

THE ANALYSIS OF SAFETY OF REAR SEAT OCCUPANTS OF A PASSENGER CAR DURING THE ROAD ACCIDENT

ANDRZEJ ŻUCHOWSKI¹, LEON PROCHOWSKI

Summary

The test results indicate that in many structural solutions of the passenger cars, dynamic loads of the rear seat passengers can be significantly higher compared to the front seat passengers, so the risk of injuries is higher for them. The work specifies examples of courses of dynamic loads that occur during the frontal collision with an obstacle and that affect the front seat and the rear seat passengers. At the same time, the attention is paid to relations between a seat occupied in a car and the probability of injuries in various road accidents.

The analysis of dynamic loads that affect the rear seat passengers in many cars has been carried out. In order to do that, the laboratory test (crash test) results have been used. Dynamic loads affecting the passengers of various anthropometrical features have been considered. The results of those analyses have been referred to the loads affecting a driver and a front seat passenger, that is the persons who drive a car and are protected by typical passive safety systems on the front seats. The indexes of biomechanical human body resistance to impact load results have been used during the evaluation.

Keywords: transport, road safety, vehicle safety, crash tests, rear seat occupant

1. Introduction

In critical road situations, human life and injuries are determined by the equipment of the individual protection system installed in a car, as seat belts, airbags, head restraints, seats and child seats. Efficiency of operation of that equipment depends on many factors that are usually hard to consider at the design stage, e.g. passenger's weight and height, seat occupant's position, seat adjustment and steering wheel condition, direction of impact.

The safety of the car occupants on the second and the third row seats in the passenger cars has been treated as a secondary issue so far. The achieved stage of the structure of that equipment for the rear seat occupants makes an important confirmation of that state.

¹ Military University of Technology, Department of Mechanical Engineering, e-mail: azuchowski@wat.edu.pl, tel. 22 683 74 54

Usually there is no adjustment of the seat belt fixing point position, seat belt tensioners, seat adjustment. Safety approvals for motor vehicles within a scope of protection of the car occupants during front and side collisions (Directive 96/79/WE and 96/27/WE of the European Parliament and Council) refer only to the front seat occupants.

The purpose of this work is to compare dynamic loads affecting the occupants of the second and the third row seats with the loads affecting a driver and a front seat passenger during the road accident. Actuality of this work results from several important aspects:

- the increasing number of seats in the passenger cars, from 4-5 to 5-7 or even more;
- the third row of the seats has appeared, usually in the cargo area;
- the safety equipment for the second and the third seat row is usually worse than for the first row of the seats.

This paper has carried out the analysis of the results of measurements made during the crash tests [8]. Analyzed results refer to the frontal collision of a car with a rigid flat barrier, placed perpendicularly to the direction of the car motion.

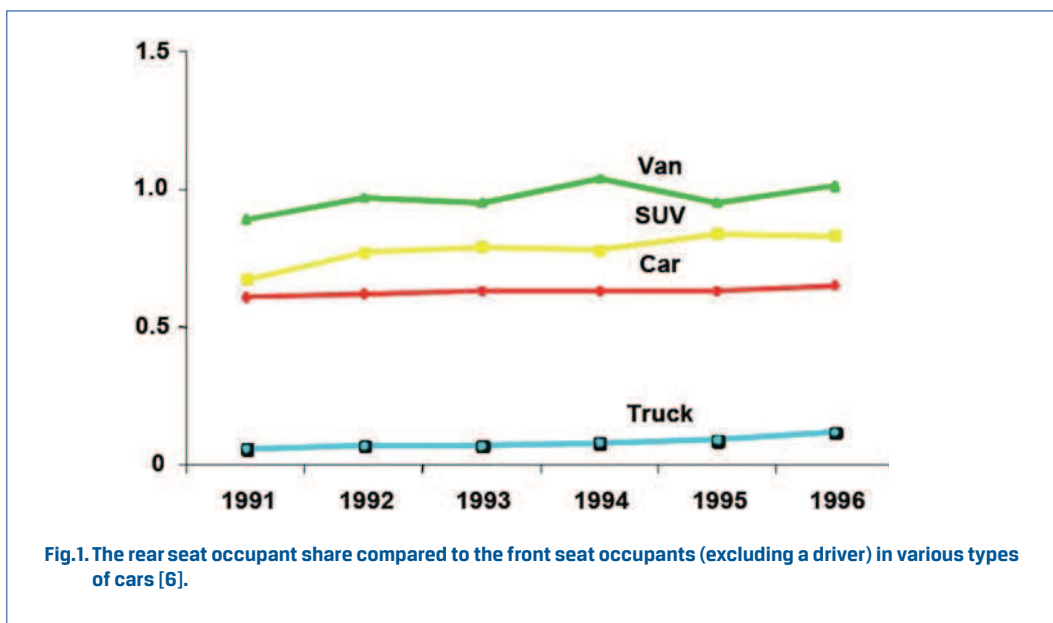
The test results indicate that in many passenger cars dynamic loads of the rear seat occupants can be significantly higher than of the front seat occupants so the risk of injuries is much higher for them [3,6,7,9].

2. Static characteristics of the road accident victims in the passenger cars

The majority of the passenger cars is used only by the drivers. The data about the number of other occupants in the passenger cars is published rarely. In the studies carried out in Cracow in the 90's, it was found that a average occupation of cars in the city traffic when commuting to work amounts to 1.4 – 1.7 persons per car [2]. On the basis of detailed data on the road accidents in Japan during 1995-2000, this paper [7] presents the following structure of occupation in over 530 thousand cars:

- 84,6 % only a driver,
- 11,7% a driver +1 passenger,
- 2,5% a driver +2 passengers,
- 0,6% a driver +3 passengers,
- 0,1% a driver +4 passengers.

The data indicates that the rear seat occupants make only about 3% of a total number of people in the passenger cars. Similar results are presented on figure 1. The figure shows the results of the measurement of passenger presence in the rear seats compared to the front seat occupants [6]. A driver is excluded from the seat occupancy frequency calculations.



The structure of the road accident victims involving the passenger cars in Poland is given in table 1. The data concerning the victims among the drivers, the front seat occupants and the rear seat occupants are given separately. Victims among the passengers include children, however the available statistical data do not include the information in what type of vehicle a child passenger was injured in the road accident.

Table 1. The structure of the road accident victims in Poland involving the passenger cars (p.v.) [4].

Year	Total		p.v. driver		p.v. passenger - front		p.v. passenger - rear		Passenger - child*	
	Killed	Injured	Killed	Injured	Killed	Injured	Killed	Injured	Killed	Injured
2007	5583	63224	1517	18355	882	15057	183	2 668	-	-
2008	5437	62097	1465	17469	904	15097	171	2 549	81	2591
2009	4572	56046	1334	16030	702	13554	143	2 291	60	2319
2010	3907	48952	1125	14033	595	11684	133	1 872	60	2115

*) children 0-14 years old are included as occupants of the passenger cars and other vehicles.

On the basis of the data from table 1, figure 2 shows the share of drivers and passengers of the passenger cars in a total number of the road accident victims during 2007-2010. Fatal victims made 46...48 % and injured victims made 56...57 %, including:

- drivers 27...29 % fatal and 28...29 % injured victims;
- front seat passenger 15...17 % fatal and 23...24 % injured victims;
- rear seat passengers 3 % fatal and 4 % injured victims.

The rear seat passengers made:

- 6,6...7,2% fatal victims and 6,8...7,4% injured victims among the passenger car victims (driver + passengers);
- 15,9..18,3% fatal and 13,8...15,1% injured victims among the passengers (excluding drivers).

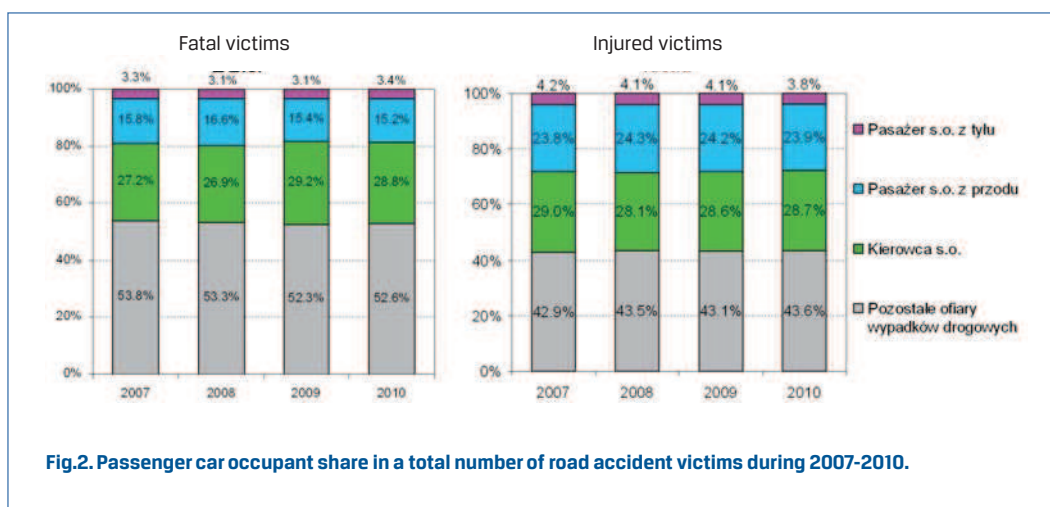


Fig.2. Passenger car occupant share in a total number of road accident victims during 2007-2010.

Figure 3a shows the statistical data on the road accident victims in the passenger cars (people of age over 13). It also presents the position of those victims in a car. Very interesting information results from a combination of seat occupancy frequency and the statistics of the victims in the passenger cars, as shown on figure 3b [6]. Columns on figure 3b show the quotient of victims with severe injuries (MAIS 3+) against a number of occupants on particular seats during an accident. It indicates an unfavourable situation of rear seat occupants in a passenger car.

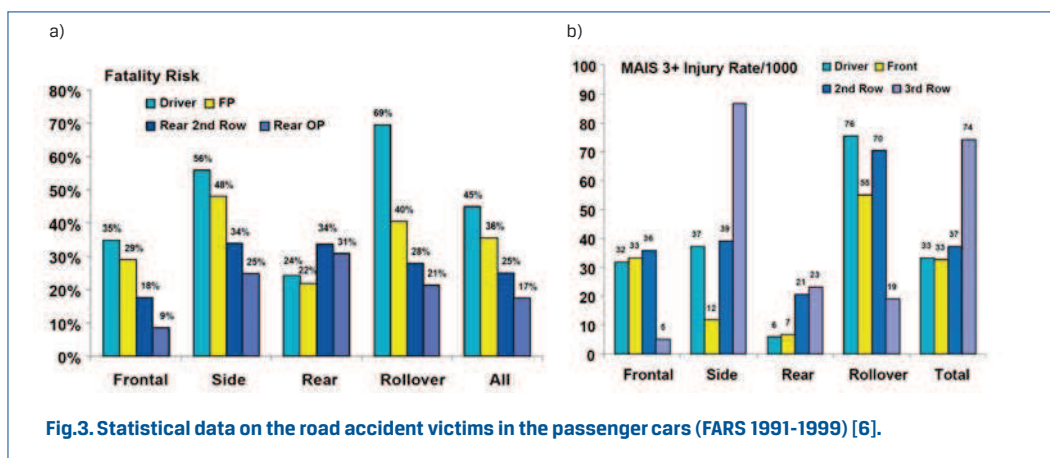


Fig.3. Statistical data on the road accident victims in the passenger cars (FARS 1991-1999) [6].

When completing this information, it is worth mentioning that a constant increase of the automotive industry development index (number of passenger cars per 1000 inhabitants) indicates decreasing number of people per one car (table 2). The number was reduced from 15 in 1980 to 2.25 in 2010.

