



DAWID RYS

dawid.rys@wilis.pg.gda.pl



JÓZEF JUDYCKI

jozef.judycki@wilis.pg.gda.pl



PIOTR JASKUŁA

piotr.jaskula@wilis.pg.gda.pl

Politechnika Gdańska

Analiza obciążenia osi pojazdów ciężkich na podstawie danych z ważenia pojazdów w ruchu (*WIM*)

W okresie ostatnich kilku lat w Polsce nastąpił intensywny rozwój systemów ważenia pojazdów w ruchu *WIM* (ang. *weigh in motion*). Systemy *WIM* instalowane są przede wszystkim w celu usprawnienia kontroli pojazdów przeciążonych, ale również w celu zbierania danych statystycznych. Systemy dostarczają danych o rzeczywistych obciążeniach pojazdów oraz o natężeniu, prędkości i strukturze ruchu, dzięki czemu można je wykorzystać m.in. do projektowania i analizy konstrukcji nawierzchni drogowych, obiektów mostowych lub różnego rodzaju obiektów inżynierskich infrastruktury drogowej [12], [14]. Do projektowania i analizy konstrukcji nawierzchni drogowych szczególnie istotne są dane dotyczące obciążenia osi pojazdów. Wartości obciążenia osi zmieniają się w zależności od typu pojazdu, umiejscowienia danej osi w pojeździe, stopnia załadunku oraz rozmieszczenia ładunku w pojeździe, dlatego też ob-

Wykaz odcinków dróg, na których dopuszczalne obciążenie osi wynosi 100 kN lub 115 kN zamieszczony jest w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury [10], [11]. W środowisku drogowym trwa dyskusja, w jaki sposób dopuszczalne obciążenia osi wpływa na rzeczywiste obciążenia osi pojazdów, a tym samym na trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni.

W niniejszym artykule przedstawiono rozkłady obciążenia osi wykorzystując analizę danych z 10 stacji *WIM* rozmieszczonych w Polsce. Celem artykułu, oprócz przedstawienia rozkładów, jest ocena wpływu dopuszczalnego obciążenia osi na rzeczywiste obciążenia osi pojazdów ciężkich. Ocena ta jest szczególnie przydatna, gdy rozpatruje się na danej drodze zmianę limitu dopuszczalnego obciążenia osi pojazdów. Może być ona wykorzystana do oszacowania skrócenia okresu trwałości nawierzchni na skutek dopuszczenia do ruchu pojazdów o większych obciążeniach osi lub też do planowania zabiegów utrzymaniowych w celu przeciwdziałania przedwczesnej destrukcji nawierzchni. Odwrotnie, w przypadku gdy stan i nośność nawierzchni uniemożliwia prowadzenie ruchu o zadanym maksymalnym obciążeniu, przytoczona ocena może być wykorzystana do oszacowania ograniczeń obciążenia osi tak, aby stan nawierzchni do następnego planowanego remontu nie przekroczył stanu granicznego.

Przegląd literatury

Dotychczas w Polsce analizami rozkładów obciążenia osi pojazdów zajmował się Wardęga, co było tematem publikacji [19] oraz elementem rozprawy doktorskiej [20]. Wardęga zaproponował, aby rozkład obciążenia osi był opisany w zależności od umiejscowienia osi w pojeździe i rodzaju pojazdu funkcją rozkładu normalnego lub funkcją rozkładu wykładniczego, lub funkcją rozkładu gamma. Funkcję rozkładu wykładniczego lub rozkładu gamma przyjęto w przypadku rozkładów jednomodalnych, niesymetrycznych lewostronnych, do pozostałych rozkładów przyjęto funkcję rozkładu normalnego.

W literaturze światowej znaleźć można również inne podejścia do modelowania funkcji rozkładu prawdopodobieństwa. Kim i współautorzy [7] oraz Wu [21] zaproponowali, że model rozkładu obciążenia osi można przedstawić jako równanie wielomianowe dystrybuanty rozkładu. Mohammadi i Shah [8] sugerowali, że najwłaściwszym modelem teoretycznym rozkładu masy całkowitej lub obciążeń osi byłoby połączenie rozkładu beta i logonormalnego, nie rozwinęli jednak takiego mo-

ciążenia osi pojazdów przedstawia się w postaci rozkładów. Na podstawie rozkładów obciążenia osi wyznaczono współczynniki przeliczeniowe pojazdów na liczbę równoważnych osi standardowych do określania ruchu projektowego w katalogach typowych konstrukcji nawierzchni [5], [15]. Rozkłady obciążenia osi są również ważnym elementem charakterystyki ruchu drogowego w nowej, mechanistyczno-empirycznej metodzie projektowania nawierzchni MEPDG 2004 [1], [18], [22].

Po przystąpieniu Polski do Unii Europejskiej zmieniły się przepisy dotyczące dopuszczalnego, maksymalnego obciążenia osi pojazdów. Obecne polskie przepisy [9], [10], [11], [17] określają trzy poziomy dopuszczalnego obciążenia osi, zależnie od drogi:

- 80 kN – obowiązuje na wszystkich drogach powiatowych i gminnych, na większości dróg wojewódzkich i na niektórych drogach krajowych,
- 100 kN – obowiązuje na wybranych drogach wojewódzkich i na drogach krajowych,
- 115 kN – obowiązuje na autostradach i drogach ekspresowych oraz na najważniejszych ciągach dróg krajowych.

delu. Timm i współautorzy [16] określili metodę modelowania rozkładu obciążenia osi za pomocą dwóch rozkładów logonormalnych. Haider i Harichandran [2], [4] rozwinęli modele złożone z dwóch rozkładów normalnych lub z rozkładu normalnego i logonormalnego, oraz wyprowadzili równania na cztery momenty centralne rozkładów złożonych. Według wszystkich wymienionych badaczy funkcje rozkładów złożonych z dwóch rozkładów wystarczająco dobrze opisują obciążenia osi lub masy całkowitej pojazdów.

