INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW

Zakład Diagnostyki Nawierzchni

RAPORT

z realizacji pracy TD-93 pt.:

„Aktualizacja zależności funkcyjnych w pomiarach urządzeniem SRT-3 między wartościami współczynnika tarcia uzyskiwanymi na oponach PIARC i Barum Bravuris".

Zleceniodawca: Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad

Umowa nr 3464/2013 z dnia 3.10.2013 roku

Opracowali:

mgr inż. Tomasz MECHOWSKI

mgr inż. Zbigniew MŁYNARCZYK

inż. Jacek KRZYSZTOFOWICZ

inż. Beata KRZYSZTOFOWICZ

inż. Adam KOWALSKI

Eugeniusz MAJEWSKI

Radosław BORUCKI

Artur GRĄCZEWSKI

Jacek KUSIAK

Kierownik Zakładu

Diagnostyki Nawierzchni

mgr inż. Tomasz MECHOWSKI

Warszawa, grudzień 2013

Spis treści

1 Podstawa i zakres pracy 7

2 Wprowadzenie 7

3 Wytypowanie drogowych odcinków badawczych o różnych właściwościach przeciwpoślizgowych 10

4 Pomiary współczynnika tarcia 14

5 Badania tekstury nawierzchni metodą profilometryczną 15

6 Wstępna ocena wyników pomiarów współczynnika tarcia i tekstury nawierzchni odcinków badawczych 17

7 Ocena korelacji współczynnika tarcia i tekstury nawierzchni 23

8 Analiza zmienności współczynnika tarcia nawierzchni w funkcji prędkości pomiarowej 26

9 Opracowanie funkcji przeliczeniowych między oponami PIARC i Barum 29

10 Ocena zużycia opony PIARC i określenie jej wydajności pomiarowej 36

11 Określenie zasad przeliczania wyników pomiarów w badaniach oponą PIARC na wartości wymagań zawartych w polskich przepisach technicznych 37

12 Wnioski z przeprowadzonych prac i analiz 48

Spis ilustracji

Rysunek 1 ***Opony stosowane w pomiarach współczynnika tarcia nawierzchni:*** 8

Rysunek 2 ***Opony rowkowane PIARC użyte do badań*** 10

Rysunek 3 ***Opony stosowane w pomiarach*** 15

Rysunek 4 ***Ilustracja procedury wyznaczenia wartości MPD*** 16

Rysunek 5 ***Urządzenie SPDE - pomiar m.in. tekstury nawierzchni*** 16

Rysunek 6 ***Wyniki pomiarów współczynnika tarcia – prędkość 30 km/h*** 20

Rysunek 7 ***Wyniki pomiarów współczynnika tarcia – prędkość 60 km/h*** 20

Rysunek 8 ***Wyniki pomiarów współczynnika tarcia – prędkość 60 km/h*** 21

Rysunek 9 ***Wyniki pomiarów współczynnika tarcia – prędkość 60 km/h*** 21

Rysunek 10 ***Współczynnik tarcia a tekstura nawierzchni – prędkość 30 km/h*** 23

Rysunek 11 ***Współczynnik tarcia a tekstura nawierzchni – prędkość 60 km/h*** 23

Rysunek 12 ***Współczynnik tarcia a tekstura nawierzchni – prędkość 90 km/h*** 23

Rysunek 13 ***Współczynnik tarcia a tekstura nawierzchni – technologia BA (90 km/h)*** 24

Rysunek 14 ***Współczynnik tarcia a tekstura nawierzchni – technologia BC (90 km/h)*** . 25

Rysunek 15 ***Współczynnik tarcia a tekstura nawierzchni – technologia PU (90 km/h)*** 25

Rysunek 16 ***Zmienność współczynnika tarcia w funkcji prędkości, dla uśrednionych wartości współczynnika tarcia ze wszystkich odcinków badawczych*** 26

Rysunek 17 ***Zmienność współczynnika tarcia w funkcji prędkości, dla poszczególnych technologii warstwy ścieralnej – opona Barum Bravuris*** 27

Rysunek 18 ***Zmienność współczynnika tarcia w funkcji prędkości, dla poszczególnych technologii warstwy ścieralnej – opona PIARC*** 27

Rysunek 19 ***Zmienność współczynnika tarcia w funkcji prędkości, dla wszystkich odcinków badawczych – opona Barum Bravuris*** 28

Rysunek 20 ***Zmienność współczynnika tarcia w funkcji prędkości, dla wszystkich odcinków badawczych – opona PIARC*** 28

Rysunek 21 ***Zależność (liniowa) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – uśrednione wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 30 km/h*** 29

Rysunek 22 ***Zależność (wielomianowa „0”) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – uśrednione wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 60 km/h*** 30

Rysunek 23 ***Zależność (potęgowa) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – uśrednione wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 90 km/h*** 30

Rysunek 24 ***Zależność (liniowa „0”) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – wszystkie wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 30 km/h*** 31

