

Marcin BUDZYŃSKI<sup>1</sup>, Agnieszka TUBIS<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gdańsk University of Technology (Politechnika Gdańska)

<sup>2</sup>Wrocław University of Science and Technology (Politechnika Wroclawska)

## ASSESSING THE EFFECTS OF THE ROAD SURFACE AND WEATHER CONDITIONS ON ROAD SAFETY

### Ocena wpływu stanu nawierzchni i warunków atmosferycznych na bezpieczeństwo ruchu drogowego

**Abstract:** *When transport is analysed for its safe delivery the focus is mainly on assessing the safety of roads and the risk of undesired events. These include road accidents, an occurrence which is relatively rare and random. Randomness means that accidents depend on several factors which are partly deterministic and partly. The authors conducted an assessment of how weather conditions affect the risk of an accident due to the factor's significant contribution to road accidents. This case involves a combination of two sources of hazard: external conditions in the form of the weather which are beyond the driver's control and anthropotechnical factors that address vehicle condition and driver behaviour controlled by the driver.*

**Keywords:** road safety, weather conditions, road surface

**Streszczenie:** *Analiza bezpieczeństwa realizacji zadań transportowych w dużej mierze koncentruje się na ocenie bezpieczeństwa dróg, w zakresie ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych. Wypadki drogowe są grupą takich zdarzeń, a ich występowanie jest stosunkowo rzadkie i losowe. Losowość oznacza, że wypadki są zależne od wielu czynników, które są częściowo deterministyczne i częściowo stochastyczne. Autorzy podjęli ocenę wpływu warunków pogodowych na ryzyko wypadków, ze względu na znaczący udział tego czynnika w wypadkach drogowych. Występuje w tym przypadku połączenie dwóch źródeł zagrożeń: czynników zewnętrznych w postaci warunków atmosferycznych, pozostających poza kontrolą kierowcy oraz czynników antropotechnicznych odnoszących się do stanu użytkowanego pojazdu oraz zachowań kierowcy, nad którymi kierowca posiada kontrolę.*

**Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo ruchu drogowego, warunki atmosferyczne, nawierzchnia drogowa

## 1. Description of the problem

The set of crash contributing factors can be classified by time: before, during, after the accident [1] and source (man, road, vehicle, environment – weather conditions, enforcement, etc.) [2, 3, 4, 5]. When combined, these two classifications are a classic in road safety, i.e. Haddon matrix [6]. Over the years it was modified and expanded [7, 8, 9, 10] and continues to serve the purpose well which is to organise and classify road safety contributing factors. Areas, sections and specific sites can have their own matrix built for them. Indicated in Haddon matrix (tab.1), wet or slippery surfaces, surface friction and time of day are the subject of analyses conducted by the authors. The authors conducted an assessment of how weather conditions affect the risk of an accident due to the factor’s significant contribution to road accidents (33% of all fatalities on Polish roads happened on wet road surfaces).

A review of literature conducted by the authors [11] and a review of international research projects [12, 13, 14] helped to identify two areas from a number of factors that have an effect on safety. From the authors’ perspective these areas are of particular importance: the effect of weather and time of day.

Theofilatos [15] noticed that weather effects are having a more consistent effect on safety than traffic. What we have is a combination of two sources of hazard: (1) external conditions in the form of the weather which are beyond the driver’s control and (2) anthropotechnical factors that address vehicle condition and driver behaviour where the driver exercises complete or almost complete control.

**Table 1**

**Example of Haddon matrix (source: authors based on AASHTO 2010)**

Time/Source	Man	Road and roadside and external factors	Vehicle
<b>Pre-crash</b>	distraction, fatigue, wrong assessment of the situation, driver’s age, use of mobile phone, wrong driving habits, effects of alcohol	wet, slippery road surface, night-time strong gradients, faulty traffic lights	quality of brakes, quality of tires
<b>During crash</b>	susceptibility to injury, age, not wearing a seatbelt, speed,	surface friction, roadside obstacles	presence and condition of airbags, headrest design
<b>Post-crash</b>	accident victim’s age, type and scale of injury	time to reach the scene of the accident, quality of treatment	ease of pulling accident victims out of vehicle



As we can see from world literature the weather and how it changes has an effect not just on road safety but on transport processes as a whole [16]. The most frequent weather parameter which the literature addresses is precipitation (rain, intensity of precipitation, snow) [15]. A number of studies show that precipitation in the form of rain and snow generally results in more accidents compared with dry conditions [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23]. Bijleveld's and Churchill's [24] research showed that hazardous transport behaviour is largely influenced by precipitation. Satterthwaite [25] argued that rainy weather is the most frequent contributing factor to single vehicle accidents. Research on the effects of precipitation on road safety is quite consistent. While most studies show that precipitation corresponds to higher numbers of crashes [26, 21, 27, 28, 29], selected research results show that the effect of precipitation on safety is not clear cut and does not apply to all types of accidents of locations [30]. Studies conducted in Greece [31] suggest that the risk of accidents diminishes when it is raining. Belgium studies show that while the risk of injury accidents increases, the risk of fatality accidents goes down [32]. Other research results from Belgium show that motorcyclist and cyclist accident risk decreases while the risk of vehicle collisions increases [33]. With such a variety of results, it may be that road users change their behaviour when it is raining leading to a lower or higher accident risk.

Other studies point to the possible effect of the number of rainy days in a month on safety [34]. Kanpp and Smithson noticed that there is some evidence that wet or snowy weather, particularly if coupled with severe storms, can deter motorists from venturing onto the road, i.e. there is a reduction in traffic volume [35]. This reduction is generally of the order of a few percent [36]. The avoidance of potentially hazardous conditions may be due to a self-assessment by the road user or road weather alerts broadcast via the media [37].

Many road users avoid unnecessary trips, especially during snowfall [26]. This applies in particular to pedestrians, cyclists and motorcyclists. It was found that lower accident severity follows snowfall intensity with a higher number of collisions and slight injury accidents and a lower number of serious accidents (serious injury and killed) [26, 14]. This is mostly attributed to lower speeds in snowy conditions. There is also some evidence that the sudden onset of rainfall or snowfall may increase the accident count to a greater extent than other wet or snowy days [21, 26].

An interesting contributing parameter was found in Eisenberg [23]. This parameter is the lagged effect of rain which was first found significant in 1988 [18]. Analysis shows that the risk imposed by precipitation increases dramatically as the time since last precipitation increases. For example, 1 cm of precipitation increases the fatal crash rate for a state-day by about 3% if exactly 2 days have passed since



the last precipitation and by about 9% if more than 20 days have passed. This basic pattern holds for non-fatal crashes as well.

As a result we can say that “the lagged effect of rain” largely depends on how the driver perceives risk. In his work Moen [38] pointed to the emotional part of risk perception. His research suggests that the emotions that are part of the driving experience determine the driving style. As a result, the likelihood of an accident seems very likely to many drivers if driving in difficult weather conditions. This reduces their propensity to take risky behaviours during rainfall. When the rain stops and the weather conditions are good, the propensity for dangerous behaviour may increase. This is largely the effect of drivers misjudging the condition of the road surface.

The time of accidents is very important and has a strong effect on road safety (fourth group of contributing factors). As we know from research night-time accident severity is triple that during daylight [39, 40]. Studies conducted in Poland [41] show that driving at night significantly increases the risk of pedestrian accidents. There are similar results from studies of safety on pedestrian crossings in urban areas [42]. With no proper illumination at night-time, the risk of pedestrian death is four times higher than in daylight. Studies conducted in Sweden, Norway and the Netherlands [43] show that motorcyclist and cyclist accidents are more likely during the night-time but only in built-up areas. The objective of the authors’ work is to analyse the number and type of accidents which occur on wet road surfaces, with a special focus on accidents occurring in good weather (no precipitation). In addition, an analysis was carried out to understand the link between wet surfaces and night-time on safety. Based on this, preventative solutions will be offered using the advances in technology of the recent years.

## 2. Study method

The analyses cover the period 2012–2018 and include all road accidents which were recorded on Poland’s road network within this period. The police database was explored in order to select specific problems. They will be discussed in detail further in the article. As we can see from the records there were 238,900 accidents with more than 290,000 people injured (including more than 80,000 serious injuries) and nearly 22,000 people killed. The accident and casualty numbers over the period continued a downward trend until 2015. Sadly, 2016 saw a rise in accident numbers and primarily in fatalities. After a fatality drop in 2017, in 2018 that figure went up again. This shows that since 2016 the downward fatality trend has come to a halt. Accident severity is also a serious problem with app. 9 people

killed per 100 accidents and the rate has been increasing over the last three years. It is also important to note serious injuries which has decreased only slightly since 2015 and severity is high at app. 34 serious injuries per 100 accidents. It should be stressed that in 1991 which has been Poland's worst year, the number of fatalities was 7,900, an indication of a significant improvement of Poland's road safety. Despite this, app. three thousand road deaths is not acceptable and calls for intensive efforts to change that. This may be achieved by, among other things, shaping road user behaviour and road infrastructure using advanced technology.

