



**Marek
Guzek**

Niepewność w analizach wypadków na przykładzie zdarzeń z udziałem pieszych

Streszczenie

W opiniowaniu dotyczącym wypadków drogowych zawsze będziemy mieli do czynienia z niepewnością wyników obliczeń. Celem artykułu jest przedstawienie wybranych aspektów związanych z oceną niepewności na przykładzie sytuacji zagrożenia potrącenia pieszego. Wykorzystując wyniki badań eksperymentalnych prowadzonych w symulatorze jazdy samochodem wskazano typowe zachowania kierowców w sytuacji zagrożenia w postaci wtargnięcia pieszego przed nadjeżdżający pojazd. Wykorzystując analogiczny scenariusz zdarzenia, prosty model analityczny i założone, ale realistyczne wartości parametrów opisujących kierowcę, pojazd i drogę przedstawione są obliczenia wybranych wskaźników opisujących sytuację biorąc pod uwagę niepewność. Do obliczeń niepewności wykorzystano metodę probabilistyczną *Monte Carlo*. Wyniki przedstawiono w postaci charakterystyk probabilistycznych długości drogi zatrzymania. Pokazano możliwość określenia przedziałów odległości potrzebnej do zatrzymania pojazdu z określonym poziomem ufności. Pokazano także prawdopodobieństwa wystąpienia potrącenia pieszego. Przedstawione wyniki wskazują z jednej strony na potrzebę uwzględniania niepewności w obliczeniach dotyczących analiz wypadkowych, a z drugiej na duże możliwości i korzyści przy stosowaniu metod probabilistycznych do oceny niepewności.

Słowa kluczowe

Niepewność obliczeń, metoda *Monte Carlo*, reakcja kierowców na zagrożenie.

Otrzymano 10 stycznia 2022 r., zatwierdzono do druku 24 stycznia 2022 r.

DOI: 10.4467/15053520PnD.22.009.16958

1. Wstęp

Termin „niepewność” stosowany jest w wielu dziedzinach nauki, w których może mieć inne znaczenie. Niepewność najczęściej jest rozumiana jako parametr opisujący granice zmienności wyników pomiarów [13]. W opiniowaniu dotyczącym wypadków drogowych zawsze będziemy mieli do czynienia z niepewno-

Dr hab. inż. Marek Guzek, prof. PW, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, ORCID: 0000-0001-9871-2230.

ścią wyników obliczeń. Wynikać ona będzie zarówno z niepewności przyjmowanych danych, jak i niepewności zastosowanych narzędzi obliczeniowych. W pewnym uproszczeniu możemy uznać, że niepewność wyników obliczeń dotyczących analiz wypadkowych odpowiada pojęciu niepewności pomiaru pośredniego w technice pomiarowej. Można przyjąć, że niepewność wyników obliczeń towarzyszących analizie wypadku drogowego jest parametrem (lub zbiorem parametrów) opisującym (lub opisujących) możliwy rozrzut wartości wyznaczanej (lub wyznaczanych) w obliczeniach wielkości.

Pojęciem, które bywa kojarzone z niepewnością rekonstrukcji wypadku jest wiarygodność tej rekonstrukcji, ale nie są to pojęcia tożsame. Wiarygodność odnosi się do ufności, iż wynik rekonstrukcji (z lub bez określonej niepewności) jest poprawny. Zagadnienie wiarygodności rekonstrukcji wypadków jest opisane szeroko w pracy [21].

Metod wyznaczania niepewności jest wiele, a opisy z zastosowaniami niepewności w analizach wypadków drogowych można znaleźć w literaturze [2, 3, 5, 6, 7, 10, 11, 22].

Celem tego opracowania jest przedstawienie wybranych aspektów związanych z oceną niepewności na przykładzie specyficznego rodzaju zdarzeń drogowych, jakimi są potrącenia pieszych. Wykorzystując zaaranżowaną sytuację drogową i założone wartości parametrów danych ją opisujących, przedstawiono obliczenia dotyczące oceny możliwości uniknięcia kolizji oraz innych wybranych wskaźników opisujących sytuację biorąc pod uwagę niepewność. Do obliczeń wykorzystano metodę statystyczną *Monte Carlo*.

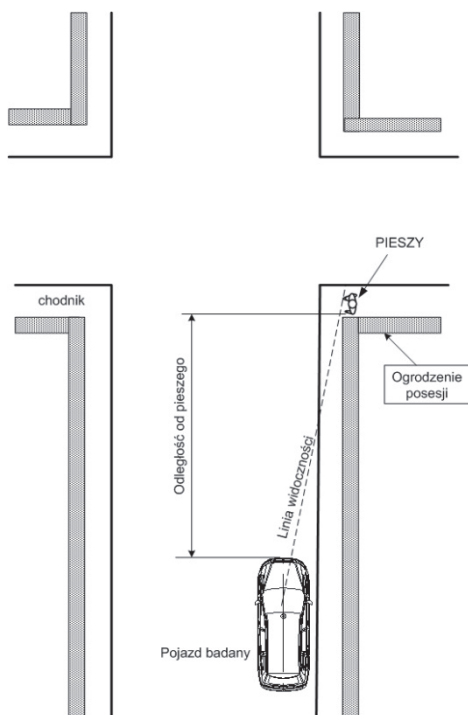
2. Badania reakcji kierowcy w sytuacji z udziałem pieszego

Wykorzystano wyniki uzyskane w ramach projektu badawczego N509 016 31/1251 „Rozwój i aktualizacja bazy danych dotyczących czasów reakcji osób kierujących pojazdami drogowymi” prowadzonego przez zespoły z Politechniki Świętokrzyskiej (lider), Politechniki Warszawskiej oraz Politechniki Krakowskiej. W ramach tego projektu wykonano ocenę sposobu reagowania kierowców oraz czasu reakcji na elementach sterowania pojazdem dla tej samej grupy badanych (ok. 100 kierowców płci męskiej, w wieku 19–64 lat) za pomocą kilku różnych metod, w tym:

- badań w symulatorze jazdy samochodem *autoPW*, w zainscenizowanej sytuacji wypadkowej,
- badań poligonowych w rzeczywistym samochodzie w zainscenizowanej sytuacji wypadkowej, analogicznej do realizowanej w symulatorze.