Table 2. Automotive industry development index in Poland [4,5].

Year	1980	1990	2000	2005	2010
Number of inhabitants (thousand)	35 735	38 183	38 644	38 157	38 187
Number of passenger cars (thousand)	2 383	5 261	9 991	12 339	16 990
Automotive industry development index	67	138	259	323	445
Number of people per one passenger car	15,00	7,26	3,87	3,09	2,25

3. Arrangement of car occupants and the scope of analysis

Main factors affecting the injuries of occupants on the particular rows of the seats are as follows:

- availability of individual protection means on the first seat row and the next seat rows;
- position of car occupants and the available space on those seats.

The influence of those factors on the injuries of car occupants, regardless of the seat occupied by them in a particular row of seats, has been considered. Figure 4 shows the car seat designation that will be used in the following part of this paper.

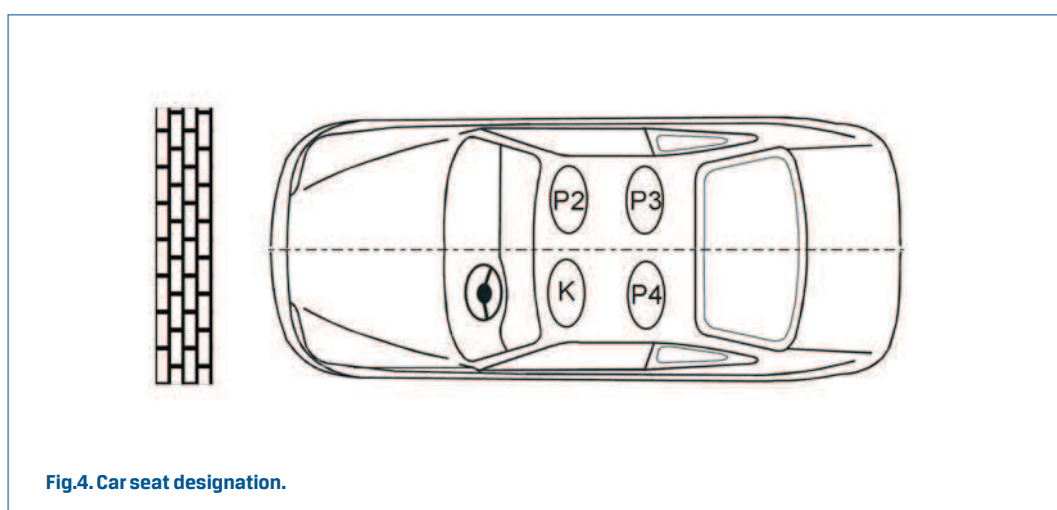


Fig.4. Car seat designation.

Considering the factors determining the injuries and the crash test results, the further analysis uses the results of measurement of dynamic loads applied on the head, torso and pelvis, courses of forces in the legs and the neck as well as the results of measurement of forces in the seat belts. The examples of the courses of those physical values are shown on figure 5. They were obtained during a frontal car collision with a rigid obstacle at the speed of 56 km/h. A dummy (F5 – 5-centile female) was placed on a driver's seat, on a passenger's seat next to a driver's seat (P2) and the right rear seat (P3). The following executions were specified in the following diagrams:

- head, torso and pelvis resultant delay;
- resultant force affecting the neck;
- chest (torso) deflection;
- forces affecting the thigh bones.

Resultant delay and force values were calculated on the basis of components measured in three mutually perpendicular directions (x,y,z):

$$a(t) = \sqrt{a_x^2(t) + a_y^2(t) + a_z^2(t)} \quad , \quad F(t) = \sqrt{F_x^2(t) + F_y^2(t) + F_z^2(t)} \quad .$$

Direct comparison of executions indicates significantly higher loads affecting the P3 dummy compared to the similar loads observed on the K and P2 dummies. For example, on the basis of figure 5, the P3 passenger's head load criterion amounts to HIC=1140 (fatal injury), however that criterion for a driver and the P2 passenger amounts to HIC=280 and 331 respectively. The above values confirm that there are situations where the threat of life is much higher for the rear seat occupant than for the front seat occupants.

The values measured during the crash tests were used to define two types of numerical criteria:

$$W1 = \frac{P2 \text{ passenger load}}{driver \text{ load}} \quad ,$$

$$W1 = \frac{P3 \text{ or } P4 \text{ passenger load}}{P2 \text{ passenger load}}$$

Those criteria will be applied for the results of the experiments where two dummies, with comparable antropometrical features, were placed on particular seats. It is worth mentioning that the index product always gives supplementary information and at the same time in accordance with the purpose of the analysis.

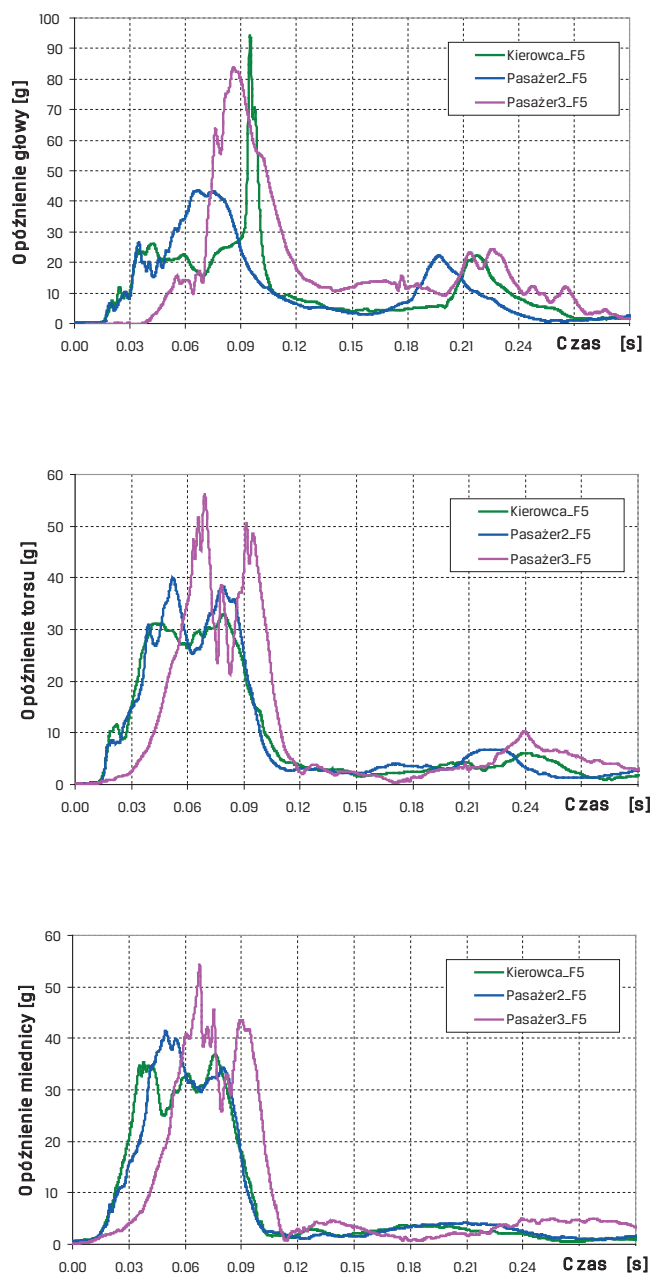


Fig.5. Courses of dynamic loads applied on the F5 dummy's head, neck, torso, pelvis and legs during frontal collision with a rigid obstacle (2004 four-door sedan, weight of 1654 kg).

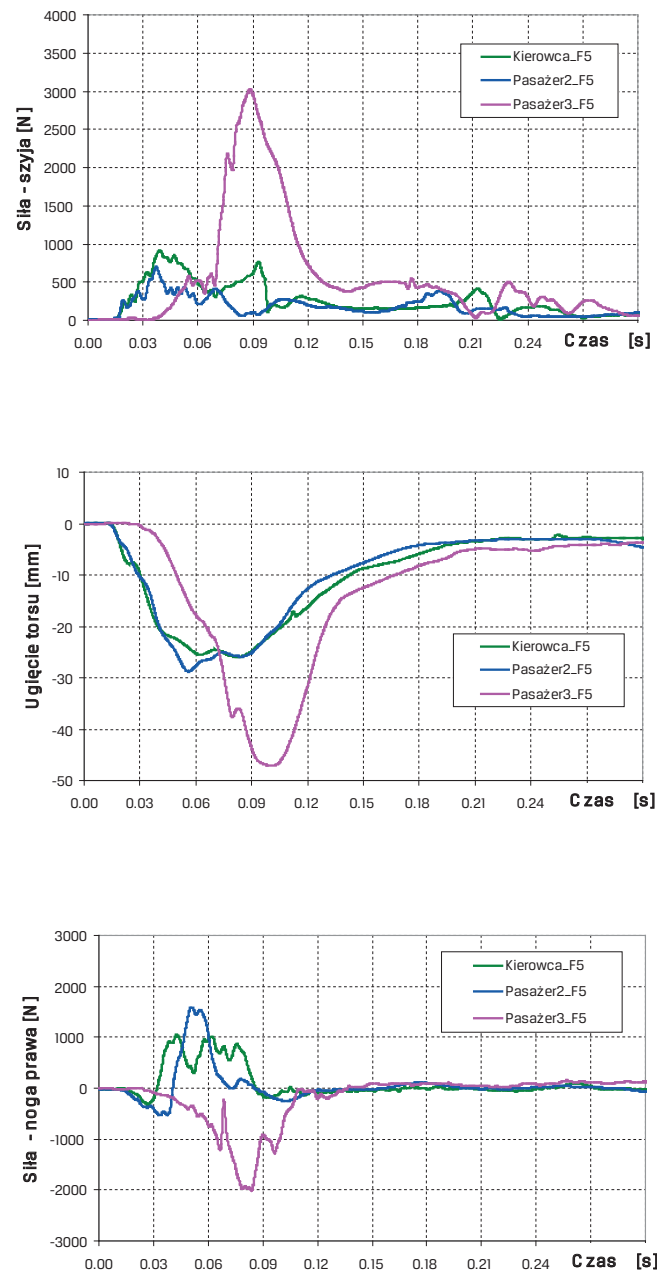


Fig.5. Courses of dynamic loads applied on the F5 dummy's head, neck, torso, pelvis and legs during frontal collision with a rigid obstacle (2004 four-door sedan, weight of 1654 kg). (cont.)

During a detailed evaluation of dynamic loads affecting the rear seat occupants, the criteria and values referring to the biomechanical resistance of a human body to the results of the impact loads, namely:

- HIC - Head Injury Criterion;
- Nij - Neck Injury Criterion;
- maximum neck stretching and pressing force;
- maximum torso delay;
- maximum chest (torso) deflection;
- VC - Viscous Criterion);
- maximum force affecting the tight bone;
- maximum seat belt stretching force.

4. The analysis of the state of passenger protection equipment on the further seat rows

A driver (K) and a passenger sitting next to a driver (P2) are protected (against the results of the frontal impact) by means of seat belts with tensioners and limiters and the airbags. These elements are permanently improved. The rear seat occupants (P3 and P4) are usually equipped only with the seat belts without tensioners and limiters. The airbag significantly reduces the occupant displacement against the seat and reduces the dynamic loads that result in injuries. However, the passenger displacement on the rear seats is high. The example of such displacement is shown on figure 6.



Fig.6. F5 dummy displacement on the P3 seat during frontal collision of a car with a rigid flat barrier at the speed of 56 km/h [8].

The lack of seat belt tensioners and limiters in the rear seats significantly reduces the possibility of protecting the rear seat occupants against injuries. This is reflected by the results of the work [9], where the Hybrid-III (50-centile male) dummy was tested on the rear car seat with application of various individual protection means (no airbag):

- A - seat belt without a tensioner and limiter;
- B - seat belt with a tensioner and limiter;
- C - seat belt with a tensioner and limiter.

