km/h niż przy 48 km/h. Wartości maksymalne wskaźnika C_{Acc} są dla manekina M50 o około 30% większe przy prędkości 56 km/h niż przy 48 km/h.



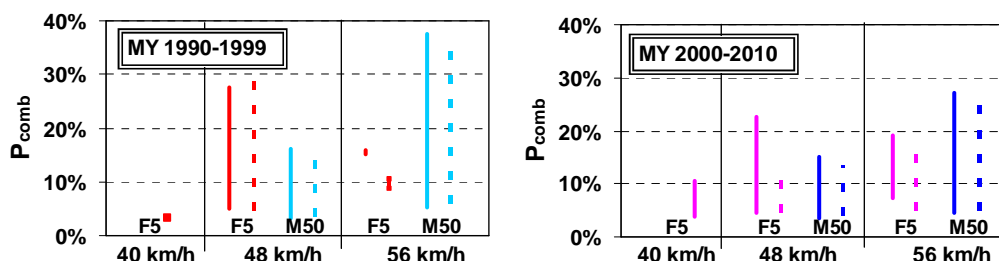
Rys.7. Wpływ prędkości zderzenia na wartości wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} manekinów M50 i F5 na fotelu kierowcy

W prowadzonej dalej ocenie wpływu prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę na obciążenia osób jadących pominięto wyniki 24 testów zderzeniowych, w których wartości wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} przy danej prędkości zderzenia były wyraźnie większe od innych (por. rys.7). W tabeli 3 podano przedziały wartości wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} oraz obliczonych na podstawie (3)÷(5) wartości ryzyka ciężkich obrażeń (AIS4+) kierowcy i pasażera P_{head} , P_{chest} , P_{comb} . Liczba testów z pasażerem (n^*) jest mniejsza niż liczba testów z kierowcą (n), ponieważ pominięto wyniki, które nie spełniały opisanych wcześniej kryteriów podobieństwa warunków badań, np. w niektórych ze starszych modeli samochodów nie było poduszki gazowej dla pasażera lub na fotelu pasażera był inny manekin.

Tabela 3. Przedziały wartości wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} oraz ryzyka P_{head} , P_{chest} , P_{comb}

Manekin	M50				F5					
	1990-1999		2000-2010		1990-1999		2000-2010			
V [km/h]	48	56	48	56	40	48	56	40	48	56
n	44	265	48	417	1	36	2	10	46	20
Przedziały wartości wskaźników obliczonych dla manekina na fotelu kierowcy										
HIC_{36}	90-518	238-1088	144-532	169-894	90	96-636	174-234	51-396	75-628	126-686
C_{Acc} [g]	27-55	32-71	32-53	28-61	27	33-65	54-55	29-47	28-56	38-55
P_{head} [%]	1-4	1-23	1-4	1-13	1	1-6	1	1-3	1-6	1-7
P_{chest} [%]	2-15	3-35	3-13	3-21	2	4-26	14-15	3-9	3-16	5-15
P_{comb} [%]	3-16	5-38	5-15	5-27	3	5-28	15-16	4-11	5-23	7-19
Przedziały wartości wskaźników obliczonych dla manekina na fotelu pasażera (obok kierowcy)										
n^*	38	192	43	417	0	34	2	10	45	18
HIC_{36}	80-573	181-1163	101-536	214-902	-	69-723	174-261	93-298	91-678	196-712
C_{Acc} [g]	26-53	35-64	28-50	29-59	-	32-67	43-47	31-44	30-49	30-52
P_{head} [%]	1-5	1-28	1-4	1-14	-	1-8	1-2	1-2	1-7	1-7
P_{chest} [%]	2-13	4-24	3-11	3-19	-	3-29	7-9	3-7	3-11	3-13
P_{comb} [%]	4-15	6-37	4-14	5-25	-	5-31	9-10	5-9	5-13	5-18

Rozstęp, czyli różnica pomiędzy wartościami maksymalną i minimalną, wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} przy danej prędkości zderzenia jest znaczny, co utrudnia ocenę wpływu prędkości zderzenia na ryzyko obrażeń głowy i torsu. Maksymalne wartości wskaźnika obrażeń głowy są zwykle $HIC_{36} < 900$ a torsu $C_{Acc} < 60$ g. Odpowiadające im ryzyko ciężkich obrażeń (AIS4+) nie przekracza 14% (głowa) i 20% (tors). O wartości całkowitego ryzyka obrażeń P_{comb} decydują obciążenia torsu, niezależnie od prędkości samochodu.



