

Model kierowcy dla analizy sytuacji przedwypadkowej – podobieństwa i różnice wyników badań na torze i w symulatorze jazdy

RAFAŁ S. JURECKI, TOMASZ L. STAŃCZYK

Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn,

W artykule przedstawiono badania sytuacji przedwypadkowej, przeprowadzone na torze samochodowym oraz w symulatorze jazdy. Celem badań była weryfikacja poprawności opracowanego modelu kierowcy dla analizy tego typu sytuacji oraz identyfikacja jego parametrów. W artykule dokonano porównania parametrów charakteryzujących zachowanie kierowców w obu środowiskach badawczych. Ponieważ kierowca mógł wybierać rodzaj manewru obronnego – hamowanie lub (i) omijanie przeszkody, porównano częstość podejmowania obu tych manewrów, w każdym ze środowisk badawczych. Przeprowadzono porównanie czasu reakcji kierowców zarówno przy hamowaniu, jak i przy skręcie. Wyznaczono współczynniki korelacji między średnim czasem reakcji uzyskiwanym na torze i w symulatorze. Porównano również sposób realizacji manewrów (przebiegi opóźnienia i skrętu w funkcji czasu). Jako miarę liczbową sposobu realizacji manewrów przyjęto wartości parametrów matematycznego modelu kierowcy. Przeprowadzono analizę korelacyjną parametrów modelu na przykładzie wybranych kierowców.

1. Wstęp

Możliwość symulacji komputerowej rzeczywistego ruchu pojazdu zależy nie tylko od jakości i dokładności opracowanych modeli dynamicznych samochodu, ale również od jakości zamodelowania zachowania (działań) kierowcy. Próby opracowania tzw. modelu kierowcy podejmowane są od wielu lat przez wielu autorów. Jednak ze względu na złożoność problemu świadomie ogranicza się opracowywane modele kierowcy do konkretnego wąskiego obszaru zastosowań. W pracach [1-11] autorzy proponują koncepcję modelu kierowcy również dla konkretnego, zawężonego obszaru zastosowań – czyli do analizy sytuacji przedwypadkowych.

Model ten opracowany przez autorów i opisany w artykułach [12-14], [4-7] został przebadany dla wybranego scenariusza sytuacji przedwypadkowej. W artykule [13] zaprezentowano sposób realizacji wybranego scenariusza podczas badań na Torze Kielce. Dokonano oceny częstości występowania określonych zachowań kierowców, oraz czasu reakcji kierowców dla manewrów skrętu, hamowania silnikiem oraz hamowania hamulcem roboczym. Wyznaczono równania regresji liniowej opisujące zależności czasu reakcji w funkcji czasu ryzyka charakteryzującego sytuację wypadkową [12]. Na podstawie zarejestrowanych przebiegów czasowych wartości kąta skrę-

tu kół oraz opóźnienia przeprowadzono procedurę identyfikacji parametrów modelu kierowcy dla badań na torze.

Ponieważ interesuje nas tzw. „przeciętny kierowca”, więc mimo podejmowania różnych środków bezpieczeństwa, badania sytuacji przedwypadkowych wiążą się jednak z pewnym ryzykiem. Bezpieczną alternatywą jest realizacja tego typu badań w środowisku wirtualnym – czyli w symulatorze jazdy. Aby ocenić, czy można i w jakim zakresie realizować tego typu badania w środowisku wirtualnym przeprowadzono badania tej samej grupy kierowców, według tego samego scenariusza w symulatorze jazdy. Następnie zrealizowano identyczną procedurę postępowania jak w przypadku analizy danych uzyskanych podczas badań na torze. Analizę porównawczą wyników uzyskanych podczas badań na torze i w symulatorze przedstawiono w niniejszym artykule.

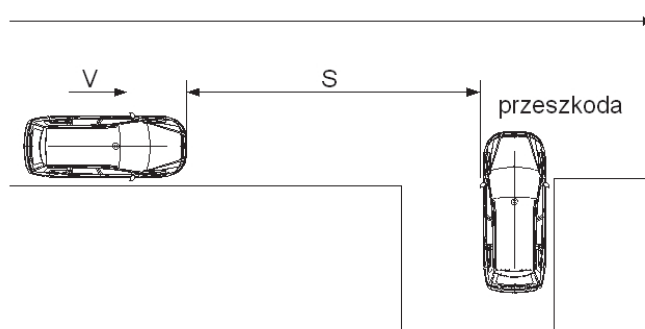
W niektórych publikacjach można znaleźć w sposób opisowy charakteryzowane różnice w postrzeganiu rzeczywistej sytuacji drogowej i jej odwzorowania w środowisku wirtualnym (w symulatorze jazdy) [2], [15-16]. Zatem jako szczególnie wartościową zaletę przeprowadzonych badań należy uznać możliwość określenia różnic wartości różnorodnych parametrów charakteryzujących zachowanie się kierowców w obu środowiskach.

2. Badania eksperymentalne na torze

Badania eksperymentalne przeprowadzono na Torze Kielce w Miedzianej Górze. Samochodem testowym był samochód marki Ford Transit wyposażony w aparaturę pomiarową. Podczas badań dokonywano pomiaru wielu parametrów. Wyznaczenie części z nich było niezbędne do określenia parametrów opracowanego modelu kierowcy (opóźnienie, kąt skrętu). Do badań wybrano sytuację przedwypadkową polegającą na nagłym pojawieniu się na drodze przeszkody w postaci wyjeżdżającego z bocznej uliczki samochodu osobowego. Bardziej szczegółowo scenariusz i sposób przeprowadzenia badań został opisany w pracy [13].

Zadaniem kierowców była próba uniknięcia zderzenia z wnikającą w obszar jezdni przeszkodą, przy czym nie narzucano kierowcom sposobu reagowania na zaistniałe zagrożenie. Kierując się indywidualną, subiektywną oceną danej sytuacji drogowej kierowca mógł wyłącznie hamować, mógł wykonywać wyłącznie manewr omijania albo wykonywać oba te rodzaje działań z dowolną „intensywnością”.

W badaniach i analizie posłużono się pojęciem czasu ryzyka [4], [6], [9], [12], [15], [17]. Czas ryzyka t_R zdefiniowano jako czas, którym dysponuje kierowca od momentu zauważenia przeszkody, do ewentualnego zderzenia z nią i może on być wykorzystany przez kierowcę na realizację działań obronnych. Parametr ten jest obliczany jako stosunek odległości pojazdu od przeszkody do jego prędkości V (rys.1) – (równanie 1) (w niektórych publikacjach nazywany TTC – czas do kolizji ang. Time To Collision [18-20]) i jak pokazują analizy przeprowadzone przez autorów w pracach [5], [7], [13-14] jest przydatny w ocenie sytuacji wypadkowych.



Rys.1. Schemat obliczania czasu ryzyka

$$t_R = \frac{S}{V} \quad (1)$$

Dzięki jego wprowadzeniu charakteryzujemy daną sytuację (opisaną tu prędkością pojazdu oraz odległością od przeszkody, kiedy staje się widoczna) tylko jednym parametrem – właśnie czasem ryzyka.

Testy prowadzono dla parametrów: prędkości jazdy charakterystycznej dla obszarów zabudowanych: 40, 50, 60 km/h; odległości od pojazdu, przy jakich kierowca zauważał przeszkodę: 10, 20, 30, 40 i 50 m. Kombinacja tych parametrów pozwoliła na uzyskanie 15 różnych prób, charakteryzujących się początkową wartością czasu ryzyka (wartością określaną dla chwili pojawienia się przeszkody) t_{R0} zawierającą się w zakresie 0,60 s do 4,5 s.

3. Badania w symulatorze jazdy

Badania w symulatorze jazdy zostały przeprowadzone w Pracowni Badań Symulacyjnych Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej. Budowa i możliwości tego symulatora opisane zostały w pracach [21], [22]. Sygnały z czujników były przetwarzane przez układ 3 komputerów klasy IBM PC, zaś efekt symulacji wyświetlany był poprzez rzutnik multimedialny o wysokiej rozdzielczości na ekranie umieszczonym przed samochodem. Oprogramowanie symulatora, które umożliwia rozpatrywanie różnych scenariuszy sytuacji drogowych, zawiera model pojazdu [23] o następujących parametrach:

- 7 stopni swobody (2 współrzędne położenia środka masy pojazdu w układzie związanym z drogą, kąt odchylenia, 4 kąty obrotu kół jezdnych),
- quasistatyczny opis zmian reakcji normalnych drogi,
- podatność układu kierowniczego,
- złożony nieliniowy model sił kontaktowych i momentów stabilizujących.

Scenariusz zrealizowany w symulatorze jazdy samochodem autoPW był identyczny jak realizowany na torze. Dzięki graficznym możliwościom symulatora możliwe było znacznie bardziej realistyczne odwzorowanie scenarii rozważanej sytuacji. Na

rysunku 2 przedstawiono widok rzeczywistego skrzyżowania oraz jego odwzorowanie w symulatorze. Na rysunku 3 przedstawiono widok kolejnych faz przejazdu pojedynczej próby widzianej z lotu ptaka.