The measurement results presented in table 3 clearly confirm that there is a possibility of reducing the loads affecting the head, the torso and the neck by development of individual protection equipment.

Table 3. Extreme values of the loads affecting a passenger (description in the text) [9].

	Value	A	B	C	A/C [%]	B/C [%]
Head	HIC36	888	663	458	194	145
	Delay [g]	73,0	67,3	57,3	127	117
Neck	Force Fx [kN]	1,64	1,53	1,14	144	134
	Force Fz [kN]	2,75	2,49	2,24	123	111
	Moment span My [Nm]	218	181	174	125	104
Torso	Deflection [mm]	61	50	37	165	135
	Delay [g]	60,8	54,6	56,7	107	96
	VC [m/s]	0,95	0,55	0,28	339	196
Seat belt	Force – arm section [kN]	10,8	10,0	5,9	183	169
	Force – hip section [kN]	11,4	11,1	10,4	110	107

The seat belt tensioners and limiters successfully reduce the risk of passenger injuries during the road accident. Two last columns in table 3 clearly indicate a possibility of improvement of the safety conditions for the rear seat occupants. The work [10] states that the head and torso dynamic loads are clearly lower in the cars where the seat belts with tensioners and limiters are installed: the HIC index is reduced by 20–40%, the maximum torso acceleration is reduced by 10–20%.

5. Car interior dimensions and their influence on the passenger safety

The occupant body position on a seat and resulting distance between the head, the torso, the legs and the car components makes an important factor which affects the injuries during the road accident. These factors are conditioned by the anthropometrical human features and the car interior dimensions.

Several characteristic values, describing the anthropometrical features of a human being are shown on figure 7, where some dimensions of the Hybrid III dummies are given: M50 (50-centile male) an F5 (5-centile female).

The car interior dimensions and a possibility of the seat position adjustment (usually only the front ones) provide many various possibilities of positioning the body on the seat. For example, figure 8 shows the position of the M50 and F5 dummy's legs in a car. Calculations

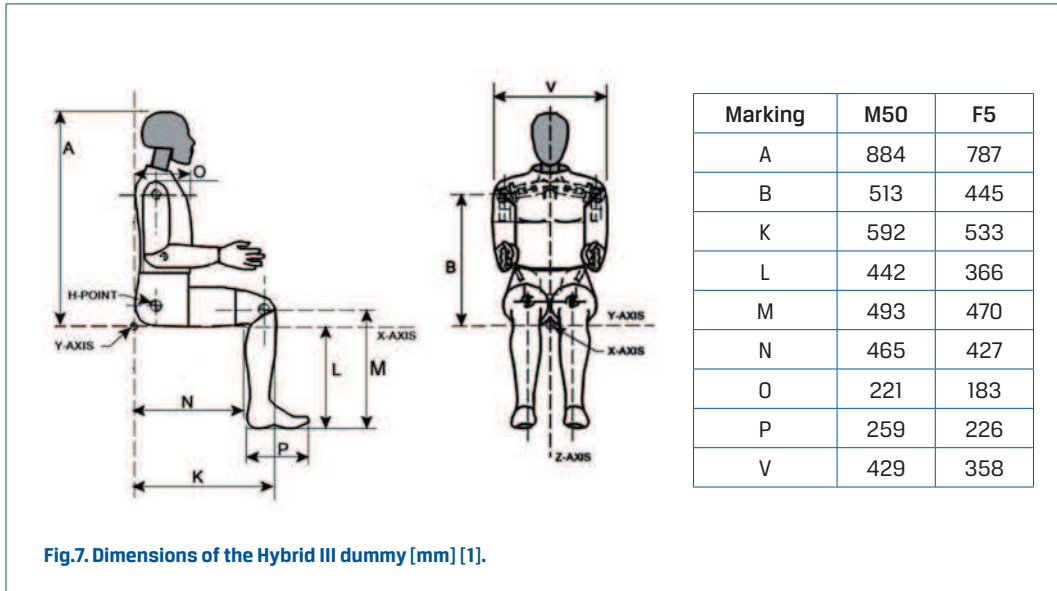


Fig.7. Dimensions of the Hybrid III dummy [mm] [1].

were made for $h=20, 25$ and 30 cm (h – height of point H of the dummy above the floor) and the seat inclination angle $\chi =15, 25$ and 30 degrees. Leg position angle and the place of the leg rest on the floor affect the kinematics of the human body motion during the road accident, and first of all on the displacement of the hips and the torso against the seat of the dummy fastened with the seat belts.

Figure 9 shows characteristic dimensions of the space available for the car passengers (the driver and the rear seat occupant). Driver's position in a car mostly results from the arrangement of the steering elements (fig. 9a). However the position of the rear seat

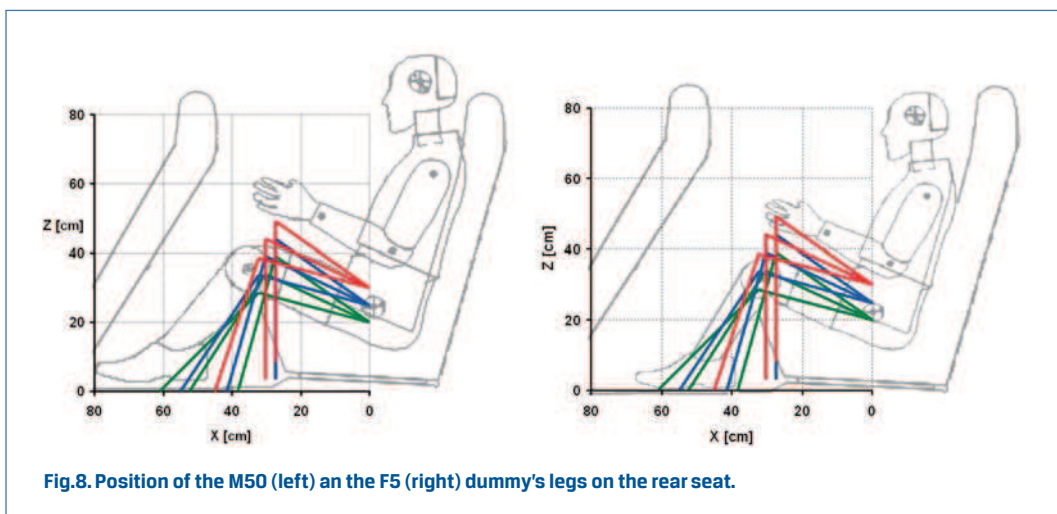


Fig.8. Position of the M50 (left) and the F5 (right) dummy's legs on the rear seat.

passengers is limited by the seat dimensions and its position against the floor (height and inclination angle), backrest inclination angle and the distance to the front seats. In some cars (e.g. SUV, pickup) the space for the rear seat occupants is significantly reduced and forces the passengers to take the upright position. As a result, the centre of the human body weight is located higher than in case of a typical position in a passenger car.

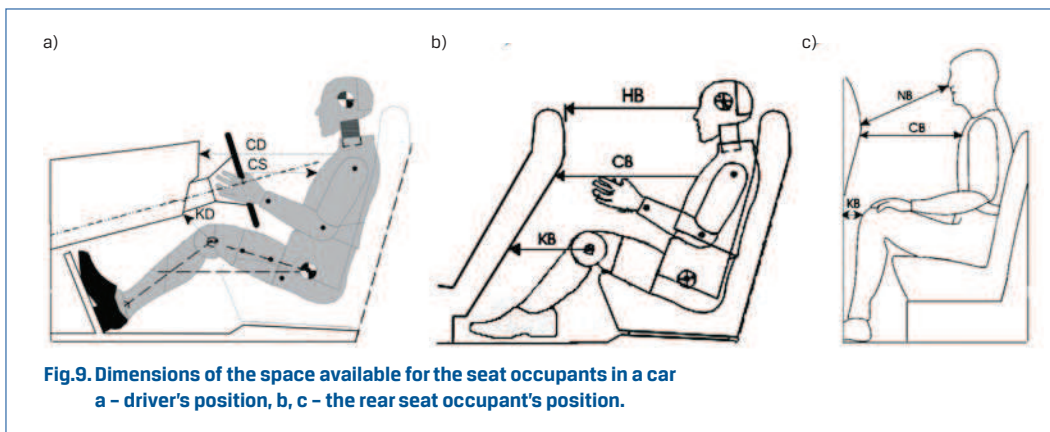
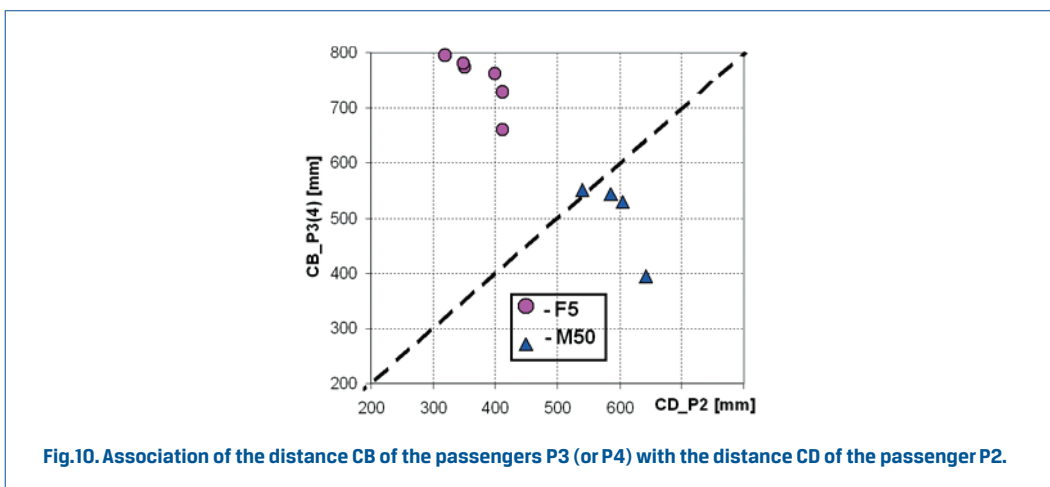


Figure 10 shows the comparison of the distance CB of the passengers P3 (or P4) with the distance CD of the passenger P2. The specification includes the situation when the dummies of the same size (M50 or F5) were placed on the front and the rear seats of a car. Obviously the higher space for the rear seat passengers can be obtained where only two F5 dummies are placed in a car. Considering the dimensions of the dummies (fig.7) and dimensions of the space available for the rear seat passengers (fig. 9), we can come to a conclusion that there is a possibility that the head or the knees can hit the back part of the front seats. The tension of the seat belts, that should successfully keep the passenger on the seat, is of high significance in such case.



6. Examples of the comparative test results

The loads affecting the driver and the passengers P2, P3 and P4 were compared on the basis of the available car crash tests results (frontal collision). The tests were chosen where the passenger dummy placed on the "i" seat was the same as the driver's dummy and fastened with the seat belts. The airbags for the driver and the passenger P2 were installed in all cars. The tests for the cars, weight: 1500-2700 kg, manufactured during 2004-2006 were used.

The results of W1 and W2 index calculations are presented on figures 11...15. The W2 index calculations include the passengers P3 and P4. The continuous lines $W1=1$ and $W2=1$ divide the calculation results on those figures into four areas:

- G1: P2 passenger load $<$ than the driver's and $P3(4) > P2$;
- G2: P2 passenger load $>$ than the driver's and $P3(4) > P2$;
- G3: P2 passenger load $<$ than the driver's and $P3(4) < P2$;
- G4: P2 passenger load $>$ than the driver's and $P3(4) < P2$.