Rys.8. Wpływ prędkości zderzenia na wartości ryzyka P_{comb} (AIS4+);
(linie ciągłe - kierowca, linie przerywane - pasażer)

Na rysunku 8 skojarzono prędkość zderzenia i ryzyko ciężkich obrażeń P_{comb} . Uwzględniając wyniki uzyskane dla obu manekinów (M50 i F5), na miejscach kierowcy i pasażera, ustalono następujące przedziały ryzyka obrażeń:

- samochody z lat 1990-1999
 - $P_{comb} = 4 \div 31\%$, przy 48 km/h;
 - $P_{comb} = 5 \div 38\%$, przy 56 km/h;
- samochody z lat 2000-2010
 - $P_{comb} = 4 \div 11\%$, przy 40 km/h (tylko F5);
 - $P_{comb} = 4 \div 23\%$, przy 48 km/h;
 - $P_{comb} = 5 \div 27\%$, przy 56 km/h.

6. Ocena statystyczna wpływu prędkości zderzenia na obciążenia manekinów

6.1. Zakres analizy statystycznej

Bardziej szczegółową ocenę wpływu prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę na obciążenia i ryzyko obrażeń osób jadących przeprowadzono na podstawie analizy statystycznej wartości wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} oraz wartości ryzyka P_{head} , P_{chest} , P_{comb} , które przyjęto jako zmienne losowe. Do oceny własności ich rozkładów prawdopodobieństwa opracowano histogramy. Na podstawie liczby testów zderzeniowych n oraz rozstępu R danego wskaźnika, pogrupowano ich wartości x_1, x_2, \dots, x_n w k przedziałów (klas) o długości h (interwał klasowy), uwzględniając [6, 7]:

$$k \approx \sqrt{n}; \quad k \leq 5 \log(n); \quad h \approx \frac{R}{k} \quad (6)$$

W ten sposób każdej i -tej klasie przyporządkowano n_i wartości wskaźników (liczność danej klasy) oraz obliczono licznosc względną p_i (częstość), licznosc skumulowaną c_i oraz wartości dystrybuanty F w górnych granicach klas x_i^+ :

$$p_i = \frac{n_i}{n}; \quad c_i = \sum_{j=1}^i n_j, \quad i = 1, 2, \dots, k; \quad F(x_i^+) = \frac{c_i}{n} \quad (7)$$

Na podstawie histogramów wyznaczono wartość modalną (dominantę) [6]:

$$Mo = x_m^- + h \cdot \frac{n_m - n_{m-1}}{2n_m - n_{m-1} - n_{m+1}} \quad (8)$$

gdzie: m – numer przedziału histogramu o największej licznosci; x_i^- , n_m – dolna granica i licznosc przedziału zawierającego modalną.

Do oceny asymetrii i spłaszczenia (koncentracji) analizowanych rozkładów wykorzystano współczynnik asymetrii As oraz kurtozę Ku [6]:

