

## ANALIZA RUCHU KIEROWCY W PŁASZCZYŹNIE CZOŁOWEJ ORAZ ODDZIAŁYWAŃ WEWNĘTRZNYCH W KRĘGOSŁUPIE SZYJNYM PODCZAS WYPADKÓW SAMOCHODOWYCH

MAREK GZIK  
EUGENIUSZ ŚWITOŃSKI  
DAGMARA TEJSZERSKA  
WOJCIECH WOLAŃSKI  
PAWEŁ POTKOWA

*Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Śląska*

NAIF K. ALSHAMMARI

*Sultan Bin Abdulaziz Al-Saud Foundation, Arabia Saudyjska*

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono analizę obciążeń kręgosłupa szyjnego kierowcy podczas zderzenia bocznego i dachowania samochodu. Przeprowadzona analiza pozwoliła na wyznaczenie parametrów ruchu (przemieszczeń, prędkości, przyspieszeń) użytkownika pojazdu oraz sił działających na jego struktury anatomiczne. Wyniki symulacji zostały zweryfikowane na podstawie dostępnych danych literaturowych i posłużyły do określenia miejsc najbardziej podatnych na urazy podczas omówionych typów kolizji.

### 1. WSTĘP

Zderzenie boczne oraz dachowanie pojazdów występuje rzadziej niż inne typy wypadków drogowych. Przypadki dachowania stanowią jedynie 5%, zaś zderzenia boczne około 25% wszystkich kolizji, w których uczestnicy doznali obrażeń [3, 6]. Jednak urazy odniesione wskutek takich wypadków są poważne i często zagrażają zdrowiu lub życiu pasażerów, zaś ryzyko trwałego uszkodzenia ciała bądź nawet śmierci jest znacznie większe niż w innych typach zderzeń. Badania doświadczalne oceny skutków kolizji, mimo iż pochłaniają duże środki finansowe, są niekiedy niemożliwe do realizacji. Dużo tańszym i szybszym sposobem oszacowania rozmiaru odniesionych obrażeń jest analiza numeryczna. W prezentowanych badaniach przeprowadzono analizę różnych konfiguracji testów zderzeniowych na podstawie ich symulacji komputerowych.

Badania zostały przeprowadzone na podstawie sformułowanych modeli numerycznych przy użyciu aplikacji Working Model 2D. Modele zostały zweryfikowane na podstawie dostępnych danych literaturowych i posłużyły do określenia miejsc najbardziej podatnych na urazy podczas omówionych typów kolizji. Przeprowadzona analiza pozwoliła na wyznaczenie parametrów ruchu (przemieszczeń, prędkości, przyspieszeń) użytkownika

pojazdu oraz sił działających na jego struktury anatomiczne, a także ocenę rozmiaru odniesionych obrażeń będących efektem dachowania oraz zderzenia bocznego.

## 2. PROCES MODELOWANIA

Badania modelowe wypadków komunikacyjnych są wciąż rozwijane i udoskonalane w poszukiwaniu coraz to bardziej szczegółowych modeli samochodów i do uzyskiwania porównywalnych wyników z rzeczywistymi. Modele te głównie bazują na matematycznych równaniach opisujących ruch elementów traktowanych jako sztywne bryły połączone węzłami i elementami sprężysto-tłumiącymi. Taką metodologię również zastosowano w prezentowanych badaniach.

Podczas formułowania modeli kierowano się następującymi założeniami:

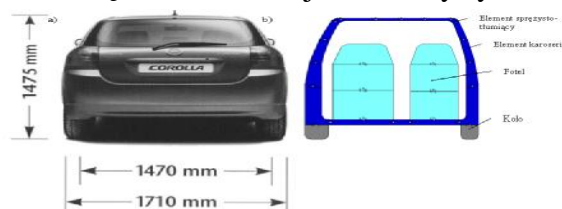
- modele powinny dostarczać jak najlepszych wyników, zbliżonych do rzeczywistych,
- czas obliczeń nie powinien przekraczać 12 godz. jednego przypadku,
- małe zmiany parametrów nie powinny powodować dużych zmian w wynikach,
- parametry modeli numerycznych (geometria, masy, momenty bezwładności, prędkości, itp.) zostały przyjęte zgodnie z zaleceniami Insurance Institute for Highway Safety (IIHS),
- uwzględniono zjawisko tarcia oraz wpływ pasów bezpieczeństwa na pasażerów.

Szczegółowy opis opracowanych modeli samochodu oraz kierowcy użytych do badań wypadków dachowania oraz zderzenia bocznego przedstawiono w dalszej części referatu.

