



ANDRZEJ POŻARYCKI

Politechnika Poznańska
andrzej.pozarycki@put.
poznan.pl



PRZEMYSŁAW GÓRNAŚ

Politechnika Poznańska
przemyslaw.gornas@put.
poznan.pl

Zagadnienia liniowej normalizacji wartości ugięć nawierzchni jezdni poddanej obciążeniom ponadnormatywnym

Definicja stanu granicznego nośności nawierzchni jezdni określona w postaci maksymalnej dopuszczalnej wartości ugięcia sprężystego [10, 11] stanowi tylko uproszczoną ocenę układu warstwowego, jaki tworzą warstwy konstrukcji nawierzchni i podłoża. Ograniczając się bowiem wyłącznie do oceny nośności na podstawie zależności wyrażonej wzorem (1), nie można wykluczyć takiej kombinacji właściwości i układu warstw nawierzchni i podłoża, w której zmierzone w osi obciążenia wartości ugięć dwóch różnych konstrukcji są równe co do wartości [7] i jednocześnie większe od wartości ugięcia dopuszczalnego.

$$U_m = (U_{sr} + 2 \cdot S_u) \cdot f_T \cdot f_s \cdot f_p \quad (1)$$

w którym:

U_m i U_{sr} – odpowiednio wartości ugięć miarodajnych i średnich na odcinku jednorodnym,

S_u – odchylenie standardowe,

f_T – współczynnik temperaturowy,

f_s – współczynnik sezonowości,

f_p – współczynnik podbudowy.

W kontekście pominięcia analizy mechanistycznej [10, 11], oba te przypadki zostaną zakwalifikowane do odcinków wymagających wykonania zabiegów utrzymaniowych. Optymalizacja konstrukcji nawierzchni jezdni przy wykorzystaniu metod mechanistycznych nie zawsze jest jednak standardem i w szczególności dla dróg niższych klas, warto poszukiwać metod uzupełnionych. Degradacja nawierzchni stanowi skomplikowaną sumę zjawisk, które wyczerpująco przedstawiono w pracy [9]. Najszerszą bazę danych do oceny tych zjawisk stanowią zbiory wyników badań odcinków doświadczalnych, które są zaprogramowane i zrealizowane w warunkach naturalnych. Szczególną rolę wśród nich pełnią te, które dotyczą tzw. badań przyspieszonych [1, 8] i wszystkie te, które w sposób uproszczony pozwalają zrozumieć mechanizmy zniszczenia nawierzchni w czasie. Dodatkowo należy zwrócić uwagę, że na podstawie pomiarów wartości ugięć nawierzchni dla pojedynczych i wielokrotnych obciążeń w zakresie wartości (siły) od 17 do 70 kN, istnieje możliwość prognozowania głębokości kolein, dla których wykazano dobrą zgodność dla szerokiego spektrum przypadków [4].

W artykule przedstawiono analizę liniowej normalizacji wartości ugięć nawierzchni i podłoża pod obciążeniem

ponadnormatywnym. Prowadząc analizę wyników badań nawierzchni ugięciomierzem dynamicznym *FWD*, ocenie poddano współczynnik nachylenia prostych regresji opisujących mechaniczną zależność siła – ugięcie. W ten sposób testowano sztywność układu warstwowego spoczywającego na półprzestrzeni w warunkach obciążenia od 30 do 90 kN. Do porównania wybrano trzy warianty konstrukcji reprezentujące skrajne rozwiązania w kontekście rozwoju procesów zmęczeniowych zarówno warstw asfaltowych, jak i podłoża.

Metodyka eksperymentu

Powszechnie liniową zależność obciążenie-ugięcie nawierzchni i jej podłoża wykorzystuje się do normalizacji wartości ugięć względem wartości siły określonej w specyfikacjach, najczęściej 50 lub 57,5 kN (2).

$$U_{obl}(F_2) = \frac{F_2}{F_1} \cdot U_{test}(F_1) \quad (2)$$

w którym:

F_2 – obciążenie, dla którego poszukuje się wartości ugięcia

$U_{obl}(F_2)$,

F_1 – obciążenie, przy którym znana jest wartość ugięcia

$U_{test}(F_1)$ [3].

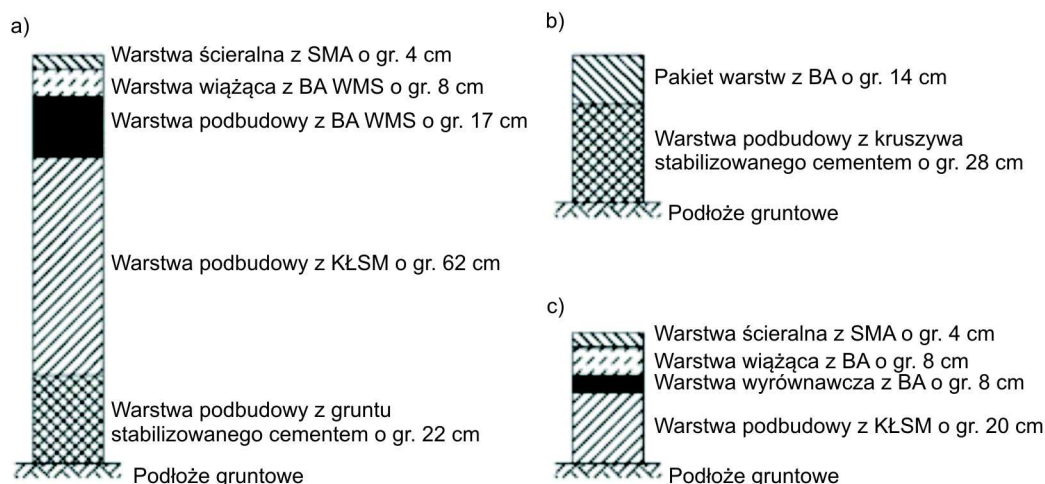
W praktyce, normalizacja właściwie dotyczy tylko wartości obciążeń, które najczęściej mieszczą się w zakresie odpowiadającym precyzji generowania wartości siły przez urządzenie pomiarowe. Z doświadczeń autorów wynika, że wartości te nie przekraczają 5 kN dla urządzeń typu *FWD* (*Falling Weight Deflectometer*) i 10 kN w przypadku metody belki Benkelmana. Z tego powodu, na wzór badań przyspieszonych nawierzchni w warunkach naturalnych, wykonano pomiary ugięciomierzem dynamicznym typu *FWD* na trzech różnych odcinkach testowych. Na rysunku 1 przedstawiono odpowiednio przekroje konstrukcji nawierzchni jezdni dla odcinka A, B i C.

Charakterystyka odcinków testowych:

A. Nawierzchnia nowa: badania na odcinku doświadczalnym A przeprowadzono w trakcie jego budowy. Pomiary zostały wykonane na wszystkich trzech warstwach z mma [6] oraz w kolejnych latach eksploatacji przy różnych wartościach temperatury warstw asfaltowych.