Rysunek 25 ***Zależność (potęgowa) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – wszystkie wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 60 km/h*** 31

Rysunek 26 ***Zależność (liniowa) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – wszystkie wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 90 km/h*** 32

Rysunek 27 ***Zależność (liniowa) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – uśrednione wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 60 km/h*** 33

Rysunek 28 ***Zależność (liniowa) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – uśrednione wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 90 km/h*** 34

Rysunek 29 ***Zależność (liniowa) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – wszystkie wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 30 km/h*** 34

Rysunek 30 ***Zależność (liniowa) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – wszystkie wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 60 km/h*** 35

Rysunek 31 ***Zależność (liniowa) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – uśrednione wartości dla odcinków, wszystkie prędkości pomiarowe razem*** 35

Rysunek 32 ***Zależność (liniowa „0”) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – uśrednione wartości dla odcinków, wszystkie prędkości pomiarowe razem*** 36

Spis tabel

Tabela 1 ***Wytypowane odcinki badawcze do pomiarów wstępnych*** 11

Tabela 2 ***Wyniki pomiarów na wytypowanych odcinkach badawczych*** 12

Tabela 3 ***Wyniki pomiarów współczynnika tarcia przy prędkości 30 km/h*** 17

Tabela 4 ***Wyniki pomiarów współczynnika tarcia przy prędkości 60 km/h*** 18

Tabela 5 ***Wyniki pomiarów współczynnika tarcia przy prędkości 90 km/h*** 19

Tabela 6 ***Wyniki pomiarów tekstury metodą profilometryczną*** 19

Tabela 7 ***Wyniki obliczeń współczynnika korelacji*** 24

Tabela 8 ***Wyniki obliczeń współczynnika korelacji dla różnych technologii wykonania warstwy ścieralnej*** 25

Tabela 9 ***Wyniki analizy korelacji wyników pomiarów uzyskiwanych na oponach PIARC i Barum Bravuris*** 32

Tabela 10 ***Wymagania wg [4], dla opony rowkowanej „Dębica", rozmiaru 165 R13*** .. 39

Tabela 11 ***Wymagania wg [4], dla opony PIARC – wariant 1*** 39

Tabela 12 ***Wymagania wg [4], dla opony PIARC – wariant 2*** 40

Tabela 13 ***Wymagania wg [4], dla opony PIARC – wariant 3*** 40

Tabela 14 ***Wymagania wg [3], dla opony o bieżniku „generalskim"*** 40

Tabela 15 ***Wymagania wg [3], dla opony PIARC – wariant 1*** 41

Tabela 16 ***Wymagania wg [3], dla opony PIARC – wariant 2*** 41

Tabela 17 ***Wymagania wg [3], dla opony PIARC – wariant 3*** 41

Tabela 18 ***Kryteria klasyfikacji wg [14], dla opony Barum Bravura*** 42

Tabela 19 ***Kryteria klasyfikacji wg [14], dla opony PIARC – wariant 1*** 42

Tabela 20 ***Kryteria klasyfikacji wg [14], dla opony PIARC – wariant 2*** 42

Tabela 21 ***Kryteria klasyfikacji wg [14], dla opony PIARC – wariant 3*** 43

Tabela 22 ***Wymagania wg OST, dla opony Barum Bravuris*** **wymagane przed dopuszczeniem nawierzchni do ruchu i w okresie 4 do 8 tygodni od oddania nawierzchni do eksploatacji** 43

Tabela 23 ***Wymagania wg OST, dla opony Barum Bravuris*** **wymagane na koniec okresu gwarancyjnego** 44

Tabela 24 ***Wymagania wg OST, dla opony PIARC*** **wymagane przed dopuszczeniem nawierzchni do ruchu i w okresie 4 do 8 tygodni od oddania nawierzchni do eksploatacji – wariant 1** 44

Tabela 25 ***Wymagania wg OST, dla opony PIARC*** **wymagane na koniec okresu gwarancyjnego – wariant 1** 45

Tabela 26 ***Wymagania wg OST, dla opony PIARC*** **wymagane przed dopuszczeniem nawierzchni do ruchu i w okresie 4 do 8 tygodni od oddania nawierzchni do eksploatacji – wariant 2** 45

Tabela 27 ***Wymagania wg OST, dla opony PIARC*** **wymagane na koniec okresu gwarancyjnego – wariant 2** 46

Tabela 28 ***Wymagania wg OST, dla opony PIARC*** **wymagane przed dopuszczeniem nawierzchni do ruchu i w okresie 4 do 8 tygodni od oddania nawierzchni do eksploatacji – wariant 3** 46

Tabela 29 ***Wymagania wg OST, dla opony PIARC*** **wymagane na koniec okresu gwarancyjnego – wariant 3** 47

Spis załączników

Załącznik nr 1 Specyfikacja standardowej opony testowej do pomiaru współczynnika tarcia nawierzchni: Testowa opona rowkowana

