

TOMASZ SZCZURASZEK<sup>1)</sup>EMILIA KUSOWSKA<sup>2)</sup>

## WEATHER CONDITIONS AND THE RISK OF ROAD INCIDENT OCCURRENCE

## WARUNKI ATMOSFERYCZNE A RYZYKO POWSTANIA ZDARZENIA DROGOWEGO

**STRESZCZENIE.** W środowisku atmosferycznym człowiek podlega oddziaływaniu wielu czynników o charakterze bodźcowym, co w przypadku kierowców przekłada się potencjalnie na ich zachowania w ruchu drogowym oraz na poziom ryzyka narażenia na określone zdarzenia drogowe. W artykule podjęto próbę udzielenia odpowiedzi na pytanie, czy warunki pogodowe mają wpływ na wzrost poziomu ryzyka zdarzenia drogowego oraz jakie ewentualne wartości parametrów atmosferycznych decydują o tym w stopniu istotnym. Analizy przeprowadzono na przykładzie sieci drogowej Elbląga. Ich podstawą były zebrane z dwóch lat szczegółowe informacje dotyczące liczby wypadków drogowych oraz udostępnione dane warunków atmosferycznych, w jakich one zaistniały. W pracy wykazano, że warunki atmosferyczne wpływają bez wątpienia na rozważane ryzyko oraz że spośród parametrów atmosferycznych znaczny wpływ na jego wzrost mają między innymi wilgotność i temperatura powietrza.

**SŁOWA KLUCZOWE:** bezpieczeństwo ruchu drogowego, biometeorologia, inżynieria ruchu drogowego, transport drogowy, zdarzenie drogowe.

**ABSTRACT.** In an atmospheric environment, a man is subjected to the influence of many factors of a stimulus nature, which probably affect into the behaviour of drivers in road traffic and the risk of them being exposed to certain road incidents. The aim of the paper was to answer the question whether weather conditions and what values of atmospheric parameters have an impact on the increase of the risk level regarding the occurrence of a road incident. The analyses were carried out using the road network in Elbląg as an example. There were based on detailed information regarding road incidents occurrence covering two years, and also atmospheric conditions that were made available. The work undoubtedly demonstrates that atmospheric conditions have an impact on considered risk. Moreover, the increase of this risk is highly influenced by atmospheric parameters such as humidity and air temperature.

**KEYWORDS:** biometeorology, road incident, road traffic engineering, road traffic security, road transportation.

DOI: 10.7409/rabdim.018.012

<sup>1)</sup> Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej i Transportu, al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz; tomasz.szczuraszek@utp.edu.pl

<sup>2)</sup> Urząd Miejski w Elblągu, Departament Zarządu Dróg, ul. Czerwonego Krzyża 2, 82-300 Elbląg; emilia.kusowska@umelblag.pl (✉)

## 1. WPROWADZENIE

Według psychologów, w poszukiwaniu przyczyn zdarzeń drogowych za mało uwagi przywiązuje się do czynnika ludzkiego. Działania człowieka w ruchu drogowym polegają bowiem na odbiorze informacji z otoczenia, ich ocenie, następnie podejmowaniu decyzji i wykonaniu manewrów stosownie do zaistniałej sytuacji na drodze [1]. Działania te mają więc kluczowe znaczenie dla poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego.

Na odpowiednią ocenę sytuacji występującej na drodze wpływa oczywiście wiele czynników, które w sposób bezpośredni, czy też pośredni, działają na zachowanie kierowcy. Każdy kierowca jako indywidualna jednostka inaczej reaguje na zewnętrzne bodźce, takie jak warunki ruchu, parametry drogi, otoczenie, czy też pogodę. Jest to zależne od wieku, płci, charakteru, sytuacji w jakiej się znajduje, jakie emocje mu towarzyszą, a przede wszystkim od jego zdolności psychofizycznych w danej sytuacji ruchowej [2]. Zapewne jednym ze słabiej rozpoznanych czynników wpływających na zachowania kierowcy w ruchu drogowym, a tym samym na poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego, są warunki pogodowe. Często przy określaniu przyczyn zaistnienia zdarzenia drogowego warunki te są pomijane, poza opadami atmosferycznymi. Stąd w literaturze najczęściej można znaleźć prace opisujące wpływ na poziom zagrożenia w ruchu drogowym tylko opadów atmosferycznych, przy pominięciu wielu innych parametrów atmosferycznych [3-6].

Środowisko atmosferyczne charakteryzuje się dużą zmiennością, która jest odczuwalna przez cały świat przyrody, w tym człowieka (na jego stan zdrowia, samopoczucie, nastrój oraz na prawidłowość reakcji na czynniki zewnętrzne) [7, 8]. Pogoda może wywołać pewne dolegliwości, bądź je nasilać. W wyniku negatywnego oddziaływania pogody na kierowcę może pogorszyć się sprawność jego organizmu, oprócz tego może zmniejszyć się jego koncentracja czy czas reakcji [9]. Do zjawisk meteorologicznych bezpośrednio oddziałujących na warunki ruchu drogowego zaliczyć można m.in.: opady atmosferyczne, mgłę, gołoledź, szadź, wiatr, nagłe zmiany warunków atmosferycznych [9]. Czynniki atmosferyczne, tj. rodzaj i intensywność opadów, stopień zamglenia i zachmurzenia nieba, położenie słońca, pogarszają m.in. widzialność drogi, stan nawierzchni oraz zmniejszają przyczepność opon do nawierzchni.

Za cel niniejszej pracy przyjęto próbę zdefiniowania odpowiedzi m.in. na następujące pytania:

- W jakich warunkach pogodowych najczęściej dochodzi do zdarzeń drogowych, a także kiedy występuje największe ryzyko zdarzenia drogowego?

## 1. INTRODUCTION

According to psychologists, when searching for causes of road incidents, little attention is paid to the human factor. Human activities in road traffic rely on the reception of information from the environment, their assessment, and then making decisions and performing maneuvers according to the current traffic situation [1]. Therefore these activities pay the key role for the level of road safety.

Of course the appropriate assessment of the situation on the road is affected by many factors that directly or indirectly influence the driver's behavior. Each driver, as an individual unit, reacts differently to external stimuli such as: traffic conditions, road parameters, surroundings or weather. This depends on the driver's age, sex and character, the occurred situation, emotions that accompany it, and above all on the driver's psychophysical abilities in a given traffic situation [2]. Weather conditions are probably one of the least recognized factors that influence a driver's behaviour in road traffic, and thus the level of road safety. These conditions are often ignored when determining the causes of a road incident, except in cases of atmospheric precipitation. Therefore, papers describing the impact of only atmospheric precipitation on the level of risk in road traffic, while omitting many other atmospheric parameters, can be most often found in literature [3-6].

