

Article citation info:

Żuchowski A. Comparative assessment of the risk of injury to children aged 3 and 10 in a road accident. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2016; 71(1): 131-151, <http://dx.doi.org/10.14669/AM.VOL71.ART9>

Ocena porównawcza ryzyka obrażeń dzieci w wieku 3 i 10 lat podczas wypadku drogowego

ANDRZEJ ŻUCHOWSKI ¹

Wojskowa Akademia Techniczna

Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań obciążeń dynamicznych, jakie działają na dzieci przewożone w fotelikach na tylnym siedzeniu samochodu osobowego, podczas jego czołowego uderzenia w przeszkodę. Wykorzystano wyniki badań udostępnione w Internecie przez *National Highway Traffic Safety Administration* (USA), obejmujące 12 testów zderzeniowych, w których samochód jadący z prędkością około 56 km/h uderzał czołowo w sztywną, płaską barierę. Uwagę skupiono na obciążeniach manekinów, reprezentujących dzieci w wieku 3 i 10 lat. W większości samochodów, w rozważanych warunkach badań, ryzyko poważnych obrażeń (AIS3) dziecka 3-letniego było większe o (5 ÷ 27)% niż dziecka 10-letniego. Ustalono, że zagrożeniem dla młodszego dziecka może być uderzenie tyłem głowy o oparcie fotelika, w końcowej fazie zderzenia. Natomiast starsze dziecko jest narażone na nadmierne ugięcie klatki piersiowej. Ocenę obciążeń manekinów poprzedzono analizą danych z wypadków drogowych w Polsce i UE. Ustalono, że ryzyko śmierci dziecka podczas wypadku drogowego w Polsce jest porównywalne w obu analizowanych grupach wiekowych (0 – 6 lat oraz 7 – 14 lat). Niepokojące jest to, że wartość wskaźnika zagrożenia dzieci w Polsce jest prawie 2 razy większa niż średnia w Unii Europejskiej.

Słowa kluczowe: wypadki drogowe, testy zderzeniowe, bezpieczeństwo dzieci, foteliki

1. Wstęp

Wypadki z udziałem dzieci zasługują na szczególną uwagę. Przepisy wymagają, aby dziecko mające mniej niż 150 cm wzrostu, przewozić w foteliku bezpieczeństwa lub innym urządzeniu przytrzymującym, odpowiadającym masie i wzrostowi dziecka oraz właściwym warunkom technicznym [20].

Autorzy wielu prac wskazują na to, że troska rodziców o bezpieczeństwo dziecka w samochodzie maleje wraz z wiekiem dziecka. Starsze dzieci przewożone są często bez wymaganych urządzeń przytrzymujących (fotelików), podczas gdy fotele i pasy

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

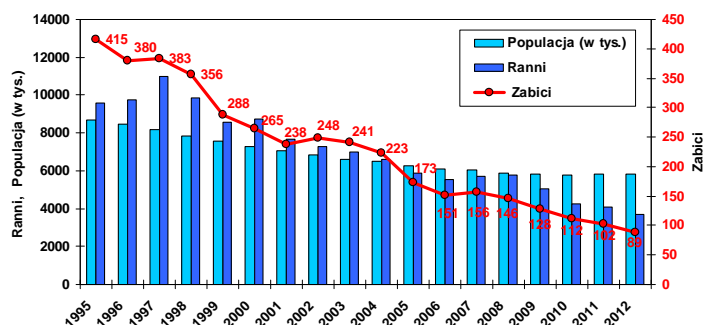
bezpieczeństwa dla dorosłych nie stanowią skutecznej ochrony dla dzieci, a nawet mogą powodować poważne obrażenia, głównie brzucha i szyi [22]. Szacuje się, że w Europie tylko co trzecie dziecko jest właściwie zabezpieczone w samochodzie a rodzice zbyt wcześnie rezygnują z fotelików i przewożą nawet 3-letnie dzieci bezpośrednio na kanapie, zapięte pasem bezpieczeństwa [24, 25]. W pracy [4] podano, że pasy bezpieczeństwa były jedynym zabezpieczeniem u około 60% dzieci w wieku 4 – 6 lat i ponad 90 % dzieci w wieku 7 – 8 lat (Australia). Także wyniki analizy wypadków drogowych w USA potwierdzają, że w większości wypadków starsze dzieci są gorzej chronione niż młodsze, a szczególnie niebezpieczne dla dzieci w wieku 9 – 12 lat są zderzenia czołowe [2]. Brak właściwej ochrony dzieci widoczny jest w skutkach wypadków drogowych. W pracy [5] zwrócono uwagę, że aż 61% wszystkich ofiar śmiertelnych i poważnych urazów wystąpiło u dzieci w wieku 5 – 10 lat, 32% u dzieci w wieku 1 – 4 lat a tylko 7% w wieku poniżej 1 roku. Szerszy przegląd prac, dotyczących obrażeń dzieci podczas wypadków drogowych oraz sposobu zabezpieczania dzieci w samochodach, podano wcześniej w [24, 25]. W pracach [10, 12] zwrócono uwagę na skutkach niewłaściwej eksploatacji fotelików oraz na skuteczności działania fotelika i podstawki podwyższającej, w odniesieniu do dziecka w wieku około 3 lat. Wyniki badań manekina dziecka w wieku około 10 lat podano w [9].

Celem pracy jest ocena porównawcza ryzyka obrażeń dzieci w wieku 3 i 10 lat podczas czołowego uderzenia samochodu w przeszkodę. Ocenę przeprowadzono na podstawie wyników testów zderzeniowych 12 samochodów, w których na tylnych siedzeniach umieszczone były manekiny, reprezentujące dzieci w wieku około 3 i 10 lat. Bezpośrednie wyniki pomiarów, z analizowanych w tej pracy testów zderzeniowych, pobrano w postaci cyfrowej z [32]. Ocenę ryzyka obrażeń podczas testu zderzeniowego poprzedzono analizą danych o wypadkach drogowych z udziałem dzieci, w dwóch grupach wiekowych (0 – 6 lat oraz 7 – 14 lat). Cel pracy ukierunkowany jest na identyfikację czynników konstrukcyjnych i eksploatacyjnych, decydujących o obciążeniach pasażerów podczas wypadku drogowego oraz konieczności minimalizacji tych obciążeń. Wyniki badań w tym zakresie przedstawiono wcześniej w pracach [13, 24–27] oraz innych publikacjach autora z lat 2006 – 2015.

2. Ocena bezpieczeństwa dzieci w ruchu drogowym w zależności od ich wieku na podstawie danych z wypadków drogowych

Intensywność oraz sposób uczestniczenia dziecka w ruchu drogowym zależy od wielu czynników, w tym także jego wieku. Zgodnie z ustawą Prawo o ruchu drogowym [20] dziecko w wieku do 7 lat może korzystać z drogi jako pieszy wyłącznie pod opieką osoby, która osiągnęła wiek co najmniej 10 lat. Dziecko w wieku do 10 lat może kierować rowerem wyłącznie pod opieką osoby dorosłej, na zasadach określonych dla ruchu pieszych, czyli może korzystać wraz z opiekunem z chodnika lub drogi dla pieszych oraz jechać lewą stroną jezdni. Do samodzielnego kierowania rowerem na drodze wymagana jest karta rowerowa. Może ją otrzymać osoba, która ukończyła co najmniej 10 lat [21].

W latach 1995 – 2012 w Polsce zginęło w wypadkach drogowych 4094 dzieci w wieku 0 – 14 lat (rys. 1). Ich liczba systematycznie maleje, od 415 w 1995 roku do 89 w 2012 roku. Warto tu dodać, że w tym samym okresie populacja dzieci w Polsce (w wieku 0 – 14 lat) zmalała z 8,68 mln do 5,80 mln [29].