B. Nawierzchnia po okresie 30 lat eksploatacji: testy na odcinku B zrealizowano na dwóch pasach ruchu jezdni (lewym i prawym). Wyniki analizy mechanistycznej wykazały, że degradacja nawierzchni osiągnęła umowy poziom trwałości

Rys. 1. Schematy konstrukcji nawierzchni jezdni odcinków testowych A, B i C symbolizujące odpowiednio, a) nawierzchnię typu BA WMS, b) nawierzchnię półsztywną c) typową nawierzchnię podatną



zmęczeniowej (szkoda zmęczeniowa $D > 100\%$ [10]). Dodatkowo, interesujący wydaje się tu fakt, że relatywnie małe wartości modułów sztywności mma uzyskano dla strefy pasa ruchu nie obciążonej ruchem. Do badań laboratoryjnych modułów sztywności w rozciąganiu pośrednim (EITT) wycięto również próbki ze środka obu pasów ruchu. Ustalono, że wartość średnia (średnia ważona modułów dla wszystkich warstw w próbce mma) tego modułu EITT jest równa 5300 MPa ($T = 10^{\circ}\text{C}$, $f = 10\text{ Hz}$). Dla nowych warstw tego typu wartość ta w temperaturze równoważnej wynosi 10 000 MPa. To w konsekwencji potwierdza tylko, że sam mechanizm degradacji w czasie to bardzo złożone zjawisko. Wartości modułów sztywności w laboratorium oznaczono dla prawdopodobieństwa 85%.

C. Nawierzchnia po remoncie: wyniki pomiarów uzyskane na odcinku C wykonano kolejno w latach 2011, 2012 i 2013. Analizie poddano konstrukcję nawierzchni, którą w roku 2010 wyremontowano. Prace objęły częściowe sfrezowanie zużytych warstw asfaltowych i ułożenie nowych zgodnie ze schematem na rysunku 1c.

W analizie wyróżnione zostały dwa etapy. W pierwszej kolejności ocenie poddano charakterystykę zależności między wartościami ugięć nawierzchni, a odpowiadającymi im wartościami obciążeń (zakres obciążeń przyjęto od 30–90 kN). W drugim etapie przeprowadzono ekstrapolację zmierzonych wartości ugięć z wykorzystaniem liniowej normalizacji wartości ugięć oznaczonych w warunkach ponadnormatywnych obciążeń (1). Wyniki obliczeń porównano z wartościami zmierzonymi. Do oceny ekstrapolowanych wartości ugięć wykorzystano zarówno statystykę testową chi-kwadrat, jak i średni błąd względny wyrażony w postaci wzoru.

$$\text{Błąd średni, } \Delta = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{U_{i,\text{obl}}(F_2) - U_{i,\text{test}}(F_1)}{U_{i,\text{test}}(F_1)} \cdot 100\% \quad (3)$$

w którym:

n – liczba pomiarów ugięć nawierzchni w danych warunkach [–],

$U_{i,\text{obl}}(F_2)$ – wartość ugięcia odpowiadająca obciążeniu F_2 obliczona przy wykorzystaniu ekstrapolacji [μm],

$U_{i,\text{test}}(F_1)$ – wartość ugięcia z pomiarów przy obciążeniu F_1 [μm].

Jako charakterystykę pomocniczą wykorzystano bezwzględną różnicę średnich wartości sił ΔF_x (4) liczoną według wzoru:

$$\Delta F_x = F_2 - F_1 \quad (4)$$

w którym:

F_1 – wartość siły, dla której oznaczono wartość ugięcia [kN],

F_2 – wartość siły, przy której wartość ugięcia uzyskano metodą ekstrapolacji [kN].

Wyniki analiz

W niniejszej części artykułu przedstawiono uzyskane zależności między wielkościami siły i ugięcia nawierzchni jezdni. Wyniki opracowano na podstawie pomiaru wartości ugięć odcinków nawierzchni A, B i C urządzeniem typu FWD. Zakres obciążeń (siłą F_1) wahał się od 30÷90 kN, co odpowiada wartościom nacisku na oś równym od 60 do 180 kN.

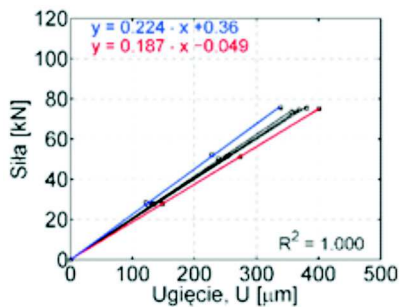
Odcinek A – ocena liniowości

W pierwszej kolejności analizie poddano nową nawierzchnię, którą wykonano przy wykorzystaniu warstw o podwyższonym module sztywności. Na kolejnych rysunkach (rysunek 2 i rysunek 3) pokazano przypadki, dla których wartości ugięć i sił oznaczono przy uwzględnieniu zarówno różnych wartości temperatury warstw asfaltowych w czasie pomiaru FWD, jak i ich grubości. Badania wykonano w roku 2010.

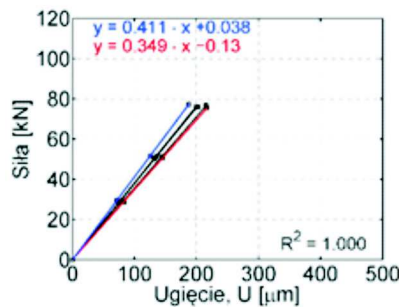
Dla porównania na rysunku 3 przedstawiono również sytuację, w której łączna grubość warstw asfaltowych jest stała ($h_{\text{mma}} = 29\text{ cm}$), a zmianie podlega wyłącznie ich temperatura zmierzona podczas realizacji badań in-situ. Badania przeprowadzono w 2012 r., dwa lata po oddaniu odcinka do eksploatacji.

Otrzymane funkcje regresji na podstawie tak przeprowadzonych badań nawierzchni, są liniowe i w każdym przypadku charakteryzują się dużą wartością współczynnika determinacji ($R^2 \geq 0,97$). To oznacza, że dla pokazanych tu przy-

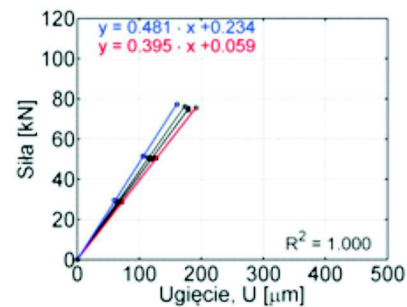
a) Pomiar na warstwach BA WMS o gr. 17 cm (podbudowa)
T = + 17 °C



b) Pomiar na warstwach BA WMS o gr. 25 cm (wiążąca + podbudowa)
T = + 9 °C

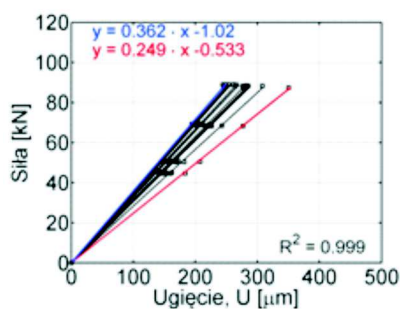


c) Pomiar na warstwach z MMA o gr. 29 cm (ścieralna + wiążąca + podbudowa)
T = + 7 °C

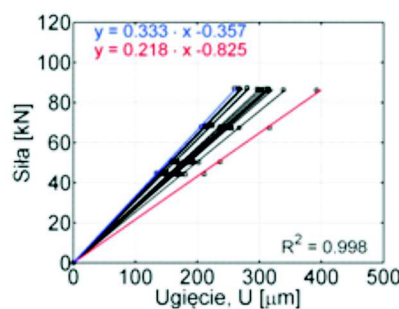


Rys. 2. Przykłady zależności między wielkościami siła – ugięcie w warunkach zmiennej temperatury i różnych grubości warstw asfaltowych