In the majority of cars, the results from the areas G1 and G2 dominate, regardless of the value used for the calculation of W1 and W2 indexes. So the collected results lead to the following conclusions:

1. The head protection level is clearly the highest for the driver. The load affecting the head of the passenger P2 is often 1.5 times higher than for the driver and the loads of the heads P3 and P4 are 1.5-2.5 times higher than P2).
2. The loads affecting the chest are the lowest for the passenger P2. In case of passengers P3 and P4, the chest deflection is 1.5-2.5 times higher than for P2, so the VC index is higher.
3. The passengers P3 and P4 are particularly exposed to the neck injuries. The values of the Nij index and the neck stretching force are much higher than the load affecting the driver and the passenger P2. It results from the lack of the equipment that can reduce the head displacement (airbags) for the second and the third seat row occupants.
4. The loads affecting the legs on the rear seats are usually lower than on the front seats. The legs of the passengers P3 and P4, due to their positions (usually different than position of the driver's legs and the P2 passenger's legs), usually do not touch the backrest of the front seats and the axial squeezing forces in their thigh bones are not high. However, in such case the legs do not support the operation of the seat belts in order to keep a passenger in the seat.
5. The forces affecting the seat belts on the rear seats are 1.5-2.5 times higher than on the front seats. In case of the arm section, equipped with a tension force limiter on the front seats, we have $W2 > 5$. The forces affecting the seat belt of the passenger P2 are not higher than for a driver and they are comparable in the hip section.

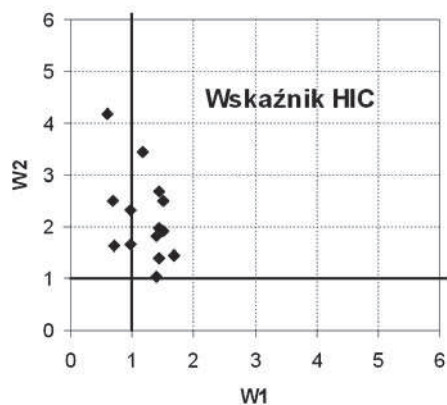


Fig.11. Association of W1 and W2 indexes – head load.

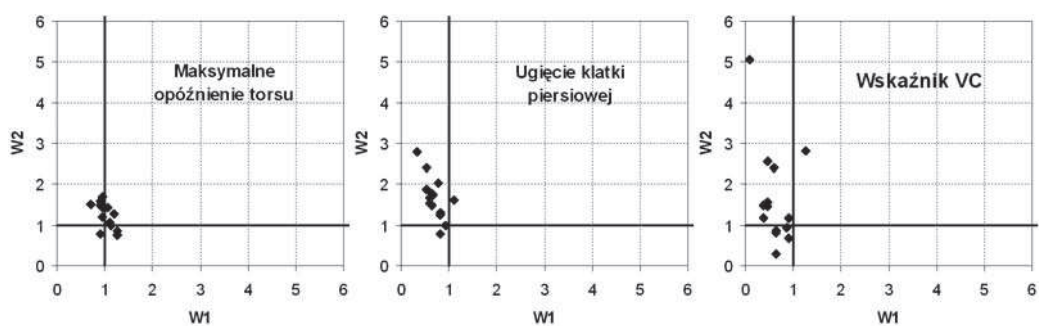


Fig.12. Association of W1 and W2 indexes – chest load.

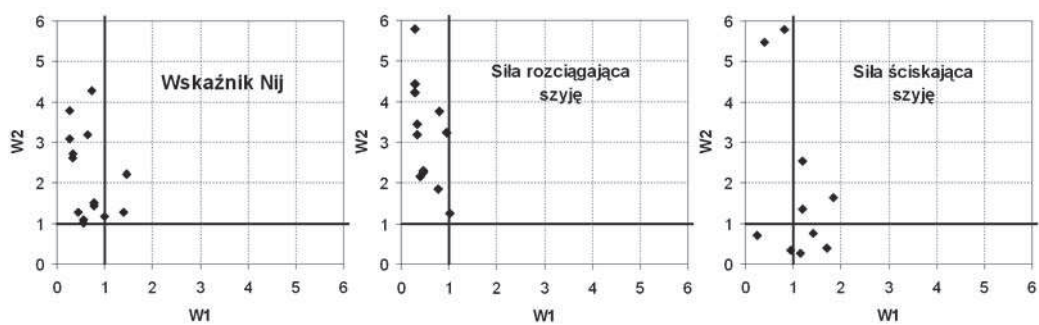


Fig.13. Association of W1 and W2 indexes – neck load.

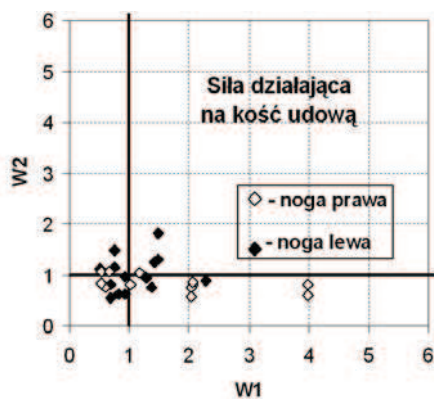


Fig.14. Association of W1 and W2 indexes
- leg load.

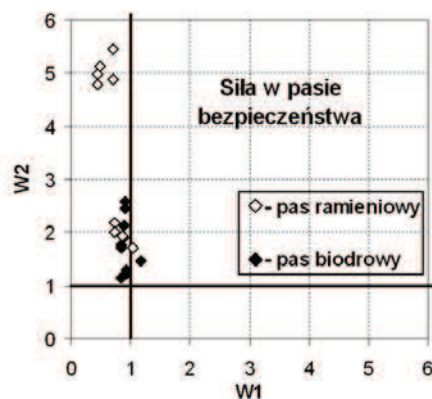


Fig.15. Association of W1 and W2 indexes
- forces stretching the seat belt tape.

Conclusions

The analyses that have been carried out confirm the fact that injuries of the car occupants also depend on their seat location in a car. In order to facilitate such evaluation, the W1 and W2 indexes have been introduced. They facilitate the comparison of dynamic loads affecting the occupants in the second and the third seat rows. Their dimensionless nature provides many possibilities of using that index to define the car passenger safety level.

The values of the W2 index confirm that during a frontal collision with a rigid obstacle, the observed dynamic loads affecting the rear seat occupants are often many times higher than for the front seat occupants. They are particularly exposed to the risk of fatal head and neck injuries. The calculation results given in this paper are confirmed by the statistical data on the road accident victims.

Separate analyses indicate basic actions that lead to the improvement of situation of the rear seat occupants. The examples of results compared in the last two columns in table 3 clearly indicate the possibilities of improving the safety condition for the rear seat occupants by the development of the passive safety systems.

Reference

- [1] *Final Report of New Car Assessment Program Testing*, Report Number: CAL-05-03, National Highway Traffic Safety Administration, USA, Washington, 2004 (www-nrd.nhtsa.dot.gov).
- [2] GACA, S., SUCHORZEWSKI, W. and TRACZ M.: *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*, WKŁ, 2008
- [3] KUPPA, S., SAUNDERS, J. and FESSAIAIE, O.: *Rear Seat Occupant Protection in Frontal Crashes*. The 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Washington 2005.
- [4] Materiały informacyjne Policji.

- [5] Materiały informacyjne GUS.
- [6] PARENTEAU, CH. AND VIANO, D.C.: *Field Data Analysis of Rear Occupant Injuries Part I: Adults and Teenagers*, SAE 2003-01-0153.
- [7] SHIMAMURA, M., YAMAZAKI, M. AND FUJITA, G.: *Method to Evaluate the Effect of Safety Belt Use by Rear Seat Passengers on the Injury Severity of Front Seat Occupants*. Accident Analysis & Prevention 37/2005.
- [8] www.nhtsa.dot.gov.
- [9] ZELLMER, H., LÜHRS, S. and BRÜGGEMANN, K.: *Optimized Restraint Systems for Rear Seat Passengers*. The 16th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Kanada 1996.
- [10] ŻUCHOWSKI, A. AND JACKOWSKI, J.: *Analysis of Properties Operation of the Supporting Equipment for The Seat Belts*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol.18, No.1, Warszawa 2011.

The paper has been prepared according to the project no. 5596/B/T02/2011/40,
financed from the funds of the National Centre of Science.

ANALIZA STANU BEZPIECZEŃSTWA PASAŻERÓW NA TYLNYCH SIEDZENIACH SAMOCHODU OSOBOWEGO PODCZAS WYPADKU DROGOWEGO

ANDRZEJ ŻUCHOWSKI¹, LEON PROCHOWSKI

Streszczenie

Wyniki badań pokazują, że w wielu rozwiązaniach konstrukcyjnych samochodów osobowych, obciążenia dynamiczne pasażerów na tylnych siedzeniach mogą być znacznie większe niż osób na przednich fotelach, a więc i ryzyko obrażeń jest dla nich wyższe. W pracy zestawiono przykładowe przebiegi obciążeń dynamicznych, powstających podczas czołowego uderzenia w przeszkodę i które działają na osoby jadące w pierwszym i drugim rzędzie foteli samochodowych. Jednocześnie zwrócono uwagę na relacje między miejscem zajmowanym w samochodzie a prawdopodobieństwem odniesienia obrażeń w różnych wypadkach drogowych.

Przeprowadzono analizę obciążeń dynamicznych, jakie działają na osoby na tylnych siedzeniach w wielu samochodach. W tym celu wykorzystano wyniki badań laboratoryjnych (testów zderzeniowych) samochodów. Rozważono obciążenia dynamiczne działające na pasażerów o różnych cechach antropometrycznych. Wyniki tych analiz odniesiono do obciążeń działających na kierowcę i pasażera obok kierowcy, a więc do osób jadących, które są chronione przez typowe systemy bezpieczeństwa biernego na przednich fotelach. Podczas oceny wykorzystano wskaźniki biomechanicznej odporności ciała człowieka na skutki obciążeń udarowych.

Słowa kluczowe: transport, bezpieczeństwo ruchu drogowego, bezpieczeństwo pojazdów, testy zderzeniowe, pasażer na tylnym siedzeniu

1. Wprowadzenie

W krytycznych sytuacjach drogowych o życiu i obrażeniach człowieka decydują urządzenia systemu ochrony indywidualnej w samochodzie, takie jak pasy bezpieczeństwa, poduszki gazowe, zagłówki, fotele i foteliki dla dzieci. Skuteczność działania tych urządzeń zależy od wielu czynników, często trudnych do uwzględnienia na etapie ich projektowania,

¹ Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: azuchowski@wat.edu.pl, tel. 22 683 74 54

np. masa i wzrost osoby jadącej, pozycja na fotelu, stan regulacji fotela i koła kierownicy, kierunek uderzenia.

Problem bezpieczeństwa osób jadących na drugim i trzecim rzędzie foteli w samochodach osobowych dotychczas traktowany jest drugorzędnie. Ważnym potwierdzeniem tego stanu jest osiągnięty etap konstrukcji tych urządzeń dla osób na tylnych fotelach. Z reguły brakuje tam regulacji położenia punktów mocowania pasów, napinaczy pasów, regulacji siedziska fotela. Także wymagania homologacyjne do pojazdów w zakresie ochrony osób znajdujących się w samochodach podczas zderzenia czołowego i bocznego (Dyrektywy 96/79/WE i 96/27/WE Parlamentu Europejskiego i Rady) dotyczą wyłącznie ochrony osób na przednich siedzeniach.

Celem pracy jest porównanie obciążeń dynamicznych, działających na osoby jadące na kolejnych rzędach foteli, z obciążeniami działającymi na kierowcę i siedzącego obok niego pasażera w czasie wypadku drogowego. Aktualność pracy wynika z kilku ważnych aspektów:

- rośnie liczba siedzisk w samochodach osobowych, z 4-5 do 5-7 a nawet więcej;
- pojawił się trzeci rząd foteli, często w miejscu obecnego bagażnika;
- wyposażenie w urządzenia do ochrony osób na drugim i trzecim rzędzie foteli jest zwykle gorsze niż na pierwszym.