Opis matematyczny rozkładów obciążenia osi

Rozkłady masy całkowitej lub obciążenia osi można wyrazić w sposób dyskretny poprzez obliczenie procentowego udziału liczby osi w kolejnych przedziałach obciążenia, zgodnie ze wzorem:

$$p(Q_i) = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^k n_i} \quad (1)$$

w którym:

$p(Q_i)$ – udział procentowy osi o obciążeniu z przedziału Q_i ,
 n_i – liczba osi w przedziale obciążenia Q_i ,
 k – łączna liczba przedziałów obciążenia osi.

W analogiczny sposób można określić rozkład masy całkowitej pojazdów.

Innym sposobem opisanie rozkładów obciążenia jest równanie funkcji rozkładu prawdopodobieństwa. Zaletą funkcji rozkładu prawdopodobieństwa jest to, że rozkład charakteryzowany jest za pomocą tylko kilku parametrów, podczas gdy w przypadku rozkładu dyskretnego należy określić procentowy udział osi w kilkunastu przedziałach obciążenia. Z drugiej strony określenie funkcji rozkładu wiąże się zawsze z popełnieniem pewnego błędu dopasowania. Rozkład dyskretny jest bardziej dokładny.

W dalszej części analizy przyjęto, że funkcje rozkładu obciążenia osi będą przedstawione jako rozkłady złożone z dwóch rozkładów normalnych, czego schemat przedstawiono na rysunku nr 1. Funkcję rozkładu prawdopodobieństwa złożonego z co najmniej dwóch rozkładów można przedstawić następująco:

$$f^* = \sum_{i=1}^n p_i f_i \quad (2)$$

w której:

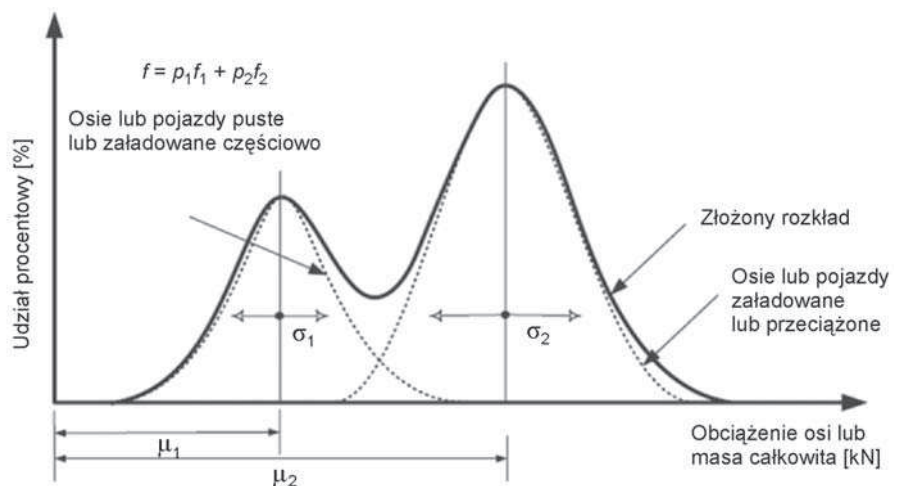
f^* – funkcja rozkładu prawdopodobieństwa rozkładu złożonego,

i – numer i -tej funkcji rozkładu prawdopodobieństwa,

n – liczba zastosowanych w modelu funkcji rozkładów prawdopodobieństwa,

p_i – proporcja (waga) dla każdej i -tej funkcji rozkładu prawdopodobieństwa,

f_i – i -ta funkcja rozkładu prawdopodobieństwa.



Rys. 1. Schemat rozkładu złożonego, dwumodalnego

Jak wynika z wykresów zamieszczonych na rysunku 1 do scharakteryzowania rozkładu złożonego z dwóch rozkładów normalnych potrzebnych jest 5 parametrów ($\mu_1, \mu_2, \sigma_1, \sigma_2, p_1$, przy czym $p_2=1-p_1$). Najistotniejszym etapem tworzenia modelu rozkładu jest estymacja parametrów rozkładu, którą przeprowadzono stosując procedurę zaproponowaną przez Tima i współautorów. [15] oraz Haidera i Harichandrana [2], [4]:

1. Wyznaczono rozkłady dyskretne.
2. Obliczono pierwsze trzy momenty centralne rozkładu $\mu^*, \sigma^{2*}, \gamma^{2*}$ na podstawie rozkładów dyskretnych.
3. Parametry μ_1 i μ_2 dobierano najpierw w miejscu lokalnego maksimum, a następnie iteracyjnie, w taki sposób, aby zapewnić najlepsze dopasowanie rozkładu teoretycznego do rozkładu dyskretnego, określonego z pomiaru. Do mierzenia mocy dopasowania zastosowano współczynnik determinacji R^2 , który osiąga maksimum przy najlepszym dopasowaniu parametrów.
4. Pozostałe parametry σ_1, σ_2, p_1 , obliczono z układu trzech równań (4), (5) i (6) na trzy pierwsze momenty centralne.

Aby przyrównać momenty centralne w pierw należy wyznaczyć równanie momentów centralnych w przypadku rozkładu złożonego. Ogólna postać równania na n -ty moment centralny $m^{(n)}$ jest następująca:

$$m^{(n)} = \int_{-\infty}^{\infty} x^n f^*(x) dx \quad (3)$$

w którym:

$f^*(x)$ – funkcja rozkładu prawdopodobieństwa rozkładu złożonego.

Pierwszym momentem centralnym rozkładu prawdopodobieństwa jest wartość oczekiwana. Równanie wartości oczekiwanej przyjmuje postać:

$$\mu^* = \int_{-\infty}^{\infty} x f^*(x) dx = p_1 \mu_1 + p_2 \mu_2 \quad (4)$$

w którym:

μ^* – wartość oczekiwana rozkładu dwumodalnego, pozostałe oznaczenia wg rysunku 1.

Równanie wariancji (drugiego momentu centralnego), jest następująco:

$$\sigma^{2*} = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu^*)^2 f^*(x) dx = p_1 \sigma_1^2 + p_1 (\mu_1 - \mu)^2 + p_2 \sigma_2^2 + p_2 (\mu_2 - \mu)^2 \quad (5)$$

w którym:

σ^{2*} – wariancja rozkładu dwumodalnego, pozostałe oznaczenia wg rysunku 1.