$$As = \frac{\bar{x} - Me}{s}; \quad Ku = \frac{\mu_4}{s^4} \quad (9)$$

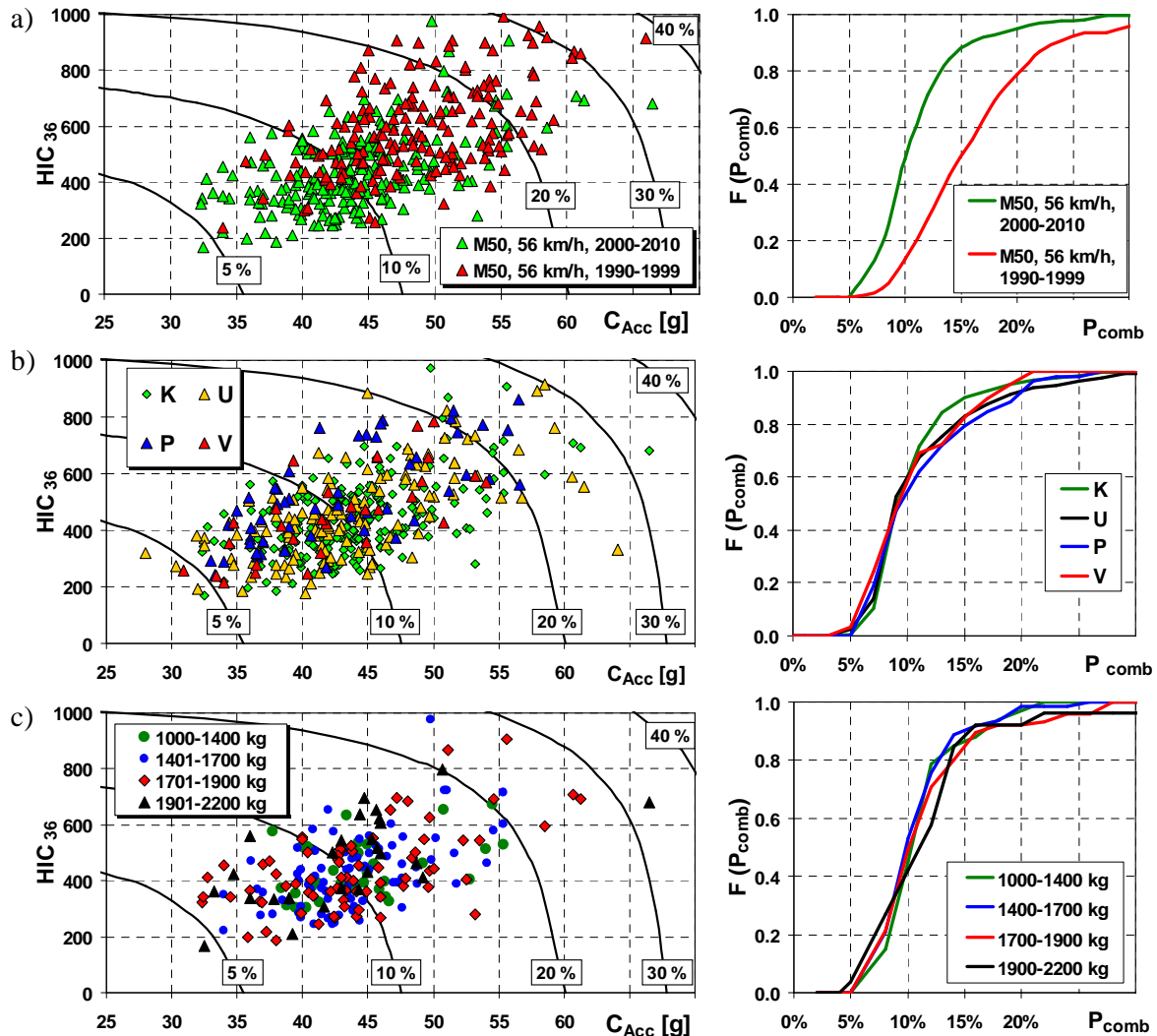
gdzie: \bar{x} - średnia arytmetyczna, Me - mediana, s - odchylenie standardowe, μ_4 - moment centralny rzędu czwartego.

Współczynnik asymetrii $As=0$ dla rozkładu symetrycznego ($\bar{x} = Me = Mo$), $As < 0$ dla rozkładów o asymetrii lewostronnej ($Mo > Me > \bar{x}$) i $As > 0$ dla rozkładów o asymetrii prawostronnej ($Mo < Me < \bar{x}$). Im większa jest wartość bezwzględna współczynnika asymetrii, tym silniejsza jest asymetria rozkładu. Kurtoza $Ku > 3$ i $Ku < 3$ charakteryzuje rozkłady bardziej i mniej skoncentrowane niż rozkład normalny, dla którego $Ku=3$ [6].

6.2. Wpływ lat produkcji, typu i masy samochodu na wartości wskaźników HIC_{36} i C_{Acc}

W punkcie 5 oceniono wpływ prędkości zderzenia na wartości wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} oddzielnie dla samochodów z lat 1990-1999 oraz 2000-2010. Na tym etapie oceniono, czy typ oraz masa samochodu mogą wpływać na znaczny rozstęp wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} przy danej prędkości zderzenia.

Na rysunku 9a zestawiono wartości wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} , dotyczące manekina M50 (kierowca) w samochodach klasycznych. Wartości wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} skojarzono z liniami ryzyka obrażeń (por. rys.3c). Wyraźną różnicę pomiędzy obciążeniami manekinów



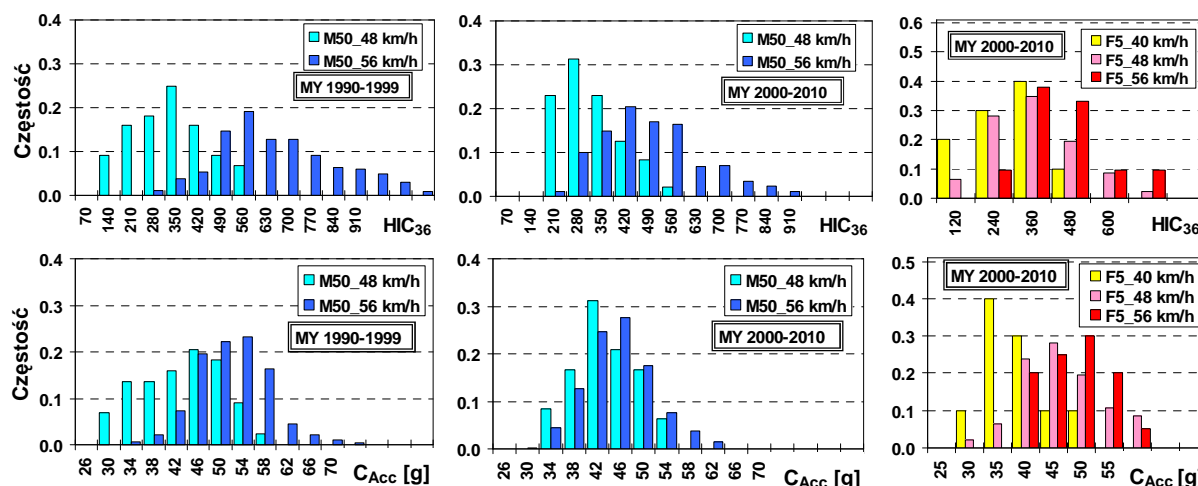
Rys.9. Wskaźniki HIC_{36} i C_{Acc} i dystrybuanty ryzyka obrażeń P_{comb} (AIS4+) (M50, 56 km/h);
a) samochody z lat 1990-1999 oraz 2000-2010; b) różne typy samochodów z lat 2000-2010;
c) różna masa samochodów klasycznych (K) z lat 2000-2010

