



ANDRZEJ POŻARYCKI

Politechnika Poznańska
andrzej.pozarycki@put.poznan.pl

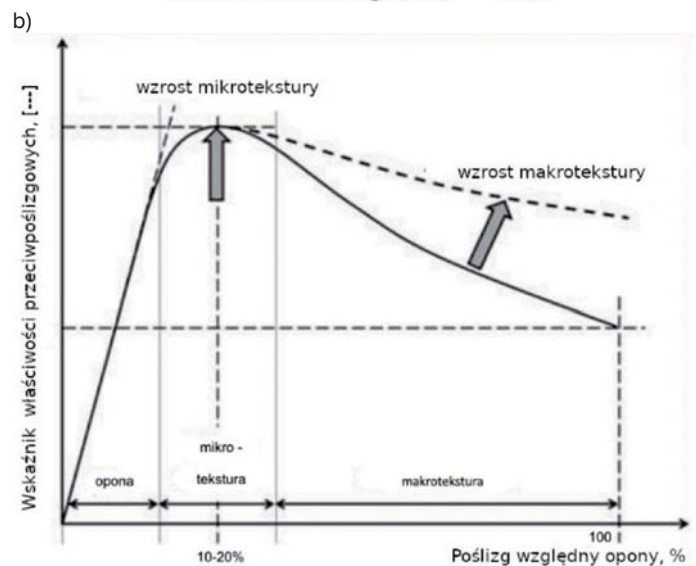
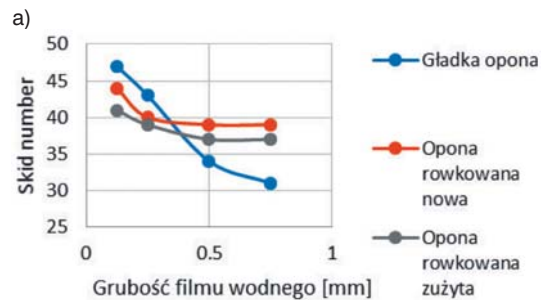
Badania właściwości przeciwoślizgowych nawierzchni urządzeniami do testów w trybie ciągłym

W artykule opisano nowy model urządzenia mechanicznego skonstruowanego i wybudowanego w Polsce do określania właściwości

przeciwoślizgowych nawierzchni. Urządzenie powstało na potrzeby badania nawierzchni lotniskowych, jednak sposób podejścia do kształtowania układu mechanicznego wywołującego docisk pionowy koła pomiarowego do nawierzchni predysponuje takie rozwiązanie również do wykorzystania go do badań nawierzchni drogowych. W publikacji wykorzystano fragmenty artykułów autora [6], [8].

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

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 przeciwoślizgowych nawierzchni są różne w przypadku każdego z urządzeń. Jeżeli chodzi o nawierzchnie lotniskowe, stos-



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

Tabela 1. Kryteria oceny właściwości przeciwoślizgowych nawierzchni lotniskowych dla urządzeń wzorcowych wg ICAO [9]

Urządzenie pomiarowe	Opona testowa		Prędkość pomiarowa (km/h)	Grubość pomiarowa strumienia wody (mm)	Wartości pomiarowe dla nowej nawierzchni	Poziom planowania działań naprawczych	Wartości minimalne współczynnika tarcia
	typ	ciśnienie (kPa)					
(1)	(2)		(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Przyczepa Mu-meter	A	70	65	1,0	0,72	0,52	0,42
	A	70	95	1,0	0,66	0,38	0,26
Przyczepa Skiddometer	B	210	65	1,0	0,82	0,60	0,50
	B	210	95	1,0	0,74	0,47	0,34
Surface Friction Tester Vehicle	B	210	65	1,0	0,82	0,60	0,50
	B	210	95	1,0	0,74	0,47	0,34
Runway Friction Tester Vehicle	B	210	65	1,0	0,82	0,60	0,50
	B	210	95	1,0	0,74	0,54	0,41
TATRA Friction Tester Vehicle	B	210	65	1,0	0,76	0,57	0,48
	B	210	95	1,0	0,67	0,52	0,42
Przyczepa GRIPTESTER	C	140	65	1,0	0,74	0,53	0,43
	C	140	95	1,0	0,64	0,36	0,24

wane kryteria są określone dla kilku urządzeń (tabela 1) akceptowanych przez Międzynarodową Organizację Lotnictwa Cywilnego (ang. ICAO). W odniesieniu do nawierzchni drogowych obowiązują kryteria określone dla urządzenia SRT (tabela 2).

Tabela 2. Kryteria oceny właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni drogowych dla urządzenia SRT – 4 wg GDDKiA [10]

Klasa	Ocena stanu nawierzchni	Miarodajny współczynnik tarcia, przy prędkości 60 km/h	Miarodajny współczynnik tarcia, przy prędkości 50 km/h
A	stan dobry	$\geq 0,51$	$\geq 0,54$
B	stan zadowalający	$0,36 \div 0,50$	$0,38 \div 0,53$
C	stan niezadowalający	$0,29 \div 0,35$	$0,31 \div 0,37$
D	stan zły	$\leq 0,28$	$\leq 0,30$

Celem głównym artykułu jest przedstawienie rzeczywistych i niefiltrowanych rozkładów dla wielkości, które wykorzystuje się do obliczania wartości współczynnika przyczepności przy zastosowaniu urządzenia ze sztucznie wymuszonym i kontrolowanym dociskiem pionowym koła pomiarowego do nawierzchni. Opisane przykłady sformułowano na podstawie pomiarów wykonanych na nawierzchniach, w przypadku których wartość wskaźnika równości podłużnej IRI była mniejsza niż 3. Spektrum badanych nawierzchni wybrano według kryteriów oceny stanu technicznego nawierzchni lotniskowych, gdzie według tej klasyfikacji podejmowane są decyzje o długoplanowych działaniach naprawczych nawierzchni i te, które determinują natychmiastowe reakcje służb technicznych.