Trzecim momentem centralnym, jest skośność, której równaniem jest:

$$\gamma^{2*} = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu^*)^3 f^*(x) dx = 3p_1(\mu_1 - \mu)\sigma_1^2 + p_1(\mu_1 - \mu)^3 + 3p_2(\mu_2 - \mu)\sigma_2^2 + p_2(\mu_2 - \mu)^3 \quad (6)$$

w którym:

γ^{2*} – skośność (trzeci moment centralny) rozkładu dwumodalnego,

pozostałe oznaczenia wg rysunku 1.

Dane pomiarowe ze stacji ważenia pojazdów w ruchu

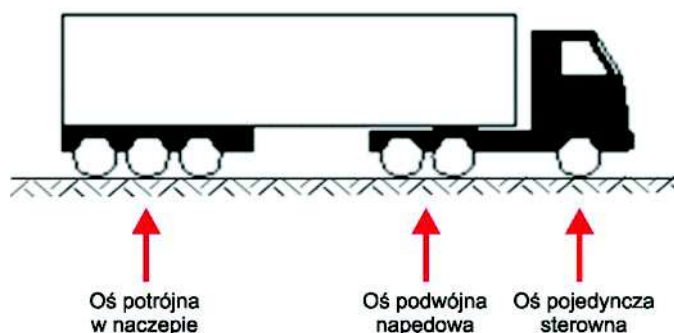
W tabeli nr 1 zestawiono informacje dotyczące stacji WIM i danych pomiarowych, które zostały wykorzystane w analizie. Do analizy wybrano te stacje ważenia, na których pomiar prowadzony był przez minimum pełny rok. Rozpatrywano dane wyłącznie z dni miarodajnych, czyli takich, w których pomiar prowadzony był przez pełne 24 godziny. W trakcie roku pomiarowego dane obejmowały wszystkie miesiące, a w każdym z miesięcy pomiarowych dostępne były z minimum siedmiu kolejnych dni. Dane elementarne dostarczone ze stacji WIM zostały sprawdzone pod względem poprawności i zweryfikowane. Szczegółowe informacje na temat sposobu weryfikacji danych WIM można znaleźć w pracy [13]. Łącznie do analizy wykorzystano dane z ważenia blisko 12 mln pojazdów ciężkich z 10 stacji pomiarowych.

Rodzaje osi pojazdów i ich udział w ruchu

Osie pojazdów ciężkich można podzielić według kryterium lokalizacji i przeznaczenia w następujący sposób:

- pojedyncze napędowe,
- pojedyncze sterowne,
- pojedyncze w przyczepach i naczepach,
- podwójne napędowe,
- podwójne sterowne,
- podwójne w przyczepach i naczepach,
- potrójne w przyczepach i w naczepach.

Przyjęto, że oś (osie) sterowne w pojazdach ciężkich są zawsze pierwszymi osiami od przodu pojazdu, natomiast osie napędowe zlokalizowane są bezpośrednio za osią (osiami) sterownymi. W klasyfikowaniu decyduje liczba osi mających kontakt z nawierzchnią. Dotyczy to szczególnie osi podwójnych w naczepach, obok których bardzo często występuje trzecia, uniesiona oś. Ponieważ trzecia oś nie ma kontaktu z nawierzchnią to cały zestaw osi klasyfikowany jest jako oś podwójna, a nie potrójna. Na rysunku 2 przedstawiono przykład pojazdu (sześciokoosiowy ciągnik siodłowy z naczepą) z opisem poszczególnych typów osi występujących w tym pojeździe.

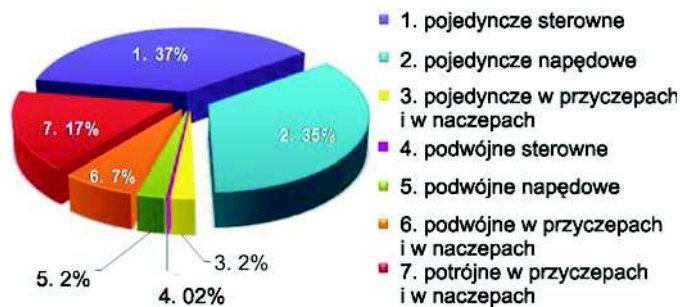


Rys. 2. Przykład oznaczenia osi w sześciokoosiowym ciągniku siodłowym z naczepą typu Cs+N123

Tabela 1. Zestawienie informacji dotyczących liczby zważonych pojazdów i okresu pomiaru na stacjach WIM

Stacja WIM (nr drogi krajowej)	Liczba kierunków ruchu objętych pomiarem	Łączna liczba dni objętych pomiarem		Okres pomiaru		Łączna liczba pojazdów ciężkich wykorzystana w analizie
		Kierunek A	Kierunek B	Kierunek A	Kierunek B	
A2	2	559	559	I 2011 – XII 2012	I 2011 – XII 2012	2 580 957
S7	1	296	–	I 2013 – XII 2013	–	417 185
4	2	822	530	I 2011 – XII 2013	I 2012 – XII 2013	3 340 424
7	2	542	714	I 2012 – XII 2013	I 2012 – XII 2013	1 089 331
11	1	711	–	I 2010 – XII 2011	–	811 792
22	2	354	355	I 2013 – XII 2013	I 2013 – XII 2013	638 915
46	2	1 025	692	I 2011 – XII 2013	I 2011 – XII 2012	1 249 711
75	2	526	642	I 2012 – XII 2013	I 2012 – XII 2013	861 494
79	1	352	–	I 2013 – XII 2013	–	254 237
94	2	322	359	I 2013 – XII 2013	I 2013 – XII 2013	472 534
Suma						11 859 384

Procentowy udział poszczególnych rodzajów osi w ruchu jest charakterystyką, którą obok udziału poszczególnych typów pojazdów w ruchu, opisuje się strukturę ruchu ciężkiego. Na rysunku 3 przedstawiono średni udział poszczególnych rodzajów osi obliczony w przypadku wszystkich rozpatrywanych stacji. Przedstawiony udział rodzajów osi sporządzono dla wszystkich pojazdów ciężkich łącznie, bez różnicowania poszczególnych kategorii i typów pojazdów.