w samochodach starszych i nowszych potwierdzają dystrybuanty ryzyka obrażeń P_{comb} . Na rysunku 9b zestawiono wartości wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} , dotyczące manekina M50 (kierowca) w samochodach typu: klasyczne (K), terenowo-rekreacyjne (U), pikapy (P) i vany (V), z lat 2000-2010. Samochody klasyczne, których jest tu najwięcej, podzielono dodatkowo na cztery grupy, różniące się masą (rys. 9c). Rozkłady ryzyka P_{comb} , wyrażone za pomocą dystrybuanty $F(P_{comb})$, są podobne zarówno dla różnych typów samochodów jak i różnych wartości masy samochodów klasycznych. Tym samym nie stwierdzono, aby typ lub masa samochodu istotnie wpływały na wzrost wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} .

Na podstawie powyższych ustaleń podzielono testy zderzeniowe na 14 grup (7 z kierowcą i 7 z pasażerem), wyszczególnionych wcześniej w tabeli 3 (8 grup testów z manekinem M50 i 6 grup testów z manekinem F5). Ze względu na małą liczbę testów samochodów z lat 1990-1999 z manekinem F5, przy prędkości 40 i 56 km/h, pominięto je w prowadzonej dalej analizie.

6.3. Wpływ prędkości zderzenia na dominanty wskaźników HIC_{36} i C_{Acc}

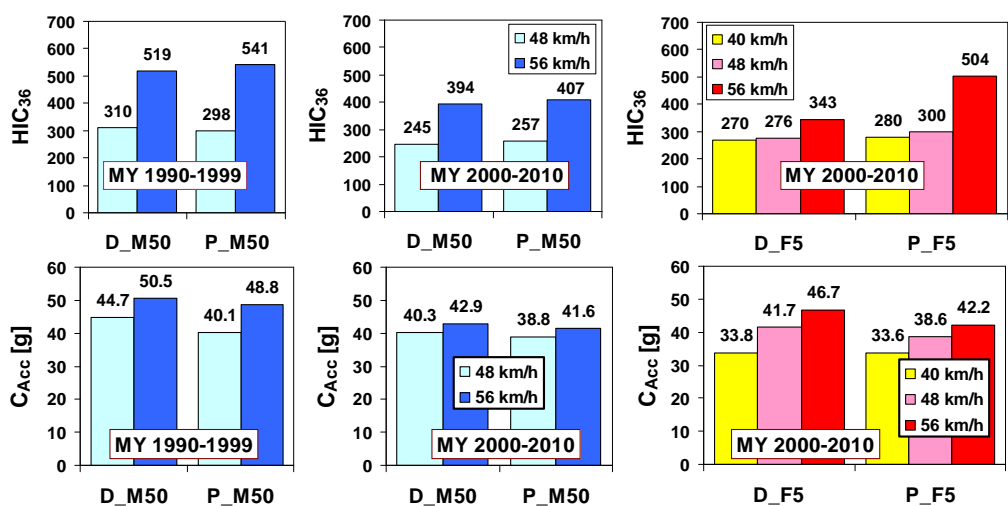
Histogramy wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} , dotyczące obciążenia manekina na fotelu kierowcy, podano na rysunku 10 (dla pasażera opracowano podobne rozkłady). Na osi odciętych są wartości górnych granic klas x_i^+ . Na osi rzędnych jest częstość p_i (7). Liczność testów podano wcześniej w tabeli 3. Na podstawie (6) przyjęto interwały klasowe $h_{HIC} = 70$ i $h_{C_{Acc}} = 4$ g dla wskaźników dotyczących manekina M50 oraz $h_{HIC} = 120$ i $h_{C_{Acc}} = 5$ g dla wskaźników dotyczących manekina F5.