### 2.1. Model samochodu

Przy modelowaniu pojazdu zostały przyjęte następujące założenia:

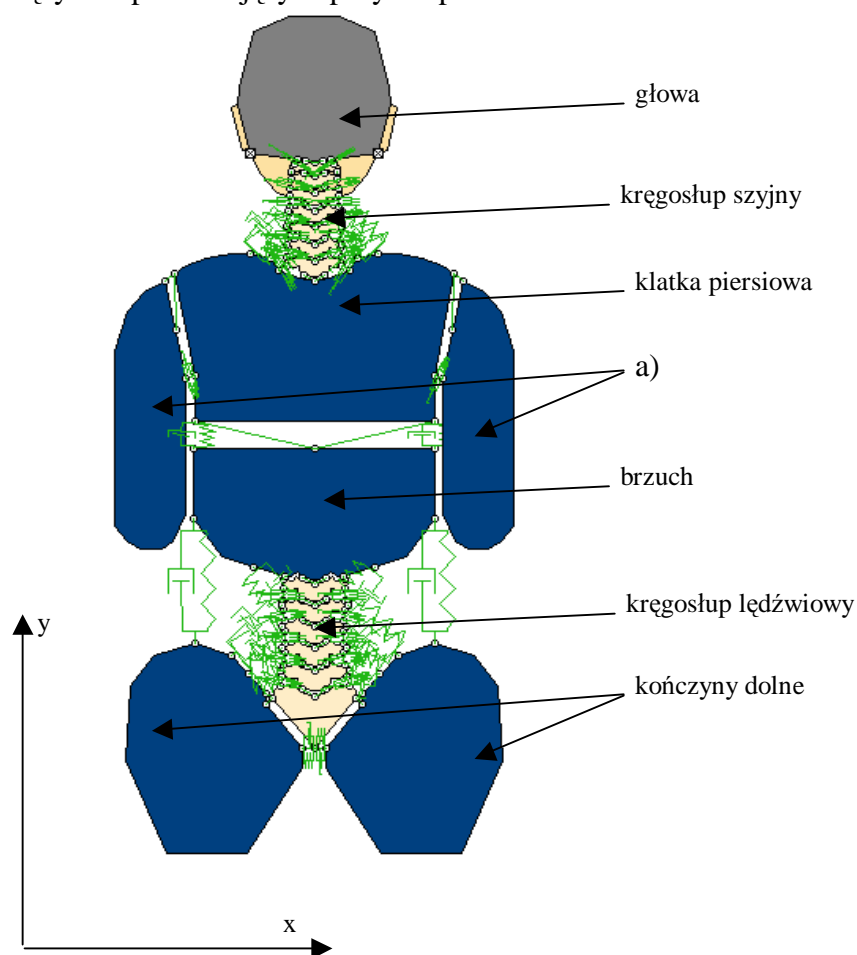
- geometria modelowanego pojazdu oraz jego masa (1200 kg) odpowiadają geometrii samochodu Toyota Corolla, model 2002,
- model pojazdu zbudowany został z brył sztywnych posiadających kształt podstawowych figur geometrycznych, połączonych więzami obrotowymi oraz elementami sprężysto-tłumiącymi, co pozwala na uzyskanie kształtu deformacji oraz miejsc rozproszenia energii kinetycznej w momencie kolizji,
- masa pojazdu została rozłożona w sposób następujący (rys.1): karoseria – 1130 kg (uwzględniająca główne elementy pojazdu), fotel kierowcy i pasażera – po 10 kg, koła – 25 kg każde,
- zamodelowano jedynie siedziska foteli, oparcia oraz zagłówki pominięto z uwagi na rozpatrywaną płaszczyznę ruchu, połączenie oparcia fotela z tułowiem uzyskano dzięki dodatkowym elementom sprężysto-tłumiącym umieszczonym pomiędzy tułowiem a siedziskiem,
- model uwzględnia podstawowe elementy wnętrza pojazdu mające wpływ na zachowanie ciała kierowcy podczas zderzenia bocznego i dachowania,
- uwzględniono wpływ pasów bezpieczeństwa na kinematykę ruchu kierowcy, modelując je jako elementy sprężysto-tłumiące o nieliniowej charakterystyce.