Opis symulatora *autoPW* można znaleźć np. w [4, 16]. Zarówno z wykorzystaniem rzeczywistego pojazdu na torze badawczym, jak i w symulatorze jazdy samochodem realizowano badania dla trzech wybranych scenariuszy sytuacji zagrożenia wypadkowego. Cechą wspólną scenariuszy była przeszkoda pojawiająca się

na drodze w sposób nagły, przy dodatkowo ograniczonej widoczności. Scenariusze różniły się rodzajem przeszkody (samochód osobowy, pieszy, zestaw ciągnik siodłowy – naczepa), charakterem ruchu przeszkody i innymi elementami na drodze, które wpływały na stopień skomplikowania sytuacji. W obu środowiskach badawczych wykonano próby dla różnych wartości czasu ryzyka (stosunek odległości od przeszkody do prędkości samochodu prowadzonego przez badanego kierowcę). Szczegółowe opisy tych badań jak i ich wyników znaleźć można w piśmiennictwie [9, 12, 14, 15, 19, 20]. W niniejszym artykule wykorzystano wyniki badań dla tzw. scenariusza 2, w którym przeszkodą, na którą reagował badany kierowca był pieszy wkraczający na drogę z prawej strony. Schemat sytuacyjny przedstawiono na ryc. 1.



Ryc. 1. Schemat ilustrujący badaną sytuację.

W symulatorze odtworzono skrzyżowanie ulic Kosiarzy i Piechoty Łanowej w Warszawie (ryc. 2). Zadaniem kierowców podczas badań była próba uniknięcia potrącenia pieszego, przy czym nie narzucano kierowcom sposobu reagowania na zaistniałe zagrożenie. W zależności od indywidualnej, subiektywnej oceny danej sytuacji, kierowca mógł wyłącznie hamować, mógł wykonywać wyłącznie manewr omijania albo reagować w sposób złożony, wykorzystując oba rodzaje działań z dowolną „intensywnością”.

Jako podstawowy parametr charakteryzujący próbę przyjęto czas ryzyka (w niektórych źródłach znany pod nazwą TTC – ang. *time to collision*). Testy prowadzono dla 22 wartości czasu ryzyka w przedziale od 0,3 do 3,6 s, uzyskanych jako kombinacje następujących prędkości badanego pojazdu i odległości, z jakich kierowca zauważył przeszkodę:

- prędkości: 36, 40, 45, 50, 51,4, 60 i 65 km/h,
- odległości: 5, 10, 20, 30, 40 i 50 m.

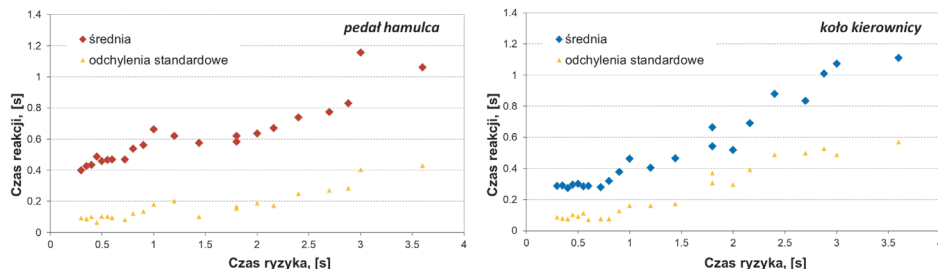
Podstawowa analiza obejmowała dwa główne zagadnienia charakteryzujące zachowania kierowców: czas reakcji kierowców i częstotliwość podejmowania decyzji o realizacji określonego manewru. W literaturze dostępne są szczegółowe wyniki analizy dla scenariusza badań realizowanego w symulatorze [9 oraz wcześniej wymienione opracowania].



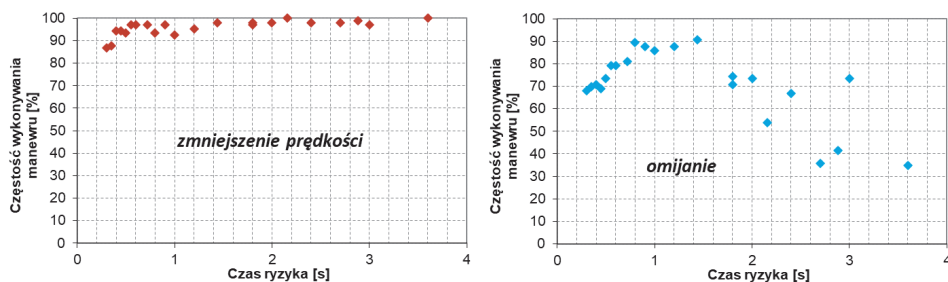
Ryc. 2. Odzworowane w symulatorze skrzyżowanie i przykłady realizacji scenariusza sytuacji.