Załącznik nr 2A Wyniki pomiarów współczynnika tarcia na odcinkach badawczych. Opona Barum Bravuris

Załącznik nr 2B Wyniki pomiarów współczynnika tarcia na odcinkach badawczych. Opona PIARC

Załącznik nr 3 Wyniki pomiarów makrotekstury nawierzchni metodą profilometryczną

1 Podstawa i zakres pracy

Praca została wykonana na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w ramach umowy nr 3464/13 z dnia 3 października 2013 roku. Głównym celem pracy jest opracowanie zależności funkcyjnych w badaniach współczynnika tarcia urządzeniem SRT-3 między wartościami uzyskiwanymi na dotychczas stosowanej oponie Barum Bravuris oraz oponie PIARC, gładkiej z obwodowymi rowkami, która jest typowana jako nowa opona testowa.

W ramach pracy wykonano serie pomiarów współczynnika tarcia oraz makrotekstury nawierzchni. Uzyskane wyniki były podstawą do ustalenia poszukiwanych zależności funkcyjnych.

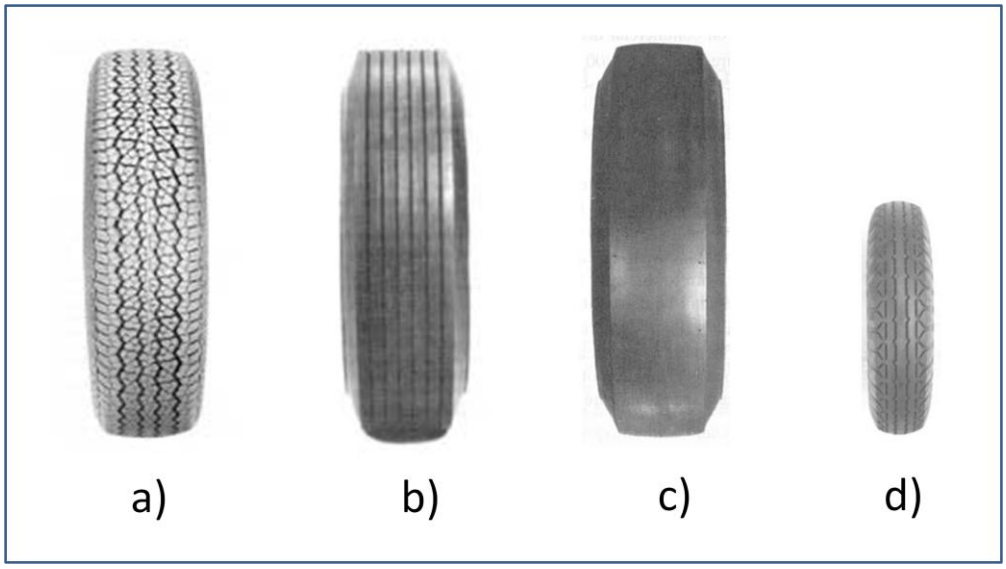
2 Wprowadzenie

Konieczność realizacji niniejszej pracy wynika z zaprzestania produkcji opon Barum Bravuris, które były wykorzystywane w badaniach współczynnika tarcia urządzeniem SRT-3. Zapas opon, zgromadzonych przez IBDiM wystarczy tylko na prace pomiarowe w 2013 roku.

Opona testowa do pomiaru współczynnika tarcia urządzeniem SRT-3 była już kilkukrotnie zmieniana [1, 2]. Polskie przepisy techniczne, w wymaganiach dotyczących właściwości przeciwpoślizgowych odnoszą się do różnych opon, co często powoduje problemy interpretacyjne, w szczególności podczas badań odbiorczych nowych nawierzchni drogowych. Na przykład w Rozporządzeniu [3] dotyczącym warunków technicznych obowiązujących dla autostrad płatnych powołano się na oponę z tzw. bieżnikiem generalskim, produkcji „Stomil" Olsztyn. Według Rozporządzenia [4] opisującego wymagania dla dróg publicznych, pomiary współczynnika tarcia należy wykonywać przy użyciu opony gładkiej, rowkowanej (na wzór opony PIARC), produkcji „Dębica". W systemie Diagnostyka Stanu Nawierzchni (DSN) [5], w pomiarach należy stosować oponę Barum Bravura, rozmiaru 185/70 R14. Obecnie, od kilku lat używana jest opona Barum Bravuris, rozmiaru 185/65 R14. Każda zmiana opony wymagała opracowania zależności funkcyjnych między opona nową a dotychczas stosowaną.

Do wykonywania pomiarów współczynnika tarcia stosowane są różne urządzenia pomiarowe. Z tym z kolei wiąże się różnorodność stosowanych opon testowych. Są to zazwyczaj opony służące tylko do pomiarów współczynnika tarcia nawierzchni drogowych i lotniskowych. Przykładowe opony pomiarowe przedstawia Rys. 1.