Analysis of the biggest road safety problems showed: risks to vulnerable road users (app. 35% of all fatalities), run-off-road accidents with vehicles rolling over or hitting an obstacle (app. 20% of all fatalities), accidents on wet surfaces – more than 33% of all fatalities and night-time accidents – more than 45% of all fatalities (table 2). In this article the authors carried out a detailed analysis of the last two problems, also as a combined problem. The authors have conducted detailed statistical accident analyses looking at road class, type of cross-section and road section (straight section, horizontal curve, slopes, junction) between 2014–2016.

With the extended analyses it was possible to identify sections of national roads where the risk of accidents on a wet surface without precipitation is the highest. Thanks to the analyses technologies can be deployed on those road sections to help with changing road user behaviour, especially that of drivers.

**Table 2**

**Share of fatalities in accidents involving wet, snowy and icy roads at night between 2012–2018**

Year	Wet, snowy, icy surface		Night-time, dawn, dusk	
	number	%	number	%
2012	1161	32.5	1739	48.7
2013	1128	33.6	1618	48.2
2014	1050	32.8	1547	48.3
2015	934	31.8	1408	47.9
2016	1105	36.5	1372	45.3
2017			1286	45.4
2018			1269	44.3

Risk analysis was based on an estimation of general societal and individual risk measures. It covers the period 2014–2016. As a general measure of societal risk of serious accidents on national roads (fatality and/or serious injury accidents),

the authors used the density of serious accidents  $GPW_{kp}$  (number of serious accidents/3 years/km) which was calculated using this formula:

$$GPW_{k,j} = LPW_{k,j} * L_j \quad (1)$$

where:

$GPW_{k,j}$  – density of serious accidents for a selected type of hazard  $k$  on  $j$ -th section of national road, over the analysed period (accidents/3 years/km),

$LPW_{k,j}$  – number of serious accidents on  $j$ -th section of national road, for a selected type of hazard  $k$  (in this case accidents on wet, slippery surface or at night-time), in the analysed year (number of accidents /year),

$L_j$  – length of  $j$ -th section [km].

As a general measure of individual risk of serious accidents, the authors used concentration of serious accidents  $KPW_{kp}$  (number of serious accidents/m veh. km). It was calculated using this formula:

$$KPW_{k,j} = LPW_{k,j} / PP_j \quad (2)$$

$$PP_j = (AADT_{i,j} * L_j * 365) / 1000000 \quad (3)$$

where:

$KPW_{k,j}$  – concentration of serious accidents for a selected type of hazard  $k$  on  $j$ -th section of national road (in this case accidents on wet, slippery surface or at night-time), in the analysed period (number of accidents /m veh. km),

$LPW_{k,j}$  – number of serious accidents on  $j$ -th section of national road, for a selected type of hazard  $k$ , in the analysed period (accidents/3 years),

$AADT_{i,j}$  – average daily annual traffic in year  $i$ , on  $j$ -th section of national road (veh./day);  $L_j$  – length of  $j$ -th section [km] [44, 45].

### 3. Results

Preliminary road accident analyses (between 2012–2016) have helped to identify road safety hazards linked to external factors such as weather conditions and the resulting road conditions (wet surface), and time of day (night, dusk, dawn). While both cases have an effect on driver behaviour, some drivers do not pay sufficient attention to the heightened risks. Their risk perception is inadequate for the changed conditions of traffic (road grip, longer stopping distance, limited visibility, limited readability of road infrastructure).

Table 3 gives data about the number and percentage of accidents and accident casualties as a consequence of external factors. It is particularly striking that precipitation (rain, snow, hail) occurs in nearly 12% of all accidents which claimed nearly 12% of all fatalities compared to wet roads with more than 32% of all accidents which recorded more than 33% of all fatalities. It is clear that accident risk is lower for precipitation alone and higher for wet road surfaces where there is no precipitation. From the perspective of driver perception, precipitation causes drivers to pay more attention and, as a consequence, to drive more carefully and slower. If there is no precipitation, even if the road is wet, risky behaviour becomes more frequent, driving is less careful and speeds are higher. The effects of precipitation or lack of it can be seen in fig. 1 – for wet roads, 66% of fatalities occur when it is not raining. The next factor which has been identified to contribute to higher road user risks is the time of day. When there is no natural light (night, dusk, dawn) over the period of analysis there were 31% of all accidents and as much as 48% of all fatalities. Night-time accident severity tends to be serious with 14 fatalities per 100 accidents compared to 7 in daytime. Severity is particularly high in night-time when there is no lighting – 24 fatalities per 100 accidents. Fig. 2 shows the combined effect of road surface condition and time of day on road user safety. More than 59% of fatalities of accidents which happened on wet, snowy or icy roads occurred when there was no daylight. This represents nearly 20% of all road accident fatalities. Due to this, it is important to pay special attention to when both factors occur together, i.e. a combination of road surface condition and time of day. Treatments are required, especially pro-active steps should be taken. This will be the topic of new research by the authors.

**Table 3**

**Presence of selected external factors acting as road accident circumstances**

Factor	Number of accidents LW	Number of injuries LR	Number of serious injuries LCR	Number of fatalities LZ	Share of % LW	Share of % LR	Share of % LCR	Share of % LZ
<b>Roadway condition</b>								
Wet	48605	60312	16396	4766	27,9	28,3	27,9	29,6
Icy, snowy	7502	9988	2284	579	4.3	4.7	3.9	3.6
<b>Weather conditions</b>								
Rainfall	16893	21014	5665	1586	9.7	9.9	9.7	9.9
Snowfall, hail	3674	4799	1127	289	2.1	2.3	1.9	1.8

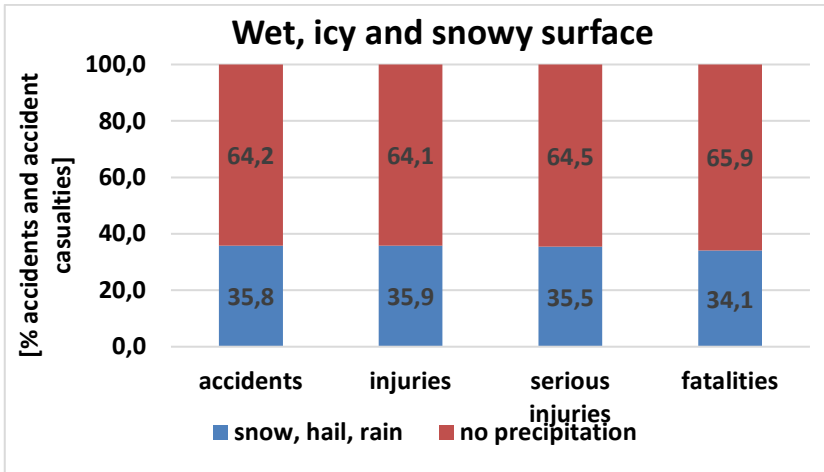


Fig. 1. Effects of precipitation or lack of precipitation on safety when road surface is wet, covered with snow or icy

Wet, icy and snowy surface, % of accidents and accident casualties, accidents, injuries, serious injuries, fatalities snow, hail, rain no precipitation

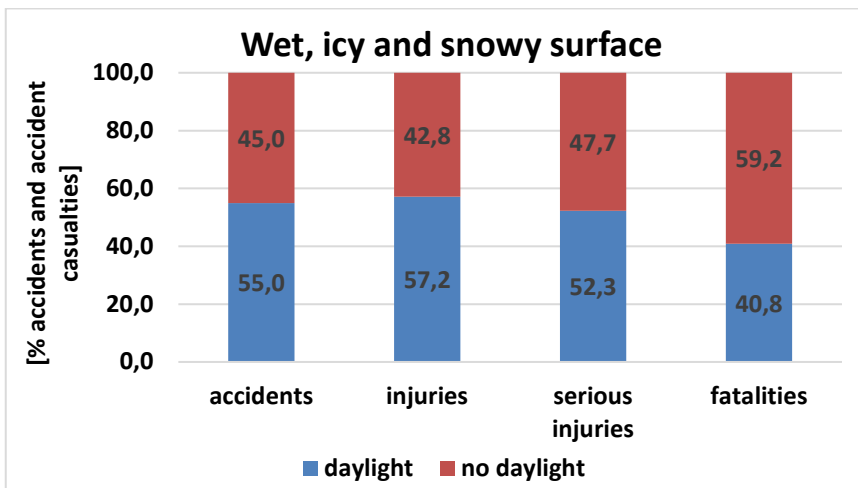


Fig. 2. Effects of time of day on safety when road surface is wet, covered with snow or icy

As regards road sections, a thorough analysis of accidents on wet, snowy or icy road surfaces showed that: most accidents happen on straight sections (56% of accidents, 65% of fatalities), junctions (25% of accidents, 12% of fatalities) and horizontal curves (17% of accidents, 20% of fatalities). Severity is the highest on





horizontal curves (13 of fatalities per 100 accidents). Due to the length of the road network, treatments will be most effective on horizontal curves with work focussed on better friction, safe roadside, signage to improve driver perception, variable message signs with updates on surface condition and helping with speed management.