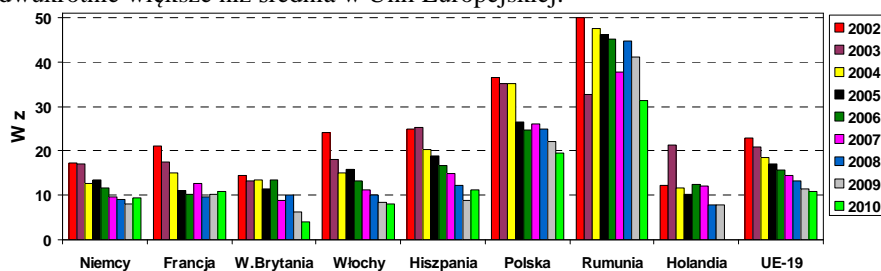


Rys. 1. Skutki wypadków drogowych z udziałem dzieci w wieku 0 – 14 lat w latach 1995 – 2012 (wg [29])

Dane statystyczne o udziale dzieci w wypadkach drogowych w Polsce porównano z danymi z innych państw Unii Europejskiej [3, 8]. W tym celu obliczono wskaźnik zagrożenia dzieci.

$$W_z = \frac{\text{liczba dzieci (0 - 14 lat) zabitych w wypadkach drogowych, w danym roku}}{\text{populacja dzieci (0 - 14 lat) w mln, w danym roku}} \quad (1)$$

Na rysunku 2 zestawiono wyniki obliczeń wskaźnika W_z . Uwagę skupiono na państwach o największej liczbie mieszkańców (np. Niemcy – 80,5 mln, Polska – 38,5 mln, Holandia – 16,8 mln). Największe wartości wskaźnika W_z dotyczą Rumunii a najmniejsze Wielkiej Brytanii. W latach 2002 – 2010 wartość średnia wskaźnika W_z zmalała w krajach UE-19 od 22,7 do 10,5, natomiast w Polsce od 35,2 do 19,3. Uwzględniając dodatkowo, że w 1995 roku w Polsce $W_z=47,8$ a w 2012 roku $W_z=15,3$, to widoczna jest istotna poprawa bezpieczeństwa dzieci w ruchu drogowym. Jednak wartości wskaźnika W_z dla Polski są prawie dwukrotnie większe niż średnia w Unii Europejskiej.



Rys. 2. Wskaźnik zagrożenia dzieci w wieku 0 – 14 lat; dane o populacji z [28–30], dane o wypadkach drogowych z [3, 8]

Dzieci w wieku do 14 lat stanowiły w Polsce w latach 2008 – 2012 około 8% zabitych i 15% rannych wśród pasażerów samochodów osobowych [29]. Poniżej oceniono strukturę wypadków drogowych z udziałem dzieci, w zależności od ich wieku i charakteru uczestniczenia w ruchu drogowym (kierujący, pasażer, pieszy). W tym celu w tabeli 1 zestawiono dane o wypadkach z udziałem dzieci, w latach 2008 – 2012. Około 50 % zabitych dzieci to pasażerowie, przy czym w [29] brakuje informacji o rodzajach pojazdów, których pasażerami były dzieci. Na podstawie [6, 8] można przyjąć, że byli to głównie pasażerowie samochodów osobowych. Oddzielnie ujęto dane dotyczące dzieci w wieku 0 – 6 lat (siedem roczników) i 7 – 14 lat (osiem roczników). W grupie wiekowej 0 – 6 lat dominują wypadki, w których dziecko było pasażerem (około 69%). Starsze dzieci (7 – 14 lat) biorą udział w wypadkach podobnie często jako pasażerowie (35%) i jako piesi (42%).

Tabela 1. Skutki wypadków drogowych w Polsce z udziałem dzieci w wieku do 14 lat (D – kierujący, P – pasażer, W – pieszy); opracowano na podstawie [29]

Rok	Populacja [mln]	Liczba wypadków				Liczba rannych				Liczba zabitych			
		D	P	W	Ogółem	D	P	W	Ogółem	D	P	W	Ogółem
Dzieci w wieku 0 – 6 lat													
2008	2,560	45	1027	470	1542	45	1012	470	1527	0	34	15	49
2009	2,631	46	916	401	1363	41	905	387	1333	5	24	14	43
2010	2,721	40	909	318	1267	39	893	314	1246	1	28	5	34
2011	2,827	34	809	356	1199	34	849	360	1243	0	18	14	32
2012	2,845	36	816	298	1150	35	821	336	1192	1	22	8	31
Dzieci w wieku 7 – 14 lat													
2008	3,302	872	1557	1784	4213	865	1579	1797	4241	18	47	32	97
2009	3,185	843	1372	1489	3704	824	1414	1487	3725	22	36	27	85
2010	3,038	727	1195	1414	3336	713	1222	1405	3340	17	32	29	78
2011	2,992	733	979	1166	2878	730	1176	1265	3171	16	28	26	70
2012	2,952	641	762	1126	2529	632	980	1141	2753	9	23	26	58

Dalej uwagę skupiono na bezpieczeństwie dzieci-pasażerów (opisany wcześniej wskaźnik W_z dotyczył wszystkich dzieci, w tym kierujących, pasażerów i pieszych). Szukano odpowiedzi na pytanie, która grupa wiekowa dzieci-pasażerów jest bardziej zagrożona podczas wypadku drogowego? Różnice w ryzyku obrażeń (śmierci) mogą wynikać z różnych cech antropometrycznych, a tym samym z różnej odporności na obciążenia udarowe, ale także z różnej skuteczności urządzeń przytrzymujących (fotelików) dla dzieci młodszych i starszych.

W ocenie wykorzystano wskaźniki bezpieczeństwa, często stosowane w analizie wypadków drogowych. Wskaźnik ciężkości wypadków, który zdefiniowano w następujący sposób:

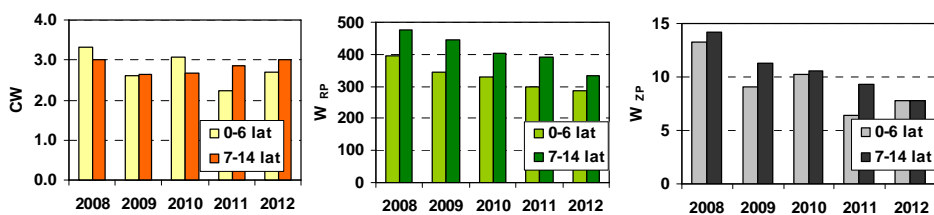
$$CW = \frac{\text{liczba dzieci (pasażerów) zabitych w wypadkach drogowych, w danym roku}}{100 \text{ wypadków z udziałem dzieci (pasażerów), w danym roku}} \quad (2)$$

oraz wskaźniki zagrożenia, w których liczbę dzieci-pasażerów poszkodowanych w wypadkach drogowych w ciągu roku, odniesiono do ich populacji:

$$W_{RP} = \frac{n_{RP}}{N}, \quad W_{ZP} = \frac{n_{ZP}}{N} \quad (3)$$

gdzie: n_{RP} , n_{ZP} – liczba rannych i liczba zabitych dzieci-pasażerów w danej grupie wiekowej, N – populacja dzieci w danej grupie wiekowej, w milionach.

Wyniki obliczeń ww. wskaźników, dotyczących dwóch grup wiekowych dzieci-pasażerów (0 – 6 lat i 7 – 14 lat), podano na rysunku 3.