Rys.1. Toyota Corolla: a) obiekt rzeczywisty, b) model samochodu

## 2.2. Model kierowcy

Model kierowcy składa się z głównych elementów struktury anatomicznej (głowa, klatka piersiowa, brzuch, kończyny górne oraz dolne), które połączone zostały przegubami obrotowymi oraz elementami sprężysto-tłumiącymi tworząc otwarty łańcuch kinematyczny. Szczegółowo odwzorowano geometrię kręgów odcinka szyjnego i lędźwiowego kręgosłupa, natomiast mięśnie, więzadła i dyski międzykręgowe zamodelowano jako elementy sprężysto-tłumiące. Masy oraz geometria segmentów anatomicznych zostały dobrane na podstawie współczynników Dempstera jak dla 75 kg dorosłego mężczyzny, które zostały przedstawione w tabeli 1. Model kierowcy połączono z modelem samochodu za pomocą elementów sprężysto-tłumiących reprezentujących pasy bezpieczeństwa oraz kontakt z fotelem.



Rys.2. Model kierowcy

Tabela 1. Masy i masowe momenty bezwładności głównych części ciała kierowcy

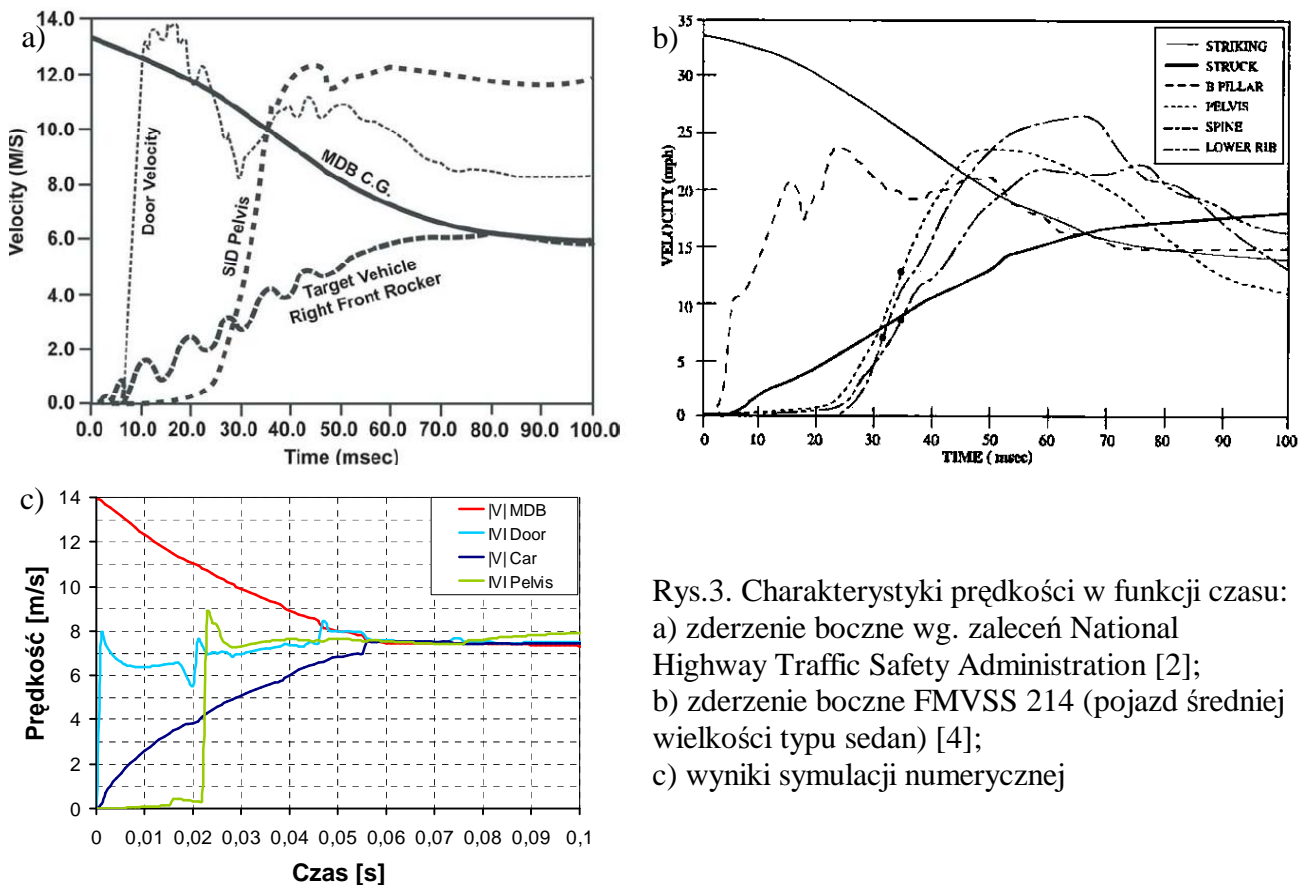
SEGMENT CIAŁA		WSPÓŁCZYNNIK DEMPSTERA [%]		MASA [KG]		$I_x$ [KGM <sup>2</sup> ]	
głowa		6,9		5		0,025	
tułów	klatka piersiowa	46,1	20	35	15	0,243	0,147
	brzuch		26,1				20
kończyna górna		6,2		4,5		0,031	
kończyna dolna		17,1		12,5		0,045	

