PRZEMYSŁAW HARASIM¹⁾MARCIN GAJEWSKI²⁾

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF PAVEMENT UNEVENNESS ON HEAVY VEHICLES' AXLE LOADS VARIATIONS WITH THE USE OF TSD DEFLECTOMETER

BADANIA WPŁYWU NIERÓWNOŚCI NAWIERZCHNI NA ZMIANY NACISKÓW OSI POJAZDÓW CIĘŻKICH Z WYKORZYSTANIEM UGIĘCIOMIERZA TSD

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono wyniki badań zależności pomiędzy stanem technicznym nawierzchni, wyrażonym parametrem równości podłużnej *IRI*, a wynikającymi z niego zmianami nacisków osi pojazdów ciężkich. W tym celu wykorzystano wyniki pomiarów wykonanych ugięciomierzem laserowym TSD, który wśród mierzonych parametrów rejestruje m.in. profil podłużny nawierzchni oraz naciski osi pomiarowej. Na podstawie danych zgromadzonych podczas rutynowych pomiarów, wytypowano odcinki reprezentatywne do badań, a wyselekcjonowane dane poddano analizom statystycznym. Pod uwagę brano zarówno wyniki pomiarów równości jak i powiązane z nimi naciski osi pojazdu. Omówiono zagadnienie równości podłużnej w kontekście wymagań stawianym nawierzchniom drogowym, a także określono stopień korelacji wskaźnika *IRI* z zarejestrowanymi naciskami osi pojazdu pomiarowego. Określona została ilościowa ocena wpływu nierówności na wielkość nacisków pojazdów ciężkich, uzupełniona o analizę zmian trwałości nawierzchni asfaltowych opartą na uzyskanych danych.

SŁOWA KLUCZOWE: IRI, naciski osi, równość nawierzchni, TSD, ugięciomierz laserowy.

ABSTRACT. The article presents the results of research on the relation between the technical condition of the pavement, expressed by the International Roughness Index, and heavy vehicles' axle loads variations. To this end, Traffic Speed Deflectometer has been used, which records such parameters as a longitudinal profile of the pavement, and the measurement axle loads. Based on the data collected during routine measurements, sections representative for the study have been selected, and the selected data has been subjected to statistical analyses. Both the results of the evenness measurements and the associated axle loads of the vehicle have been taken into consideration. The problem of longitudinal evenness was discussed in the context of the pavement condition assessment, and the degree of correlation of the IRI index with the recorded axle loads of the measuring vehicle was determined. A quantitative evaluation of the impact of unevenness on the vehicles axle loads was determined, supplemented with an analysis of asphalt pavement durability changes based on the obtained data.

KEYWORDS: axle loads, IRI, pavement unevenness, Traffic Speed Deflectometer, TSD.

DOI: 10.7409/rabdim.021.025

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; pharasim@ibdim.edu.pl (✉)

²⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; mgajewski@ibdim.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Parametr równości podłużnej nawierzchni wyrażony międzynarodowym wskaźnikiem *IRI* jest podstawowym kryterium do oceny stanu technicznego nawierzchni zarówno w Polsce jak i na świecie. Jest to parametr odpowiadający za tzw. odczucie komfortu, który wraz ze wzrostem klasy drogi powinien być coraz większy [1], [2]. Parametr ten pozwala również określić, kiedy stan drogi pogorszy się na tyle, że wymaga ona zbiegów utrzymaniowych albo remontu.

Od około 10 lat laboratorium diagnostyczne IBDiM dysponuje tzw. ugięciomierzem laserowym TSD [3]. Urządzenie służy do ciągłego pomiaru ugięć oraz oceny nośności nawierzchni drogowej [4], [5]. Dodatkowo rejestrowane są dane dotyczące równości podłużnej nawierzchni oraz w sposób pośredni (poprzez pomiar odkształceń na osi pojazdu i odpowiednie skalowanie) naciski osi pojazdu na nawierzchnię. Dysponujemy zatem uporządkowaną przez czas/odległość bazą danych, którą w niniejszej pracy poddajemy analizie. Aby zapewnić obiektywność przeprowadzonych badań wybrano sześć kilometrowych odcinków dróg w trzech klasach stanu równości nawierzchni. Uzyskane z pomiarów wskaźniki *IRI* zaprezentowano na wykresach w zależności od długości odcinka uśrednienia, wskazując że ten parametr ma także istotny wpływ na jego wartość. Na wstępie przeprowadzono analizę statystyczną zbioru otrzymanych z pomiarów danych weryfikując m.in. hipotezę o normalności rozkładu zarejestrowanych danych w przypadku nacisków osi. Następnie podjęto próbę określenia korelacji między wskaźnikiem *IRI* a wybranymi wielkościami statystycznymi dotyczącym zarejestrowanych nacisków osi. Należy zaznaczyć, że w przypadku nacisków osi średnia wartość nie odnosi się bezpośrednio do nierówności nawierzchni, lecz wykorzystywana jest do normowania pojedynczych odczytów z czujników jako przybliżenie obciążenia statycznego osi. W pracy przyjęto, że z nierównością nawierzchni dla danego odcinka jest związana rozpiętość przedziału, tj. różnica między maksymalnym a minimalnym unormowanym naciskiem osi. Tego typu podejście w większym stopniu pozwala uwzględnić brak symetrii rozkładu danych pomiarowych w stosunku do nacisku statycznego na oś pojazdu.

Wpływ dynamicznego obciążenia nawierzchni przez ruch pojazdów ciężkich był niejednokrotnie analizowany przez różne ośrodki badawcze, m.in. [6 - 9]. Rozpatrywano w nich zależności pomiędzy konfiguracją zawieszenia pojazdu a obciążeniami nawierzchni oraz wpływem nierówności nawierzchni na wielkość tych oddziaływań. Kluczowe z punktu widzenia przeprowadzonych analiz jest określenie zależności pomiędzy siłą dynamiczną powstałą na skutek ruchu pojazdu a siłą statyczną wynikającą z jego masy własnej. W tym celu

1. INTRODUCTION

The International Roughness Index *IRI*, a parameter measuring the longitudinal roughness profile of the road surface, is a world wide known and the most often used measure of the condition of pavement. It represents the so-called ride comfort, which should increase with the importance class of the road. *IRI* can also be used to support decisions on undertaking road maintenance treatments or renewals works.

For about 10 years now the IBDiM's pavement survey laboratory has been using the traffic speed deflectometer (TSD), a pavement evaluation device employing Doppler laser-based technology [3]. It continuously measures the deflections and in this way evaluates the bearing capacity of the road pavement [4], [5]. Pavement roughness data are also recorded and, indirectly (i.e. by measurement of strains on the vehicle axle and appropriate scaling) also the axle loads applied by the test vehicle. In this way we get a data base sorted by time/distance which will be analysed in this article. In order to ensure the objectivity of the research, the total number of six 1 km long road sections were selected in three classes of pavement roughness. The *IRI* indices obtained from the measurements are presented in diagrams depending on the length of the averaging segment length, indicating that this parameter also has a significant effect on its value. At the beginning, a statistical analysis of the set of data obtained from measurements was carried out, which included also the verification of the hypothesis about the normality of the distribution of data recorded for axle loads. Next, an attempt was made to determine the correlation between the *IRI* index and the selected statistical values concerning the recorded axle loads. It should be noted that in the case of axle loads, the mean value does not refer directly to the road surface defects, but instead it is used to standardise single sensor readings as an approximation of a static axle load. For the purpose of this analysis, it was assumed that a parameter related to the roughness of the pavement surface is the range of the set of data, i.e. the difference between the maximum and minimum values of the standardised axle load obtained for a given test section. This allows to put more emphasis on the lack of symmetry of the distribution of the measurement data in relation to the static axle load.

The influence of the dynamic loading of the pavement by heavy vehicles was analysed in a number of research projects, for instance in [6 - 9]. The relationships between the vehicle suspension configuration and loading of the pavement and the influence of pavement roughness on the magnitude of these impacts were analysed as part of this

stosowany jest wskaźnik *DLC* (ang. *Dynamic Load Coefficient*) [6] wyznaczany z równania:

$$DLC = \frac{\sigma}{\bar{F}}, \quad (1)$$

gdzie:

σ – odchylenie standardowe zarejestrowanych wartości obciążenia osi,

\bar{F} – średnia rozkładu zarejestrowanych obciążeń osi równa obciążeniu statycznemu.

Wskaźnik *DLC* stanowi prostą miarę wielkości zmian dynamicznych obciążenia osi pojazdu wynikających z kombinacji równości nawierzchni i prędkości pojazdu. Punktem odniesienia byłaby tu sytuacja, w której poruszający się po idealnie równej drodze pojazd dawał wskaźniki zbliżone do zera. Maksymalne zaobserwowane wskaźniki *DLC* mieszczą się w przedziale 0,30 - 0,35 [10], [11] i zostały zarejestrowane dla pojazdów o zawieszeniu typu resorowego. W przypadku typowych pojazdów ciężarowych z zwieszieniami pneumatycznymi maksymalne wartości wskaźnika *DLC* mogą być nawet o rząd wielkości mniejsze [8].

