

# Właściwości przeciwpoślizgowe nawierzchni lotniskowych przy użyciu urządzeń ze sztucznie wymuszonym dociskiem

## Skid resistance properties of airport pavements using a device with artificially enforced vertical pressure



**Andrzej Pożarycki**

Dr inż.

Instytut Inżynierii Lądowej  
Politechniki Poznańskiej

andrzej.pozarycki@put.poznan.pl



**Tomasz Moralewski**

Hax HYDRAULICS, Hax Warias  
Dariusz

tmoralewski@hax-serwis.pl



**Mariusz Wesołowski**

Pplk dr inż.

Instytut Techniczny Wojsk  
Lotniczych, Warszawa, Zakład  
Lotniskowy

mariusz.wesolowski@itwl.pl

**Streszczenie:** W układach pomiarowych do oznaczania właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni lotniskowych, spośród szeregu rozwiązań dominuje koncepcja sztucznie wymuszonego docisku. Jest to naturalny wybór biorąc pod uwagę rzeczywiste warunki kontaktu jakie panują podczas manewrów startu i lądowania statków powietrznych. W artykule opisano konsekwencje kształtowania układów mechanicznych wywołujących docisk pionowy koła pomiarowego do nawierzchni. Analizę poparto zbiorem wyników badań właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni lotniskowych. W następstwie przedstawiono statystyczne aspekty wartości siły docisku pionowego w kontekście zmiennych warunków determinujących cechy warstwy przypowierzchniowej nawierzchni.

**Słowa kluczowe:** Właściwości przeciwpoślizgowe; nawierzchnie lotniskowe

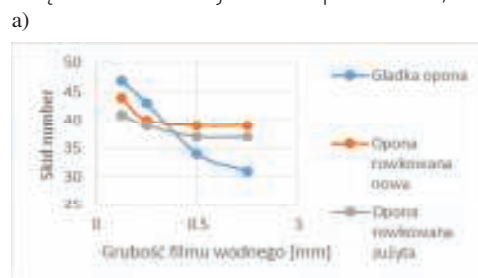
**Abstract:** In the measuring systems for determining the skid resistance properties of airport pavements, the concept of artificially enforced vertical pressure dominates among a number of solutions. This is a natural choice considering the real contact conditions that prevail during aircraft starting and landing maneuvers. The article describes the consequences of shaping mechanical systems that induce vertical pressure of the measuring wheel to the pavement surface. The analysis was supported by a set of test results of anti-slip properties of airport pavements. As a result, the statistical aspects of the value of the vertical downforce are presented in the context of variable conditions determining the properties of the surface layer of the surface.

**Keywords:** Skid resistance; airport pavements

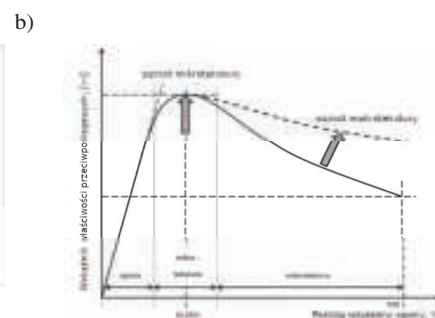
Liczba dostępnych rozwiązań i różnorodność poszczególnych metod oznaczania wskaźników właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni powoduje, że uzyskane wartości np. współczynników przyczepności nawierzchni są unikalne dla poszczególnych urządzeń. Przykładowe zależności, które obrazują zmienność wartości przykładowego wskaźnika właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni ze względu na przyjęte parametry techniczne systemu pomiarowego, pokazano między innymi na rysunku 1 w odniesieniu do parametru „stopień poślizgu (ang. skid number)” wg normy ASTM E – 274.