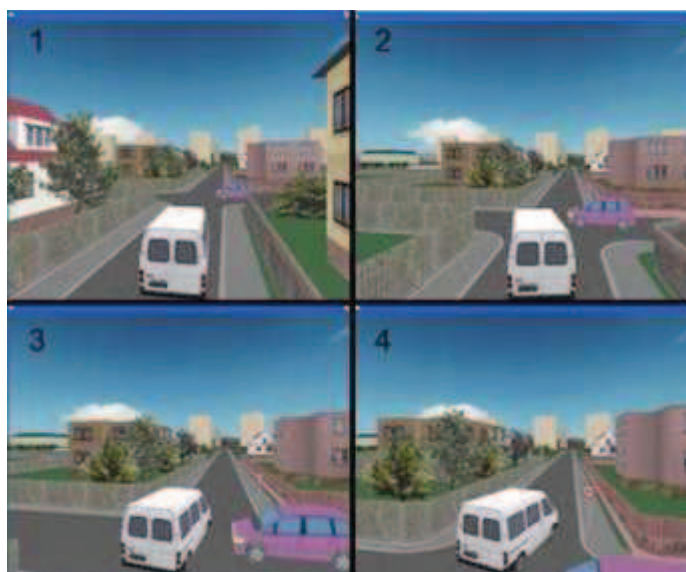
Rys. 2. Widok na rzeczywiste skrzyżowanie oraz jego odwzorowanie w symulatorze AutoPW

Badania przeprowadzono dla grupy 30 kierowców, w której 20 było w wieku 22-24 lata oraz 10 w wieku od 30 do 67 lat. W obu eksperymentach (Tor Kielce, symulator autoPW) wzięła udział ta sama grupa kierowców. Do oprogramowania symulatora (do modelu samochodu) wprowadzono parametry samochodu Ford Transit, używanego w badaniach na torze, a więc w symulatorze kierowca kierował samochodem o parametrach i właściwościach jezdnych takiego samego samochodu jak na torze.

Spełniając trzy warunki:

- ta sama grupa kierowców,
- ten sam scenariusz i parametry badań,
- samochód o tych samych właściwościach jezdnych,

zagwarantowano w możliwie największym stopniu podobieństwo eksperymentów przeprowadzonych w obu środowiskach badawczych. Zatem ewentualne różnice w uzyskiwanych wynikach badań będą spowodowane wyłącznie wpływem środowiska badawczego. Możliwe więc będzie wskazanie, w jakich aspektach zachowania kierowców w obu środowiskach są podobne lub identyczne, a w jakich różnią się od siebie. Kierowcy przed badaniem w symulatorze zapoznawali się ze specyfiką otoczenia symulatora w czasie jazd próbnych



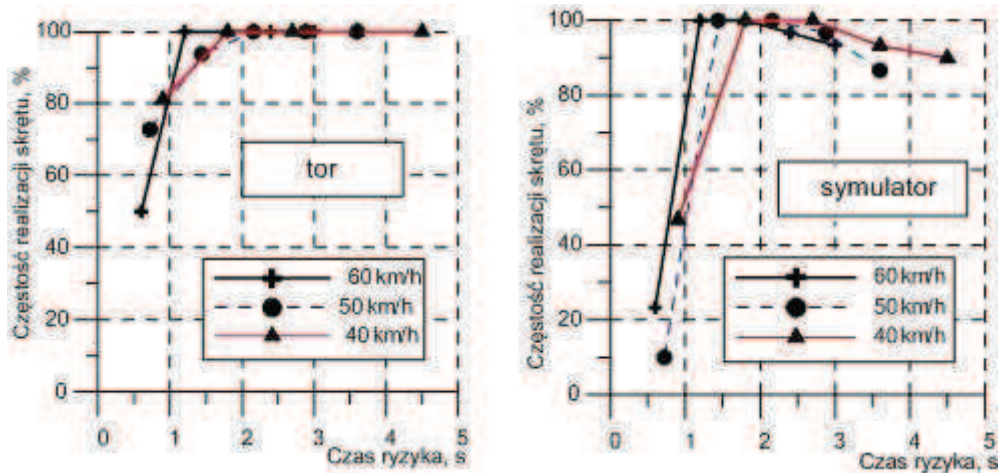
Rys. 3. Odwzorowanie jednej z zarejestrowanych prób ("widok z lotu ptaka")

4. Ocena częstości podejmowania manewrów

Badania wykazały, że decyzja o podejmowaniu danego działania (skręt, hamowanie) zależy od wartości czasu ryzyka, a nie wyłącznie od prędkości jazdy lub odległości od przeszkody [12]. Dla dalszej analizy wyznaczono współczynnik „w” określający stosunek ilości osób wykonujących dany manewr n_p do liczby wszystkich badanych kierowców n - czyli częstości występowania danego manewru obronnego - zależność (2):

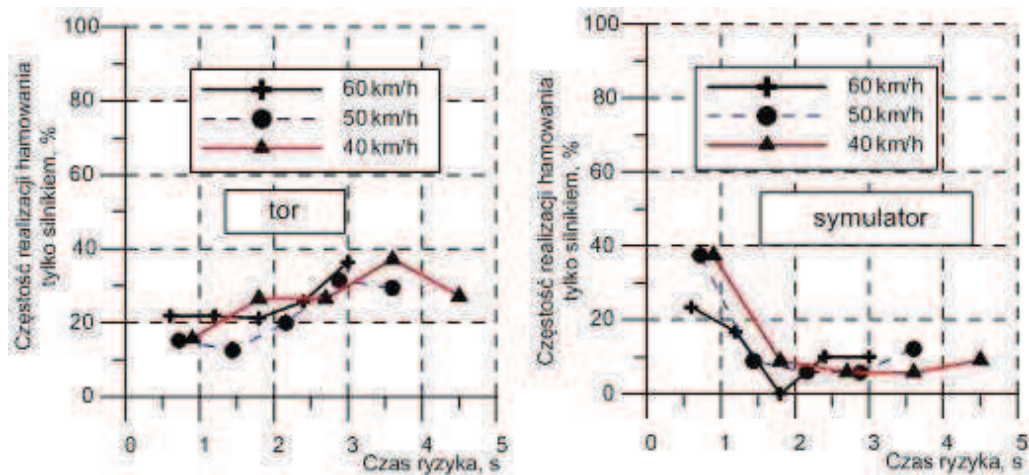
$$W = \frac{n_p}{n} \cdot 100 \% \quad (2)$$

Największe podobieństwo zachowań w obu środowiskach zaobserwowano w przypadku decyzji o podejmowaniu manewru skrętu. Na rysunku 4 pokazano wartości wskaźnika „w” wyznaczone dla tego manewru. Widoczna jest wyraźnie zarysowana graniczna wartość czasu ryzyka (ok. 1,2 – 1,5 s), powyżej której w zasadzie 100% kierowców podejmuje decyzję o manewrze skrętu. Dla sytuacji wypadkowych o czasach ryzyka poniżej tej granicy odsetek kierowców decydujących się na manewr skrętu bardzo szybko spada, ale nawet dla najmniejszego badanego czasu ryzyka $t_{R0} = 0,6$ s nie spada on do zera.



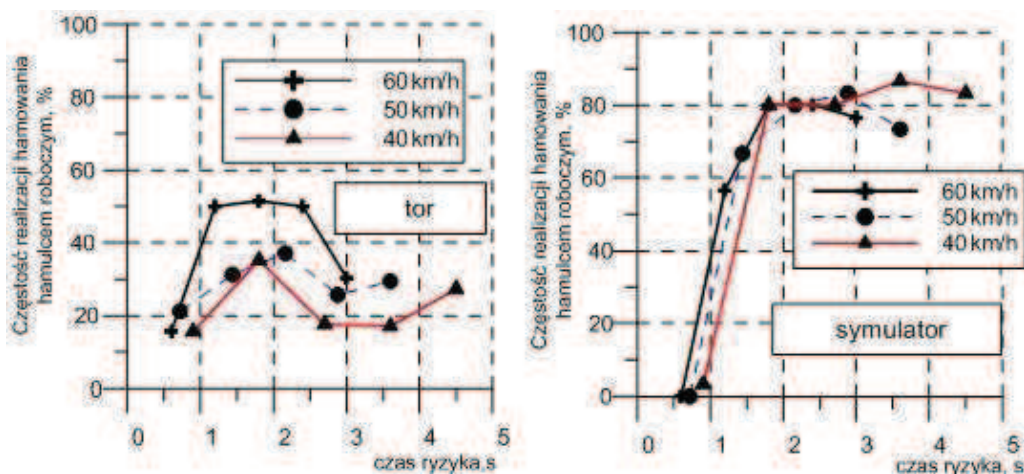
Rys. 4. Częstość wykonania manewru skrętu

Większe zróżnicowanie zachowań zaobserwowano w przypadku manewru hamowania. Na rysunku 5 pokazano częstość hamowania silnikiem w obu środowiskach badawczych, a na rysunku 6 – częstość hamowania hamulcem roboczym.