2. UGIĘCIOMIERZ LASEROWY TSD

Ugięciomierz laserowy TSD (ang. *Traffic Speed Deflectometer*) jest zaawansowanym systemem pomiarowym służącym do sieciowych pomiarów nośności dróg (Rys. 1). Zasada działania urządzenia polega na bezpośrednim pomiarze prędkości pionowych przemieszczeń nawierzchni, które w ramach opracowanych algorytmów przeliczane są na ugięcia nawierzchni. Siłą wymuszającą pionowe przemieszczenia jest pojedyncza oś pojazdu obciążona naciskiem 10 ton. Oprócz standardowych danych opisujących czasę ugięć nawierzchni, podczas pomiarów zbierane są również informacje dotyczące profilu podłużnego nawierzchni oraz wartości nacisków kół osi pomiarowej. Pierwsze służą do sterowania położeniem belki pomiarowej, drugie do standaryzacji wyników ugięć. Pomiar odbywa się w normalnych warunkach ruchowych, tzn. określonych przepisami i warunkami drogowymi, stąd przejazd pomiarowy TSD można uznać jako typowy dla przejazdu pojazdu ciężarowego [12]. Spośród wielu zarejestrowanych parametrów pomiarowych do analiz wykorzystano jedynie wyniki pomiarów równości podłużnej oraz nacisków osi pomiarowej. W badaniach nie uwzględniono wyników pomiarów ugięć nawierzchni. Szczegółowe informacje na temat metodyki pomiaru oraz zastosowania TSD zawarte są m.in. w [13 - 15].

study. From the point of view of the analyses, it is crucial to determine the relationship between the dynamic force generated by movement of the vehicle and the static force generated by its kerb weight. For this purpose, the Dynamic Load Coefficient (*DLC*) [6] was determined from the following equation:

$$DLC = \frac{\sigma}{\bar{F}}, \quad (1)$$

where:

σ – standard deviation of the recorded axle load values,

\bar{F} – mean of the distribution of the recorded axle loads equal to the static load.

The value of *DLC* is a simple measure of the magnitude of dynamic changes in the vehicle axle load resulting from the combination of the pavement roughness and the speed of travel. A point of reference in this context would be movement of a vehicle on a perfectly smooth road surface giving coefficients close to zero. The maximum observed *DLCs* are in the range of 0.30 - 0.35 [10], [11] and were recorded for vehicles with spring suspension. In the case of typical lorries with air suspension, the maximum values of the *DLC* can be even an order of magnitude lower [8].

2. TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER (TSD)

Traffic Speed Deflectometer is an advanced measuring system for field measurements of the bearing capacity of road pavements (Fig. 1). The principle of the device's operation is based on the direct measurement of the velocity of vertical displacements of the pavement, which are converted into pavement deflections by means of special algorithms. Vertical displacements are induced by 10 tonne single axle load. The longitudinal roughness data and forces applied by the wheels of the test axle are recorded in addition to the data on the pavement deflection bowl, which are gathered as standard. These data are used for different purposes, i.e. the latter for controlling the position of the measuring beam, and the former for standardization of the deflection results. Measurements are carried out under normal traffic conditions defined by the highway code and the situation on the road at the time, and hence the test run of a TSD vehicle can be regarded as a typical pass of a lorry [12]. Only longitudinal roughness and axle load data were chosen for the analyses from among the recorded parameters. Pavement deflections were left out. The information on the method of measurement and use of TSD can be found, for example in [13 - 15].

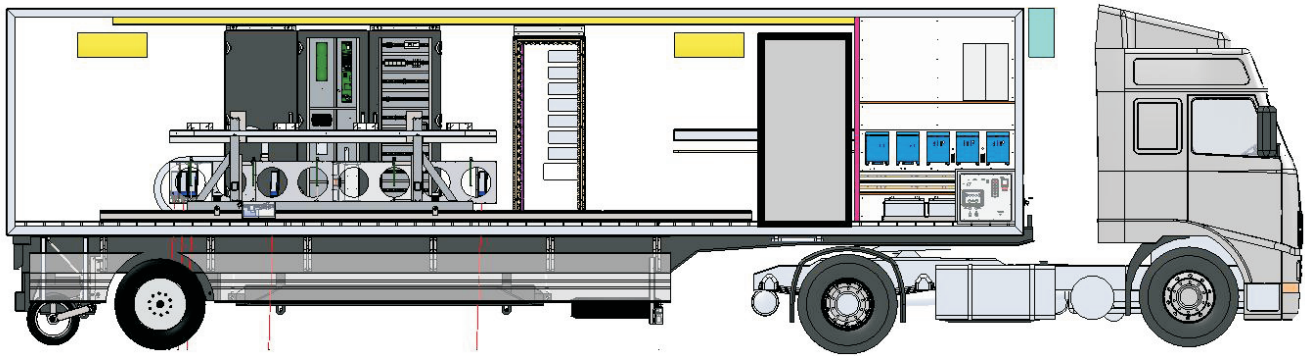


Fig. 1. Measurement system of TSD device (source: Greenwood Engineering)

Rys.1. System pomiarowy TSD (źródło: Greenwood Engineering)

3. WYBÓR ODCINKÓW DO ANALIZ

W analizach wykorzystano dane zgromadzone podczas kampanii pomiarowych na sieci dróg krajowych. Drogi krajowe stanowią główne szlaki tranzytowe, na których z zasady nie obowiązują ograniczenia ruchu pojazdów ciężarowych. Konstrukcyjnie przystosowane są do przenoszenia obciążeń od ruchu ciężkiego, dlatego stanowią reprezentatywną próbkę do badań. Jako kryterium wyboru odcinków badawczych przyjęto stopień degradacji nawierzchni, wyrażony parametrem równości podłużnej *IRI* (ang. *International Roughness Index*) [16]. Na potrzeby artykułu wyróżniono trzy umowne klasy stanu:

- Klasa A: $IRI < 1$ – nawierzchnia równa (stan oczekiwany, typowy w przypadku nawierzchni nowych oraz dróg szybkiego ruchu),
- Klasa B: $1 \leq IRI < 4$ – nawierzchnia nierówna (stan nawierzchni eksploatowanej lub niższych klas),
- Klasa C: $IRI \geq 4$ – nawierzchnia bardzo nierówna (nawierzchnia przeznaczona do remontu) [17],

gdzie *IRI* oznacza średnią wartość wskaźników *IRI* na odcinku o długości 1 km [m/km]. Zaproponowane klasy nie odpowiadają systematyce krajowej oceny stanu równości podłużnej, według której drogi o parametrze $IRI \leq 2$ m/km zaliczane są do dróg w dobrym stanie [17]. Istotne było, aby wyodrębnić odcinki w stanie typowym dla nowych dróg, a także przeciętne wśród dróg eksploatowanych i nadających się do remontu. Szacuje się, że dla nowobudowanych nawierzchni wskaźnik *IRI* zawiera się w przedziale od 0,81 do 1,03 m/km [18]. Przy ustalaniu klas brano również pod uwagę własne doświadczenia autorów z badań równości nawierzchni.

Spośród dostępnych danych do analiz wybrano losowo 6 odcinków pomiarowych o długości 1 km każdy, w każdej klasie po dwa odcinki (oznaczenia sekcji zgodnie z regułą: A1 – odcinek 1 w klasie A). Nie zastosowano tutaj żadnych szczególnych kryteriów wyboru odcinka takich jak np. rodzaj

3. SELECTION OF THE TEST SECTIONS

The input data for the analyses were gathered during surveys carried out on the network of trunk roads in Poland. The term trunk roads refers to the main transport routes in a country on which, as a rule, no restrictions are imposed on the traffic of heavy load vehicles. For this reason, pavements of national roads are designed to withstand heavy axle loads and provide a robust sample for this study. The criterion applied in selection of the test sections was the degree of deterioration of pavement measured by the International Roughness Index (*IRI*) [17]. For the purposes of this study, pavements were grouped in three roughness classes:

- Class A: $IRI < 1$ – smooth (the most desired condition, typical of new pavements and major highways),
- Class B: $1 \leq IRI < 4$ – rough (roads in service and new pavements on less important roads),
- Class C: $IRI \geq 4$ – very rough (resurfacing needed) [17],

where *IRI* mean *IRI* value over a distance of 1 km [m/km]. The proposed classes do not correspond to the national longitudinal roughness rating system, where roads of $IRI \leq 2$ m/km are rated good [17]. It was crucial to filter out sections whose condition is typical of new roads and mid-ranking roads in the “in service” and “in need of resurfacing” groups. It is estimated that for new built pavements *IRI* falls in the range from 0.81 to 1.03 m/km [18]. The authors’ experiences gained in evaluating pavement roughness were also applied in rating the pavements under analysis.