Dlatego, decydując się na diagnozowanie właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni warto sięgać po metody, które gwarantują dostęp

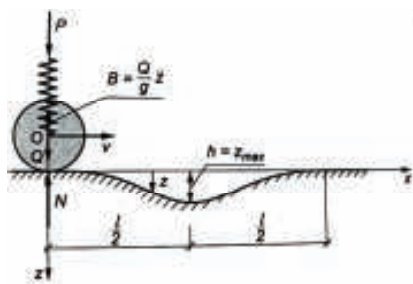
do wszystkich wartości generowanych przez sensory układu pomiarowego podczas realizacji badań. Mimo wszystko duża ilość zmiennych [3, 4, 5], która towarzyszy zjawiskom na styku opony i warstwy przypowierzchniowej nawierzchni powoduje, że na świecie nie ma uniwersalnych sposobów, które można wykorzystać do przeliczenia wyników pomiarów nawierzchni, wykonanych różnymi urządzeniami. To jeden z powodów,



dla których kryteria oceny właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni są różne dla każdego z urządzeń. W przypadku nawierzchni lotniskowych stosowane kryteria są zestawione dla kilku urządzeń akceptowanych przez Międzynarodową Organizację Lotnictwa Cywilnego (ang. ICAO), a w odniesieniu do nawierzchni drogowych obowiązują kryteria określone dla urządzenia SRT.



1. Ilustracja typowych zmian wartości wskaźnika właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni w funkcji: a) różnego rodzaju opon testowych [1], b) w zależności od stopnia poślizgu względnego opony [2]



2. Model sprężystego ruchu koła po sztywnym torze (bez poślizgu)

## Cel

Jeśli koło pomiarowe porusza się po poziomym, sztywnym torze, to nacisk na tor jest naciskiem statycznym i w nawiązaniu do rysunku 2 można go obliczyć jako  $N(st.) = P + Q$ .

W przypadku gdy pod kołem wystąpi nierówność, koło zaczyna się przemieszczać nie tylko poziomo, ale i pionowo z przyspieszeniem. Jeżeli by założyć, że nierówności są opisane równaniem krzywej w postaci (1)

$$z = \frac{h}{2} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{l}\right)\right) \quad (1)$$

to dla  $x = 0$ , wartość minimalna dla  $N$  wynosi (2):

$$N_{min} = P + Q \left(1 - \frac{2\pi^2 v^2 h}{gl^2}\right) \quad (2)$$

oraz dla  $x = l/2$ , wartość  $N$  osiąga maksimum równe (3):

$$N_{min} = P + Q \left(1 + \frac{2\pi^2 v^2 h}{gl^2}\right) \quad (3)$$

Z punktu widzenia pomiaru wartości wskaźników właściwości przeciwpoślizgowych (np. współczynnika tarcia) warto zauważyć, że przy spełnionej nierówności  $(2\pi^2 \cdot v^2 \cdot h) / (g \cdot l^2) > 1$ , wartość siły nacisku dynamicznego może być mniejsza od wartości siły  $P$ . To oznacza, że przy pomiarach na nawierzchni o określonych kombinacjach parametrów nierówności podłużnych i prędkości pomiarowych dochodzi do oderwania się koła od toru.

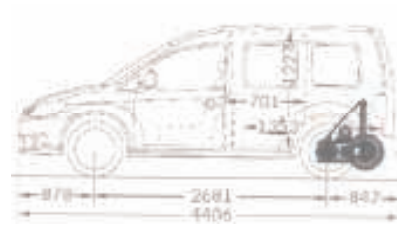
Wobec powyższych, celem pracy jest przedstawienie rzeczywistych i nie filtrowanych rozkładów dla wielkości, które wykorzystuje się do obliczania wartości współczynnika przyczep-

a)



3. Widok urządzenia wybudowanego na potrzeby oznaczania wartości współczynnika przyczepności nawierzchni lotniskowych

b)



ności przy zastosowaniu rozwiązań ze sztucznie wymuszonym i kontrolowanym dociskiem pionowym koła pomiarowego do nawierzchni. Dodatkowo zakłada się, że pomiary wykonane są na nawierzchniach, dla których wartość wskaźnika równości podłużnej spełnia warunek  $IRI < 3$ .

## Metodyka pomiarów

Do pomiarów wykorzystano urządzenie CSR [6, 7], które powstało jako efekt współpracy między jednostkami przemysłową (HAX) i naukową (Politechnika Poznańska) przy udziale w badaniach porównawczych zespołu badawczego z Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych.

Ocenę właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni w urządzeniu CSR oparto na standardowym modelu (4) wykorzystywanym do estymacji wartości wskaźnika tarcia na styku opona / nawierzchnia wyrażonego zależnością  $CSR_i$  (ang. Continuous Skid Resistance index).

$$CSR_i = \frac{M}{F \cdot r} \quad (4)$$

gdzie:

$CSR_i$  – współczynnik przyczepności wzdłużnej, [-],  $M$  – rejestrowana wartość momentu, [Nm],  $F$  – rejestrowana wartość siły pionowego docisku opony do nawierzchni, [N],  $r$  – ramię momentu, [m] (w warunkach statycznych równe 0.21 m).