Rys.10. Histogramy częstości wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} dla manekina na fotelu kierowcy; M50 (48 i 56 km/h) i F5 (40, 48 i 56 km/h);

Uwzględniając opisane w punkcie 6.1 miary położenia, zmienności, asymetrii i koncentracji analizowanych rozkładów ustalono, że rozkłady wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} w większości z 14 grup mają bardzo słabą ($|As| < 0,2$) asymetrię prawostronną ($As > 0$, czyli $\bar{x} > Mo$) i koncentrację mniejszą niż rozkład normalny (na ogół $Ku \in (1,7; 2,9)$, a tylko dla 2 grup $Ku > 3$). Ze względu na niesymetryczność rozkładów wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} , do opisu maksimum ich funkcji gęstości przyjęto wartości modalne Mo (rys.11).

Zwiększenie prędkości uderzenia samochodu z 48 do 56 km/h ma większy wpływ na zwiększenie wartości modalnej wskaźnika HIC_{36} niż C_{Acc} . Na podstawie zależności (3) i (4) oceniono, że takie zwiększenie prędkości powoduje zwiększenie wartości modalnej ryzyka ciężkich obrażeń głowy z 2 do 4% a torsu z 5÷6 do 7÷11%.



Rys.11. Wartości modalne wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} (M50 i F5) dla kierowcy (D) i pasażera (P) przy prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę 40, 48 i 56 km/h

Potwierdzono, że zwiększenie prędkości zderzenia wpływa w większym stopniu na obciążenia manekina M50 w starszych niż w nowszych samochodach (por. rys.9a i 11). Ponadto wartości modalne wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} dla manekinów M50 na fotelach kierowcy i pasażera są podobne przy danej prędkości zderzenia. Natomiast przy prędkości 56 km/h wartości modalne wskaźnika HIC_{36} są wyraźne większe dla manekinów F5 na miejscu pasażera niż kierowcy.

6.4. Wpływ prędkości zderzenia na dominanty ryzyka obrażeń P_{comb}

Rozkłady ryzyka obrażeń P_{comb} opracowano również na podstawie histogramów. W tabeli 4 zestawiono wartości parametrów, opisujących własności rozkładów ryzyka P_{comb} , w 14 grupach danych (I÷XIV). Na podstawie (6) przyjęto interwały klasowe h równe 1,5, 1,8 oraz 2,5% dla manekina M50 oraz $h=3\%$ dla manekina F5.

Tabela 4. Wartości parametrów opisujących własności rozkładów ryzyka P_{comb}

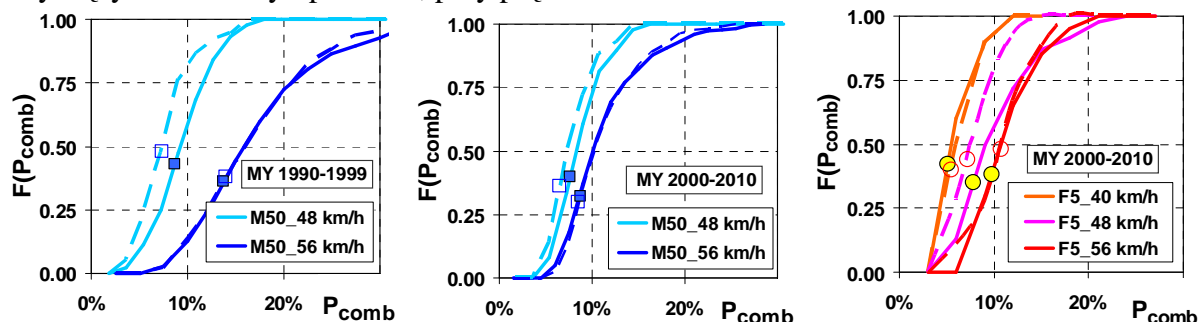
Manekin	M50								F5					
	Kierowca				Pasażer				Kierowca			Pasażer		
Rok prod.	1990-1999		2000-2010		1990-1999		2000-2010		2000-2010					
V [km/h]	48	56	48	56	48	56	48	56	40	48	56	40	48	56
Grupa	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
n	44	265	48	417	38	192	43	417	10	46	20	10	45	18
R [%]	12,9	32,2	10,3	22,5	11,5	31,3	9,4	19,4	6,8	18,2	11,8	4,3	7,9	12,5
h [%]	1,8	2,5	1,8	1,5	1,8	2,5	1,8	1,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
\bar{x} [%]	9,3	17,2	8,6	11,2	7,9	16,9	7,8	11,2	6,3	10,4	11,4	6,3	7,9	11,1
Me [%]	9,3	15,8	8,1	10,0	7,4	15,8	7,3	10,3	5,2	9,1	10,9	5,9	7,6	11,0
Mo^* [%]	8,6	13,8	7,7	8,7	7,6	14,0	6,6	8,6	5,0	7,8	9,8	5,5	7,3	10,7
s [%]	3,1	6,8	2,6	4,4	3,0	6,5	2,4	3,9	2,1	4,6	3,4	1,5	2,3	3,3
$q_{0,25}$ [%]	7,2	12,2	6,7	8,2	5,4	11,9	6,0	8,3	4,5	7,0	8,5	5,1	5,9	8,8
$q_{0,75}$ [%]	11,6	20,7	10,4	13,1	9,1	20,4	9,2	13,4	7,5	12,2	12,9	6,9	9,9	12,9
As	0,01	0,20	0,18	0,26	0,15	0,17	0,22	0,25	0,49	0,28	0,17	0,26	0,14	0,03
Ku	2,36	3,23	2,61	4,64	2,84	3,36	2,82	3,71	2,21	3,11	2,65	1,97	1,90	2,21