From among the available data six 1 km long test sections were randomly selected - two in each class (designated as follows A1 – section 1 in class A). Selection of test sections was not based on any specific criteria, such as type of pavement structure, traffic service class, road location, etc. All the sections under analysis had bituminous pavements.

konstrukcji, kategoria ruchu, położenie drogi itp. Wszystkie badane odcinki zostały wykonane w technologii warstw bitumicznych. Badaniem nie zostały objęte nawierzchnie betonowe, ponieważ ich charakterystyka powoduje, że wymagają one odrębnych analiz [19].

Pomiary ugięciomierzem laserowym TSD wykonuje się przy zachowaniu możliwie stałej prędkości przejazdu, jednak rzeczywiste warunki drogowe nie zawsze na to pozwalają. W praktyce prędkość poruszania się pojazdu pomiarowego uzależniona jest od przepisów ruchu drogowego, prędkości innych pojazdów oraz stanu technicznego nawierzchni. Oznacza to, że zgromadzone dane stanowią naturalną próbkę rzeczywistych sił oddziaływań pojazdu na nawierzchnię. Podczas pomiarów zarejestrowana została prędkość pojazdu, a wyniki jej zapisu na wytypowanych odcinkach testowych przedstawiono na Rys. 2. Rozpiętość zmierzonych prędkości zawiera się w przedziale od 55 do 80 km/h, przy czym 80 km/h jest to maksymalna dopuszczona przepisami prędkość pojazdu ciężarowego na drogach szybkiego ruchu. Prędkość pojazdu ma istotny wpływ na wielkość sił dynamicznych przekazywanych na konstrukcję nawierzchni. Im większa prędkość tym większe siły oddziaływania. Szacuje się, że wpływ prędkości maleje dopiero po osiągnięciu wartości 90 km/h [7]. Ze względu na brak danych w tej sytuacji nie analizowano wpływu prędkości na otrzymane wyniki. Na podstawie zapisu prędkości wnioskuje się, że ruch pojazdu na wyznaczonych odcinkach testowych odbywał się płynnie, a zmiany prędkości wynikały z rzeczywistych warunków na drodze.

Na Rys. 3 przedstawiono wartości wskaźników równości *IRI* wyznaczonych na sekcjach o długości 10, 50 oraz 100 metrów. Wartości *IRI* 100 m charakteryzują ogólny stan techniczny odcinka testowego, *IRI* 50 m są powszechnie stosowane w sieciowej ocenie stanu dróg oraz podczas odbiorów nowych nawierzchni w Polsce, natomiast *IRI* 10 m przedstawiają zmienność parametru na długości odcinka, a także wskazują na lokalne nierówności nawierzchni.

Analizując przedstawione na wykresach dane można stwierdzić, że w klasie A dla wartości wskaźników *IRI* 10 m występuje mała zmienność wartości (Rys. 3). Odchylenie standardowe wskaźników wynosi około 0,3 przy rozpiętości danych do 1,7 m/km. Należy zatem oczekiwać również małej zmienności wartości nacisków. Zmiany wartości *IRI* dla dróg nierównych i bardzo nierównych są odpowiednio większe i stanowią reprezentatywną próbkę danych dla tego typu przypadków. Średnia zarejestrowanych wartości wskaźników dochodzi do 6,5 m/km przy zakresie danych od 1,0 m/km do 12,3 m/km. Szczegółowe charakterystyki odcinków wyrażone wartościami wskaźników *IRI* 10 m zestawiono w Tabl. 1.

Portland cement pavements were not covered by this study, as they require different analyses due to different performance properties [19].

As far as practicable, the TSD vehicle should, during measurements, travel at the same speed, which was not always possible due to the actual traffic conditions on the road. The factors that influenced the speed of travel during measurements included the maximum speed limit, speeds of the traffic stream and the condition of the pavement. Thus the gathered data provide a natural sample of the actual forces exerted by moving vehicles on the road surface. Speed of travel was also recorded and the measurement results on the chosen test sections are presented in Fig. 2. The measured speeds were in the range of 55-80 km/h, 80 km/h being the maximum allowed speed of the heavy load vehicles on highways. The speed of travel has a significant influence on the dynamic forces exerted by the vehicle on the pavement. Their magnitude increases with the speed. It is estimated that for speeds above 90 km/h the speed influence tends to decrease [7]. However, the effect of the travel speed on the results was not analysed in this situation due to lack of data. The speed records indicate that the flow of traffic on the test sections was smooth and speed variations were caused by the actual driving conditions on the road.

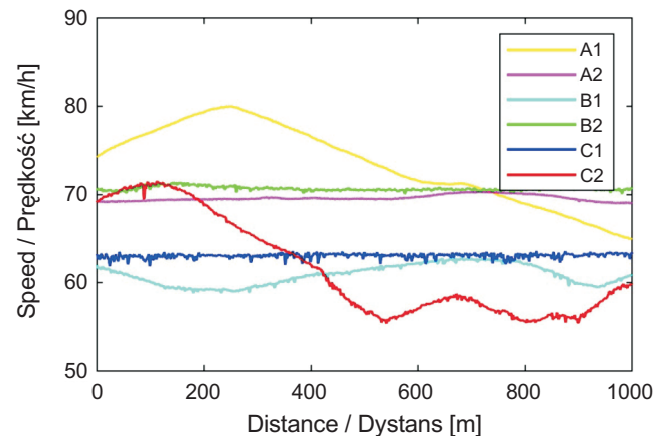


Fig. 2. Vehicle speeds on the test sections
Rys. 2. Prędkości pojazdu na odcinkach testowych

Fig. 3 gives the values of *IRI* determined on 10 m, 50 m and 100 m long sections. The values determined on 100 m long sections provide a general rating of the condition of pavement, the values determined on 50 m long sections are commonly used in Poland for evaluation of existing pavements and new pavements during final inspections before the road is put in service. The values of *IRI* determined on 10 m sections represent the variation in the value

Table 1. Longitudinal roughness of the pavements of the analysed test sections
 Tablica 1. Charakterystyka równości podłużnej badanych odcinków

Section Odcinek	IRI 10 m [m/km]				
	Minimum Minimum	Maximum Maksimum	Range Zakres	Mean Średnia	Standard deviation Odchylenie standardowe
A1	0.37	2.06	1.68	0.89	0.33
A2	0.45	1.46	1.01	0.88	0.23
B1	1.01	6.77	5.76	2.82	1.08
B2	1.82	9.50	7.68	3.44	1.13
C1	3.41	10.77	7.36	6.48	1.82
C2	1.16	12.27	11.11	4.14	2.28

of this parameter over the length of the test section and pinpoint local surface irregularities.

The diagrams show only a small variation in the values of *IRI* 10 m in the case of roads rated in class A (Fig. 3). This is evidenced by the value of standard deviation of 0.3 at the range of up to 1.7 m/km. Therefore, we can expect only a small variation of axle loads as well. Rough and very rough pavements feature much greater variations in the *IRI* values, thus providing a robust data sample for such cases. The mean of the recorded *IRI* values reaches 6.5 m/km for the range of the data set from 1.0 m/km to 12.3 m/km. The detailed characteristics of the sections under analysis, measured by the values of *IRI* 10 m, are compiled in Tabl. 1.