### 3. WYNIKI NUMERYCZNEJ SYMULACJI KOLIZJI SAMOCHODU

Każdy ze stworzonych modeli został poddany weryfikacji na podstawie wyników badań doświadczalnych dostępnych w literaturze [1,2,4,5]. Symulacje numeryczne przeprowadzone na zweryfikowanych modelach pozwalają na wyznaczenie kinematyki ruchu ciała kierowcy oraz sił występujących w wewnętrznych strukturach anatomicznych dla różnych prędkości, przy których następuje kolizja. Pozwalają również na wyznaczenie trajektorii, prędkości i przyspieszeń podstawowych segmentów ciała uwzględnionych w modelu. Poznanie tych wszystkich parametrów pozwala oszacować rozmiar obrażeń doznanych wskutek wypadku.

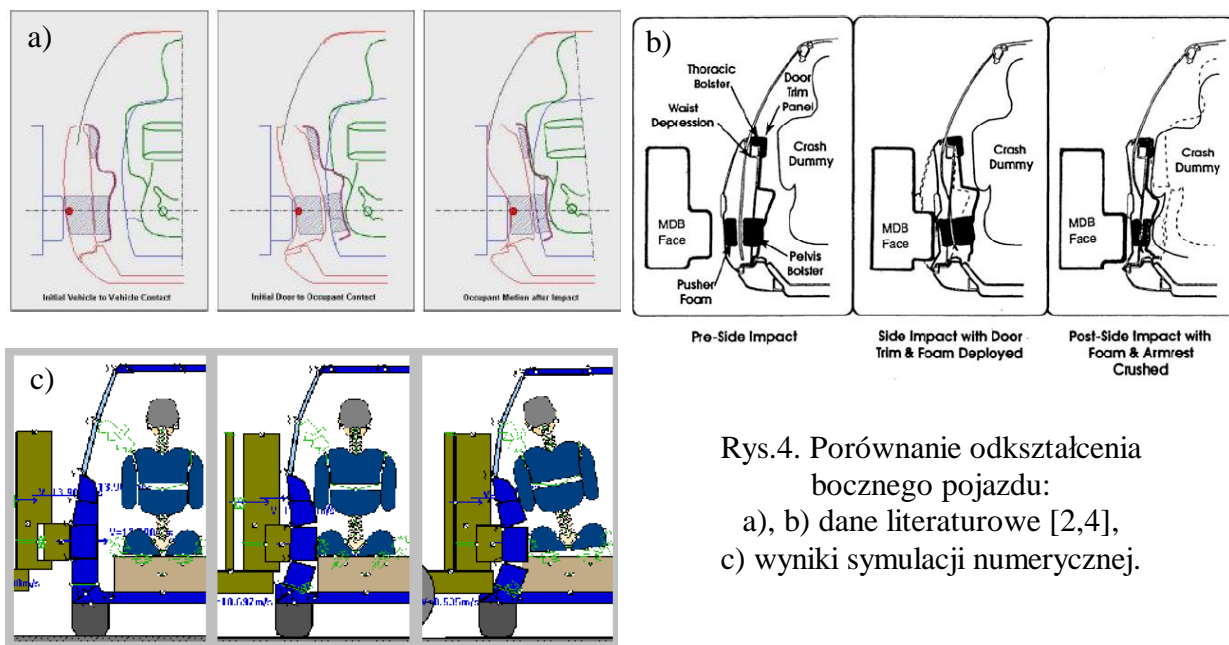
#### 3.1. Symulacja zderzenia bocznego samochodu

Weryfikacja modelu została przeprowadzona na podstawie testów zderzeniowych przeprowadzanych zgodnie z zaleceniami Insurance Institute for Highway Safety "Crashworthiness Evaluation Side Impact Crash Test Protocol". Testy te polegają na uderzeniu w bok pojazdu specjalnie skonstruowanego wózka (Moving Deformable Barrier) o masie 1500 kg i prędkości 50 km/h. Porównywano charakterystyki prędkości w funkcji czasu m.in. takich elementów jak: wózka uderzającego w pojazd, słupka drzwi, środka masy uderzanego pojazdu oraz miednicy kierowcy (rys.3).