The atmospheric environment is characterized by high variability, which is felt by the whole world of nature, including human (for his/her health, well-being, mood and the correctness of his/her reaction to external factors) [7, 8]. The weather can cause ailments, or increase them. As a result of the negative impact of weather on drivers, the efficiency of their bodies may deteriorate, and what is more, the concentration or reaction time may decrease [9]. Meteorological phenomena that directly affect road traffic conditions include, among others: atmospheric precipitation, fog, glazed frost, rime, wind, and sudden changes in atmospheric conditions [9]. Atmospheric factors, i.e. the type and intensity of precipitation, the degree of haze and cloud, or the location of the sun, deteriorate, among others, the visibility of a road or the condition of a road surface, can even cause the reduction of the adhesion between vehicle's tires and a road surface.

An attempt to define answers, among others, for the following questions, is the goal of this work:

- under what weather conditions do road incidents occur most often, and when is there the highest risk of a road incident?

- które parametry atmosferyczne mają największy wpływ na ryzyko powstania zdarzenia drogowego oraz przy jakich wartościach tych parametrów to ryzyko jest większe?
- czy opady atmosferyczne zwiększają ryzyko wystąpienia zdarzeń drogowych i ewentualnie w jakim stopniu?

## 2. OPIS PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

Analizę wpływu warunków atmosferycznych na bezpieczeństwo ruchu drogowego przeprowadzono na przykładzie miasta Elbląga. Podstawą analiz były dane o zdarzeniach drogowych na obszarze całej sieci drogowej miasta w ciągu dwóch lat, które pozyskano z bazy danych Informatycznego Systemu Wspomagania Zarządzania Drogami i Ruchem Drogowym w Elblągu „WZDR” oraz dane historyczne odnoszące się do tego samego okresu o stanie pogody w poszczególnych obszarach miasta, udostępnione przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Gdyni (IMGW). Do oceny środowiska atmosferycznego wykorzystano następujące parametry:

- temperaturę powietrza,
- wilgotność względną powietrza,
- ciśnienie atmosferyczne,
- zachmurzenie nieba,
- rodzaj opadów atmosferycznych.

Ze względu na ułatwienie analiz, wyżej wymienione parametry podzielono w klasy wartości (Tabl. 1). Określając poszczególne klasy, opierano się na charakterystykach typowych warunków atmosferycznych [8-11].

Table 1. Division of atmospheric parameters into classes adopted because of analyses

Tablica 1. Przyjęty do potrzeb analiz podział parametrów atmosferycznych na klasy

Description of atmospheric parameter classes Opis klas parametrów atmosferycznych		Accepted values of parameters in a given class Przyjęte wartości parametrów w danej klasie
Atmospheric pressure Ciśnienie atmosferyczne	low pressure / niskie (niżowe)	$\leq 1013$ hPa
	high pressure / wysokie (wyżowe)	$> 1013$ hPa
Degree of cloudiness Stopień zachmurzenia nieba	low / mały	0-2 octants / 0-2 oktantów
	partly / średni	3-5 octants / 3-5 oktantów
	high / duży	6-9 octants / 6-9 oktantów
Air temperature Temperatura powietrza	low / niska	$\leq 0^{\circ}\text{C}$
	transitional / przejściowa	$0.1^{\circ}\text{C} - 13.0^{\circ}\text{C}$
	optimal / optymalna	$13.1^{\circ}\text{C} - 26.0^{\circ}\text{C}$
	heat / upał	$> 26^{\circ}\text{C}$
Air humidity Wilgotność powietrza	low / mała	$\leq 70\%$
	high / duża	$> 70\%$
Precipitation Opady atmosferyczne	no precipitation / brak opadów	
	snow / śnieg	
	rain / deszcz	

- which atmospheric parameters have the greatest impact on the risk of a road incident and at what values of these parameters make the risk is greater?
- does atmospheric precipitation increase the risk of road incidents and possibly to what extent?

## 2. DESCRIPTION OF CARRIED OUT TESTS

The analysis of the impact of atmospheric conditions on road safety was carried out using Elbląg as an example. The basis of the analysis was data on traffic incidents recorded on the entire road network of the city over two years, which was obtained from the database of the “IT System for Supporting Roads and Road Traffic Management” in Elbląg (WZDR) and historical data referring to the same period of time regarding weather conditions in individual areas of the city, which were made available by the Institute of Meteorology and Water Management in Gdynia (IMGW). The following parameters were used to assess the atmospheric environment:

- air temperature,
- relative air humidity,
- atmospheric pressure,
- cloud cover,
- type of atmospheric precipitation.

The above mentioned parameters were divided into classes of values, what makes analysis easier (Table 1).. Individual classes were based on the characteristics of typical atmospheric conditions [8-11].

Analizy wpływu warunków atmosferycznych na bezpieczeństwo ruchu drogowego przeprowadzono w dwóch formach:

- poprzez badanie wpływu wytypowanych warunków pogodowych na ryzyko powstania zdarzenia drogowego – na podstawie literatury oraz najczęściej występujących warunków atmosferycznych zdefiniowano na potrzeby tych analiz 87 typowych warunków pogodowych,
- poprzez badanie wpływu poszczególnych parametrów meteorologicznych na ryzyko powstania zdarzenia drogowego.

Oceny ryzyka powstania zdarzenia drogowego przy danych warunkach atmosferycznych dokonano za pomocą następujących wskaźników:

$$R_i = \frac{L_z}{L_p}, \text{ [incidents/h], [zdarzeń/h]}, \quad (1)$$

$$W_R = \frac{R_i}{R}, \text{ [%]} \quad (2)$$

gdzie:

$R_i$  – ryzyko powstawania zdarzenia drogowego w ciągu godziny przy danej pogodzie w analizowanym czasie [zdarzeń/h],

$L_z$  – liczba zdarzeń drogowych przy danej pogodzie w analizowanym czasie,

$L_p$  – liczba godzin danej pogody w analizowanym czasie,

$W_R$  – względna wartość ryzyka wystąpienia zdarzenia drogowego w stosunku do średniego ryzyka wystąpienia zdarzenia drogowego na sieci drogowej miasta [%],

$R$  – średnia wartość ryzyka wystąpienia zdarzenia drogowego na sieci drogowej miasta [zdarzeń/h].