W odniesieniu do charakterystyki przedstawionej na rysunku 1b, w urządzeniu CSR wykorzystano koło pomiarowe przyhamowane względem kół pojazdu o 13 %. Podczas prze-

jazdu urządzeniem, parametr  $CSR_i$  wyznaczany jest w odstępach co 10 cm. Tym samym, użytkownik ma możliwość przeprowadzenia umownie ciągłego pomiaru właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni jezdni. Do pomiarów wykorzystano oponę Unitester 520, a ciśnienie w oponie wynosiło 700 kPa (7 bar). Pomiary prowadzone były zarówno w warunkach „na sucho” jak i „na mokro” przy zastosowaniu filmu wodnego o grubości 1 mm (rysunek 4a). W celu kontroli warunków pomiaru urządzenie wyposażono w przyrząd do okresowej, statycznej kalibracji przetworników tensometrycznych. Kontrola podlegają takie wielkości jak: wartość siły pionowej oraz wartość momentu, które są porównywane z wzorcowymi wartościami przetworników tensometrycznych stanowiska kalibracyjnego pokazanego na rysunku 4b.

Procedura kalibracyjna polega na: 1) ustawieniu stanowiska pod oponą koła pomiarowego urządzenia CSR, 2) Opuszczeniu koła pomiarowego i zadaniu docisku siłą o wartości  $\leq 1400$  N, 3) odczytu uzyskanych wartości z przetworników wzorcowych, 4) wymuszeniu przesuwu stolika kalibracyjnego momentu, 5) odczytu wartości momentu przy założeniu, że ramię przyłożenia siły jest stałe, 6) zarejestrowania wartości przez komputer pokładowy urządzenia CSR, 7) porównania odczytów i w przypadku jeśli wskazania sensorów różnią się o więcej niż 5 % wprowadza się poprawki kalibracyjne.

## Charakterystyka dynamiczna modelu koła pomiarowego

Dla rozwiązania pokazanego na rysunku **3b** zagadnienie analizy właściwości modelu (1) można powiązać z analizą wymuszenia kinematycznego [1]. Wpływ nierówności nawierzchni określa wówczas model, który opisuje reakcję koła pomiarowego na zadany zewnętrznie ruch na sztywnym torze. W ogólnym przypadku schematy dla modeli z wymuszeniami siłowym i kinematycznym pokazane są na rysunku **5**.

Schemat rozważanych rozwiązań ingerujących w zakres konstrukcji mechanicznej tylnego mostu urządzenia pomiarowego CSR, przedstawiony jest na rysunku **6**, gdzie 1) przekładnia zębata, 2) komory sprzęgieł, 3) wahacz z kołem pomiarowym, 4) zespół półosi, 5) mocowanie siłownika hydraulicznego, 6) tensometryczny przetwornik siły, 7) tensometryczny przetwornik momentu. Wyniki dla rozwiązań docisku koła pomiarowego do nawierzchni przedstawiono w układzie o jednym stopniu swobody, ale przy wykorzystaniu koncepcji modeli z połączeniem sprężystym (rysunek **6a**) i lepko-sprężystym (rysunek **6b**).

Konsekwencją wywierania różnego rodzaju wpływów na powierzchnie styku opona / nawierzchnia podczas pomiarów wartości współczynnika przyczepności, jest inny charakter modelu (4), który w kontekście rozwiązań pokazanych na rysunkach **6a** i **6b** przyjmuje postać odpowiednio (5) lub (6).