Rys. 3. Ciężkość wypadków oraz wskaźniki zagrożenia dzieci-pasażerów w Polsce (na podstawie [29])

Wyniki obliczeń wskaźnika ciężkości wypadków z dziećmi – pasażerami w analizowanych grupach wiekowych nie dają jednoznacznej odpowiedzi na postawione wcześniej pytanie. W niektórych latach wskaźnik CW ma większą wartość w grupie dzieci młodszych a w innych latach – w grupie dzieci starszych. Wartości wskaźnika CW obliczone za okres 2008 – 2012 są prawie jednakowe w obu grupach wiekowych (2,81 dla dzieci młodszych oraz 2,83 dla starszych dzieci). Taki rezultat wskazuje na to, że ryzyko śmierci dziecka-pasażera podczas wypadku drogowego nie zależy od jego wieku.

Wartości wskaźnika W_{RP} dla dzieci starszych są o około 24% większe, niż dla dzieci młodszych. Uwzględniając, że liczba rannych jest zwykle proporcjonalna do liczby wypadków, to większe wartości wskaźnika W_{RP} wskazują na to, że starsze dzieci częściej biorą udział w wypadkach drogowych. Jest to przewidywany rezultat, potwierdzający przypuszczenie (dane w tym zakresie nie są dostępne), że starsze dzieci przewożone są w samochodach częściej niż młodsze. Wartości wskaźnika W_{ZP} są jakościowo podobne do W_{RP} , z tą różnicą, że w latach 2010 i 2012 wartości wskaźnika W_{ZP} dla dzieci młodszych i starszych są podobne.

3. Ocena ryzyka obrażeń dzieci w wieku 3 i 10 lat na podstawie badań laboratoryjnych

3.1. Cel i zakres analizy wyników badań laboratoryjnych

Celem analizy wyników badań laboratoryjnych jest ocena porównawcza obciążeń manekinów, reprezentujących dzieci w wieku 3 i 10 lat. Rozważono obciążenia działające na manekiny dzieci na tylnych siedzeniach samochodu osobowego, podczas zderzenia czołowego. Wykorzystano wyniki 12 testów zderzeniowych, udostępnionych w Internecie przez National Highway Traffic Safety Administration (USA) [32].

Podczas testu zderzeniowego, jadący z prędkością około 56 km/h samochód, uderzał czołowo w nieruchomą, sztywną barierę. Podstawowe dane o samochodach podano w tabeli 2. Samochody zestawiono według typu nadwozia (sedan, minivan, van). Wszystkie samochody były modelami z 2005 roku. Badane samochody były nowe. Masa samochodów uwzględnia masę manekinów, umieszczonych na przednich (dwa manekiny reprezentujące mężczyznę) i tylnych siedzeniach (dwa manekiny reprezentujące dzieci w wieku 3 i 10 lat).

Wykorzystane w badaniach samochody różnią się masą, wymiarami oraz konstrukcją czołowej strefy zgniotu. Głębokość deformacji nadwozia po uderzeniu w barierę, mierzona na wysokości zderzaka w połowie jego szerokości, była od 0,38 m (Ford Five Hundred) do 0,65 m (Chevrolet Uplander), co potwierdza znaczne różnice w konstrukcji czołowej strefy zgniotu samochodów. Właściwości czołowej strefy zgniotu decydują o wartościach opóźnienia, jakie działa na samochód podczas zderzenia [27].

Obiektami badań były manekiny Hybrid III, reprezentujące dzieci w wieku 3 i 10 lat, dalej oznaczone 3YO i 10YO (rys. 4). Manekin 3YO siedział po prawej stronie kanapy w foteliku (Evenflo Titan V) z 5-punktowym zapięciem, z systemem mocowania LATCH (ang. Lower Anchors and Tethers for Children) – bez wykorzystania pasów bezpieczeństwa samochodu. W samochodzie Ford E150van (test V1) manekin 3YO był na środkowym miejscu kanapy. Manekin 10YO siedział w każdym samochodzie po lewej stronie kanapy (za fotelem kierowcy), na podstawie z oparciem (Graco Turbo Booster Highback) i był zapięty za pomocą standardowego pasa bezpieczeństwa.

Tabela 2. Samochody wykorzystane w testach zderzeniowych (na podstawie [32])

Oznaczenie testu	Marka	Model	Typ nadwozia	Masa [kg]	Głębokość deformacji [m]
S1	Chevrolet	Malibu	sedan	1697	0,51
S2	Suzuki	Verona		1758	0,53
S3	Pontiac	G6		1767	0,58
S4	Buick	Lacrosse		1832	0,63
S5	Ford	Five Hundred		1924	0,38
S6	Volvo	V70		1802	0,57
mV1	Toyota	Sienna	minivan	2165	0,54
mV2	Chevrolet	Uplander		2243	0,65
mV3	Honda	Odyssey		2263	0,47
mV4	Chevrolet	TrailBlazer		2388	0,55
V1	Ford	E150van	van	2675	0,54
V2	Chevrolet	Express		2721	0,62



Rys. 4. Foteliki zabezpieczające manekiny podczas testów zderzeniowych oraz charakterystyka dynamicznego uginania klatki piersiowej [15, 16]

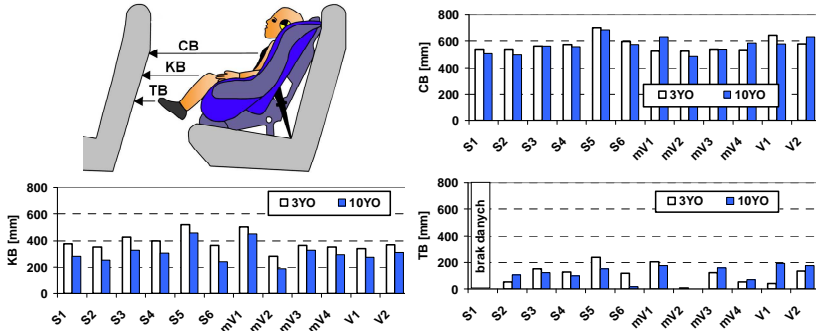
Uwagę skupiono na obciążeniach głowy, szyi oraz torsu manekinów. W tym celu wykorzystano, pobrane w postaci cyfrowej z [32], wyniki pomiarów następujących wielkości:

- przyspieszenie głowy i klatki piersiowej,
- siły oraz momenty sił działających na szyję,
- ugięcie klatki piersiowej.

3.2. Manekiny pomiarowe i ich rozmieszczenie w samochodach

Obciążenia działające na manekiny podczas uderzenia samochodu w barierę wynikają m.in. z właściwości urządzeń ochronnych oraz rozmiarów manekina. Wysokości manekinów 3YO i 10YO są odpowiednio 945 mm i 1297 mm a wysokości w pozycji siedzącej 772 mm i 1064 mm. Największe różnice w wymiarach elementów manekinów dotyczą nóg, a najmniejsze – głowy. Masa manekina 3YO (16,2 kg) jest ponad dwukrotnie mniejsza niż manekina 10YO (35,2 kg), przy czym największe różnice dotyczą masy nóg i tułowia. Szczegółowe dane o wymiarach i masie elementów manekinów są dostępne w [31]. Oba manekiny mają różne właściwości dynamiczne. Przykładowo na rysunku 4 podano charakterystykę dynamicznego uginania klatki piersiowej. Wykonuje się ją przy wykorzystaniu wahadła (masa 1,7 kg dla 3YO i 6,9 kg dla 10YO), które z prędkością około 6 m/s uderza w klatkę piersiową manekina. Zakres ugięcia wynosi tu około 25% głębokości klatki piersiowej.