Metody pomiarowe

Określenie właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni wykonuje się metodami, które można sklasyfikować w dwóch grupach:

- 1) metody stacjonarne (tzw. punktowe),
- 2) metody mobilne (pomiaru wykonywane urządzeniami w ruchu drogowym).

Do pierwszej grupy można zaliczyć metody, do których wykorzystuje się takie urządzenia jak: wahadło angielskie (ang. *British Pendulum*), dynamiczny tester tarcia (ang. *Dynamic Friction Tester – DFT*), urządzenia typu *drag sled* – czyli oznaczanie właściwości przeciwpoślizgowych metodą wleczenia. Do pierwszej grupy metod zalicza się również klasyczną już metodę piasku kalibrowanego, z której uzyskuje się informacje o średniej głębokości tektury warstwy przypowierzchniowej nawierzchni, opisywanej wielkością MTD (ang. *Mean Texture Depth*) oraz punktową metodę oznaczania współczynnika tarcia znaną jako CTM (ang. *Circular Track Meter*).

W drugiej grupie metod dominują zarówno techniki pomiarów laserowych, jak i technologie skoncentrowane na ocenie właściwości przeciwpoślizgowych za pośrednictwem specjalnie skonstruowanego koła pomiarowego. Wykorzystując

jako źródło informacji o strefie przypowierzchniowej nawierzchni wiązkę lasera, otrzymuje się parametr określający tzw. średnią głębokość profilu MPD (ang. *Mean Profile Depth*) czy technologie typu *outflow meter*, które pozwalają określić czas odpływu wody z powierzchni nawierzchni przy ustalonych warunkach. W przypadku urządzeń bazujących na kole pomiarowym, właściwości przeciwpoślizgowe nawierzchni można oznaczyć:

- 1) przy tzw. pełnej blokadzie koła pomiarowego ($s = 100\%$),
- 2) przy częściowej blokadzie koła pomiarowego ($s =$ od 0 do 100%),
- 3) przy zmiennej blokadzie koła pomiarowego,
- 4) z kołem pomiarowym wychylonym w porównaniu do płaszczyzny kół napędowych pojazdu o kąt „ α ”.

Liczba dostępnych na świecie rozwiązań jest relatywnie duża, a spośród nich najczęściej stosowane zostały zestawione w tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie metod / urządzeń do pomiarów właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni

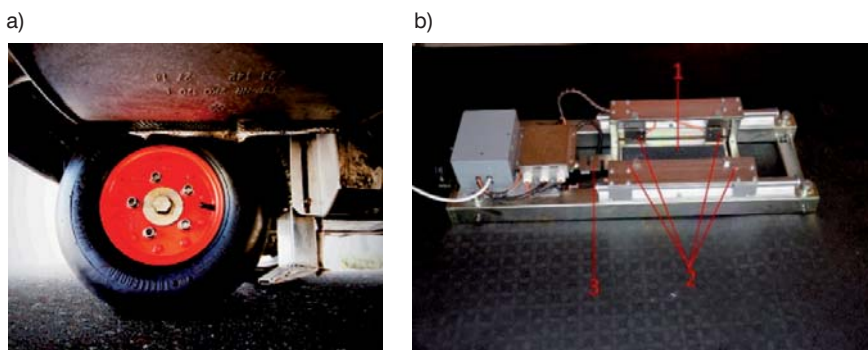
Metoda/urządzenie	Uzyskiwany parametr/komentarz
Metody stacjonarne	
<i>Drag sled</i>	Statyczny współczynnik tarcia
Wahadło angielskie	BPN (<i>British Pendulum Number</i>)
DFT	Dynamiczny współczynnik tarcia
CTM	MPD, RMS
Profilometr	MPD
Piasek kalibrowany	MTD
<i>Outflow meter</i>	Czas odpływu wody
Metody mobilne – pełna blokada koła	
SRT-4	Współczynnik tarcia, RT, $p = 200$ kPa
ASTM E – 274	Skid number ST/RT (g)
LCPC Adhera	Współczynnik tarcia, $F = 2500$ N (g)
Metody mobilne – częściowa blokada koła	
Griptester	GN (grip number), $s = 15\%$, $p = 140$ kPa, $F = 85$ kg (g), ST
ASFT	Współczynnik tarcia, $s = 13\%$, $F = 1400$ N (h), RT
<i>Skiddo meter</i>	μ , $s = 17\%$, $F = 100$ N (g), $p = 140$ kPa
Metody mobilne – zmienna blokada koła	
Norsemeter Oskar	Friction number $s = 5-95\%$, $p = 207$ kPa, ST
Petra	Gliding friction force, $s = 0-100\%$, $F = 491$ N (g)
Metody mobilne – koło pomiarowe wychylone względem płaszczyzny kół napędowych pojazdu	
SCRIM (ang. <i>Sideways-force Coefficient Routine Investigation Machine</i>)	SFC (sideways friction coefficient), $\alpha = 20^\circ$, $F = 2$ kN, ST, $p = 350$ kPa
Mu-Meter	Skid number, $\alpha = 7,5^\circ$, ST, $p = 70$ kPa
Stradograph	Stradograph number, $\alpha = 12^\circ$
Odoliograph	SFC (sideways friction coefficient), $\alpha = 15^\circ$, ST, $F = 2700$ N