$$CSR_i = \frac{M}{N(x,t) \cdot r}, \text{ gdzie } N(x,t) = F + m_1 g - m_1 \ddot{y} - m_0 \ddot{q} \quad (5)$$

gdzie (oznaczenia zgodnie z rysunkami **6a** i **6b**):

$$m_0 \ddot{q} + k_1(q - y) = 0$$

oraz

$$m_1 \ddot{y} - k_1(q - y) - (m_0 + m_1)g = 0$$

$$CSR_i = \frac{M}{N(x,t) \cdot r}, \text{ gdzie } N(x,t) = F + m_2 g - m_2 \ddot{y} - m_3 \ddot{q} \quad (6)$$

gdzie (oznaczenia zgodnie z rysunkami **6a** i **6b**):

$$m_3 \ddot{q} + c_2(\dot{q} - \dot{y}) + k_2(q - y) = 0$$

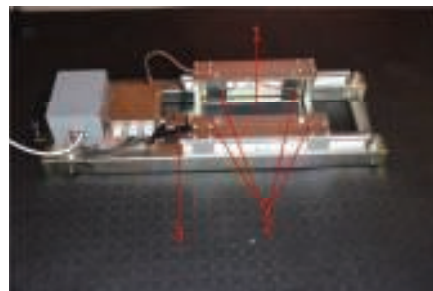
oraz

$$m_2 \ddot{y} - c_2(\dot{q} - \dot{y}) - k_2(q - y) - (m_3 + m_2)g = 0$$

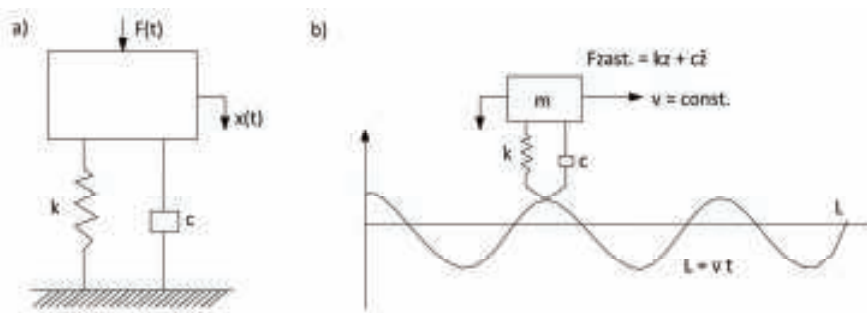
a)



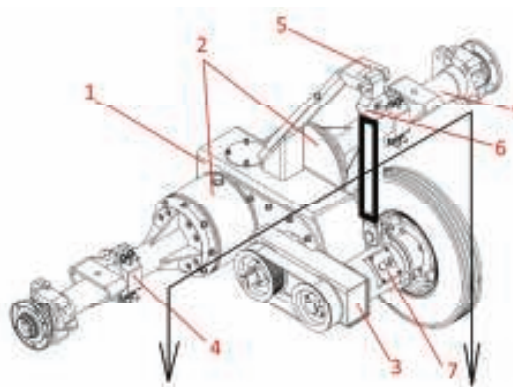
b)



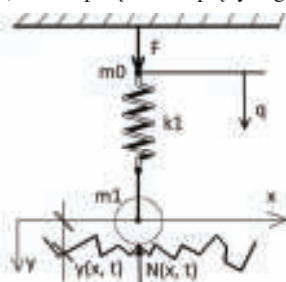
4. Widok od lewej: a) koła pomiarowego z dyszą układu podającego wodę, b) stanowisko do kalibracji statycznej przetworników tensometrycznych zamontowanych w urządzeniu CSR (1- miejsce na oponę koła pomiarowego (stolik przesuwany) 2 i 3 – tensometryczne przetworniki siły do kalibracji odpowiednio siły pionowej i momentu)



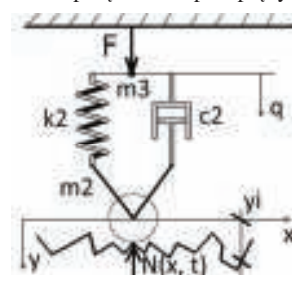
5. Ilustracja równowagi wymuszeń w układzie o jednym stopniu swobody a) wymuszenie siłowe, b) wymuszenie kinematyczne



a) model połączenia sprężystego



b) model połączenia lepko-sprężystego



6. Schematy modeli testowanych układów pomiarowych w urządzeniu CSR

To w jaki sposób zachowują się poszczególne modele rozwiązań pokazano na przykładach wyników uzyskanych w kampaniach pomiarowych opisanych w dalszej części tej pracy.