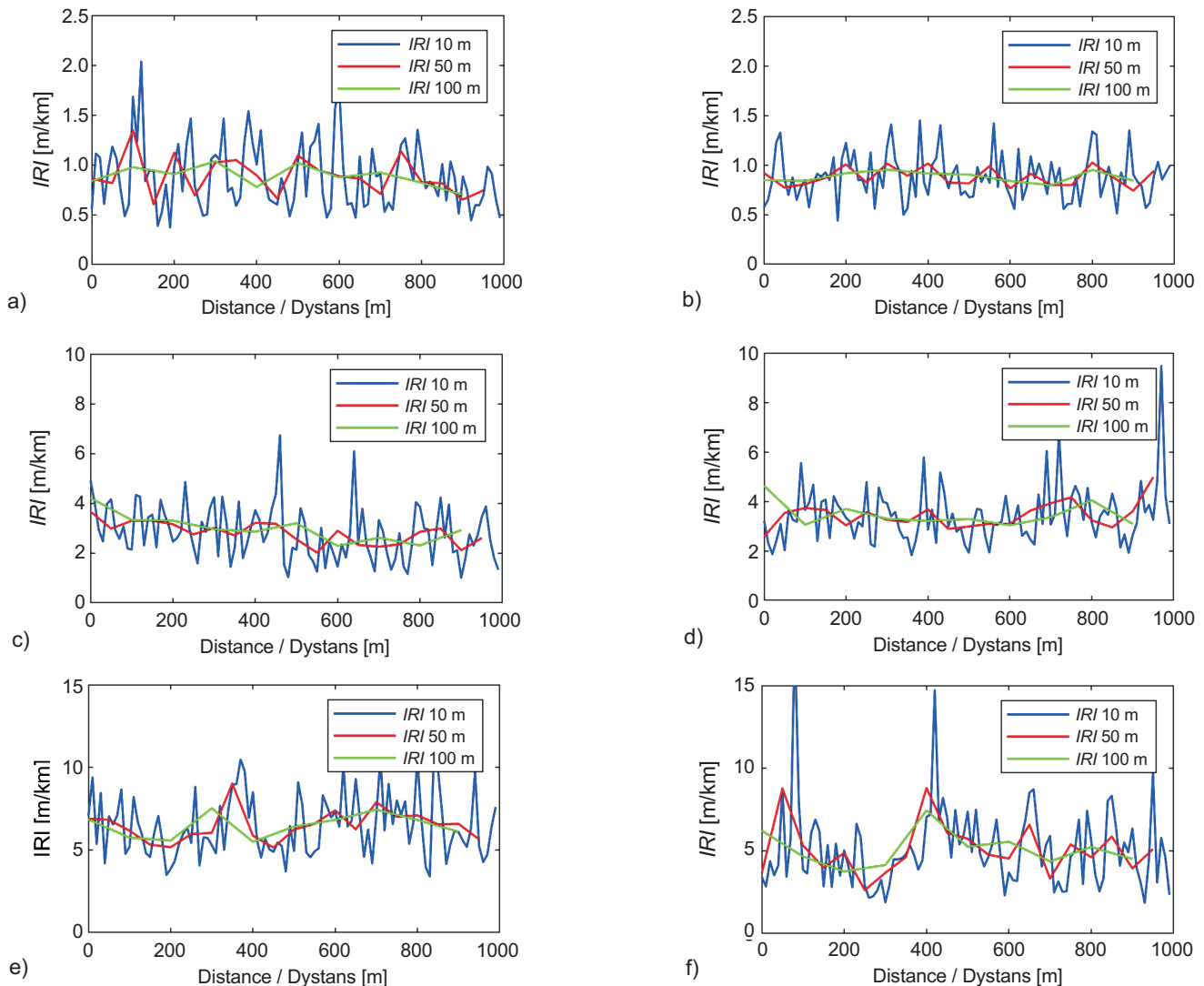


Fig. 3. *IRI* values obtained on selected test sections: a) A1, b) A2, c) B1, d) B2, e) C1, f) C2

Rys. 3. Wartości wskaźników *IRI* na wybranych odcinkach testowych: a) A1, b) A2, c) B1, d) B2, e) C1, f) C2

4. ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW NACISKU OSI POJAZDU

4.1. PREZENTACJA PRZYKŁADOWYCH WYNIKÓW POMIARU NACISKÓW OSI POJAZDU NA NAWIERZCHNIĘ

Podstawą analiz są odczyty z tensometrycznych czujników nacisków zlokalizowanych na osi naczepy pomiarowej. Pojedyncze odczyty odpowiadają sumie średnich nacisków zarejestrowanych przez czujniki na prawym i lewym kole na dystansie 10 cm. W efekcie dla każdego odcinka jest to 10 000 odczytów obciążenia osi. Ponieważ przedmiotem analiz są zmiany wartości nacisków osi wywołane nierównościami, a nie wartości bezwzględne obciążenia, wyniki pomiarów znormalizowano średnią zarejestrowaną na długości odcinka. Zestawienie wyników pomiarów na przykładowo wybranym odcinku badawczym C1 wraz z odniesieniem do stanu nawierzchni wyrażonej wskaźnikiem *IRI* przedstawiono na Rys. 4.

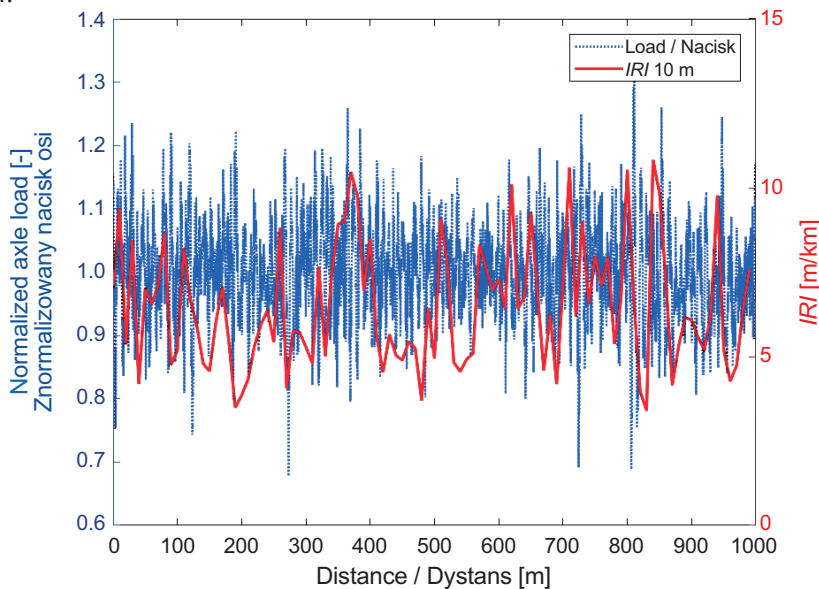


Fig. 4. Diagram of the normalised axle loads and *IRI* obtained on the test section C1
Rys. 4. Wykres znormalizowanych nacisków osi oraz wskaźnika *IRI* na odcinku C1

4.2. ANALIZA STATYSTYCZNA

Nasze podstawowe dane to odczyty nacisków osi pojazdu zarejestrowane na odcinku 1 km co 10 cm (dla każdego odcinka pomiarowego mamy zbiory po 10 000 elementów). Dla każdego ze zbiorów przeprowadzono test normalności rozkładu stosując m.in. kryterium Kolmogorova-Smirnova [20 - 22] z poziomem ufności 95%, za każdym razem uzyskując *p-value* na poziomie poniżej 0,01. Test Kolmogorova-Smirnova został wybrany do testowania hipotezy o normalności rozkładu danych pomiarowych ze względu na jego niską moc statystyczną w porównaniu do innych testów normalności rozkładów. Mimo to hipoteza o normalności rozkładu danych

4. ANALYSIS OF AXLE LOAD MEASUREMENTS

4.1. PRESENTATION OF THE EXAMPLE AXLE LOAD DATA

The basis of the analyses are the readings from the strain gauges fitted on the test trailer axle to measure the force exerted on the pavement. The individual readings correspond to the sum of the mean forces recorded by the sensors fitted on the right and left wheels over a distance of 10 cm. This gives 10,000 axle load values for each test section. Since the parameter under analysis is the variation of the force exerted on the pavement due to the surface irregularities and not the absolute load values, the recorded data were normalized by the mean value obtained for the overall length of the section. Fig. 4 shows an example of the survey data on the test section C1 with reference to the condition of pavement specified by *IRI*.

4.2. STATISTICAL ANALYSIS

The basic input data for analysis are axle loads recorded over a distance of 1 km at 10 cm intervals (this giving 10,000 records for each test section under analysis). Each data set was checked for normality using, inter alia, the Kolmogorov-Smirnov (K-S) test [20 - 22] at 95% confidence level. The *P-Value* in each case was below 0.01. The K-S test was chosen to test the normality hypothesis because of its low statistical power, as compared to other available normality tests. Even so, it was found that the normality hypothesis had to be rejected. The statistical tools available in the MATLAB platform were used to

pomiarowych musi być odrzucona. Korzystając z narzędzi statystycznych programu MATLAB stwierdzono, że dane nie są zgodne/nie rozkładają się zgodnie z żadnym innym rozkładem statystycznym (przetestowano ponad 10 rozkładów w tym m.in. eksponentialny, Weibulla, gamma, najmniejszej wartości ekstremalnej itd.). W związku z tym, w ramach oceny statystycznej uzyskanych wyników wykonano transformację Johnsona w celu zamiany zbioru danych pomiarowych na rozkład normalny, tak aby możliwe było odrzucenie „outlierów” [23]. Wyniki tej transformacji dla danych zebranych na odcinku C1 zamieszczono na Rys. 5.

find that the data are not following any other distribution (over ten distributions were tested, including exponential distribution, Weibull distribution, gamma distribution, the smallest extreme value distribution, etc.). Therefore, Johnson transformation was used to transform the data to follow a normal distribution in order to discard outliers [23]. The results of this transformation for the data gathered on the test section C1 are shown in Fig. 5.