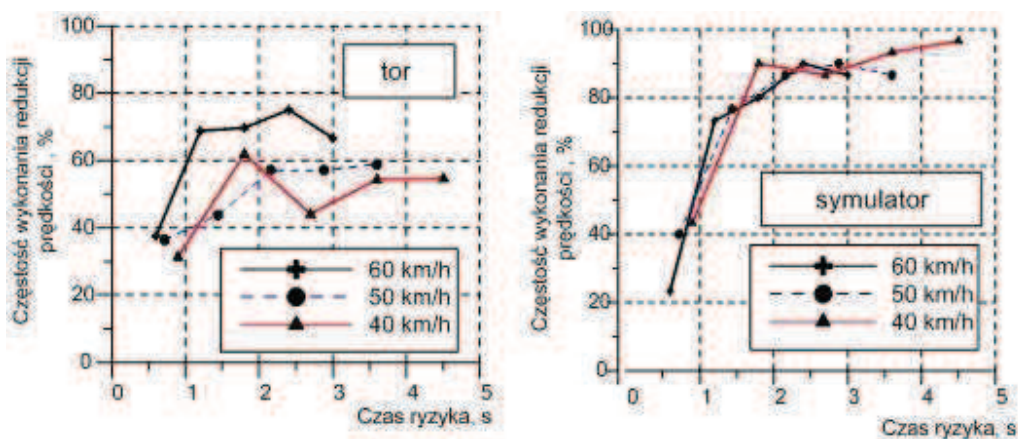
Rys. 5. Częstość wykonania manewru hamowania silnikiem

Częstość podejmowania decyzji o hamowaniu wyłącznie silnikiem (osoby badane zdejmowały w tym przypadku nogę z pedału gazu, a nie naciskały pedału hamulca) w obu środowiskach jest podobna i waha się od około 0 do 40%. Jednak w przypadku badań na torze następuje nieznaczny wzrost częstości realizacji tego manewru wraz ze wzrostem początkowego czasu ryzyka. W symulatorze natomiast tylko dla małych wartości czasu ryzyka osiąga ona wartości rzędu 30 – 40%, a po czasie około 1,0 – 1,5 s stabilizuje się na poziomie około 10% .



Rys. 6. Częstość wykonania manewru hamowania hamulcem roboczym

W przypadku hamowania hamulcem zasadniczym widoczna jest największa różnica zachowań kierowców. Podczas badań na torze największa częstość podejmowania tej decyzji wynosiła około 40% i występowała dla czasu ryzyka około 2s. Powyżej czasu ryzyka $t_{R0} \approx 3s$ udział kierowców podejmujących hamowanie hamulcem malał do około 20 – 30%. Inaczej kształtowało się to w symulatorze. W zakresie czasu ryzyka od 0.6 do około 2s udział kierowców podejmujących ten manewr wzrastał prawie liniowo od 0 do około 80% i do końca badanego zakresu t_{R0} utrzymywał się na tym poziomie. Podobieństwo zachowań w obu środowiskach badawczych jest większe, jeśli rozpatrujemy łącznie zagadnienie redukcji prędkości jazdy bez względu na to, czy jest ona realizowana przez hamowanie silnikiem czy też hamulcem roboczym (rys. 7).



Rys. 7. Porównanie częstości wykonania redukcji prędkości jazdy

Wprawdzie w tym przypadku również częściej decyzję taką podejmowano podczas badań w symulatorze, jednak charakter zmienności – czyli wzrost częstości podejmowania decyzji wraz ze wzrostem czasu ryzyka – jest taki sam w obu środowiskach badawczych. W zakresie dużych wartości czasu ryzyka przebiegi powyższych wykresów mają podobny charakter (linia w przybliżeniu pozioma), ale różnią się o pewną stałą wartość wynoszącą około 30%.

5. Analiza korelacji czasu reakcji kierowców

Spośród parametrów modelu kierowcy szczególną uwagę poświęcono czasowi reakcji [4], [7], [18], [24-27]. Wynika to z faktu, że uzyskane wartości czasu reakcji już obecnie mogą być bezpośrednio wykorzystywane przy rekonstrukcji przebiegu wypadków drogowych.

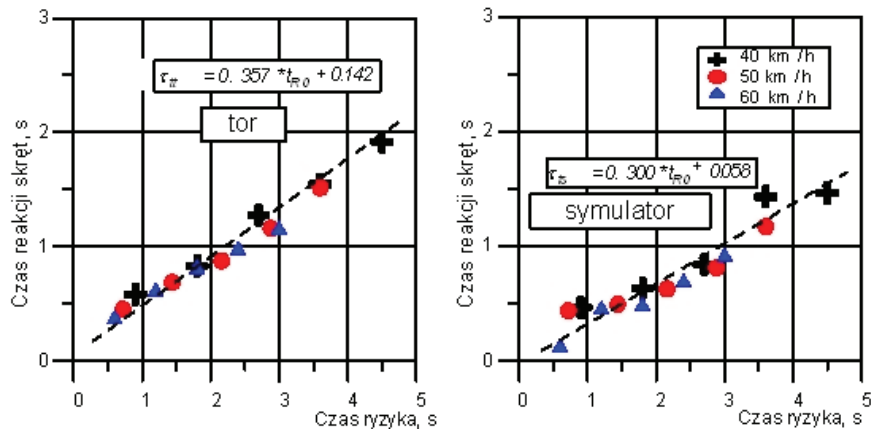
5.1. Czas reakcji skrętu

Stwierdzono, że czas reakcji kierowców podczas badań w symulatorze jest krótszy niż podczas badań na torze. Nie można jednak wskazać jakiejś stałej wartości różnicy czasu reakcji, jak podają niektóre źródła literaturowe, np. [25], [28].

Czas reakcji dla skrętu był definiowany jako czas pomiędzy pojawieniem się przeszkody do momentu reakcji kierowcy na kole kierowniczym.

Badania przeprowadzone przez autorów wykazały, że uzyskiwane wartości czasu reakcji, zarówno na torze, jak i w symulatorze, bardzo silnie zależą od początkowej wartości czasu ryzyka charakteryzującego daną próbę.

Średni czas reakcji kierowców określony dla całej badanej populacji kierowców, zarówno dla badań na torze, jak i w symulatorze wykazywał liniową zależność od wartości początkowej czasu ryzyka t_{R0} . Przebiegi te cechuje bardzo wysokie podobieństwo dla obu środowisk. Zostały one przedstawione na kolejnych rysunkach. Na rysunku 8 przedstawiono czas reakcji dla skrętu.



Przedstawione wykresy pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- 1 czas reakcji uzyskiwany zarówno podczas badań na torze, jak i w symulatorze zależy bardzo wyraźnie od czasu ryzyka, a nie zależy tylko od prędkości, przy jakich poszczególne próby były realizowane.
- 2 czas reakcji zmienia się w dosyć szerokim zakresie (od ok. $0,4 \div 1,9$ s na torze oraz od ok. $0,15 \div 1,5$ s w symulatorze) i zależy silnie od wartości czasu ryzyka τ_{R0} - zależność ta ma charakter liniowy.

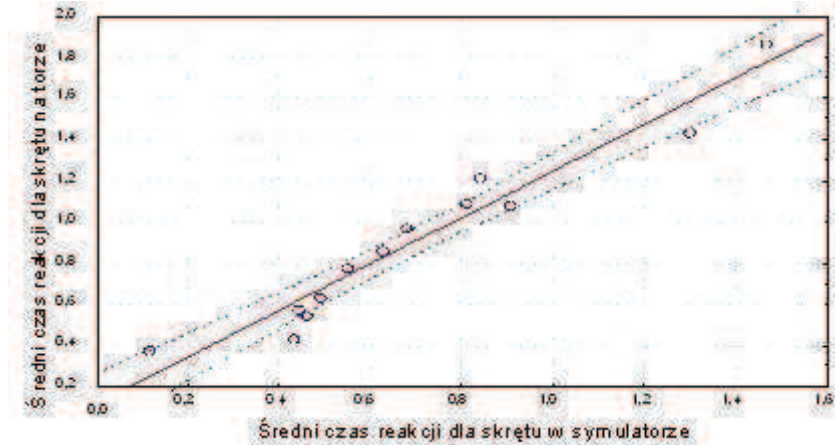
Na podkreślenie zasługuje pierwszy z przedstawionych wniosków. W publikacjach dotyczących analizy wypadków oraz w różnego rodzaju poradnikach dla rzeczoznawców podawane są zalecenia dotyczące wartości czasu reakcji. W wielu przypadkach jest one dość dokładny, poddany obróbce statystycznej, podawany np. w postaci funkcji rozkładu prawdopodobieństwa. Nie uzależniają jednak one zalecanych wartości czasu reakcji od żadnych parametrów charakteryzujących sytuację wypadkową. Zatem rzeczoznawca może przyjmować ten sam czas reakcji zarówno dla sytuacji, którą scharakteryzowano by przez czas ryzyka wynoszący 0,6 s, jak i dla sytuacji, w której ten czas ryzyka wynosi znacznie więcej – na przykład około 2,0 s.

Przedstawiony na rysunku 8 wykres jednoznacznie dowodzi, że w obu wyżej wymienionych sytuacjach należałoby przyjmować czas reakcji różniący się od siebie w sposób znaczny. Czy zatem wniosek powyższy jest zasadny, czy może jest to przypadkowo uzyskany rezultat? Można z całą pewnością wykluczyć przypadkowość uzyskanych rezultatów. Po pierwsze: zależność czasu reakcji od czasu ryzyka potwierdzona została w dwóch niezależnie od siebie prowadzonych badaniach – na torze i w symulatorze. Po drugie: każdy z punktów zaznaczonych na wykresach jest wartością średnią z czasu reakcji 30 kierowców badanych w każdej próbie.

Każdy z wykresów powstał na podstawie 450 pomiarów. Fakt zależności czasu reakcji od czasu ryzyka można interpretować tak, że kierowca oceniając sytuację nie kieruje się z osobna ani prędkością jazdy, ani odległością od przeszkody, lecz ma świadomość czasu, jakim dysponuje na podjęcie decyzji i zareagowanie. Gdy odczuwa, że dysponuje dłuższym czasem, to również dłużej podejmuje decyzję, a z całą pewnością po dłuższym czasie reaguje. Uzyskanie podczas badań w obu środowiskach badawczych liniowych zależności wskazuje, że wyniki badań są ze sobą skorelowane.