## Wyniki pomiarów

Pomiary wykonane zostały na drodze startowej z nawierzchnią asfaltową oraz na nawierzchni parkingu wykonanej z betonu cementowego. Długość odcinków pomiarowych wynosiła 100 metrów w każdym przypadku. Podczas realizacji kampanii pomiarowych na kompletny zbiór wyników złożyły się następujące scenariusze:

- pomiary na odcinku nawierzchni z betonu asfaltowego SMA 0/11 mm (pomiar „na sucho” i „na mokro”); wartość IRI < 1.5;
- pomiary na nawierzchni z betonu cementowego teksturowanego matą jutową (pomiar „na sucho” i „na mokro”); wartość IRI < 3;

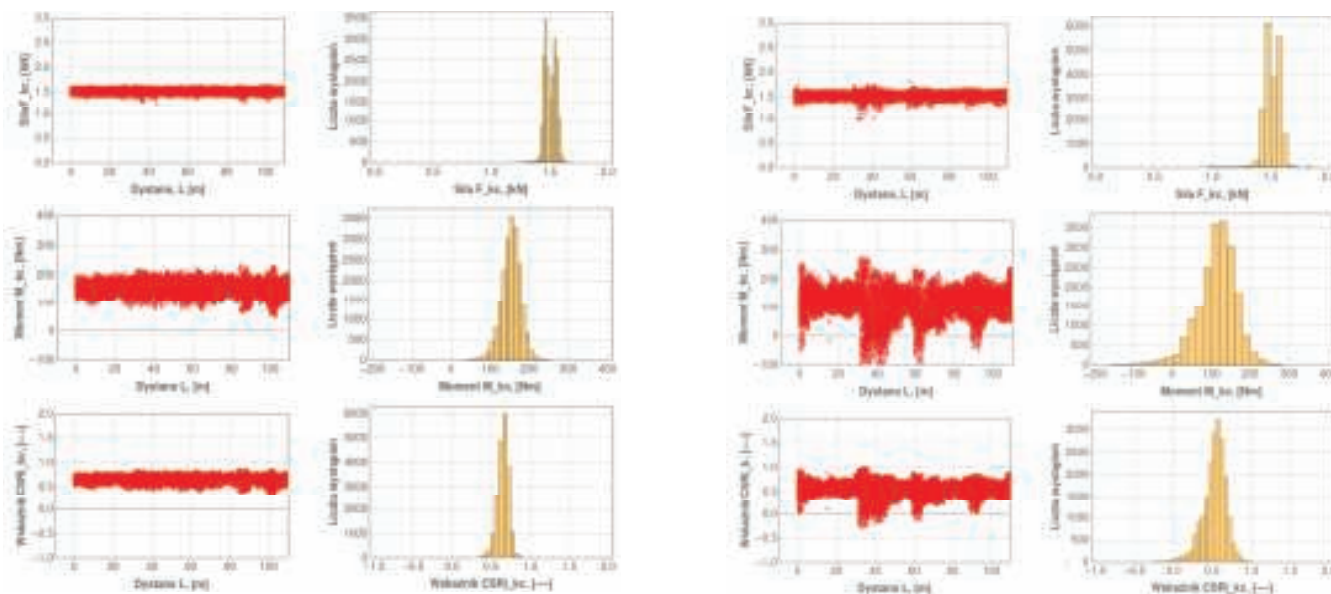
W pomiarach wykonanych wiosną wykorzystano model pokazany na rysunku 6a, a latem na rysunku 6b. W następstwie na analizę pojedynczego odcinka nawierzchni złożył się zbiór 19900 wyników pomiarów. Na rysunkach 7 i 8 pokazano wpływ nierówności podłużnej na zarejestrowane wartości siły pionowej i momentu. W pierwszym przypadku wykresy obrazują wyniki pomiarów na drodze startowej przy prędkości 65 km/h w warunkach „na mokro”. Natomiast na rysunku 8, zilustrowano rzeczywistą reakcję systemu na analogiczne warunki pomiarów, ale na odcinku nawierzchni z betonu cementowego.

Dla celów porównawczych, na rysunku 9 pokazano też reakcję siły pionowego docisku koła pomiarowego do nawierzchni uzyskaną w pomiarach na nawierzchni z betonu cementowego przy prędkości pomiarowej równej 65 km/h i bez podawania filmu wodnego.

Z analizy wartości sił zestawionych na rysunku 9 wynika, że model z rozwiązaniem sprężystym (rysunek 6a) jest na tyle wrażliwy, że następuje zjawisko oderwania się koła pomiarowego od toru jazdy. To oznacza, że czynniki równości podłużnej nawierzchni i sił bezwładności prowadzą w konsekwencji do różnych wartości współczynnika przyczepności uzyskanych dla obu testowanych modeli.