*) Wartości modalne wskaźnika P_{comb} obliczono wg (8). Wartości modalne wskaźnika P_{comb} obliczone na podstawie wartości modalnych wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} (z rys. 11) oraz wg (8) dla 9 grup nie różnią się więcej niż o 5% a dla pozostałych grup (I, II, IV, IX i XI) różnice te są 8÷12%.

Rozkłady w każdej grupie mają asymetrię prawostronną ($As>0$), przy czym siła asymetrii jest bardzo słaba ($|As|<0,2$) lub słaba ($|As|<0,4$). Średnia arytmetyczna \bar{x} jest o 8÷33% większa niż Mo , odchylenie standardowe $s \in (1,5\%; 6,8\%)$. W 5 grupach (II, IV, VI,

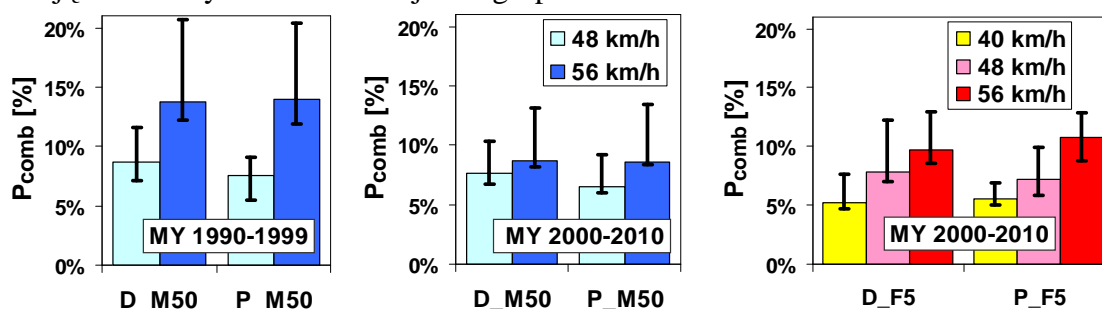
VIII, X) koncentracja jest większa niż w rozkładzie normalnym ($Ku > 3$), w pozostałych grupach $Ku \in (1,97; 2,84)$.

Na rysunku 12 podano dystrybuanty ryzyka P_{comb} , dotyczące manekinów na fotelach kierowcy i pasażera. Punktami zaznaczono wartości modalne ryzyka obrażeń P_{comb} . Występują one pomiędzy kwartylem $q_{0,25}$ a medianą Me . Uwagę zwracają różnice rozkładów dotyczących kierowcy i pasażera, przy prędkości 48 km/h.



Rys.12. Dystrybuanty ryzyka obrażeń P_{comb} (AIS4+) manekinów na fotelu kierowcy (linie ciągłe) i pasażera (linie przerywane) przy prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę 40, 48 i 56 km/h

Wartości modalne ryzyka obrażeń P_{comb} (AIS4+) kierowcy i pasażera z tabeli 4 zestawiono na rysunku 13, gdzie zaznaczono przedziały zmienności ($Mo - q_{0,25}; q_{0,75} - Mo$), zawierające 50% wyników w każdej z 14 grup.