Potwierdzeniem tej tezy jest przedstawiona na rysunku 9 zależność między czasem reakcji uzyskanym na torze i w symulatorze oraz wynik analizy korelacyjnej. Obliczony współczynnik korelacji liniowej był bardzo wysoki i wynosił $R = 0,97$. Dla zależności pokazanej na rysunku 9 wyznaczono równanie regresji liniowej (3), dzięki któremu można obliczyć średni czas reakcji skrętu na torze τ_{ts} , przy znanej wartości tego czasu w symulatorze τ_{ss} :

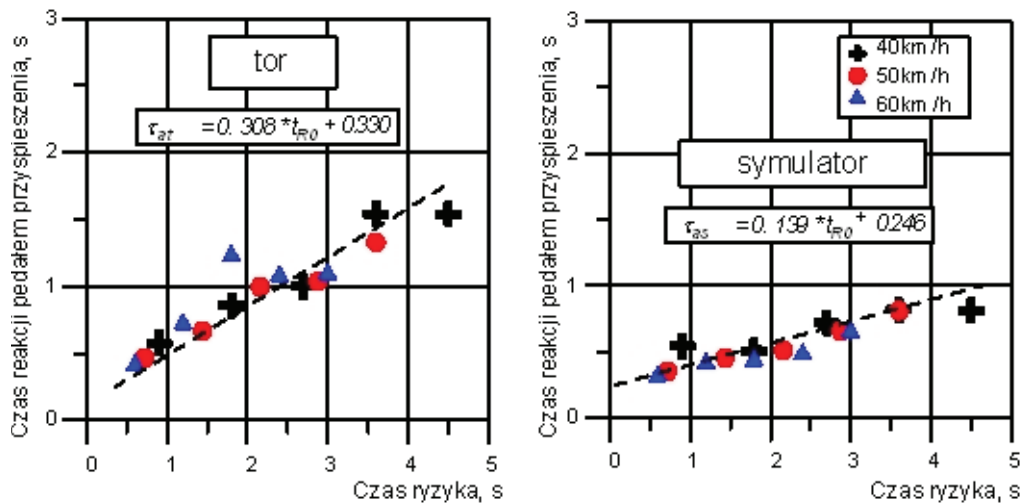
$$\tau_{tt} = 1.128 \cdot \tau_{ts} + 0,118 \quad (3)$$



Rys. 9. Zależność średniego czasu reakcji dla skrętu określonego podczas prób na torze i średniego czasu reakcji w symulatorze

5. 2. Czas reakcji pedałem przyspieszenia

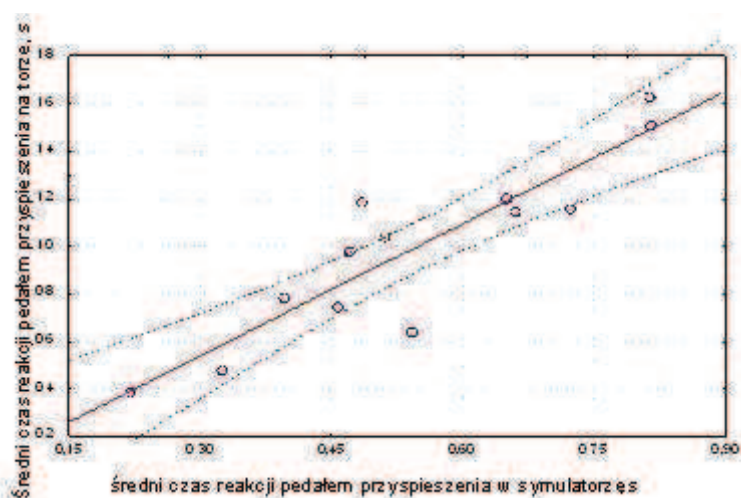
Na rysunku 10 przedstawiono charakterystyki czasu reakcji pedałem przyspieszenia w funkcji początkowego czasu ryzyka t_{R0} w symulatorze.



Rys. 10. Czas reakcji kierowcy dla pedału przyspieszenia w funkcji czasu ryzyka t_{R0}

Ponieważ zależności czasu reakcji dla gazu określone na podstawie badań na torze i w symulatorze mają również przebiegi liniowe można oczekiwać, że są one skorelowane.

Dla czasu reakcji pedałem przyspieszenia w obu środowiskach wyznaczono współczynnik korelacji, który wyniósł $R=0.90$ i wyznaczono równanie regresji liniowej (4) zależności podanej na rysunku 11.



Rys. 11. Zależność średniego czasu reakcji dla pedału przyspieszenia określonego podczas prób na torze i średniego czasu reakcji w symulatorze

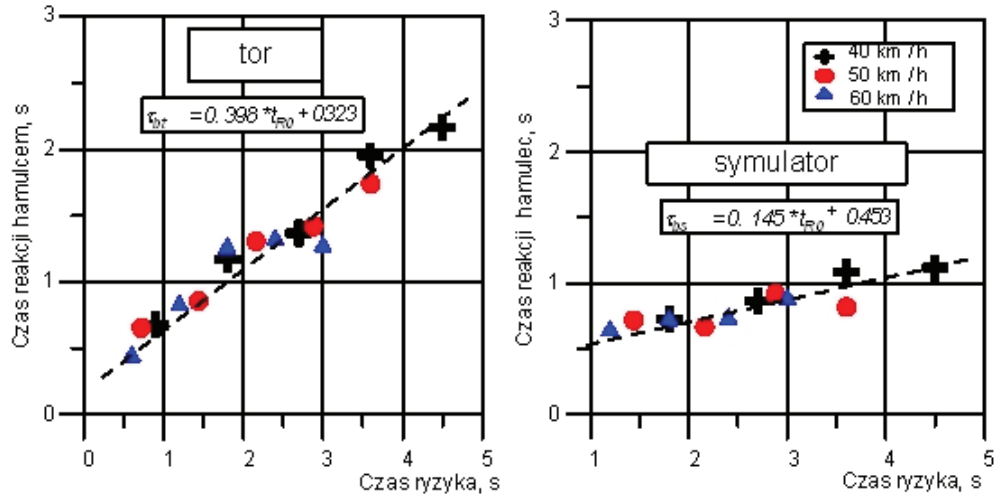
$$\tau_{at} = 1.851 \cdot \tau_{as} + 0,016 \quad (4)$$

Posługując się tą zależnością można obliczyć średni czas reakcji dla pedału przyspieszenia na torze τ_{at} przy znanej wartości tego czasu w symulatorze τ_{as} .

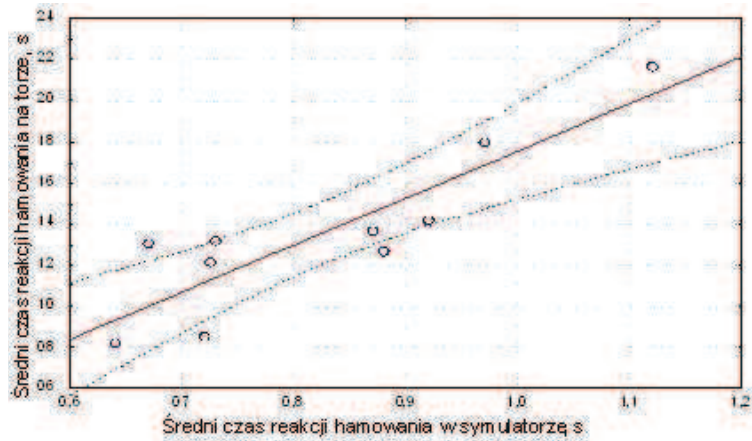
5.3. Czasy reakcji przy hamowaniu hamulcem roboczym

Charakterystyki czasu reakcji przy hamowaniu hamulcem zasadniczym przedstawiono na rysunku 12. Podobnie jak w poprzednich przypadkach wykazują wyraźną zależność liniową od czasu ryzyka. Zależność tę uzyskano zarówno dla badań na torze, jak i w symulatorze.

Wyznaczono współczynnik korelacji liniowej między wartościami średniego czasu reakcji uzyskiwanymi na torze oraz w symulatorze (dla danej wartości czasu ryzyka). Był on niewiele mniejszy w stosunku do manewrów skrętu, jak i gazu, a jego wartość $R=0,88$ można uznać za wysoką. Zależność między średnim czasem reakcji przy hamowaniu uzyskiwanym w obu środowiskach badawczych przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 12. Czas reakcji kierowcy dla hamulca roboczego w funkcji czasu ryzyka t_{r0}



Rys. 13. Różnice wartości średniego czasu reakcji (dla hamowania hamulcem roboczym) na torze do średniego czasu reakcji w symulatorze

Wyznaczona zależność regresyjna (rów. 5) umożliwia obliczenie średniego czasu reakcji dla hamowania na torze τ_{bt} przy znanym średnim czasie reakcji wyznaczonym w symulatorze τ_{bs} :

$$\tau_{bs} = 2.287 \cdot \tau_{bs} - 0,531 \quad (5)$$

5.4. Podsumowanie porównania czasu reakcji kierowców

Dla dodatkowego porównania, w tabeli 1 zestawiono wartości różnic średniego czasu reakcji, dla pięciu wybranych prób o różnych wartościach czasu ryzyka. W tabeli podano różnice tylko dla dwóch podstawowych typów czasów wykorzystywanych przy rekonstrukcji wypadków, tj.: czasu reakcji przy skręcie i czasu reakcji hamowania hamulcem zasadniczym.

