



TOMASZ KULA ¹⁾
LESZEK RAFALSKI²⁾

IDENTIFICATION OF THE NUMBER OF OVERLOADED VEHICLES ON THE BASIS OF DATA FROM CHOSEN WEIGH-IN-MOTION PRESELECTION STATIONS

IDENTYFIKACJA LICZBY POJAZDÓW PRZECIĄŻONYCH NA PODSTAWIE DANYCH Z WYBRANYCH PRESELEKCYJNYCH STACJI WAŻENIA POJAZDÓW W RUCHU

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono wyniki wykonanych w 2014 i 2018 roku badań dotyczących liczby pojazdów przeciążonych poruszających się po wybranych drogach. Zbadano procentowy udział pojazdów przeciążonych w całkowitej liczbie pojazdów, określono liczbę dni charakteryzujących się dziennym udziałem pojazdów przeciążonych przypadającym na dany przedział – przy różnych wariantach pomiarów, bez kontroli i z kontrolą Głównego Inspektoratu Transportu Drogowego (GITD). Ustalono, że procentowy udział pojazdów przeciążonych zależał od intensywności kontroli prowadzonych przez GITD. Udział pojazdów przeciążonych (tj. w przypadku braku kontroli wyniósł 25,1% (wartość minimalna 18,5%, maksymalna 31,4%). Przy sporadycznych kontrolach udział pojazdów przeciążonych wyniósł 9,0% (wartość minimalna 6,4%, maksymalna 11,0%). Przy intensywnych kontrolach udział pojazdów przeciążonych wynosił 1,2% (wartość minimalna 0%, maksymalna 2,5%) oraz 2,2% (wartość minimalna 0%, maksymalna 7,7%). Stwierdzono, że histogramy procentowego udziału pojazdów przeciążonych mogą być aproksymowane rozkładem normalnym.

SŁOWA KLUCZOWE: pojazd przeciążony, pomiary masy pojazdu w ruchu, ruch drogowy.

ABSTRACT. The paper presents the results of research conducted in 2014 and 2018 pertaining to the number of overloaded vehicles on chosen roads. Proportion of overloaded vehicles in the total number of vehicles was investigated, and the number of days in which the percentage of overloaded vehicles fell within the given interval was determined, taking into account different accompanying circumstances – i.e. measurements with and without concurrent inspections by the General Inspectorate of Road Transport (GITD) in the vicinity of the weighing station. It was established that the percentage of overloaded vehicles depended on the intensity of GITD inspections. The proportion of overloaded vehicles when no accompanying inspections were conducted equaled 25.1% (minimum value of 18.5%, maximum value of 31.4%). With occasional inspections, the share of overloaded vehicles equaled 9.0% (minimum value of 6.4%, maximum value of 11.0%). With intensive inspections, the proportion of overloaded vehicles equaled 1.2% (minimum value of 0%, maximum value of 2.5%) and 2.2% (minimum value of 0%, maximum value of 7.7%). It was observed that histograms of percentage of overloaded vehicles may be approximated using normal distribution.

KEYWORDS: overloaded vehicle, road traffic, weigh-in-motion measurements.

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

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

1. WSTĘP

Pojazdy przeciążone wywierają negatywny wpływ na trwałość konstrukcji nawierzchni drogowych i obiektów mostowych. Potwierdzają to studia literaturowe [1-5] i liczne obserwacje odnoszące się do przyspieszonego zniszczenia konstrukcji nawierzchni drogowych. Dotyczy to zarówno przekroczenia dopuszczalnej masy całkowitej pojazdu, jak i dopuszczalnego nacisku osi na nawierzchnię drogową. Nawet nieznaczne przekroczenie dopuszczalnych wartości nacisku osi pojazdu powoduje przyspieszoną degradację konstrukcji nawierzchni drogowej. Według [1, 5, 6] degradujący wpływ obciążenia przyrasta w sposób nieliniowy (Rys. 1) i jest opisany tzw. prawem czwartej potęgi (współczynnik $\alpha = 4$).

Natomiast w raportach opracowanych przez OECD/ECMT-European Long-Life Pavement Group ELLPAG [6] oraz Joint OECD/ITF Transport Research Committee [7] zweryfikowano prawo czwartej potęgi i wykazano, że oddziaływanie pojazdów ciężkich na nawierzchnię jest większe niż przyjmowane na podstawie wcześniejszych badań, zaś współczynnik α , którego wartość dotychczas przyjmowano jako 4, wynosi w przypadku nawierzchni asfaltowych – 5, a nawierzchni betonowych – od 10 do 12 (w zależności od szczegółowych rozwiązań konstrukcji nawierzchni).

Ruch pojazdów ciężkich po drogach publicznych w Polsce jest regulowany odpowiednimi przepisami. Ustawa [8] wskazuje, że na drogach publicznych dopuszcza się ruch pojazdów o dopuszczalnym nacisku pojedynczej osi napędowej do 11,5 t. Na niektórych drogach może być natomiast wprowadzone ograniczenie tego nacisku do 10 t lub 8 t. Od sierpnia 2016 roku rozporządzenie [9] zawiera obowiązujące wymagania dotyczące dopuszczalnej masy całkowitej pojedynczych pojazdów, zespołu pojazdów i pojazdów członowych, a także dopuszczalnego nacisku osi. Dopuszczalna masa pojazdów ciężarowych wynosi od 18 t do 44 t – w zależności od typu pojazdu. Najbardziej rozpowszechnionym typem pojazdu ciężarowego o dużej ładowności jest ciągnik siodłowy o dwóch osiach pojedynczych z naczepą trójosiową. Przy takim układzie osi i masie całkowitej 40 t nacisk osi tylnej ciągnika siodłowego nie przekracza 11,5 t. Po zmianie rozporządzenia i dopuszczeniu pojazdu o masie całkowitej 42 t każdy pojazd tego typu załadowany do wartości dopuszczalnej przekracza wartość dopuszczalną nacisku pojedynczej osi (11,5 t) na osi tylnej ciągnika siodłowego, więc jest pojazdem nienormatywnym.

Najskuteczniejszym sposobem wykrywania pojazdów przeciążonych bez ograniczania ich prędkości jest ważenie w ruchu. Systemy takie, nazywane w skrócie WIM (ang. *Weigh-In-Motion*), pozwalają na zidentyfikowanie nacisków

1. INTRODUCTION

Overloaded vehicles negatively affect the lifespan of road pavements and bridge structures, as confirmed by the literature [1-5] and numerous observations of accelerated road pavement failure. This effect pertains both to excessive gross vehicle weight and to excessive axle load. Even a slight excess over the limit axle load results in accelerated degradation of the pavement structure. According to [1, 5, 6] the destructive effect of loading increases in a non-linear manner (Fig. 1) and may be expressed by the so-called fourth power rule (exponent of $\alpha = 4$).