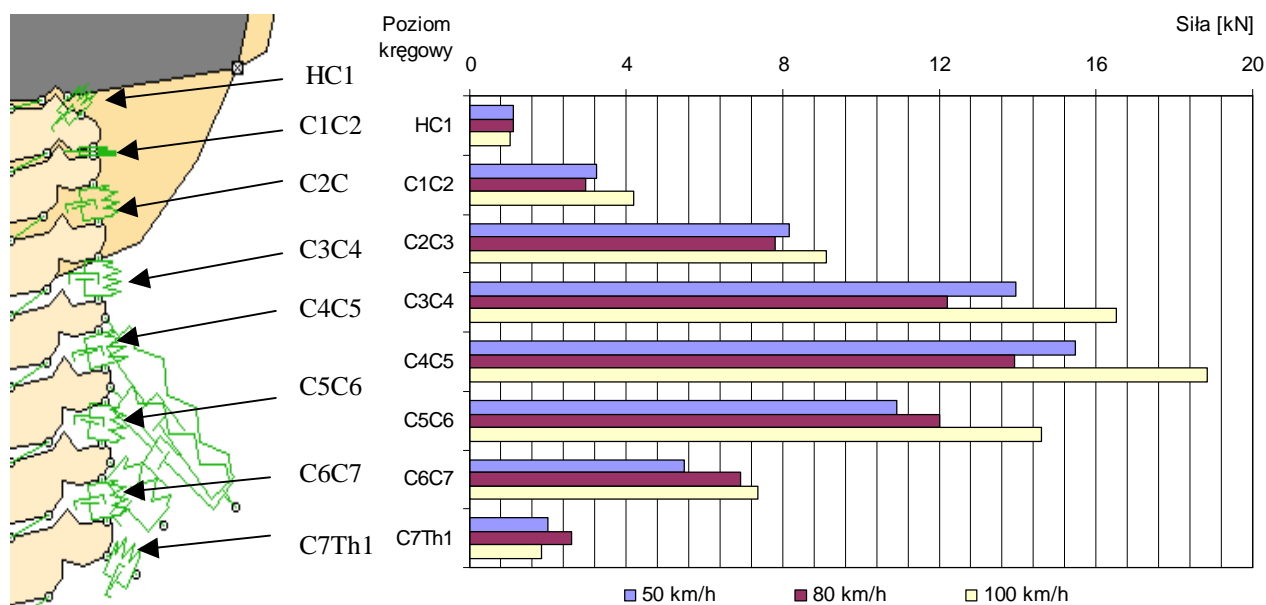
Rys.3. Charakterystyki prędkości w funkcji czasu:  
 a) zderzenie boczne wg. zaleceń National Highway Traffic Safety Administration [2];  
 b) zderzenie boczne FMVSS 214 (pojazd średniej wielkości typu sedan) [4];  
 c) wyniki symulacji numerycznej

Do weryfikacji posłużyły również dane literaturowe dotyczące sposobu odkształcenia profilu bocznego uderzanego pojazdu. Jest to bardzo istotny element, gdyż sposób przekazania energii kinetycznej oraz jej dyssypacji ma znaczący wpływ na kinematykę ruchu wszystkich elementów modelu - w tym i kierowcy (rys.4).



Rys.4. Porównanie odkształcenia bocznego pojazdu:  
 a), b) dane literaturowe [2,4],  
 c) wyniki symulacji numerycznej.

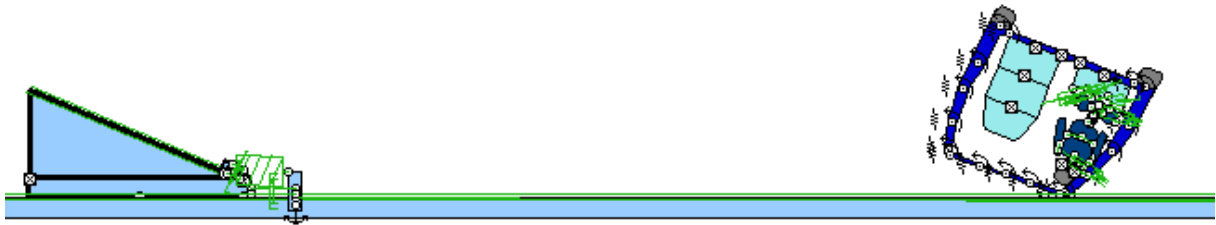
Weryfikacja potwierdziła poprawność stworzonego modelu numerycznego. Na jego bazie dokonano analizy szeregu innych przypadków kolizji zmieniając prędkość najazdową wózka. Rezultaty symulacji pozwoliły wyznaczyć siły występujące między poszczególnymi segmentami odcinków kręgosłupa (rys.5) i na ich podstawie oszacować destrukcyjny wpływ na wewnętrzne struktury anatomiczne.