### 3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ DOTYCZĄCYCH RYZYKA WYSTĄPIENIA ZDARZENIA DROGOWEGO W DANYCH WARUNKACH POGODOWYCH

Wartości ryzyka oraz względną wartość ryzyka wystąpienia zdarzenia drogowego w danych warunkach pogodowych przedstawiono w Tabl. 2. W tabelicy pominięto warunki pogodowe, które wystąpiły w ciągu analizowanych dwóch lat w czasie < 30 godzin, aby uniknąć zbyt dużej losowości wyników analiz. Takich było elementów aż 20. Pozostałe dane zostały posegregowane według wartości ryzyka, od wartości najmniejszej do największej, a następnie przyporządkowano

The analysis of the impact of atmospheric conditions on traffic safety was carried out in two forms:

- by examining the impact of the selected weather conditions on the risk of a traffic incident – 87 typical weather conditions were defined for the needs of these analyzes based on literature and the most common weather conditions,
- by examining the impact of individual meteorological parameters on the risk of a traffic incident.

The assessment of the risk of a traffic incident for given weather conditions was made using the following indices:

where:

$R_i$  – the risk of a road incident occurrence within one hour in given weather conditions in the analyzed time [incidents/h],

$L_z$  – the number of road incidents in given weather conditions in the analyzed time,

$L_p$  – the number of hours of given weather conditions in the analyzed time,

$W_R$  – the relative value of the risk of a road incident in relation to the average risk of a road incident on the city road network [%],

$R$  – the average value of the risk of a road incident on the city road network [incidents/h].

### 3. ANALYSIS OF TEST RESULT ON THE RISK OF ROAD INCIDENTS IN THE GIVEN WEATHER CONDITIONS

The absolute and relative risk values of a traffic incident in the given weather conditions are presented in Table 2. In order to avoid a too high randomness of the analysis results, the weather conditions that occurred during less than 30 hours in the analyzed two years were omitted. There were 20 such records in data. The remaining data was sorted from the smallest to the highest risk value. Then a specific id number from 1 to 67 were assigned to each group of the weather conditions. On the basis of the



im określony numer warunków pogodowych od 1 do 67. Na podstawie uzyskanych danych określono średnią wartość ryzyka wystąpienia zdarzenia drogowego, która wyniosła 0,239 zdarzeń/h.

Porównując dane zestawione w Tabl. 2 zauważono, że najmniejsze ryzyko wystąpienia zdarzenia drogowego wyniosło  $0,049 \pm 0,042$  zdarzeń/h i wystąpiło przy pogodzie o niskim ciśnieniu atmosferycznym, małym zachmurzeniu nieba, optymalnej temperaturze powietrza, małej wilgotności oraz podczas opadów deszczu. Względna wartość wskaźnika ryzyka wystąpienia zdarzenia drogowego w tych warunkach pogodowych wyniosła 20,51% i jest ona prawie 5-krotnie mniejsza od jej wartości średniej 0,239. Największe ryzyko wystąpienia zdarzenia drogowego, tj.  $0,500 \pm 0,173$  zdarzeń/h, miało miejsce przy niskim ciśnieniu atmosferycznym, średnim zachmurzeniu nieba, temperaturze powietrza  $>26^{\circ}\text{C}$ , małej wilgotności oraz przy braku opadów atmosferycznych i jest ono ponad dwukrotnie większe od wartości przeciętnego ryzyka na sieci drogowej, jakie zaobserwowano w ciągu dwóch lat. Warto zwrócić uwagę, że w grupie najmniejszego ryzyka są głównie warunki z dużą wilgotnością powietrza  $>70\%$ , temperaturą nieprzekraczającą  $26^{\circ}\text{C}$  oraz często też z opadami deszczu. Natomiast w grupie największego ryzyka są warunki z małą wilgotnością powietrza  $<70\%$ , przy braku występowania opadów atmosferycznych oraz z bardzo wysoką temperaturą powietrza (patrz dwa ostatnie przypadki w Tabl. 2).

## 4. WPŁYW POSZCZEGÓLNYCH PARAMETRÓW ŚRODOWISKA ATMOSFERYCZNEGO NA RYZYKO ZDARZENIA DROGOWEGO

### 4.1. OPADY ATMOSFERYCZNE

Na Rys. 1 porównano wartości wskaźnika ryzyka wystąpienia zdarzenia drogowego ze względu na rodzaj opadów atmosferycznych. W tym przypadku wszystkie warunki atmosferyczne zostały posegregowane na 3 grupy, tj.: do pierwszej grupy zdefiniowano te, w których występowały opady deszczu, do drugiej grupy zaliczono te z opadami śniegu, a do ostatniej grupy – z brakiem opadów atmosferycznych. Trzecia grupa była najliczniejsza. W jej zakres wchodziło 36 przypadków wariantów pogody. Przy opadach deszczu było ich 22, natomiast przy opadach śniegu – tylko 9. Porównując te trzy przypadki, można zauważyć, że najmniejszy średni względny wskaźnik ryzyka występuje przy opadach śniegu i wynosi 90,6%. Przy opadach deszczu jego wartość wzrasta już do 92,3%. Natomiast, gdy nie występują opady atmosferyczne, wówczas średni względny wskaźnik

obtained data the average value of the risk of a road incident was estimated - this value equals 0.239 incidents/h.

When comparing the data from Table 2, it was noticed that the lowest risk of a traffic incident was equal to  $0.049 \pm 0.042$  incidents/h and occurred in the following weather conditions: low atmospheric pressure, low cloud cover, optimal air temperature, low humidity, and during rainfall. The relative risk index of a road incident in such weather conditions was equal to 20.51% - which is almost 5 times lower than the average value of this index (0.239). The highest risk of a road incident, i.e.  $0.500 \pm 0.173$  incidents/h, took place during low atmospheric pressure, partly cloud cover, an air temperature of  $>26^{\circ}\text{C}$ , low humidity and a no precipitation, and it was more than twice higher the average risk that was observed over a period of two years on the road network. It is worth noting that there are mainly conditions with high air humidity  $>70\%$ , a temperature not exceeding  $26^{\circ}\text{C}$ , and often also with rainfall in the group of the lowest risk. In opposite, there are conditions with low air humidity  $<70\%$ , no precipitation, and a very high air temperature in the group of the highest risk (compare, among others, the last two cases in Table 2).