Na ryc. 3 pokazano średnie wartości czasów reakcji kierowców oraz odchylenia standardowe kierowcy przy operowaniu pedałem hamulca i kierownicą w funkcji czasu ryzyka. Widoczny jest wyraźny wpływ czasu ryzyka na czas reakcji kierowcy – wraz z jego wzrostem zarówno wartości średnie jak i odchylenia standardowe wzrastają. Fakt ten (obserwowany niezależnie od metody badań – symulator czy rzeczywiste prowadzenie pojazdu, czy rodzaju przeszkody) jest istotnym czynnikiem, który należy brać pod uwagę analizując sytuacje wypadkowe. Zauważalne jest również jednak to, że w przypadku najbardziej niebezpiecznych sytuacji (o małym czasie ryzyka) ta zależność nie jest bardzo wyraźna (dla czasów ryzyka do ok. 1,0–1,5 s, w zależności od środowiska badań).

Na ryc. 4 pokazano częstość (mierzoną odsetkiem kierowców) sposobu reagowania w postaci podejmowania działania w formie zmniejszenia prędkości lub zmiany kierunku ruchu (omijanie).



Ryc. 3. Czasy reakcji kierowców.



Ryc. 4. Częstość reakcji dla rozważanego scenariusza z pieszym.

Na wykresie zmniejszania prędkości uwzględniono zarówno przypadki hamowania hamulcem roboczym, jak i występujące bardzo rzadko przypadki hamowania wyłącznie silnikiem. Udział osób wybierających manewr zmniejszania prędkości był bardzo wysoki i w większości prób przekraczał 95%. Rezultaty na poziomie 90% zaobserwowano jedynie dla dwóch testów wymagających najszybszych decyzji ze strony kierowcy.

W przypadku rozpatrywania manewru skrętu, dla najkrótszych wartości czasu ryzyka rzędu 0,3 s, udział osób realizujących ten manewr wynosił około 60–70%, a więc wyraźnie mniej niż dla manewru hamowania. Wraz ze wzrostem czasu ryzyka częstość wzrasta, aby dla wartości czasu ryzyka 0,80–1,44 s osiągnąć poziom maksymalny rzędu 87–91%. Powyżej tej wartości czasu ryzyka widać wyraźną tendencję spadkową i duże rozproszenie wyników. Dla najdłuższych wartości tego czasu udział osób skręcających spada do około 40%.

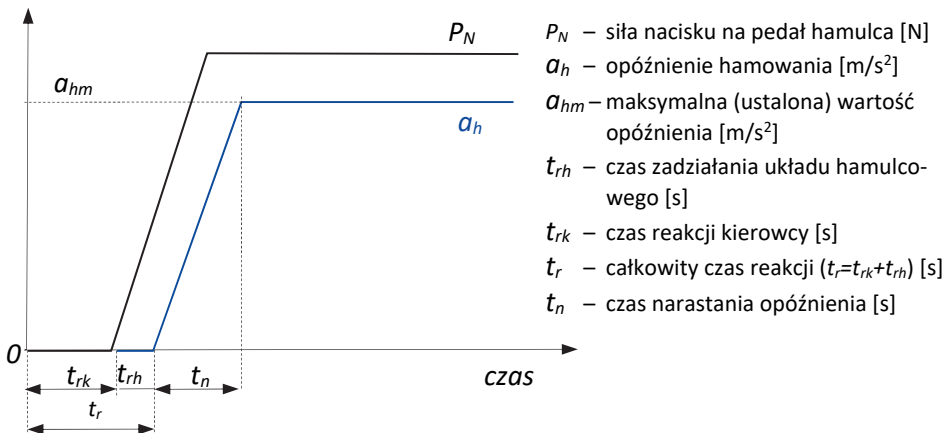
Przedstawione dane wskazują więc, że zmniejszanie prędkości jest podstawową formą reagowania kierowców w analizowanej sytuacji. Ten fakt potwierdzony jest również w badaniach na torze oraz dla innych scenariuszy.

3. Obliczenia wybranych wielkości z uwzględnieniem niepewności

3.1. Model matematyczny

Rozważając sytuację taką, jaka została przedstawiona na ryc. 1 oraz biorąc pod uwagę dominujący sposób zachowania kierowców, przyjęto do dalszej analizy, że rozpatrywanym manewrem obronnym kierowcy jest hamowanie prostoliniowe przed pieszym. Jeśli przyjmiemy, iż pieszy porusza się z taką prędkością, że o ile pojazd nie zatrzyma się przed nim, to do kolizji dojdzie, analizę całej sytuacji można ograniczyć tylko do drogi zatrzymania pojazdu.

W przedstawianym opracowaniu do dalszej analizy przyjęto prosty model hamowania prostoliniowego (ryc. 5) wynikający z czasowego przebiegu siły nacisku na pedał hamulca oraz opóźnienia hamowania (por. [18, 23]).



Ryc. 5. Uproszczony czasowy przebieg procesu hamowania.

Przyjmując ten model mamy przybliżoną analityczną zależność na długość drogi zatrzymania S_z przy znanej prędkości w chwili początkowej V_0 :

$$S_z = V_0 \cdot \left(t_{rk} + t_{rh} + \frac{t_n}{2} \right) + \frac{V_0^2}{2 \cdot a_{hm}} \quad (1)$$

3.2. Metoda określenia niepewności

Jak wspomniano we wstępie, istnieje wiele metod pozwalających na wyznaczenie niepewności wyników obliczeń pod wpływem znanych niepewności danych wejściowych. Te najbardziej przydatne to:

- metoda wartości skrajnych (deterministyczna),
- metoda różniczki zupełnej pierwszego lub wyższych rzędów (deterministyczne),
- metoda różnic skończonych (deterministyczna),
- metoda Gaussa (probabilistyczna),

- metoda wykorzystująca opis procesów stochastycznych (probabilistyczna),
- metoda *Monte Carlo* (probabilistyczna).