W Europie popularne w stosowaniu są opony zalecane przez World Road Association PIARC: rowkowana (ribbed tyre) oraz gładka (smooth tyre) rozmiaru 165 R 15. W badaniach [1, 2] prowadzonych w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów testowano już wcześniej opony testowe: bieżnikowaną ASTM 1136 oraz rowkowaną PIARC. Wnioskowano wówczas, aby w badaniach współczynnika tarcia urządzeniem SRT-3 używać oponę PIARC. Jednak ze względu na duże koszty związane z zakupem tych opon podjęto decyzję o stosowaniu opon handlowych.



Rysunek 1 ***Opony stosowane w pomiarach współczynnika tarcia nawierzchni: a) bieżnikowana ASTM E1136, b) rowkowana ASTM E 501, c) gładka ASTM E 524, d) bieżnikowana T49, wg szwedzkiej normy (źródło: [6])***

W 2013 roku, w związku z wyczerpaniem zapasu opon pomiarowych Barum Bravuris podjęto decyzję, aby od 2014 roku stosować w pomiarach współczynnika tarcia urządzeniem SRT-3 opony PIARC, z obwodowymi rowkami. Zapewni to stałą dostępność opon testowych i porównywalność wyników pomiarów z innymi jednostkami badawczymi, stosującymi tę oponę.

Opona PIARC, zarówno gładka jak i rowkowana była produkowana przez firmę Vredestein z Holandii, według specyfikacji [7] (specyfikację dołączono do niniejszego Raportu w załączniku 1). Od kilku lat opony PIARC produkuje firma z USA: Specialty Tires of America. W 2012 roku IBDiM zakupił 4 nowe opony rowkowane PIARC, z przeznaczeniem do celów badawczych. Dwie spośród tych opon wykorzystano w niniejszej pracy (Rys. 2).

Specyfikacja [7] została przygotowana przez Grupę Roboczą WG D Komitet C1 "Charakterystyki powierzchniowe" w 2004 roku. Celem jej opracowania było zapewnienie stabilności specjalnej opony testowej używanej do pomiarów współczynnika tarcia. Specyfikacje przygotowano zarówno dla opony gładkiej jak i rowkowanej. Główne informacje zawarte w tym dokumencie to:

a) materiały używane do produkcji opon – rodzaj i ilość,

b) wymiary oraz waga i tolerancje tych wielkości, budowa: opona jest rozmiaru 165R15, radialna, bezdętkowa; szerokość bieżnika wynosi 160 mm +/- 4 mm, a promień przekroju bieżnika wynosi 646 mm (+/ - 1%); opona ma nominalną szerokość 167 mm i średnicę zewnętrzna 646 mm (+/- 1%) po zamontowaniu na obręczy; **o**pona posiada 4 proste rowki szerokości 5 mm każdy, zakończone półkoliście (na dnie rowka). Każdy rowek ma jednolitą głębokość do 8 mm maksymalnie.

c) zasady kontroli jakości opon (sprawdzenie m.in. twardości, gęstości, wytrzymałości na rozciąganie); producent, na życzenie nabywcy powinien przekazać mu certyfikat jakości przekazywanej partii opon,

d) sposób przechowywania i konserwacji: poziom twardości opony będzie się stopniowo zmieniał w czasie; aby zminimalizować to zjawisko, przed wysłaniem do użytkowników i w czasie po dostarczeniu z fabryki, opony powinny być przechowywane w temperaturze -10°C; data wysyłki powinna być zapisana po obu stronach opony; po odbiorze opony przez użytkownika, należy ją zużyć w ciągu 18 miesięcy od daty wysyłki podanej na oponie; opony powinny być przechowywane w suchych warunkach atmosferycznych przy średniej temperaturze 18 +/- 3°C; poziom ozonu w miejscu przechowywania nie powinien przekraczać 5 części/108 (lub 5 MPa ciśnienie cząstkowe), a odległość od silników elektrycznych lub innych urządzeń wytwarzających ozon większa niż 9m; w miejscu składowania powinno być przytłumione oświetlenie, opony można układać nie więcej niż osiem, jedna na drugiej, płasko, na palecie,

e) zalecenia odnośnie stosowania: opona służy tylko do badania współczynnika tarcia; do transportu sprzętu pomiarowego stosować zwykłe opony bieżnikowane, nowe opony powinny być dotarte przed użyciem do badania tarcia (300 km swobodnego toczenia lub 10 km pomiarów na mokrej nawierzchni, przy poślizgu 10 do 90%); opona jest eksploatowana przy ciśnieniu nie mniej niż 150 kPa; maksymalne obciążenie wynosi 5450 N przy ciśnieniu 250 kPa; zalecane obciążenie statyczne opony powinno wynosić 3000 N, maks. 3500 N,

Korespondencja prowadzona z holenderskimi użytkownikami opon PIARC wskazuje, że opony wyprodukowane przez firmę Vredestein i w USA różnią się od siebie. Pierwszą partię nowych opon DWW (Dienst Weg-en Waterbouwkunde) zakupiło w 2010 roku. Stwierdzono znaczne różnice w stosunku do stosowanych wcześniej opon. Przeprowadzono szeroko zakrojone badania porównawcze, na różnych rodzajach nawierzchni i opracowano zależności funkcyjne pomiędzy nowymi i dotychczas stosowanymi oponami. W 2011 zakupiono nową partię opon, z tej samej serii co IBDiM. Badania nie wykazały różnic w osiąganych poziomach współczynnika tarcia w stosunku do opon z 2010 roku.