Road class and type of cross-section were also analysed. In the case of motorways 28% of the accidents occurred on surfaces with reduced friction resulting in 25% of serious injuries and 20% of fatalities on this class of road. In the case of express roads 31% of accidents happened on surfaces with a poorer friction causing 30% of injuries and 22% of all fatalities on this class of road. Other dual carriageways recorded 31% of accidents on surfaces with reduced friction with 31% of injuries and 33% of all fatalities. A major problem on dual carriageways, which includes motorways and express roads, is that water pools on the surface where gradients are too low, an occurrence on some road ramps.

A societal risk analysis was also conducted for national roads looking at wet roads with no rainfall. The analysis helped to identify sections of national roads where the risk of these accidents is the highest. Spots like these need treatments suggested in section 5. Table 4 shows the location of the most dangerous sections. The selection criterion is at least 3 serious accidents in three years. Please note that a clear majority of those sections is in south Poland.

**Table 4**

**Location of sections where societal risk of accidents on wet, snowy or icy surfaces was the highest – national roads 2014–2016**

Road	Km	Region	County	Number of accidents LW	Number of injuries LR	Number of serious injuries LCR	Number of fatalities LZ	Density of serious accidents GPW
K7	607.8 - 608.2	Małopolskie	Miechowski	9	21	13	4	18.0
K7	719.9 - 720.5	Małopolskie	Myślenicki	9	19	9	3	15.0
K9	212.3 - 212.8	Podkarpackie	Strzyżowski	6	14	6	3	12.0
K9	224.0 - 224.5	Podkarpackie	Strzyżowski	5	9	7	7	10.0
K3	423.4 - 424	Dolnośląskie	Jaworski	5	5	3	2	8.3



table 4 cont.

K35	60.0 - 60.8	Dolnośląskie	Świdnicki	5	10	6	0	8.3
K16	301.1 - 301.6	Warmińsko - Mazurskie	Ełcki	4	6	3	1	8.0
K44	95.3 - 95.8	Małopolskie	Krakowski	4	2	2	2	8.0
K62	87.2 - 87.7	Kujawsko - Pomorskie	Włocławski	4	3	3	2	8.0
K7	572.3 - 572.8	Świętokrzyskie	Jędrzejowski	4	3	3	3	8.0
K74	63.5 - 64.0	Świętokrzyskie	Kielecki	4	13	7	3	8.0
K5	330.4 - 331.1	Dolnośląskie	Trzebnicki	5	12	6	3	7.1
K28	81.2-81.8	Małopolskie	Limanowski	4	4	4	0	6.7

## 4. Summary and proposed actions

The results of the analyses show that road surface condition has a strong effect on the number, type and consequences of accidents recorded on Polish roads (35% of fatalities in accidents on wet, snowy or icy surfaces). As a result, modern technology solutions are increasingly more important because they help to assess the condition of the road surface and inform drivers about it. One of the basic tools are sensors that identify road surface condition. The sensors are now part of standard equipment of weather stations which are used in intelligent transport systems (ITS) [46]. The information from the sensors is often displayed on variable message signs (VMS). Thanks to this drivers are kept-up-to-date on road surface conditions on a road they are using. Weather stations can now be complemented by road condition sensors. It is clear that different road surfaces have different properties that change with weather conditions, locations and heat accumulation capacity. As a result, weather and air temperature information alone is not enough [47]. Sensors determine the condition of a road surface and classify it as dry, moist, wet, icy or covered with rime, snow or slush. They can also assess how slippery the surface is using a scale based on estimated friction when the tyre is in contact with dry road surface. A calibrated sensor determines surface friction which for a dry surface is about 0.8. The value drops when there is water and reaches 0.1 when there is black ice. Designed to inform drivers in real time about surface condition, solutions like these can help to reduce risky behaviour of motorists. They should follow today's technology trends and be SMART, i.e. use available information and communication technologies to make road infrastructure more interactive,



efficient and safe. By integrating information coming from road surface sensors with VMS signs, it will be possible to manage speed on sections where the risk of weather-related accidents as a result of road surface condition is higher.

If safety is to be improved as a result of eliminating night-time accidents, especially if road deaths (45% of all fatalities on Poland's roads) and accident severity are to be reduced, road lighting and signage must be improved. Night-time speeding is a problem, especially in built-up areas. One contributing factor is that the speed limit is higher (60 km/h) in built-up areas between 24.00 – 6.00. A single limit of 50 km/h should be reintroduced. This will ensure that the regulations are the same as in other EU countries and will help to reduce the severity of night-time accidents.

A combination of night-time and wet, snowy or icy roads was a contributing factor to 20% of all people killed in road accidents. Treatments are necessary, especially pro-active ones (better lighting, signs, speed management, variable message signs). In addition, safety is strongly influenced by factors related road surface condition such as temperature, precipitation and dry surface friction rate. This will be the topic of future research by the authors.

## 5. References

1. AASHTO, Highway Safety Manual. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington 2010.
2. Treat JR et al.: Tri-Level Study of the Causes of Traffic Accidents. Res. Rep. Compil. by Inst. Res. Public Saf. to US Department Transp. Washingt. DC, 1979.
3. Vogel L., Bester C. J.: A relationship between accident types and causes. Proc. 24th South. African Transp. Conf., 2005.
4. PIARC: Road accident investigation guidelines for road engineers, 2007.
5. NCHRP: Application of Human Factors Guidelines for Road Systems. Rep. 600, Transp. Res. Board, 2016.
6. Haddon W.: The changing approach to the epidemiology, prevention, and amelioration of trauma: the transition to approaches etiologically rather than descriptively based. Am. J. Public Health, 1968.
7. Williams A.F.: The Haddon matrix: its contribution to injury prevention and control. 3rd Natl. Conf. Inj. Prev. Control, 2000.
8. Murray W., Pratt S., Darby P.: Applying the Haddon Matrix in the context of work-related road safety. Semant. Sch., 2014.
9. Rustagi N., Kumar A., Norbu L., Vyas D.: Applying Haddon Matrix for evaluation of road crash victims in Delhi, India. Indian J. Sci. Technol., vol. 80, iss. 5, 2018.
10. Global Road Safety Partnership: The Roads Between Us, 2016.



11. Tubis A.: Risk Assessment in Road Transport – Strategic and Business Approach. *Journal od KONBiN*, no. 45, 2018, doi.org/10.2478/jok-2018-0016 .
12. Safety Cube: Project. co-funded by by Horiz. 2020 Framew. Program. Eur. Union, 2016.
13. Reurings M., Janssen T., Eenink R., Elvik R., Cardoso J., Stefan C.: Accident Prediction Models and Road Safety Impact Assessment a state of the art. Ripcord - Iserest, 2005.
14. SWOV: Road Infrastructure Safety Management Evaluation Tools (RISMET), 2012.
15. Theofilatos A., Yannis G.: A review of the effect of traffic and weather characteristics on road safety. *Accid. Anal. Prev.*, vol. 72, 2014.
16. Koetse M. J., Rietveld P.: The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 14, no. 3, 2009.
17. Codling P. J.: Weather and Road Accidents. *Clim. Resour. Econ. Act.*, 1974.
18. Brodsky H., Hakkert A. S.: Risk of a road accident in rainy weather. *Accid. Anal. Prev.*, vol. 20, no. 3, 1988.
19. Fridstrøm L., Ifver J., Ingebrigtsen S., Kulmala R., Thomsen L. K.: Measuring the contribution of randomness, exposure, weather, and daylight to the variation in road accident counts. *Accid. Anal. Prev.*, vol. 27, no. 1, 1995.
20. Changnon S. A.: Effects of summer precipitation on urban transportation. *Clim. Change*, vol. 32, no. 4, 1996.
21. Levine N., Kim K. E., Nitz L. H.: Daily fluctuations in Honolulu motor vehicle accident. *Accid. Anal. Prev.* 27, 1995.
22. Edwards J.: Speed Adjustment of Motorway Commuter Traffic to Inclement Weather. *Transp. Res. Part F*, 2, 1999.
23. Eisenberg D.: The mixed effects of precipitation on traffic crashes. *Accid. Anal. Prev.*, vol. 36, no. 4, 2004.
24. Bijleveld F., Churchill T.L: The influence of weather conditions on road safety:an assessment of the effect of precipitation and temperature. *SWOV Inst. Road Saf. Res.*, 2009.
25. Satterthwaite S.: An Assessment of Seasonal and Weather Effects on the Frequency of Road Accidents in California. *Accid. Anal. Prev.*, 8, 1976.
26. Fridstrom L., Liver J., Ingebrigtsen S., Kulmala R., Thomsen L.: Measuring the contribution of randomness, exposure, weather, and daylight to the variation in road accident counts. *Accid. Anal. Prev.*, vol. 27, 1995.
27. Chang L. Y., Chen W. C.: Data mining of tree-based models to analyze freeway accident frequency. *J Saf. Res.*, 2005.
28. Bergel-Hayat R., Depireb A.: Climate, Road Traffic and Road Risk: An Aggregate Approach, 2004.
29. Brijs T., Karlis D., Wets G.: Studying the effect of weather conditions on daily crash counts using a discrete time-series model. *Accid. Anal. Prev.*, vol. 40, no. 3, 2008.
30. Focant N., Martensen H.: Are there more accidents in the rain? Exploratory analysis of the influence of weather conditions on the number of road accidents in Belgium. *Belgian Road Saf. Institute.*, 2014.