Ich szczegółowy opis formalny, w tym przykłady zastosowań oraz porównań uzyskiwanych nimi wyników można znaleźć w literaturze [3, 5, 6, 7, 10, 11]. Znane są także inne metody, takie jak arytmetyka przedziałowa [17], czy metoda wykorzystująca zasady znane z teorii planowania eksperymentu (DoE, ang. *Design of Experiment*) [1]. Metody te różnią się podejściem (deterministyczne lub probabilistyczne), formalizmem matematycznym, jak również aplikacyjnością do modelu matematycznego analizowanego zjawiska.

Tu wybrano metodę *Monte Carlo*, będącą obecnie jednym z najpotężniejszych narzędzi obliczeniowych stosowanych w analizach zjawisk i procesów, których ze względu na złożoność nie można opisać modelami analitycznymi i zdeterminowanymi. Znajduje zastosowanie w różnych dziedzinach nauki (matematyka, fizyka, ekonomia, nauki inżyniersko-techniczne i inne). Metoda sprawdza się szczególnie w problemach obliczeniowych, gdzie należy uwzględniać zjawiska losowe. Ogólnie polega ona na wielokrotnym powtarzaniu doświadczenia z losowo zmienianymi wartościami parametrów w zakresie określonym rodzajem doświadczenia i badanego zjawiska.

Za jednego z twórców współcześnie stosowanej metody *Monte Carlo* uchodzi polski matematyk Stanisław Ulam, który wykorzystywał wraz z innymi naukowcami tę technikę w trakcie swoich prac w ramach projektu „Manhattan” w latach 40. XX w. Z tamtego okresu wywodzi się też nazwa metody, nawiązująca do teorii prawdopodobieństwa poprzez nazwę dzielnicy w Monako, znanej powszechnie z gier hazardowych [24].

W rozważanym aspekcie, metoda ta umożliwia znalezienie poszukiwanych rozkładów prawdopodobieństwa przy wykorzystaniu zdeterminowanego modelu analizowanego zjawiska funkcji. Zakłada się, że dane modelu (np. parametry po prawej stronie równania (1)) są zmiennymi losowymi o znanych charakterystykach (teoretycznych lub empirycznych).

Poszukiwane wielkości (tu – lewa strona równania (1)) wyznacza się poprzez wielokrotne numeryczne obliczenia według zdeterminowanej zależności (tu – równania (1)) dla wygenerowanych komputerowo liczb pseudolosowych dla danych modelu według odpowiednich rozkładów tych wielkości. Metodę można również stosować w przypadku wykorzystywania modeli symulacyjnych. Możliwy zakres rozwiązań otrzymuje się na podstawie wygenerowanych w powyższy sposób pseudolosowych rozkładów statystycznych poszukiwanych zmiennych. Miarami niepewności są miary rozproszenia uzyskanych pseudorozkładów statystycznych zmiennych wynikowych (dla modelu opisanego równaniem (1) – wielkości S_2).

Na poprawność uzyskiwanych wyników istotny wpływ ma jakość generatorów liczb pseudolosowych (mierzona skończoną liczbą liczb w cyklu generatora).

3.3. Dane do obliczeń

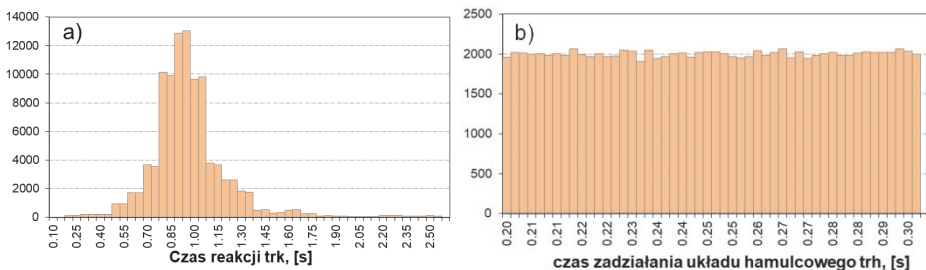
Przyjęty model matematyczny (równanie (1)) ma pięć parametrów: V_0 , t_{rk} , t_{rh} , t_n , a_{hm} , które możemy potraktować jako zmienne losowe. Do obliczeń wykorzystano dane, które przyjęto jak w jednej z wcześniejszych prac [8]. W przypadku czasu reakcji kierowcy zastosowano dane eksperymentalne, opracowane na podstawie badań opisanych w punkcie 2. Przyjęto rozkład uzyskany dla badań z wykorzystaniem rzeczywistego ruchu samochodu (na torze badawczym). W przypadku pozostałych wielkości przyjęto wartości nominalne oraz niepewności odpowiadające realistycznym dla hamowania rzeczywistych pojazdów na suchej asfaltowej nawierzchni drogi. Dla prędkości początkowej rozpatrzono 3 warianty wartości nominalnej w zakresie odpowiadającym racjonalnej prędkości dla terenu zabudowanego (40, 50, 60 km/h). Syntetycznie przyjęte dane przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1. Przyjęte wartości parametrów hamowania.