Legenda: F – obciążenie koła pomiarowego (h – hydrauliczne, g – grawitacyjne), ST (ang. *smooth tire*) – gładka opona RT (ang. *ribbed tire*) – opona rowkowana, PT (ang. *patterned tire*) – opona z bieżnikiem, p – ciśnienie w oponie koła pomiarowego [kPa].

Charakterystyka urządzenia CSR

Zaletą korzystania w badaniach właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni z urządzeń, w których użytkownik ma zagwarantowany dostęp do wartości generowanych przez sensory układu pomiarowego jest możliwość analizy zbioru danych, który nie jest w żaden sposób wstępnie filtrowany. W tym przypadku wykorzystano urządzenie CSR (ang. *Continuous Skid Resistance Device*) [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 wykorzystywanym do estymacji wartości współczynnika przyczepności oznaczanego na styku opona koła pomiarowego / nawierzchnia, który opisano między innymi w [11]. Wielkość wyrażono zależnością pokazaną we wzorze (1), i nadano jej nazwę CSR_i (ang. *Continuous Skid Resistance index*).

$$CSR_i = \frac{M}{r} \times \frac{1}{F} \quad (1)$$



Fot. 1. Widok od lewej: a) koło pomiarowe z dyszą układu zraszającego nawierzchnię wodą, b) stanowisko do kalibracji statycznej przetworników tensometrycznych zamontowanych w urządzeniu CSR (1 – miejsce na oponę koła pomiarowego (stolik przesuwny), 2 i 3 – tensometryczne przetworniki siły do kalibracji odpowiednio siły pionowej i momentu)



Fot. 2. Widok urządzeń a) CSR, b) ASFT T-10

w którym:

CSR_i – współczynnik przyczepności (współczynnik właściwości przeciwpoślizgowych [7], w uproszczeniu nazywany często współczynnikiem tarcia) [-],

M – rejestrowana wartość momentu [Nm],

F – rejestrowana wartość siły pionowego docisku opony do nawierzchni [N],

r – statyczne ramię momentu [cm] (wartość określona z pominięciem dynamiki ruchu pojazdu w czasie pomiarów na deformacje opony, która w przypadku urządzenia CSR jest równa 21 cm).

W odniesieniu do charakterystyki przedstawionej na rysunku 1b, w urządzeniu CSR wykorzystano koło pomiarowe przyhamowane względem kół pojazdu o 13% (tzw. ang. *Breaking Moment*). Podczas przejazdu urządzeniem, wartości parametru CSR_i wyznaczane są w odstępach co 10 cm. Tym samym, użytkownik ma możliwość przeprowadzenia umownie ciągłego pomiaru właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni jezdni. Do pomiarów wykorzystuje się oponę Unitester 520 (fot. 1a), dzięki której badania właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni można prowadzić zarówno przy ciśnieniu w kole pomiarowym równym 210 kPa (2.1 bara), jak i 700 kPa (7 bar). 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 zdjęciu 1b.

Procedura kalibracyjna polega na:

- 1) ustawieniu stanowiska pod oponą koła pomiarowego urządzenia CSR,
- 2) opuszczeniu koła pomiarowego i zadaniu docisku siłą o wartości ≤ 1400 N,
- 3) odczycie uzyskanych wartości z przetworników wzorcowych,
- 4) wymuszeniu przesuwu stolika kalibracyjnego momentu,

5) odczycie wartości momentu przy założeniu, że ramię przyłożenia siły jest stałe,

6) zarejestrowaniu wartości przez komputer pokładowy urządzenia CSR,

7) porównaniu odczytów, w przypadku jeśli wskazania sensorów różnią się o więcej niż 5% wprowadza się poprawki kalibracyjne.

Do badań porównawczych, na potrzeby opracowania zależności korelacyjnych wykorzystano urządzenie ASFT (ang. *Airport Surface Friction Tester*), którym dysponuje Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych. Jest to jedno z dostępnych na rynku urządzeń

Tabela 4. Wartości współczynników właściwości przeciwpoślizgowych uzyskane w badaniach porównawczych urządzeń CSR i ASFT (uzyskane dla ostatecznej wersji układu pomiarowego urządzenia CSR)