Rys. 3. Średni udział poszczególnych rodzajów osi w pojazdach ciężkich na drogach krajowych w Polsce [13]

Z danych zamieszczonych na rysunku 3 wynika, że osie sterowne i napędowe w pojazdach ciężkich w zdecydowanej większości są osiami pojedynczymi. Przyczepy i naczepy przeważnie wyposażone są w osie potrójne lub podwójne. Struktura rodzajowa osi pojazdów wynika bezpośrednio ze struktury rodzajowej ruchu ciężkiego. Na drogach w Polsce najbardziej liczne są pojazdy następujących typów: dwuosio-we samochody ciężarowe bez przyczep C11, pięciosio-we ciągniki siodłowe z naczepami typu Cs+N 113 oraz pięciosio-we ciągniki siodłowe z naczepami z podniesioną jedną z osi w naczepie (typ Cs+N 112) [5], [9], [13].

Parametry rozkładów obciążenia osi pojazdów ciężkich

Rozkłady dyskretne oraz parametry funkcji rozkładów złożonych: μ_1 , μ_2 , σ_1 , σ_2 , p_1 , (rysunek 1) określono osobno w przypadku każdego rodzaju osi oraz każdej stacji pomiarowej z osobna. Szczegółowe zestawienie parametrów znajduje się w załączniku do pracy [13], natomiast w niniejszym artykule przedstawiono przykład wyników otrzymanych ze

stacji DK 46 Grodziec. Stację DK 46 wybrano ze względu na najdłuższy dostępny okres pomiaru. Na rysunku 4 przedstawiono rozkłady obciążenia poszczególnych typów osi pojazdów. Do każdego typu osi przedstawiono rozkład dyskretny oraz zaznaczono przebieg poszczególnych rozkładów normalnych, i przebieg rozkładu złożonego. W tabeli 2 zestawiono parametry rozkładów złożonych, na podstawie których wyznaczono przebiegi funkcji na rysunku 4.

W wyniku analizy rozkładów obciążenia osi dla danych z poszczególnych stacji pomiarowych stwierdzono, że uzyskuje się dobre lub bardzo dobre dopasowanie, wyrażone poprzez współczynnik determinacji R^2 . Stwierdzono, że model matematyczny złożony z dwóch rozkładów normalnych opisuje wszystkie poszczególne rozkłady obciążenia osi z wystarczającą dokładnością. Na rysunku 4 można zauważyć, że rozkłady obciążenia osi mogą mieć przebieg jednomodalny (np. osie podwójne napędowe) lub dwumodalny (np. osie potrójne w przyczepach lub w naczepach). W przypadku pozostałych stacji pomiarowych, których rozkłady obciążenia osi zaprezentowano w pracy [13], stwierdzono, że kształty rozkładów są podobne na poszczególnych stacjach i zależą od typu osi, natomiast mogą być one przesunięte w stronę wyższych bądź niższych obciążeń, zależnie od stacji.

Wpływ dopuszczalnego obciążenia osi napędowych 115 kN i 100 kN na średnie rozkłady obciążenia osi