Rys.5. Porównanie maksymalnych wartości sił występujących na różnych poziomach kręgów podczas zderzenia bocznego

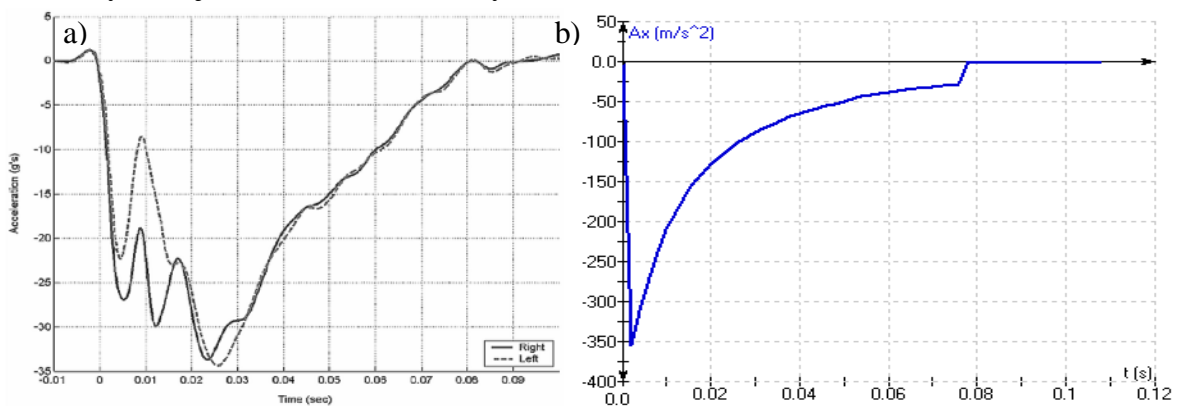
### 3.2. Symulacja dachowania samochodu

Weryfikacja badań modelowych w przypadku dachowania samochodu została przeprowadzona na podstawie porównania wyników symulacji z parametrami kinematycznymi uzyskanymi podczas doświadczalnych testów na obiektach rzeczywistych. W pierwszej kolejności porównano kinematykę samochodu, a następnie kierowcy. Na rysunku 6 przedstawiono zastosowaną metodykę badań, która oparta jest na procedurze testu FMVSS 208 (dolly test) zalecanego przez Insurance Institute for Highway Safety (IIHS). Dachowanie w takich testach wymuszone jest przez platformę, na której umieszczono samochód pod kątem  $230^\circ$ . Zadana prędkość początkowa samochodu  $48\text{km/h}$  na kierunku poprzecznym jest wyhamowywana przez siłowniki z opóźnieniem  $17g$  na dystansie nie większym niż  $1\text{m}$ . Gdy platforma zostanie wyhamowana, samochód zaczyna się obracać, a jego ruch zbliżony jest do sytuacji przypominającej dachowanie. Dużą zaletą tej metody jest również możliwość sprawdzania i weryfikacji systemów zapewniających bezpieczeństwo pasażerów podczas dachowania.

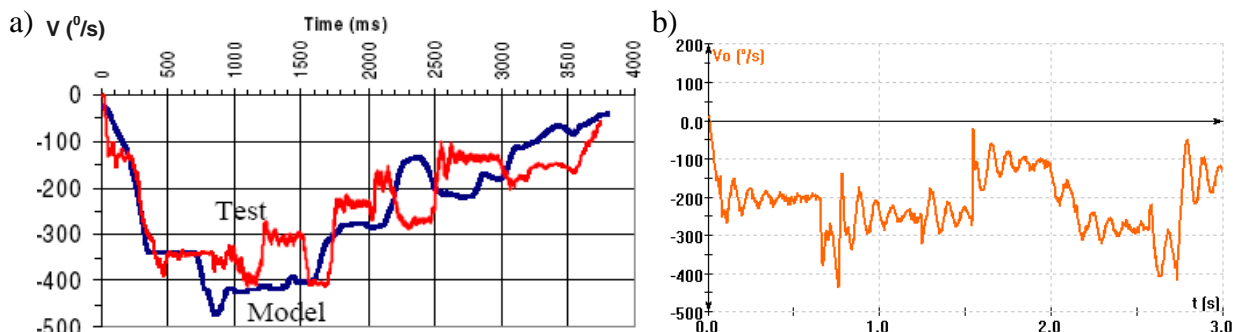


Rys.6. Symulacja dachowania samochodu

W przypadku walidacji samochodu porównano opóźnienie oraz prędkość obrotową uzyskaną podczas dachowania. Na rys.7 zestawiono charakterystykę modelową i doświadczalną opóźnienia, natomiast na rys.8 uzyskiwaną prędkość obrotową samochodu podczas symulacji i badań doświadczalnych.