Użyte w badaniach samochody różnią się wymiarami przestrzeni dla pasażerów na tylnej kanapie. Jest ona ograniczona z przodu fotelami przednimi a z tyłu oparciami kanapy i fotelików (rys.5). Fotele pasażera w samochodzie Suzuki Verona (test S2) był ustawiony w tylnym położeniu. Fotele przednie we wszystkich innych samochodach były w centralnym położeniu. Odległość torsu od fotela przedniego obu manekinów (wymiar CB na rys. 5) jest podobna (różnice zwykle 20 mm ÷ 50 mm), przy czym tylko w trzech samochodach odległość CB dla manekina 10YO jest w większa niż dla manekina 3YO. Kolana manekina 3YO są w większej odległości od fotela przedniego niż kolana manekina 10YO, o 40 mm ÷ 120 mm. W teście mV2 stopy manekinów dotykają oparcia fotela przedniego (TB = 0 mm). Początkowe ułożenie nóg oraz sposób, w jaki nogi opierają się o oparcie fotela przedniego podczas zderzenia, mają istotną rolę w kształtowaniu obciążeń manekinów [13].



Rys. 5. Wymiary opisujące położenie manekina względem fotela przedniego (opracowano wg [16, 32])

Podczas zderzenia manekiny przemieszczają się względem kanapy, w zakresie wynikającym z oddziaływania urządzeń ochronnych. Przykładowe przemieszczenie manekinów (położenia w czasie co 50 ms) podano na rysunku 6. Przesunięcie manekinów do przodu jest znaczne, jednak w żadnym samochodzie nie doszło do uderzenia głową o oparcie przedniego fotela.



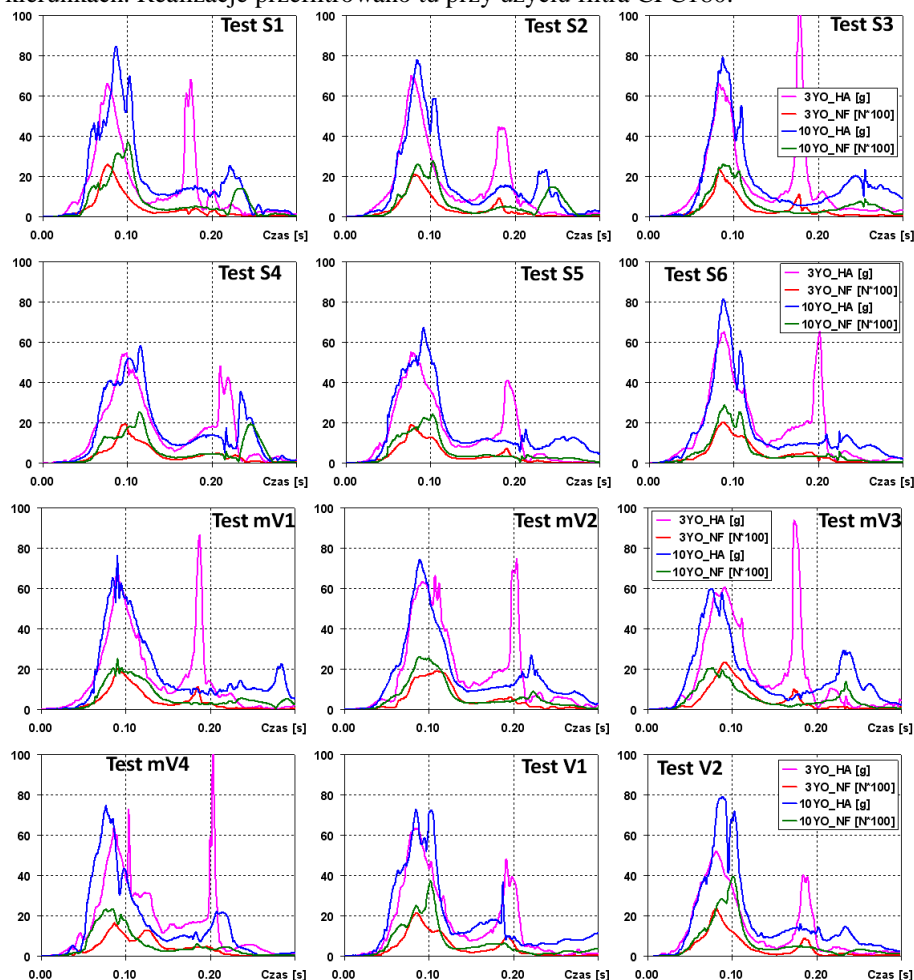
Rys. 6. Przesunięcia manekinów podczas zderzenia w teście V1; opracowano na podstawie [32]

3.3. Wyniki pomiarów obciążeń manekinów

Wstępną ocenę porównawczą obciążeń manekinów 3YO i 10YO przeprowadzono na podstawie realizacji pomierzonych wielkości. W tym celu zestawiono następujące realizacje:

- wypadkowe przyspieszenie głowy oraz wypadkowa siła działająca na szyję (rys. 7),

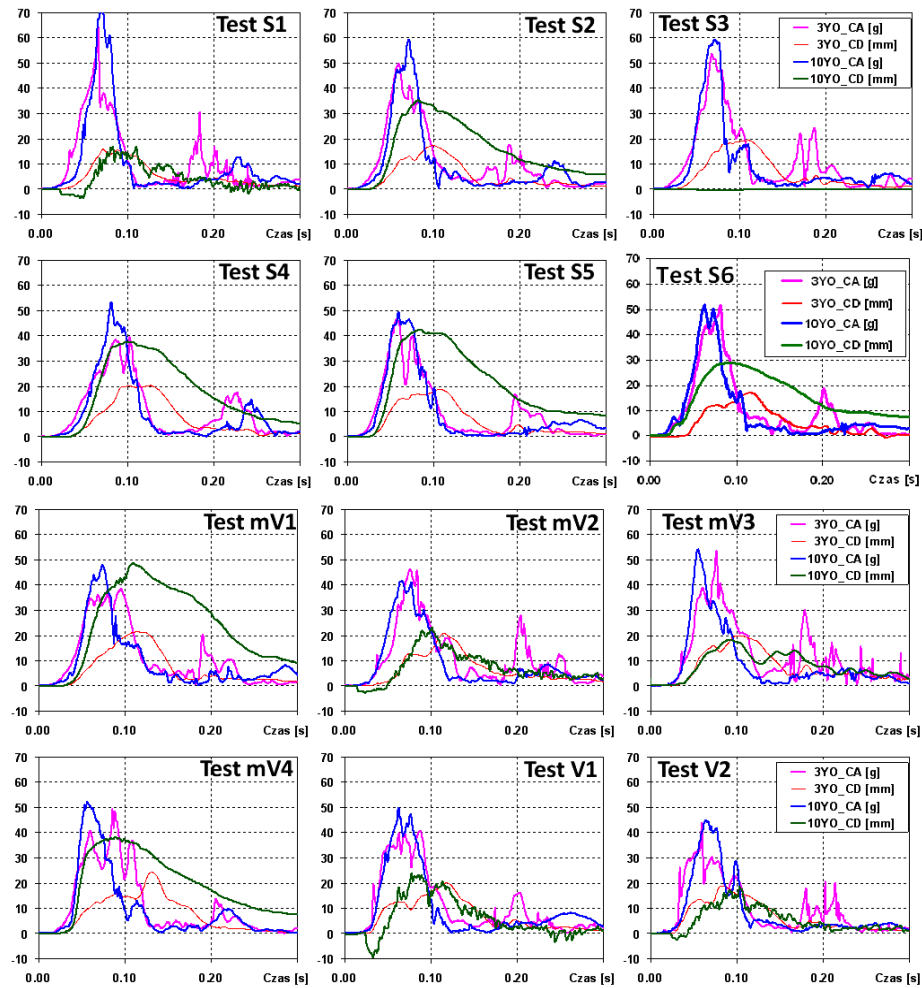
– wypadkowe przyspieszenie torsu i ugięcie klatki piersiowej (rys. 8).
Wartości wypadkowe obliczono z realizacji, pomierzonych w trzech, wzajemnie prostopadłych kierunkach. Realizacje przefiltrowano tu przy użyciu filtra CFC180.