W pracy dokonano analizy wyników pomiarów wykonywanych podczas testów zderzeniowych [8]. Analizowane wyniki dotyczą czołowego uderzenia samochodu w sztywną, płaską barierę, ustawioną prostopadle do kierunku ruchu samochodu.

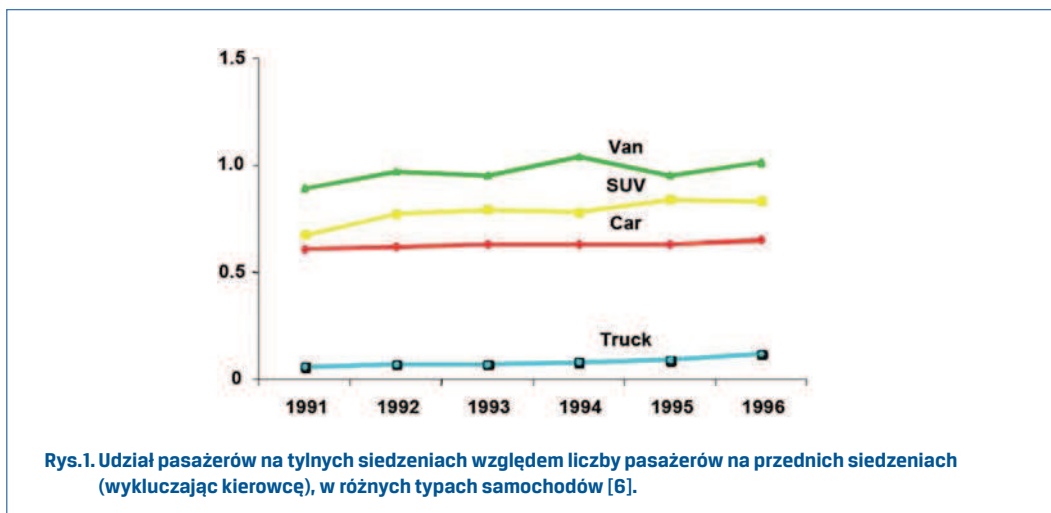
Wyniki badań pokazują, że w wielu samochodach osobowych, obciążenia dynamiczne pasażerów na tylnych siedzeniach mogą być znacznie większe niż osób na przednich fotelach, a więc i ryzyko obrażeń jest dla nich wyższe [3,6,7,9].

2. Charakterystyki statystyczne ofiar wypadków drogowych w samochodach osobowych

Znaczna część samochodów osobowych wykorzystywana jest wyłącznie przez ich kierowców. Rzadko są publikowane dane o liczbie pasażerów przewożonych samochodami osobowymi. W badaniach wykonanych w Krakowie w latach 90-tych stwierdzono, że średnie napełnienie samochodów w ruchu miejskim podczas dojazdu i powrotu z pracy jest 1,4-1,7 osoby na samochód [2]. Na podstawie szczegółowych danych o wypadkach drogowych w Japonii z lat 1995-2000 w pracy [7] podano następującą strukturę napełnienia w ponad 530 tysiącach samochodach:

- 84,6 % tylko kierowca,
- 11,7% kierowca +1 pasażer,
- 2,5% kierowca +2 pasażerów,
- 0,6% kierowca +3 pasażerów,
- 0,1% kierowca +4 pasażerów.

Z danych tych wynika, że pasażerowie na tylnych siedzeniach stanowią tylko około 3% z ogólnej liczby osób jadących samochodami osobowymi. Podobne wyniki przedstawiono na rysunku 1. Rysunek pokazuje rezultaty pomiaru obecności pasażerów na tylnych siedzeniach względem pasażerów na przednich [6]. Osoba kierowcy jest wykluczona z obliczeń częstotliwości zajmowania siedzeń.



Strukturę ofiar wypadków drogowych w Polsce z udziałem samochodów osobowych podano w tabeli 1. Oddzielnie podano dane dotyczące poszkodowanych wśród kierowców, pasażerów na przednim fotelu oraz pasażerów na tylnych siedzeniach. Część ofiar wśród pasażerów to dzieci, jednak dostępne dane statystyczne nie zawierają informacji, w jakim pojeździe przewożone było dziecko-pasażer, poszkodowane w wypadku drogowym.

Tabela 1. Struktura ofiar wypadków drogowych w Polsce z udziałem samochodów osobowych (s.o.) [4].

Rok	Ogółem		Kierowca s.o.		Pasażer s.o.- przód		Pasażer s.o.- tył		Pasażer - dziecko*	
	Zabici	Ranni	Zabici	Ranni	Zabici	Ranni	Zabici	Ranni	Zabici	Ranni
2007	5583	63224	1517	18355	882	15057	183	2 668	-	-
2008	5437	62097	1465	17469	904	15097	171	2 549	81	2591
2009	4572	56046	1334	16030	702	13554	143	2 291	60	2319
2010	3907	48952	1125	14033	595	11684	133	1 872	60	2115

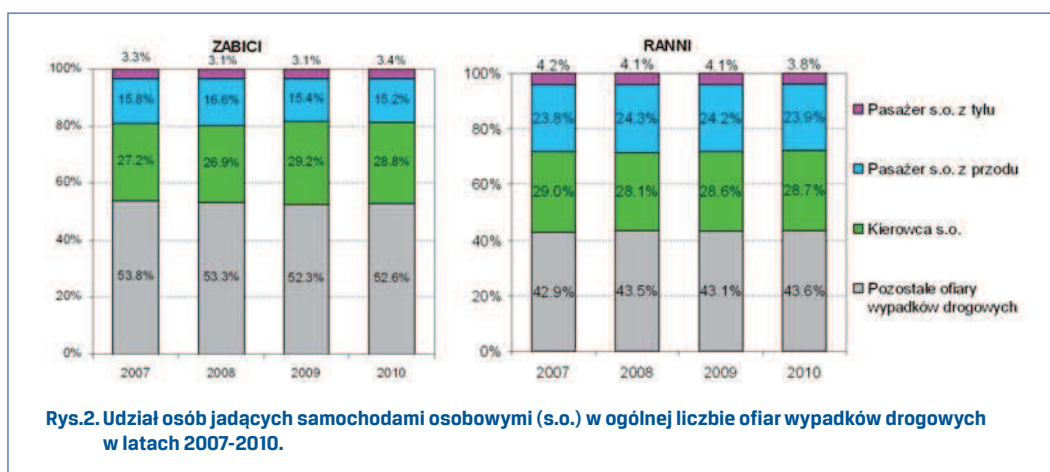
*) dzieci 0-14 lat ujęto tu jako pasażerów w samochodach osobowych i innych pojazdach

Na podstawie danych z tabeli 1, na rysunku 2 podano udział kierowców i pasażerów samochodów osobowych w ogólnej liczbie ofiar wypadków drogowych w latach 2007-2010. Zabici stanowili 46...48% a ranni 56...57%, w tym:

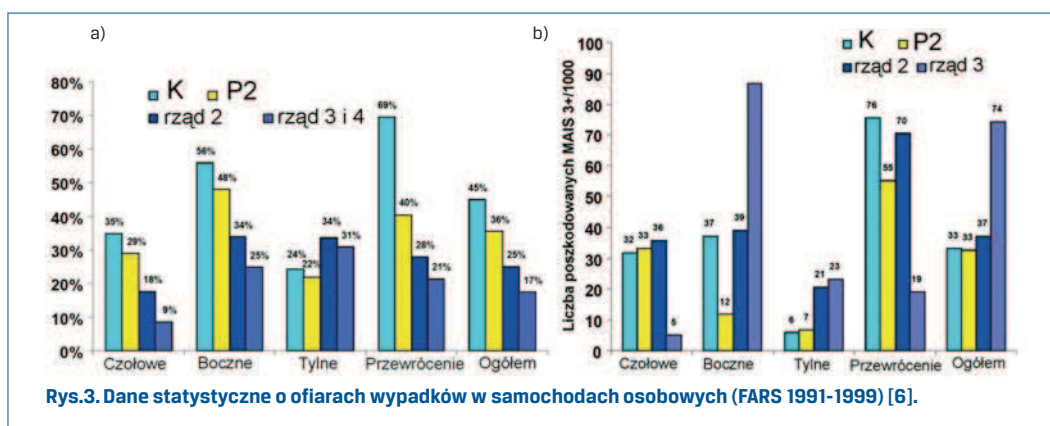
- kierowcy 27...29% zabici oraz 28...29% ranni;
- pasażer z przodu 15...17% zabici oraz 23...24% ranni;
- pasażer z tyłu 3% zabici oraz 4% ranni.

Pasażerowie na tylnych siedzeniach stanowili:

- 6,6...7,2% zabitych oraz 6,8...7,4% rannych wśród ofiar wypadków w samochodach osobowych (kierowca + pasażerowie);
- 15,9..18,3% zabitych oraz 13,8...15,1% rannych spośród pasażerów (bez kierowców).



Rysunek 3a zawiera dane statystyczne o ofiarach wypadków drogowych w samochodach osobowych (osoby powyżej 13 roku życia). Pokazano też umiejscowienie tych ofiar w samochodzie. Bardzo interesująca informacja wynika z połączenia częstotliwości zajmowania tylnych siedzeń ze statystyką ofiar w samochodach osobowych, co pokazano na rysunku 3b [6]. Słupki na rysunku 3b wyrażają w promilach iloraz liczby osób z ciężkimi obrażeniami (MAIS 3+) do liczby osób jadących na konkretnych siedziskach w czasie wypadku. Wskazuje to na niekorzystną sytuację osób jadących na tylnych siedzeniach w samochodzie osobowym.



Uzupełniając te informacje warto dodać, że stały wzrost wskaźnika motoryzacji (liczba samochodów osobowych na 1000 mieszkańców) wskazuje na zmniejszającą się liczbę osób przypadającą na jeden samochód (tabela 2). Liczba ta zmalała od 15 w 1980 roku do 2,25 w roku 2010.

Tabela 2. Wskaźnik motoryzacji w Polsce [4,5].

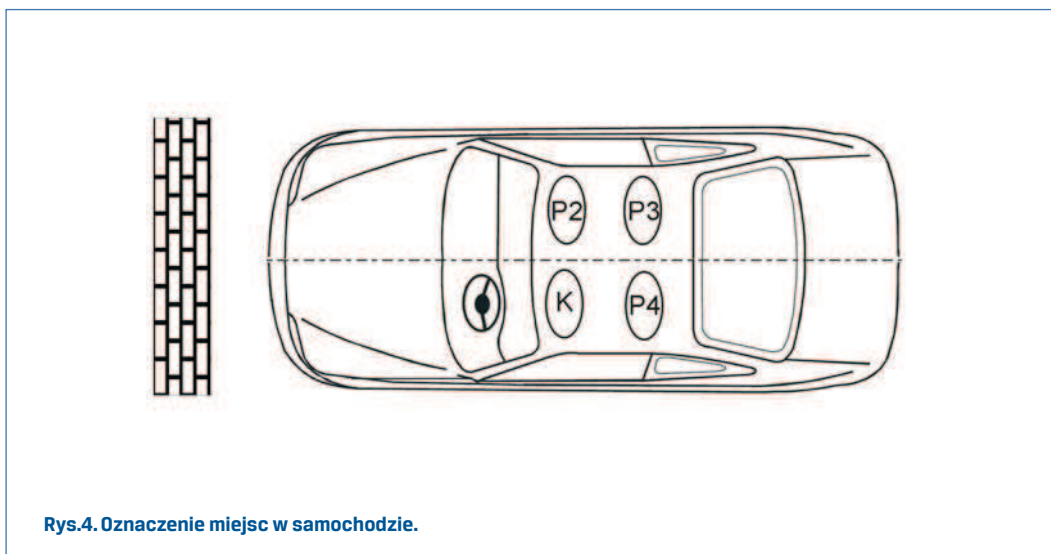
Rok	1980	1990	2000	2005	2010
Liczba mieszkańców (tys.)	35 735	38 183	38 644	38 157	38 187
Liczba samochodów osobowych (tys.)	2 383	5 261	9 991	12 339	16 990
Wskaźnik motoryzacji	67	138	259	323	445
Liczba osób na jeden samochód osobowy	15,00	7,26	3,87	3,09	2,25

3. Rozmieszczenie osób w samochodzie i zakres analizy

Główne czynniki wpływające na obrażenia osób na poszczególnych rzędach foteli są następujące:

- dostępność środków ochrony indywidualnej na pierwszym i kolejnych rzędach foteli;
- pozycja osób jadących i przestrzeń jaką mają do dyspozycji na ww. fotelach.