ASFT					CSR				
LATO									
AC_1	BCE_1	AC_2	BCE_2	BC_N	AC_1	BCE_1	AC_2	BCE_2	BC_N
0,75	0,64	0,74	0,54	0,64	0,67	0,62	0,72	0,57	0,62
0,71	0,64	0,70	0,50	0,64	0,67	0,63	0,72	0,57	0,62
0,70	0,62	0,70	0,53	0,63	0,67	0,63	0,71	0,57	0,62
0,69	0,63	0,69	0,52	0,64	0,67	0,63	0,71	0,57	0,62
0,71	0,63	0,68	0,53	0,64	0,67	0,64	0,73	0,57	0,62
0,72	0,63	0,69	0,52	0,65	0,67	0,63	0,71	0,57	0,61
0,71	0,63	0,68	0,54	0,63	0,66	0,63	0,73	0,58	0,61
0,70	0,62	0,69	0,53	0,63	0,66	0,64	0,71	0,58	0,60
0,71	0,64	0,68	0,55	0,64	0,67	0,63	0,70	0,58	0,60
0,72	0,61	0,70	0,55	0,65	0,66	0,64	0,70	0,58	0,61
JESIEŃ									
0,76	0,65			0,61	0,66	0,64			0,60
0,73	0,66			0,58	0,67	0,65			0,59
0,72	0,65			0,59	0,68	0,65			0,60
0,73	0,67			0,60	0,68	0,66			0,60
0,72	0,68			0,62	0,69	0,67			0,61
0,71	0,69	-	-	0,61	0,68	0,66	-	-	0,59
0,73	0,69	-	-	0,60	0,69	0,67	-	-	0,61
0,73	0,67	-	-	0,62	0,69	0,65	-	-	0,62
0,72	0,68	-	-	0,60	0,69	0,65	-	-	0,60
0,72	0,68	-	-	0,62	0,69	0,65	-	-	0,60

Legenda:

- AC_1 – nawierzchnia z MMA w eksploatacji (lotnisko nr 1)
- BCE_1 – nawierzchnia z betonu cementowego w eksploatacji (lotnisko nr 1)
- AC_2 – nawierzchnia z MMA w eksploatacji (lotnisko nr 2)
- BCE_2 – nawierzchnia z betonu cementowego w eksploatacji (lotnisko nr 2)
- BC_N – nowa nawierzchnia z betonu cementowego (lotnisko nr 1)

Tabela 5. Graniczne wartości średnie współczynników właściwości przeciwpoślizgowych (albo w uproszczeniu współczynników tarcia) dla urządzeń CSR (w celach porównawczych podano również wartości dla urządzenia ASFT [12])

Urządzenie pomiarowe	Opona testowa		Prędkość pomiarowa	Grubość filmu wodnego	Współczynnik tarcia		
	typ	ciśnienie			wartości projektowe dla nowych nawierzchni	wartości do planowania działań naprawczych	wartości minimalne (graniczne)
	[-]	[kPa]			[km/h]	[mm]	[-]
ASFT	T520	700	65	1,0	0,70	0,50	0,40
			95	1,0	0,60	0,40	0,32
CSR			65	1,0	0,68	0,55	0,49
			95	1,0	0,56	0,45	0,40

dopuszczonych do badań właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni lotniskowych [9]. Wykorzystano wersję na przyczepie oznakowaną symbolem T-10. Widok obu urządzeń pokazano na fotografii 2.

Badania wykonano we wszystkich porach roku. Fragment przykładowych wartości współczynników CSR_i oraz μ_{ASFT} pokazano w tabeli 4. Zestawienie dotyczy wartości generowanych przez urządzenia CSR i ASFT dla prędkości 65 km/h i z użyciem wody (strumień wody o szerokości 60 × 1 mm).

W artykule zestawienie ograniczono do prezentacji wyników badań uzyskanych podczas kampanii letniej i jesiennej. Zależności korelacyjne w tym przypadku są następujące:

- Lato: CSR_i (μ_{ASFT}) = 0,2459 + 0,6145 μ_{ASFT}, r-Pearson = 0,86, p-Value = 0,0000
- Jesień: CSR_i (μ_{ASFT}) = 0,23358 + 0,4669 μ_{ASFT}, r-Pearson = 0,72, p-Value = 0,0000

Ostatecznie, na podstawie analizy zebranych wyników badań wybranych typów nawierzchni w różnym stanie technicznym, określono wartości graniczne wymagane przez Międzynarodową Federację Lotniczą. Dla najnowszej wersji urządzenia CSR obowiązują wartości zestawione w tabeli 5.

Charakterystyka pomiarów w ruchu

Jeśli koło pomiarowe porusza się po poziomym, sztywnym torze, to nacisk na tor jest naciśkiem 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 \ddot{z} . Jeżeli by założyć, że nierówności są opisane równaniem krzywej w postaci (2)

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

to dla $x = 0$, wartość minimalna dla N wynosi (3):

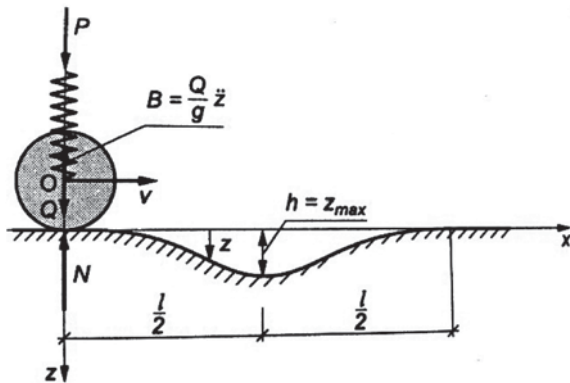
$$N_{min} = P + Q \left(1 - \frac{2\pi^2 v^2 h}{gl^2}\right) \quad (3)$$

oraz dla $x = l/2$, wartość N osiąga maksimum równe (4):

$$N_{min} = P + Q \left(1 + \frac{2\pi^2 v^2 h}{gl^2}\right) \quad (4)$$

Z punktu widzenia pomiaru wartości wskaźników właściwości przeciwpoślizgowych (np. współczynnika tarcia) warto zauważyć, że przy spełnionej nierówności, wartość