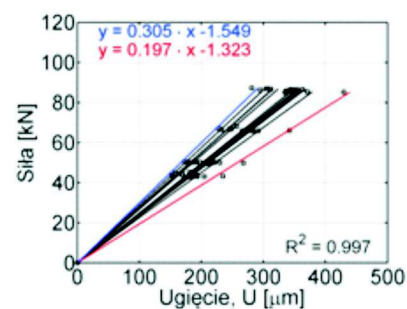
a) Pomiar w temperaturze warstw mma równej + 4 °C



b) Pomiar w temperaturze warstw mma równej + 15 °C



c) Pomiar w temperaturze warstw mma równej + 21 °C



Rys. 3. Funkcje regresji dla relacji siła – ugięcie, opracowane dla ugięć nawierzchni jezdni o stałej grubości warstw z mma ($h_{mma} = 29$ cm), ale przy różnych wartościach temperatury

padków zastosowanie liniowej normalizacji wartości ugięć nawierzchni jezdni jest uzasadnione, również w odniesieniu do obciążeń ponadnormatywnych. Warto też zauważyć, że wyniki badań przedstawione na rysunku 3 dotyczą tej samej konstrukcji nawierzchni, jak na rysunku 2c, ale wykonano je tym samym urządzeniem dwa lata później. Średnia wartość współczynników nachylenia dwóch prostych regresji, które stanowią tu w pewnym sensie rolę obwiedni (zaznaczone na rysunkach kolorami czerwonym i niebieskim), dla warunków pokazanych na rysunku 2c ($h_{mma} = 29$ cm, T = + 7 °C) jest równa 0,438, a dla warunków pokazanych na rysunku 3a ($h_{mma} = 29$ cm, T = + 4 °C) wynosi 0,305. Z punktu widzenia testu chi-kwadrat są to wartości istotnie od siebie różne. Wiedząc, że parametr nachylenia prostych regresji określa nam sztywność badanego układu, nasuwa się przypuszczenie, że po dwóch latach od wybudowania nawierzchni odnotowano na tym odcinku spadek sztywności nawierzchni i podłoża. To z kolei może sygnalizować początek procesu zmęczenia.

Odcinek A – ekstrapolacja wartości ugięć

Z analizy przedstawionej wyżej wynika, że liniowa zależność między wielkościami siły, a ugięciem nawierzchni i podłoża w zakresie obciążeń do 90 kN poparta jest relatywnie silną decyzją statystyczną (statystyka p-value >> 0,1). Postanowiono wobec tego zweryfikować wartość błędów, które popelnia się korzystając z tak sformułowanego założenia dla

typowej konstrukcji BA WMS stosowanej w Polsce. Na rysunku 4 przedstawiono wyniki pomiaru ugięć nawierzchni jezdni, które wykorzystano w eksperymencie. Wielkość oznaczona symbolem U_{test} reprezentuje wyniki badań ugięć nawierzchni pod obciążeniem F_1 , a wielkość U_{ref} wyniki badań ugięć nawierzchni obciążonej siłą F_2 (wartości docelowe). Przyjmując, że pierwsza z nich jest wielkością znaną, a drugą należy obliczyć korzystając ze wzoru (1), na rysunkach 4 i 5 podano średnie wartości błędów (3) uzyskanych w obliczeniach. Dodatnia wartość miary ΔF_x oznacza, że wartość ugięcia jest ekstrapolowana do wartości, będącej wynikiem obciążenia nawierzchni siłą F_2 większą niż wartość siły F_1 , przy której oznaczono ugięcie U_{test} . Analogiczny komentarz dotyczy wartości ujemnej.

Pomimo obciążenia nawierzchni siłą o wartości około 80 kN, średnia wartość błędu wyznaczenia wielkości U_{ref} (wartości docelowej) jest mniejsza niż 2%. Bardzo silną korelację między wartościami U_{ref} i U_{obl} potwierdzają również statystyki chi-kwadrat (najmniejsza wartość statystyki p – value >> 0,1, co oznacza jednoznaczną decyzję statystyczną). Cechą charakterystyczną, która ujawnia się w tych obliczeniach jest fakt, że większą wartością błędu wyznaczenia ugięć docelowych (U_{ref}), zgodnie z przypuszczeniami, obarczone są konstrukcje nawierzchni z relatywnie małymi grubościami warstw asfaltowych (tu 17 cm). Mając jednak na uwadze przypadki pokazane na rysunku 4a, nie jest to związane tylko z obciążeniem ponadnormatywnym. Zbliżoną wartość błędu otrzymano bowiem również w przypadku przeliczania ugięć

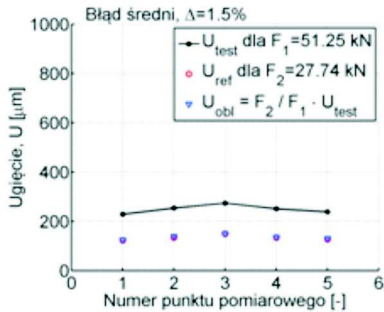
w zakresie obciążenia od 28 do 50 kN. W dalszej kolejności, konsekwentnie wobec omówionych testów liniowości, na rysunku 5 można prześledzić wyniki obliczeń wartości docelowej U_{ref} w warunkach, gdy stała jest grubość warstw

asfaltowych, a zmianie podlega ich temperatura podczas pomiaru ugięć.

Bez wątplenia, wartość błędu związanego z wykorzystaniem liniowej normalizacji ugięć (3) będzie się zwiększać

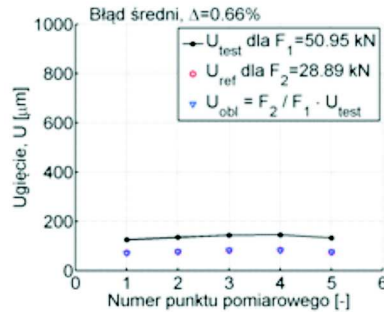
a) $T = +17^{\circ}\text{C}$, $h_{mma} = 17\text{ cm}$

$\Delta F = -23,51\text{ kN}$



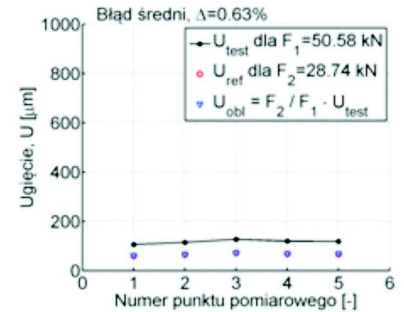
b) $T = +9^{\circ}\text{C}$, $h_{mma} = 25\text{ cm}$