Tabela 1. Porównanie czasu reakcji osiągniętego na torze i w symulatorze

	Różnice średniego czasu tor- symulator dla wybranych wartości czasu ryzyka t_{r0}				
	$t_{r0} = 0,6$ s	$t_{r0} = 1,5$ s	$t_{r0} = 2,5$ s	$t_{r0} = 3,5$ s	$t_{r0} = 4,5$ s
Różnica czasu reakcji przy skręcie	0,13	0,19	0,27	0,34	0,41
Różnica czasu reakcji hamowania hamulcem roboczym	- 0,01	0,24	0,52	0,79	1,07

Reasumując powyższe porównanie czasu reakcji można sformułować następujące wnioski:

- czas reakcji kierowców zarówno przy skręcie, jak i przy hamowaniu uzyskiwany podczas badań w symulatorze jest krótszy niż podczas badań na torze (rys. 8, 10 i 12);
- różnica wartości średniego czasu uzyskiwanego na torze i w symulatorze nie jest dla danego manewru stała, lecz maleje liniowo wraz ze zmniejszaniem się czasu ryzyka charakteryzującego daną próbę, a więc wraz ze wzrostem stopnia niebezpieczeństwa sytuacji (rys. 8, 10 i 12 oraz tab. 1);
- wszystkie omówione powyżej wielkości czasu reakcji kierowców wyznaczone podczas badań na torze i symulatorze wykazują wzajemną silną korelację (rys. 9, 11 i 13).
- średnie wartości czasu reakcji uzyskiwane w obu środowiskach przyjmują bardzo podobne wartości dla małych wartości czasu ryzyka (różnica dąży do zera – tab. 1).

Warto zwrócić uwagę na ostatni wniosek, gdyż wskazuje on, że badanie sytuacji o najmniejszych wartościach czasu ryzyka, których realizacja na torze byłaby szczególnie niebezpieczna, można przeprowadzać w symulatorze jazdy.

6. Analiza parametrów modelu kierowcy (sposobów realizacji manewrów)

W wyniku przeprowadzonych pomiarów w symulatorze okazało się, że zarejestrowane charakterystyki kąta skrętu kół oraz opóźnienia charakteryzują się dość znacz-

nym zróżnicowaniem [5]. W niektórych próbach (określonych wartościach czasu ryzyka) otrzymane charakterystyki kąta skrętu kół i opóźnienia układały się wokół wyznaczonej linii średniej, inne wykazywały silne zróżnicowanie.

W większości prób otrzymane charakterystyki wykazywały jednak na tyle duże zróżnicowanie, że dokonanie ich uśrednienia było niecelowe. Dlatego też na podstawie wyników badań na torze i w symulatorze dokonano podziału całej populacji badanych kierowców na 4 mniejsze grupy, charakteryzujące się podobnym sposobem zachowania [12]:

1. Bardzo małe opóźnienia hamowania (lub brak opóźnienia), „wczesny” skręt.
2. Bardzo małe opóźnienia hamowania (lub brak opóźnienia), „średni” skręt.
3. Małe opóźnienia hamowania, „średni” skręt.
4. Małe opóźnienia hamowania, „wczesny” skręt.

Aby w sposób ścisły (matematyczny) scharakteryzować sposób realizacji manewrów opracowano matematyczny model kierowcy dla analizy sytuacji przedwypadkowych. Przyjęto, że model będzie obejmował dwa podstawowe działania stosowane przez kierowców jako manewry obronne w sytuacjach zagrożenia [12], [13]: zmniejszenie prędkości (hamowanie) i kierowanie (omijanie przeszkody).

W opracowanym modelu zachowania kierowcy opisanym w pracach [12-14], model hamowania ma postać - równanie (6):

$$b_b(t) + W_1 \dot{b}_b(t) = W_2 \left(y_{lat}(t - \tau_b) - y_s(t - \tau_b) \right) + W_3 \left(\frac{1}{t_R} \right) \quad (6)$$

gdzie: W_1, W_2, W_3 - współczynniki modelu hamowania, b_b - opóźnienie pojazdu, y_{lat} - wychylenie poprzeczne przeszkody, y_s - położenie środka masy pojazdu, τ_b - czas reakcji dla hamowania, t_R - czas ryzyka, $t_R = S/V$, S - odległość od przeszkody, t - czas, V - prędkość samochodu.

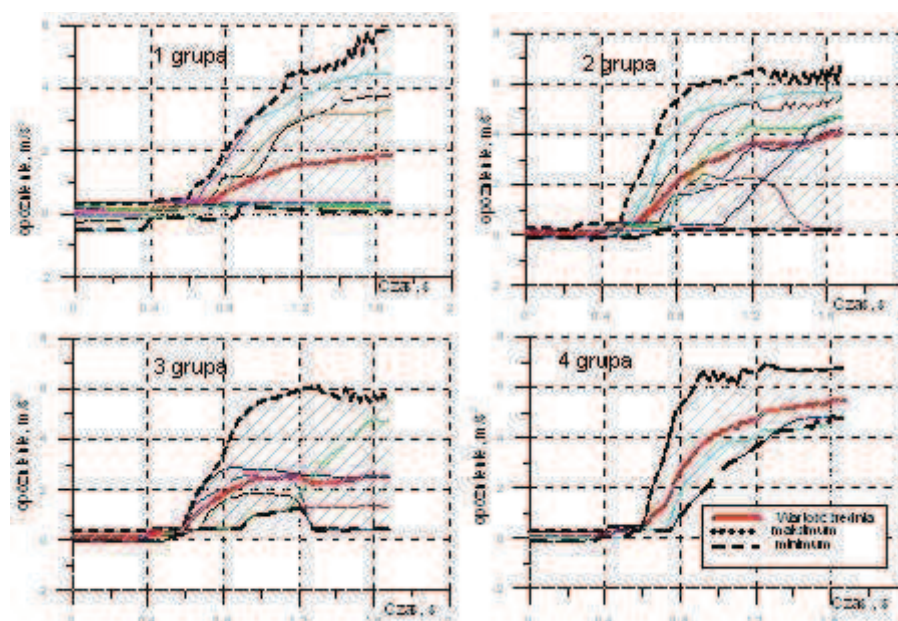
Model kierowania przyjęto w postaci równania (7):

$$\delta_t(t) + W_4 \dot{\delta}_t(t) = W_5 (y_{lat}(t - \tau_t) - y_s(t - \tau_t)) \quad (7)$$

gdzie: W_4, W_5 - współczynniki modelu kierowania, δ_t - kąt skrętu kół, y_{lat} - wychylenie poprzeczne przeszkody, y_s - położenie środka masy pojazdu, τ_s - czas reakcji dla kierowania (skrętu).

Identyfikację parametrów modelu kierowcy w oparciu o badania w symulatorze przeprowadzono w sposób analogiczny, jak dla wyników badań na torze [13]. Dla poszczególnych prób określonych wartością początkowego czasu ryzyka t_{R0} dokonano wyznaczenia charakterystyk z podziałem na grupy kierowców. Podobnie jak dla pre-

zencacji wyników na torze [13], na wykresach oprócz przebiegów kąta skrętu kół i opóźnień realizowanych przez poszczególnych kierowców naniesiono przebiegi wartości średnich (gruba linia) oraz obwiednie wartości minimalnych (linie kreskowane) i obwiednie wartości maksymalnych (linie kropkowane). Ponadto zakresowano obszar, w którym zawarte są charakterystyki kierowców z danej grupy. Przykładowe charakterystyki kąta skrętu kół i opóźnień uzyskiwane podczas badań na torze i w symulatorze, dla dwóch wybranej próby scharakteryzowanych początkową wartością czasu ryzyka 1,8 s, przedstawiono na rysunkach 14 i 15.



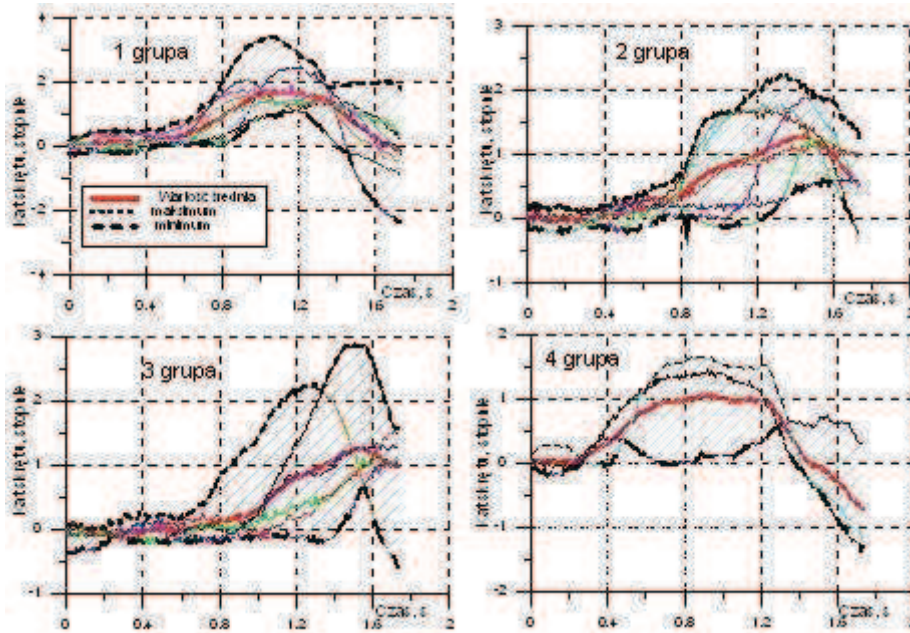
Rys. 14. Opóźnienie uzyskane w symulatorze dla czasu ryzyka $t_{R0}=1.8s$ ($v=60\text{km/h}$, $s=30\text{m}$)

Przedstawione powyżej charakterystyki pokazują, iż mimo podziału kierowców na cztery grupy, zróżnicowanie zachowań kierowców na torze i w symulatorze jest duże. Nie możliwe jest zatem tak wyraźne wskazanie podobieństw i prawidłowości, jak w przypadku analizowanych poprzednio prawdopodobieństw wykonania manewru, lub czasu reakcji.