Rozważono oddziaływanie tych czynników na powstawanie obrażeń u osób jadących, niezależnie od zajmowanego miejsca w określonym rzędzie foteli. Na rysunku 4 podano oznaczenia miejsc w samochodzie, które zostaną wykorzystane w dalszej części pracy.



Rys.4. Oznaczenie miejsc w samochodzie.

Biorąc pod uwagę czynniki decydujące o powstawaniu obrażeń oraz wyniki testów uderzenia samochodu w przeszkodę, do dalszej analizy wykorzystano wyniki pomiarów obciążeń dynamicznych głowy, torsu i miednicy, przebiegi sił w nogach oraz w szyi, a także wyniki pomiarów sił w pasach bezpieczeństwa. Przykładowe przebiegi tych wielkości fizycznych pokazano na rysunku 5. Otrzymano je podczas czołowego uderzenia samochodu w sztywną przeszkodę przy prędkości 56 km/h. Na miejscu kierowcy, pasażera obok kierowcy (P2) i pasażera na prawym tylnym fotelu (P3) posadowiony był manekin (F5 – 5-centylowa kobieta). Na kolejnych wykresach zestawiono realizacje:

- wypadkowe opóźnienie głowy, torsu i miednicy;
- wypadkowa siła działająca na szyję;
- ugięcie klatki piersiowej (torsu);
- siły działające na kości udowe.

Wartości wypadkowe opóźnienia i siły obliczono ze składowych mierzonych w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach (x,y,z):

$$a(t) = \sqrt{a_x^2(t) + a_y^2(t) + a_z^2(t)} \quad , \quad F(t) = \sqrt{F_x^2(t) + F_y^2(t) + F_z^2(t)} \quad .$$

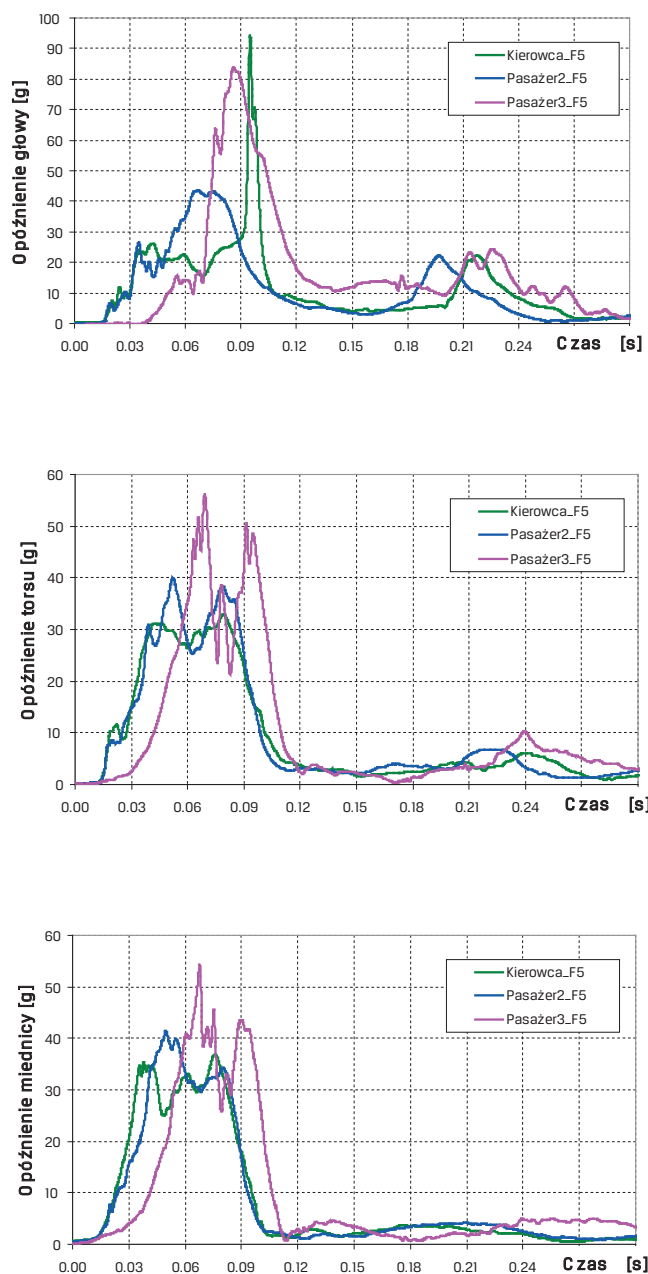
Bezpośrednie porównanie realizacji wskazuje na znacznie większe obciążenia manekina P3 w stosunku do obciążeń obserwowanych na manekinach K i P2, których obciążenia są podobne. Przykładowo, na podstawie rysunku 5 mamy, że wskaźnik obciążenia głowy pasażera P3 jest HIC=1140 (obrażenia śmiertelne), natomiast dla kierowcy i pasażera P2 wynosi odpowiednio HIC=280 i 331. Powyższe potwierdza, że są sytuacje, w których zagrożenie życia pasażera z tyłu samochodu jest wielokrotnie większe niż osób na przednich fotelach.

Wielkości pomierzone podczas testów zderzeniowych wykorzystano do określenia dwóch rodzajów wskaźników liczbowych:

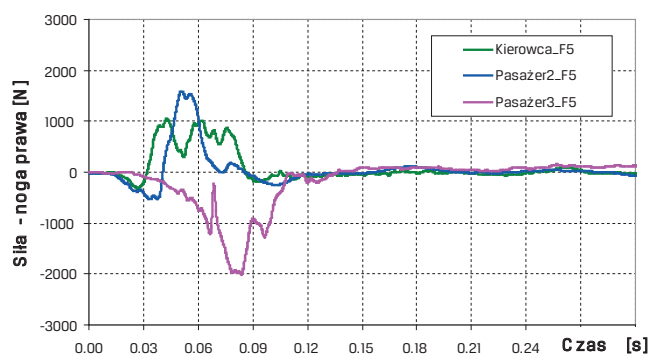
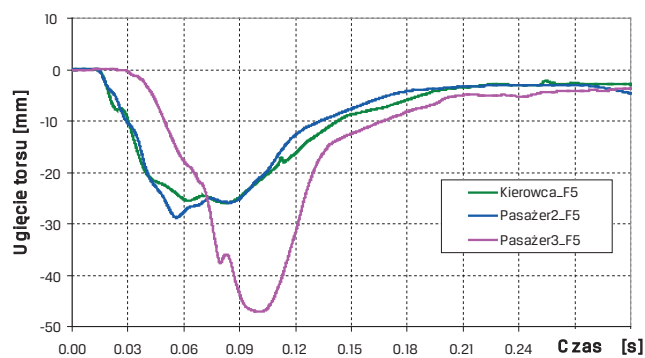
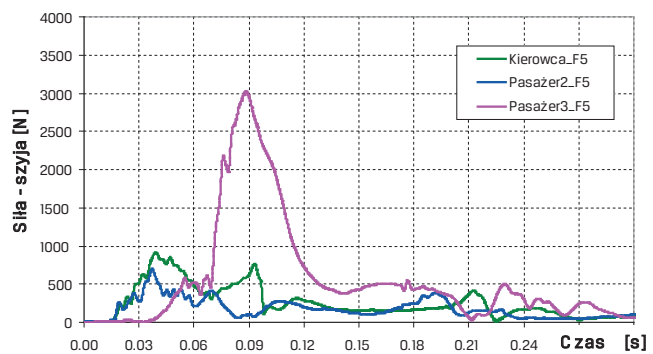
$$W1 = \frac{\text{Obciążenie pasażera P2}}{\text{Obciążenie kierowcy}} \quad ,$$

$$W2 = \frac{\text{Obciążenie pasażera P3 lub P4}}{\text{Obciążenie pasażera P2}} \quad .$$

Te wskaźniki będą stosowane do wyników eksperymentów, w których na poszczególnych fotelach umieszczono manekiny o porównywalnych cechach antropometrycznych. Warto zauważyć, że iloczyn wskaźników daje zawsze informację uzupełniającą, a jednocześnie zgodną z celami analizy.



Rys.5. Przebiegi obciążeń dynamicznych głowy, szyi, torsu, miednicy i nóg manekina F5, podczas uderzenia czołowego w sztywną przeszkodę (czterodrzwiowy sedan z 2004 roku, masa 1654 kg).



Rys.5. Przebiegi obciążeń dynamicznych głowy, szyi, torsu, miednicy i nóg manekina F5, podczas uderzenia czołowego w sztywną przeszkodę (czterodrzwiowy sedan z 2004 roku, masa 1654 kg) cd.

Podczas szczegółowej oceny obciążeń dynamicznych osób jadących na tylnych fotelach zostaną wykorzystane wskaźniki i wielkości odnoszące się do biomechanicznej odporności ciała człowieka na skutki obciążeń uderowych, a mianowicie:

- wskaźnik obrażenia głowy (HIC – *Head Injury Criterion*);
- wskaźnik obciążenia szyi (Nij – *Neck Injury Criterion*);
- maksymalna siła rozciągająca i ściskająca szyję;
- maksymalne opóźnienie torsu;
- maksymalne ugięcie klatki piersiowej (torsu);
- kryterium wiskotyczne obciążenia torsu (VC – *Viscous Criterion*);
- maksymalna siła działająca na kość udową;
- maksymalna siła rozciągająca taśmę pasa bezpieczeństwa.

4. Analiza stanu wyposażenia kolejnych rzędów foteli w urządzenia ochrony jadących

Kierowca (K) i pasażer na fotelu obok kierowcy (P2) są chronieni (przed skutkami zderzeń czołowych) za pomocą pasów bezpieczeństwa z napinaczami i ogranicznikami oraz przez poduszki gazowe. Elementy te są ciągle doskonalone. Pasażerowie na tylnych fotelach (P3 i P4) zwykle mają tylko pasy bezpieczeństwa, najczęściej bez napinaczy i ograniczników. Poduszka gazowa znacznie ogranicza przemieszczenia człowieka względem fotela, łagodząc prowadzące do urazów obciążenia dynamiczne. Natomiast przemieszczenia pasażera na tylnych siedzeniach są znaczne, co w sposób przykładowy podano na rysunku 6.



Rys.6. Przemieszczenie manekina F5 na siedzeniu P3 podczas czołowego uderzenia samochodu w sztywną płaską barierę przy prędkości 56 km/h [8].