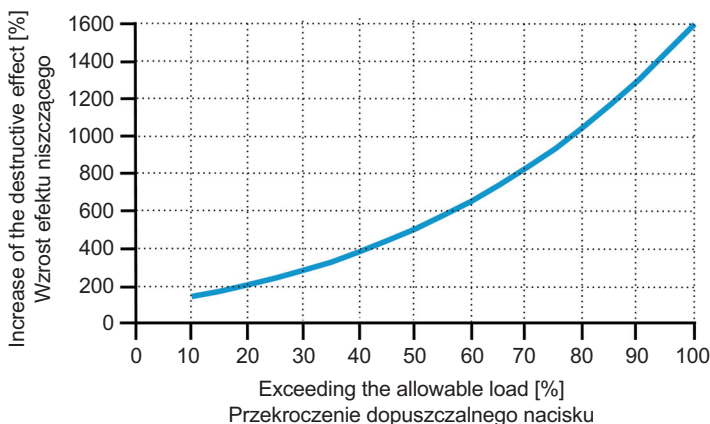


Fig. 1. Relationship between the increase in the damaging effect on the road pavement structure and the excess over the permissible axle load (based on [6])

Rys. 1. Zależność wzrostu niszczonego efektu obciążenia na konstrukcję nawierzchni drogowych od przekroczenia dopuszczalnego nacisku osi wg [6]

Nevertheless, the fourth power rule has been verified in the reports prepared by the OECD/ECMT-European Long-Life Pavement Group ELLPAG [6] and Joint OECD/ITF Transport Research Committee [7], which have shown that the impact of heavy vehicles on the pavement is greater than assumed in the past, while the α exponent, whose value was assumed as 4, equals 5 for asphalt pavements and 10 to 12 for concrete pavements (depending on specific structural solutions).

Heavy vehicle traffic on public roads in Poland is subject to relevant regulations. The Law [8] states that the maximum permitted single drive axle load of a vehicle using public roads is 11.5 t. On some roads, however, the limit may be decreased to 10 t or 8 t. Since August 2016, the ordinance [9] includes the requirements in force regarding permitted gross vehicle weight, gross weight of combination vehicles and articulated vehicles, along with the limit axle load. The permissible gross weight of heavy vehicles is from 18 t to 44 t, depending on the type of the vehicle.

poszczególnych osi pojazdu, a w konsekwencji masy całego pojazdu. W latach 1993-1999 zrealizowano europejski projekt pod akronimem COST323, którego celem było wykorzystanie dostępnych wówczas technologii do budowy systemów WIM. Raport z tego projektu [3] zawiera zestaw zasad postępowania dotyczących ważenia pojazdów w ruchu.

Obecnie prawie wszystkie kraje europejskie wykorzystują technologię ważenia pojazdów w ruchu w celu eliminacji pojazdów przeciążonych. Od 2015 r. we Francji działa 29 stacji WIM zlokalizowanych w głównych korytarzach transportowych i w pobliżu granic [10]. Według danych z tych stacji około 5-10% pojazdów ciężarowych jest przeciążonych, a niektóre pojazdy są przeciążone o 20% lub więcej. Według [11] wskaźnik przeciążenia samochodów ciężarowych poruszających się po drogach Bośni i Hercegowiny jest niezwykle wysoki, w szczególności w przypadku 5-osiowych ciężarówek, wśród których 58,7% wszystkich pojazdów jest przeciążone. Poziom przeciążenia wynosi od 10% do 20% maksymalnej dopuszczalnej masy pojazdu.

Jak wynika z [12], 20% ciągników siodłowych z naczepami na drogach Portugalii jest przeciążonych. W Szwajcarii według [13] odsetek pojazdów przeciążonych wynosi około 10% ogółu. Natomiast w całej UE udział pojazdów przeciążonych waha się od 5% do 20%, w zależności od rodzaju drogi [14].

Przeciążone samochody ciężarowe stanowią poważny problem w krajach o słabo rozwiniętej infrastrukturze drogowej. Dotyczy to między innymi Indonezji, gdzie w ostatniej dekadzie odsetek przeciążonych ciężarówek przekraczał 60% [12]. Badania [15] przeprowadzone w czerwcu, lipcu i sierpniu 2016 r. na jednej z dróg Brazylii na stacji WIM wykazały, że na zarejestrowanych łącznie 211 030 ciężkich pojazdów ciężarowych 33 067 (15,7%) było przeciążonych. Udział procentowy różnych rodzajów pojazdów wśród pojazdów przeciążonych w Brazylii przedstawiono w [16].

Według [17] Ministerstwo Transportu i Dróg Iranu wdraża obecnie rozmieszczoną na terenie całego kraju sieć WIM, składającą się z ponad 150 stacji pomiarowych. Głównym celem stosowania systemów WIM jest pomiar masy całkowitej, nacisku osi i grup osi samochodów ciężarowych, co pozwala na egzekwowanie ograniczeń obciążenia w celu poprawy stanu dróg. Autorzy [17] uważają, że proponowane przez nich nowe podejście pozwoli uzyskać większą niż w przypadku dostępnych metod dokładność szacowania nacisku osi i wprowadzenie tzw. inteligentnego systemu ważenia (IWIM), kwalifikującego się do bezpośredniego naliczania kar za przekroczenia. Na Węgrzech działa 107 stacji WIM [18] zespolonych w jeden system, który będzie pozwalać na bezpośredni pobór

The most popular type of high-capacity heavy vehicle in Poland is a semi-trailer truck – tractor with two single axles and a three-axle trailer. With such an arrangement of axles and the gross weight of 40 t, the load of the rear axle of the tractor does not exceed 11.5 t. After introduction of changes in the ordinance and increase in the permissible gross weight to 42 t, every vehicle of this type loaded to its maximum permissible weight exceeds the limit axle load (11.5 t) on the rear axle of the tractor, thus becoming an overweight vehicle.

The most effective method of detection of overloaded vehicles without limiting traffic speed is weighing of moving vehicles. Such systems, referred to as WIM (weigh-in-motion), enable determination of load of individual axles and, consequently, of the entire vehicle. In the years 1993-1999 a European project under the acronym COST323 was realized in order to implement the available technology in development of WIM systems. The report from this project [3] includes a set of standards pertaining to weighing of vehicles in motion.

Currently nearly all European countries use the weigh-in-motion technology to eliminate overloaded vehicles. In France, 29 WIM stations have been operational since 2015. They are located on major transport corridors and in the vicinity of borders [10]. According to data from these stations, approx. 5-10% of heavy vehicles are overloaded, with some vehicles exceeding the permissible limits by 20% or more. According to [11], the rate of overloading of heavy vehicles on the roads of Bosnia and Herzegovina is extraordinarily high, especially in the case of 5-axle trucks, which are overloaded in 58.7% of cases. The level of overloading is between 10% and 20% of the permissible gross vehicle weight.

As shown in [12], 20% of semi-trailer trucks on Portuguese roads are overloaded. In Switzerland the percentage of overloaded vehicles is around 10%, according to [13]. In the entire EU, the proportion of overloaded vehicles ranges from 5% to 20%, depending on the type of the road [14].