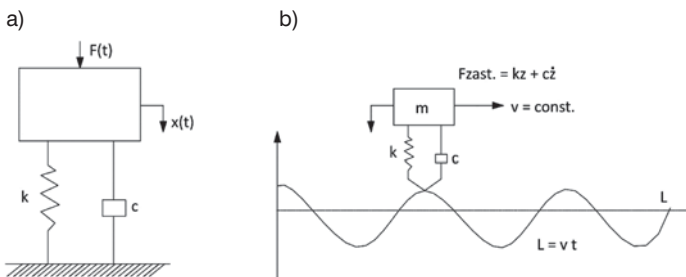
siły nacisku dynamicznego może być mniejsza od wartości siły P . To oznacza, że przy pomiarach na nawierzchni o określonych kombinacjach parametrów nierówności podłużnych i prędkości pomiarowych dochodzi do oderwania się koła od toru.



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

Charakterystyka teoretyczna modelu dynamicznego koła pomiarowego

Do rozwiązania z kołem pomiarowym dociskającym pionowo do nawierzchni, zagadnienie analizy właściwości modelu wyrażonego wzorem (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 3.

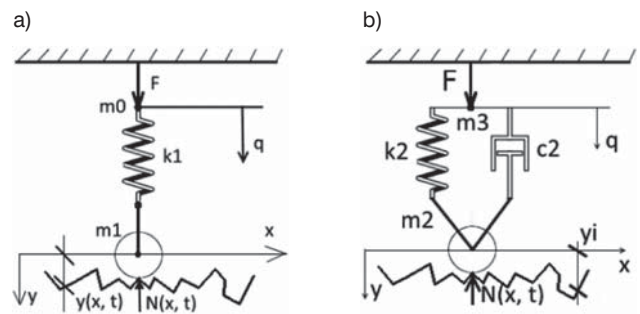


Rys. 3. Przedstawienie równoważności wymuszeń w układzie o jednym stopniu swobody: a) wymuszenie siłowe, b) wymuszenie kinematyczne

Schemat rozważanych rozwiązań ingerujących w zakres konstrukcji mechanicznej tylnego mostu urządzenia pomiarowego CSR można przedstawić jako model w układzie o jednym stopniu swobody, ale przy wykorzystaniu koncepcji modeli z połączeniem sprężystym (rysunek 4a) i lepko-sprężystym (rysunek 4b).

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 4a i 4b przyjmuje postać odpowiednio (5) lub (6).



Rys. 4. Schematy modeli testowanych układów pomiarowych w urządzeniu CSR: a) model połączenia sprężystego, b) model połączenia lepko-sprężystego

$$CSR_i = \frac{M}{N(x, t) \cdot r}, \quad (5)$$

gdzie $N(x, t) = F + m_1 g - m_1 \ddot{y} - m_0 \ddot{q}$

w którym:

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

oraz:

$$CSR_i = \frac{M}{N(x, t) \cdot r}, \quad (6)$$

gdzie $N(x, t) = F + m_2 g - m_2 \ddot{y} - m_2 \ddot{q}$

w którym:

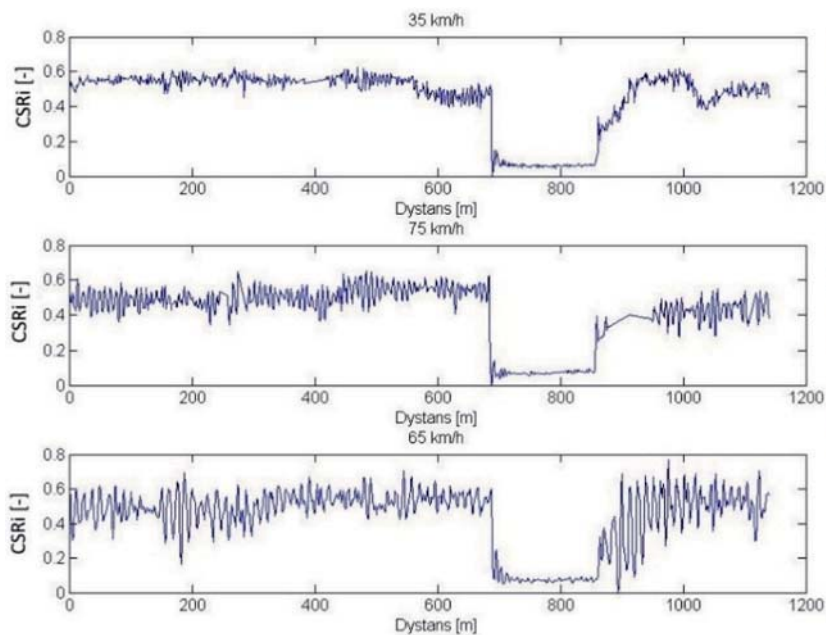
$$m_2 \ddot{q} + c_2 (\dot{q} - \dot{y}) + k_2 (q - y) = 0 \quad \text{oraz}$$

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

Sposób zachowania się poszczególnych rozwiązań w praktyce pokazano na przykładach wyników uzyskanych w kampaniach pomiarowych opisanych w skrócie podczas prezentacji wybranych wyników badań właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni w różnych warunkach.