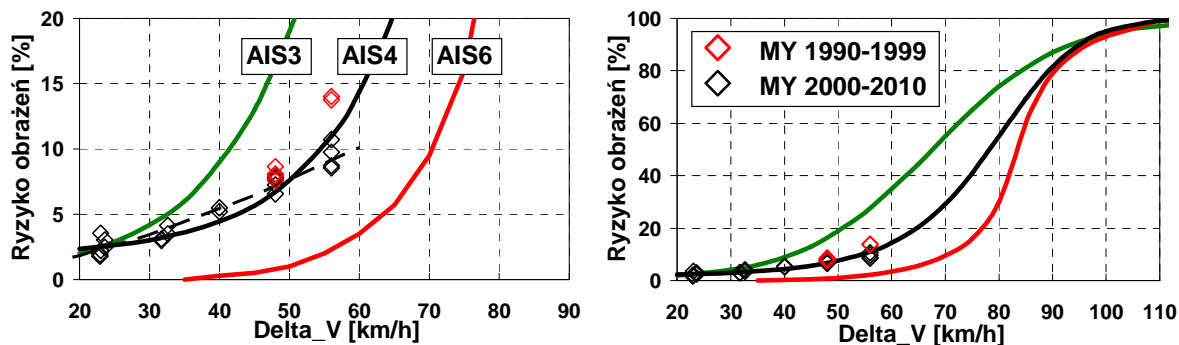


Rys.13. Wartości modalne (dominanty) ryzyka obrażeń P_{comb} (AIS4+) kierowcy (D) i pasażera (P) przy prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę 40, 48 i 56 km/h (manekiny M50 i F5)

Na podstawie wartości modalnych ryzyka obrażeń P_{comb} ustalono, że zwiększenie prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę:

- z 48 do 56 km/h zwiększa ryzyko obrażeń (AIS4+) 50-centylowego mężczyzny z 8 do 14% w samochodach z lat 1990-1999 oraz z 7 do 9% w samochodach z lat 2000-2010;
- z 40 do 56 km/h zwiększa ryzyko obrażeń (AIS4+) 5-centylowej kobiety z 5 do 10% w samochodach z lat 2000-2010.

Uogólnione wyniki oceny wpływu prędkości zderzenia czołowego na ryzyko obrażeń kierowcy i pasażera na przednim fotelu podano na rysunku 14. Punktami na wykresach, przy prędkości 40, 48 i 56 km/h, oznaczono wartości modalne z rysunku 13. Natomiast punkty przy $\Delta V < 40$ km/h, to wartości ryzyka obrażeń P_{comb} kierowcy i pasażera, obliczone na podstawie wyników z dwóch testów z manekinem M50 i trzech testów z manekinem F5 (por. rys.7 i tab.2).



Rys.14. Ryzyko obrażeń kierowcy i pasażera na przednim fotelu podczas zderzenia czołowego w funkcji ΔV (po lewej stronie jest fragment wykresu z prawej); linia „AIS3” wg [4], linia „AIS6” wg [23]

Punkty na wykresach oraz przebiegi funkcji ryzyka AIS3 i AIS6 (linie 6 i 9 z rys.1) wykorzystano do aproksymowania uzyskanych wyników następującą funkcją (linia „AIS4” na rys.14):

$$P_{comb}(AIS4+) = \{1 + \exp[3,9 - 4,1 \cdot (\Delta V / 80)^{2,3}]\}^{-1} \quad (10)$$

gdzie ΔV [km/h] jest zmianą prędkości samochodu podczas zderzenia.

Ryzyko obrażeń osób na przednich fotelach samochodów z lat 2000-2010, podczas zderzenia czołowego przy $\Delta V < 60$ km/h, może być opisane funkcją aproksymującą (linia przerywana na rys.14):

$$P_{comb}(AIS4+) = 0,017 \cdot \Delta V^{1,56} \quad (11)$$

która wykazuje wysoką wartość współczynnika determinacji $R^2 = 0,920$.

7. Podsumowanie

Analiza wyników kilkuset testów zderzeniowych umożliwiła ocenę wpływu prędkości zderzenia na ryzyko obrażeń kierowcy i pasażera na przednim fotelu, zapiętych pasami bezpieczeństwa i chronionych poduszką gazową. Prędkość zderzenia jest tylko jednym z wielu czynników, wpływających na ryzyko obrażeń osób jadących, dlatego ocenę prowadzono w dwóch grupach wiekowych samochodów, oddzielnie dla manekinów F5 i M50 oraz miejsc w samochodzie (na fotelach kierowcy i pasażera).

W ocenie ryzyka obrażeń uwzględniono obciążenia głowy i torsu (wskaźniki HIC_{36} i C_{Acc}). Znaczny rozstęp tych wskaźników utrudniał prowadzoną ocenę (pkt.5). Dlatego wartości wskaźników HIC_{36} i C_{Acc} oceniono statystycznie, określając parametry ich rozkładów. Na podstawie wartości modalnych ryzyka obrażeń P_{comb} ustalono, że zwiększenie prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę z 40 do 56 km/h zwiększa ryzyko ciężkich obrażeń (AIS4+) 5-centylowej kobiety z 5 do 10%. Ryzyko obrażeń 50-centylowego mężczyzny oceniono przy prędkości zderzenia 48 i 56 km/h. Zwiększenie prędkości w tym zakresie zwiększa ryzyko ciężkich obrażeń z 8 do 14% w samochodach z lat 1990-1999 oraz z 7 do 9% w samochodach z lat 2000-2010.