Overloaded vehicles pose a major issue in countries with underdeveloped road infrastructure. The problem concerns, among others, Indonesia, where the proportion of overloaded trucks in the last decade exceeded 60% [12]. The research [15], which was conducted in June, July and August 2016 at a WIM station on one of Brazilian roads, shows that 33,067 (15.7%) out of the total of 211,030 heavy vehicles registered at the station was overloaded. Percentage of overloaded vehicles in Brazil according to their type was shown in [16].

kar za przekroczenia masy całkowitej pojazdu i przekroczenia obciążenia osi. W Irlandii od roku 2014 działa sześć stacji WIM zainstalowanych na trasach prowadzących do i z Dublinu [19]. Każda ze stacji składa się z dwóch piezopolimerowych czujników WIM i jednej pętli indukcyjnej na każdym pasie ruchu w wybranym kierunku. Dane z tych stacji służą do nowelizacji przepisów dotyczących dopuszczalnych w Irlandii mas całkowitych pojazdów i dopuszczalnych nacisków osi pojazdów. Pojazdy przeciążone stanowią także poważne zagrożenie dla drogowych obiektów mostowych. Dlatego w celu zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji podwieszono mostu w Hongkongu (most Hongkong-Zhuhai-Makau) poddaje się ważeniu wszystkie pojazdy mające skorzystać z przeprawy [20].

Skala problemu związana z pojazdami przeciążonymi nie była dokładnie znana w Polsce do czasu budowy na sieci dróg krajowych znacznej liczby stacji do ważenia pojazdów w ruchu. Skuteczność identyfikacji przeciążonych pojazdów zwiększyła się istotnie od 2010 roku, kiedy to w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów opracowano System Kompleksowej Identyfikacji Pojazdów (ISKIP) i wdrożono go na stacjach ważenia WIM. Z badań IBDiM [21, 22] wynikało, że w przypadku braku kontroli ważenia liczba przeciążonych pojazdów przekraczała 20%.

Ponadto w ostatnich latach w Polsce przeprowadzono szereg badań związanych z ważeniem pojazdów w ruchu. Dane ze stacji pomiarowych wykorzystywano do analizy ruchu pod kątem trwałości nawierzchni drogowych. W [23] przedstawiono dane z ważenia pojazdów w ruchu uzyskane na 11 stacjach pomiarowych w okresie trzech lat. Istotnym elementem tej pracy była ocena wpływu pojazdów przeciążonych na trwałość zmęczeniową nawierzchni. Stwierdzono, że zwiększenie udziału pojazdów przeciążonych z 0% do 20% powoduje zmniejszenie trwałości zmęczeniowej nawierzchni podatnych i półsztywnych średnio o 55%. Wyniki ważenia w ruchu zostały wykorzystane do analizy struktury ruchu samochodów ciężarowych na wybranych drogach w Polsce [24, 25]. Celem tych badań było określenie rzeczywistych nacisków na oś pojazdów ciężarowych pod kątem projektowania nawierzchni podatnych i półsztywnych. Wyniki zostały opisane w [26]. Badania zaowocowały rozwojem metodyki identyfikowania widma obciążeń, czyli liczby osi pojazdów o różnym obciążeniu w poszczególnych dniach [27]. W [28] stwierdzono na podstawie badań widma obciążeń ze stacji pomiarowych, że teoretyczne rozwiązanie dotyczące modelu prognozowania zniszczenia nawierzchni wymaga skorygowania i przedstawiono metodykę takiej korekty.

According to [17], Ministry of Roads and Transportation of Iran is currently introducing a nationwide WIM network, consisting of over 150 weighing stations. The primary aim of use of WIM systems is measurement of gross weight, loads of individual axles and groups of axles, which enables enforcement of applicable limits and improvement of pavement condition. The authors of [17] propose a new approach, declaring that it will provide greater accuracy of axle load estimation and enable introduction of the so-called intelligent weigh-in-motion system (IWIM), which will qualify for use in direct enforcement of load limits. In Hungary there are 107 operational WIM stations [18] combined into a single system, which will enable direct collection of fines for breaches of limits of gross vehicle weight and axle load. In Ireland six WIM stations have been operational since 2014, located on routes leading to and from Dublin [19]. Every station consists of two piezo polymer WIM sensors and one induction loop per each traffic lane in each direction. Data from the stations is used for amendments in regulations concerning acceptable gross vehicle weights and axle loads in Ireland. Overloaded vehicles pose a major threat to road bridges as well. Therefore, in order to ensure structural safety of the cable-stayed bridge in Hong Kong (the Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge), all vehicles are weighed prior to crossing [20].

The scale of the problem of vehicle overloading in Poland had been largely unidentified until a considerable number of WIM stations was built on the network of national roads. Effectiveness of identification of overloaded vehicles has increased significantly since 2010, when the Intelligent System of Comprehensive Vehicle Identification (ISKIP) was developed at the Road and Bridge Research Institute (IBDiM) and introduced on WIM stations. According to the research conducted by the Institute [21, 22], without accompanying weighing inspections the percentage of overloaded vehicles exceeded 20%.

Moreover, in recent years a number of studies devoted to weighing of vehicles in motion were performed in Poland. Data obtained from the WIM stations was used in analyses of traffic in the aspect of pavement life. Publication [23] presents WIM data collected over 3 years at 11 weighing stations. A significant element of the work is the assessment of the impact of overloaded vehicles on pavement fatigue life. It was noted that an increase in the proportion of overloaded vehicles from 0% to 20% results in an average decrease in the fatigue life of flexible and semi-rigid pavements by 55%. Weigh-in-motion results were used in analysis of the structure of heavy vehicle traffic on chosen

Istotną część badań prowadzonych w Polsce dotyczyła dokładności ważenia pojazdów w ruchu. W [29, 30] przedstawiono wyniki badań z których wynika, że systemy ważenia złożone z 2 pasów sensorów mogą być przydatne do preselekcyjnego ważenia, natomiast w przypadku dokładnego ważenia pojazdów skutecznym jest system złożony z 16 pasów sensorów. Na dokładność ważenia pojazdów istotny wpływ ma temperatura nawierzchni. W [31] zbadano wpływ temperatury na różne rodzaje sensorów. Niektóre polskie prace (np. [32]) poświęcone są problematyce autokalibracji systemów ważenia i opisują zoptymalizowane algorytmy, które umożliwiają kalibrację zapewniającą dokładność ważenia. Ponieważ stacje do ważenia rejestrują sylwetki pojazdów, mogą być wykorzystane do oceny poziomu hałasu drogowego [33] lub weryfikacji modeli ruchu drogowego [34].

Z przedstawionego przeglądu literatury wynika, że przeciążone samochody ciężarowe stanowią poważny problem w wielu krajach, w tym w Polsce. Zarówno w kraju, jak i za granicą prowadzone są prace badawcze i wdrożenia systemów zapewniających dokładne ważenie pojazdów w ruchu.

Celem niniejszej pracy było zbadanie na wyselekcjonowanych stacjach WIM usytuowanych na wybranych drogach w Polsce, jaka jest liczba i procentowy udział pojazdów ciężarowych przekraczających dopuszczalną masę całkowitą w ogólnej liczbie pojazdów ciężarowych w różnych warunkach, tj. bez kontroli i z kontrolą GITD. Ponieważ znacząca część drogowych obiektów inżynierskich – w tym mostów i wiaduktów – nie jest w Polsce dostosowana do ruchu pojazdów o masie 40 ton, do analizy wybrano masę całkowitą pojazdów, nie zaś nacisk pojedynczych osi.

2. METODA BADANIA

Metoda badania polegała na pomiarze w trakcie ruchu masy całkowitej pojazdów ciężarowych na wybranych stacjach ważenia WIM usytuowanych na drogach oraz ustaleniu liczby i procentowego udziału pojazdów przeciążonych w różnych warunkach, tj. bez kontroli oraz z kontrolą GITD.