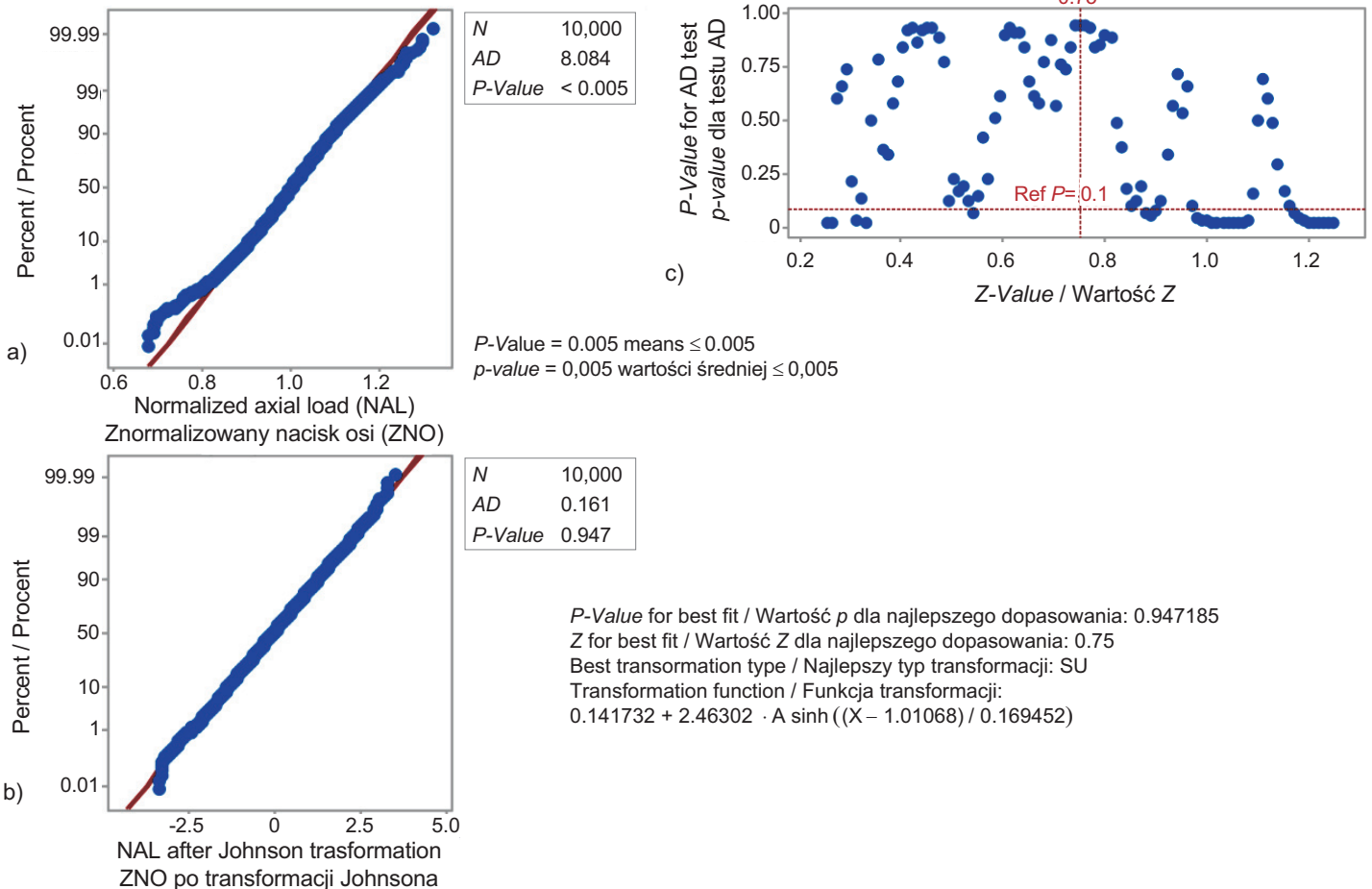


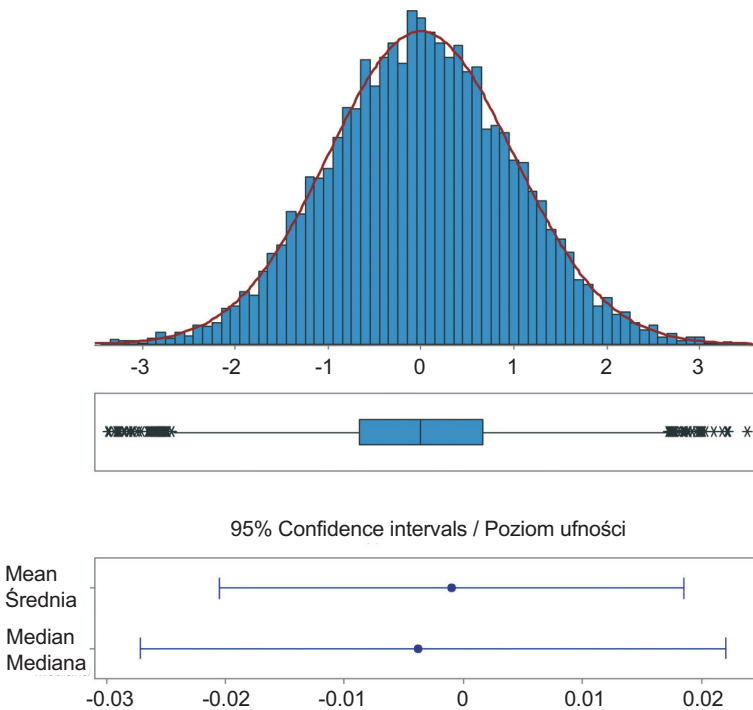
Fig. 5. Johnson transformation performed on the C1 data: a) probability plot for original data, b) probability plot for transformed data, c) choice of the transformation; AD – Anderson-Darling test

Rys. 5. Transformacja Johnsona wykonana na danych pomiarowych dla odcinka C1: a) wykres prawdopodobieństwa dla oryginalnych danych, b) wykres prawdopodobieństwa dla danych po transformacji, c) wybór transformacji; AD – test Andersona-Darlinga

Analizując dane z Rys. 5 można zauważyć, że po transformacji Johnsona wartość $p\text{-value}$ w teście normalności Kolmogorova-Smirnova dla analizowanego zbioru danych zmieniła się z wartości niższej niż 0,005 na $p = 0,947$ (w teście normalności Andersona-Darlinga). Oznacza to, że dane po transformacji mają teraz rozkład normalny. Dla tak przetransformowanych

Analysing the data from Fig. 5 we see that after Johnson transformation the $p\text{-value}$ in the K-S normality test changed for the analysed data set from below 0.005 to $p = 0.947$ (in the Anderson-Darling test). This means that after the transformation the data follow normal distribution. Next the distribution features were determined and

danych wyznaczono cechy rozkładu (Rys. 6) oraz określono „outlierów”. Okazało się, że żadna z wartości zarejestrowanych nie powinna być odrzucana ze zbioru danych. Tego typu analizę powtórzono dla danych ze wszystkich odcinków. Podkreślenia wymaga fakt, że w żadnym przypadku, żadna z danych nie była „outlierem”. Określenie „outlierów” w przypadku niniejszej analizy wydaje się jednym z najważniejszych elementów, gdyż nierówność nawierzchni chcemy charakteryzować przez rozstęp nacisków, tj. różnicę między wartością maksymalną i minimalną unormowanych nacisków osi. Fakt odrzucenia pewnych ekstremalnych danych ze zbioru z pewnością wpłynęłaby na wartość rozstępu.



outliers were identified (Fig. 6) for the data set obtained after transformation. It was found that no record should be rejected from the data set in question. This analysis was repeated for the respective data sets gathered on all the test sections under analysis. It is worth noting that no outliers were identified in these data sets. Identification of outliers appears to be crucial for the goal of our analysis in which the surface roughness is to be rated by using the range of exerted forces, i.e. the difference between the maximum and minimum normalised axle loads. Filtering out some extreme values would certainly have a bearing on the range of the data set.

Anderson-Darling normality test Test normalności Andersona-Darlinga	
A-Squared	0.16
P-Value	0.947
Mean / Średnia	-0.00102
Stand. Dev. / Odch. Stand.	0.99655
Variance / Wariancja	0.99312
Skewness / Skośność	-0.0056593
Kurtosis / Kurtoza	0.0119622
N	10,000
Minimum	-3.37422
1 st Quartile / 1. Kwartyl	-0.66950
Median / Mediana	-0.00381
3 rd Quartile / 3. Kwartyl	0.66198
Maximum	3.51653

Fig. 6. Features of normal distribution for the data from the test section C1 after Johnson transformation
Rys. 6. Cechy rozkładu normalnego uzyskanego dla danych odcinka C1 po transformacji Johnsona

Po przeprowadzeniu powyższej analizy w celu precyzyjnej oceny zjawiska wyznaczono parametry statystyczne znormalizowanych nacisków osi w tym: wartości minimalne i maksymalne, rozpiętość oraz odchylenie standardowe (odchylenie standardowe w przypadku unormowanych nacisków osi ma interpretację współczynnika *DLC*), a uzyskane wyniki zestawiono w Tabl. 2. Dodatkowo w celu określenia symetrii rozkładu określono jego skośność statystyczną. W przypadku odcinków pomiarowych A1 i B1 można stwierdzić, że rozkład znormalizowanych nacisków nie jest symetryczny. W takich sytuacjach wydaje się, że równość nawierzchni lepiej może być scharakteryzowana przez rozstęp a nie przez odchylenie standardowe odniesione do wartości średniej, czyli przez współczynnik *DLC*. Dlatego w dalszej części pracy zostaną określone korelacje między wskaźnikiem *IRI* a rozstępem oraz między *IRI* a współczynnikiem *DLC*.