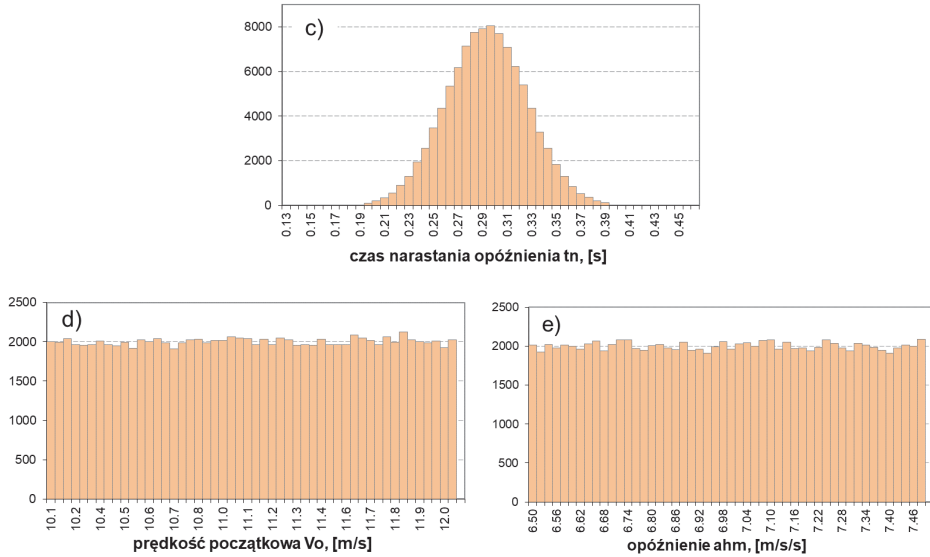
Parametr		Nominalna/ średnia wartość	Niepewność	Rozkład prawdopodobieństwa
Czas reakcji kierowcy	t_{rk}	0,994 s	($\pm 0,774$ s)	empiryczny
Czas zadziałania układu hamulcowego	t_{rh}	0,25 s	$\pm 0,05$ s	jednostajny
Czas narastania opóźnienia	t_n	0,3 s	$\pm 0,1$ s	normalny
Prędkość początkowa	V_0	40, 50, 60 km/h	$\pm 3,6$ km/h	jednostajny
Opóźnienie hamowania	a_{hm}	7,0 m/s ²	$\pm 0,5$ m/s ²	jednostajny

3.4. Wyniki obliczeń drogi zatrzymania

Na ryc. 6 i 7 przedstawiono wygenerowane rozkłady liczb pseudolosowych ilustrujących histogramy licznosci wartości parametrów t_{rk} , t_{rh} , t_n , V_0 , a_{hm} dla przypadku prędkości początkowej 50 km/h. Dla pozostałych prędkości postacie są podobne, oczywiście poza rozkładem dla prędkości, ponieważ zmienia się jej przedział.

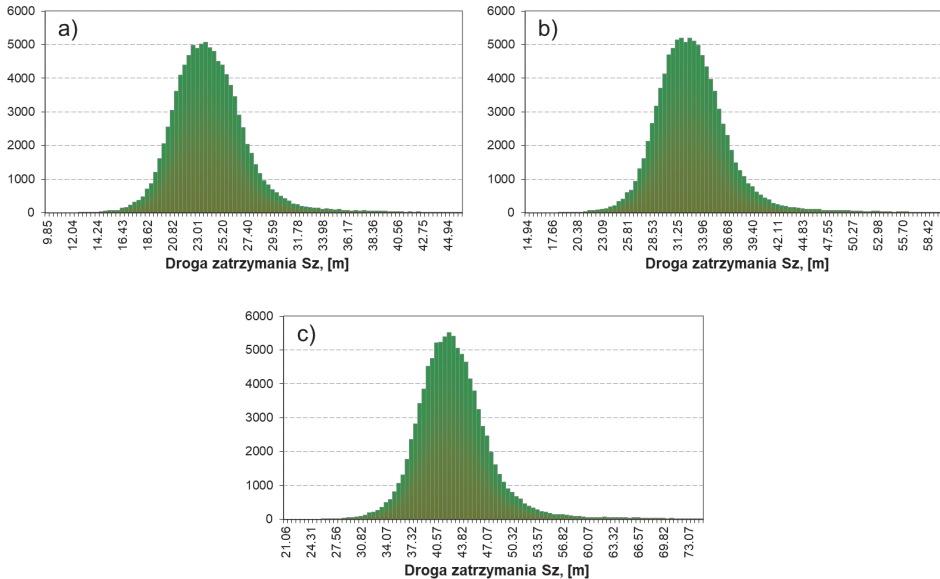


Ryc. 6. Histogramy: a – czasu reakcji kierowcy, b – czasu zadziałania układu hamulcowego t_{rh} .



Ryc. 7. Histogramy: c – czasu narastania opóźnienia hamowania t_n , d – prędkości początkowej V_0 , e – opóźnienia hamowania a_{hm} .

Na ryc. 8 pokazano wynikowe histogramy drogi zatrzymania S_z dla trzech prędkości początkowych nominalnych 40, 50 i 60 km/h. W tabeli 2 przedstawiono natomiast wartości liczbowe opisujące uzyskane pseudorozkłady.



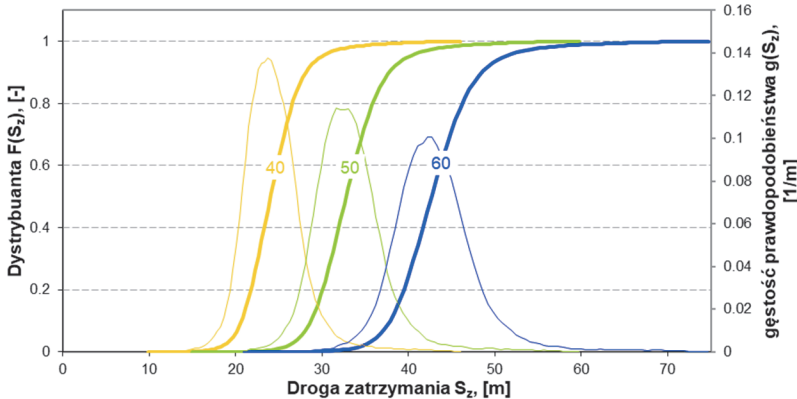
Ryc. 8. Histogramy drogi zatrzymania.