Podstawowym elementem stacji ważenia są czujniki (kwarcowe, piezoelektryczne lub pojemnościowe) wbudowane w nawierzchnię prostopadle do kierunku ruchu. Schemat typowego punktu ważenia preselekcyjnego WIM przedstawiono na Rys. 2.

Punkt ważenia preselekcyjnego WIM składa się: ze stacji pomiarowej wyposażonej w system ważenia dynamicznego (czujniki i pętle indukcyjne), z systemu identyfikacji pojazdów (kamery i systemy identyfikacji) oraz z centralnego systemu do zarządzania stacjami pomiarowymi.

roads in Poland [24, 25]. The aim of the studies was to determine the actual axle loads of heavy vehicles for use in the design of flexible and semi-rigid pavements. The results were described in [26]. The research resulted in development of methodology of axle load spectra identification, i.e. determination of the number of axles in particular load intervals over given days [27]. In [28], based on investigation of axle load spectra from WIM stations, it was established that the theoretical solution for prediction of pavement failure requires correction and appropriate corrective methodology was presented.

A significant part of the research conducted in Poland concerns weigh-in-motion accuracy. As implied by the test results presented in [29, 30], WIM systems consisting of 2 strips of sensors per lane are sufficient for preselection weighing, whereas accurate weighing of vehicles requires a system consisting of 16 sensor strips. Pavement temperature is a significant factor affecting weighing accuracy. The impact of temperature on various sensor types was investigated in [31]. Some Polish studies (e.g. [32]) are devoted to issues of WIM system autocalibration and describe optimized algorithms providing better calibration and weighing accuracy. As the weigh-in-motion stations register axle configurations and profiles of the vehicles, they may be used in evaluation of road noise [33] or verification of traffic models [34].

Based on the presented literature study, overloaded heavy vehicles are a major problem in many countries, including Poland. Both in Poland and abroad, research studies are being performed and new systems are being introduced in order to provide accurate weighing of vehicles in motion.

The aim of the presented work was to investigate the number and percentage of heavy vehicles exceeding the acceptable gross weight at selected WIM stations situated on chosen roads in Poland under various accompanying circumstances – i.e. with or without concurrent inspections by the General Inspectorate of Road Transport (GITD). Since a considerable number of road bridge structures in Poland – both over water and land – are not accommodated to usage by vehicles weighing over 40 t, gross vehicle weight (and not the load of individual axles) was chosen as the analyzed parameter.

2. RESEARCH METHODOLOGY

The method of the research consisted in measurements of gross vehicle weight of heavy vehicles at chosen WIM stations and determination of the number and percentage of overloaded vehicles under different circumstances – i.e. with and without concurrent GITD inspections.

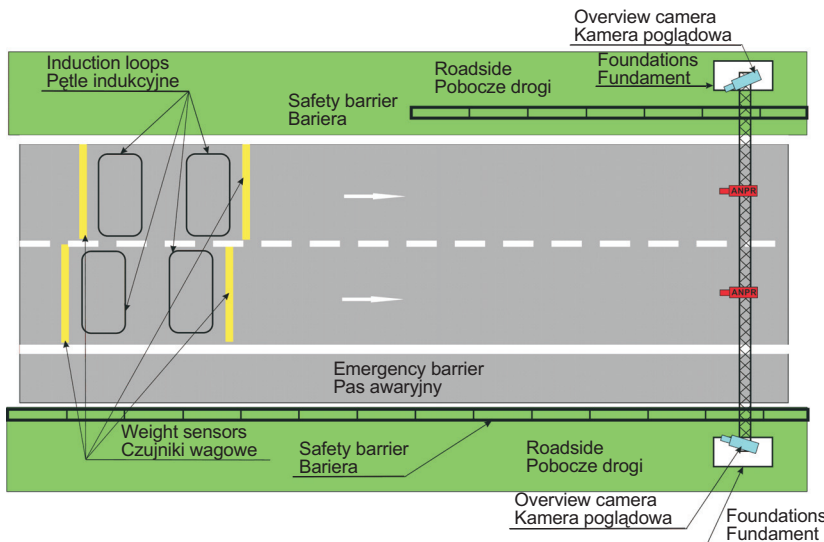


Fig. 2. Scheme of a WIM preselection weighing point
Rys. 2. Schemat punktu ważenia preselekcyjnego WIM

Parametrami rejestrowanymi i określanymi podczas przejazdu każdego pojazdu przez punkt pomiarowy były m.in.:

- masa całkowita pojazdu,
- nacisk osi pojedynczej i wielokrotnej,
- liczba osi i odległość między nimi,
- długość pojazdu,
- widok pojazdu z boku, umożliwiający określenie liczby osi.

Jak wspomniano powyżej, z wcześniejszych badań IBDiM [21, 22] wynikało, że w przypadku braku kontroli ważenia udział przeciążonych pojazdów przekracza 20%. Aby zweryfikować te spostrzeżenia przeanalizowano wyniki uzyskane ze stacji pomiarowej WIM w Radomiu przy ul. Czarnieckiego w sierpniu 2014 r., gdzie GITD nie prowadziła kontroli (wariant A). Wyniki te porównano z danymi uzyskanymi z preselekcyjnych stacji ważenia w następujących miejscach, terminach i warunkach kontroli:

- wariant B: Bydgoszcz, ul. Armii Krajowej w sierpniu 2014 r., gdzie GITD prowadziła sporadyczne kontrole,
- wariant C: Bydgoszcz, ul. Armii Krajowej w październiku 2015 r., gdzie GITD prowadziła intensywne kontrole,
- wariant D: Bydgoszcz, ul. Nowotoruńska w sierpniu 2018 r., gdzie GITD prowadziła intensywne kontrole.

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

W sierpniu 2014 r. w punkcie ważenia WIM na ul. Czarnieckiego w Radomiu prowadzone były pomiary masy pojazdów. GITD w tym miesiącu nie wykonywała kontroli pojazdów

The basic components of a weighing station are the sensors (quartz, piezoelectric or capacitive) installed in the pavement perpendicularly to traffic direction. A scheme of a typical preselection WIM weighing point is shown in Fig. 2.

Each preselection WIM point consisted of a weighing station with dynamic weighing system (sensors and induction loops), vehicle identification devices (cameras and identification systems) and a central system for management of weighing stations.

Parameters registered and determined during each vehicle pass included:

- gross vehicle weight,
- load of single and multiple axles, number of axles and distance between the axles,
- vehicle length,
- image of the side of the vehicle, enabling determination of the number of axles.

As mentioned above, earlier research by IBDiM [21, 22] indicated that without accompanying weighing inspections the proportion of overloaded vehicles exceeded 20%. In order to verify those findings, analyses were performed on the results obtained from the WIM station located in Radom on Czarnieckiego St. in August 2014, when no GITD inspections were performed (variant A). The results were compared with data obtained from other preselection WIM stations. The locations, months and circumstances are listed below:

- wariant B: Bydgoszcz, Armii Krajowej St., August 2014, with occasional GITD inspections,
- wariant C: Bydgoszcz, Armii Krajowej St., October 2015, with intensive GITD inspections,
- wariant D: Bydgoszcz, Nowotoruńska St., August 2018, with intensive GITD inspections.