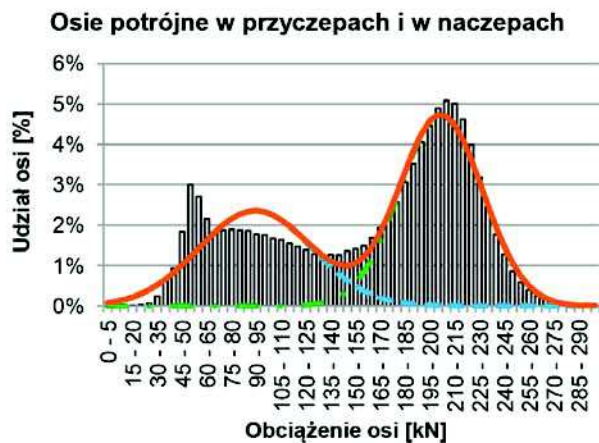
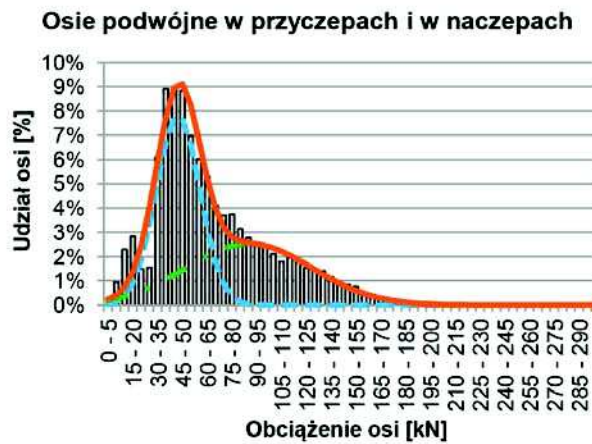
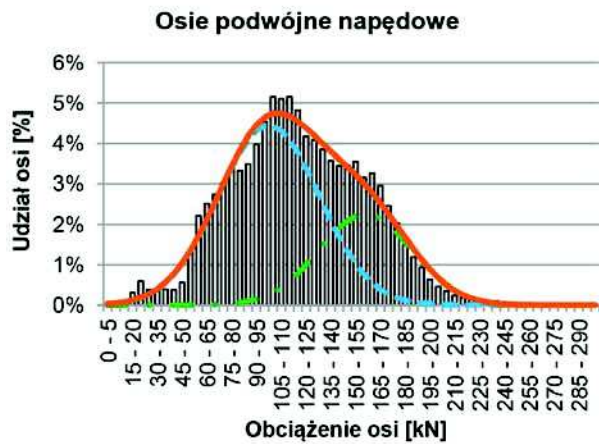
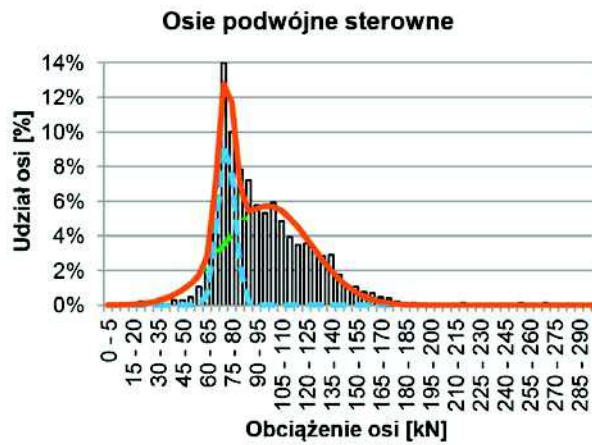
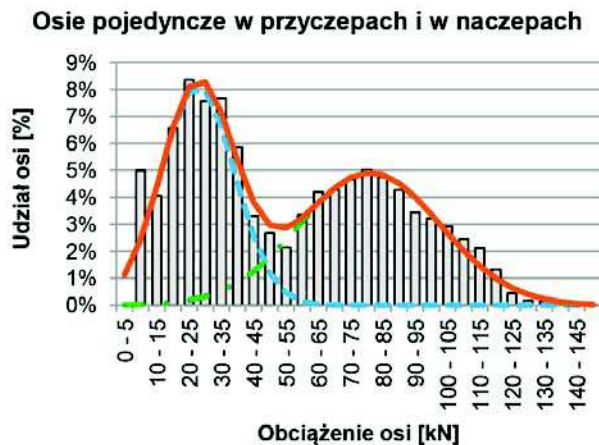
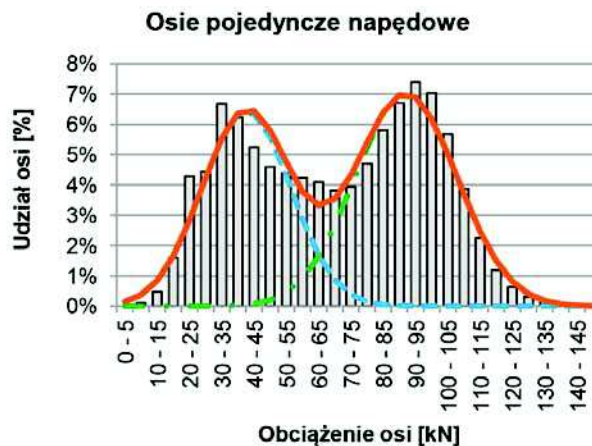
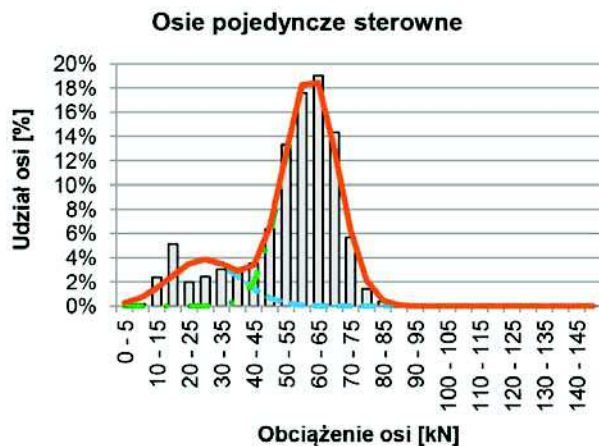
Rozpatrywane stacje WIM pogrupowano ze względu na obowiązujące na nich dopuszczalne obciążenie osi napędowej pojazdów:

- 115 kN – stacje zlokalizowane w ciągu dróg krajowych nr: A2, S7 i 4.
- 100 kN – pozostałe stacje, czyli te zlokalizowane w ciągu dróg krajowych nr: 11, 22, 46, 7, 75, 79 i 94.

Dla tak pogrupowanych stacji obliczono średnie parametry funkcji rozkładów obciążenia osi i zestawiono je w tabeli 3. W przypadku wszystkich typów osi zaobserwowano, że przy limicie dopuszczalnego obciążenia osi 115 kN rzeczywiste obciążenia osi przesunięte są w stronę wyższych obciążeń, czyli wyższe są parametry rozkładu: μ_1, μ_2 i p_2 . Oznacza to, że większa część pojazdów jest załadowana optymalnie i mniej jest pojazdów pustych lub załadowanych częściowo.

Tabela 2. Zestawienie parametrów rozkładów obciążenia osi określonych na podstawie danych ze stacji zlokalizowanej przy drodze krajowej nr 46

Rodzaj osi	Parametry modelu rozkładu						R^2
	μ_1	σ_1	p_1	μ_2	σ_2	p_2	
Pojedyncze sterowne	27,38	10,83	0,21	60,17	8,23	0,79	0,984
Pojedyncze napędowe	40,11	13,70	0,44	89,57	15,87	0,56	0,971
Pojedyncze w przyczepach i naczepach	25,18	11,38	0,46	78,50	21,75	0,54	0,967
Podwójne sterowne	74,00	4,91	0,24	99,00	26,51	0,76	0,970
Podwójne napędowe	99,94	30,68	0,68	158,45	28,13	0,32	0,980
Podwójne w przyczepach i naczepach	44,85	13,19	0,52	87,87	38,02	0,48	0,949
Potrójne w przyczepach i naczepach	91,91	34,22	0,41	204,21	25,08	0,59	0,965



Legenda:

- rozkład dyskretny (z interwałem obciążenia co 5 kN)
- rozkład normalny 1
- rozkład normalny 2
- rozkład złożony