Rysunek 2 ***Opony rowkowane PIARC użyte do badań***

Oponę PIARC wykorzystuje w Europie kilka ośrodków badawczych, m.in. stosuje się je w urządzeniach: Adhera (Francja) [8], DWW Trailer (Holandia) [9], Road STAR (Austria) [10], Skiddometer BV-8 (Szwecja, Szwajcaria) [11].

3 Wytypowanie drogowych odcinków badawczych o różnych właściwościach przeciwpoślizgowych

Głównym kryterium przy wyborze odcinków badawczych była różnorodność wartości współczynnika tarcia i makrotekstury nawierzchni. Ponadto założono, że odcinki te będą zlokalizowane w granicach województwa mazowieckiego, aby ekipy pomiarowe traciły możliwie jak najmniej czasu na dojazdy do ocenianych dróg.

W wyborze odcinków pomocne były dane o wartościach miarodajnego współczynnika tarcia oraz o technologii wykonania warstwy ścieralnej, które autorzy pracy otrzymali z GDDKiA. Przekazane materiały zawierały informacje aktualne na koniec 2012 roku. Planowano wykonanie pomiarów wstępnych na 30 odcinkach, lecz dołączono jeszcze 5 odcinków, m.in. 3 wykonane w technologii betonu cementowego (spoza woj. mazowieckiego). Wykaz ocenianych dróg przedstawia Tabela 1. Każdą z technologii wykonania warstwy ścieralnej oznaczono innym kolorem i oznakowano następująco:

- BA – beton asfaltowy,
- BC – beton cementowy,
- SMA – warstwa z mieszanki SMA (mastyks grysowy),
- SS – cienka warstwa na zimno (ang.: *slurry surfacing*),
- PU – powierzchniowe utrwalenie (PPU – podwójne powierzchniowe utrwalenie).

Przyjęte kolory dla poszczególnych technologii wykonania warstwy ścieralnej stosowano również w dalszej części opracowania (w tabelach i na wykresach).

Tabela 1 ***Wytypowane odcinki badawcze do pomiarów wstępnych***

Nr odcinka	Nr drogi	Technologia	Początek	Koniec	Długość, km	Współczynnik tarcia	Klasa wg DSN
1	9	BA	24+000	30+000	6,000	0,37 ÷ 0,41	B
2	9	PPU	30+000	34+000	4,000	0,38 ÷ 0,44	B
3	48	PPU	42+500	52+000	9,500	0,28 ÷ 0,34	C/D
4	48	BA	61+000	63+000	2,000	0,53 ÷ 0,54	A
5	48	PU	72+000	78+000	6,000	0,40 ÷ 0,47	B
6	48	BA	92+000	97+000	5,000	0,52 ÷ 0,57	A
7	48	PU	114+000	117+000	3,000	0,26 ÷ 0,29	D
8	48	BA	147+000	153+000	6,000	0,26 ÷ 0,32	C/D
9	50	BA	17+000	33+000	16,000	0,38 ÷ 0,46	B
10	50	BA	65+000	72+000	7,000	0,30 ÷ 0,35	C
11	50	SMA	89+000	101+000	12,000	0,23 ÷ 0,29	D
12	50	SMA	137+000	144+000	7,000	0,33 ÷ 0,36	C
13	50	SMA	168+000	176+000	8,000	0,32 ÷ 0,34	C
14	50	BA	227+000	230+000	3,000	0,28	D
15	50	PPU	268+000	274+000	6,000	0,52	A nowy
16	50	SMA	281+000	287+000	6,000	0,39 ÷ 0,42	B
17	53	PU	89+000	94+000	5,000	0,38 ÷ 0,41	B
18	57	PU	128+000	131+300	3,300	0,43 ÷ 0,46	B
19	61	BA	174+000	185+000	11,000	0,39 ÷ 0,44	B
20	61	SMA	30+000	34+000	4,000	0,31 ÷ 0,35	C
21	61	BA	52+000	57+000	5,000	0,31 ÷ 0,34	C
22	61	BA	78+000	85+000	7,000	0,30 ÷ 0,34	C
23	61	SS	85+000	92+000	7,000	0,52	A nowy
24	61	BA	94+000	111+000	17,000	0,39 ÷ 0,43	B
25	62	BA	138+000	147+000	9,000	0,42 ÷ 0,48	B
26	62	SMA	150+000	160+000	10,000	0,37 ÷ 0,42	B
27	62	SMA	184+000	190+000	6,000	0,34 ÷ 0,36	C
28	62	SMA	200+000	217+000	17,000	0,52	A nowy

29	62	BA	265+000	285+000	20,000	0,52	A nowy
30	79	BA	31+000	37+000	6,000	0,30 ÷ 0,31	C
31	79	BA	72+000	79+000	7,000	0,21 ÷ 0,25	D
32	79	BA	112+000	116+000	4,000	0,25 ÷ 0,28	D
33	S8	BC	399+000	400+500	1,500	?	?
34	S8	BC	377+500	379+500	2,000	?	?
35	S8	BC	341+000	342+500	1,500	?	?