Uogólniając uzyskane wyniki ustalono, że zwiększenie prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę z 25 do 56 km/h zwiększa ryzyko ciężkich obrażeń (AIS4+) kierowcy i pasażera z 2 do 10%. O wartości ryzyka obrażeń P_{comb} decydują obciążenia torsu, niezależnie od prędkości uderzenia samochodu w przeszkodę. Wyniki analizy wykorzystano do opisu zależności ryzyka ciężkich obrażeń (AIS4+) kierowcy i pasażera od parametru ΔV funkcjami (10) i (11).

Literatura

1. 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.
2. Dąbrowska-Loranc M, Wojsz T. Prędkość pojazdów w Polsce w 2014 r. Krajowa Rada Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego. Warszawa 2014.
3. Funk J R, Cormier J M, Gabler H C. Effect of Delta-V errors in NASS on frontal crash risk calculations. 52nd AAAM Annual Conference Annals of Advances in Automotive Medicine 2008.
4. Gabauer D J, Gabler H C. Comparison of roadside crash injury metrics using event data recorders. Accident Analysis and Prevention 2008; 40: 548-558.
5. Gaca S, Suchorzewski W, Tracz M. Inżynieria ruchu drogowego. WKŁ, Warszawa 2008.
6. Kot S M, Jakubowski J, Sokołowski A. Statystyka. Wydawnictwo Difin SA, Warszawa 2011.
7. Kukuła K. Elementy statystyki w zadaniach. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.
8. Kullgren A. Dose-response models and EDR data for assessment of injury risk and effectiveness of safety systems. IRCOBI Conference, Bern, Switzerland 2008: 3-14.
9. Kullgren A, Krafft M, Tingvall C, Lie A. Combining crash recorder and paired comparison technique: Injury risk functions in frontal and rear impacts with special reference to neck injuries. The 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Paper Number 404, Nagoya, Japan 2003.
10. Liu W C, Doong J L, Tsai S L, Lai C H, Jeng M C. Integrated model of simulated occupant injury risk and real medical costs. Journal of Safety Research 2009; 40: 461-468.
11. Opportunities exist to enhance NHTSA's New Car Assessment Program. United States Government Accountability Office, GAO-05-370. USA 2005.
12. Pijanowski B, Żardecki D. Selected vehicle monitoring problems with the e-Call system taken as an example. The Archives of Automotive Engineering 2013; 3: 25-41.
13. Prochowski L, Kochanek H. Analiza wieku i obrażeń ofiar wypadków drogowych w aspekcie programowania ratownictwa drogowego. Logistyka 2015; 4: 1082-1090.
14. Prochowski L, Żuchowski A, Zielonka K. Analysis of the influence of the speed of impact against an obstacle on the dynamic loads acting on occupants of an automotive vehicle with body-on-frame design of the load bearing structure. The Archives of Automotive Engineering 2011; 4: 53-73.

15. 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.
16. Richards D, Cuerden R. The relationship between speed and car driver injury severity. Road Safety Web Publication No.9, Transport Research Laboratory, Department for Transport, London 2009.
17. Schmitt K U, Niederer P F, Muser M H, Walz F. Trauma biomechanics. Accidental injury in traffic and sports. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.
18. Strandroth J, Rizzi M, Kullgren A, Tingvall C. Head-on collisions between passenger cars and heavy goods vehicles: Injury risk functions and benefits of Autonomous Emergency Braking. IRCOBI Conference 2012: 342-351.
19. Symon E. Wypadki drogowe w Polsce (lata 2001-2014), <http://statystyka.policja.pl>.
20. Vincze-Pap S, Csiszár A. Real and simulated crashworthiness tests on buses. The 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Washington, 2005.
21. Wicher J. Bezpieczeństwo samochodów i ruchu drogowego. WKŁ, Warszawa 2012.
22. Wicher J. Is it worth limiting the travel speed? *The Archives of Automotive Engineering* 2015; 69(4): 105-114.
23. Wramborg P. A new approach to a safe and sustainable road structure and street design for urban areas. Proceedings of the Road Safety on Four Continents Conference, Warsaw 2005.
24. www.nhtsa.gov.
25. 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.
26. Żuchowski A. The use of energy methods at the calculation of vehicle impact velocity. *The Archives of Automotive Engineering* 2015; 68(2): 85-111.
27. Żuchowski A, Jackowski J. Analysis of properties of operation of the supporting equipment for the seat belts. *Journal of KONES Powertrain and Transport* 2011; 18(1): 697-704.
28. Żuchowski A, Prochowski L. The analysis of safety of rear seat occupants of a passenger car during the road accident. *The Archives of Automotive Engineering* 2011; 53(3): 83-98.
29. Żuchowski A, Wicher J. Influence of the pre-tightening of seat belts on the loads acting on rear seat occupants during a frontal collision. *The Archives of Automotive Engineering* 2013; 2: 93-110.