$\Delta F = -22,06\text{ kN}$

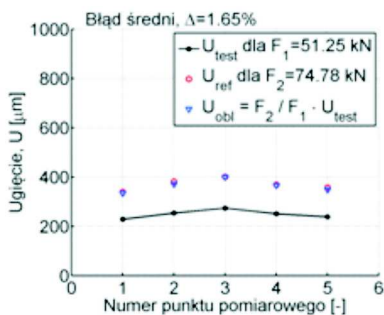


c) $T = +7^{\circ}\text{C}$, $h_{mma} = 29\text{ cm}$

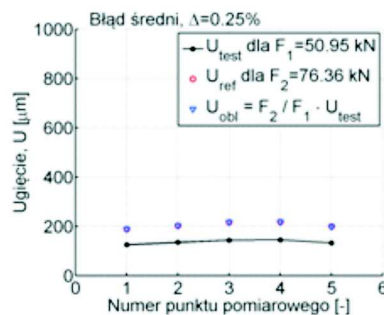
$\Delta F = -21,84\text{ kN}$



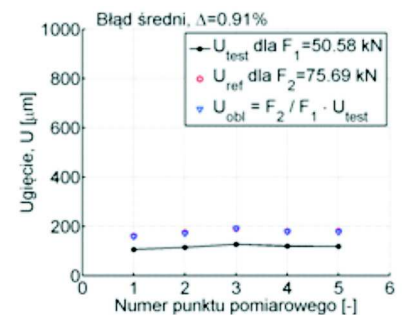
$\Delta F = +23,53\text{ kN}$



$\Delta F = +25,41\text{ kN}$



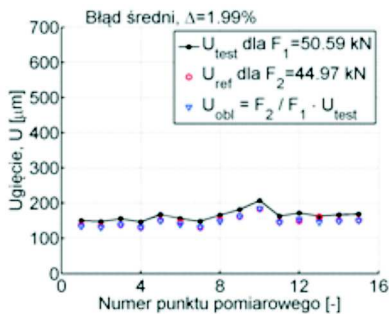
$\Delta F = +25,11\text{ kN}$



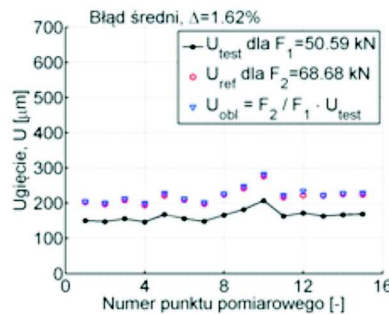
Rys. 4. Wyniki ekstrapolacji ugięć nawierzchni metodą liniowej normalizacji dla różnych wartości temperatury i grubości warstw z BA WMS

a) $T = +4^{\circ}\text{C}$, $h_{mma} = 29\text{ cm}$

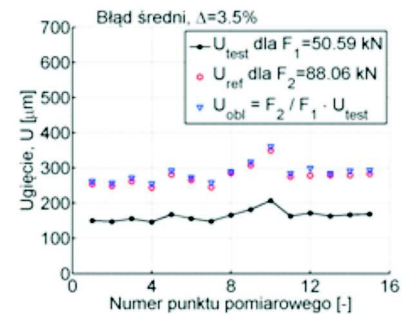
$\Delta F = -5,62\text{ kN}$



$\Delta F = +18,09\text{ kN}$

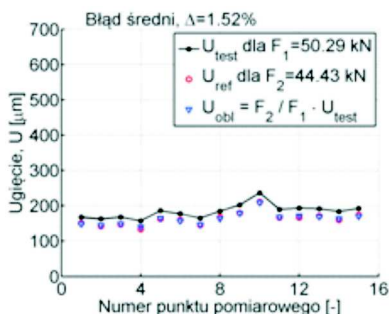


$\Delta F = +37,47\text{ kN}$

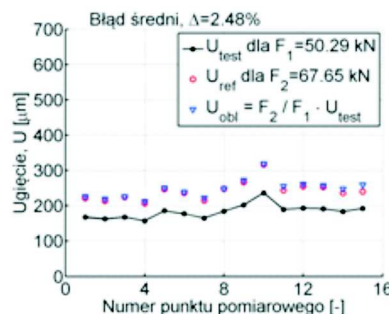


b) $T = +15^{\circ}\text{C}$, $h_{mma} = 29\text{ cm}$

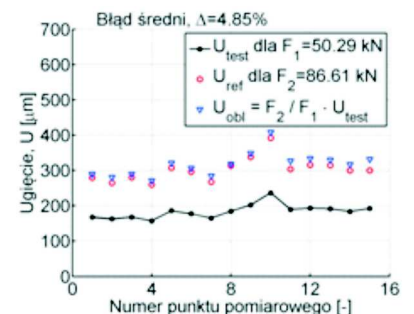
$\Delta F = -5,86\text{ kN}$



$\Delta F = +17,36\text{ kN}$

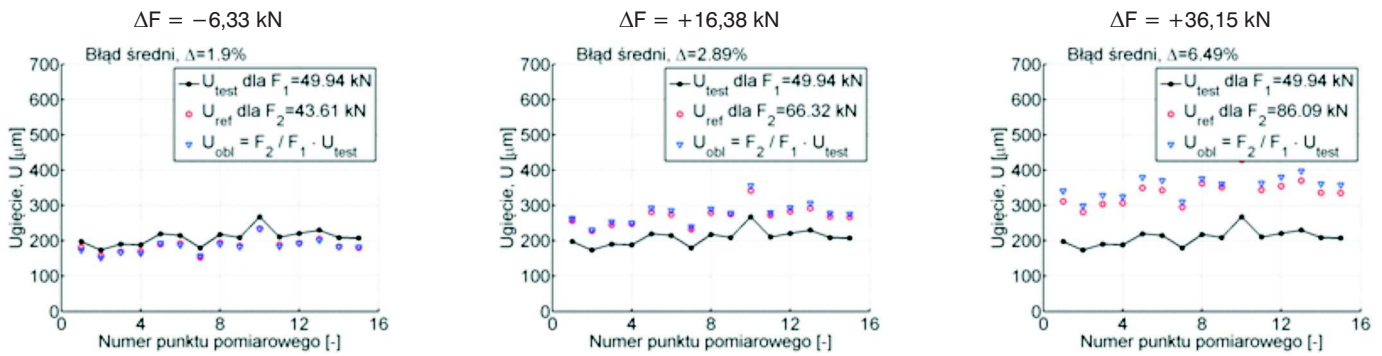


$\Delta F = +36,32\text{ kN}$



Rys. 5. Wyniki ekstrapolacji ugięć nawierzchni metodą liniowej normalizacji dla różnych wartości temperatury i stałej grubości warstw z mma

a) $T = +21^{\circ}\text{C}$, $h_{\text{mma}} = 29 \text{ cm}$



Rys. 5. Wyniki ekstrapolacji ugięć nawierzchni metodą liniowej normalizacji dla różnych wartości temperatury i stałej grubości warstw z mma (cd.)

wraz ze wzrostem zarówno temperatury, jak i obciążenia (rysunek 5). W zakresie jednak omówionych do tej pory warunków nie jest to wartość większa niż 10%. Obciążenie nowej konstrukcji nawierzchni odcinka A, siłą o wartości zbliżonej do 90 kN w temperaturze 21°C , zaburza warunek liniowości o około 6,5%.