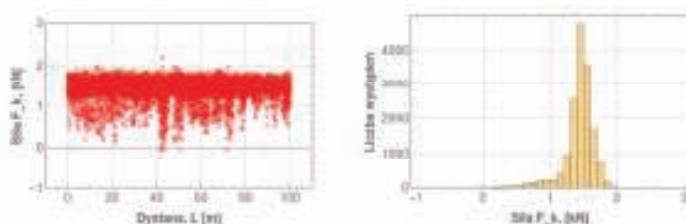
## Dyskusja

Porównanie wartości bezwzględnych współczynnika CSRI uzyskanych przy wykorzystaniu obu omówionych w tym artykule rozwiązań z uwagi na różne podejście do ukształtowania pionowego docisku koła pomiarowego do nawierzchni nie może być tutaj brane pod uwagę. Można jednak prześledzić reakcję tych dwóch systemów pomiarowych na zmianę warunków pomiaru. Na rysunkach 10a

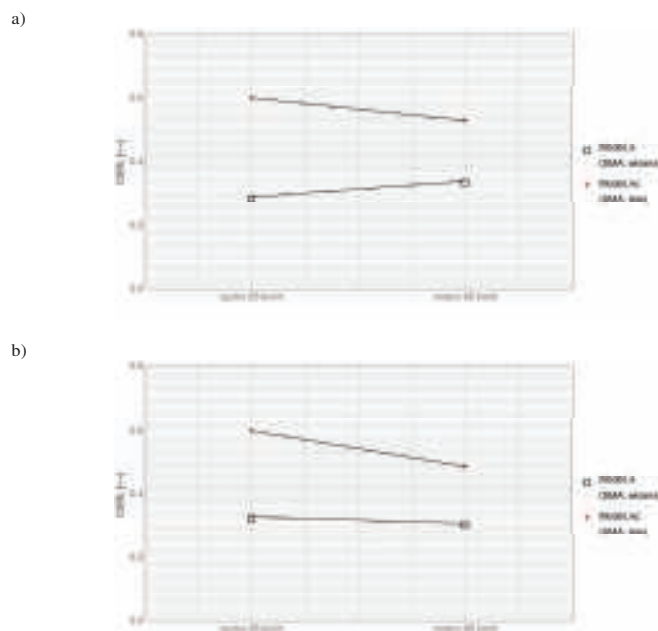
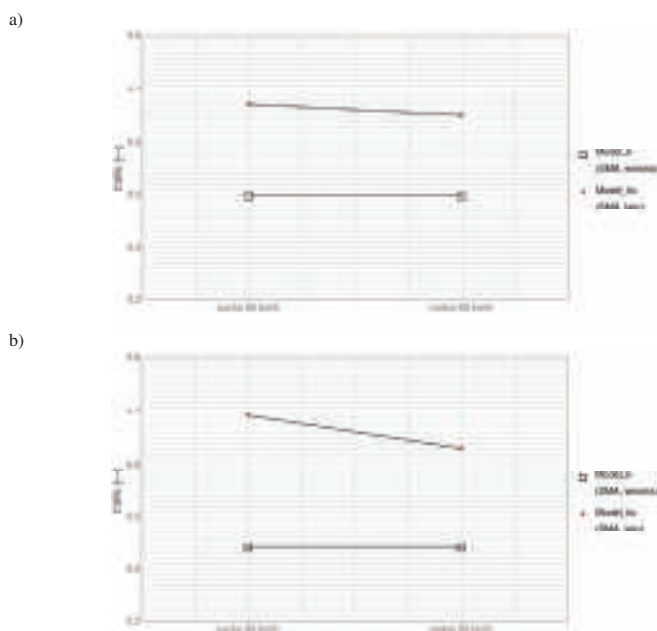


7. Wyniki pomiarów na drodze startowej z asfaltową warstwą ścierną ( $v = 65$  km/h, „na mokro”, wykorzystany model rozwiązania w urzędzeniu CSR - zgodnie z rysunkiem 6b)

8. Wyniki pomiarów na nawierzchni z betonu cementowego ( $v = 65$  km/h, „na mokro”, wykorzystany model rozwiązania - zgodnie z rysunkiem 6b)