Rys. 7. Wypadkowe przyspieszenie głowy (linie HA) oraz wypadkowa siła działająca na szyję (linie NF) manekinów 3YO i 10YO

Realizacje podane na wykresach z rysunku 7 ukazują obciążenia głowy (linie HA) i szyi (linie NF), w dwóch fazach ruchu manekinów podczas zderzenia. Pierwsza faza ruchu jest podczas przemieszczania się manekina do przodu i występuje w czasie do około 0,12 s. Druga faza ruchu jest w czasie odchyłania się manekina w kierunku oparcia. Niezależnie od samochodu, w jakim były umieszczone manekiny, obciążenia głowy i szyi są jakościowo podobne. W pierwszej fazie ruchu wartości maksymalne obciążen głowy i szyi manekinów 10YO są większe niż manekinów 3YO, co może wynikać nie tylko z właściwości urządzenia przytrzymującego, ale także z większej masy głowy manekina 10YO. W drugiej fazie ruchu wartości maksymalne obciążen głowy są wyraźnie większe u manekinów 3YO. Mocne uderzenie tyłem głowy manekina 3YO o oparcie fotelika świadczy o sprężystym napięciu pasków mocujących manekin na foteliku, co w efekcie powoduje niekorzystne odrzucenie

manekina do tyłu. Ponadto oparcie fotelika z manekinem 3YO ma znacznie mniejszą możliwość odkształcenia, a tym samym zamortyzowania uderzenia, niż oparcie fotelika z manekinem 10YO (por. rys. 6).



Rys. 8. Wypadkowe przyspieszenie torsu (linie CA) oraz ugięcie klatki piersiowej (linie CD) manekinów 3YO i 10YO (w teście S3 nie mierzono ugięcia klatki piersiowej manekina 10YO)

Wypadkowe przyspieszenie torsu (linie CA na rys. 8), podobnie jak w przypadku głowy, jest większe u manekinów 10YO. Ugięcie klatki piersiowej (linie CD na rys. 8) manekinów 3YO jest około 20 mm i stanowi (12 ÷ 18)% głębokości klatki piersiowej (132 mm). Natomiast u manekinów 10YO ugięcie klatki piersiowej jest w kilku testach (S1, mV2, mV3, mV4 i V2) na poziomie 20 mm (12% głębokości klatki piersiowej, która wynosi 165 mm) a w pozostałych testach około (30 ÷ 50) mm (18% ÷ 30% głębokości klatki piersiowej). W analizowanych samochodach ugięcie klatki piersiowej jest więc podobne u manekinów 3YO a różne u manekinów 10YO.

Taki rezultat może wynikać z różnego sposobu obciążenia klatki piersiowej manekinów 3YO i 10YO. Mianowicie manekin 3YO jest przypięty do fotelika paskami (szelkami), ułożonymi

symetrycznie na obu barkach, co ogranicza możliwość uginania klatki piersiowej. Manekin 10YO jest zapięty pasem bezpieczeństwa przechodzącym przez mostek (por. rys. 8), co sprzyja uginaniu klatki piersiowej. Ponieważ taśma pasa ułożona jest skośnie względem torsu, to podczas zderzenia może przesuwać się ona w kierunku szyi lub zsuwać się z barku na ramię, co jednocześnie może wpływać na zwiększenie lub zmniejszenie ugięcia klatki piersiowej. Takie niekorzystne działanie trzypunktowego pasa bezpieczeństwa opisano wcześniej w [25], gdzie zwrócono uwagę, że skuteczność pasa bezpieczeństwa zależy od położenia jego górnego punktu mocowania. W samochodach sedan, minivan i van taśma pasa na odcinku „bark manekina – górny punkt mocowania” nachylona jest pod różnymi kątami, zarówno w płaszczyźnie pionowej jak i poprzecznej, bowiem w sedanach taśma pasa przebiegała obok zagłówka, w minivanach pas kotwiczony był do słupka nadwozia a w vanach do belki nad bocznym oknem. Ponadto z charakterystyki uginania klatki piersiowej (rys. 4) wynika, że przy działaniu siły około 1500 N ugięcie może być w zakresie (15 ÷ 30) mm. Wskazane wyżej czynniki mogą wyjaśniać znaczne różnice ugięcia klatki piersiowej manekinów 10YO w poszczególnych samochodach.

W testach S1, mV2, V1 i V2 początkowe wartości ugięcia klatki piersiowej są ujemne. Wyjaśnienia takiego stanu szukano podczas analizy obciążeń pasów bezpieczeństwa oraz filmów z kamer szybkobieżnych, ukazujących ruch manekina podczas zderzenia. Nie potwierdzono jednak, by ujemne ugięcie klatki piersiowej było spowodowane np. naciskiem taśmy pasa na brzuch lub bok klatki piersiowej. Dlatego wyniki pomiarów ugięcia klatki piersiowej manekinów 10YO wykorzystano dalej w ograniczonym zakresie.

3.4. Wskaźniki biomechaniczne i ocena ryzyka obrażeń dzieci

Na podstawie opisanych wyżej wyników pomiarów trudno jest ocenić w sposób ilościowy różnice w obciążeniach manekinów, reprezentujących dzieci w wieku 3 i 10 lat. Dlatego wyniki te wykorzystano do obliczenia czterech wskaźników obrażeń (tabela 3), których opis podano m.in. w [7, 13, 23]:

- HIC₁₅, wskaźnik obrażeń głowy (*Head Injury Criterion*), liczony w czasie do 15 ms;
- N_{ij}, wskaźnik obrażeń szyi, uwzględniający siły (F_T, F_C – rozciąganie, ściskanie) i momenty sił działające na szyję (M_F, M_E – zginanie do przodu i do tyłu);
- C_{Acc}, maksymalne wypadkowe przyspieszenie torsu, w czasie co najmniej 3 ms;
- C_{max}, maksymalne ugięcie klatki piersiowej.

Tabela 3. Wartości wskaźników biomechanicznych

Oznaczenie testu	HIC ₁₅		N _{ij}		C _{Acc} [g]		C _{max} [mm]	
	3YO	10YO	3YO	10YO	3YO	10YO	3YO	10YO
S1	438	705	1.52	1.40	53	70	16	17(-)
S2	514	631	0.91	0.93	49	58	17	35
S3	634*	689	1.01	0.96	52	59	19	-
S4	271	286	0.84	0.93*	38	53	20	38
S5	291	407	0.84	0.80	46	47	19	43
S6	441	725	1.17	1.08	48	50	17	29
mV1	433	459	0.92	0.78	38	47	21	48
mV2	446	589	0.98	1.10	45	41	21	23(-)
mV3	569*	351	1.26	0.86	47	53	20	17
mV4	352	591	0.81	0.91	45	51	24	38
V1	445	486	0.93	0.92	40	46	20	24(-)
V2	257	733	1.35	1.30	34	44	19	19(-)

* – wartość wskaźnika obliczona w drugiej fazie ruchu manekina (uderzenie głowy o oparcie fotelika)
 (-) – wyniki pomiarów oceniono jako wątpliwe (por. opis rys. 8)

Wartości wskaźników (tabela 3) uwzględniają największe obciążenia manekinów, które niemal we wszystkich testach występują w pierwszej fazie ruchu manekinów, czyli podczas przemieszczania się ich do przodu. W trzech testach dominujące obciążenia występują w drugiej fazie ruchu manekinów, czyli podczas uderzenia głową o oparcie fotelika. Są to:

- wypadkowe przyspieszenie głowy manekina 3YO w testach S3 i mV3 (wskaźnik HIC_{15}),
- obciążenie szyi (moment M_F i siła F_C) manekina 10YO w teście S4 (wskaźnik N_{ij}).