Wyniki pomiarów dotyczące rozwiązania docisku pionowego ze sprężyną

Badania wykonano na odcinku nawierzchni o długości 130 m. W celu uzyskania pożądanej prędkości zapewniony był dodatkowy odcinek o długości 80 m. W ramach badań przewidziano odcinek o długości 20 m, na którym ułożono i przyklejono grubą folię wysmarowaną olejem roślinnym. Zabieg miał na celu symulację ekstremalnie śliskiej nawierzchni, co w następstwie pozwoli na określenie granicznych wartości dla urządzenia. Uzyskaną reakcję urządzenia CSR w odniesieniu do wartości współczynnika właściwości przeciwpoślizgowych CSR_i oznaczonych w pomiarach z różną prędkością przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Wyniki pomiarów właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni na odcinku o wyraźnie zmiennej szorstkości nawierzchni

Wyniki pomiarów dotyczące rozwiązania docisku pionowego ze sprężyną i tłumikiem

Pomiary wykonane zostały na drodze startowej z nawierzchnią asfaltową oraz na nawierzchni parkingu wykonanej z betonu cementowego. Długość odcinków pomiarowych wynosiła 100 m 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. Wartość IRI < 1.5
- pomiary na nawierzchni z betonu cementowego teksturowanego matą jutową. Wartość IRI < 3.

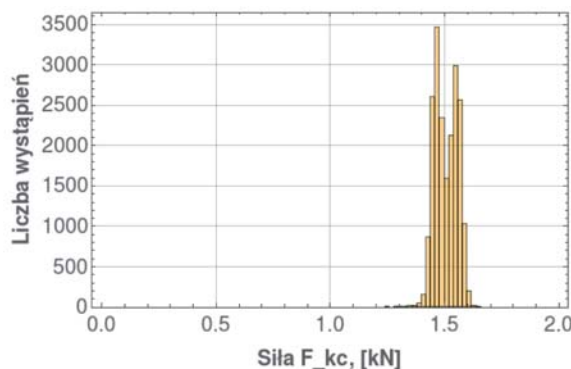
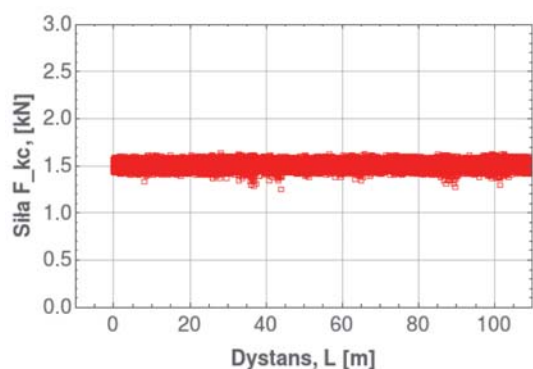
Na rysunkach 6, 7 i 8 pokazano wpływ nierówności podłużnej na zarejestrowane wartości siły pionowej. W pierwszym przypadku (rysunek 6) wykresy obrazują wyniki pomiarów na drodze startowej przy prędkości 65 km/h w warunkach „na mokro”. Na rysunku 7 zilustrowano rzeczywistą reakcję systemu na analogiczne warunki pomiarów, ale na odcinku nawierzchni z betonu cementowego. Reakcję systemu ze sprężyną zilustrowano na rysunku 8.

Dyskusja wyników

Reakcja systemu ze sprężyną nie budzi wątpliwości w przypadku badania wrażliwości na natychmiastową zmianę warunków poślizgu na nawierzchni. Na odcinku ze skrajnie dużym poślizgiem, wartość współczynnika CSRI zmieniła się z wartości 0.6 na wartość 0.1, którą należy uznać za wartość graniczną urządzenia CSR dla warunków „bardzo ślisko”.

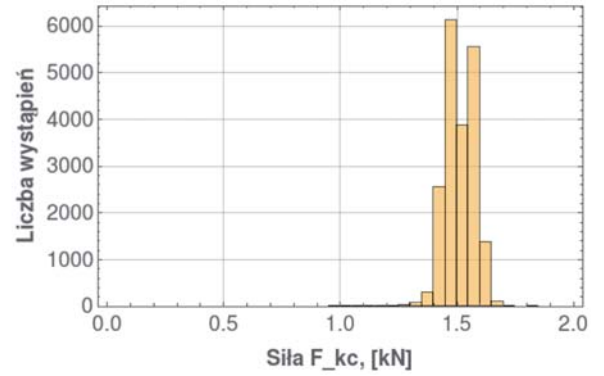
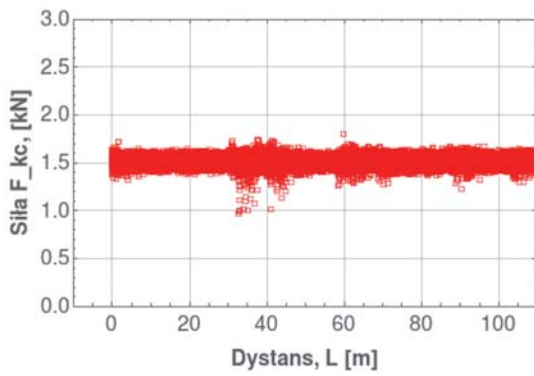
Z analizy wartości sił zestawionych na rysunkach 6, 7 i 8 wynika, że model z rozwiązaniem sprężystym (rysunek 6a) jest jednak na tyle wrażliwy, że następuje zjawisko oderwania się koła pomiarowego od toru jazdy. To oznacza, że czynniki równości podłużnej nawierzchni i sił bezwładności prowadzą w konsekwencji do ujemnych wartości współczynnika właściwości przeciwpoślizgowych, co nie jest pożądanym zjawiskiem. W przypadku modelu z tłumikiem nie zaobserwowano zjawiska oderwania się koła pomiarowego od nawierzchni.