3. RESULTS AND THEIR ANALYSIS

In August 2014 weigh-in-motion measurements were being performed continuously at the WIM station on Czarnieckiego St. in Radom. In this month GITD did not

ciężarowych na tej ulicy. W Tabl. 1 przedstawiono wyniki pomiarów z punktu WIM. W kolumnach 2 i 3 podano kolejno liczby wszystkich przejeżdżających ciężarówek i ciągników siodłowych z naczepą, a w kolumnie 4 – obu tych grup pojazdów razem. W kolumnach 5, 6 i 7 podano liczby pojazdów przeciążonych z podziałem na trzy grupy pod względem masy, zaś w kolumnie 8 – łączną liczbę pojazdów przeciążonych. W kolumnie 9 przedstawiono udział pojazdów przeciążonych, tj. iloraz wartości z kolumny 8 przez wartość z kolumny 4, wyrażony w procentach. W podobny sposób przedstawiono wyniki pomiarów w Tabl. 2-4.

conduct any weighing inspections of heavy vehicles on this street. Table 1 shows the results of the WIM measurements. Columns 2 and 3 give the number of all passing single unit trucks and semi-trailer trucks, respectively. Column 4 includes the total number of vehicles in these two groups. Columns 5, 6, and 7 present the number of overloaded vehicles divided into three groups according to their mass, and column 8 – the total number of overloaded vehicles. Column 9 shows the proportion of overloaded vehicles, i.e. value from column 8 divided by value from column 4, expressed in per cent. Weighing results in Tables 2, 3 and 4 are presented in an analogous manner.

Table 1. Number of trucks and their total weight; Radom, Czarnieckiego St., August 2014

Tablica 1. Liczba pojazdów ciężarowych i ich masa całkowita; Radom, ul. Czarnieckiego, sierpień 2014 r.

Day Dzień	Total number of vehicles Liczba pojazdów ogółem			Number of overloaded vehicles Liczba pojazdów przeciążonych				The share of overloaded vehicles Udział pojazdów przeciążonych x [%]
	Single unit truck Ciężarowy bez przyczepy	Tractor unit with semitrailer Ciągnik siodłowy z naczepą	Total Łącznie	Mass / Masa 40 t < M ≤ 42 t	Mass / Masa 42 t < M ≤ 44 t	Mass / Masa M > 44 t	Total Łącznie	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	857	1598	2455	50	76	435	561	22.9
2	343	614	957	25	25	164	214	22.4
3	242	459	701	23	14	167	204	29.1
4	938	2052	2990	60	73	692	825	27.6
5	971	2101	3072	43	76	598	717	23.3
6	1021	2032	3053	67	69	611	747	24.5
7	999	2038	3037	70	75	612	757	24.9
8	836	1635	2471	48	51	415	514	20.8
9	337	692	1029	30	31	203	264	25.7
10	247	505	752	22	19	175	216	28.7
11	954	2118	3072	66	77	644	787	25.6
12	1108	2050	3158	61	74	595	730	23.1
13	1047	2061	3108	79	80	589	748	24.1
14	860	1524	2384	46	45	351	442	18.5
15	132	374	506	19	20	120	159	31.4
16	313	410	723	29	19	150	198	27.4
17	256	524	780	26	21	198	245	31.4
18	973	2097	3070	84	81	676	841	27.4
19	977	2114	3091	76	73	631	780	25.2
20	1059	2047	3106	65	59	607	731	23.5
21	1085	1972	3057	63	62	569	694	22.7
22	928	1611	2539	59	54	402	515	20.3
23	414	611	1025	26	25	189	240	23.4
24	237	508	745	26	23	184	233	31.3
25	1008	2064	3072	74	75	612	761	24.8
26	1078	1999	3077	83	69	601	753	24.5
27	1034	1958	2992	68	86	579	733	24.5
28	1014	1864	2878	80	79	562	721	25.1
29	960	1672	2632	50	73	433	556	2.1
30	470	678	1148	25	33	203	261	22.7
31	264	500	764	24	30	170	224	29.3
Total Ogółem	22962	44482	67444	1567	1667	13137	16371	24.5

Wyniki badań uzyskanych z preselekcyjnych stacji ważenia WIM w Bydgoszczy zestawiono w następujących tablicach:

- Tabl. 2 – dane z wagi przy ul. Armii Krajowej w sierpniu 2014 r., gdzie GITD prowadziła sporadyczne kontrole (wariant B),
- Tabl. 3 – dane z wagi przy ul. Armii Krajowej w październiku 2015 r., gdzie GITD prowadziła intensywne kontrole (wariant C),
- Tabl. 4 – dane z wagi przy ul. Nowotoruńskiej w sierpniu 2018 r., gdzie GITD prowadziła intensywne kontrole (wariant D).

Test results from preselection WIM stations in Bydgoszcz are shown in the following tables:

- Table 2 – data from the weighing station on Armii Krajowej St. in August 2014, with occasional GITD inspections (variant B),
- Table 3 – data from the weighing station on Armii Krajowej St. in October 2015, with intensive GITD inspections (variant C),
- Table 4 – data from the weighing station on Nowotoruńska St. in August 2018, with intensive GITD inspections (variant D).

Table 2. Number of trucks and their total weight; Bydgoszcz, Armii Krajowej St., August 2014

Tablica 2. Liczba pojazdów ciężarowych i ich masa całkowita; Bydgoszcz, ul. Armii Krajowej, sierpień 2014 r.

Day Dzień	Total number of vehicles Liczba pojazdów ogółem			Number of overloaded vehicles Liczba pojazdów przeciążonych				The share of overloaded vehicles Udział pojazdów przeciążonych x [%]
	Single unit truck Ciężarowy bez przyczepy	Tractor unit with semitrailer Ciągnik siodłowy z naczepą	Total Łącznie	Mass / Masa 40 t < M ≤ 42 t	Mass / Masa 42 t < M ≤ 44 t	Mass / Masa M > 44 t	Total Łącznie	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	647	1013	1660	93	48	9	150	9.0
2	172	283	455	24	12	0	36	7.9
3	109	319	428	29	16	2	47	11.0
4	674	1253	1927	122	43	12	177	9.2
5	619	1267	1886	131	59	11	201	10.7
6	635	1271	1906	133	56	11	200	10.5
7	616	1119	1735	115	43	17	175	10.1
8	640	971	1611	89	49	9	147	9.1
9	196	321	517	30	13	0	43	8.3
10	128	296	424	22	9	7	38	9.0
11	642	1312	1954	154	51	8	213	10.9
12	641	1345	1986	138	58	8	204	10.3
13	701	1228	1929	114	48	15	177	9.2
14	609	930	1539	85	30	8	123	8.0
15	62	184	246	18	4	0	22	8.9
16	145	214	359	15	6	3	24	6.7
17	107	292	399	26	6	0	32	8.0
18	628	1348	1976	133	40	5	178	9.0
19	671	1359	2030	148	56	12	216	10.6
20	599	1185	1784	115	34	7	156	8.7
21	705	1184	1889	121	46	10	177	9.4
22	652	955	1607	88	27	7	122	7.6
23	236	282	518	24	8	1	33	6.4
24	131	324	455	39	9	1	49	10.8
25	710	1348	2058	131	39	6	176	8.6
26	690	1305	1995	154	47	19	220	11.0
27	708	1337	2045	123	43	10	176	8.6
28	669	1205	1874	123	51	8	182	9.7
29	676	915	1591	78	37	5	120	7.5
30	192	283	475	22	11	1	34	7.2
31	121	303	424	17	11	6	34	8.0
Total Ogółem	14731	26951	41682	2654	1010	218	3882	9.0

Table 3. Number of trucks and their total weight; Bydgoszcz, Armii Krajowej St., October 2015
 Tablica 3. Liczba pojazdów ciężarowych i ich masa całkowita; Bydgoszcz, ul. Armii Krajowej, październik 2015 r.