31. Yannis G., Karlaftis M. G.: Weather Effects on Daily Traffic Accidents and Fatalities: A Time Series Count Data Approach. TRB 89th Annu. Meet., 2010.
32. Hermans E., Wets G., Van den Bossche F.: Describing the evolution in the number of highway deaths by a decomposition in exposure, accident risk and fatal risk. *Transp. Res. Rec.*, (1), 1950.
33. Martensen H., Focant N., Diependaele K.: Let's talk about the weather. Interpretation of short term changes in road accident outcomes. Proc. 6th Transp. Res. Arena, Warsaw 2016.
34. Hermans E., Brijs T., Stiers T., Offermans C.: The impact of weather conditions on road safety investigated on an hourly basis. Proc. 85th Annual Meet. Transp. Res. Board, Washington D.C. 2006.
35. Knapp K. K., Smithson L. D.: Winter storm event volume impact analysis using multiple-source archived monitoring. *Transportation Research Record*, no.1700, 2000.
36. Keay K., Simmonds I.: The association of rainfall and other weather variables with road traffic volume in Melbourne, Australia. *Anal. Prev.*, vol. 37(1), 2005.
37. Hansen B. G., Martin P. T., Perrin H. J., Meldrum D.: Delivering road weather information to the traveling public. *Transp. Res. Rec.*, no.1745, 2001.
38. Moen B. E.: Determinants of safety priorities in transport – the effect of personality, worry, optimism, attitudes and willingness to pay. *Saf. Sci.*, vol. 45(8), 2007.
39. Gray R. C., Quddus M. A., Evans A.: Injury severity analysis of accidents involving young male drivers in Great Britain. *J. Safety Res.*, vol. 39, no. 5, 2008.
40. Michalaki P., Quddus M. A., Pitfield D., Huetson A.: Exploring the factors affecting motorway accident severity in England using the generalised ordered logistic regression model. *J. Safety Res.*, vol. 55, 2015.
41. Gaca S., Kiec M.: Risk of accidents during darkness on roads with different technical standards. 16th Road Saf. Four Cont. Conf., China - Beijing, 2013.
42. Olszewski P., Szagała P., Wolański M., Zielińska A.: Pedestrian fatality risk in accidents at unsignalized zebra crosswalks in Poland. *Accid. Anal. Prev.*, vol. 84, 2015.
43. Johansson Ö., Wanvik P. O., Elvik R.: A new method for assessing the risk of accident associated with darkness. *Accid. Anal. Prev.*, vol. 41, no. 4, 2009.
44. Jamróz K., Budzyński M., Kustra W., Michalski L., Gaca S.: Tools for road infrastructure safety management - Polish experiences. *Transportation Research Procedia*, vol. 3, 2014.
45. Budzyński M., Jamróz K., Kustra W., Michalski L., Gaca S.: Road Infrastructure Safety Management in Poland. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 245, 2017.
46. Brzozowski K., Maczyński A., Ryguła A.: Wstępna ocena powtarzalności wskazań mobilnego czujnika warunków drogowych. *Eksploat. i testy. Autobusy*, 6/2018, 2018.
47. Szczerbiński J., Antosz M.: Automatyczny system zapobiegania gołoledzi. *Drogownictwo*, 4/2014, 2014.



## OCENA WPLYWU STANU NAWIERZCHNI I WARUNKÓW ATMOSFERYCZNYCH NA BEZPIECZEŃSTWO RUCHU DROGOWEGO

### 1. Opis zagadnienia

Zbiór czynników wpływających na wystąpienie wypadków drogowych może być klasyfikowany według czasu: przed, w trakcie, po wystąpieniu wypadku [1] oraz źródła (człowiek, droga, pojazd, otoczenie – warunki atmosferyczne, nadzór itp.) [2, 3, 4, 5]. Połączenie tych dwóch klasyfikacji to klasyka badań w zakresie bezpieczeństwa ruchu drogowego czyli macierz Haddona [6]. W kolejnych latach podlegała ona modyfikacji oraz rozwinięciu [7, 8, 9, 10] i nadal umożliwia porządkowanie, a także klasyfikowanie czynników wpływających na bezpieczeństwo ruchu drogowego. Dla różnych obszarów, odcinków, konkretnych lokalizacji możliwe jest budowanie takiej dedykowanej macierzy. Wskazane w macierzy Haddona (tabela 1) mokra lub śliska nawierzchnia, przyczepność nawierzchni, pora dnia są przedmiotem analiz przeprowadzonych przez autorów niniejszego artykułu. Wykonano ocenę, w jaki sposób warunki pogodowe wpływają na ryzyko wypadku, ze względu na znaczący udział tego czynnika w wypadkach drogowych (33% wszystkich ofiar śmiertelnych na polskich drogach uczestniczyło w wypadkach na mokrej nawierzchni).

**Tabela 1**

**Przykład macierzy Haddona, opracowanie własne na podstawie AASHTO 2010**

Czas/Źródło	Człowiek	Droga i jej otoczenie oraz czynniki zewnętrzne	Pojazd
<b>Przed wypadkiem</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• rozproszenie uwagi,</li> <li>• zmęczenie,</li> <li>• nieprawidłowa ocena sytuacji,</li> <li>• wiek kierowcy,</li> <li>• użycie telefonu komórkowego,</li> <li>• nieprawidłowe nawyki jazdy,</li> <li>• wpływ alkoholu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mokra, śliska nawierzchnia jezdni,</li> <li>• pora nocna</li> <li>• duże pochylenie podłużne,</li> <li>• nieprawidłowo funkcjonująca sygnalizacja świetlna</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jakość hamulców,</li> <li>• jakość opon</li> </ul>



cd. tabeli 1

<b>W trakcie wypadku</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• podatność na urazy, wiek, brak użycia pasa bezpieczeństwa, prędkość jazdy,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• przyczepność nawierzchni,</li> <li>• przeszkody w otoczeniu drogi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• występowanie i stan poduszek powietrznych,</li> <li>• konstrukcja zagłówka</li> </ul>
<b>Po wypadku</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wiek ofiary wypadku,</li> <li>• rodzaj i wielkość obrażeń</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• czas dotarcia na miejsce zdarzenia,</li> <li>• jakość leczenia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• łatwość wyciągnięcia z pojazdu ofiar wypadku</li> </ul>

Przeprowadzony przez autorów przegląd literatury [11], a także przedstawiony w ramach międzynarodowych projektów badawczych [12, 13, 14] pozwolił z szeregu grup czynników determinujących poziom bezpieczeństwa, wyróżnić te, które mają szczególne znaczenie: wpływ warunków pogodowych oraz pory dnia.

Theofilatos [15] zauważa wyraźny wpływ warunków pogodowych na bezpieczeństwo niż w przypadku natężenia ruchu. Występuje tutaj połączenie dwóch źródeł zagrożeń: (1) czynników zewnętrznych w postaci warunków atmosferycznych, pozostających poza kontrolą kierowcy oraz (2) czynników antropotechnicznych odnoszących się do stanu użytkowanego pojazdu, a także zachowań kierowcy, nad którymi posiada pełną lub prawie pełną kontrolę.