Ocena porównawcza obciążeń dynamicznych na podstawie bezpośredniego porównania wartości ww. wskaźników nie jest możliwa, ponieważ dzieci w różnym wieku mają różną odporność na obciążenia. Dlatego wartości dopuszczalne wskaźników biomechanicznych są inne dla manekinów 3YO i 10YO. Zestawiono je w tabeli 4, gdzie podano także wartości krytyczne sił F_T i F_C oraz momentów M_F i M_E , do obliczeń wskaźnika N_{ij} .

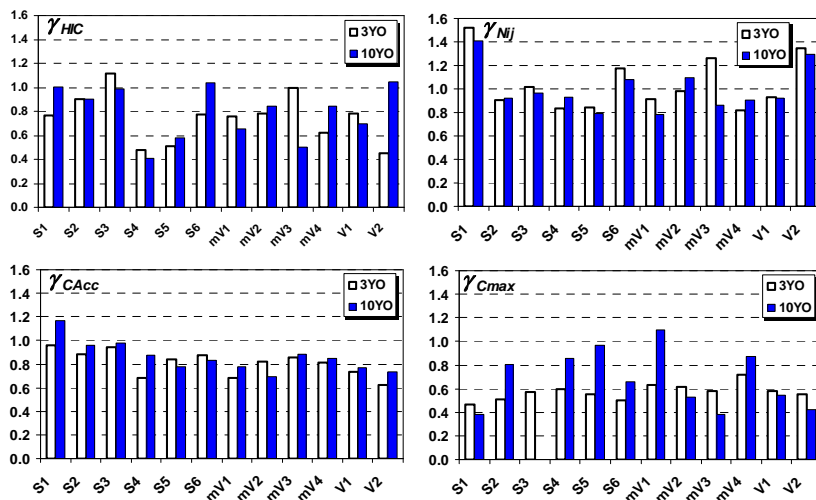
Tabela 4. Dopuszczalne wartości wskaźników biomechanicznych [9, 17, 19]

Manekin	HIC_{15}	N_{ij}	F_T [N]	F_C [N]	M_F [Nm]	M_E [Nm]	C_{Acc} [g]	C_{max} [mm]
Hybrid III 3YO	570	1,0	2330	2130	67	29,3	55	34
Hybrid III 10YO	700	1,0	3710	3390	125	54,8	60	44

W dalszej analizie wartości wskaźników biomechanicznych odniesiono do wartości dopuszczalnych. W tym celu obliczono wskaźniki:

$$\gamma_i = \frac{W_i}{W_{dop}} \quad (4)$$

gdzie: W_i – wartość wskaźnika (HIC_{15} , N_{ij} , C_{Acc} , C_{max}), podana w tabeli 3; W_{dop} – wartość dopuszczalna wskaźnika, podana w tabeli 4.



Rys. 9. Wyniki obliczeń wskaźników γ_i

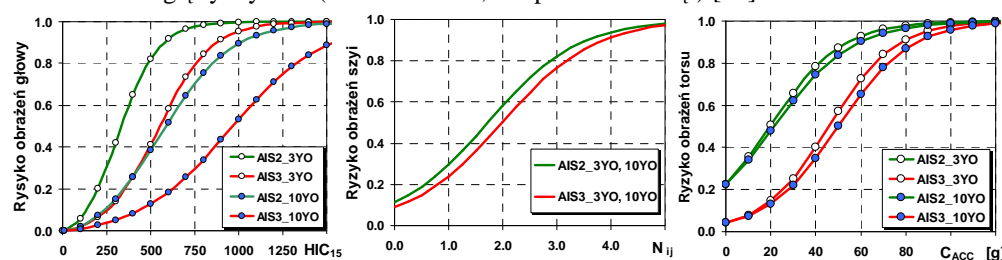
Wyniki obliczeń wskaźników γ zestawiono na rysunku 9. Wynikają z nich następujące ustalenia dotyczące celu pracy, czyli relacji pomiędzy obciążeniami manekinów 3YO i 10YO:

- największe różnice pomiędzy manekinami 3YO i 10YO dotyczą γ_{Cmax} oraz γ_{HIC} ,
- tylko w dwóch testach (S2, mV4) wszystkie wskaźniki γ są większe dla manekina 10YO,
- nie ma takiego testu, w którym wszystkie wskaźniki γ są większe dla manekina 3YO.

Widoczny jest duży rozrzut wartości wskaźników w poszczególnych testach zderzeniowych, co potwierdza różne właściwości układów bezpieczeństwa biernego w badanych samochodach.

Analiza wskaźników γ_i nadal nie umożliwia jednoznacznej oceny porównawczej obciążeń manekinów 3YO i 10YO. Trudno jest wskazać, który manekin jest lepiej chroniony w danym samochodzie. W wielu testach zderzeniowych mamy taką sytuację, że lepszy stopień ochrony głowy manekina (małe wartości γ_{HIC}) związany jest ze zwiększeniem obciążenia szyi lub klatki piersiowej (duże wartości wskaźników γ_{Nij} , γ_{CAcc} lub γ_{Cmax}). Dlatego w dalej prowadzonej ocenie obciążeń manekinów 3YO i 10YO wykorzystano relacje pomiędzy obliczonymi wskaźnikami biomechanicznymi (tabela 3) a ryzykiem obrażeń.

Metodyka taka bazuje na relacjach pomiędzy wartościami wskaźników HIC_{15} , N_{ij} oraz C_{Acc} a ryzykiem obrażeń, ujętych w skali *Abbreviated Injury Scale* (AIS) [7, 9, 11, 26]. Ryzyko średnich (AIS2) i poważnych (AIS3) obrażeń głowy, szyi i klatki piersiowej opisywane jest za pomocą tzw. funkcji ryzyka obrażeń (*Injury Risk Curves*), które podano na rysunku 10. Ryzyko obrażeń klatki piersiowej podano dla wskaźnika C_{Acc} , bowiem nie są dostępne funkcje ryzyka uwzględniające wskaźnik C_{max} manekina 10YO (opracowano go dopiero w latach 2003 – 2005). Warto tu dodać, że możliwości opracowania funkcji ryzyka dla obrażeń są bardzo ograniczone. Przede wszystkim wykluczone są eksperymenty na ludziach. Natomiast wykorzystywane w badaniach zwłoki mają inne właściwości niż żywi ludzie a wyniki nawet wiarygodnych badań na zwierzętach, trudno jest odnosić do ludzi. Ważne są tu także koszty badań oraz względy etyczne (badania zwłok, cierpienia zwierząt) [18].