9. Wykres siły pionowego docisku koła pomiarowego do nawierzchni wraz z histogramem dla pomiarów na nawierzchni z betonu cementowego w warunkach „na sucho” przy prędkości 65 km/h (model rozwiązania - zgodnie z rysunkiem 6a)



10. Ilustracja graficzna reakcji układu pomiarowego w pomiarach „na sucho” i „na mokro” na nawierzchni asfaltowej: a) prędkość pomiarowa 65 km/h i b) prędkość pomiarowa 95 km/h

11. Ilustracja graficzna reakcji układu pomiarowego w pomiarach „na sucho” i „na mokro” na nawierzchni z betonu cementowego: a)  $v = 65$  km/h i b)  $v = 95$  km/h

i b pokazano reakcję obu rozwiązań na przykładzie wyników pomiaru na nawierzchni asfaltowej.

Poprzez analogię do wyników pokazanych na rysunku 10, reakcja rozwiązań dla modelu sprężystego i lepko-sprężystego pokazana jest na rysunkach 11a i b.

Cechą charakterystyczną rozwiązania z modelem sprężystym jest reakcja układu pomiarowego na wykorzystanie filmu wodnego i pomiary bez filmu. W ogólnym przypadku, użytkownik spodziewa się, że wartość współczynnika przyczepności będzie mniejsza zarówno wraz ze wzrostem prędkości pomiarowej jak i w warunkach „na mokro” w porównaniu do pomiarów bez użycia wody. W tym eksperymencie zasady te potwierdzają się dla tylko wyników uzyskanych przy wykorzystaniu modelu z tłumikiem.

## Wnioski

W pracy omówiono cząstkowe wyniki eksperymentu, który przeprowadzono z wykorzystaniem urządzenia CSR, zbudowanego na potrzeby oznaczania wartości współczynnika przyczepności wzdłużnej nawierzchni lotniskowych przy różnych prędkościach. Uwagę skierowano na rozpoznanie właściwości układów pomiarowych

zastosowanych w tym urządzeniu, które zdeterminowane są głównie właściwościami modelu sprężystego i lepko-sprężystego. W oparciu o analizę wyników zebranych podczas kampanii pomiarowych na dwóch rodzajach nawierzchni lotniskowych stwierdzono, że zgodnie z oczekiwaniami układ modelu z tłumikiem prowadzi do dwóch głównych wniosków 1) rozkłady statystyczne sporządzone dla wartości wielkości pośrednich składających się na model wskaźnika CSRI są znacznie bardziej skupione wokół wartości średniej w porównaniu do analogicznych rozkładów wykonanych dla modelu sprężystego, 2) tłumik konsekwentnie redukuje niepożądany wpływ równości podłużnej na obliczane wartości wskaźnika CSRI ograniczając skłonność układu pomiarowego do rejestrowania wartości wielkości pośrednich i odrywania koła pomiarowego od nawierzchni. ◀

## Materiały źródłowe

[1] Cempel C. Drgania mechaniczne - wprowadzenie. Politechnika Poznańska, 1982.  
 [2] Ueckermann A., Wang D., Oeser M. and Sreinauer B. Towards Contactless Skid Resistance Measurement. Safer Roads International

Conference, May 18-21, 2014, UK.  
 [3] Burtos M., et. Al. Development of correlation equations between different measurements of skid resistance in pavements. Indian Journal of Engineering & Material Sciences, Vol. 13, April 2006, pp. 117-122.  
 [4] Descornet G., et. Al. Harmonization of European Routine and research Measuring Equipment for Skid Resistance. FEHRL Report 2006/01, pp. 1-161.  
 [5] International Experiment to Compare and Harmonize Skid Resistance and Texture Measurements. PIARC, 1995, 430 pages.  
 [6] Pożarycki Andrzej, Fengier Jakub, Warias Dariusz, Tomasz Moralewski. Identyfikacja odcinków nawierzchni lotniskowych o zmiennych właściwościach przeciwpoślizgowych urządzeniem CSR. Poznań - Lotnictwo dla obronności, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2016, pp. 483-494.  
 [7] Pożarycki A., Fengier J., Wyczałek M., Skrzypczak P., Wesołowski M., Blacha K., Analiza wyników metody fotogrametrycznej w świetle właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni, Drogownictwo, 2017, nr 3, str. 75-84