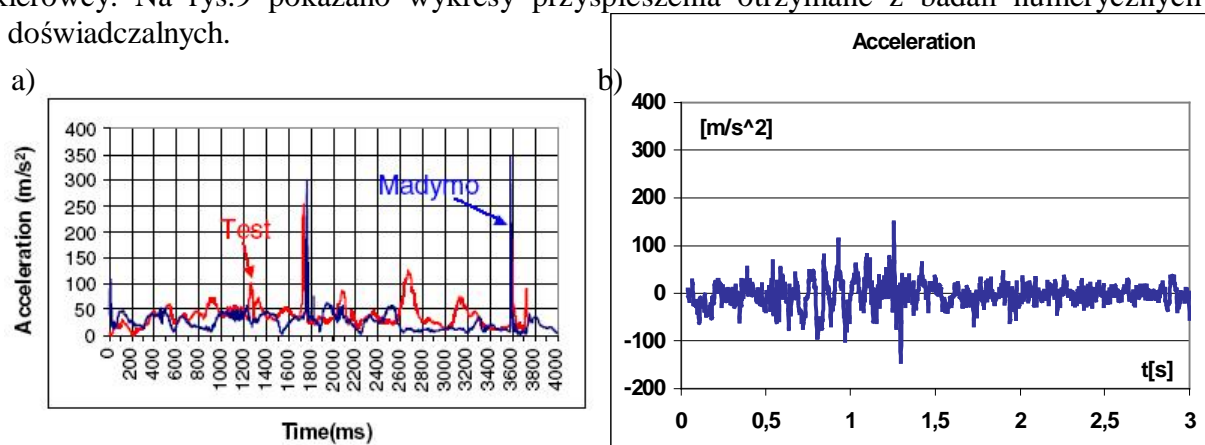
Rys.7. Opóźnienie samochodu: a) badania doświadczalne [1], b) symulacja numeryczna



Rys.8. Prędkość kątowna samochodu:

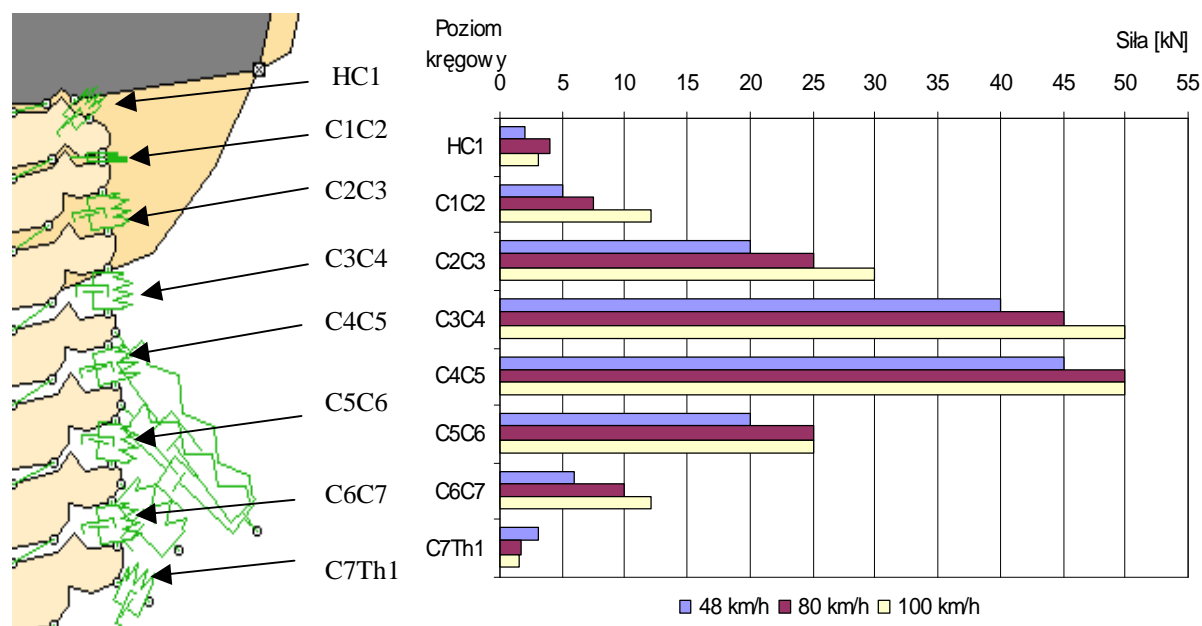
a) uzyskana podczas testu [5], b) uzyskana w trakcie symulacji numerycznej