Day Dzień	Total number of vehicles Liczba pojazdów ogółem			Number of overloaded vehicles Liczba pojazdów przeciążonych				The share of overloaded vehicles Udział pojazdów przeciążonych x [%]
	Single unit truck Ciężarowy bez przyczepy	Tractor unit with semitrailer Ciągnik siodłowy z naczepą	Total Łącznie	Mass / Masa $40 t < M \leq 42 t$	Mass / Masa $42 t < M \leq 44 t$	Mass / Masa $M > 44 t$	Total Łącznie	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	627	1169	1796	8	3	7	18	1.0
2	594	945	1539	6	2	5	13	0.8
3	164	292	456	0	0	0	0	0.0
4	117	401	518	3	1	2	6	1.2
5	641	1357	1998	8	3	7	18	0.9
6	673	1323	1996	4	1	7	12	0.6
7	659	1239	1898	9	1	11	21	1.1
8	606	1213	1819	11	2	8	21	1.2
9	599	1050	1649	11	7	4	22	1.3
10	191	929	1120	1	0	2	3	0.3
11	107	392	499	5	2	0	7	1.4
12	593	1382	1975	18	3	6	27	1.4
13	643	1369	2012	22	10	6	38	1.9
14	643	1296	1939	24	10	14	48	2.5
15	606	1217	1823	12	7	6	25	1.4
16	656	841	1497	11	3	3	17	1.1
17	191	343	534	8	2	0	10	1.9
18	134	448	582	7	1	2	10	1.7
19	653	1336	1989	16	6	12	34	1.7
20	671	1273	1944	10	3	5	18	0.9
21	631	1274	1905	16	4	6	26	1.4
22	633	1202	1835	12	6	5	23	1.3
23	665	1036	1701	11	1	12	24	1.4
24	185	339	524	3	0	1	4	0.8
25	107	410	517	2	2	2	6	1.2
26	618	1396	2014	22	10	6	38	1.9
27	718	1386	2104	21	5	10	36	1.7
28	682	1288	1970	7	5	8	20	1.0
29	664	1221	1885	19	6	8	33	1.8
30	685	988	1673	8	0	3	11	0.7
31	120	264	384	0	0	0	0	0.0
Total Ogółem	15476	30619	46095	315	106	168	589	1.2

Na podstawie uzyskanych danych opracowano charakterystykę statystyczną procentowego udziału pojazdów przeciążonych, którą przedstawiono w Tabl. 5.

Korzystając z testu Shapiro-Wilka zauważono, że histogramy procentowego udziału pojazdów przeciążonych x mogą być aproksymowane rozkładem normalnym. Przykładowe aproksymacje wariantów A i C ilustrują Rys. 3 i 4. Udział pojazdów przeciążonych pokazany na rzędnej tych rysunków oznacza liczbę dni charakteryzujących się dziennym udziałem pojazdów przeciążonych przypadającym na dany przedział. Na podstawie aproksymacji można oceniać rozkład zmiennej x w zależności od przyjętego prawdopodobieństwa, wykorzystując średnią X , odchylenie standardowe S_x i współczynniki

Statistical characteristics of the proportion of overloaded vehicles were prepared based on the obtained data. They are presented in Table 5.

Based on the Shapiro-Wilk test, it was observed that histograms of percentage of overloaded vehicles x may be approximated using normal distribution. Example approximations of variants A and C are shown in Figs 3 and 4. The ordinate axis shows the number of days in which the percentage of overloaded vehicles fell within the given interval. Based on the approximation, the distribution of the variable x may be evaluated depending on the assumed probability, using the mean value X , standard deviation S_x and probability distribution parameters. The

rozkładu prawdopodobieństwa. Aproksymacje są ważne w przypadku, gdy $x \geq 0$, co wynika z przyjętej definicji x .

approximations are valid when $x \geq 0$, which results from the assumed definition of x .

Table 4. Number of trucks and their total weight; Bydgoszcz, Nowotoruńska St., August 2018

Tablica 4. Liczba pojazdów ciężarowych i ich masa całkowita; Bydgoszcz, ul. Nowotoruńska, sierpień 2018 r

Day Dzień	Total number of vehicles Liczba pojazdów ogółem			Number of overloaded vehicles Liczba pojazdów przeciążonych				The share of overloaded vehicles Udział pojazdów przeciążonych x [%]
	Single unit truck Ciężarowy bez przyczepy	Tractor unit with semitrailer Ciągnik siodłowy z naczepą	Total Łącznie	Mass / Masa 40 t < M ≤ 42 t	Mass / Masa 42 t < M ≤ 44 t	Mass / Masa M > 44 t	Total Łącznie	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	464	345	809	1	1	3	5	0.6
2	602	325	927	7	4	9	20	2.2
3	545	282	827	5	1	7	13	1.6
4	195	78	273	0	1	2	3	1.1
5	121	39	160	0	0	1	1	0.6
6	559	339	898	6	3	3	12	1.3
7	565	334	899	8	6	4	18	2.0
8	538	350	888	7	3	9	19	2.1
9	619	357	976	5	3	7	15	1.5
10	594	311	905	5	0	4	9	1.0
11	197	87	284	2	0	1	3	1.1
12	119	45	164	1	1	1	3	1.8
13	565	358	923	21	3	4	28	3.0
14	571	300	871	4	1	2	7	0.8
15	135	85	220	4	2	1	7	3.2
16	594	342	936	12	8	4	24	2.6
17	534	307	841	8	6	6	20	2.4
18	258	85	343	2	1	2	5	1.5
19	131	53	184	1	2	0	3	1.6
20	600	367	967	11	7	5	23	2.4
21	0	0	0	0	0	0	0	0.0
22	626	380	1006	14	8	9	31	3.1
23	653	361	1014	14	5	10	29	2.9
24	615	342	957	14	6	11	31	3.2
25	199	78	277	4	0	1	5	1.8
26	137	45	182	2	2	0	4	2.2
27	499	250	749	19	25	14	58	7.7
28	265	162	427	0	2	1	3	0.7
29	616	351	967	17	4	6	27	2.8
30	660	408	1068	26	8	13	47	4.4
31	585	169	754	14	1	10	25	3.3
Total Ogółem	13361	7335	20696	234	114	150	498	2.1

Table 5. Statistical characteristics of the proportion of overloaded vehicles

Tablica 5. Charakterystyka statystyczna procentowego udziału pojazdów przeciążonych