## 4. INFLUENCE OF INDIVIDUAL PARAMETERS OF THE ATMOSPHERIC ENVIRONMENT ON THE RISK OF ROAD INCIDENT

### 4.1. PRECIPITATION

Values of the risk index of a road incident with regards to the type of atmospheric precipitation are compared in Fig. 1. In this case, all atmospheric conditions were segregated into 3 groups, i.e. the first group included rainfall, the second group included snowfall, and the last group – no atmospheric precipitation. The third group was the most numerous and it included 36 weather condition cases. There were 22 weather cases in the group that includes rainfall, and only 9 in the group with snowfall. When comparing these three groups, it can be seen that the smallest average relative risk index occurs during snowfalls and amounts to 90.6%. During rainfalls, its value increases to 92.3%. However, when there is no precipitation, the average relative risk index is equal to 107.1%. This is due to the fact that drivers feel more confident during dry weather, they increase the speed of their vehicles, and thus drive their cars less safely with a higher risk level [2].

ryzyka wynosi 107,1%. Wynika to z faktu, że kierowcy przy suchej pogodzie czują się pewniej za kierownicą, zwiększają prędkość swojego pojazdu, a tym samym mniej bezpiecznie prowadzą pojazd, z większym poziomem ryzyka [2].

Table 2. The results of risk of road incidents at given weather conditions

Tablica 2. Uzyskane wyniki ryzyka wystąpienia zdarzenia drogowego przy danych warunkach pogodowych

No. of a kind of weather conditions Nr rodzaju warunków pogodowych	Barometric pressure Ciśnienie powietrza	Cloudiness Zachmurzenie	Air temperature Temperatura powietrza	Relative humidity Wilgotność względna	Kind of precipitation Rodzaj opadów atmosferycznych	The number of hours of the given weather conditions Liczba godzin trwania danej pogody	Number of road incidents Liczba zdarzeń drogowych	Risk of road incidents Ryzyko wystąpienia zdarzenia drogowego	Relative value of a risk of road incidents Względna wartość ryzyka wystąpienia zdarzenia drogowego	Confidence interval at $\alpha=0.05$ Przedział ufności ryzyka przy $\alpha=0.05$
	[hPa]	[octants] [oktanty]	[°C]	[%]	[-]	[h]	[-]	[incidents/h] [zdarzenie/h]	[%]	[-]
1	≤1013	0-2	13-26	>70	rain / deszcz	102	5	0.049	20.51	±0.042
2	≤1013	0-2	≤0	>70	lack of falls / brak	58	5	0.086	36.08	±0.072
3	≤1013	0-2	0-13	>70	rain / deszcz	245	23	0.094	39.29	±0.037
4	≤1013	3-5	13-26	>70	rain / deszcz	203	20	0.099	41.23	±0.041
5	>1013	3-5	0-13	>70	rain / deszcz	69	7	0.101	42.46	±0.071
6	≤1013	3-5	13-26	>70	lack of falls / brak	136	14	0.103	43.08	±0.051
7	>1013	0-2	0-13	>70	rain / deszcz	135	14	0.104	43.40	±0.051
8	≤1013	0-2	0-13	≤70	rain / deszcz	38	4	0.105	44.05	±0.098
9	≤1013	3-5	0-13	>70	lack of falls / brak	165	18	0.109	45.65	±0.048
10	>1013	0-2	0-13	>70	lack of falls / brak	615	71	0.115	48.31	±0.025
11	≤1013	0-2	0-13	>70	lack of falls / brak	270	36	0.133	55.80	±0.041
12	>1013	0-2	≤0	>70	snow / śnieg	64	9	0.141	58.85	±0.085
13	≤1013	6-9	13-26	>70	lack of falls / brak	545	84	0.154	64.50	±0.030
14	>1013	3-5	≤0	>70	snow / śnieg	32	5	0.156	65.39	±0.126
15	>1013	3-5	13-26	>70	rain / deszcz	38	6	0.158	66.08	±0.116
16	≤1013	0-2	13-26	>70	lack of falls / brak	144	24	0.167	69.75	±0.061
17	≤1013	6-9	>26	≤70	rain / deszcz	30	5	0.167	69.75	±0.133
18	>1013	3-5	13-26	>70	lack of falls / brak	78	13	0.167	69.75	±0.083
19	≤1013	3-5	0-13	>70	rain / deszcz	244	41	0.168	70.32	±0.047
20	>1013	3-5	0-13	>70	lack of falls / brak	192	34	0.177	74.11	±0.054
21	≤1013	6-9	0-13	>70	lack of falls / brak	730	130	0.178	74.53	±0.028
22	>1013	0-2	13-26	>70	lack of falls / brak	94	17	0.181	75.69	±0.078
23	>1013	0-2	≤0	>70	lack of falls / brak	533	99	0.186	77.73	±0.033
24	≤1013	0-2	13-26	≤70	rain / deszcz	80	15	0.188	78.47	±0.086
25	>1013	6-9	≤0	>70	lack of falls / brak	335	65	0.194	81.20	±0.042
26	>1013	6-9	0-13	>70	lack of falls / brak	905	185	0.204	85.55	±0.026
27	≤1013	6-9	0-13	≤70	snow / śnieg	57	12	0.211	88.10	±0.106
28	≤1013	6-9	0-13	>70	rain / deszcz	1979	421	0.213	89,03	±0.018
29	≤1013	0-2	≤0	>70	snow / śnieg	37	8	0.216	90.49	±0.133
30	≤1013	3-5	0-13	>70	snow / śnieg	37	8	0.216	90.49	±0.133
31	>1013	6-9	0-13	>70	rain / deszcz	578	125	0.216	90.51	±0.034
32	≤1013	6-9	≤0	>70	snow / śnieg	537	119	0.222	92.74	±0.035