Model kierowcy został zweryfikowany na podstawie porównania wyników symulacji z wynikami pochodzącymi z badań doświadczalnych. W tym przypadku walidacja opierała się na zestawieniu uzyskanych charakterystyk przyspieszenia środka ciężkości głowy kierowcy. Na rys.9 pokazano wykresy przyspieszenia otrzymane z badań numerycznych i doświadczalnych.



Rys.9. Wykres przyspieszenia głowy kierowcy uzyskany z:  
a) badań doświadczalnych [5], b) symulacji numerycznej

W obu przypadkach weryfikacji modeli samochodu i kierowcy uzyskano zadowalającą zbieżność wyników, dlatego mogły posłużyć do analizy obciążeń kręgosłupa szyjnego kierowcy podczas dachowania samochodu. Poniżej zaprezentowano uzyskane największe wartości sił działające na struktury kręgosłupowe kierowcy przy różnych prędkościach tego typu kolizji.



Rys.10. Wykres maksymalnych sił działających na struktury kręgosłupa szyjnego przy różnych prędkościach dachowania

Przeprowadzona analiza pozwoliła również na wyznaczenie parametrów ruchu (przemieszczeń, prędkości, przyspieszeń) użytkownika pojazdu oraz sił działających na jego struktury anatomiczne.

#### 4. WNIOSKI

Uzyskane wyniki potwierdzają tezę, że prędkość, masa oraz konstrukcja pojazdu mają niebagatelny wpływ na kinematykę ruchu pasażerów, a więc i na rozmiar obrażeń doznanych wskutek kolizji. Wartości sił występujących w strukturach anatomicznych kręgosłupa są silnie powiązane z prędkością kolizji. Największe wartości sił (większe niż 40kN) występują w kręgosłupie szyjnym w momencie uderzenia i mogą być wynikiem gwałtownego kontaktu głowy z wnętrzem pojazdu.

Pasy bezpieczeństwa mają bardzo istotny wpływ na poziom bezpieczeństwa – zarówno podczas zderzeń bocznych jak i dachowania utrzymują ciało na siedzisku fotela, uniemożliwiając jego swobodny ruch i doznanie obrażeń wynikających z kolizji z elementami wyposażenia i wnętrzem pojazdu.

Porównanie wyników poszczególnych symulacji pozwala oszacować różnice pomiędzy przypadkami zderzeń dla różnych prędkości pojazdu. Użycie szczegółowego modelu jest konieczne, aby oszacować obciążenia kręgosłupa szyjnego. Opracowane modele mogą zostać zastosowane do analizy oddziaływania pomiędzy strukturami anatomicznymi w innych przypadkach kolizji drogowych.

#### LITERATURA

1. Chou C.C., McCoy R.W., Le J.: A literature review of rollover test methodologies, Int. J. Vehicle Safety, Vol. 1, No. 1/2/3, 2005.
2. Du Bois P., Chou C. C., Fileta B. B., Khalil T. B., King A. I., Mahmood H. F., Mertz H. J., Wismans J.: Vehicle crashworthiness and occupant protection, Automotive Applications Committee, American Iron and Steel Institute, Southfield, Michigan, 2004.
3. Frimberger M., Wolf F., Scholpp G., Schmidt J.: Influences of Parameters at Vehicle Rollover, Society of Automotive Engineers, Inc., Raport nr 2669, 2000.
4. Insurance Institute for Highway Safety. Crashworthiness Evaluation. Side Impact Crash Test Protocol (Version IV), August 2005.
5. Parenteau Ch. Gopal M. Viano D.: Near and far-side adult front passenger kinematics in a vehicle rollover. SAE technical paper series No. 2001-01-0176.
6. Wismans J., "Report – European vehicle passive safety network 2" Project founded by European Community 2004.

### **ANALYSIS OF DRIVER MOVEMENT IN FRONTAL PLANE AND INTERNAL FORCES INSIDE CERVICAL SPINE DURING ROAD ACCIDENTS**

Summary. The driver's cervical spine loading analysis during side impact and rollover car accidents in this paper were presented. Performed researches allow to determine motion and loads occurring between driver's anatomic parts. Obtained results show displacement, velocity and acceleration of modelled occupant segments and have been compared and validated with published data. Due to forces estimation we could predict occupant's injuries during car crashes.