W pierwszej kolejności wykonywano pomiary współczynnika tarcia nawierzchni. Z odcinka pomiarowego wybierano sekcję długości 1 km, na którym prowadzono badania z częstotliwością co 50 m, z prędkością 60 km/h. Zwracano uwagę, aby wybrana sekcja była odcinkiem o jednorodnej powierzchni (bez łat), na którym pomiary można wykonywać w sposób niezakłócony. Sprawdzano również czy w pobliżu znajduje się miejsce, w którym można zaparkować urządzenie SRT-3 w celu zmiany opon i zatankowania wody. Pomiary współczynnika tarcia wykonywano w dniach: 9 – 21 października. Wyniki badań dołączono na płycie CD, a wartości średnie i odchylenia standardowe zestawiono w Tabeli 2.

W drugiej kolejności na wybranych sekcjach, o długości 1 km, wykonano pomiary makrotekstury metodą profilometryczną [1]. Badania makrotekstury prowadzono w dniach: 23 października – 4 listopada. Wyniki pomiarów dołączono na płycie CD, a wartości średnie i odchylenia standardowe zestawiono w Tabeli 2.

Tabela 2 ***Wyniki pomiarów na wytypowanych odcinkach badawczych***

Nr odcinka	Nr drogi	Technologia	Początek pomiarów	Współczynnik tarcia		Tekstura MPD, mm	
				średnia	odch. st.	średnia	odch. st.
1	9	BA	26,000	0,388	0,021	0,52	0,06
2	9	PPU	30,200	0,402	0,013	0,80	0,19
3	48	PPU	46,000	0,422	0,053	0,44	0,12
4	48	BA	61,000	0,527	0,031	0,93	0,24
5	48	PU	76,300	0,469	0,032	1,26	0,23
6	48	BA	93,000	0,470	0,018	0,60	0,06
7	48	PU	115,000	0,283	0,040	0,68	0,27
8	48	BA	147,200	0,416	0,034	0,51	0,12
9	50	BA	31,100	0,475	0,021	0,58	0,06
10	50	BA	71,300	0,414	0,018	0,69	0,12

11	50	SMA	89,100	0,284	0,021	0,88	0,16
12	50	SMA	141,000	0,354	0,026	0,87	0,14
13	50	SMA	169,700	0,362	0,010	0,85	0,10
14	50	BA	228,800	0,351	0,040	0,74	0,13
15	50	PPU	271,100	0,424	0,027	0,96	0,19
16	50	SMA	281,000	0,422	0,009	0,95	0,14
17	53	PU	90,000	0,417	0,043	0,40	0,12
18	57	PU	130,000	0,404	0,038	0,84	0,20
19	61	BA	181,000	0,383	0,029	0,69	0,12
20	61	SMA	brak danych – liczne łaty na odcinku				
21	61	BA	52,600	0,339	0,017	0,38	0,05
22	61	BA	78,500	0,335	0,008	0,76	0,07
23	61	SS	85,200	0,486	0,021	0,83	0,12
24	61	BA	96,300	0,403	0,026	0,76	0,10
25	62	BA	145,200	0,449	0,015	0,66	0,08
26	62	SMA	157,500	0,417	0,012	0,86	0,10
27	62	SMA	188,700	0,354	0,017	0,82	0,15
28	62	SMA	216,000	0,447	0,015	0,78	0,12
29	62	BA	267,300	0,392	0,033	0,58	0,15
30	79	BA	32,300	0,323	0,017	0,50	0,05
31	79	BA	75,000	0,275	0,029	0,38	0,11
32	79	BA	112,150	0,303	0,012	0,67	0,06
33	S8	BC	399,000	0,444	0,010	0,82	0,10
34	S8	BC	378,500	0,459	0,009	1,16	0,12
35	S8	BC	341,000	0,416	0,034	0,30	0,11

Na podstawie wyników pomiarów wytypowano 14 odcinków do badań szczegółowych na oponach Barum i PIARC (w Tabeli 2 oznaczone kolorem żółtym). W wyborze kierowano się założeniem, że odcinki będą reprezentowały różne technologie wykonania warstwy ścieralnej oraz charakteryzowały się możliwie niskim odchyleniem standardowym wartości pomiarów współczynnika tarcia. Ponieważ wykonane badania nie potwierdziły wysokich wartości współczynnika tarcia, na odcinkach, na których się ich spodziewano (na podstawie danych dla woj. mazowieckiego) więc postanowiono w dalszej części pracy poszukać takich odcinków dróg, aby uzupełnić zestaw ocenianych dróg o piętnasty odcinek.