Odcinek B – ocena liniowości

Zgodnie z charakterystyką odcinków testowych przedstawioną we wcześniejszej części artykułu, nawierzchnia jezdni na odcinku B to przykład silnie zużytej nawierzchni, poddanej 30-letniej eksploatacji (fot. 1). Pomiary ugięć zostały wykonane w średniej temperaturze warstw asfaltowych równej $T = +24^{\circ}\text{C}$. Konsekwentnie w relacji do poprzednich przykładów zachowano ten sam program obciążeń, a uzyskane funkcje regresji zestawione są na rysunku 6.

W pierwszej kolejności uwagę zwraca bardzo duże rozproszenie wartości współczynników nachylenia $\text{tg}(\alpha)$ prostych regresji. Dla najbardziej skrajnych przypadków (zaznaczonych na rysunkach 6a i 6b, kolorami czerwonym i niebieskim) są to wartości z zakresu $\text{tg}(\alpha) = (0,081 \div 0,331)$. Analogiczne wartości oznaczone w zbliżonej temperaturze ($T = +21^{\circ}\text{C}$) dla nawierzchni nowej (ale innego typu, rysunek 3c) należą do przedziału $\text{tg}(\alpha) = (0,197 \div 0,305)$. Funkcje gęstości prawdopodobieństwa (PDF) i dystrybuanty (CDF) dla wartości współczynników nachylenia w tych obu przypadkach przedstawione są na rysunku 7.

Choć porównanie przedstawione na rysunku 7 nie dotyczy tych samych konstrukcji nawierzchni, to mimo wszystko są to elementy dyskretnego opisu rzeczywistego procesu degradacji zmęczeniowej. W nawiązaniu do stochastycznych narzędzi opisu zjawisk zmęczeniowych mma przedstawionych w pracy [5], analiza tego typu może stanowić bazę do ustalania parametrów funkcji przenoszenia wyników badań modeli laboratoryjnych i teoretycznych mma do skali naturalnej. W tle tych rozważań warto się również zastanowić nad stwierdzeniem, że podczas analizy utraty trwałości zmęczeniowej nawierzchni jezdni, przypuszczalnie można brać pod uwagę nie tylko zmiany wartości nachylenia prostych regresji (sztywności całego układu nawierzchni i podłoża), ale również ich rozproszenie (rysunek 8). Naturalna wydaje się tu też zasada, że im większa wartość zadanej w pomiarach siły docelowej, tym większe rozproszenie obserwowanych wartości ugięć.

Sytuacja przedstawiona na rysunku 8 umożliwia opracowanie uproszczonych ocen do diagnozowania trwałości zmęczeniowej. Do tego celu w najprostszym ujęciu można wykorzystać koncepcję zmiennych lingwistycznych [2]. Przypisując np. różnicy kwantyli 0,8 i 0,2 warunek w postaci $(q_{0,8} - q_{0,2}) < 50$, można w odniesieniu do rozkładów przedstawionych na rysunku 8 ustalić skalę wartościowania tego kryterium poprzez określenie zmiennych typu: *trwałość zmęczeniowa zachowana – wyczerpana*.

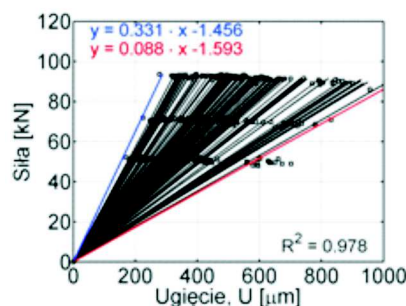
W nawiązaniu do wartości samych współczynników determinacji R^2 (rysunek 6) uwagę zwracają ich relatywnie duże wartości. Znając wiek nawierzchni na odcinku B, nawet



Fot. 1. Stan techniczny powierzchni testowanego układu

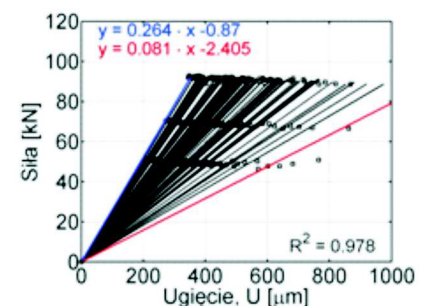
a) Pomiary na lewym pasie ruchu

$T = 24^{\circ}\text{C}$, $h_{\text{mma}} = 14 \text{ cm}$

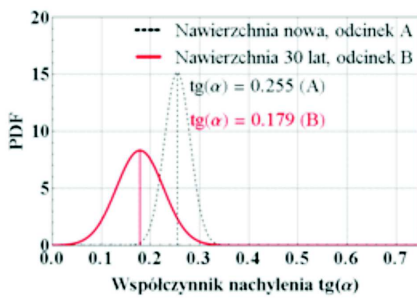


b) Pomiary na prawym pasie ruchu

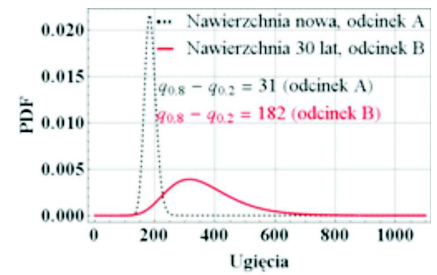
$T = 24^{\circ}\text{C}$, $h_{\text{mma}} = 14 \text{ cm}$



Rys. 6. Ilustracja: zależności między wielkościami sił i ugięć uzyskanych w pomiarach konstrukcji nawierzchni z przekroczonym stanem granicznym trwałości zmęczeniowej



Rys. 7. Funkcje gęstości prawdopodobieństwa (PDF) i dystrybuanty (CDF) rozkładu normalnego dla współczynników nachylenia prostych regresji określających zależność siły i ugięcia dla nawierzchni nowej (BA WMS – odcinek A) i nawierzchni jezdni po 30 latach eksploatacji (odcinek B)



Rys. 8. Funkcje gęstości prawdopodobieństwa (PDF) ugięć wywołanych obciążeniem ponadnormatywnym nowej nawierzchni jezdni (BA WMS) i nawierzchni po 30 latach eksploatacji ($q_{0,8}$ i $q_{0,2}$ oznaczają odpowiednio kwantyle 0,8 i 0,2)

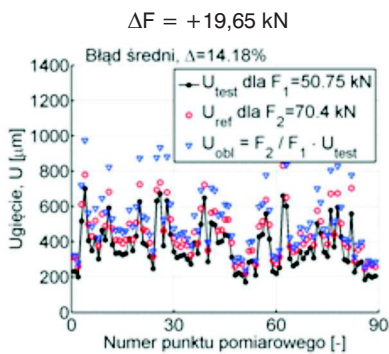
ponadnormatywne obciążenie nawierzchni jezdni nie wywołało istotnych reakcji nieliniowych między wielkościami siła – ugięcie.

Odcinek B – ekstrapolacja wartości ugięć

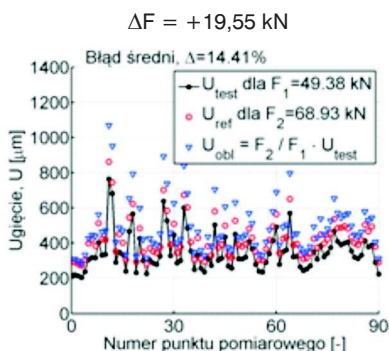
Wyniki analizy charakterystyki siła – ugięcie opracowanej dla nawierzchni o 30-letniej historii pozwalają przypuszczać, że wartość średniego błędu liniowej normalizacji ugięć (3) dla tego odcinka znacznie przekroczy umowną granicę wartości błędu inżynierskiego wynoszącą 10%. Pełny przegląd otrzymanych rezultatów zestawiono na rysunku 9.