After the above analysis, statistical parameters of the normalised axle loads were determined for precise evaluation of the phenomenon, including: minimum and maximum values, range and standard deviation, the results of which are compiled in Table 2. Note that for normalized axle loads the standard deviation has the meaning of the dynamic load coefficient (*DLC*). Skewness was also determined to test the symmetry of the distribution. In the case of the test sections A1 and B1 the distribution of the normalized axle loads was found to be not symmetric. In such situations, the range of the data set appears to be a more reliable measure of the surface roughness than the standard deviation related to the mean value, i.e. the value of *DLC*. Therefore, relationships will be established between the value of *IRI* and the range, and between the values of *IRI* and *DLC* further below.

Table 2. Statistical representation of normalised axle loads

Tablica 2. Charakterystyka statystyczna znormalizowanych nacisków osi

Test section Odcinek	Normalised axle load / Znormalizowany nacisk osi					
	Minimum Minimum	Maximum Maximum	Range Zakres	<i>DLC</i> Dynamiczny współczynnik obciążenia Standard deviation Odchylenie standardowe	Skewness Współczynnik skośności	Kurtosis Kurtoza
A1	0.931	1.066	0.135	0.017	-0.284	0.678
A2	0.924	1.077	0.153	0.018	0.092	0.211
B1	0.794	1.230	0.436	0.054	-0.126	0.226
B2	0.832	1.162	0.331	0.046	-0.045	0.045
C1	0.678	1.323	0.645	0.075	-0.100	0.811
C2	0.807	1.173	0.366	0.048	-0.087	-0.022

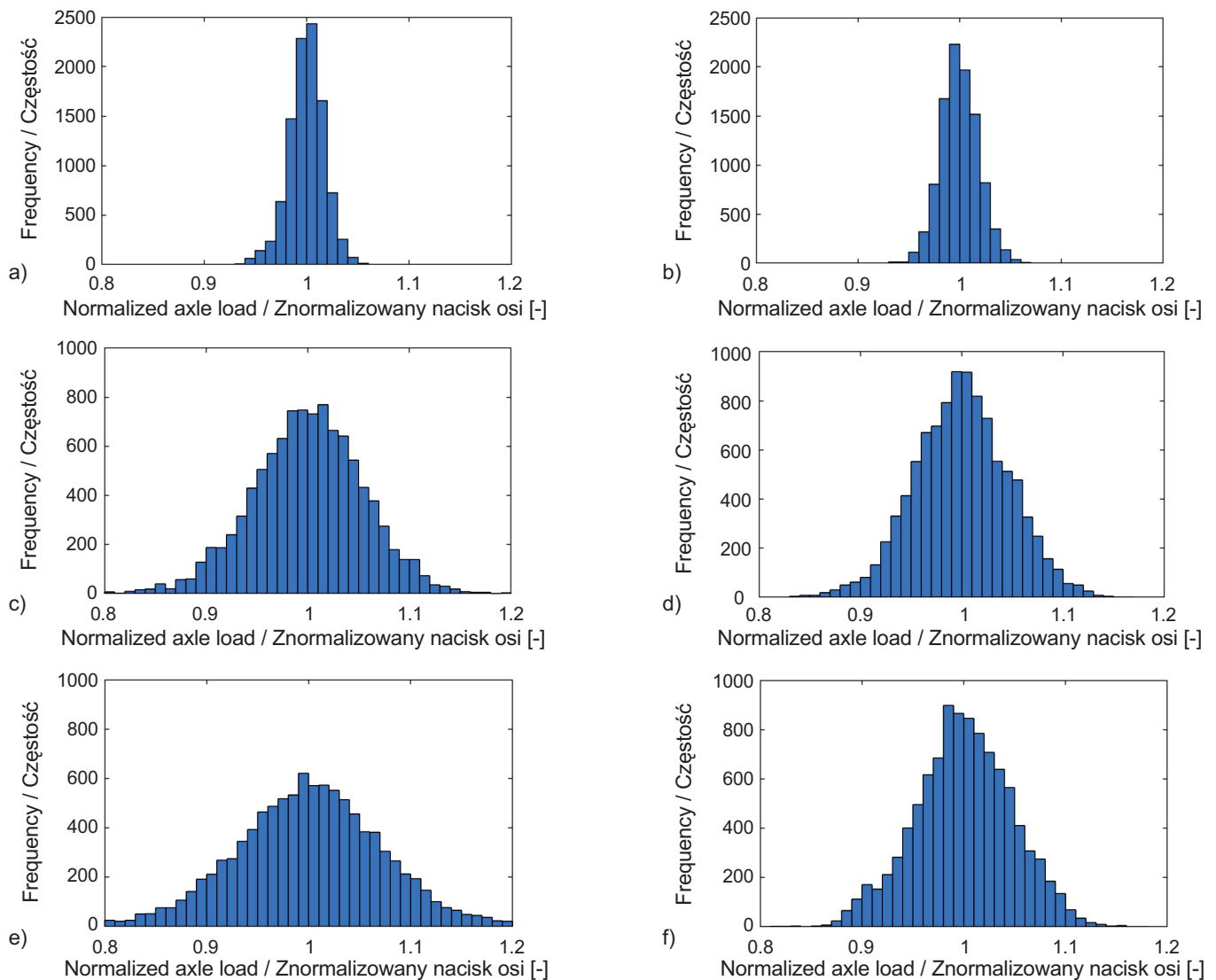


Fig. 7. Histograms of normalised axle loads on selected test sections: a) A1, b) A2, c) B1, d) B2, e) C1, f) C2

Rys. 7. Histogramy znormalizowanych nacisków osi na wybranych odcinkach testowych: a) A1, b) A2, c) B1, d) B2, e) C1, f) C2

Dodatkowo na Rys. 7 zamieszczono graficzną interpretację danych pomiarowych w postaci histogramów. Przyjmując założenie, że wartość średnia (równa 1) odpowiada naciskowi spoczynkowemu pojazdu, a zarejestrowane wartości są miarą odciążenia (wartości mniejsze niż 1) oraz dociążeń (wartości większe niż 1) osi, można wnioskować o wpływie dynamiki ruchu na stopień obciążenia nawierzchni. Na dynamikę ruchu pojazdu wpływa wiele czynników takich jak prędkość pojazdu i jej zmiany, siły zewnętrzne w postaci oddziaływań wiatru i oporów powietrza, a także wpływ geometrii drogi. W analizowanym przypadku przyjęto założenie, że ruch pojazdu odbywa się ze stałą prędkością przy zbliżonych na danym odcinkach warunkach ruchowych i otoczenia. Jedynym czynnikiem wymuszającym są zmiany równości podłużnej.

Stosując jako miarę zmienności odchylenie standardowe nacisków można stwierdzić, że w przypadku dróg równych (klasa A) charakterystyczne są zmiany nacisków osi w zakresie 2%, dla dróg nierównych (klasy B i C) jest to odpowiednio 5% i 6%. Zakres zmian rejestrowanych wartości to około 15% w przypadku nawierzchni równych oraz średnio 45% dla nawierzchni nierównych. Analizując dane w aspekcie największych obciążeń nawierzchni, zarejestrowane wartości sięgają nawet 30% ponad średnią dla nawierzchni nierównych.

5. WYZNACZENIE KORELACJI MIĘDZY *IRI* A ROZSTĘPEM UNORMOWANYCH NACISKÓW OSI POJAZDÓW CIĘŻKICH

Na podstawie wykonanych pomiarów *IRI* i nacisków osi pojazdu na nawierzchnię podjęto próbę wyznaczenia korelacji między wartościami *IRI* z Tabl. 1 i wartościami rozstępów z Tabl. 2. Uzyskane wyniki w postaci wykresu zamieszczono na Rys. 8. Należy zaznaczyć, że zbiór danych jest tylko sześćoelementowy, ale uzyskano wysoką wartość współczynnika determinacji (na poziomie 0,89) co oznacza istnienie korelacji między wartościami średnimi *IRI* a wartościami rozstępów unormowanych nacisków osi pojazdu. Dodatkowo określono także korelację między standardowym współczynnikiem *DLC* a wskaźnikiem *IRI* (Rys. 9). W tym przypadku współczynnik determinacji ma jeszcze wyższą wartość i wynosi 0,90. Niemniej jednak odległość punktów reprezentujących odcinki pomiarowe z danymi wykazującymi największy poziom asymetrii, tj. A1 i B1 znajdują się w większej odległości od prostej korelacyjnej, niż na wykresie korelacji między *IRI* a rozstępem.

In addition, histograms have been shown in Fig. 7 as a graphical interpretation of the survey data. Assuming that the mean value (equal to 1) represents the load applied by a stationary vehicle and the recorded values provide a measure of a decrease (values lower than 1) and increase (values greater than 1) of that load, we can determine the effect of dynamic movement on the loading of the pavement. There are a number of factors relevant to the vehicle dynamics, including the vehicle speed and its variation, external forces acting on the vehicle, including wind pressure and drag force, and also geometry of the road. In the case under analysis, it was assumed that the vehicle travels at a steady speed under similar traffic and environmental conditions on each of the respective sections. The only relevant variable are the changes of the longitudinal roughness of the road pavement.