Rys. 4. Rozkłady obciążenia osi na podstawie danych ze stacji WIM DK46 Grodziec

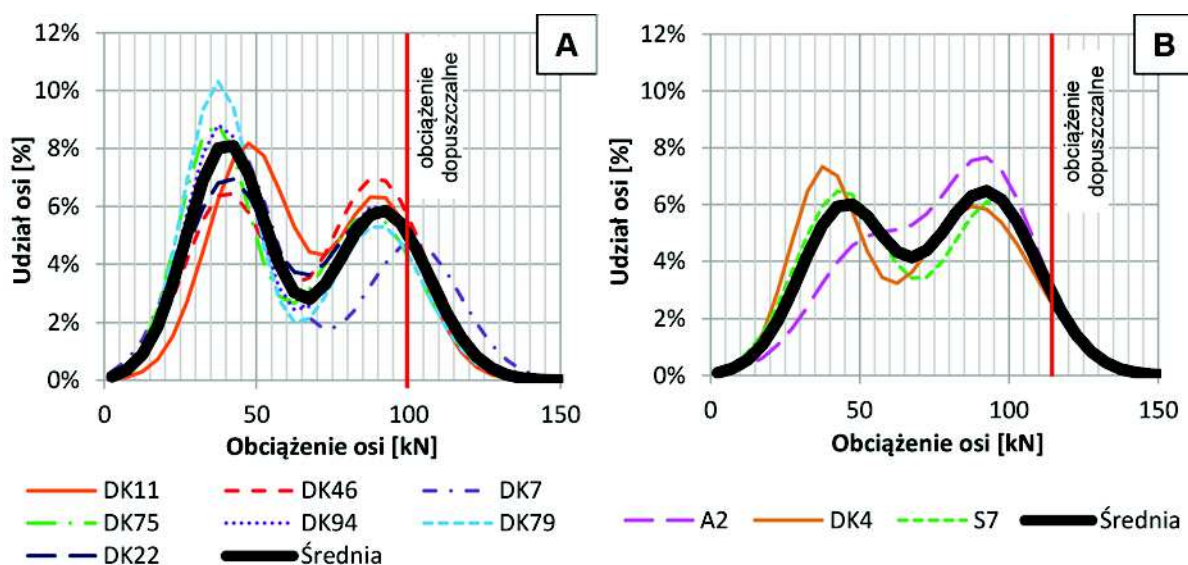
Tabela 3. Średnie parametry rozkładów obciążenia osi w zależności od dopuszczalnego obciążenia osi pojedynczej, napędowej 100 kN lub 115 kN

Dopuszczalne obciążenie osi pojedynczej	Rodzaj osi	Parametry modelu rozkładu					
		μ_1	σ_1	p_1	μ_2	σ_2	p_2
100 kN	pojedyncze sterowne	26,20	9,38	0,25	59,95	8,83	0,75
	pojedyncze napędowe	40,08	13,05	0,52	89,60	15,95	0,48
	pojedyncze w przyczepach i naczepach	27,31	9,78	0,56	67,38	24,27	0,44
	podwójne sterowne	81,71	8,35	0,61	122,42	22,65	0,39
	podwójne napędowe	97,96	32,00	0,65	159,28	25,47	0,35
	podwójne w przyczepach i naczepach	49,26	13,87	0,69	97,92	38,85	0,31
	potrójne w przyczepach i naczepach	91,49	34,38	0,46	208,60	21,87	0,54
115 kN	pojedyncze sterowne	30,92	12,13	0,23	61,80	7,77	0,77
	pojedyncze napędowe	44,64	14,79	0,44	92,27	17,45	0,56
	pojedyncze w przyczepach i naczepach	24,65	10,41	0,66	84,25	25,48	0,34
	podwójne sterowne	84,19	11,19	0,45	129,94	21,63	0,55
	podwójne napędowe	91,23	23,97	0,25	144,33	37,15	0,75
	podwójne w przyczepach i naczepach	54,16	13,88	0,49	97,19	38,69	0,51
	potrójne w przyczepach i naczepach	101,12	37,43	0,46	209,99	24,57	0,54