Weighing location and conditions Miejsce i warunki pomiaru	Number of days Liczba dni N	Mean value of the share of overloaded vehicles Wartość średnia procentowego udziału pojazdów przeciążonych X	Standard deviation Odchylenie standardowe S_x	Minimum value Wartość minimalna x_{\min}	Maximum value Wartość maksymalna x_{\max}
1	2	3	4	5	6
A. Radom, Czarnieckiego St. August 2014 - no GITD Radom, ul. Czarnieckiego, sierpień 2014 r., bez kontroli GITD	31	25.1	3.3	18.5	31.4

Table 5 (continued). Statistical characteristics of the proportion of overloaded vehicles
 Tablica 5 (ciąg dalszy). Charakterystyka statystyczna procentowego udziału pojazdów przeciążonych

Weighing location and conditions Miejsce i warunki pomiaru	Number of days Liczba dni N	Mean value of the share of overloaded vehicles Wartość średnia procentowego udziału pojazdów przeciążonych \bar{X}	Standard deviation Odchylenie standardowe S_x	Minimum value Wartość minimalna x_{\min}	Maximum value Wartość maksymalna x_{\max}
1	2	3	4	5	6
B. Bydgoszcz, Armii Krajowej St., August 2014 - occasional GITD inspections Bydgoszcz, ul. Armii Krajowej, sierpień 2014 r. - GITD prowadziła sporadyczne kontrole	31	9.0	1.3	6.4	11.0
C. Bydgoszcz, Armii Krajowej St., October 2015 - intensive GITD inspections Bydgoszcz, ul. Armii Krajowej, październik 2015 r. - GITD prowadziła intensywne kontrole	31	1.2	0.6	0	2.5
D. Bydgoszcz, Nowotoruńska St., August 2018 - intensive GITD inspections Bydgoszcz, ul. Nowotoruńska, sierpień 2018 r. - GITD prowadziła intensywne kontrole	31	2.2	1.4	0	7.7

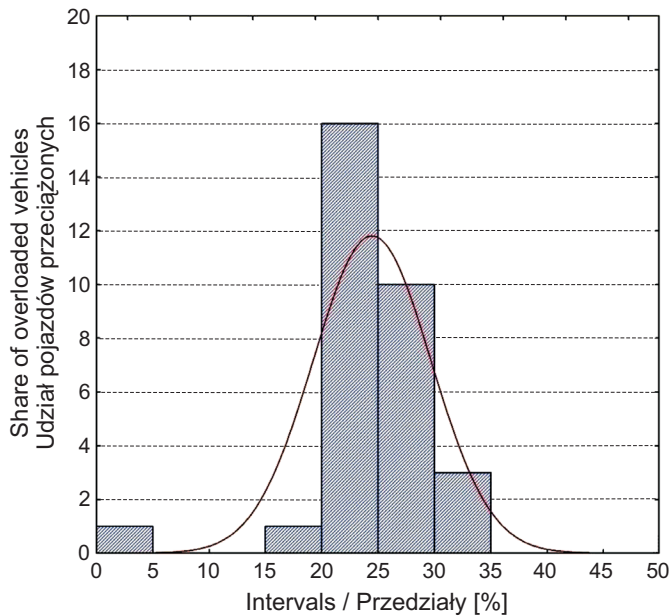


Fig. 3. Histogram of percentage of overloaded vehicles in variant A and its approximation by normal distribution
 Rys. 3. Histogram procentowego udziału pojazdów przeciążonych w wariancie A oraz aproksymacja rozkładem normalnym

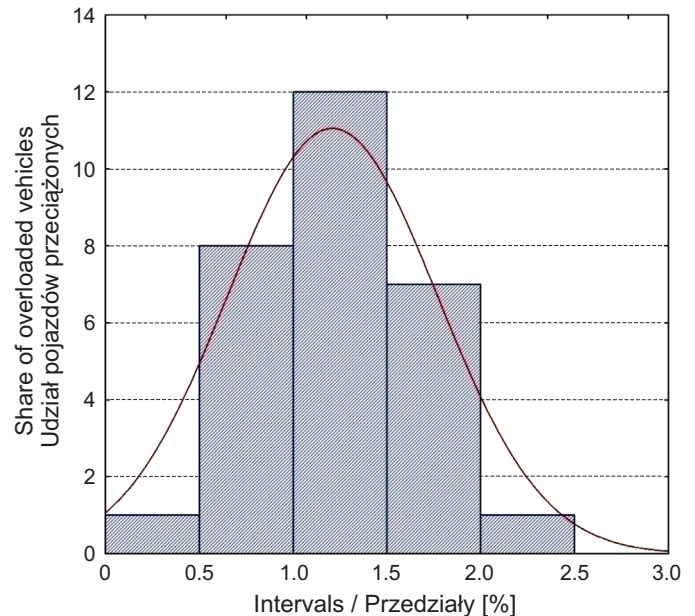


Fig. 4. Histogram of percentage of overloaded vehicles in variant C and its approximation by normal distribution
 Rys. 4. Histogram procentowego udziału pojazdów przeciążonych w wariancie C oraz aproksymacja rozkładem normalnym

4. WNIOSKI

Przedstawione wyniki badań wskazują, że procentowy udział pojazdów przeciążonych zidentyfikowanych na omawianych stacjach pomiarowych zależał od intensywności kontroli prowadzonych przez GITD. Potwierdzono relatywnie duży udział pojazdów przeciążonych w przypadku braku kontroli, który wyniósł 25,1% (przy wartości minimalnej 18,5% i maksymalnej 31,4%). Przy sporadycznych kontrolach udział pojazdów przeciążonych wyniósł 9,0% (przy wartości minimalnej 6,4% i maksymalnej 11,0%). Natomiast przy intensywnych kontrolach udział pojazdów przeciążonych był relatywnie mały i wynosił 1,2% (przy wartości minimalnej 0% i maksymalnej 2,5%) oraz 2,2% (przy wartości minimalnej 0% i maksymalnej 7,7%).

Stwierdzono, że w przypadku uzyskanych wyników pomiarów histogramy procentowego udziału pojazdów przeciążonych x mogą być aproksymowane rozkładem normalnym dla $x \geq 0$, co wynika z przyjętej definicji x . Na podstawie aproksymacji można oceniać rozkład zmiennej x w zależności od przyjętego prawdopodobieństwa, wykorzystując średnią X , odchylenie standardowe S_x i współczynniki rozkładu prawdopodobieństwa.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Bergan A.T., Lindgren N., Berthelot C., Woytowich B.*: Preserving Highway Infrastructure Using Weigh-In-Motion (WIM). International Road Dynamics Inc., 1998
- [2] *Jessup E.L.*: An economic analysis of trucker's incentive to overload as affected by the judicial system. Research in Transportation Economic, **4**, 1996, 131-159, DOI: 10.1016/S0739-8859(96)80008-4
- [3] *Loo van H.J.*: WIM-Hand Project. 1st Intermediate Report - Results of the first phase of the "Weight-In-Motion for direct Enforcement" Project in 2000. Road and Hydraulic Engineering Division, Delft, 2001
- [4] *Mohammadi J., Shah N.*: Statistical evaluation of truck overloads. Journal of Transportation Engineering, **118**, 5, 1992, 651-665, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1992)118:5(651)
- [5] *Mulyono A.T., Parikesit D., Antameng M., Rahim R.*: Analysis of loss cost of road pavement distress due to overloading freight transportation. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, **8**, 2010, 706-721, DOI: 10.11175/easts.8.706
- [6] A Guide to the use of Long-life Semi Rigid Pavements. European Long-Life Pavement Group Report ELLPAG, FEHRL, Brussels, 2009

4. CONCLUSIONS

The presented results indicate that the percentage of overloaded vehicles at the discussed measurement stations depended on the intensity of GITD inspections. Relatively high proportion of overloaded vehicles in the case of lack of inspections was confirmed, as the percentage equaled 25.1% (minimum value of 18.5% and maximum of 31.4%). With occasional inspections, the percentage of overloaded vehicles equaled 9.0% (minimum value of 6.4% and maximum of 11.0%). With intensive inspections, the percentage of overloaded vehicles equaled 1.2% (minimum value of 0% and maximum of 2.5%) and 2.2% (minimum value of 0% and maximum of 7.7%).