Literatura światowa pokazuje, że warunki pogodowe i ich potencjalne zmiany mają wpływ nie tylko na bezpieczeństwo drogowe, ale ogólnie na procesy transportowe [16]. Najczęstszym parametrem warunków atmosferycznych uwzględnionych w literaturze, są opady (opady deszczu, intensywność opadów, opady śniegu) [15]. Wiele badań pokazuje, że przy opadach deszczu i śniegu występuje więcej wypadków w porównaniu z warunkami bez opadów [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23]. Bijleveld i Churchill [24] w swoich badaniach dowiedli, iż na niebezpieczne zachowania transportowe wpływają w dużej mierze opady atmosferyczne. Natomiast Satterthwaite [25] argumentował, że na wypadki pojedynczych pojazdów największy wpływ miała właśnie deszczowa aura. Badania dotyczące wpływu opadów na bezpieczeństwo drogowe są dość spójne. W większości stwierdzono, że opady wiążą się ze zwiększoną liczbą wypadków [26, 21, 27, 28, 29]. Ale wybrane wyniki badań wskazują, że taki wpływ opadów na bezpieczeństwo nie jest jednoznaczny i nie dotyczy wszystkich rodzajów wypadków lub lokalizacji [30]. Wyniki badań prowadzonych w Grecji [31] wskazują na zmniejszenie ryzyka wystąpienia wypadków w czasie opadów deszczu. W Belgii wskazano na wzrost ryzyka wystąpienia wypadków z ofiarami rannymi, ale zmniejszenie ryzyka wypadków z ofiarami śmiertelnymi [32]. Inne wyniki z belgijskich badań wskazują na zmniejszenie ryzyka wypadków z motocyklistami i rowerzystami a jednocześnie wzrost ryzyka zderzeń pojazdów



[33]. Takie zróżnicowanie może świadczyć o innych zachowaniach użytkowników dróg podczas deszczu, co przekłada się na zmniejszenie lub wzrost ryzyka wystąpienia wypadków.

Inne badania wykazują wpływ liczby dni deszczowych w miesiącu na bezpieczeństwo [34]. Knapp i Smithson zauważają, że istnieją dowody na to, że mokra lub śnieżna pogoda, szczególnie w połączeniu z silnymi sztormami, może powstrzymać kierowców od rozpoczęcia podróży, czyli następuje zmniejszenie natężenia ruchu [35]. Ta redukcja jest na ogół rzędu kilku procent [36]. Unikanie potencjalnie niebezpiecznych warunków może być spowodowane oceną użytkownika drogi lub reakcją na informacje medialne o pogodzie [37].

Wielu użytkowników dróg unika niepotrzebnych podróży, szczególnie gdy występują opady śniegu [26]. Dotyczy to głównie pieszych, rowerzystów, motocyklistów. Stwierdzono również, że ciężkość wypadków zmniejsza się wraz z intensywnością opadów śniegu, ponieważ zaobserwowano wzrost liczby kolizji i wypadków z ofiarami lekko rannymi, a liczba poważnych wypadków (z ofiarami ciężko rannymi i śmiertelnymi) jest mniejsza [26, 14]. Zwykle przypisuje się to zmniejszonej prędkości w warunkach śniegowych. Istnieją również dowody na to, że nagły początek opadów deszczu lub śniegu może zwiększyć liczbę wypadków w większym stopniu niż np. w inne dni deszczowe lub śnieżne [21, 26].

Interesującym parametrem jest tzw. opóźniony efekt deszczu [23]. Parametr ten został po raz pierwszy opisany w 1988 r. [18]. Analiza pokazuje, że ryzyko związane z opadami wzrasta gwałtownie wraz z upływem czasu od ostatnich opadów. Na przykład 1 cm opadu zwiększa liczbę wypadków z ofiarami śmiertelnymi w ciągu dnia o około 3%, jeśli minęły dokładnie 2 dni od ostatniego opadu i o około 9%, w przypadku gdy upłynęło ponad 20 dni. Ta podstawowa zależność obowiązuje również w przypadku pozostałych wypadków. Można w związku z tym stwierdzić, że istotnym elementem wpływającym na opóźniony efekt deszczu jest percepcja ryzyka postrzeganego przez kierowcę. Moen [38] w swoich badaniach zwrócił uwagę na emocjonalną część postrzegania ryzyka. W oparciu o jego badania można wnioskować, iż emocje towarzyszące prowadzeniu pojazdu przez kierowcę oddziałują na styl jazdy. W przypadku występowania trudnych warunków pogodowych, duża liczba kierowców wysoko ocenia prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku, a także jego skutki. Z tego względu ograniczają oni swoją skłonność do podejmowania zachowań ryzykownych w trakcie trwających opadów. Po zakończonych opadach deszczu, gdy warunki atmosferyczne są dobre, skłonność do zachowań niebezpiecznych może wzrastać. Wynika to w dużej mierze z błędnej oceny stanu nawierzchni drogi przez kierowców.





Bardzo ważnym czynnikiem wpływającym na bezpieczeństwo ruchu drogowego jest również pora występowania wypadków (czwarta wyróżniona grupa czynników). Badania wskazują, że w porze nocnej występuje trzykrotnie większa ciężkość wypadków niż w porze dziennej [39, 40]. Badania prowadzone w Polsce [41] wskazują, że w porze nocnej występuje zdecydowany wzrost ryzyka wystąpienia wypadków z pieszymi. Podobne wyniki dają badania dotyczące bezpieczeństwa na przejściach dla pieszych prowadzone w miastach [42]. Przy braku odpowiedniego oświetlenia w porze nocnej występuje blisko czterokrotnie większe ryzyko śmierci pieszego niż w porze dziennej. Badania przeprowadzone w Szwecji, Norwegii i Holandii [43] wskazują na wzrost ryzyka wystąpienia wypadków z motocyklistami i rowerzystami w porze nocnej, ale tylko w obszarach zabudowanych. Celem przeprowadzonych przez autorów badań jest analiza liczby i rodzaju wypadków zachodzących w sytuacjach, gdy nawierzchnia drogi była mokra, ze szczególnym uwzględnieniem wypadków, którym towarzyszyły dobre warunki atmosferyczne (brak opadów). Dodatkowo przeprowadzono analizę połączenia wpływu mokrej nawierzchni i pory nocnej na poziom bezpieczeństwa. Na tej podstawie zaproponowane zostaną rozwiązania prewencyjne, wykorzystujące osiągnięcia technologiczne ostatnich lat.

## **2. Metoda badań**

Analizy dotyczą okresu 2012–2018 i obejmują wszystkie wypadki drogowe zarejestrowane w tym czasie na sieci dróg w Polsce. Wgląd w policyjną bazę danych pozwoliła na wyselekcjonowanie wybranych problemów, które szczegółowo zostaną przedstawione w dalszej części artykułu. W tym czasie zarejestrowano 238,9 tys. wypadków, w których rannych zostało ponad 290 tys. osób (w tym ponad 80 tys. ciężko) oraz zginęło blisko 22 tys. osób. Trendy liczby wypadków i ich ofiar były w analizowanym okresie malejące do 2015 r. Niestety w 2016 r. nastąpił wzrost liczby wypadków i przede wszystkim liczby ofiar śmiertelnych. Po spadku liczby ofiar śmiertelnych w 2017 r., ich liczba znowu wzrosła w kolejnym roku. Wynika z tego, że od 2016 r. wyhamowany został trend spadkowy liczby ofiar śmiertelnych. Poważnym problemem jest również ciężkość wypadków drogowych, na poziomie ok. 9 ofiar śmiertelnych na 100 wypadków, która w trzech ostatnich latach wzrastała. Należy też zwrócić uwagę na liczbę ofiar ciężko rannych, która od 2015 r. zmniejszyła się bardzo nieznacznie, przy wysokiej ciężkości ok. 34 ofiar ciężko rannych na 100 wypadków. Należy podkreślić, że w najgorszym 1991 r. liczba ofiar śmiertelnych na polskich drogach wynosiła 7,9 tys., co wskazuje na znaczącą poprawę poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego w Polsce. Niemniej jednak



liczba ok. 3 tys. ofiar śmiertelnych jest nie do zaakceptowania i wymaga podjęcia intensywnych działań naprawczych, m.in. w zakresie oddziaływania na użytkowników dróg oraz infrastruktury drogowej, przy wykorzystaniu najnowszej technologii.

Analizując największe problemy brd, zidentyfikowano m.in.: zagrożenia niechronionych uczestników ruchu drogowego (ok. 35% wszystkich ofiar śmiertelnych), wypadki związane z wypadnięciem z drogi i wywróceniem pojazdu lub jego uderzeniem w przeszkodę (ok. 20% wszystkich ofiar śmiertelnych), wypadki na mokrej nawierzchni – ponad 33% wszystkich ofiar śmiertelnych oraz wypadki w porze nocnej – ponad 45% wszystkich ofiar śmiertelnych (tabela 2). W artykule szczegółowo przeanalizowano dwa ostatnie problemy, rozpatrując również ich łączne występowanie.