Otrzymane wartości błędów ekstrapolacji w najbardziej niekorzystnym wariancie są równe 24% (rysunek 9b). Warunek wykorzystania w tej sytuacji liniowej normalizacji ugięć jest obarczony znacznym błędem.

a) Pas lewy, $T = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$



b) Pas prawy, $T = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$



Rys. 9. Wyniki ekstrapolacji metodą liniowej normalizacji ugięć nawierzchni jezdni o wyczerpanej trwałości zmęczeniowej

Odcinek C – ocena liniowości

Kolejny przykład to opis wyników badań typowej nawierzchni podatnej poddanej zabiegowi remontu w 2010 r. Badania ugięciomierzem dynamicznym typu FWD (przy zachowaniu warunków zwiększonego zakresu obciążeń) zostały wykonane po remoncie w latach 2010–2014. Zestawienie wybranych wyników obliczeń zaprezentowano na rysunku 10.

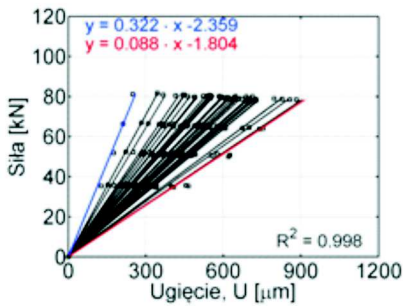
Podstawowa weryfikacja relacji między wielkościami siła – ugięcie, poparta dużą, średnią wartością współczynnika $R^2 = 0.99$ wskazuje na wyraźną liniowość tej zależności. Mając jednak na uwadze te wartości, które uzyskano dla nawierzchni po 30 latach eksploatacji (odcinek B, rysunek 6), można było to już przewidzieć. W ocenie rezultatów analizy testów pokazanych na rysunku 10, przyjęto też metodykę

oceny kształtu podstawowych własności rozkładów PDF i CDF. Ponownie, kierując się postacią rozkładów PDF i CDF otrzymaną w konsekwencji analizy nawierzchni odcinka B, rozważaniom poddano zmiany ich własności w czasie (rysunek 11). Na rysunku pokazano również wartości różnicy oznaczonej jako $q(0,9-0,1)$, która oznacza rozstęp między kwantylami 0,9 i 0,1.

Test Fishera nie potwierdza hipotezy o tym, że wszystkie wartości współczynników nachylenia określone dla poszczególnych lat mają wspólną wartość średnią, co oznacza, że wartość ta jest mniejsza w latach 2012, 2013 w porównaniu do tej z roku 2011. Przyjmując w sposób umowny, że rozkład PDF współczynników nachylenia prostych wyznaczonych dla nawierzchni odcinka C, jest reprezentantem nawierzchni z warstwami asfaltowymi po remoncie, a przypadek odcinka B opisuje nawierzchnie zdegradowane, porównanie na rysunku 11 wskazuje w pewnym sensie kierunek, w którym postępuje proces degradacji zmęczeniowej układu nawierzchnia + podłoże.

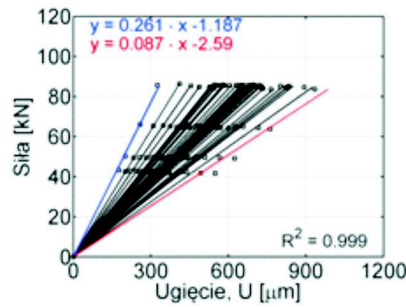
a) Pomiary w 2011 r.

T = + 22 °C



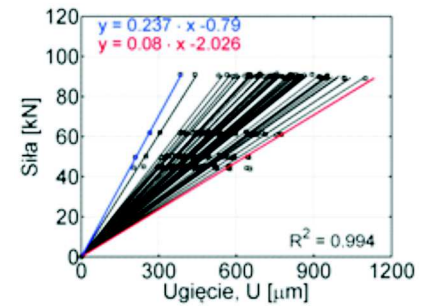
b) Pomiary w 2012 r.

T = + 17 °C



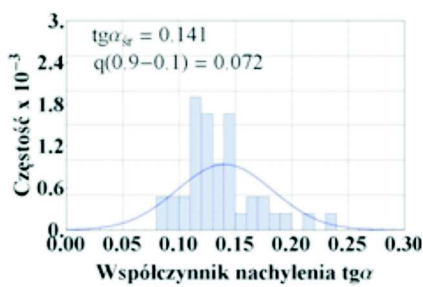
c) Pomiary w 2013 r.

T = + 25 °C

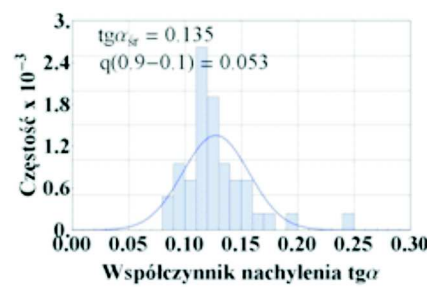


Rys. 10. Funkcje regresji opisujące zależność między wielkościami siła – ugięcie dla wartości uzyskanych w pomiarach ugięć konstrukcji nawierzchni odcinka testowego C, kolejno w trzech latach po zabiegu remontowym w 2010 r.

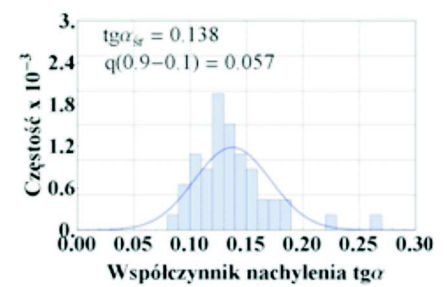
a)



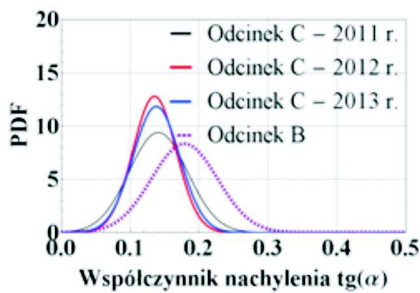
b)



c)



Rys. 11. Gęstość prawdopodobieństwa wartości współczynników nachylenia funkcji regresji charakterystyki siła – ugięcie w latach a) 2011, b) 2012, c) 2013



Rys. 12. Umowna prezentacja funkcji gęstości prawdopodobieństwa wartości współczynników nachylenia prostych regresji zależności siła – ugięcie nawierzchni podatnej po remoncie (odcinek A) i zdegradowanej nawierzchni o konstrukcji półsztywnej (odcinek B)

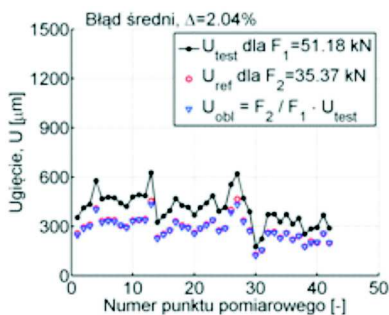
Odcinek C – ekstrapolacja wartości ugięć

Wracając do zagadnienia liniowej normalizacji wartości ugięć dla obciążeń przekraczających standardowe naciski 115 kN/os. Na rysunku 13 zestawiono przypadki obliczeń dla nawierzchni po remoncie.