No. of a kind of weather conditions Nr rodzaju warunków pogodowych	Barometric pressure Ciśnienie powietrza	Cloudiness Zachmurzenie	Air temperature Temperatura powietrza	Relative humidity Wilgotność względna	Kind of precipitation Rodzaj opadów atmosferycznych	The number of hours of the given weather conditions Liczba godzin trwania danej pogody	Number of road incidents Liczba zdarzeń drogowych	Risk of road incidents Ryzyko wystąpienia zdarzenia drogowego	Relative value of a risk of road incidents Względna wartość ryzyka wystąpienia zdarzenia drogowego	Confidence interval at $\alpha=0.05$ Przedział ufności ryzyka przy $\alpha=0.05$
	[hPa]	[octants] [oktanty]	[°C]	[%]	[-]	[h]	[-]	[incidents/h] [zdarzenie/h]	[%]	[-]
33	>1013	6-9	≤0	>70	snow / śnieg	394	90	0.228	95.60	±0.041
34	≤1013	0-2	13-26	≤70	lack of falls / brak	201	46	0.229	95.78	±0.058
35	≤1013	6-9	0-13	>70	snow / śnieg	961	223	0.232	97.11	±0.027
36	≤1013	6-9	0-13	≤70	lack of falls / brak	276	66	0.239	100.08	±0.050
37	>1013	6-9	≤0	≤70	lack of falls / brak	46	11	0.239	100.08	±0.123
38	≤1013	3-5	≤0	>70	lack of falls / brak	50	12	0.240	100.44	±0.118
39	≤1013	6-9	13-26	>70	rain / deszcz	1353	328	0.242	101.45	±0.023
40	>1013	3-5	≤0	>70	lack of falls / brak	103	25	0.243	101.58	±0.083
41	>1013	6-9	13-26	>70	lack of falls / brak	154	38	0.247	103.27	±0.068
42	>1013	6-9	13-26	>70	rain / deszcz	141	36	0.255	106.85	±0.072
43	>1013	0-2	13-26	≤70	rain / deszcz	42	11	0.262	109.61	±0.133
44	>1013	3-5	≤0	≤70	lack of falls / brak	42	11	0.262	109.61	±0.133
45	≤1013	6-9	≤0	>70	lack of falls / brak	158	42	0.266	111.25	±0.069
46	>1013	6-9	0-13	≤70	lack of falls / brak	141	39	0.277	115.75	±0.074
47	>1013	0-2	0-13	≤70	lack of falls / brak	269	77	0.286	119.79	±0.054
48	>1013	3-5	13-26	≤70	rain / deszcz	66	19	0.288	120.48	±0.109
49	>1013	6-9	13-26	≤70	lack of falls / brak	315	93	0.295	123.56	±0.050
50	≤1013	6-9	13-26	≤70	rain / deszcz	619	191	0.309	129.13	±0.036
51	≤1013	3-5	13-26	≤70	lack of falls / brak	272	84	0.309	129.24	±0.055
52	≤1013	0-2	0-13	≤70	lack of falls / brak	51	16	0.314	131.29	±0.127
53	≤1013	6-9	13-26	≤70	lack of falls / brak	532	167	0.314	131.37	±0.039
54	>1013	6-9	0-13	≤70	rain / deszcz	79	25	0.316	132.44	±0.103
55	≤1013	6-9	>26	≤70	lack of falls / brak	31	10	0.323	135.00	±0.165
56	>1013	6-9	0-13	>70	snow / śnieg	105	34	0.324	135.51	±0.090
57	≤1013	6-9	0-13	≤70	rain / deszcz	185	67	0.362	151.56	±0.069
58	≤1013	3-5	13-26	≤70	rain / deszcz	163	61	0.374	156.62	±0.074
59	>1013	6-9	13-26	≤70	rain / deszcz	80	30	0.375	156.94	±0.106
60	>1013	3-5	13-26	≤70	lack of falls / brak	237	89	0.376	157.16	±0.062
61	>1013	3-5	0-13	≤70	lack of falls / brak	119	46	0.387	161.77	±0.087
62	≤1013	3-5	0-13	≤70	rain / deszcz	45	18	0.400	167.40	±0.143
63	>1013	0-2	13-26	≤70	lack of falls / brak	310	126	0.406	170.10	±0.055
64	>1013	0-2	≤0	≤70	lack of falls / brak	176	72	0.409	171.20	±0.073
65	≤1013	3-5	0-13	≤70	lack of falls / brak	103	43	0.417	174.71	±0.095
66	≤1013	0-2	>26	≤70	lack of falls / brak	41	20	0.488	204.15	±0.153
67	≤1013	3-5	>26	≤70	lack of falls / brak	32	16	0.500	209.25	±0.173
mean / średnia							0.239	100		

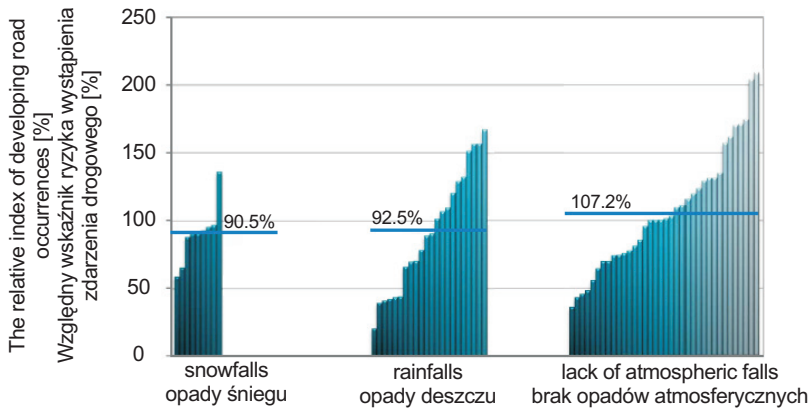


Fig. 1. The relative risk of road incident occurrence depending on the kind of atmospheric precipitation  
Rys. 1. Względny ryzyko wystąpienia zdarzenia drogowego w zależności od rodzaju opadów atmosferycznych

## 4.2. CIŚNIENIE ATMOSFERYCZNE

Ciśnienie atmosferyczne (związana z nim zawartość tlenu w powietrzu) wpływa na wiele procesów biofizycznych, na stan organizmu człowieka, jego wydolność fizyczną, natlenienie krwi [10]. Rys. 2 przedstawia ryzyko wystąpienia zdarzenia drogowego w zależności od ciśnienia atmosferycznego. Przy niskim ciśnieniu  $\leq 1013$  hPa (tzw. „nizowym”) względny wskaźnik ryzyka wynosił od 20,5% do 209,3%, natomiast przy ciśnieniu wysokim  $> 1013$  hPa (tzw. „wyzowym”) – od 42,5% do 171,2%. Średni względny wskaźnik ryzyka wystąpienia zdarzenia drogowego uzyskano jednak nieco większy przy wysokim ciśnieniu atmosferycznym (o około 4%). Na podstawie uzyskanych wyników nie można jednak wskazać, przy jakiej wartości ciśnienia atmosferycznego powstaje większe ryzyko zaistnienia zdarzenia drogowego. Wynika to prawdopodobnie z faktu, że dłużej trwające wysokie, bądź niskie ciśnienie, nie wpływa specjalnie negatywnie na organizm człowieka. Istotna dla pogorszenia samopoczucia organizmu człowieka jest natomiast nagła zmiana tego ciśnienia [8]. Tego typu zjawisko trudno jednak było wychwycić na podstawie wyników badań.