Tabela 2. Uzyskane wartości parametrów rozkładów.

Parametr		Średnia	Odchylenie standardowe	Wartości min/max
Czas reakcji kierowcy t_{rk}	[s]	0,994	0,256	0,20/2,60
Czas zadziałania ukł. hamul. t_{rh}	[s]	0,2501	0,00289	0,2/0,3
Czas narastania opóźnienia t_n	[s]	0,2999	0,0328	0,2/0,4
Opóźnienie hamowania a_{hm}	[m/s ²]	7,0	0,289	6,5/7,5
<i>Prędkość początkowa 40 km/h</i>				
Prędkość początkowa V_0	[m/s]	11,114	0,577	10,1/12,1
Droga zatrzymania S_z	[m]	24,4	3,4	12,9/46,7
<i>Prędkość początkowa 50 km/h</i>				
Prędkość początkowa V_0	[m/s]	13,888	0,578	12,9/14,9
Droga zatrzymania S_z	[m]	33,2	4,4	18,9/61,4
<i>Prędkość początkowa 60 km/h</i>				
Prędkość początkowa V_0	[m/s]	16,666	0,577	15,7/17,7
Droga zatrzymania S_z	[m]	43,1	4,9	26,2 /75,8

3.5. Analiza wyników

Wartości przedstawione w tabeli 2 z jednej strony ilustrują wartości nominalne rozwiązań (średnie drogi zatrzymania), a z drugiej poszukiwane miary niepewności (odchylenia standardowe oraz uzyskane wartości minimalne i maksymalne). Do dalszej analizy histogramy przedstawione na ryc. 8 wygodniej jest przedstawić w formie funkcji gęstości prawdopodobieństwa lub dystrybuant drogi zatrzymania jak na ryc. 9. Dystrybuanty są o tyle wygodniejsze, że pozwalają praktycznie bezpośrednio odczytać prawdopodobieństwa z góry określonych przedziałów drogi zatrzymania lub przedziału drogi zatrzymania ze z góry określonym prawdopodobieństwem.



Ryc. 9. Funkcje gęstości prawdopodobieństwa i dystrybuanty drogi zatrzymania dla trzech prędkości początkowych 40, 50 i 60 km/h.

W tabeli 3 zamieszczono przykładowe wartości drogi zatrzymania i odpowiadające im wartości dystrybuant.

Tabela 3. Wybrane wartości dystrybuant.

Droga zatrzymania S_z	$V_0=40$ km/h	$V_0=50$ km/h	$V_0=60$ km/h
30 m	94,2%	19,8%	0,2%
35 m	98,7%	73%	2,5%

Wartości w tabeli 3 wskazują prawdopodobieństwo, że droga zatrzymania była nie większa niż podana jej wartość. Stąd łatwo wskazać, że prawdopodobieństwo tego, iż droga zatrzymania była w przedziale między 30, a 35 m wynosi:

$$P(30\text{m} \leq S_z \leq 35\text{m}) = 98,7\% - 94,2\% = 3,5\% \text{ przy prędkości } V_0=40 \text{ km/h}$$

$$P(30\text{m} \leq S_z \leq 35\text{m}) = 73,0\% - 19,8\% = 53,2\% \text{ przy prędkości } V_0=50 \text{ km/h}$$

$$P(30\text{m} \leq S_z \leq 35\text{m}) = 2,5\% - 0,2\% = 2,3\% \text{ przy prędkości } V_0=60 \text{ km/h}$$

W tabeli 4 zamieszczono wybrane kwantyle drogi zatrzymania (odczytane z dystrybuant).

Tabela 4. Wybrane kwantyle drogi zatrzymania.

Rząd kwantyla	$V_0=40$ km/h	$V_0=50$ km/h	$V_0=60$ km/h
1 (100%)	46,7 m	61,4 m	75,8 m
0,95 (95%)	29,9 m	40,0 m	51,1 m
0,9 (90%)	28,1 m	37,8 m	48,5 m
0,8 (80%)	26,6 m	35,8 m	46,3 m
0,1 (10%)	20,6 m	28,7 m	37,8 m
0,05 (5%)	19,7 m	27,5 m	36,4 m

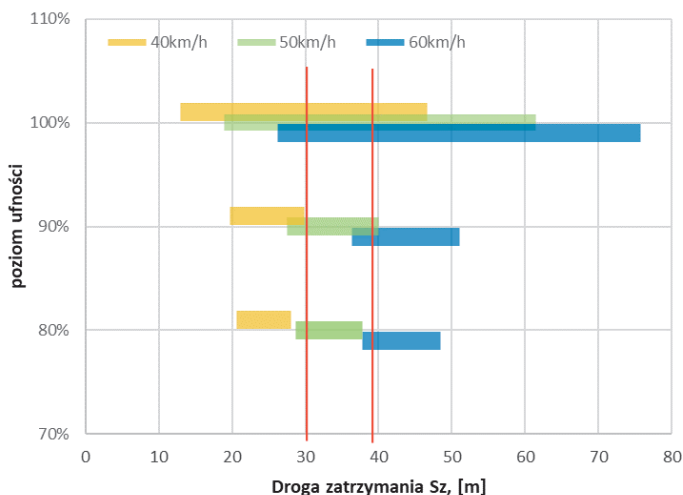
Korzystając z danych w tabeli 4 możemy stwierdzić przykładowo, że samochód jadący z prędkością początkową 40 km/h zatrzyma się na odcinku drogi:

- do 46,7 m z pewnością (100%),
- do 28,1 m z prawdopodobieństwem 90%,
- do 20,6 m z prawdopodobieństwem 10%,
- itd.