**Tabela 2**

**Udział liczby ofiar śmiertelnych w wypadkach na nawierzchni mokrej, zaśnieżonej, oblodzonej oraz w porze nocnej w latach 2012–2018**

Rok	Nawierzchnia mokra, zaśnieżona, oblodzona		Pora nocna, świt, zmierzch	
	liczba	%	liczba	%
2012	1161	32,5	1739	48,7
2013	1128	33,6	1618	48,2
2014	1050	32,8	1547	48,3
2015	934	31,8	1408	47,9
2016	1105	36,5	1372	45,3
2017			1286	45,4
2018			1269	44,3

Przeprowadzono szczegółowe analizy statystyczne, dotyczące występowania wypadków wg klasy drogi, typu przekroju poprzecznego oraz odcinka drogi (prosta, łuk poziomy, pochylenie, rejon skrzyżowania) w latach 2014–2016. Dodatkowe analizy pozwoliły na zidentyfikowanie odcinków na sieci dróg krajowych o największym ryzyku wystąpienia wypadków na mokrej nawierzchni bez opadów. Takie analizy umożliwią wdrożenie na tych odcinkach technologii pozwalającej na zmianę zachowania użytkowników dróg, szczególnie kierowców. Analiza ryzyka została przeprowadzona w oparciu o szacowanie miar ogólnych ryzyka społecznego i indywidualnego i dotyczą lat 2014–2016. Jako miarę ogólną ryzyka społecznego poważnych wypadków na drogach krajowych (wypadki z ofiarami śmiertelnymi i/lub z ofiarami ciężko rannymi) przyjęto gęstość poważnych



wypadków  $GPW_{kp}$  (liczba poważnych wypadków/3 lata/km) i obliczono na podstawie wzoru:

$$GPW_{k,j} = LPW_{k,j} * L_j \quad (1)$$

gdzie:

$GPW_{k,j}$  – gęstość poważnych wypadków dla wybranego rodzaju zagrożeń  $k$  na  $j$ -tym odcinku drogi krajowej, w analizowanym okresie (wypadków/3 lata/km);

$LPW_{k,j}$  – liczba poważnych wypadków na  $j$ -tym odcinku drogi krajowej, dla wybranego rodzaju zagrożeń  $k$  (w tym przypadku wypadki na mokrej, śliskiej nawierzchni lub w porze nocnej), w analizowanym roku (liczba wypadków/rok);

$L_j$  – długość  $j$ -tego odcinka [km].

Jako miarę ogólną ryzyka indywidualnego poważnych wypadków przyjęto koncentrację poważnych wypadków  $KPW_{kp}$  (liczba poważnych wypadków/mln pojkm) i obliczono na podstawie wzoru:

$$KPW_{k,j} = LPW_{k,j} / PP_j \quad (2)$$

$$PP_j = (AADT_{i,j} * L_j * 365) / 1000000 \quad (3)$$

gdzie:

$KPW_{k,j}$  – koncentracja wypadków poważnych dla wybranego rodzaju zagrożeń  $k$  na  $j$ -tym odcinku drogi krajowej (w tym przypadku wypadki na mokrej, śliskiej nawierzchni lub w porze nocnej), w analizowanym okresie (liczba wypadków/mln poj km),

$LPW_{k,j}$  – liczba poważnych wypadków na  $j$ -tym odcinku drogi krajowej, dla wybranego rodzaju zagrożeń  $k$ , w analizowanym okresie (wypadków/3 lata),

$AADT_{i,j}$  – średni dobowy ruch roczny w roku  $i$ , na  $j$ -tym odcinku drogi krajowej (Poj./dobę),

$L_j$  – długość  $j$ -tego odcinka [km] [44, 45].



### 3. Wyniki

Wstępne analizy danych o zdarzeniach drogowych (w okresie 2012–2016) pozwoliły na wskazanie zagrożeń bezpieczeństwa ruchu drogowego związanych z czynnikami zewnętrznymi – warunki atmosferyczne i w konsekwencji stan nawierzchni (mokra) oraz porą dnia (noc, zmierzch, świt). W obu przypadkach występuje wpływ na zachowania kierowców, ale jednocześnie część z nich nie przykłada wystarczającej uwagi na zwiększone zagrożenia. Ich postrzeganie ryzyka jest nieadekwatne do zmienionych warunków ruchu (przyczepność do nawierzchni, wydłużenie drogi hamowania, ograniczona widoczność, ograniczona czytelność infrastruktury drogowej).

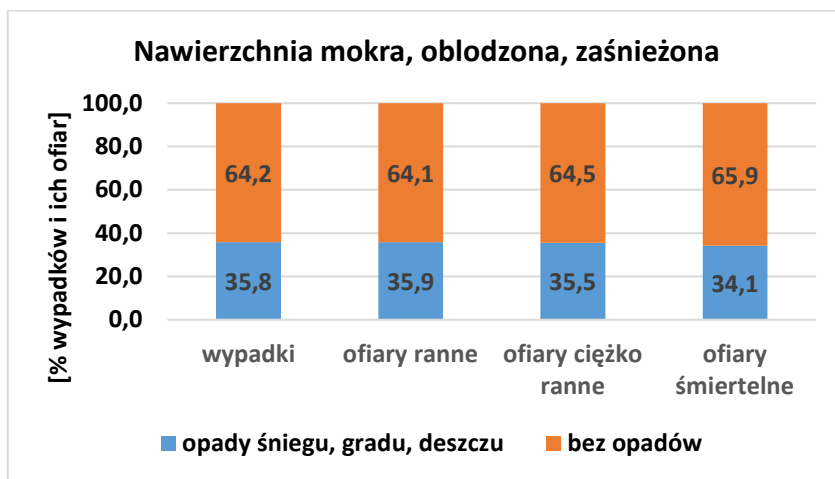
W tabeli 3 przedstawiono zestawienie danych o liczbie i udziale procentowym wypadków i ich ofiar ze względu na występowanie czynników zewnętrznych. Opady (deszcz, śnieg, grad) zwracają szczególną uwagę, są one okolicznością występującą w blisko 12% wszystkich wypadków, w których zginęło prawie 12% wszystkich ofiar śmiertelnych, podczas gdy na mokrej nawierzchni wystąpiło ponad 32% wszystkich wypadków, w wyniku których zginęło ponad 33% wszystkich ofiar śmiertelnych. Wskazuje to wyraźnie, że przy samych opadach ryzyko wystąpienia wypadku drogowego jest dużo niższe, niż przy mokrej nawierzchni bez opadów. Z punktu widzenia percepcji kierowcy, opady powodują zwiększenie jego uwagi, a w konsekwencji ostrożniejszą jazdę, zmniejszenie prędkości w ruchu drogowym. Brak takich opadów, pomimo mokrej nawierzchni powoduje wzrost ryzykownych zachowań, mniej ostrożną jazdę, zwiększoną prędkość jazdy. Efekt wpływu opadów lub ich braku jest widoczny na rys. 1 – przy mokrej nawierzchni, 66% ofiar śmiertelnych występuje przy braku opadów. Kolejnym zidentyfikowanym czynnikiem wpływającym na wzrost zagrożenia użytkowników dróg jest pora dnia. W porze bez światła dziennego (noc, zmierzch, świt) zarejestrowano w analizowanym okresie 31% wszystkich wypadków i aż 48% wszystkich ofiar śmiertelnych. W porze tej występuje bardzo wysoka ciężkość wypadków – 14 ofiar śmiertelnych na 100 wypadków, przy wartości 7 w porze dziennej. Szczególnie wysoka ciężkość występuje w porze nocnej przy braku oświetlenia – 24 ofiary śmiertelne na 100 wypadków. Na rys. 2 przedstawiono łączny wpływ stanu nawierzchni i pory dnia na bezpieczeństwo użytkowników ruchu drogowego. Pora poza światłem dziennym jest okolicznością występującą przy ponad 59% ofiar śmiertelnych zarejestrowanych w wypadkach na mokrej, zaśnieżonej lub oblodzonej nawierzchni. Daje to prawie 20% wszystkich ofiar śmiertelnych wypadków drogowych. Ze względu na to należy zwrócić szczególną uwagę na łączne występowania tych dwóch czynników – stan nawierzchni i pora dnia. Konieczne jest również podjęcie działań naprawczych, szczególnie z grupy

działań proaktywnych. Będzie to przedmiotem kolejnych badań prowadzonych przez autorów.