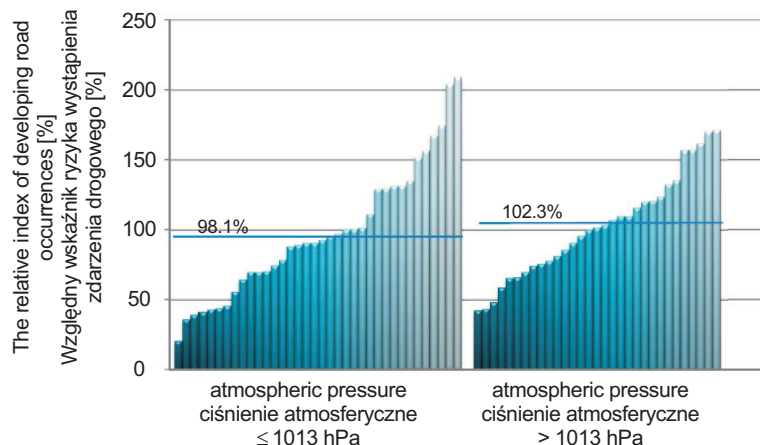


Fig. 2. The relative risk of road incident occurrence depending on the atmospheric pressure  
Rys. 2. Względny ryzyko wystąpienia zdarzenia drogowego w zależności od ciśnienia atmosferycznego

## 4.2. ATMOSPHERIC PRESSURE

Atmospheric pressure (the content of oxygen in the air which is associated with it) affects many biophysical processes, the state of the human body, and also the body's physical performance and blood oxygenation [10]. Fig. 2 shows the risk of road incident with regards to atmospheric pressure. At a low pressure of  $\leq 1013$  hPa (so-called “low-pressure”), the relative risk index ranged from 20.5% to 209.3%, while at a high pressure of  $\geq 1013$  hPa (so-called “high-pressure”) it ranged from 42.5% to 171.2%. The average relative risk index for a road incident was slightly higher at a high atmospheric pressure (by approx. 4%). However, on the basis of the obtained results, it is not possible to indicate at which value of atmospheric pressure a higher risk of a road incidents arises. This is probably due to the fact that longer lasting high or low pressure does not have a negative effect on the human body. An abrupt change in this pressure is significant for the deterioration of the human body [8]. However, this type of phenomenon was difficult to detect based on the results of the research.



### 4.3. WILGOTNOŚĆ WZGLĘDNA POWIETRZA

Porównując wartości względnego wskaźnika ryzyka wystąpienia zdarzenia drogowego na podstawie wilgotności względnej (Rys. 3), jednoznacznie można stwierdzić, że średni względny wskaźnik ryzyka jest większy przy wilgotności mniejszej niż 70%. Średni względny wskaźnik ryzyka przy wilgotności  $\leq 70\%$  wynosi 131,5%, natomiast przy wilgotności  $>70\%$  wynosi 74,5%. Taką analogię zaobserwowano także podczas porównania poszczególnych warunków pogody przedstawionych w Tabl. 2, charakteryzujących się takimi samymi wartościami parametrów atmosferycznych, za wyjątkiem wilgotności powietrza, np. oznaczone numerami: 20 i 61, 18 i 60, 15 i 48, 25 i 37, 26 i 46, 31 i 54, 23 i 64, 10 i 47, 22 i 63, 9 i 65, 19 i 62, 6 i 51, 4 i 58, 21 i 36, 28 i 57, 13 i 53, 11 i 52.

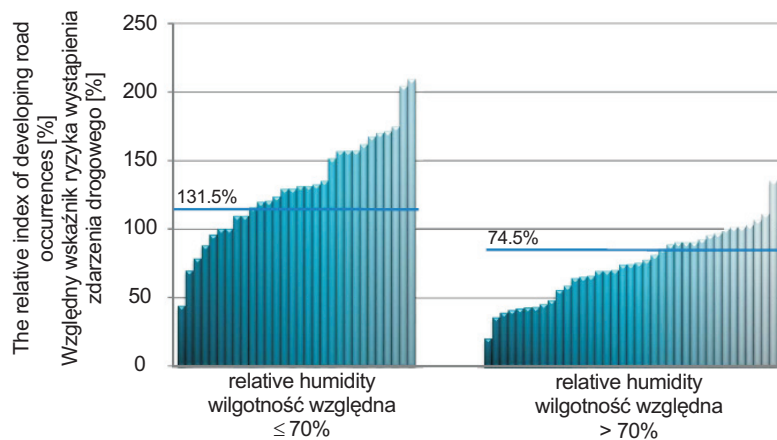


Fig. 3. The comparative risk of a road incident occurrence depending on the relative humidity of air  
Rys. 3. Względne ryzyko wystąpienia zdarzenia drogowego w zależności od wilgotności względnej powietrza

### 4.4. TEMPERATURA POWIETRZA

Na Rys. 4 pokazano wpływ temperatura powietrza na ryzyko wystąpienia zdarzenia drogowego. Analizując go widać, że średni względny wskaźnik ryzyka wzrasta wraz ze wzrostem temperatury powietrza. Zdecydowanie największe ryzyko występuje przy wysokiej temperaturze powietrza, tj.  $>26^{\circ}\text{C}$ , co związane jest ze znacznym obniżeniem wydolności psychofizycznej kierowcy [12]. Przy niskiej temperaturze powietrza średni względny wskaźnik ryzyka wynosi 92,3%, przy temperaturze przejściowej odpowiednio 95,0%, przy temperaturze optymalnej – 100,9%, podczas upałów – aż 154,5%.

### 4.5. ZACHMURZENIE NIEBA

Zachmurzenie nieba określane jest za pomocą oktantów, w której skala równa 0 oktantów oznacza niebo bezchmurne, natomiast 9 całkowicie zachmurzone. Analizując Rys. 5

### 4.3. RELATIVE AIR HUMIDITY

When comparing the values of the relative risk index of a road incident based on relative humidity (Fig. 3), it can be clearly stated that the average relative risk index is higher with a humidity of less than 70%. The average relative risk index when humidity is  $\leq 70\%$  is equal to 131.5%, while when humidity is  $>70\%$  it amounts to 74.5%. Such an analogy was also observed when comparing the particular weather conditions shown in Table 2, which are characterized by the same values of atmospheric parameters, except for air humidity, e.g. marked of numbers: 20 and 61, 18 and 60, 15 and 48, 25 and 37, 26 and 46, 31 and 54, 23 and 64, 10 and 47, 22 and 63, 9 and 65, 19 and 62, 6 and 51, 4 and 58, 21 and 36, 28 and 57, 13 and 53, 11 and 52.