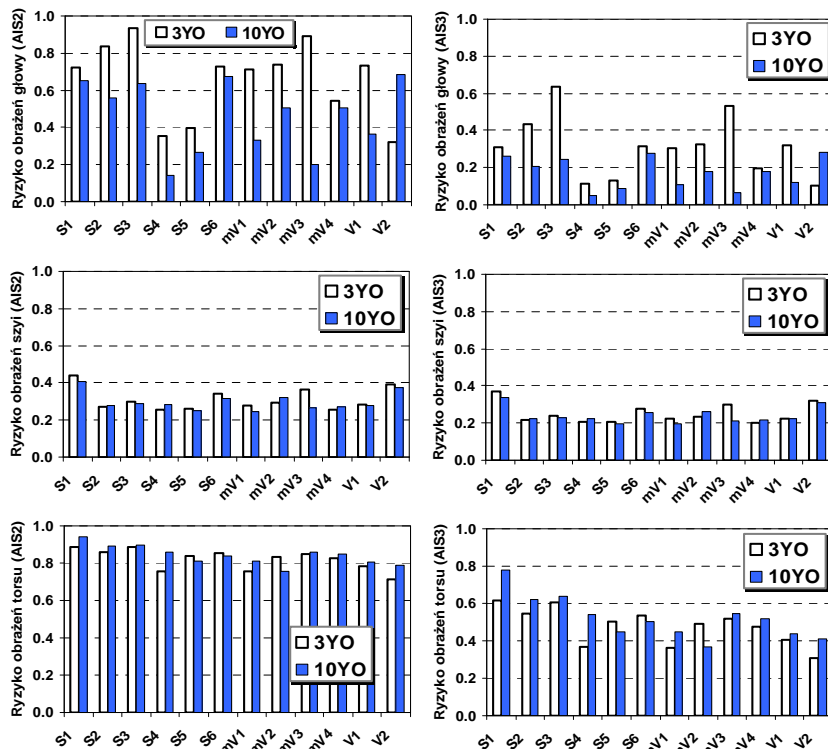
Rys. 10. Funkcje prawdopodobieństwa (ryzyka) obrażeń (AIS2 oraz AIS3) głowy, szyi i klatki piersiowej (torsu) manekinów 3YO i 10YO [1, 7, 14]

Ze względu na różne cechy antropometryczne, oddzielne funkcje ryzyka obrażeń głowy i klatki piersiowej są dla manekinów 3YO i 10YO (rys. 10). Natomiast funkcje ryzyka obrażeń szyi nie zależą od rozmiaru manekina, bowiem już podczas obliczeń wskaźnika N_{ij} uwzględniono różne wartości krytyczne sił i momentów, działających na szyję (tabela 4). Funkcje ryzyka obrażeń szyi i klatki piersiowej nie zaczynają się w początku układu współrzędnych, dlatego nie powinny być stosowane przy małych wartościach obciążeń [1]. Przebiegi funkcji ryzyka wskazują na różną wrażliwość głowy, szyi i klatki piersiowej na urazy. Widoczne są tu następujące zależności:

- znaczne różnice w ryzyku obrażeń głowy manekinów 3YO i 10YO,
- niewielka różnica w ryzyku obrażeń klatki piersiowej manekinów 3YO i 10YO,

- znaczne różnice w ryzyku obrażeń głowy i klatki piersiowej na poziomie AIS2 i AIS3,
- niewielka różnica w ryzyku obrażeń szyi na poziomie AIS2 i AIS3.

Uwzględniając wartości wskaźników z tabeli 3 oraz funkcje ryzyka z rysunku 10, na rysunku 11 zestawiono wyniki obliczeń ryzyka obrażeń manekinów 3YO i 10YO. Ryzyko obrażeń szyi i klatki piersiowej obu manekinów, zarówno na poziomie obrażeń AIS2 jak i AIS3, jest podobne w większości testów. Ryzyko obrażeń klatki piersiowej jest 2÷3 razy większe niż szyi. Uwagę zwracają wyniki obliczeń ryzyka obrażeń głowy. Mamy znaczne różnice ryzyka obrażeń zarówno w poszczególnych testach zderzeniowych jak i pomiędzy manekinami, w tym samym samochodzie. W większości testów ryzyko średnich (AIS2) i poważnych (AIS3) obrażeń głowy manekina 3YO jest większe niż manekina 10YO. Szczególnie widoczne jest to w testach S3 i mV3, gdzie największe obciążenia głowy manekina 3YO występują w chwili uderzenia nią o oparcie fotelika (por. tabela 3).



Rys. 11. Ryzyko obrażeń (AIS2 i AIS3) głowy, szyi i klatki piersiowej (torsu) manekinów 3YO i 10YO

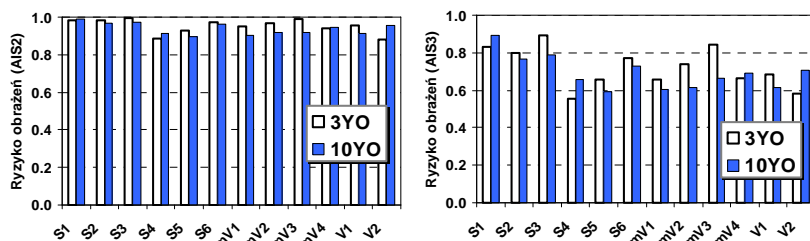
Bardziej jednoznaczną ocenę porównawczą obciążeń manekinów 3YO i 10YO umożliwi wykorzystanie wskaźnika P_{Joint} (Joint Probability of Injury), który wyraża całkowite ryzyko obrażeń manekina [11]:

$$P_{Joint} = 1 - (1 - P_{Head}) \cdot (1 - P_{Neck}) \cdot (1 - P_{Chest}) \quad (5)$$

gdzie: P_{Head} , P_{Neck} , P_{Chest} – ryzyko obrażeń głowy, szyi i klatki piersiowej.

W ten sposób, bazując na funkcjach ryzyka oraz wynikach pomiarów obciążeń dynamicznych poszczególnych części manekina (głowa, szyja, klatka piersiowa), określono całkowite ryzyko średnich (AIS2) i poważnych (AIS3) obrażeń manekinów (rys. 12).

W rozważanych warunkach badań (czołowe uderzenie samochodu w sztywną barierę przy prędkości 56 km/h) ryzyko średnich obrażeń (AIS2) manekinów jest wysokie (w przedziale od 0,88 do 0,99). Różnice pomiędzy ryzykiem obrażeń manekinów 3YO i 10YO są niewielkie (nie przekraczają 8%), przy czym w 8 z 12 testów wartości $P_{Joint}(AIS2)$ są większe dla manekina 3YO. Ryzyko poważnych obrażeń (AIS3) manekinów jest bardziej zróżnicowane (w przedziale od 0,55 do 0,89). W 8 z 12 testów wartości $P_{Joint}(AIS3)$ są większe dla manekina 3YO (o 5% ÷ 27%). Natomiast w dwóch testach (S4 i V2) wartości $P_{Joint}(AIS3)$ są wyraźnie większe dla manekina 10YO (o 16% ÷ 18%).



Rys. 12. Całkowite ryzyko obrażeń (AIS2 oraz AIS3) manekinów 3YO i 10YO

Wyniki oceny ryzyka uwzględniają testy zderzeniowe z samochodami o nadwoziu sedan, minivan i van. Nie stwierdzono jednak, by właściwości strefy zgniotu miały istotny wpływ na obserwowane ryzyko obrażeń manekinów na tylnych siedzeniach. Przykładowo samochody z testów S4 i S5 miały różną głębokość deformacji (tabela 2), jednak ryzyko obrażeń manekinów 3YO i 10YO w tych testach jest podobne. Może to świadczyć o tym, że decydujące znaczenie w kształtowaniu obciążeń manekinów mają tu właściwości urządzeń przytrzymujących.

4. Podsumowanie

Wiek dziecka determinuje sposób jego uczestniczenia w ruchu drogowym, co uwzględnione jest w przepisach, określających zasady korzystania z dróg publicznych [20, 21]. Wskaźnik zagrożenia dzieci jest w Polsce prawie 2 razy większy niż średnia w Unii Europejskiej, mimo że liczba zabitych dzieci w wypadkach drogowych w ostatnich 20 latach zmalała ponad czterokrotnie. Około 50% dzieci zabitych w wypadkach drogowych to pasażerowie samochodów osobowych. Analiza danych z wypadków drogowych w Polsce wskazuje na to, że ryzyko śmierci dzieci-pasażerów podczas wypadku nie zależy od ich wieku, natomiast ryzyko obrażeń dzieci-pasażerów (ranni) jest większe dla starszych dzieci (rys. 3), co może wynikać z częstszego ich podróżowania.