Analizując te charakterystyki można wskazać jedynie następujące ogólne prawidłowości:

- na charakterystykach widoczny jest krótszy czas reakcji w symulatorze, zarówno przy hamowaniu, jak i przy skręcie (potwierdzenie wniosków z punktu 5);
- w symulatorze wszyscy kierowcy hamowali z większą intensywnością – uzyskiwano w niektórych przypadkach dwukrotne lub nawet większe opóźnienie hamowania niż na torze;

- w symulatorze wszyscy kierowcy wykonywali silniejsze skręty podczas omijania przeszkody – uzyskiwano dwukrotne lub nawet większe maksymalne wartości kąta skrętu niż na torze.



Rys. 15. Kąt skrętu uzyskany na torze dla czasu ryzyka $t_{R0}=1.8s$ ($v=60km/h$, $s=30m$)

Chcąc dokładnie (liczbowo) scharakteryzować podobieństwa lub różnice w sposobie realizacji manewrów przeprowadzono identyfikację parametrów modelu kierowcy opisanego równaniami (6) i (7). Sposób identyfikacji parametrów w oparciu o wyniki badań na torze opisano szczegółowo w pracy [12].

W analogiczny sposób przeprowadzono identyfikację parametrów modelu w oparciu o wyniki badań w symulatorze.

Kryterium identyfikacji była zgodność charakterystyk (w funkcji czasu) kąta skrętu kół kierowanych - równanie (8) i opóźnienia - równanie (9) uzyskanych w eksperymentach σ_{exper} , b_{exper} oraz uzyskanych z symulacji komputerowej modelu kierowcy σ_{simul} , b_{simul} . Poszukiwano minimum funkcji kryterialnej J_t , J_b , obliczanej pomiędzy czasem początkowym t_1 a końcowym t_2 danego manewru, ($T=t_2 - t_1$):

$$\text{for the turning angle } J_t = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} (\delta_{exper_i}(t) - \delta_{simul_i}(t))^2 dt \quad (8)$$

$$\text{for deceleration } J_b = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} (b_{exper_i}(t) - b_{simul_i}(t))^2 dt \quad (9)$$

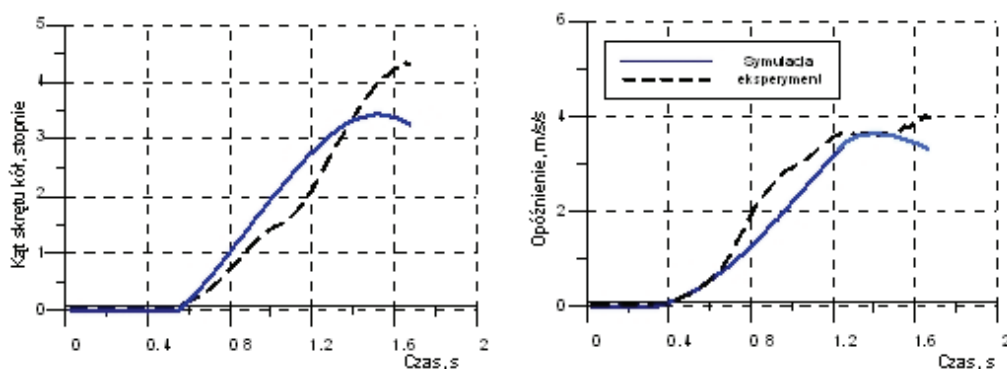
Ewentualna różnica wartości parametrów modelu mogłaby być spowodowana faktem, że zaproponowana postać matematycznego modelu kierowcy dobrze opisuje zachowanie kierowcy tylko w jednym ze środowisk badanych. Wysoką zgodność wyników uzyskiwanych na torze oraz w symulacji komputerowej z wykorzystaniem opracowanego modelu kierowcy i zidentyfikowanych wartości parametrów modelu pokazano w pracy [13].

Aby pokazać, że zaproponowany model kierowcy dobrze opisuje zachowanie kierowcy również w symulatorze, dokonano porównania przebiegów czasowych opóźnienia i skrętu uzyskiwanych podczas badań w symulatorze oraz w symulacji komputerowej z wykorzystaniem matematycznego modelu kierowcy. Przy czym w tym przypadku posłużono się parametrami modelu zidentyfikowanymi dla badań w symulatorze.

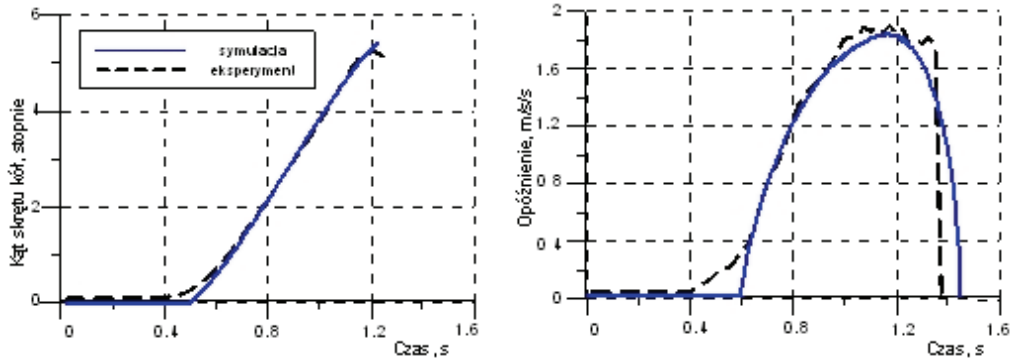
Na rysunkach 16 - 18 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji dla różnych wartości czasu ryzyka. Przy wyborze zwracano uwagę, aby charakterystyki skrętu i opóźnienia uzyskane w symulatorze były zróżnicowane.

Przeprowadzone symulacje dla zidentyfikowanych parametrów modelu na podstawie badań w symulatorze, wykazują, że zaproponowany przez autorów model matematyczny kierowcy nie odnosi się wyłącznie do jednego określonego kształtu charakterystyki, lecz dobrze opisuje różne kształty nie tylko charakterystyk skrętu, ale i opóźnienia, uzyskiwanych zarówno podczas badań na torze, jak i w symulatorze.

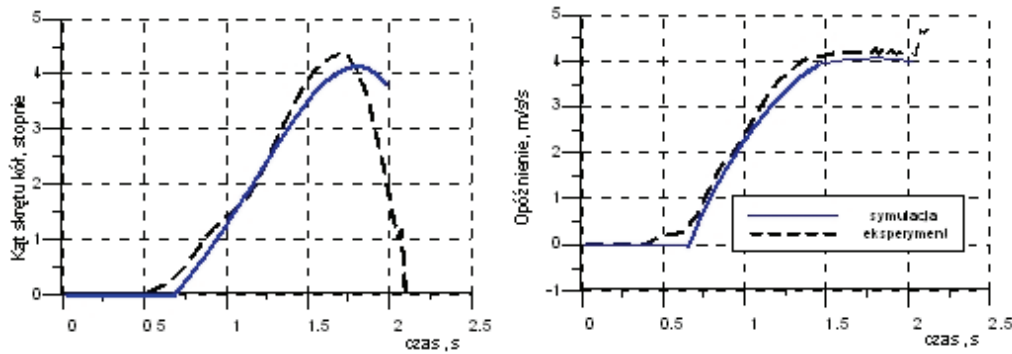
Skoro zaproponowaną postać matematycznego modelu kierowcy można uznać za adekwatną dla opisu zachowań kierowców zarówno na torze, jak i w symulatorze, zatem ewentualne różnice wartości parametrów modelu uzyskiwane dla obu środowisk należy uznać za skutek różnic środowisk badanych.