### 4.4. AIR TEMPERATURE

Fig. 4 shows how the air temperature affects the risk of a road incident. When analyzing this figure, it can be seen that the average relative risk index increases with an increase of air temperature. The highest risk definitely occurs at a high temperature, i.e.  $>26^{\circ}\text{C}$ , and this is associated with a significant reduction in the psychophysical efficiency of a driver [12]. At a low air temperature, the average relative risk index is equal to 92.3%, at a transition temperature it is equal to 95.0%, at the optimum temperature it is equal to 100.9%, and in hot weather it is even equal to 154.5%.

### 4.5. CLOUD COVER

Cloud cover is determined using octants, where a scale of 0 octants means a cloudless sky, while 9 means a completely cloudy sky. When analyzing Fig. 5, it can be con-

można stwierdzić, że średnia względna wartość ryzyka wystąpienia zdarzenia drogowego wzrasta wraz ze wzrostem zachmurzenia nieba. Przy małym zachmurzeniu, tj. 0-2 oktanty wynosi 87,0%, przy zachmurzeniu z zakresu 3-5 oktantów wynosi 104,6%, natomiast przy dużym zachmurzeniu (ponad 6 oktantów) wynosi 106,3%. Zauważyć należy także, że największe względne wartości ryzyka miały miejsce w warunkach pogodowych ze średnim i małym zachmurzeniem nieba, na co wpływ miały jeszcze inne parametry atmosferyczne, w tym wysoka temperatura, która skutkuje podniesieniem poziomu ryzyka. W związku z powyższym i w tym przypadku nie można jednoznacznie wskazać, jaki stan zachmurzenia nieba stwarza dla kierowców większe ryzyko zdarzenia drogowego.

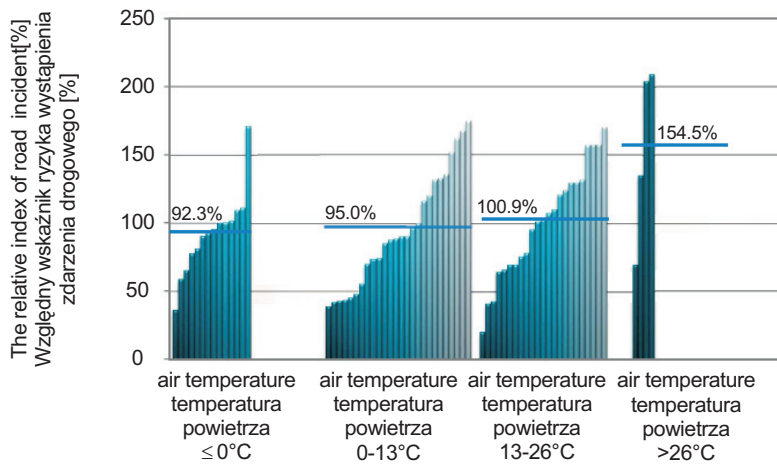


Fig. 4. The relative risk of a road incident occurrence depending on the air temperature

Rys. 4. Względne ryzyko wystąpienia zdarzenia drogowego w zależności od temperatury powietrza

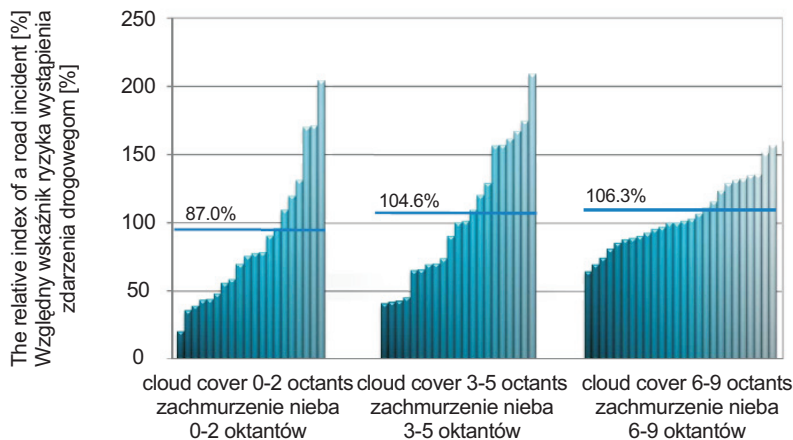


Fig. 5. The risk of a road incidents occurrence depending on the level of cloudiness

Rys. 5. Ryzyko wystąpienia zdarzenia drogowego w zależności od stopnia zachmurzenia nieba

## 5. WNIOSKI

Przeprowadzone badania własne i analiza dostępnej literatury z zakresu bezpieczeństwa ruchu drogowego i meteorologii pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

cluded that the average relative value of the risk index of a road incident increases with an increase in cloud cover. With small cloud cover, i.e. 0-2 octants, it is equal to 87.0%, with cloudiness within the range of 3-5 octants it is equal to 104.6%, while with large cloud cover (over 6 octants) it is equal to 106.3%. It should also be noted that the highest relative risk index values occurred in weather conditions with an average and low cloud cover, which was also influenced by other atmospheric parameters, including high temperature. This resulted in an increased risk level. Regarding the above, in this case it also cannot be unambiguously indicated what state of cloud cover creates a greater risk of a road incident for drivers.

## 5. CONCLUSIONS

The performed investigation and analysis of the available literature in the field of road safety and meteorology enabled the following conclusions to be formulated:

1. Bardzo duży wpływ na ryzyko wystąpienia zdarzenia drogowego ma mała wilgotność powietrza, tj.  $\leq 70\%$ . Przy małej wilgotności średnia wartość względnego ryzyka przy różnych warunkach pogodowych wyniosła – 131,5%, natomiast przy dużej wilgotności zaledwie 74,5%.
  2. Znaczący wpływ na wzrost ryzyka zaistnienia zdarzenia drogowego ma wzrost temperatury powietrza. Zaobserwowana wartość średnia względnego wskaźnika ryzyka do wszystkich przypadków z wysoką temperaturą powietrza  $> 26^\circ\text{C}$  wyniosła ponad 154%, podczas gdy przy niskiej temperaturze  $\leq 0^\circ\text{C}$  – około 92%.
  3. Większe wartości względnego wskaźnika ryzyka zaistnienia zdarzenia drogowego można zaobserwować, gdy brak jest opadów atmosferycznych w stosunku do okresu, gdy te opady występują. Średnia wartość względnego wskaźnika ryzyka wyniosła w tych warunkach 107,2%, podczas gdy w trakcie opadów deszczu była równa 92,2%, natomiast w przypadku opadów śniegu – 90,5%. Przy opadach deszczu i śniegu kierowcy są bardziej ostrożni oraz dostosowują się do warunków panujących na drodze. Natomiast gdy nie występują opady atmosferyczne, kierowcy czują się pewniej za kierownicą, rozwijają większe prędkości, tracą czujność podczas kierowania pojazdem, jadą z mniejszym marginesem bezpieczeństwa, co może zwiększać prawdopodobieństwo zdarzenia drogowego.
  4. Wysoka temperatura powietrza w połączeniu z małą wilgotnością powietrza, niskim ciśnieniem atmosferycznym i brakiem występowania opadów atmosferycznych nie sprzyja kierowaniu pojazdem oraz obniża koncentrację i sprawność motoryczną kierowcy. W konsekwencji prowadzi to do wysokiego względnego ryzyka wystąpienia zdarzenia drogowego, tj. średnio ponad 209%.
  5. Najmniejsze wartości wskaźnika ryzyka powstania zdarzenia drogowego występują w warunkach pogodowych przy dużej wilgotności powietrza  $> 70\%$ , temperaturze nieprzekraczającej  $26^\circ\text{C}$  oraz często też z opadami deszczu. Natomiast największe wartości ryzyka mają miejsce przy małej wilgotności  $< 70\%$ , bez opadów atmosferycznych oraz przy bardzo wysokiej temperaturze powietrza, czyli przy najbardziej sprzyjających do ruchu warunkach.
  6. Ponieważ zdarzenia drogowe mają olbrzymi wpływ na szeroko rozumiane straty społeczne [13], stąd wiedzę o wpływie warunków atmosferycznych na ryzyko zdarzeń drogowych powinno wykorzystywać się do optymalizacji rozwiązań infrastruktury drogowej, organizacji ruchu, a w szczególności w rozwiązaniach inteligentnych
1. A low air humidity, i.e.  $\leq 70\%$ , has a very high impact on the risk of a road incident occurrence. At low humidity, the average value of the relative risk index in different weather conditions was equal to 131.5%, while at high humidity it was equal to only 74.5%.
  2. The increase in air temperature has a significant impact on the increase of the risk of a road incident occurrence. The observed average value of the relative risk index for all cases with a high air temperature  $> 26^\circ\text{C}$  was equal to over 154%, while at low temperature  $\leq 0^\circ\text{C}$  to approximately 92%.
  3. When there is no precipitation there are higher values of the relative risk index a road incident in relation to when precipitation occurs. The average value of the relative risk index in these conditions was equal to 107.2%, while during rainfall it was equal to 92.2%, and during snowfall equal to 90.5%. When there is rain and snow, drivers are more careful and adapt to the conditions on the road. However, when there is no precipitation, drivers feel more confident, they drive with higher speeds, lose vigilance while driving and drive with a smaller safety margin. This can increase the probability of a road incident.
  4. A high air temperature combined with low air humidity, low atmospheric pressure and no precipitation is not conducive to driving and reduces both a driver's concentration and motor skills. As a consequence, this leads to a high relative risk a road incident, i.e. an average of more than 209%.
  5. The smallest values of the risk of a road incident are during weather conditions with high air humidity of  $> 70\%$ , a temperature not exceeding  $26^\circ\text{C}$ , and often also with rainfall. However, the highest risk values occur at low humidity of  $< 70\%$ , no precipitation, and at a very high air temperature, i.e. in conditions most conducive to driving.
  6. Because road incidents have a huge impact on broadly understood social losses [13], knowledge of the impact of atmospheric conditions on the risk of road incidents should be used in order to optimize road infrastructure solutions, traffic organization, and in particular in intelligent solutions of transportation systems. The authors also suggest using this knowledge when defining methods of assessing road safety [14].

systemów transportowych. Autorzy sugerują również wykorzystanie tej wiedzy przy definiowaniu metod oceny bezpieczeństwa ruchu drogowego [14].

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Łuczak A., Najmiec A.*: Praca naukowo - badawcza z zakresu prewencji wypadkowej: Badania sprawności psychofizycznej kierowców wypadkowych i bezwypadkowych w aspekcie prewencji wypadkowej i zwiększania kultury bezpieczeństwa w transporcie drogowym. Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa, 2009
- [2] *Szczuraszek T.*: Badanie zagrożeń w ruchu drogowym. Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Warszawa, 2005
- [3] *Golob T.F., Recker W.W.*: Relationships Among Urban Freeway Accidents, Traffic Flow, Weather, and Lighting Conditions. *Journal of Transportation Engineering*, Volume 129, Issue 4, 2003, 342-353
- [4] *Jaroszewski D., McNamara T.*: The influence of rainfall on road accidents in urban areas: A weather radar approach. *Travel Behaviour and Society*, Volume 1, Issue 1, 2014, 15-21, DOI: 10.1016/j.tbs.2013.10.005
- [5] *Maze T., Agarwai M., Burchett G.*: Whether weather matters to traffic demand, traffic safety, and traffic operations and flow. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1948**, 1, 2006, 170-176, DOI: 10.3141/1948-19
- [6] *Yu R., Xiong T., Abdel-Aty M.*: A correlated random parameter approach to investigate the effects of weather conditions on crash risk for a mountainous freeway. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 50, 2015, 68-77 DOI: 10.1016/j.trc.2014.09.016
- [7] *Woś A.*: ABC meteorologii. Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań, 1995
- [8] *Al-Harbi M., Yassin M.F., Shams M.B.*: Stochastic modeling of the impact of meteorological conditions on road traffic accidents. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Volume 26, Issue 5, 2012, 739-750 DOI: 10.1007/s00477-012-0611-z
- [9] *Ząbczyk K.*: Meteorologia drogowa, a bezpieczeństwo ruchu. Krajowy Program Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego. VI Międzynarodowe Seminarium Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego GAMBIT 2006 „Miejsce Programu GAMBIT w III Planie BRD Unii Europejskiej”, Gdańsk, 2006, 193-198
- [10] *Kożuchowski K.*: Atmosfera, klimat, ekoklimat. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1998
- [11] *Pszczola M., Ryś D., Jaskuła P.*: Analysis of climatic zones in Poland with regard to asphalt performance grading. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **16**, 4, 2017, 245-264 DOI: 10.7409/rabdim.017.016
- [12] *Person K.*: Human thermal environments: The effects of hot moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance. Third Edition. CRC Press, 2014
- [13] *Jażdżik-Osmólska A.*: Pandora - valuation method of social costs of road accidents in Poland. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **14**, 2, 2015, 133-142 DOI: 10.7409/rabdim.015.009
- [14] *Cafiso S., D'agostino C., Kieć M., Pappalardo G.*: Surrogate measure of safety from road inspection data - experimental test on Polish roads. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **16**, 2, 2017, 115-130 DOI: 10.7409/rabdim.017.008