Wyniki badań laboratoryjnych ujawniają znaczne różnice w obciążeniach manekinów w różnych samochodach, co można utożsamiać z różnymi właściwościami ich układów bezpieczeństwa biernego. Wyraźne różnice w obciążeniach manekinów 3YO i 10YO dotyczą obciążenia głowy i szyi oraz ugięcia klatki piersiowej. Ustalono, że znaczne obciążenia głowy i szyi manekina 3YO mogą być skutkiem uderzenia tyłem głowy o oparcie fotelika, w końcowej fazie zderzenia. Stan taki wymaga wprowadzenia zmian w konstrukcji fotelika, które ograniczą efekt odrzucenia manekina w kierunku oparcia fotelika. Manekin 10YO,

zapiwany standardowym pasem bezpieczeństwa, ma taśmę pasa ułożoną na klatce piersiowej, co może powodować znaczne jej ugięcie (por. wskaźnik $\gamma_{C_{max}}$). Manekin 3YO ma paski przytrzymujące na barkach, co korzystnie ogranicza ugięcie jego klatki piersiowej.

Jednoznaczność oceny porównawczej obciążeń manekinów 3YO i 10YO jest trudna, bowiem obciążenia poszczególnych części manekinów (głowa, szyja, klatka piersiowa) nie zmieniają się w poszczególnych samochodach w jednakowym stopniu. Dlatego w ocenie porównawczej wykorzystano relacje pomiędzy wskaźnikami biomechanicznymi a funkcjami ryzyka obrażeń, a w efekcie obliczono całkowite ryzyko obrażeń (wskaźnik P_{Joint}). W rozważanych warunkach badań (czołowe uderzenie samochodu w sztywną barierę przy prędkości 56 km/h, foteliki opisane w pkt. 3.1.) ryzyko poważnych obrażeń (AIS3) w większości testów zderzeniowych było większe dla manekina 3YO (o 5% ÷ 27%). Taki rezultat uzyskano przy uwzględnieniu podczas obliczeń ryzyka obrażeń przyspieszenia klatki piersiowej (C_{Acc}). Uwzględnienie ugięcia klatki piersiowej (C_{max}) w obliczeniach wskaźnika P_{Joint} nie było możliwe, ze względu na brak stosownych funkcji ryzyka obrażeń dla manekina 10YO.

Pracę częściowo przygotowano podczas realizacji projektu N N509 559640, finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki, w latach 2011 – 2013.

Literatura

- [1] Adam T, Untaroiu C D. Identification of occupant posture using a Bayesian classification methodology to reduce the risk of injury in a collision. *Transportation Research Part C*. 2011; 19(6): 1078-1094.
- [2] Bidez M W, Burke D S, King D, Mergl K M, Meyer S E. A Critical safety need for children ages 9 to 12 in the rear seat. 5th International Conference – Protection of Children in Cars; 2007 December 6-7; Munich, Germany.
- [3] Brandstaetter C et al. Annual Statistical Report. Deliverable D3.9 of the EC FP7 project DaCoTA; 2012.
- [4] Brown J, Bilston L, McCaskill M, Henderson M. Identification of injury mechanisms for child occupants aged 2-8 in motor vehicle accidents. Final Project Report for the Motor Accidents Authority of New South Wales; 2005.
- [5] Charlton J, Koppel S, Fitzharris M, Congiu M, Fildes B. Factors that Influence Children's Booster Seat Use. Monash University Accident Research Centre, Report No. 250; 2006.
- [6] Childhood Road Safety, The European Child Safety Alliance - EuroSafe. Consumer Safety Institute in the Netherlands; 2007; Holandia.
- [7] Eppinger R et al. Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint systems – II, NHTSA. National Highway Traffic Safety Administration; 1999; USA.
- [8] European Road Safety Observatory. Traffic Safety Basic Facts 2012: Children (Aged<15); 2012.
- [9] Hong S, Park Ch, Morgan R, Kan C, Park S, Bae H. A study of the rear seat occupant safety using a 10-year-old child dummy in the new car assessment program. SAE Technical Paper Series 2008-01-0511; 2008.
- [10] Muszyński A, Trzaska P, Wicher J, Mazurkiewicz Ł. Analysis of the forces developing in the straps of the belts that restrain a child in a safety seat. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*. 2015; 67(1): 113–126.

- [11] New Car Assessment Program. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). Federal Register. 2008; 73(134).
- [12] Prochowski L, Zielonka K, Trzaska P. Analysis of the protective properties of the seat and booster based on the movement of the child at the moment of car impact into barrier. *Logistyka*. 2012; 3: 1849-1856.
- [13] Prochowski L, Żuchowski A. Analysis of the influence of passenger position in a car on a risk of injuries during a car accident. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 2014; 16(3): 360-366.
- [14] Proposed Amendment to FMVSS No 213 Frontal Test Procedure NHTSA; 2002; USA.
- [15] Report number CAL-05-06. New Car Assessment Program (NCAP) Frontal Barrier Impact Test, General Motors Corporation – 2005 Chevrolet Trailblazer MPV. General Dynamics, Advanced Information Engineering Services, Transportation Sciences Center; 2005; Buffalo, USA.
- [16] Report number TR-P25001-08-NC: New Car Assessment Program (NCAP) Frontal Barrier Impact Test, Honda Motors Corporation – 2005 Honda Odyssey 5-Door MPV. Karco Engineering; 2004; Adelanto, USA.
- [17] SAE J1727: Calculation Guidelines for Impact Testing; 02-2010.
- [18] Schmitt K U, Niederer P F, Muser M H, Walz F. Trauma Biomechanics. Accidental injury in traffic and sports. Springer Verlag Berlin Heidelberg; 2010.
- [19] U.S. Department of Transportation; NHTSA. Laboratory Test Procedure, TP208-14; 2008.
- [20] Road Traffic Law of 20 June 1997 [cited 01 Feb 2016]. Available from <http://isap.sejm.gov.pl/DetailsServlet?id=WDU19970980602>.
- [21] Act on Vehicle Drivers of 5 January 2011 [cited 01 Feb 2016]. Available from <http://isap.sejm.gov.pl/DetailsServlet?id=WDU20110300151>.
- [22] Visvikis C, Pitcher M, Girard B, Longton A, Hynd M. Literature review, accident analysis and injury mechanisms. Final Project Report 218744, EPOCH Consortium; 2009.
- [23] Wicher J. Pojazdy samochodowe. Bezpieczeństwo samochodów i ruchu drogowego (Motor vehicles. The safety of motor vehicles and road traffic). WKŁ, Warszawa; 2012.
- [24] Żuchowski A. Child safety in a car during a frontal collision. *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2013; 20(1): 395-404.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Żuchowski A. The use of energy methods at the calculation of vehicle impact velocity. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*. 2015; 68(2): 197-222.
- [28] The World Bank [cited 01 Feb 2016]. Available from <http://data.worldbank.org>.
- [29] Dla kierowców [cited 01 Feb 2016]. Available from <http://dlakierowcow.policja.pl>.
- [30] Eurostat [cited 01 Feb 2016]. Available from <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>.
- [31] Humanetic Innovative Solution [cited 01 Feb 2016]. Available from <http://humaneticsatd.com>.
- [32] National Highway Traffic Safety Administration [cited 01 Feb 2016]. Available from <http://nhtsa.gov>.