4 Pomiary współczynnika tarcia

Badania szczegółowe współczynnika tarcia, na oponach PIARC i Barum Bravuris wykonano w dniach: 25 października – 7 listopada. Podczas pomiarów napotkano na kilka problemów związanych z wytypowanymi odcinkami. Pomiędzy datami wykonania badań wstępnych i szczegółowych na dwóch odcinkach dokonano zmian stanu powierzchni. Warstwę ścieralną odcinka 31 sfrezowano a na odcinku 32 wykonano zabieg utrzymaniowy. Odcinek 31 zastąpiono w dalszej części prac odcinkiem 7 (DK-48, km 115+000) a odcinek 32 odcinkiem 37 (DK-7, km 396+000, lewy kierunek). Jako ostatni odcinek, o wysokim współczynniku tarcia wybrano odcinek 36, na drodze DK-79, km 49+800.

Ostatecznie badania prowadzono na 15 odcinkach, w 5 technologiach wykonania warstwy ścieralnej:

- BA – 5 odcinków,
- SMA – 4 odcinki,
- PU – 3 odcinki,
- BC – 2 odcinki,
- SS – jeden odcinek.

W obrębie każdego odcinka badawczego, długości 1 km, wykonano pomiary współczynnika tarcia w następującej kolejności:

1. pomiary z prędkością 90 km/h – 21 pkt (Barum Bravuris),
2. pomiary z prędkością 60 km/h – 21 pkt. x 3 serie (Barum Bravuris),
3. pomiary z prędkością 30 km/h – 21 pkt (Barum Bravuris),
4. pomiary z prędkością 90 km/h – 21 pkt (PIARC),
5. pomiary z prędkością 60 km/h – 21 pkt. x 3 serie (PIARC),
6. pomiary z prędkością 30 km/h – 21 pkt (PIARC),

W przypadku gdy odcinki badawcze były zlokalizowane blisko siebie, pierwsze pomiary wykonywano na oponie, na której kończono badania na poprzednim odcinku.

Przed przystąpieniem do pierwszej serii badań przygotowano opony pomiarowe: dwie Barum Bravuris oraz dwie PIARC. Jedna, z każdego typu opony służyła jako wzorcowa a druga jako pomiarowa. Opony zostały odpowiednio oznakowane i osadzone na felgach. Na oponach umieszczono również znaki wskazujące na miejsca, w których należy mierzyć głębokość bieżnika.

Wszystkie opony zostały dotarte przez wykonanie ponad 300 pomiarów, z prędkością 30 km/h, na odcinku o współczynniku tarcia ok. 0,60. Każdego dnia pomiarowego wykonywano kalibrację czujników siły oraz opon pomiarowych. Na koniec dnia badań mierzono głębokość bieżnika opony roboczej PIARC (w 4 przekrojach, w każdym rowku po 3 razy). Zdjęcia opon przygotowanych do pracy przedstawia Rys. 3.

Rysunek 3 ***Opony stosowane w pomiarach (po lewej opony Barum, po prawej opony PIARC, WZ – oznaczenie opony wzorcowej)***

Wyniki pomiarów współczynnika tarcia wykonanych na wszystkich 15-tu ocenianych odcinkach zestawiono w załącznikach 2A i 2B, a pliki źródłowe i wynikowe znajdują się na płycie CD.

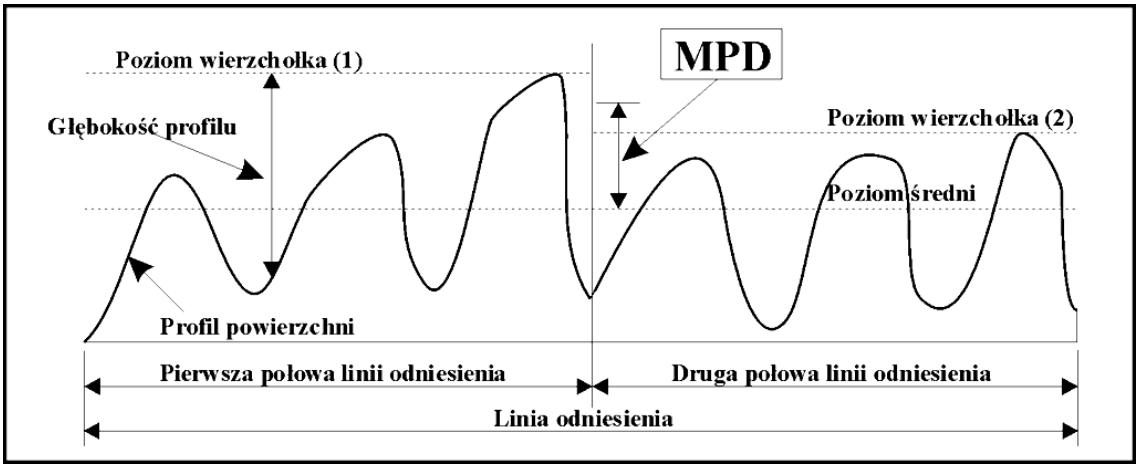
5 Badania tekstury nawierzchni metodą profilometryczną