Using the standard deviation of axle loads as a measure of variation, it can be concluded that smooth pavements (roads class A) are characterised by axle load variations at the level of 2% and rougher pavements, i.e. roads class B and C at the levels of 5% and 6% respectively. The ranges of variation of the recorded values were approximately 15% for smooth surfaces and 45% on average in the case of rough pavements. Analysing data in terms of the highest loads applied on the pavement, the recorded values are as high as 30% over the mean for rough pavements.

5. DETERMINATION OF THE CORRELATION BETWEEN THE *IRI* AND THE RANGE OF NORMALIZED AXLE LOADS OF HEAVY LOAD VEHICLES

The recorded values of *IRI* and axle loads were used to find a correlation between the *IRI* values from Table 1 and the ranges from Table 2. The results are represented graphically in Fig. 8. It should be noted that for the data set consisting of only six elements a high value of the coefficient of determination was obtained (in the order of 0.89) indicating a correlation between the mean values of *IRI* and the ranges of normalized axle loads. In addition, a correlation between the standard *DLC* value and *IRI* was also established (Fig. 9). In this case, an even greater value of the determination factor was obtained, i.e. 0.90. However, the distances between the points representing the test sections for which the data exhibit the greatest asymmetry, i.e. A1 and B1, are located much further away from the correlation straight line than in the graph representing the correlation between *IRI* and the range of the data set.

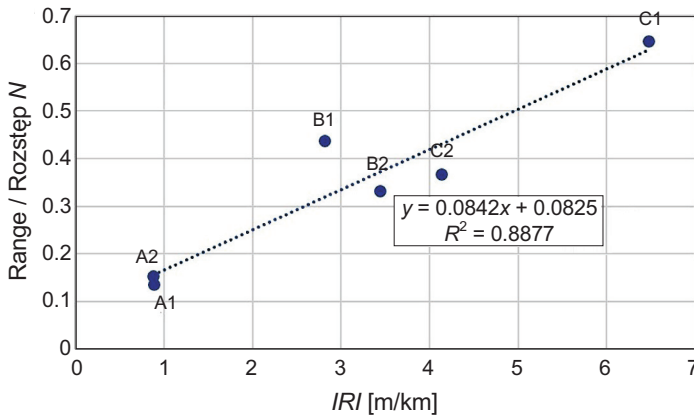


Fig. 8. Correlation between *IRI* and the range of normalised axle loads exerted on the pavement *N*

Rys. 8. Korelacja między *IRI* i rozstępem unormowanych nacisków osi na nawierzchnię *N*

6. WPŁYW ZWIĘKSZENIA WARTOŚCI NACISKÓW NA LOKALNE ZMNIJSZENIE TRWAŁOŚCI NAWIERZCHNI

Trwałość zmęczeniowa nawierzchni określana jest przez liczbę osi obliczeniowych jaką może przenieść konstrukcja nawierzchni do wystąpienia stanu granicznego nośności. W projektowaniu za oś obliczeniową, lub inaczej równoważną oś standardową, przyjmuje się pojedynczą oś 100 kN oraz 115 kN. Stanowi ona punkt odniesienia do wyznaczenia współczynników równoważności obciążenia osi względem rzeczywistych oddziaływań pojazdów ciężkich [24]. W naszym przypadku spoczynkowy nacisk osi pomiarowej TSD wynosi około 10 ton czyli jest zbliżony wartością do 100 kN. Stosując uproszczenie i zakładając, że oś pomiarowa TSD jest przybliżeniem osi obliczeniowej, możliwa jest analiza zmian wartości nacisków umownej osi obliczeniowej wywołanej nierównościami, a w konsekwencji wyznaczenie współczynników równoważności osi zależnych od tych zmian.

Analizy oparto na powszechnie stosowanym „wzorce czwartej potęgi” [25]. Przyjęto, że dla nawierzchni idealnie równej współczynnik równoważności osi wynosi 1. Na podstawie znormalizowanych nacisków osi zarejestrowanych na poszczególnych odcinkach wyznaczono rozpiętość oraz punkty charakterystyczne współczynników równoważności tj.: wartości minimalne i maksymalne oraz odchylenia standardowe próbek (Rys. 9). Zmienność wartości współczynnika mierzona w zakresie odchylenia standardowego dla nawierzchni typu A wynosi od 0,93 do 1,07, natomiast dla nawierzchni typu B i C zawiera się w przedziale od 0,73 do 1,34. Można zatem

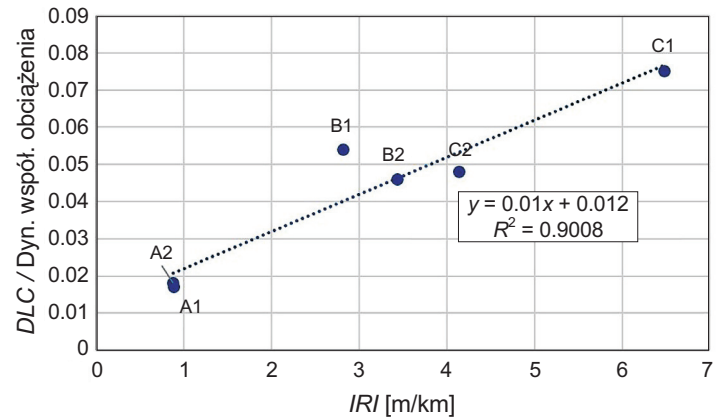


Fig. 9. Correlation between *IRI* and *DLC*

Rys. 9. Korelacja między *IRI* i współczynnikiem *DLC*

6. THE EFFECT OF INCREASED AXLE LOAD ON LOCALLY DECREASED DURABILITY OF PAVEMENT

The fatigue life of the surface is represented by the number of standard axles carried by the pavement until ultimate limit state. In the equivalent single axle load approach a standard axle of 100 kN and 115 kN is used to calculate the service life of pavement. It provides a reference for calculating the equivalence factors for actual loads exerted by heavy load vehicles [24]. In our case, the load of the TSD measuring axle at rest is approximately 10 tonnes, i.e. close to 100 kN. Subject to some simplification, and assuming that the TSD measurement axle is an approximation of the standard axle used in the design, we can analyse the variation of the load exerted by the standard axle due to surface irregularities, and in this way determine the axle equivalence factors depending on these variations.

The analyses were based on the commonly used “fourth power formula” [25]. For a perfectly smooth surface, the axle equivalence factor was taken at 1. The normalized axle loads recorded on the respective test sections were used to determine the range and characteristic points of equivalence factors, i.e. minimum and maximum values and standard deviations of the samples (Fig. 9). The variation of the factor measured in the range of standard deviation for the A class pavements was between 0.93 and 1.07, and for B- and C- class pavements it ranged 0.73-1.34. This gives the local decrease of the bearing capacity in the order of 20% in the case of pavements rated as rough. This value can be related even if only to the results of research reported in [9], in which it was demonstrated that surface roughness of $IRI = 4$ m/km accelerates the process of deterioration of the pavement, most considerably, i.e. by up

stwierdzić, że w przypadku nawierzchni nierównych następuje lokalna utrata nośności na poziomie 20%. Wartość ta może być odniesiona choćby do wyników zamieszczonych w pracy [9], gdzie wskazano, że nierówności na poziomie $IRI = 4$ m/km gwałtownie przyspieszają proces zniszczenia nawierzchni (nawet do 25%). W skrajnych przypadkach, gdzie występują największe nierówności, zarejestrowano trzykrotnie większy poziom oddziaływań w porównaniu z nawierzchniami o dobrym stanie technicznym.

7. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

W artykule przedstawiono wyniki analiz zależności pomiędzy naciskiem osi pojazdu ciężarowego, a stanem nawierzchni asfaltowej wyrażonej międzynarodowym wskaźnikiem równości podłużnej IRI . Należy przy tym podkreślić, że wykorzystano wyniki pomiarów in situ, wykonane przy użyciu rzeczywistego pojazdu ciężarowego poruszającego w sposób naturalny względem warunków ruchowych. Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej w pracy wykazano istotny związek między wskaźnikiem IRI a wzrostem unormowanych nacisków osi pojazdów ciężkich. Warto podkreślić, że nie jest to związek deklaratywny, ale związek o współczynniku determinacji na poziomie 0,89 uzyskany na bazie fizycznych pomiarów przy zastosowaniu ugięciomierza TSD. W pracy jako parametr charakteryzujący naciski dynamiczne wprowadzono rozstęp statystyczny, licząc na większe różnice pomiędzy rozstępem a klasycznym parametrem DLC w przypadku danych statystycznych, które nie są symetryczne. Jak się okazało jednak po określeniu skośności rozkładu tylko w przypadku dwóch odcinków pomiarowych A1 i B1 asymetria rozkładu jest wyraźnie widoczna. W związku z tym na podstawie analizowanych danych pomiarowych nie udało się potwierdzić hipotezy o przewadze rozstępu nad DLC (korelacja między wskaźnikiem IRI a parametrem DLC jest jeszcze większa – współczynnik determinacji 0,90).