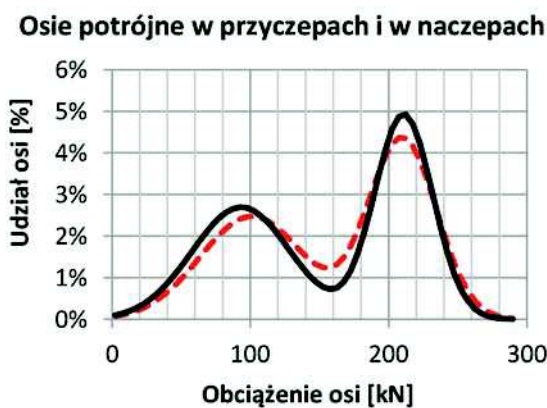
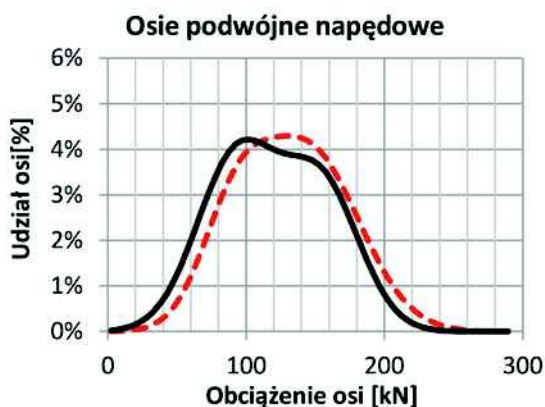
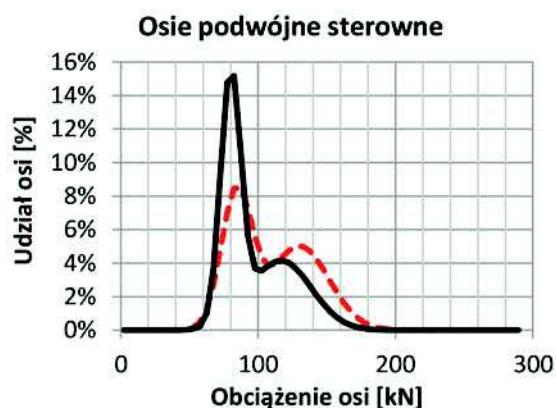
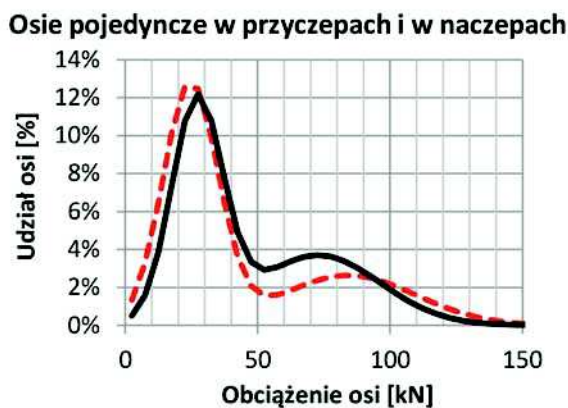
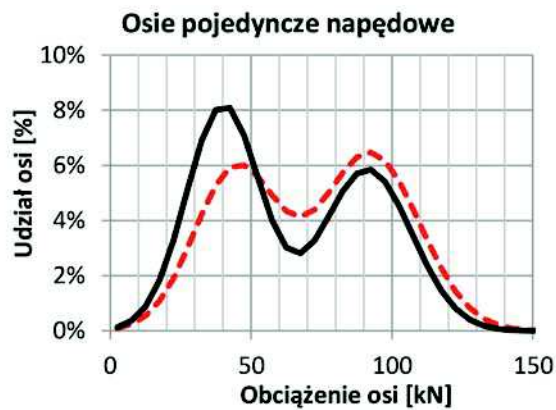
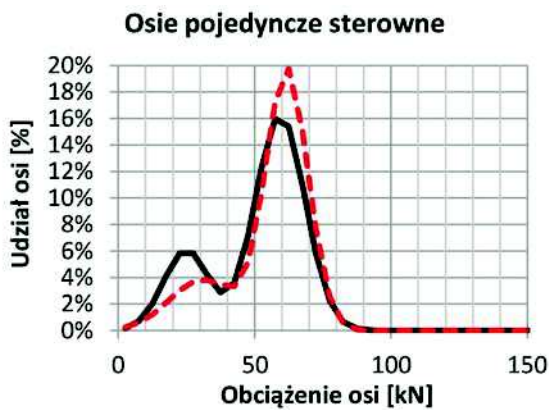
Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi rozkładów obciążenia osi pojedynczych, napędowych sporządzone z wykorzystaniem danych ze stacji WIM z rozróżnieniem dopuszczalnego obciążenia osi 100 kN i 115 kN, obowiązującego na drodze, gdzie zlokalizowana jest dana stacja. Na podstawie analizy danych zamieszczonych na rysunku 5 można wnioskować, że rzeczywiste obciążenia osi pojazdów istotnie różnią się na poszczególnych stacjach pomiarowych. Różnice w obciążeniach osi skutkują różnicami w średnich współczynnikach równoważności obciążenia pojazdów [5], [13]. Widoczne jest również, że znaczna część osi przekracza granicę dopuszczalnego obciążenia, są to osie przeciążone. Różnice w rozkładach obciążenia osi na poszczególnych

drogach wynikają ze struktury ruchu, rangi (znaczenia) drogi, dopuszczalnego obciążenia osi i udziału pojazdów przeciążonych. Na rysunku 5 zaznaczono również średnie rozkłady obciążenia osi pojedynczych napędowych. Z przebiegu średnich rozkładów można wyraźnie odczytać, że w przypadku dróg o dopuszczalnym obciążeniu osi 115 kN (rys. 5B) udział osi o średnich i wysokich obciążeniach jest wyższy. Porównanie średnich rozkładów obciążenia poszczególnych rodzajów osi w przypadku dróg z dopuszczalnym obciążeniem osi 100 kN i 115 kN przedstawiono na rysunku 6.

Na podstawie danych zamieszczonych na rysunku 6 można zauważyć, że dopuszczalne obciążenie osi ma wpływ na średnie rozkłady obciążenia osi oraz, że widoczne jest przesunię-



Rysunek 5. Rozkłady obciążenia osi pojedynczych napędowych na drogach z dopuszczalnym obciążeniem osi: A) 100 kN, B) 115 kN



Legenda:

- średni rozkład obciążenia osi na drogach o dopuszczalnym obciążeniu osi 115 kN
- średni rozkład obciążenia osi na drogach o dopuszczalnym obciążeniu osi 100 kN

Rys. 6. Porównanie średnich rozkładów obciążenia osi na drogach o dopuszczalnym obciążeniu osi 100 kN i 115 kN

cie średnich rozkładów obciążenia osi w stronę wyższych obciążeń w przypadku dróg o dopuszczalnym obciążeniu osi 115 kN. Przesunięcie jest najbardziej wyraźne w przypadku osi pojedynczych napędowych. Zgodnie z przepisami [9], [10], [11], [17] różnica w dopuszczalnym obciążeniu osi 100 kN i 115 kN dotyczy osi napędowych, natomiast w przypadku pozostałych osi dopuszczalne obciążenia osi są jednakowe. Wzrost rzeczywistych obciążeń osi na drogach z dopuszczalnym obciążeniem osi 115 kN może być również częściowo spowodowany tym, że drogi te (A2, S7, 4) mają wyższą rangę i znaczenie w ruchu krajowym oraz międzynarodowym niż pozostałe. Niemniej jednak należy spodziewać się, że zwiększenie limitu dopuszczalnego obciążenia osi na danej drodze spowoduje wzrost rzeczywistych obciążeń osi, a tym samym wzrost współczynników równoważności obciążenia osi.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy danych pomiarowych ze stacji ważenia pojazdów w ruchu można sformułować następujące wnioski:

1. Dane ze stacji *WIM* dostarczają pełnych informacji dotyczących ruchu i obciążenia pojazdów ciężkich.
2. Rozkład obciążenia osi pojazdów zależy od typu osi (sterowna, napędowa, pojedyncza, podwójna itp.).
3. Określono model matematyczny rozkładu obciążenia osi złożony z dwóch rozkładów normalnych. Model ten opisuje rzeczywiste rozkłady obciążenia osi z wystarczającą dokładnością.
4. Wyznaczono parametry modelu rozkładu obciążenia osi z 10 stacji *WIM* w Polsce wykorzystując dane z ważenia 12 mln pojazdów ciężkich dla okresu minimum pełnego roku na każdej ze stacji pomiarowych.
5. Rzeczywiste obciążenia pojazdów na poszczególnych stacjach pomiarowych różnią się od siebie, co w konsekwencji przekłada się na występowanie różnic w średnich współczynnikach równoważności obciążenia pojazdów.
6. Rozkłady obciążenia osi mogą mieć przebieg jednomodalny lub dwumodalny.
7. Wyznaczono średnie parametry modeli rozkładów obciążenia osi na drogach krajowych, na których obowiązują dopuszczalne obciążenia osi 115 kN i 100 kN.
8. Na drogach z dopuszczalnym obciążeniem osi 115 kN rzeczywiste obciążenia osi, przedstawione w postaci rozkładów obciążenia, mają większe wartości niż na drogach z dopuszczalnym obciążeniem osi 100 kN.
9. Na rozkład obciążenia osi pojazdów na danej drodze oprócz dopuszczalnego obciążenia osi pojazdu wpływają również inne czynniki – jak struktura ruchu, ranga (znaczenie) drogi i udział pojazdów przeciążonych.

Niniejszy artykuł został opracowany w oparciu o wyniki prac badawczych zamieszczone w pracy doktorskiej dr. inż. Dawida Rysia, która została zrealizowana na Politechnice Gdańskiej pod kierunkiem prof. Józefa Judyckiego i dr. inż. Piotra Jaskuły. Autorzy artykułu pragną podziękować Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad za pomoc w realizacji programu badawczego.

Literatura:

- [1] Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Report, Part 2 – Design Inputs, Chapter 4, Traffic. NCHRP, TRB, NRC, 2004
- [2] S. Haider, R. Harichandran: Relating Axle Load Spectra to Truck Gross Vehicle Weights and Volumes. *Journal of Transportation Engineering*, 133(12), s. 696–705. ASCE, 2007
- [3] S. Haider, R. Harichandran: Effect of Axle Load Spectrum Characteristics on Flexible Pavement Performance. *Transportation Research Record* 2095, s. 101–114. TRB, Waszyngton, 2009
- [4] S. W. Haider, R.S. Harichandran, M.B. Dwaikat: Closed-Form Solutions for Bimodal Axle Load Spectra and Relative Pavement Damage Estimation. *Journal of Transportation Engineering*, 135(12), s. 974–983. ASCE, 2009
- [5] J. Judycki, P. Jaskuła, M. Pszczoła, J. Alenowicz, B. Dołycki, M. Jaczewski, D. Ryś, M. Stienss: Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Politechnika Gdańska, GDDKiA, Gdańsk, 2013
- [6] J. Judycki, P. Jaskuła, M. Pszczoła, D. Ryś, M. Jaczewski, J. Alenowicz, B. Dołycki, M. Stienss: Analizy i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. WKŁ, Warszawa, 2014. ISBN: 978-83-206-1928-7
- [7] J. R. Kim, L. Titus-Glover, M. I. Darter, R. K. Kumapley: Axle load distribution characterization for mechanistic pavement design. *Transportation Research Record* 1629, 13–19. TRB, Waszyngton, 1998
- [8] J. Mohammadi, N. Shah: Statistical Evaluation of Truck Overloads. *Journal of Transportation Engineering*, 118, 651–665. ASCE, 1992
- [9] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 31 grudnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia
- [10] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 14 lipca 2010 r. w sprawie wykazu dróg krajowych, po których mogą poruszać się pojazdy o dopuszczalnym nacisku pojedynczej osi napędowej do 11,5 t
- [11] Rozporządzenie ministra infrastruktury z dnia 14 lipca 2010 r. w sprawie wykazu dróg krajowych oraz dróg wojewódzkich, po których mogą poruszać się pojazdy o dopuszczalnym nacisku pojedynczej osi do 10 t
- [12] D. Ryś, J. Judycki, P. Jaskuła: Aktualizacja współczynników równoważności pojazdów ciężarowych i autobusów. *Drogownictwo* 7-8 (2011), s. 245–249
- [13] D. Ryś: Obciążenie dróg przez pojazdy ciężkie i ich wpływ na trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Praca doktorska. Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2015
- [14] M. Splawińska, P. Zieliński, P. Burnos: Wpływ zmienności natężeń ruchu pojazdów ciężkich oraz temperatury na trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni drogowej. *Drogi i Mosty* 14 (2015), s. 117–132
- [15] A. Szydło, P. Mackiewicz, R. Wardęga, B. Krawczyk: Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych. Politechnika Wrocławska, GDDKiA, Wrocław, 2013
- [16] D. Timm, S. Tisdale, and R. Turochy: Axle Load Spectra Characterization by Mixed Distribution Modeling. *Journal of Transportation Engineering*, 131(2), s. 83–88. ASCE, 2005
- [17] Ustawa o Drogach Publicznych z dnia 21 marca 1985 r. Dz. U. 1985 Nr 14 poz. 60 (z późniejszymi nowelizacjami)
- [18] Y. Wang, D. E. Hancher, K. Mahboub: Axle load distribution for Mechanistic-Empirical Pavement Design. *Journal of Transportation Engineering*, 133(8), s. 469–479. ASCE, 2007
- [19] R. Wardęga: Analiza nacisków osi pojazdów ciężarowych na nawierzchnie drogowe, *Drogownictwo* 11/2010, s. 400–408
- [20] R. Wardęga: Wpływ struktury ruchu na nośność nawierzchni drogowych. Praca doktorska. Instytut Inżynierii Łądowej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006
- [21] S. S. Wu: Procedure to Estimate Loading From Weigh-in-Motion Data. *Transportation Research Record* 1536, s.19–24, TRB, Waszyngton, 1996
- [22] A. Zofka, A. Urbaniak, M. Maliszewski, W. Bańkowski, D. Sybilski: Site specific traffic inputs for mechanistic-empirical pavement design guide in Poland. *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*, Waszyngton, 2014