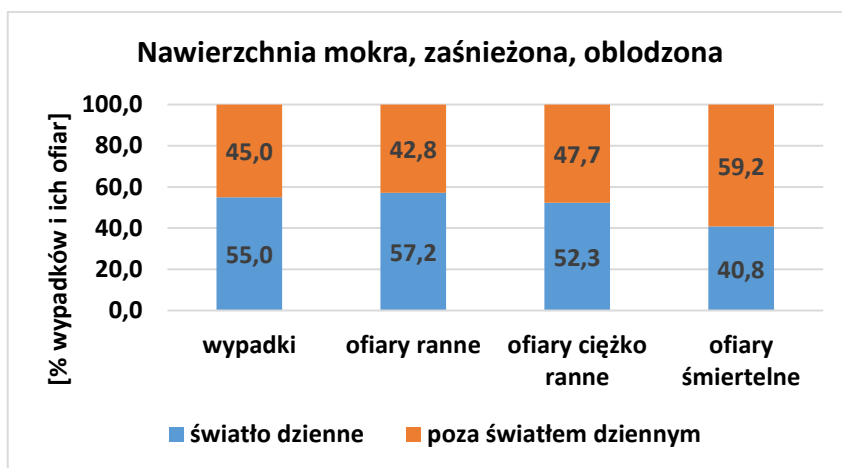
**Tabela 3**

**Występowanie wybranych czynników zewnętrznych, jako okoliczności wypadków drogowych**

Czynnik	Liczba wypadków LW	Liczba ofiar rannych LR	Liczba ofiar ciężko rannych LCR	Liczba ofiar śmiertelnych LZ	Udział % LW	Udział % LR	Udział % LCR	Udział % LZ
<b>Stan nawierzchni</b>								
Mokra	48605	60312	16396	4766	27,9	28,3	27,9	29,6
Oblodzona, zaśnieżona	7502	9988	2284	579	4,3	4,7	3,9	3,6
<b>Warunki atmosferyczne</b>								
Opady deszczu	16893	21014	5665	1586	9,7	9,9	9,7	9,9
Opady śniegu, gradu	3674	4799	1127	289	2,1	2,3	1,9	1,8



**Rys. 1.** Wpływ opadów lub ich braku na poziom bezpieczeństwa przy mokrej, zaśnieżonej lub oblodzonej nawierzchni



**Rys. 2.** Wpływ pory dnia na poziom bezpieczeństwa przy mokrej, zaśnieżonej lub oblodzonej nawierzchni

Analizując szczegółowo występowanie wypadków na mokrej, zaśnieżonej lub oblodzonej nawierzchni ze względu na odcinek drogi stwierdzono, że: największy udział tego typu wypadków występuje na odcinkach prostych (56% wypadków, 65% ofiar śmiertelnych), na skrzyżowaniach (25% wypadków, 12% ofiar śmiertelnych) oraz na łukach poziomych (17% wypadków, 20% ofiar śmiertelnych). Największą ciężkość zarejestrowano w przypadku łuków poziomych (13 ofiar śmiertelnych na 100 wypadków). Ze względu na długość sieci drogowej, najbardziej efektywne będą działania podjęte w rejonie łuków poziomych – poprawa przyczepności, bezpieczne otoczenie, oznakowanie poprawiające percepcję kierowcy, znaki zmiennej treści informujące o stanie nawierzchni oraz służące zarządzaniu prędkością.

Inne analizy dotyczyły klasy drogi i rodzaju przekroju poprzecznego. Wynika z nich, że w przypadku autostrad, zarejestrowano 28% wypadków przy nawierzchni o obniżonej przyczepności, w których ciężko rannych zostało 25% a zginęło 20% z wszystkich ofiar śmiertelnych na tej klasie drogi. W przypadku dróg ekspresowych zarejestrowano 31% wypadków przy nawierzchni o obniżonej przyczepności, w których ciężko rannych zostało 30% a zginęło 22% z wszystkich ofiar śmiertelnych na tej klasie drogi. Na pozostałych drogach dwujezdniowych zarejestrowano 31% wypadków przy nawierzchni o obniżonej przyczepności, w których ciężko rannych zostało 31% a zginęło 33% z wszystkich ofiar śmiertelnych. W przypadku dróg dwujezdniowych, w tym autostrad i dróg ekspresowych bardzo poważnym problemem jest zaleganie wody na nawierzchni przy zbyt małych pochyleniach podłużnych i poprzecznych, co występuje w części ramp drogowych.



Wykonano również analizę ryzyka społecznego dla dróg krajowych, ze względu na występowanie nawierzchni mokrej bez opadów deszczu. Na podstawie tej analizy zidentyfikowano odcinki dróg krajowych o największym ryzyku wystąpienia tych wypadków. W miejscach tych należy wdrażać rozwiązania wskazane w punkcie 5. Lokalizację najbardziej niebezpiecznych odcinków przedstawiono w tabeli 4. Przyjęto kryterium min. 3 wypadków poważnych w ciągu trzech lat. Zwraca uwagę, że zdecydowana większość odcinków jest położona na południu Polski.

**Tabela 4**

**Lokalizacja odcinków z największym ryzykiem społecznym wystąpienia wypadków na mokrej, zaśniewanej lub oblodzonej nawierzchni – drogi krajowe w latach 2014–2016**

Droga	Km	Województwo	Powiat	Liczba wypadków LW	Liczba ofiar rannych LR	liczba ofiar ciężko rannych LCR	liczba ofiar śmiertelnych LZ	Gęstość wypadków poważnych GPW
K7	607,8 - 608,2	małopolskie	miechowski	9	21	13	4	18,0
K7	719,9 - 720,5	małopolskie	myślenicki	9	19	9	3	15,0
K9	212,3 - 212,8	podkarpackie	strzyżowski	6	14	6	3	12,0
K9	224,0 - 224,5	podkarpackie	strzyżowski	5	9	7	7	10,0
K3	423,4 - 424	dolnośląskie	jaworski	5	5	3	2	8,3
K35	60,0 - 60,8	dolnośląskie	świdnicki	5	10	6	0	8,3
K16	301,1 - 301,6	warmińsko - mazurskie	ełcki	4	6	3	1	8,0
K44	95,3 - 95,8	małopolskie	krakowski	4	2	2	2	8,0
K62	87,2 - 87,7	kujawsko - pomorskie	włocławski	4	3	3	2	8,0
K7	572,3 - 572,8	świętokrzyskie	jędrzejowski	4	3	3	3	8,0
K74	63,5 - 64,0	świętokrzyskie	kielecki	4	13	7	3	8,0
K5	330,4 - 331,1	dolnośląskie	trzebnicki	5	12	6	3	7,1
K28	81,2-81,8	małopolskie	limanowski	4	4	4	0	6,7



## 4. Podsumowanie i kierunki działań

Wyniki analiz wskazują, że stan nawierzchni drogi ma silny wpływ na liczbę, rodzaj i skutki wypadków zarejestrowanych na polskich drogach (35% ofiar śmiertelnych w wypadkach przy nawierzchni mokrej, zaśniewanej lub oblodzonej). Z tego też względu coraz większego znaczenia nabierają nowoczesne rozwiązania technologiczne pozwalające ocenić stan nawierzchni i dostarczyć informacje na jej temat kierowcom. Jednym z podstawowych narzędzi są czujniki określające stan nawierzchni. Czujniki te są obecnie standardowym wyposażeniem stacji meteorologicznych wykorzystywanych w ramach instalacji inteligentnych systemów transportowych (ITS) [46]. Często informacje pochodzące z tych czujników wyświetlane są bezpośrednio na znakach o zmiennej treści (VMS). Dzięki temu kierowcy mają aktualną informację o stanie nawierzchni drogi, którą właśnie się poruszają. Impulsem do instalacji, obok stacji meteorologicznych, czujników stanu nawierzchni było zrozumienie, że w różnych warunkach pogodowych, przy różnych lokalizacjach i wreszcie ze względu na zróżnicowane zdolności akumulacji ciepła przez różne typy nawierzchni drogowych, prosta informacja o warunkach atmosferycznych i temperaturze powietrza była dalece nie wystarczająca [47]. Czujniki określają stan nawierzchni i kwalifikują go jako: sucha, wilgotna, mokra, oblodzona, pokryta szronem, śniegiem lub błotem pośniegowym. Możliwa jest również ocena stanu śliskości nawierzchni, wyrażonej w skali odniesionej do estymowanej wartości współczynnika tarcia, jakie powoduje kontakt opony samochodu z suchą nawierzchnią jezdni. Dla jezdni suchej, przyczepność nawierzchni wyznaczana przez skalibrowany czujnik wynosi około 0.8. Wartość ta spada przy pojawieniu się wody i osiąga poziom 0.1 w przypadku wystąpienia gołoledzi. Rozwiązania, które pozwolą w czasie rzeczywistym docierać z informacją o stanie nawierzchni do kierowców, pozwolą na zmniejszenie ryzykownych zachowań kierujących. Rozwiązania te, zgodnie z obecnymi trendami technologicznymi powinny być zgodne z koncepcją SMART, czyli wykorzystują dostępne technologie informacyjno-komunikacyjne w celu zwiększenia interaktywności, sprawności i bezpieczeństwa infrastruktury drogowej. Integracja informacji przekazywanych z czujników w nawierzchni drogowej ze znakami VMS, umożliwi zarządzanie prędkością na odcinkach o podwyższonym ryzyku wystąpienia wypadków związanych ze stanem nawierzchni, wynikających z warunków pogodowych.

Poprawa bezpieczeństwa związanego z eliminowaniem wypadków w porze nocnej, a szczególnie zmniejszenie liczby ofiar śmiertelnych (45% wszystkich ofiar śmiertelnych w wypadkach na drogach w Polsce) i ich ciężkości wymaga podjęcia działań w zakresie poprawy jakości oświetlenia i oznakowania na drogach.