W przeprowadzonym eksperymencie nawierzchnię asfaltową obciążano rzeczywistym pojazdem ciężarowym o znanych parametrach obciążenia osi, a na tej podstawie oszacowano wpływ tego rodzaju obciążeń na trwałość nawierzchni. W ujęciu ogólnym struktura ruchu drogowego jest bardziej złożona, jednak do projektowania nawierzchni drogowych stosuje się umowną oś obliczeniową, która jest zbliżona do tej zastosowanej w eksperymencie. Rozpatrujemy sytuację, w której obciążenia osi będą występowały w zakresie odchylenia standardowego. W tym przypadku obliczony na podstawie prawa „czwartej potęgi” współczynnik równoważności osi [25] dla dróg w klasie A zawiera się w przedziale od 0,93 do 1,07 co można interpretować jako 14% zakres zmian oddziaływań pojazdu na trwałość nawierzchni wynikający ze

to 25%. In extreme cases with the greatest surface irregularities, the impact was three times greater than on pavements in good condition.

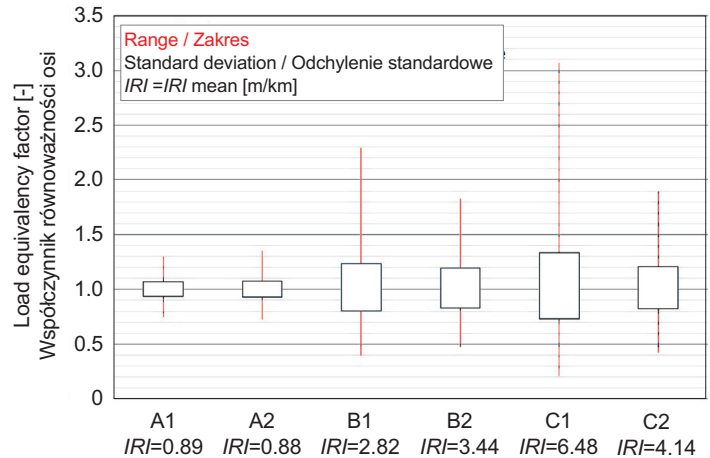


Fig. 10. Variation of the axle load equivalence factors
Rys. 10. Zmienność współczynników równoważności osi

7. CONCLUSIONS AND FINAL REMARKS

This article presents the results of analyses carried out to establish the relationship between axle load of a heavy load vehicle and the condition of asphalt pavement measured by the *International Roughness Index*. It should be stressed that the input data for the analyses were obtained in field, using a real lorry travelling along the roads as the traffic conditions allowed. The statistical analysis carried out as part of the study revealed a significant relationship between IRI and the range of normalised axle loads of heavy load vehicles. It is worth noting that rather than just claimed it is a solid proven relationship with a coefficient of determination at the level of 0.89 derived on the basis of physical measurements by means of TSD apparatus. Range of the data set was used to characterise the dynamic loads, expecting that non-symmetric data would yield greater differences between the range and the conventional DLC parameter. However, after determination of skewness, asymmetry of distribution was clearly evident only for two test sections, i.e. A1 and B1. Therefore, the hypothesised superiority of the statistical range over DLC was not confirmed by the analysed in situ data (even a stronger correlation was obtained between IRI and DLC , as demonstrated by the determination coefficient of 0.90).

In the experiment the asphalt pavement was loaded by a real heavy load vehicle with known axle load parameters to estimate, on this basis, the effect of such loads on the pavement durability. Bearing in mind that the actual

stanu jej równości. Dla dróg nierównych współczynnik równoważności osi zawiera się w przedziale od 0,73 do 1,34, co oznacza zakres zmian na poziomie 61%. W najbardziej niekorzystnym z punktu widzenia trwałości nawierzchni przypadku współczynnik równoważności wzrośnie 3-krotnie. W praktyce oznacza to, że w przypadku pojazdów o obciążeniach osi bliskich dopuszczalnym oraz pojazdów przeciążonych lokalne nierówności powodują kilkukrotny przyrost oddziaływania pojazdów na nawierzchnię. W konsekwencji wzrost nierówności nawierzchni uruchamia niekontrolowany proces jej degradacji, który przyspiesza wraz ze wzrostem nierówności.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Gillespie T.D.*: Everything You Always Wanted to Know about the IRI, But Were Afraid to Ask!. The University of Michigan Transportation Research Institute, 1992
- [2] *Sayers M.W., Karamihas S.M.*: The Little Book of Profiling. The Regent of the University of Michigan, 1998
- [3] *Hildebrand G.*: Development of a high speed deflectograph. Nordic Road and Transport Research, **14**, 3, 2002, 8-9
- [4] *Levenberg E., Pettinari M., Baltzer S., Christensen B.M.L.*: Comparing Traffic Speed Deflectometer and Falling Weight Deflectometer Data. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, **2672**, 40, 2018, 22-31, DOI: 10.1177/0361198118768524
- [5] *Gajewski M., Jemiolo S.*: Analiza możliwości wykrywania braku zespojenia warstw asfaltowych w badaniu FWD. TTS Technika Transportu Szybowego, **19**, 9, 2012, 2423-2432 CD
- [6] *Gillespie T.D., Karamihas S.M., Sayers M.W., Nasim M.A., Hansen W., Ehsan N., Cebon D.*: Effects of heavy vehicle characteristics on pavement response and performance. Transportation Research Board, 353, 1993, 132p
- [7] *Cebon D.*: Handbook of vehicle-road interaction. Swets & Zeitlinger, 1999, 600p
- [8] Dynamic interaction between vehicles and infrastructure experiment (DIVINE), OECD, 1998
- [9] *Ryś D.*: Consideration of dynamic loads in the determination of axle load spectra for pavement design. Road Materials and Pavement Design, **22**, 6, 2021, 1309-1328, DOI: 10.1080/14680629.2019.1687006
- [10] *Sweatman P.F.*: A study of dynamic wheel forces in axle group suspensions of heavy vehicles. Australian Road Research Board Special Report, 27, 1983, 56p
- [11] *Ervin R.D., Nisonger R.L., Sayers M., Gillespie T.D., Fancher P.S.*: Influence of size and weight variables on the stability and control properties of heavy trucks. Volume II. Final report. Transportation Research Institute (UMTRI), 1983, <http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/262> (23.11.2021)
- [12] *Rasmussen S., Aagaard L., Baltzer S., Krarup J.*: A comparison of two years of network level measurements with the Traffic Speed Deflectometer. Transport Research Arena conference, 21-25.04.2008, Ljubljana, Slovenia
- [13] *Nielsen C.P.*: Visco-Elastic Back-Calculation of Traffic Speed Deflectometer Measurements. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, **2673**, 2019, 439-448, DOI: 10.1177/0361198118823500
- [14] *Elseifi M.A., Zihan Z.U.A.*: Assessment of the Traffic Speed Deflectometer in Louisiana for Pavement Structural Evaluation. Final Report 590. Louisiana Transportation Research Center, 2018, 100p, http://www.ltrc.lsu.edu/pdf/2018/FR_590.pdf (22.11.2021)
- [15] *Zofka A., Sudyka J., Maliszewski M., Harasim P., Sybilski D.*: Alternative approach for interpreting traffic speed deflectometer results. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, **2457**, 2014, 12-18, DOI: 10.3141/2457-02

- [16] *Sayers M.W., Gillespie T.D., Paterson W.D.O.*: Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, 46, 1986, 88p
- [17] Diagnostyka stanu nawierzchni i wybranych elementów korpusu drogi – wytyczne stosowania. Zarządzenie nr 21 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 17 czerwca 2019 roku w sprawie diagnostyki stanu nawierzchni i wybranych elementów korpusu drogi
- [18] *Piryonesi S.M., El-Diraby T.E.*: Examining the relationship between two road performance indicators: Pavement condition index and international roughness index. *Transportation Geotechnics*, **26**, 2021, 100441, DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100441
- [19] *Mackiewicz P., Szydło A., Krawczyk B.*: Influence of the construction technology on the texture and roughness of concrete pavements. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **17**, 2, 2018, 111-126, DOI: 10.7409/rabdim.018.007
- [20] MATLAB and statistics toolbox release. Mathworks Inc., 2016, <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (22.11.2021)
- [21] *Alin A.*: Minitab. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, **2**, 6, 2010, 723-727, DOI: 10.1002/wics.113
- [22] *Parlińska M., Parliński J.*: Statystyczna analiza danych z Excelem. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2011
- [23] *Aichouni M., Messaoudene N.A., Al-Ghonamy A.*: On the Use of Johnson's Distribution in Quality and Process Improvement. *International Journal of Economics and Statistics*, **2**, 2014, 362-367
- [24] *Ryś D., Judycki J., Jaskula P.*: Determination of Vehicles Load Equivalency Factors for Polish Catalogue of Typical Flexible and Semi-rigid Pavement Structures. *Transportation Research Procedia*, **14**, 2016, 2382-2391, DOI: 10.1016/J.TRPRO.2016.05.272
- [25] *Judycki J.*: Podstawy określania współczynników równoważności obciążenia osi do projektowania nawierzchni drogowych. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **5**, 2, 2006, 55-92