Poddając analizie wyniki reakcji tych dwóch systemów pomiarowych na zmianę wilgotności warstwy ścieralnej, na

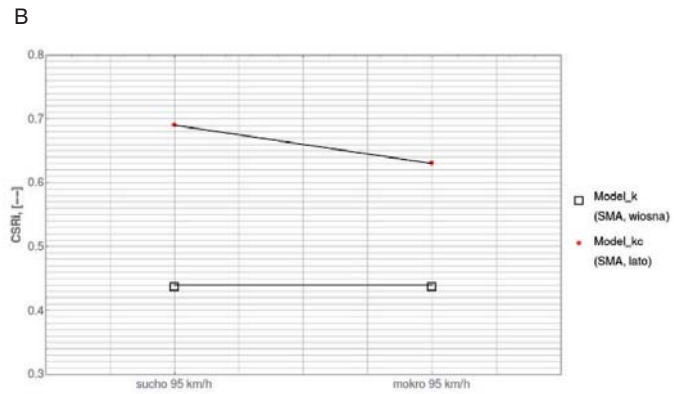
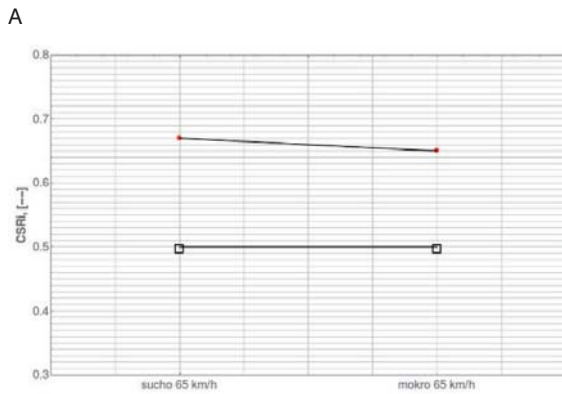
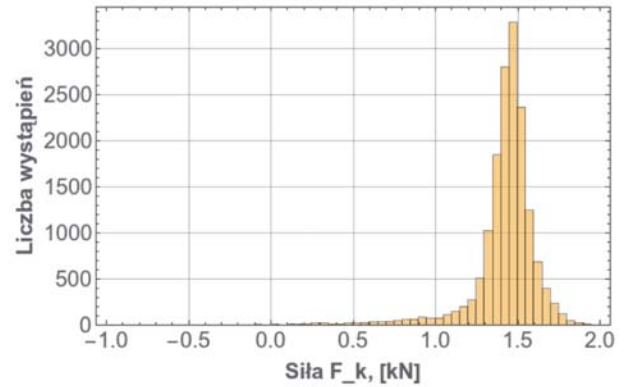
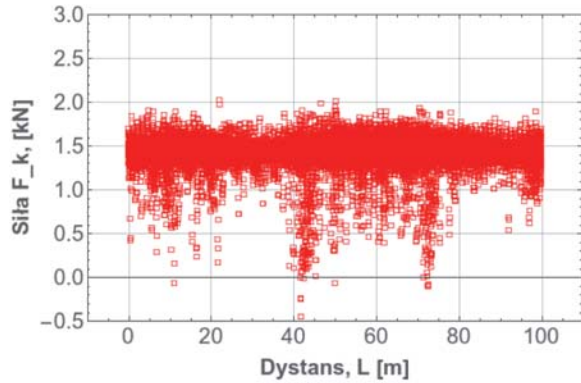


Rys. 6. Wyniki pomiarów na drodze startowej z asfaltową warstwą ścieralną ($v = 65$ km/h, „na mokro”, wykorzystano model rozwiązania CSR – zgodnie z rysunkiem 4b)

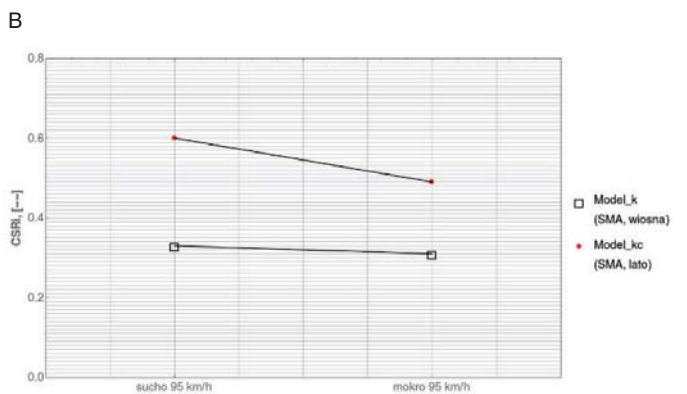
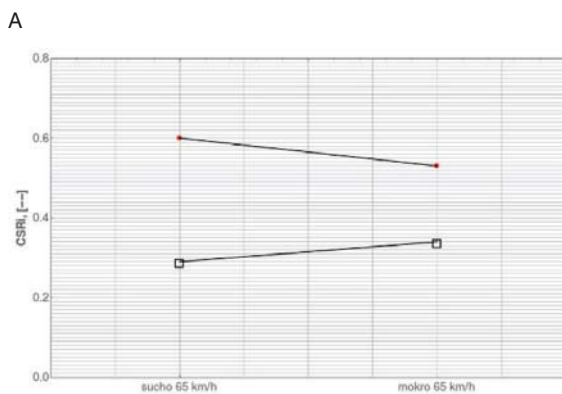
Rys. 7. Wyniki pomiarów na nawierzchni z betonu cementowego ($v = 65 \text{ km/h}$, „na mokro”, wykorzystany model rozwiązania – zgodnie z rysunkiem 4b)