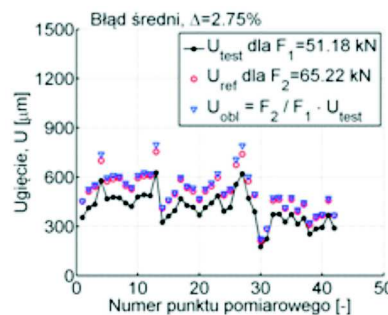
Sytuacja jest analogiczna do wyników analizy przedstawionej dla nawierzchni odcinka A. W zakresie obciążeń ponadnormatywnych, których wartość nie przekracza 90 kN, a temperatura warstw asfaltowych podczas pomiaru ugięć nawierzchni jest w zakresie do 25°C, liniowa normalizacja prowadzi do wartości błędnej niż 6,5%.

a) 2011 r., T = + 22 °C

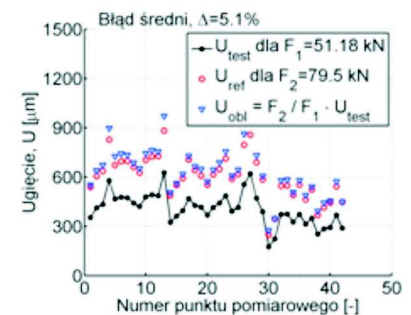
$\Delta F = -15,81$ kN



$\Delta F = +14,04$ kN

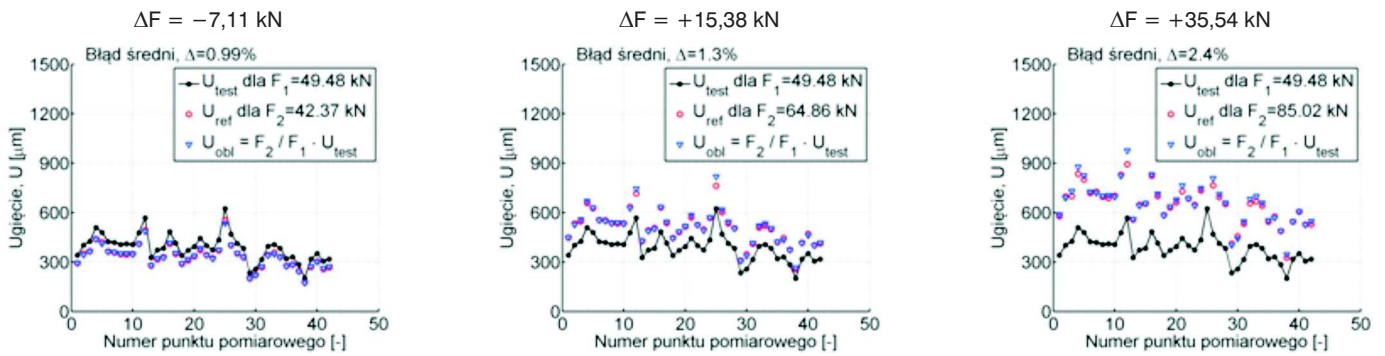


$\Delta F = +28,32$ kN

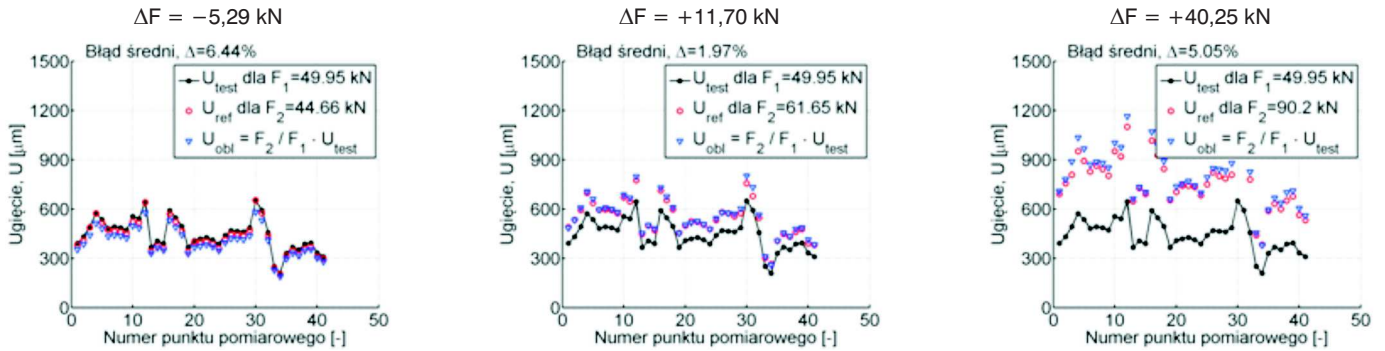


Rys. 13. Wyniki ekstrapolacji metodą liniowej normalizacji wartości ugięć – odcinek po remoncie

b) 2012 r., T = + 17°C



c) 2013 r., T = + 25°C



Rys. 13. Wyniki ekstrapolacji metodą liniowej normalizacji wartości ugięć – odcinek po remoncie (cd.)

Podsumowanie i wnioski

Analiza reakcji nawierzchni jezdni w warunkach obciążeń ponadnormatywnych to przede wszystkim próba wzbogacenia analiz opartych na wynikach badań ugięć nawierzchni prowadzonych w sposób niestandardowy. Pomimo, że koncepcja tzw. wielopoziomowych obciążeń nawierzchni nie jest wcale nowa i mieści się w kategorii badań przyspieszonych, w artykule przedstawiono studium, które trochę systematyzuje aspekt liniowej normalizacji ugięć dla typowych nawierzchni jezdni występujących w Polsce. Do porównania wybrano trzy typy konstrukcji nawierzchni ze skrajnie różną zdolnością do przenoszenia obciążeń: 1) nowa nawierzchnia wykonana w technologii BA WMS, 2) nawierzchnia półsztywna po 30-letnim okresie eksploatacji, 3) nawierzchnia podatna po zabiegu remontowym. Tak dobrany program eksperymentu pozwolił potwierdzić, że układ warstwowy, który tworzy nawierzchnia i jej podłoże, charakteryzuje się liniowym opisem zależności między mechanicznymi wielkościami siły i ugięcia w zakresie dynamicznych obciążeń od 30 do 90 kN. W zakresie tych obciążeń i prowadzenia badań ugięć nawierzchni i podłoża, przy temperaturze warstw asfaltowych do 25°C, liniowa normalizacja prowadzi do wartości błędów względnych mniejszej niż 6,5%. Wniosek ten jednak dotyczy wyłącznie testowanej tu nawierzchni nowej i tej po zabiegu remontowym. Analiza nawierzchni jezdni, wobec której stwierdzono przekroczenie stanu granicznego trwałości zmęczeniowej wykazała, że reakcję na obciążenie w omawianym zakresie można wprawdzie uznać za liniową (dominuje rozproszenie wyników, a nie określony trend), ale wartości błędów wynikające z zastosowania liniowej normalizacji ugięć sięgają granicy równej 25%. Warto

podkreślić, że przedstawione studium dotyczące analizy testów ugięć nawierzchni poddanych obciążeniom wielopoziomowym to również otwarty temat badawczy w zakresie oceny zjawisk zmęczeniowych. Przedstawione elementy analizy w tym obszarze potwierdzają możliwość poszerzenia wiedzy w tym zakresie, na potrzeby włączenia do oceny mechanicznej stochastycznych procesów zmęczeniowych, których parametry mogłyby być określone z wykorzystaniem wyników badań ugięć nawierzchni w warunkach naturalnych, co dałoby szansę zoptymalizować warunki badań zmęczeniowych próbek z mma w skali laboratoryjnej.