Jednocześnie można też stwierdzić, że samochód jadący z prędkością 40 km/h zatrzyma się na odcinku drogi znajdującym się w przedziale:

- od 12,9 do 46,7 m z pewnością (100%), patrz tab. 2,
- od 19,7 do 29,9 m z prawdopodobieństwem 90%,
- od 20,6 do 28,1 m z prawdopodobieństwem 80%,
- itp.

Na ryc. 10 przedstawiono graficznie przedziały drogi zatrzymania dla wszystkich trzech prędkości początkowych dla wskazanych wyżej trzech poziomów ufności (100, 90 i 80%).



Ryc. 10. Przedziały drogi zatrzymania dla trzech prędkości początkowych 40, 50 i 60 km/h przy różnych poziomach ufności.

Widać, że jeśli uwzględnimy niepewność danych wejściowych, to przy 100% „pewności” zakresy drogi zatrzymania dla różnych prędkości pokrywają się. Jest duży obszar, który jest wspólny dla dwóch lub trzech różnych prędkości V_0 . Jednak obniżając nieco poziom ufności, ale pozostawiając go na odpowiednio wysokim poziomie, wyniki stają się coraz bardziej jednoznaczne. W przypadku poziomu ufności równego 80% uzyskano całkowitą rozłączność przedziałów drogi zatrzymania dla trzech analizowanych prędkości początkowych.

Należy też zwrócić uwagę, że zakresy drogi zatrzymania na danym poziomie ufności mogą być różne. W tabeli 4 i na ryc. 10 pokazano tylko wybrane warianty dla ilustracji możliwości interpretowania uzyskanych charakterystyk.

Na zakończenie można zaprezentować jeszcze jedną interpretację uzyskanych wyników. Dystrybuanty takie jak pokazane na ryc. 9 pokazują bezpośrednio prawdopodobieństwo uniknięcia potrącenia pieszego, rozumianego jako wyhamowania pojazdu przed przeszkodą przy danej prędkości początkowej i danej odległości od przeszkody w chwili powstania zagrożenia (zauważenia). Korzystając z danych przedstawionych w tabeli 3 można przykładowo podać, że jeśli pieszy byłby dostrzeżony w odległości od przedniej części pojazdu równej 30 m, to prawdopodobieństwo uniknięcia jego potrącenia wynosiłoby:

- 94,2% przy prędkości początkowej pojazdu 40 km/h,
- 19,8% przy prędkości początkowej pojazdu 50 km/h,
- 0,2% przy prędkości początkowej pojazdu 60 km/h.

4. Podsumowanie

W artykule poruszono problem niepewności wyników obliczeń wykonywanych podczas analiz sytuacji wypadkowych w ruchu drogowym. zilustrowano go przykładem obliczeniowym dotyczącym sytuacji z udziałem pieszego wchodzącego przed nadjeżdżający pojazd. Wskazano zestaw narzędzi pozwalających uwzględniać niepewność danych i wyznaczać niepewność poszukiwanych wielkości. Zaprezentowane przykłady badań kierowców w sytuacjach z udziałem pieszych potwierdzają zależność czasu reakcji kierowcy od czasu ryzyka sytuacji oraz to, że podstawową reakcją kierowców w sytuacji zagrożenia (tu: wtargnięcie pieszego) jest manewr hamowania.

Przykład obliczeniowy, w którym do wyznaczania niepewności w ocenie drogi zatrzymania samochodu zastosowano metodę *Monte Carlo* pokazuje, że zastosowanie metod probabilistycznych niepewności posiada wiele zalet. Pozwala podać wyniki z określonym prawdopodobieństwem oraz zmniejszać niepewność w stosunku do metod deterministycznych. W prezentowanym przykładzie obliczeniowym dla prędkości początkowej 40 km/h, przy zastosowaniu poziomu ufności 90% niepewność oceny drogi zatrzymania pojazdu zmniejszyła się ponad trzykrotnie w stosunku do metody deterministycznej, tj. niepewności przy poziomie ufności 100%. Takie charakterystyki prawdopodobieństwa jak pokazano w artykule pozwalają określać szereg wielkości pomocnych w analizie zdarzenia, np. prawdopodobieństwa wystąpienia/uniknięcia kolizji z pieszym, drogi potrzebnej do zatrzymania na określonym poziomie ufności itp. W przykładzie obliczeniowym pokazano, że przy odległości dostrzeżenia przeszkody równej 30 m i prędkości pojazdu ok. 40 km/h, szanse na uniknięcie kolizji są powyżej 90%, a zwiększenie prędkości do 50 km/h zmniejsza te szanse blisko pięciokrotnie – do ok. 19%.

Przedstawione wyniki dotyczą pewnych konkretnych założeń co do wartości parametrów i sytuacji oraz przyjętego modelu matematycznego. Nie ma jednak ograniczeń, by uzyskać analogiczne dla innych wartości parametrów i sytuacji oraz narzędzi obliczeniowych.