Rys. 16. Porównanie charakterystyk kąta skrętu i opóźnienia uzyskanych podczas symulacji komputerowej i uzyskanych w eksperymencie dla czasu ryzyka $t_{R0}=1.2$ s (parametry dla 1 grupy kierowców)



Rys. 17. Porównanie charakterystyk skrętu i opóźnienia uzyskanych podczas symulacji komputerowej i uzyskanych w eksperymencie dla czasu ryzyka $t_{R0}=1.8$ s (parametry dla 1 grupy kierowców)



Rys. 18. Porównanie charakterystyk skrętu i opóźnienia uzyskanych podczas symulacji komputerowej i uzyskanych w eksperymencie dla czasu ryzyka $t_{R0}=2.16$ s (parametry dla 2 grupy kierowców)

Tabela 2. Wartości parametrów modelu kierowcy zidentyfikowane na podstawie badań na torze i w symulatorze

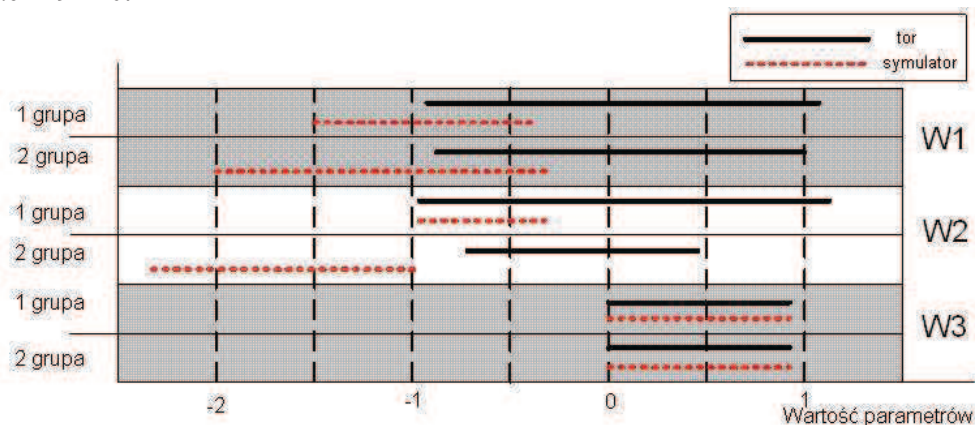
Współczynnik		Grupa	Charakterystyki średniego opóźnienia i skrętu			
			Tor		symulator	
			min	max	min	max
Model hamowania-równanie (6)	W ₁	1	-0,82	1,12	-1,5	-0,38
		2	-0,75	1,03	-2,0	-0,32
	W ₂	1	-0,91	1,21	-0,95	-0,35
		2	-0,45	0,45	-2,35	-0,98
	W ₃	1	0	0,9	0	0,9
		2	0	0,9	0	0,9
Model kierowania-równanie (7)	W ₄	1	-0,31	2,82	-1,25	1,41
		2	0	2,5	-0,95	2,5
	W ₅	1	0,004	0,1	0,03	0,1
		2	0	0,056	0	1,11

Dla zidentyfikowanych współczynników W_1, W_2, W_3, W_4, W_5 w większości przypadków nie dało się stwierdzić jakiegokolwiek formy uporządkowania wartości, pozwa-

lającej na określenie dla nich zależności funkcyjnych. Wyznaczono więc zakresy wartości dla tych współczynników, dla poszczególnych grup kierowców. Tylko w niektórych przypadkach, gdy było to możliwe, wyznaczono równania regresji liniowej [13].

Aby ułatwić dokonywanie porównań i ocen, analizę ograniczono wyłącznie do porównania przebiegów średnich opóźnienia i skrętu (linie grube na rys. 14, 15), dla dwóch pierwszych grup kierowców. W tabeli 2 podano zakresy wartości zidentyfikowanych parametrów modelu, dla badań na torze i w symulatorze. Zakresy te obejmują wszystkie 15 prób o wartościach czasu ryzyka zawierających się w przedziale od 0,60s do 4,5s (p. punkt 2).

Dodatkowo, przedstawione w tabeli 2 wyniki zilustrowano na wykresach – rysunkach 19 i 20.

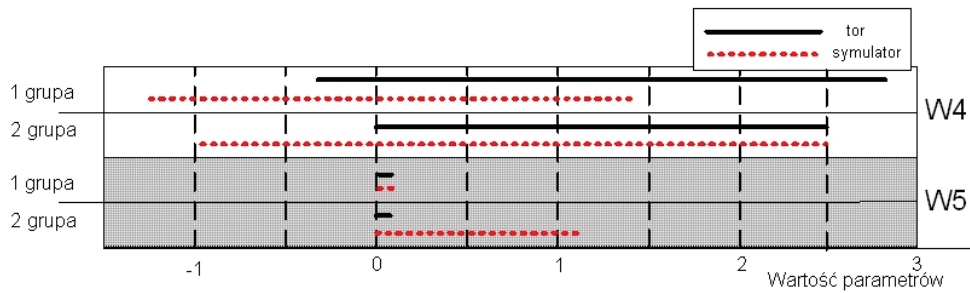


Rys. 19. Zakresy wartości parametrów modelu hamowania dla prób na torze i w symulatorze

Analiza wartości współczynników W_1 i W_2 nie pozwoliła wskazać w odniesieniu do całej grupy kierowców żadnej zależności funkcyjnej ani korelacji między wartościami uzyskiwanymi na torze i w symulatorze. Można tylko stwierdzić, że zakresy wartości uzyskane na torze są przesunięte w kierunku wartości dodatnich, w stosunku do zakresów uzyskiwanych w symulatorze.

Bardzo interesujący jest natomiast fakt, że współczynnik W_3 przyjmował dla obu grup kierowców wartości z takiego samego zakresu zmienności, zarówno podczas badań na torze, jak i w symulatorze. Współczynnik ten występuje w równaniu (6) przy składniku będącym odwrotnością bieżącej wartości czasu ryzyka. Oznacza to, że ten składnik sposobu reagowania kierowcy podczas hamowania jest w przybliżeniu taki sam w obu środowiskach badawczych.

Analiza wartości współczynnika W_4 nie pozwoliła wskazać w odniesieniu do całej grupy kierowców żadnej zależności funkcyjnej, ani korelacji między wartościami uzyskiwanymi na torze i w symulatorze. Można tylko stwierdzić, że (podobnie jak w przypadku współczynników W_1 i W_2) zakresy wartości uzyskane na torze są przesunięte w kierunku wartości dodatnich, w stosunku do zakresów uzyskiwanych w symulatorze.



Rys. 20. Zakresy wartości parametrów modelu kierowania dla prób na torze i w symulatorze

Do ciekawych wniosków prowadzi natomiast analiza wartości współczynnika W_5 . Dolna granica zakresu wartości, dla obu grup kierowców, zarówno na torze, jak i w symulatorze, jest w przybliżeniu taka sama - bliska zero. Natomiast górna granica, dla pierwszej grupy kierowców jest taka sama, zaś dla drugiej grupy jest niemal dokładnie 2-krotnie większa w symulatorze niż na torze. Współczynnik W_5 występuje w równaniu (7) przy składniku określającym bieżącą odległość środka samochodu od przeszkody, mierzoną w kierunku poprzecznym. Oznacza to, że przy danej poprzecznej odległości samochodu od przeszkody, dla kierowców pierwszej grupy ten składnik sposobu reagowania kierowcy podczas omijania przeszkody jest w przybliżeniu taki sam w obu środowiskach badawczych, zaś dla kierowców drugiej grupy ten składnik sposobu reagowania w symulatorze jest blisko 2-krotnie silniejszy niż na torze. Jest to wyrażone ilościowo, poprzez model matematyczny, potwierdzenie, przedstawionej poprzednio w sposób opisowy, różnicy zachowania kierowców na torze i w symulatorze.

7. Analiza korelacji parametrów modelu kierowcy uzyskanych dla indywidualnych kierowców

Analizując zachowanie kierowców na torze i w symulatorze stwierdzono istnienie podobieństw i korelacji dla całej badanej populacji w odniesieniu do niektórych parametrów charakteryzujących to zachowanie. Stwierdzono silną korelację między czasami reakcji na torze i w symulatorze. Nie udało się natomiast stwierdzić istnienia korelacji między rozpatrywanymi w punkcie 6. współczynnikami modelu, mimo podzielenia całej badanej populacji kierowców na mniejsze grupy.

Okazało się jednak, że można zaobserwować korelację między parametrami modelu uzyskiwanymi w obu środowiskach badawczych, ale nie w odniesieniu do średnich zachowań grupy, lecz w przypadku analizy zachowań pojedynczych kierowców. Analizę korelacji przeprowadzono na przykładzie 3 losowo wybranych kierowców. Wyniki zamieszczono w tabeli 3. Kierowcy A i B pochodzą z „1” grupy, zaś kierowca C z „2” grupy.

Tabela 3. Wyniki analizy korelacyjnej współczynników modelu

	Współczynnik korelacji liniowej				
	W1	W2	W3	W4	W5
Kierowca 'A'	0.824	0.896	0.658	0.925	0.899
Kierowca 'B'	0.547	0.776	0.748	0.708	0.827
Kierowca 'C'	0.663	0.620	0.786	0.901	0.804

Przeprowadzone analizy korelacji współczynników modelu (W_1, W_2, W_3, W_4, W_5) wykazują, że korelacja między wynikami badań poszczególnych kierowców na torze i w symulatorze jest wysoka. Jakkolwiek należy stwierdzić, że korelacja dotycząca czasu reakcji oraz współczynników modelu kierowania (W_4, W_5) jest wyraźnie wyższa, niż współczynników modelu hamowania (W_1, W_2, W_3). Silniejsza korelacja współczynników modelu kierowania jest prawdopodobnie spowodowana tym, że dla przyjętego scenariusza sytuacji wypadkowej ten właśnie manewr był preferowany przez kierowców w obu eksperymentach. Hamowanie w tym przypadku uznano za działanie pomocnicze. Można przypuszczać, że dla innych scenariuszy, w których dominującym działaniem byłoby hamowanie, sytuacja może się kształtować inaczej.

8. Wnioski

W pracy przeprowadzono analizę podobieństw i różnic w zachowaniu się kierowców w symulowanych sytuacjach zagrożenia wypadkowego na torze samochodowym i w symulatorze jazdy. Aby umożliwić tego typu analizę, zagwarantowano w możliwie największym stopniu podobieństwo eksperymentów przeprowadzonych w obu środowiskach badawczych. Uzyskano to spełniając następujące warunki: badana była ta sama grupa kierowców, realizowano ten sam scenariusz i parametry badań, a ponadto do badań został użyty samochód o tych samych własnościach jezdnych. Można zatem uznać, że uzyskiwane różnice w wynikach badań są spowodowane wyłącznie wpływem środowiska badawczego.