Brak napinaczy i ograniczników w pasach bezpieczeństwa na tylnych fotelach istotnie zmniejsza możliwość ochrony siedzących tam osób przed obrażeniami. Pokazują to wyniki pracy [9], w której podano rezultaty badań manekina Hybrid-III (50-centylowy mężczyzna) na tylnym siedzeniu samochodu przy zastosowaniu różnych środków jego ochrony indywidualnej (brak poduszki gazowej):

- A – pas bezpieczeństwa bez napinacza i bez ogranicznika;
- B – pas bezpieczeństwa z napinaczem i bez ogranicznika;
- C – pas bezpieczeństwa z napinaczem i z ogranicznikiem.

Zestawione w tabeli 3 wyniki pomiarów jednoznacznie potwierdzają możliwość zmniejszenia obciążeń działających na głowę, tors i szyję poprzez rozbudowę urządzeń ochrony indywidualnej.

Tabela 3. Wartości ekstremalne obciążeń działających na pasażera (opis w tekście) [9].

	Wielkość	A	B	C	A/C [%]	B/C [%]
Głowa	HIC36	888	663	458	194	145
	Opóźnienie [g]	73,0	67,3	57,3	127	117
Szyja	Siła Fx [kN]	1,64	1,53	1,14	144	134
	Siła Fz [kN]	2,75	2,49	2,24	123	111
	Rozpiętość momentu My [Nm]	218	181	174	125	104
Tors	Ugięcie [mm]	61	50	37	165	135
	Opóźnienie [g]	60,8	54,6	56,7	107	96
	VC [m/s]	0,95	0,55	0,28	339	196
Pas bezpieczeństwa	Siła – część ramieniowa [kN]	10,8	10,0	5,9	183	169
	Siła – część biodrowa [kN]	11,4	11,1	10,4	110	107

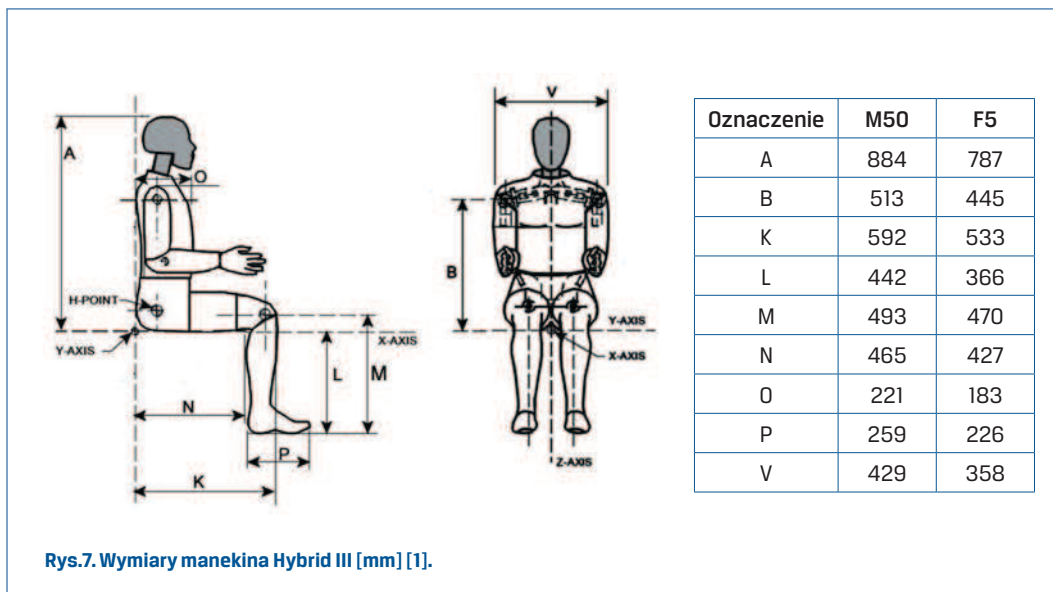
Napinacze i ograniczniki w pasach bezpieczeństwa skutecznie ograniczają ryzyko obrażeń osób jadących podczas wypadku drogowego. Dwie ostatnie kolumny w tabeli 3 dobrze wskazują możliwości poprawy stanu bezpieczeństwa osób na tylnych fotelach. W pracy [10] podano, że obciążenia dynamiczne głowy i torsu kierowcy są wyraźnie mniejsze w samochodach, w których zastosowano pasy z napinaczami i ogranicznikami: wskaźnik HIC o 20–40%, maksymalne przyspieszenie torsu o 10–20%.

5. Wymiary wnętrza samochodu i ich wpływ na bezpieczeństwo osób jadących

Ważnym czynnikiem wpływającym na obrażenia w samochodzie podczas wypadku drogowego jest pozycja ciała na fotelu oraz wynikające z tego odległości głowy, torsu i nóg od elementów samochodu. Czynniki te uwarunkowane są cechami antropometrycznymi człowieka oraz wymiarami wnętrza samochodu.

Kilka charakterystycznych wielkości, opisujących cechy antropometryczne człowieka umieszczono na rysunku 7, gdzie podano niektóre wymiary elementów manekinów Hybrid III: M50 (50-centylowy mężczyzna) i F5 (5-centylowa kobieta).

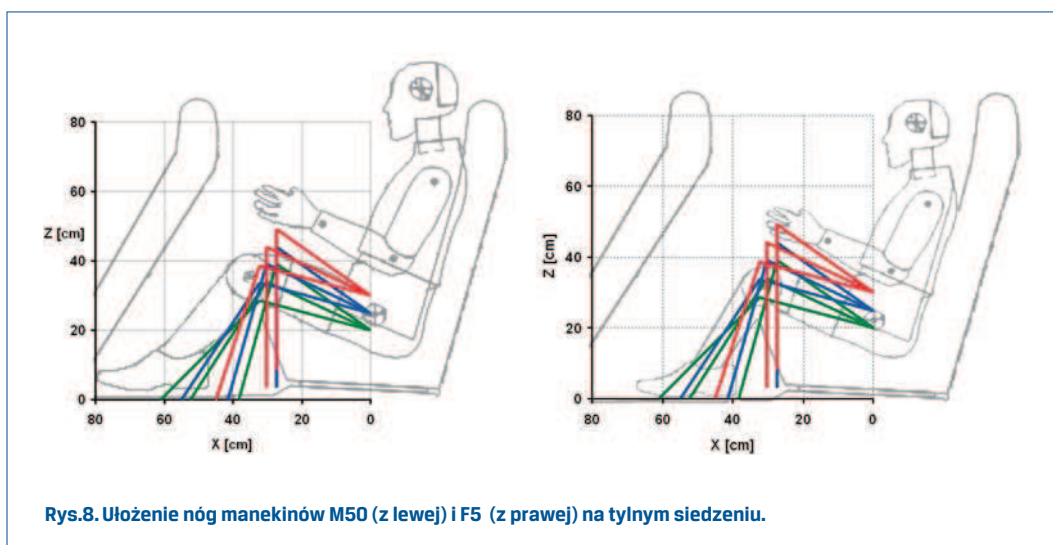
Wymiary wnętrza samochodu oraz możliwość zmiany położenia fotela (zwykle tylko przednich) oraz regulacji siedziska i oparcia daje wiele różnych możliwości ułożenia ciała na fotelu. Przykładowo, na rysunku 8 podano możliwe ułożenie nóg manekinów M50 i F5



Rys.7. Wymiary manekina Hybrid III [mm] [1].

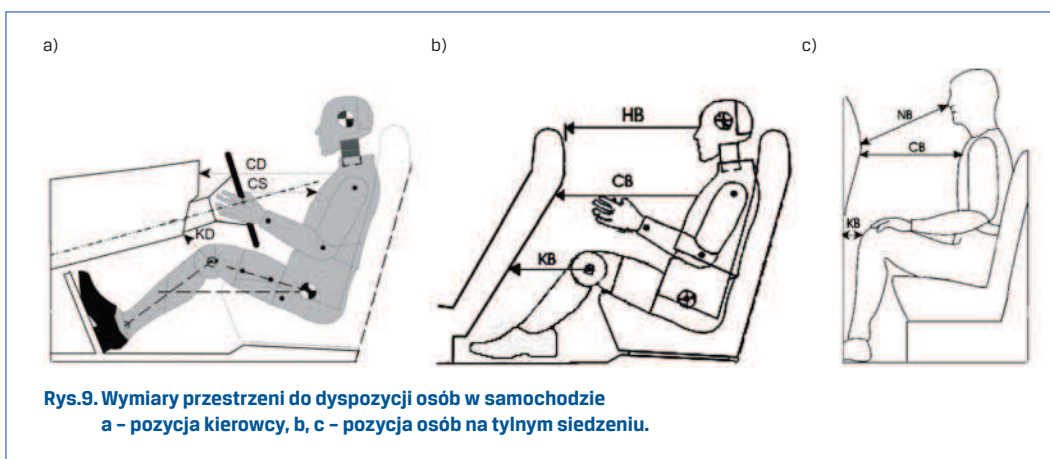
w samochodzie. Obliczenia wykonano dla $h=20, 25$ i 30 cm (h – wysokość punktu H manekina nad podłogą) oraz kąta pochylenia siedziska $\chi = 15, 25$ i 30 stopni. Kąt ułożenia nóg i miejsce ich oparcia na podłodze wpływają na kinematykę ruchu ciała człowieka podczas wypadku drogowego, a przede wszystkim na przemieszczenie bioder i tułowia manekina zapiętego pasem bezpieczeństwa względem siedziska.

Na rysunku 9 zaznaczono charakterystyczne wymiary przestrzeni, która jest do dyspozycji osób w samochodzie (kierowca i pasażer na tylnym siedzeniu). Pozycja kierowcy

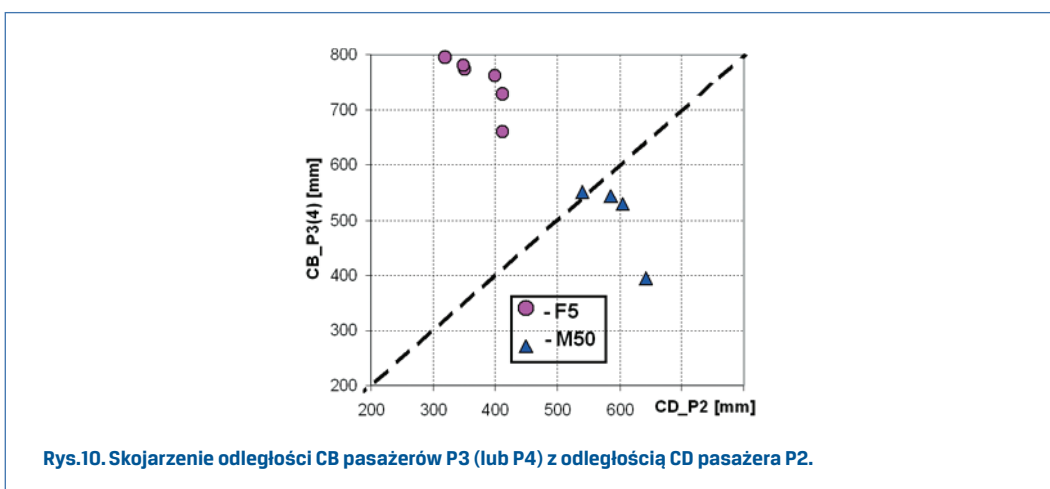


Rys.8. Ułożenie nóg manekinów M50 (z lewej) i F5 (z prawej) na tylnym siedzeniu.

w samochodzie wynika głównie z rozmieszczenia elementów sterowania (rys.9a). Natomiast pozycja pasażerów na tylnych siedzeniach ograniczona jest wymiarami siedziska i jego położeniem względem podłogi (wysokość i kąt nachylenia), kątem nachylenia oparcia oraz odległością do foteli przednich. W niektórych samochodach (np. SUV, pickup) przestrzeń dla pasażerów na tylnych fotelach jest mocno ograniczona, co wymusza przyjmowanie pozycji wyprostowanej. W rezultacie mamy wyżej położony środek masy ciała człowieka niż w typowej pozycji w samochodzie osobowym.