Bibliografia

- [1] Brach, R. M. (2007). Design of Experiments and Parametric Sensitivity of Planar Impact Mechanics. *Proceedings of the 16th Annual Congress of the European Association for Accident Research and Analysis (EVU)* (s. 9–21). Kraków: Wydawnictwo Instytutu Ekspertyz Sądowych.
- [2] Brach, R. M., Dunn, P. F. (2004). *Uncertainty analysis for forensic science*. Lawyers and Judges Publishing Company Inc.
- [3] Brach, R. M., Guzek, M., Lozia, Z. (2007). Uncertainty of road accident reconstruction computations, *Proceedings of the 16th Annual Congress of the European Association for Accident Research and Analysis (EVU)* (s. 35–50). Kraków: Wydawnictwo Instytutu Ekspertyz Sądowych.
- [4] Chodnicki, P., Guzek, M., Lozia, Z., Mackiewicz, W., Stegienka, I. (2008). autoPW driving simulator as a tool for driver-vehicle-surroundings system research. W: Weiss Z. (red.), *Virtual Design and Automation* (s. 331–338). Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- [5] Guzek, M. (2016). *Niepewność w analizie wypadków drogowych*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [6] Guzek, M. (2016). Uncertainty in calculations at the reconstruction of road accidents (s. 117–139). *Proceedings of the Institute of Vehicles*, 5 (109).
- [7] Guzek, M. (2017). Porównanie metod oceny niepewności stosowanych w obliczeniach w rekonstrukcji wypadków. *Paragraf na Drodze*, numer specjalny, 117–129.
- [8] Guzek, M. (2021). Czas reakcji kierowcy w kontekście prawdopodobieństwa zaistnienia zdarzenia. *Paragraf na Drodze*, numer specjalny, 85–95.
- [9] Guzek, M., Jurecki, R., Lozia, Z., Karendal, M., Zdanowicz, P. (2010). Badania reakcji kierowców na pieszego wychodzącego z prawej strony, realizowane w symulatorze jazdy samochodem. *Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 6.
- [10] Guzek, M., Lozia, Z. (2021). Computing Methods in the Analysis of Road Accident Reconstruction Uncertainty. *Arch Computat Methods Eng* 28, s. 2459–2476. DOI: 10.1007/s11831-020-09462-w.
- [11] Guzek, M., Lozia, Z., Wicher J. (2006). Niepewność wyników obliczeń związanych z rekonstrukcją wypadków drogowych. *Materiały II Konferencji „Rozwój techniki samochodowej a ubezpieczenia komunikacyjne”* (s. 159–188). Radom: Wyższa Szkoła Biznesu im. Biskupa Jana Chrapka.
- [12] Guzek, M., Lozia, Z., Zdanowicz, P., Jurecki, R., Stańczyk, T., Pieniążek, W. (2012). Assessment of driver’s reaction times in diversified research environments. *Archiwum Transportu – The Archives of Transport*, XXII (2), 149–164.
- [13] JCGM_100: Guide to Expression of Uncertainty in Measurement. ISO, Geneva 1993.
- [14] Jurecki, R. S. (2016). *Badania i modelowanie reakcji kierowców w sytuacjach zagrożenia wypadkowego*. Monografia M84. Kielce: Politechnika Świętokrzyska.

- [15] Jurecki, R. S., Jaśkiewicz, M., Guzek, M., Lozia, Z., Zdanowicz, P. (2012). Driver's reaction time under emergency braking a car – research in a driving simulator. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 14 (4), 295–301.
- [16] Lozia, Z. (2008). *Symulatory jazdy samochodem*. Warszawa: WKŁ.
- [17] Moore, R. E., Kearfott, R. B., Cloud, M. J. (2009). *Introduction to Interval Analysis*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [18] Prochowski, L. (2016). *Pojazdy samochodowe. Mechanika ruchu*. Warszawa: WKŁ.
- [19] Stańczyk, T. L. (2013). *Działania kierowcy w sytuacjach krytycznych*. Monografia M43. Kielce: Politechnika Świętokrzyska.
- [20] Stańczyk, T., Lozia, Z., Pieniążek, W., Jurecki, R. (2010). Badania reakcji kierowców w symulowanych sytuacjach wypadkowych. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*, 1 (77), 27–52.
- [21] Wach, W. (2014). *Wiarygodność strukturalna rekonstrukcji wypadków drogowych*. Kraków: Wydawnictwo Instytutu Ekspertyz Sądowych.
- [22] Wach, W., Unarski, J. (2007). Uncertainty of calculation results in vehicle collision analysis. *Forensic Science International*, 167 (2), 181–188.
- [23] Wierciński, J., Reza, A. (red.) (2011). *Wypadki drogowe. Vademecum biegłego sądowego*. Kraków: Wydawnictwo Instytutu Ekspertyz Sądowych.
- [24] Zięba, A. (2014). *Analiza danych w naukach ścisłych i technice*. Warszawa: PWN.

* * *

Calculations uncertainty in accident analysis illustrated by events involving a pedestrian

Abstract

When preparing expert opinions on road accidents, we will always deal with the uncertainty of calculations results. The aim of the article is to present selected aspects related to the assessment of uncertainty, illustrated by the situation of the risk of hitting a pedestrian. Based on the results of experiments conducted in a car driving simulator, typical behaviors of drivers in the event of accident risk as in the case of a pedestrian's intrusion in front of an oncoming vehicle are shown. Using an analogous event scenario, a simple analytical model, and assumed but realistic values of the parameters describing the driver, vehicle, and road, the calculations of selected indicators relating to the situation are presented, taking into account the uncertainty. The *Monte Carlo* probabilistic method was used to calculate the uncertainty. The results are presented as probabilistic characteristics of the stopping distance. The possibility of determining the distance intervals needed to stop the vehicle with a certain confidence level has been shown. The probabilities of hitting a pedestrian are also given. The presented results indicate, on the one hand, the need to take into account the uncertainty in the calculations of the analyses of accidents, and on the other hand, the great opportunities and benefits of using probabilistic methods to assess uncertainty.

Key words

Calculation uncertainty, Monte Carlo method, drivers' reaction in emergency.