Wysokie podobieństwa wykazuje ocena prawdopodobieństwa podejmowania manewru skrętu w obu środowiskach, zaś decyzje o hamowaniu, czy to hamulcem zasadniczym, czy też silnikiem są różne w obu środowiskach.

Największe podobieństwo, wyrażone wysokimi wartościami współczynników korelacji, wykazuje czas reakcji kierowców zarówno przy hamowaniu, jak i skręcie. Podobieństwo przejawia się również w tym, że średni czas reakcji kierowców określony dla całej badanej populacji kierowców, zarówno dla badań na torze, jak i w symulatorze wykazywał liniową zależność od wartości początkowej czasu ryzyka.

Stwierdzono jednocześnie, że czasu reakcji kierowców podczas badań w symulatorze są krótsze, niż podczas badań na torze. Jednak różnica średniej wartości czasu uzyskiwanego w obu środowiskach nie jest dla danego manewru stała, lecz maleje liniowo wraz ze zmniejszaniem się czasu ryzyka charakteryzującego daną próbę, a więc wraz ze wzrostem stopnia niebezpieczeństwa sytuacji. Dla największego czasu ryzyka różnica ta przekracza 1 sekundę przy hamowaniu i dochodzi do około 0,4 s przy skręcie. Dla najmniejszego czasu ryzyka różnica ta dąży do zera.

Największe zróżnicowanie dotyczy samego sposobu realizacji manewrów, wyrażonego jako czasowe przebiegi kąta skrętu i opóźnienia hamowania. Aby pokazać to w sposób ścisły (liczbowo) posłużono się opracowanym przez autorów modelem kierowcy dla analizy sytuacji przedwypadkowych. Porównano wartości współczynników tego modelu, zidentyfikowane na podstawie badań na torze i w symulatorze. Mimo podziału badanej populacji kierowców na cztery mniejsze grupy, o zbliżonym sposobie reagowania, nie udało się wykazać silnych korelacji lub podobieństw. Spośród pięciu identyfikowanych współczynników tylko jeden (dla pokazanych w pracy: 1 i 2 grupy kierowców) przyjmował wartości z tego samego przedziału zmienności zarówno dla badań na torze, jak i w symulatorze.

Okazało się jednak, że można zaobserwować korelację między współczynnikami modelu uzyskiwanymi w obu środowiskach badawczych, ale nie w odniesieniu do średnich zachowań grupy, lecz w przypadku analizy zachowań pojedynczych kierowców. Uzyskane współczynniki korelacji nie są wprawdzie tak wysokie, jak w przypadku czasu reakcji, ale mogą być uznane jako istotne.

Przedstawione powyżej podobieństwa i różnice zachowań kierowców na torze samochodowym i w symulatorze jazdy mogą być częściowo związane z wybranym do badań scenariuszem sytuacji przedwypadkowej. Można przypuszczać, że dla innych scenariuszy sytuacja może się kształtować inaczej. Celowe jest zatem dokonanie analogicznych porównań dla innych scenariuszy sytuacji przedwypadkowych (lub ogólnie sytuacji drogowych). Dopiero wówczas możliwe będzie udzielenie kompletnej odpowiedzi: w jakich aspektach zachowania kierowców w obu środowiskach są podobne lub identyczne, a w jakich różnią się od siebie.

Literatura

- [1] GUO K., GUAN H., *Modelling of Driver/Vehicle Directional Control System*, Vehicle System Dynamics 22(1993) 141-184.
- [2] REYMOND G., KEMENY A., DROULEZ J., [et al.], *Role of lateral acceleration in curve Driving: Driver model and experiments on a Real vehicle and a simulator*, Human Factors. The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 43/2001, pp.483-495.
- [3] SHARP R.S., CASANOVA D., SYMONDS P., *A Mathematical Model for Driver Steering Control, with Design, Tuning and Performance Result*, Vehicle System Dynamics 33(2000) 289-326.
- [4] STAŃCZYK T. L., JURECKI R., *Fahreaktionszeiten in Unfallrisikosituationen – neue Fahr- bahn- und Fahr- simulatorversuche*, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 07-08/2008, pp. 235 – 246.
- [5] STAŃCZYK T. L., JURECKI R. S., *Modele kierowcy (możliwość ich wykorzystania do analizy sytuacji przedwypadkowych) (Driver models (possible uses in analyzing pre-accident situations))*, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2004, Zeszyt nr 79, 105-138 (in Polish).
- [6] STAŃCZYK T. L., JURECKI R. S., *Identyfikacja parametrów modelu kierowcy dla sytuacji przedwypadkowych (w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych na torze) (Identification of driver model parameters for pre-accident situations (based on results of experimental track tests))*, Teka Komisji Motoryzacji o/Kraków 2005, Vol. No. 29-30, 419-428 (in Polish).
- [7] STAŃCZYK T. L., JURECKI R. S., *Precision in estimation time of driver reaction In car accident reconstruction*, Wydawnictwo IES, EVU Annual Meeting 8-10 November Kraków 2007, s. 325-334

- [8] SZCZEPANIAK C., *Podstawy modelowania systemu człowiek – pojazd – otoczenie (Basics of modelling the system man - vehicle – environment)*, PWN Warszawa 1999 (in Polish).
- [9] THAKUR K., *Simulation of Driver Behaviour as a Function of Driver error and Driver Daydream*, <http://www.is.irl.cri.nz/pubdoc/1997/ILTSS.pdf>.
- [10] WILLUMELT H. P., THOMAS JURGENSOHN T., Fahrer Modelle- ein kritischer Überblick, Teil 1 ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 997/8/1997, 424-428.
- [11] WILLUMELT H. P., THOMAS JURGENSOHN T., Fahrer Modelle- ein kritischer Überblick, Teil 2 ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 999/1997, 552-560.
- [12] JURECKI R., *Modelowanie zachowania kierowcy w sytuacjach przedwypadkowych*, Rozprawa doktorska (*Modelling of driver behaviour in pre-accident situation, PhD thesis*), Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Kielce University of Technology, Poland (in Polish) 2005.
- [13] JURECKI R., STAŃCZYK T. L., *Driver model for the analysis of pre-accident situations*, Vehicle System Dynamics, No.5, Vol. 47, 2009, pp. 589-612.
- [14] JURECKI R., STAŃCZYK T. L., *Model matematyczny sposobu reagowania kierowcy w sytuacjach przedwypadkowych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej, Nr 4(67)/2007, s. 5-23 (in Polish).
- [15] GUZEK M., JURECKI R., LOZIA Z., [i in.], *Comparative analyses of driver behaviour on the track and in virtual environment*. Driving Simulation Conference Europe, DSC 2006 Europe, Paris, October 2006.
- [16] REED M., GREEN P., *Comparison of driving performance on road and in low – cost simulator using a concurrent telephone dialing task*, Ergonomics, 42/1999, pp.1015-1037.
- [17] WICHER J., *Bezpieczeństwo samochodów i ruchu drogowego (Safety of cars and Road traffic)*, Warszawa WKiŁ 2002 (in Polish).
- [18] FRÖMING R., *Assesment of Integrated Pedestrian Protection System*. PhD thesis. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik Nr 681, 2008.
- [19] HILLENBRAND J., *Fahrerassistenz zur Kollisionsvermeidung*. PhD thesis. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik Nr 669, 2008.
- [20] JANSSON J., JOHANSSON J., GUSTAFSSON F., *Decision Making for collision avoidance systems*. SAE Paper 2002-01-0403.
- [21] CHODNICKI P., GUZEK M., LOZIA Z., [i in.], 2004, *Statyczny symulator jazdy samochodem AutoPW wersja 2003 (Static driving simulator AutoPW, version 2003)*, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej Kielce 2004, Zeszyt nr 79, 157-164. (in Polish).
- [22] LOZIA Z., *Symulatory jazdy samochodem*. WKiŁ, Warszawa, 2008.
- [23] LOZIA Z., *Model symulacyjny ruchu i dynamiki samochodu dwuosowego, wykorzystywany w symulatorze (Simulatory model of movement and dynamics of a biaxial car used in a Simulator)*, Zeszyty Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej Warszawa, Zeszyt 4 (34)/99. 37-51(in Polish).
- [24] DANNERT G.: *Grundprobleme der Reaktionszeit des Kraftfahrers*. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Nr 12/1998, s.328-334.
- [25] GREEN M., „How long does it take to stop?“ *Methodological analysis of driver perception-brake times*. Transportation Human Factors No 2(3), 2000, pp. 195-216.
- [27] TÖRNROS J.: *Effect of driving speed on reaction time during motorway driving*. Accident Analysis and Prevention, Vol. 27, No 4, 1995, pp. 435-442.
- [26] MAGISTER T., KRULEC R., BATISTA M., [et al.], *The driver reaction time measurement experiences*. Innovative Automotive Technology – IAT’05, Bled, 21st-22nd April 2005.
- [28] MCGEHEE D.V., MAZZAE E.N., BALDWIN G.H.S.: *Driver reaction time in crash avoidance research: validation of a driving simulator study on a test track*. Proceedings of the 14th Triennial Congress of the International Ergonomics Association and the 44th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society (IEA 2000), San Diego/USA, (6) 2000.