Problemem jest również znaczne przekraczanie prędkości w porze nocnej, szczególnie w obszarach zabudowanych, czego jedną z przyczyn jest podniesiony limit prędkości (60 km/h) obowiązujący w obszarze zabudowanym w godzinach 24.00 – 6.00. Należy przywrócić jednolity limit 50 km/h, z jednej strony ujednolici przepisy z obowiązującymi w innych krajach UE, a z drugiej strony wpłynie na zmniejszenie ciężkości wypadków rejestrowanych w porze nocnej.

Łączne występowanie pory nocnej i nawierzchni mokrej, zaśnieżonej lub oblodzonej przyczyniło się do wystąpienia 20% wszystkich ofiar śmiertelnych wypadków drogowych. Konieczne jest wdrażanie działań naprawczych, szczególnie z grupy działań proaktywnych (poprawa jakości oświetlenia, oznakowania, zarządzanie prędkością, znaki zmiennej treści). Dodatkowo bardzo istotnymi czynnikami wpływającymi na bezpieczeństwo, a związanymi ze stanem nawierzchni będą temperatura, wielkość opadów, współczynnik przyczepności suchej nawierzchni. Będzie to przedmiotem kolejnych badań realizowanych przez autorów.

## 5. Literatura

1. AASHTO, Highway Safety Manual. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington 2010.
2. Treat JR et al.: Tri-Level Study of the Causes of Traffic Accidents. Res. Rep. Compil. by Inst. Res. Public Saf. to US Department Transp. Washing. DC, 1979.
3. Vogel L., Bester C. J.: A relationship between accident types and causes. Proc. 24th South. African Transp. Conf., 2005.
4. PIARC: Road accident investigation guidelines for road engineers, 2007.
5. NCHRP: Application of Human Factors Guidelines for Road Systems. Rep. 600, Transp. Res. Board, 2016.
6. Haddon W.: The changing approach to the epidemiology, prevention, and amelioration of trauma: the transition to approaches etiologically rather than descriptively based. Am. J. Public Health, 1968.
7. Williams A.F.: The Haddon matrix: its contribution to injury prevention and control. 3rd Natl. Conf. Inj. Prev. Control, 2000.
8. Murray W., Pratt S., Darby P.: Applying the Haddon Matrix in the context of work-related road safety. Semant. Sch., 2014.
9. Rustagi N., Kumar A., Norbu L., Vyas D.: Applying Haddon Matrix for evaluation of road crash victims in Delhi, India. Indian J. Sci. Technol., vol. 80, iss. 5, 2018.
10. Global Road Safety Partnership: The Roads Between Us, 2016.
11. Tubis A.: Risk Assessment in Road Transport – Strategic and Business Approach. Journal od KONBiN, no. 45, 2018, doi.org/10.2478/jok-2018-0016 .



12. Safety Cube: Project. co-funded by by Horiz. 2020 Framew. Program. Eur. Union, 2016.
13. Reurings M., Janssen T., Eenink R., Elvik R., Cardoso J., Stefan C.: Accident Prediction Models and Road Safety Impact Assessment a state of the art. Ripcord - Iserest, 2005.
14. SWOV: Road Infrastructure Safety Management Evaluation Tools (RISMET), 2012.
15. Theofilatos A., Yannis G.: A review of the effect of traffic and weather characteristics on road safety. *Accid. Anal. Prev.*, vol. 72, 2014.
16. Koetse M. J., Rietveld P.: The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 14, no. 3, 2009.
17. Codling P. J.: Weather and Road Accidents. *Clim. Resour. Econ. Act.*, 1974.
18. Brodsky H., Hakkert A. S.: Risk of a road accident in rainy weather. *Accid. Anal. Prev.*, vol. 20, no. 3, 1988.
19. Fridstrøm L., Ifver J., Ingebrigtsen S., Kulmala R., Thomsen L. K.: Measuring the contribution of randomness, exposure, weather, and daylight to the variation in road accident counts. *Accid. Anal. Prev.*, vol. 27, no. 1, 1995.
20. Changnon S. A.: Effects of summer precipitation on urban transportation. *Clim. Change*, vol. 32, no. 4, 1996.
21. Levine N., Kim K. E., Nitz L. H.: Daily fluctuations in Honolulu motor vehicle accident. *Accid. Anal. Prev.* 27, 1995.
22. Edwards J.: Speed Adjustment of Motorway Commuter Traffic to Inclement Weather. *Transp. Res. Part F*, 2, 1999.
23. Eisenberg D.: The mixed effects of precipitation on traffic crashes. *Accid. Anal. Prev.*, vol. 36, no. 4, 2004.
24. Bijleveld F., Churchill T.L.: The influence of weather conditions on road safety:an assessment of the effect of precipitation and temperature. SWOV Inst. Road Saf. Res., 2009.
25. Satterthwaite S.: An Assessment of Seasonal and Weather Effects on the Frequency of Road Accidents in California. *Accid. Anal. Prev.*, 8, 1976.
26. Fridstrom L., Liver J., Ingebrigtsen S., Kulmala R., Thomsen L.: Measuring the contribution of randomness, exposure, weather, and daylight to the variation in road accident counts. *Accid. Anal. Prev.*, vol. 27, 1995.
27. Chang L. Y., Chen W. C.: Data mining of tree-based models to analyze freeway accident frequency. *J Saf. Res.*, 2005.
28. Bergel-Hayat R., Depireb A.: Climate, Road Traffic and Road Risk: An Aggregate Approach, 2004.
29. Brijs T., Karlis D., Wets G.: Studying the effect of weather conditions on daily crash counts using a discrete time-series model. *Accid. Anal. Prev.*, vol. 40, no. 3, 2008.
30. Focant N., Martensen H.: Are there more accidents in the rain? Exploratory analysis of the influence of weather conditions on the number of road accidents in Belgium. Belgian Road Saf. Institute., 2014.



31. Yannis G., Karlaftis M. G.: Weather Effects on Daily Traffic Accidents and Fatalities: A Time Series Count Data Approach. TRB 89th Annu. Meet., 2010.
32. Hermans E., Wets G., Van den Bossche F.: Describing the evolution in the number of highway deaths by a decomposition in exposure, accident risk and fatal risk. Transp. Res. Rec, (1), 1950.
33. Martensen H., Focant N., Diependaele K.: Let's talk about the weather. Interpretation of short term changes in road accident outcomes. Proc. 6th Transp. Res. Arena, Warsaw 2016.
34. Hermans E., Brijs T., Stiers T., Offermans C.: The impact of weather conditions on road safety investigated on an hourly basis. Proc. 85th Annual Meet. Transp. Res. Board, Washington D.C. 2006.
35. Knapp K. K., Smithson L. D.: Winter storm event volume impact analysis using multiple-source archived monitoring. Transportation Research Record, no.1700, 2000.
36. Keay K., Simmonds I.: The association of rainfall and other weather variables with road traffic volume in Melbourne, Australia. Anal. Prev., vol. 37(1), 2005.
37. Hansen B. G., Martin P. T., Perrin H. J., Meldrum D.: Delivering road weather information to the traveling public. Transp. Res. Rec., no.1745, 2001.
38. Moen B. E.: Determinants of safety priorities in transport – the effect of personality, worry, optimism, attitudes and willingness to pay. Saf. Sci., vol. 45(8), 2007.
39. Gray R. C., Quddus M. A., Evans A.: Injury severity analysis of accidents involving young male drivers in Great Britain. J. Safety Res., vol. 39, no. 5, 2008.
40. Michalaki P., Quddus M. A., Pitfield D., Huetson A.: Exploring the factors affecting motorway accident severity in England using the generalised ordered logistic regression model. J. Safety Res., vol. 55, 2015.
41. Gaca S., Kiec M.: Risk of accidents during darkness on roads with different technical standards. 16th Road Saf. Four Cont. Conf., China - Beijing, 2013.
42. Olszewski P., Szagała P., Wolański M., Zielińska A.: Pedestrian fatality risk in accidents at unsignalized zebra crosswalks in Poland. Accid. Anal. Prev., vol. 84, 2015.
43. Johansson Ö., Wanvik P. O., Elvik R.: A new method for assessing the risk of accident associated with darkness. Accid. Anal. Prev., vol. 41, no. 4, 2009.
44. Jamróz K., Budzyński M., Kustra W., Michalski L., Gaca S.: Tools for road infrastructure safety management - Polish experiences. Transportation Research Procedia, vol. 3, 2014.
45. Budzyński M., Jamróz K., Kustra W., Michalski L., Gaca S.: Road Infrastructure Safety Management in Poland. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 245, 2017.
46. Brzozowski K., Maczyński A., Ryguła A.: Wstępna ocena powtarzalności wskazań mobilnego czujnika warunków drogowych. Eksploat. i testy. Autobusy, 6/2018, 2018.
47. Szczerbiński J., Antosz M.: Automatyczny system zapobiegania gołoledzi. Drogownictwo, 4/2014, 2014.