Rys. 8. Wyniki pomiarów na nawierzchni z betonu cementowego ($v = 65 \text{ km/h}$, „na mokro”, wykorzystany model rozwiązania – zgodnie z rysunkiem 4a)



Rys. 9. 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



Rys. 10. Ilustracja graficzna reakcji układu pomiarowego w pomiarach „na sucho” i „na mokro” na nawierzchni z betonu cementowego: a) $v = 65 \text{ km/h}$ i b) $v = 95 \text{ km/h}$

rysunkach 9a i b pokazano reakcję obu rozwiązań na przykładzie wyników pomiaru na nawierzchni asfaltowej (model_k i model_kc oznaczają odpowiednio model sprężysty i lepko-sprężysty).

Poprzez analogię do wyników pokazanych na rysunku 9, reakcja rozwiązań dla modelu sprężystego i lepko-sprężystego pokazana jest na rysunkach 10 a i b.

Cechą charakterystyczną rozwiązania z modelem sprężystym jest reakcja układu pomiarowego podczas pomiarów z wykorzystaniem zraszania nawierzchni strumieniem wody i bez wykorzystania wody. 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 tylko dla wyników uzyskanych przy wykorzystaniu modelu z tłumikiem.

Podsumowanie

W artykule omówiono wybrane wyniki eksperymentów, który przeprowadzono z wykorzystaniem urządzenia CSR zbudowanego na potrzeby badania wartości współczynnika przyczepności wzdłużnej nawierzchni lotniskowych przy różnych prędkościach. Opisano elementy procesu doboru właściwości układów pomiarowych zastosowanych w urządzeniu CSR, które oscylowały między właściwościami modeli sprężystego i lepko-sprężystego.

Na podstawie analizy wyników zebranych podczas testów na odcinkach nawierzchni, gdzie warunki poślizgu zostały wymuszone w sposób sztuczny, analiza wyników badań dla rozwiązania ze sprężyną wykazała poprawną reakcję systemu na moment zmiany właściwości przeciwpoślizgowych badanej nawierzchni. Na odcinku ze skrajnie dużym poślizgiem, wartość współczynnika CSR i zmieniła się z wartości 0,6 na wartość 0,1, którą ostatecznie uznano za wartość graniczną urządzenia dla warunków „bardzo ślisko”.

W kolejnych badaniach nawierzchni 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 odrywania koła pomiarowego od nawierzchni. W układzie pomiarowym ograniczonym wyłącznie do reakcji sprężystej, zarejestrowane wartości siły docisku pionowego przyjmują wartości ujemne, prowadząc do ujemnych wartości współczynników właściwości przeciwpoślizgowych, co nie jest pożądanym zjawiskiem.

Ostatecznie warto podkreślić, że Urząd Lotnictwa Cywilnego nie wniósł uwag do przeprowadzonej kampanii pomiarowej zrealizowanej według zaleceń międzynarodowych organizacji lotniczych, które opisano między innymi w artykule [13]. W następstwie nie ma przeszkód, aby urządzenie mogło być brane pod uwagę przy rutynowych działaniach służb technicznych oraz dyżurnych operacyjnych na portach lotniczych w Polsce.

Tym samym warto zauważyć, że projekt urządzenia CSR umożliwia realizację takiego modelu, w którym zastosowane zostanie przyhamowanie koła pomiarowego względem kół pojazdu na poziome 18%. Takie podejście umożliwi wdrożenie urządzenia CSR również dla służb technicznych działających na potrzeby dróg publicznych.

Bibliografia

- [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, s. 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, s. 75–84
- [8] Pożarycki A., Moralewski T., Wesołowski M., *Właściwości przeciwpoślizgowe nawierzchni lotniskowych przy użyciu urządzeń ze sztucznie wymuszonym dociskiem*, „Przegląd komunikacyjny” 12/2018, s. 37–41
- [9] Załącznik 14 do Konwencji o Międzynarodowym Lotnictwie Cywilnym Lotniska, tom I, Projektowanie i eksploatacja lotnisk 2004
- [10] Diagnostyka Stanu Nawierzchni „DSN”, GDDKiA 2012 r.
- [11] Tarkowski Piotr, Pytka Jarosław J, Budzyński Piotr P, Kaznowski Łukasz, *Metoda oceny i klasyfikacji gruntowych nawierzchni lotniskowych. Eksploatacja i niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013; 15 (3): 273–278.
- [12] Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Lotniskowy, Badania porównawcze urządzenia CSR do ciągłego pomiaru współczynnika tarcia nawierzchni lotniskowych według wytycznych międzynarodowych organizacji lotniczych, Raport nr 3/24/19, Warszawa 2019.
- [13] Iwanowski Paweł, Blacha Krzysztof, Wesołowski Mariusz, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 356, 012002, 2018.