It was observed that for the obtained results histograms of percentage of overloaded vehicles x may be approximated using normal distribution for $x \geq 0$, which results from the assumed definition of x . Based on the approximation, the distribution of the variable x may be evaluated depending on the assumed probability, using the mean value X , standard deviation S_x and probability distribution parameters.

- [7] OECD: Moving Freight with better Trucks: Improving Safety, Productivity and Sustainability. ITF Research Reports, OECD Publishing, Paris, 2011, DOI: 10.1787/9789282102961-en
- [8] Ustawa z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych (Dz.U. Nr 19, poz. 115 z późn. zm.)
- [9] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 31 grudnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia (Dz.U. 2016 poz. 2022 z dnia 15.12.2016 r. z późn. zm.)
- [10] *Dolcemascolo V., Jacob B., Klein E.*: French policy to prevent overloading. Proceedings of the 8th International Conference on Weigh-In-Motion, Prague, 2019
- [11] *Kulović M., Injac Z., Davidović S., Posavac I.*: Modeling truck weigh stations' locations based on truck traffic flow and overweight violation: A case study in Bosnia and Herzegovina. Promet - Traffic&Transportation, **30**, 2, 2018, 163-171, DOI: 10.7307/ptt.v30i2.2423
- [12] *Pais J.C., Figueiras H., Pereira P., Kaloush K.*: The pavements cost due to traffic overloads. International Journal of Pavement Engineering, **20**, 12, 2019, 1463-1473, DOI: 10.1080/10298436.2018.1435876
- [13] *Mayer R.M., Poulikakos L.D., Lees A.R., Heutschi K., Kalivoda M.T., Soltic P.*: Reducing the environmental impact of road and rail vehicles. Environmental Impact Assessment Review, **32**, 1, 2012, 25-32, DOI: 10.1016/j.eiar.2011.02.001

- [14] *Kulauzović B., Jamnik J.*: Portable WiM as a tool for realistic traffic loading factors on Macedonian national road network. Proceedings of the 8th International Conference on Weigh-In-Motion, Prague, 2019
- [15] *Guerson L., Jung L.A., ZanelaTani V., De Mori F., Mattar Valente A.*: Brazilian National Program for Vehicle Overloading Prevention: Pilot Application. Proceedings of the 8th International Conference on Weigh-In-Motion, Prague, 2019
- [16] *Bernucci L., Bosso M., Mota R.V., Vasconcelos K.*: Impact of overloaded vehicles on asphalt pavement fatigue life. Proceedings of the 8th International Conference on Weigh-In-Motion, Prague, 2019
- [17] *Heidari F., Pouyan M.*: Application of Deep Learning Technique in High Speed Weigh-In-Motion Systems for Direct Enforcement. Proceedings of the 8th International Conference on Weigh-In-Motion, Prague, 2019
- [18] *Katkics A., Mikulas R., Ronay-Tobel B., Toldi M.*: Weight Enforcement Network of Hungary (A multi-level case study on WIM). Proceedings of the 8th International Conference on Weigh-In-Motion, Prague, 2019
- [19] *Corbally R., Connolly L., O'Brien E., O'Connor A., Cahil F.*: WIM Data Applications: Practical Examples from Ireland. Proceedings of the 8th International Conference on Weigh-In-Motion, Prague, 2019
- [20] *Agape I., Dontu A.I., Maftai A., Gaiginishi L., Barsanescu P.D.*: Actual types of sensors used for weighing in motion. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering **572**, 2019, 012102, DOI: 10.1088/1757-899X/572/1/012102
- [21] *Karkowski M., Rafalski L.*: The problem of overloaded vehicles in Poland. Baltic Road Conference, Vilnius, 2013
- [22] *Karkowski M., Rafalski L.*: High accuracy Weight In Motion Enforcement system implementation and testing. 21st World Congress on Intelligent Transport Systems, Detroit, 2014
- [23] *Ryś D.*: Obciążenie dróg przez pojazdy ciężkie i ich wpływ na trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Praca doktorska, Wydział Inżynierii Lądowej Środowiska, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2015
- [24] *Wardega R.*: Wpływ struktury ruchu na nośność nawierzchni drogowych. Praca doktorska, Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2006
- [25] *Szydło A., Wardega R.*: Struktura ruchu samochodów ciężarowych na wybranych drogach w Polsce, w: Lepsze drogi – lepsze życie. I Polski Kongres Drogowy, IBDiM, Warszawa, 2006, Referaty, 469-476
- [26] *Wardega R.*: Analiza nacisków osi pojazdów ciężarowych na nawierzchnie drogowe. Drogownictwo, **65**, 11, 2010, 400-408
- [27] *Wardega R., Szydło A.*: Widma obciążeń nawierzchni drogowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, **59**, 3/IV, 2012, 353-360
- [28] *Ryś D., Burnos P.*: Study on the accuracy of axle load spectra used for pavement design. International Journal of Pavement Engineering, 2021, 1-10, DOI: 10.1080/10298436.2021.1915492
- [29] *Gajda J., Sroka R., Stencel M., Zeglen T., Piwowar P., Burnos P., Marszałek Z.*: Design and Accuracy Assessment of the Multi-Sensor Weigh-In-Motion System. 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (12MTC), Pisa, 2015
- [30] *Burnos P., Gajda J.*: Thermal Property Analysis of Axle Load Sensors for Weighing Vehicles in Weigh-In-Motion Systems. Sensors, **16**, 12, 2016, 2143, DOI: 10.3390/s16122143
- [31] *Gajda J., Sroka S., Burnos P.*: Sensor Data Fusion in Multi-Sensor Weigh-In-Motion Systems. Sensors, **20**, 12, 2020, 3357, DOI: 10.3390/s20123357
- [32] *Burnos P., Gajda J.*: Optimised Autocalibration Algorithm of Weigh-In-Motion Systems for Direct Mass Enforcement. Sensors, **20**, 11, 2020, 3049, DOI: 10.3390/s20113049
- [33] *Splawińska M.*: Analysis of the influence of traffic flow variability on noise level on roads. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **18**, 2, 2019, 135-150, DOI: 10.7409/rabdim.019.009
- [34] *Lukasiewicz A., Świtata M.*: Differences between the traffic model and the actual road traffic and its structure. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **19**, 1, 2020, 79-91, DOI: 10.7409/rabdim.020.005