Bibliografia

- [1] S.F. Brown, B.V. Brodrick, *25 years' experience with the pilot-scale Nottingham pavement test facility*, *International Conference on Accelerated Pavement Testing*, Nevada, 1999
- [2] I. Leonowicz, S. Bogdanowicz, *New principles of development of pavement management systems*, Konferencja Polskiego Kongresu Drogowego, 2006
- [3] MAIN ROADS Western Australia Calibration Method WA 326.2 - *Pavement deflection and curvature measurement: Falling Weight Deflectometer (FWD)*
- [4] H.M. Park, Y.R. Kim, *Prediction of Remaining Life of Asphalt Pavement with Falling-Weight Deflectometer Multiloading-Level Deflections*, *Transportation Research Board of the National Academies*, Volume 1860, 2003
- [5] A. Pożarycki, *Analiza trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych*, Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań, 2009
- [6] A. Pożarycki, *Condition assessment of lower roadway layers for pavement management systems*, *Journal of civil engineering and management*, doi:10.3846/13923730.2014.897987, 2014
- [7] A. Szydło, *Statyczna identyfikacja parametrów modeli nawierzchni lotniskowych*, Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej

- [8] D. Timm, R. West, A. Priest, B. Powell, I. Selvaraj, J. Zhang, R. Brown R, Phase I *NCAT Test Track Results. NCAT Report 06-05, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, 2006*
- [9] H.K. Zubeck, G. Doré, *Cold Regions Pavement Engineering, McGraw-Hill Professional, American Society of Civil Engineers, Virginia, 2009*

- [10] Grupa robocza pod przewodnictwem Dariusza Sybilskiego. Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 2001
- [11] Grupa robocza pod przewodnictwem Dariusza Sybilskiego. Katalog przebudów i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 2013



DAWID RYŚ

Politechnika Gdańska
dawid.rys@wilis.pg.gda.pl



JÓZEF JUDYCKI

Politechnika Gdańska
josef.judycki@wilis.pg.gda.pl



PIOTR JASKUŁA

Politechnika Gdańska
piotr.jaskula@wilis.pg.gda.pl

Analiza rocznych zmian w ruchu ciężkim na podstawie danych ze stacji ważenia pojazdów (WIM) w Polsce

Ruch drogowy, w tym ruch ciężki, ulega wahaniom w ciągu roku. Rozkład ruchu ciężkiego w roku jest jedną z ważnych charakterystyk opisujących ruch drogowy, która znajduje wiele praktycznych zastosowań. Między innymi rozkład ruchu ciężkiego w roku jest wykorzystywany do projektowania metodami mechanistycznymi konstrukcji nawierzchni dróg nowych i remontowanych. Stosowany jest również w różnego rodzaju analizach ruchu drogowego, m.in. do obliczania średniorocznego ruchu dobowego. Potencjalnym zastosowaniem może być również zarządzanie transportem drogowym oraz zarządzanie infrastrukturą drogową, jak np. planowanie remontów drogowych lub planowanie prowadzenia kontroli pojazdów ciężarowych w celu zmniejszenia liczby pojazdów przeciążonych. Rozkład ruchu ciężkiego w roku może mieć również zastosowanie w analizach ekonomicznych, jako jeden ze wskaźników zmian aktywności gospodarczej w kraju.

Obecnie w Polsce do projektowania konstrukcji nawierzchni drogowych

stosowany jest następujący roczny rozkład ruchu ciężkiego:

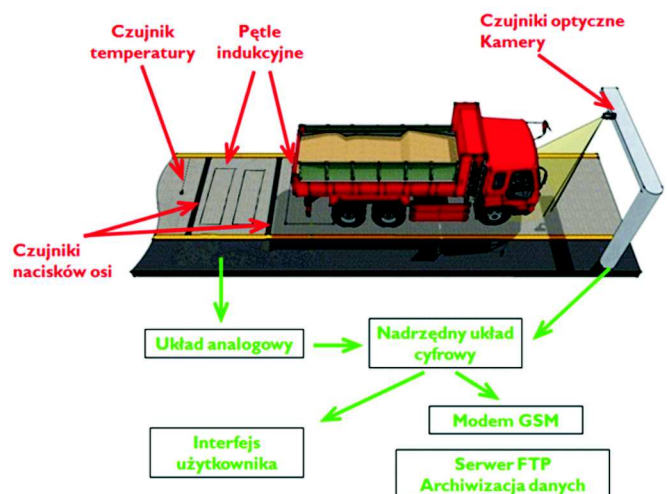
- 20% ruchu projektowego przypada na zimą,
- 50% ruchu projektowego przypada na wiosnę i jesień,
- 30% ruchu projektowego przypada na lato.

Rozkład ten wprowadzono w założeniach projektowych Katalogu typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych z 1997 r. [3] i przeniesiono do Rozporządzenia Ministra Infrastruktury [7]. Nie został jednak opublikowany sposób, według którego rozkład ten został określony. W Polsce roczny rozkład ruchu stosowany jest również do oceny efektywności ekonomicznej przedsięwzięć drogowych i mostowych. W instrukcjach [5] i [6] podano współczynniki prze-

liczeniowe średniego dobowego ruchu w danym miesiącu na średni dobowy ruch w roku. Współczynniki te określono tylko dla dróg powiatowych i gminnych i dotyczą one wszystkich pojazdów, czyli oprócz pojazdów ciężkich również samochodów osobowych i dostawczych.

Do określenia rocznych rozkładów ruchu pojazdów ciężarowych potrzebne są dane z ciągłego pomiaru liczby pojazdów i obciążeń ich osi, trwającego minimum rok. Dane te można uzyskać ze stacji ważenia pojazdów w ruchu WIM (ang. *weighing in motion*). Obecnie na sieci dróg w Polsce instalowanych jest coraz więcej stacji ważenia w ruchu, a niektóre z nich działają już kilka lat.

Poglądowy schemat budowy i działania stacji ważenia pojazdów w ruchu przedstawiono na rys. 1. Na rozpatrywanych stacjach stosowano jako czujniki nacisków osi profile aluminiowe z kwarcowym czujnikiem nacisku lub kompozytową płytę zginaną z tensometrycznym czujnikiem odkształcenia (stacje na autostradzie A2 w m. Emilia i drodze krajowej nr 11 w m. Buczyna). Więcej informacji dotyczących budowy i działania stacji WIM znaleźć można m.in. w publikacjach [1, 2, 16]. Na fot. nr 1 przedstawiono jedną ze stacji (droga krajowa nr 46 w m. Grodzcu), z której uzyskano dane pomiarowe.



Rys. 1. Schemat poglądowy budowy i działania stacji WIM [19]