Na rysunku 10 skojarzono odległość CB pasażerów P3 (lub P4) z odległością CD pasażera P2. W zestawieniu uwzględniono sytuacje, w których na przednich i tylnych siedzeniach samochodu były manekiny o tym samym rozmiarze (M50 lub F5). Oczywiście większa przestrzeń dla pasażerów z tyłu jest wówczas, gdy w samochodzie są tylko manekiny F5. Uwzględniając wymiary manekinów (rys.7) oraz wymiary przestrzeni do dyspozycji pasażerów na tylnym siedzeniu (rys.9) można wnioskować o możliwości uderzenia głowy lub



Rys.10. Skojarzenie odległości CB pasażerów P3 (lub P4) z odległością CD pasażera P2.

kolan w oparciu foteli poprzedzających. Ważne znaczenie ma tu napięcie pasów bezpieczeństwa, które powinny skutecznie utrzymywać pasażera na siedzeniu.

6. Przykłady wyników badań porównawczych

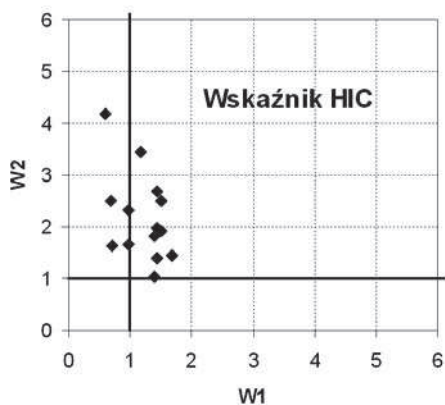
Porównano obciążenia działające na kierowcę oraz pasażerów P2, P3 i P4 na podstawie wyników dostępnych testów zderzeniowych (zderzenie czołowe) samochodów. Wybrano testy, w których manekin pasażera na i-tym siedzeniu był taki sam jak manekin kierowcy i zapięty pasami bezpieczeństwa. We wszystkich samochodach były poduszki gazowe dla kierowcy i pasażera P2. Wykorzystano badania samochodów z lat 2004-2006 o masie 1500-2700 kg.

Wyniki obliczeń wskaźników W1 i W2 zestawiono na rysunkach 11...15. W obliczeniach wskaźnika W2 uwzględniono pasażerów P3 i P4. Linie ciągłe W1=1 oraz W2=1 dzielą wyniki obliczeń na tych rysunkach na cztery obszary:

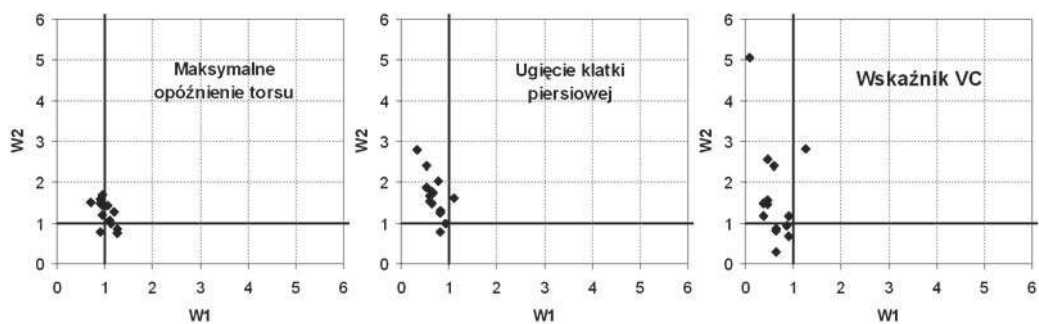
- G1: obciążenia pasażera P2 < niż kierowcy i P3(4) > P2;
- G2: obciążenia pasażera P2 > niż kierowcy i P3(4) > P2;
- G3: obciążenia pasażera P2 < niż kierowcy i P3(4) < P2;
- G4: obciążenia pasażera P2 > niż kierowcy i P3(4) < P2.

W większości samochodów przeważają wyniki z obszarów G1 i G2, niezależnie od wielkości użytej do obliczenia wskaźników W1 i W2. Zatem zgromadzone wyniki prowadzą do następujących wniosków:

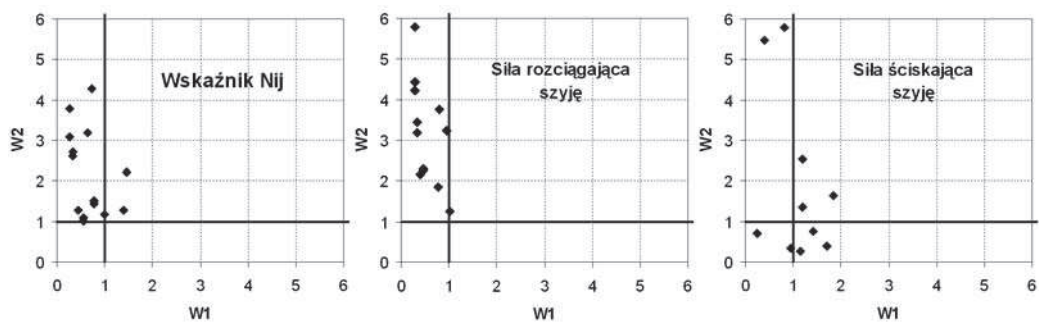
1. Stopień ochrony głowy jest wyraźnie najwyższy u kierowcy. Obciążenie działające na głowę pasażera P2 jest często 1,5 razy większe niż kierowcy a obciążenia głowy pasażerów P3 i P4 są 1,5-2,5 razy większe niż P2).
2. Obciążenia działające na klatkę piersiową są najmniejsze u pasażera P2. U pasażerów P3 i P4 obserwuje się 1,5-2,5 razy większe niż u P2 ugięcie klatki piersiowej, a tym samym większy wskaźnik VC.
3. Pasażerowie P3 i P4 są szczególnie narażeni na urazy szyi. Wartości wskaźnika Nij oraz siły rozciągającej szyję są wielokrotnie większe niż obciążenia kierowcy i pasażera P2. Jest to efekt braku urządzeń ograniczających przemieszczenia głowy (poduszek gazowych) pasażerów na kolejnych rzędach siedzeń.
4. Obciążenia działające na nogi pasażerów na tylnych siedzeniach są na ogół mniejsze niż na przednich. Nogi pasażerów P3 i P4, ze względu na sposób ich ułożenia (zwykle inny niż u kierowcy i P2) najczęściej nie opierają się o oparcia foteli przednich i ścisające siły osiowe w ich kościach udowych nie są duże. Jednak wówczas nogi nie wspomagają działania pasa bezpieczeństwa w utrzymaniu pasażera na siedzisku.
5. Siły działające w pasach bezpieczeństwa na tylnych siedzeniach są 1,5-2,5 razy większe niż na przednich. W przypadku części ramieniowej, wyposażonej w ogranicznik siły napięcia na fotelach przednich, mamy $W2 \approx 5$. Siły działające na pas bezpieczeństwa pasażera P2 nie są większe niż u kierowcy, a w części biodrowej są porównywalne.



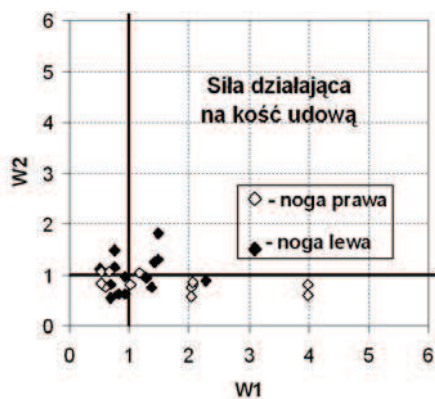
Rys.11. Skojarzenie wskaźników W1 i W2 – obciążenie głowy.



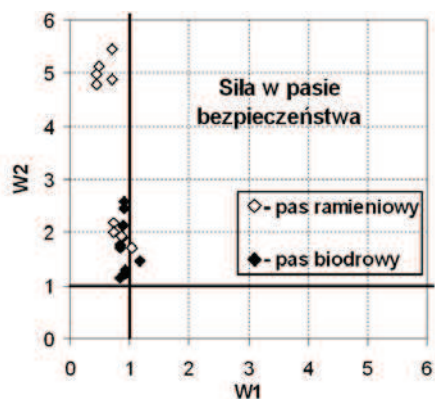
Rys.12. Skojarzenie wskaźników W1 i W2 – obciążenie klatki piersiowej.



Rys.13. Skojarzenie wskaźników W1 i W2 – obciążenie szyi.



Rys.14. Skojarzenie wskaźników W1 i W2 - obciążenie nóg.



Rys.15. Skojarzenie wskaźników W1 i W2 - siły rozciągające taśmę pasa bezpieczeństwa.

Podsumowanie

Przeprowadzone analizy potwierdzają, że obrażenia odnoszone przez osoby jadące zależą także od miejsca zajmowanego w samochodzie. W celu ułatwienia takiej oceny wprowadzono wskaźniki W1 i W2, które ułatwiają porównanie stanu obciążeń dynamicznych osób zajmujących miejsca w kolejnych rzędach foteli. Ich bezwymiarowy charakter daje szerokie możliwości wykorzystania jako wskaźnika stanu bezpieczeństwa osób jadących samochodem.

Wartości wskaźnika W2 potwierdzają, że podczas zderzenia czołowego ze sztywną przeszkodą, obserwowane obciążenia dynamiczne działające na osoby jadące na tylnych siedzeniach w samochodzie są często kilkukrotnie większe niż na osoby siedzące z przodu. Szczególnie narażeni są oni na śmiertelne urazy głowy i szyi. Podane w pracy wyniki obliczeń potwierdzają dane statystyczne o ofiarach wypadków drogowych.

Oddzielne analizy wskazują na podstawowe działania prowadzące do poprawy sytuacji osób jadących na tylnych siedzeniach. Przykładowe wyniki zastawione w dwóch ostatnich kolumnach w tabeli 3 dobrze wskazują możliwości poprawy stanu bezpieczeństwa osób na tylnych fotelach poprzez rozwój układów bezpieczeństwa biernego.

Literatura

- [1] *Final Report of New Car Assessment Program Testing*, Report Number: CAL-05-03, National Highway Traffic Safety Administration, USA, Washington, 2004 (www-nrd.nhtsa.dot.gov).
- [2] GACA, S., SUCHORZEWSKI, W., TRACZ, M.: *Inżynieria ruchu drogowego*. Teoria i praktyka, WKŁ, 2008.

- [3] KUPPA, S., SAUNDERS, J., FESSAHAIE, O.: *Rear Seat Occupant Protection in Frontal Crashes*. The 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Washington 2005.
- [4] Materiały informacyjne Policji.
- [5] Materiały informacyjne GUS.
- [6] PARENTEAU, CH., VIANO, D.C.: *Field Data Analysis of Rear Occupant Injuries Part I: Adults and Teenagers*, SAE 2003-01-0153.
- [7] SHIMAMURA, M., YAMAZAKI, M., FUJITA, G.: *Method to Evaluate the Effect of Safety Belt Use by Rear Seat Passengers on the Injury Severity of Front Seat Occupants*. Accident Analysis & Prevention 37/2005.
- [8] www.nhtsa.dot.gov.
- [9] ZELLMER, H., LÜHRS, S., BRÜGGEMANN, K.: *Optimized Restraint Systems for Rear Seat Passengers*. The 16th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Kanada 1996.
- [10] ŻUCHOWSKI, A., JACKOWSKI, J.: *Analysis of Properties Operation of the Supporting Equipment for The Seat Belts*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol.18, No.1, Warszawa 2011.

Praca została wykonana w ramach projektu nr 5596/B/T02/2011/40,
finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.