Badania tekstury metodą profilometryczną przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 13473-1 [12]. Metoda ta wykorzystuje pomiar mikroprofilu powierzchni nawierzchni przez czujnik laserowy o dużej częstotliwości próbkowania. Otrzymany profil nawierzchni poddawany jest analizie i wyznacza się tzw. średnią głębokość profilu MPD (ang.: *Mean Profile Depth*).

Profil powierzchni definiowany jest jako dwuwymiarowe odwzorowanie nawierzchni uzyskane z pomiarów urządzeniem profilometrycznym (bazującym zazwyczaj na metodzie laserowej). Urządzenie powinno mieć minimalną rozdzielczość pomiaru pionowego 0,05 mm., natomiast częstotliwość próbkowania nie powinna być mniejsza niż 1 mm.

W metodzie profilometrycznej przyjmuje się długość linii odniesienia (ang. *baseline*), czyli długość profilu na którym wyznacza się MPD, na 100 mm. Najlepiej, gdy dla całego ocenianego odcinka wyznaczony zostanie profil nawierzchni. Zaleca się minimalną liczbę odcinków bazowych na 10 równomiernie rozmieszczonych na 100 m odcinku. Na podstawie wyznaczonego z pomiarów profilu, na długości linii odniesienia oblicza się wartość MPD według schematu przedstawionego na Rys. 4 oraz wzoru (1).

MPD = [Poziom wierzchołka (1) + Poziom wierzchołka (2)] / 2 – Poziom średni (1)



Rysunek 4 ***Ilustracja procedury wyznaczenia wartości MPD***

Mając wyznaczoną wartość MPD można obliczyć tzw. „szacowaną głębokość tekstury" ETD (ang. Estimated Teksture Depth). Parametr ten jest przybliżeniem wartości MTD uzyskiwanej w badaniu metodą objętościową. ETD oblicza się ze wzoru (2):

ETD = 0,2 mm + 0,8 MPD (2)

W niniejszej pracy zastosowano, zaprezentowane na Rys. 5, urządzenie SPDE (ang.: *System for Pavement Distress Evaluation*), które pozwala na jednoczesną rejestrację kilku cech powierzchni drogi: profilu podłużnego i poprzecznego, spadków podłużnych i poprzecznych, wielkości promieni łuków poziomych oraz tekstury nawierzchni. SPDE umożliwia również rejestrację cyfrowego obrazu powierzchni nawierzchni i występujących na niej uszkodzeń z rozdzielczością 1mmx1mm. Czujnik do pomiaru mikroprofilu powierzchni drogi umieszczony jest na belce pomiarowej, zainstalowanej z przodu samochodu, w śladzie prawego koła.

Rysunek 5 ***Urządzenie SPDE - pomiar m.in. tekstury nawierzchni***

Badania prowadzono w sposób ciągły, w prawym śladzie kół pojazdów, na każdym kilometrowym odcinku badawczym. Przy pomocy oprogramowania do analizy wyników pomiarów urządzeniem SPDE wyznaczono średnie wartości makrotekstury MPD dla 5-cio metrowych odcinków nawierzchni. Wyniki pomiarów zestawiono w załączniku 3, a pliki źródłowe i wynikowe umieszczono na płycie CD, dołączonej do niniejszego Raportu.

6 Wstępna ocena wyników pomiarów współczynnika tarcia i tekstury nawierzchni odcinków badawczych

Uzyskane z pomiarów na odcinkach badawczych wartości współczynnika tarcia i tekstury nawierzchni poddano wstępnej analizie. Dane przeniesiono z plików pomiarowych do arkusza kalkulacyjnego, sprawdzono ich kompletność i występowanie błędów. Dla każdej serii pomiarowej obliczono wartości średnie i odchylenie standardowe w celu m.in. wyeliminowania danych, które mogłyby zakłócić późniejsze wnioskowanie.

W przypadku pomiarów współczynnika tarcia, z dalszych analiz wyeliminowano pierwszą serię pomiarową na oponie PIARC, na 16 odcinku badawczym. Uzyskane wartości ($_{\mu}$śr = 0,407) znacznie odbiegały od wyników z kolejnych dwóch serii ($_{\mu}$śr = 0,453). Na odcinku 16 jako pierwsze prowadzono badania na oponie PIARC, więc prawdopodobną przyczyną był pomiar na zabrudzonej nawierzchni.

Zestawienie wartości średnich oraz odchyleń standardowych wyników pomiarów współczynnika tarcia urządzeniem SRT-3 na oponach Barum Bravuris i PIARC oraz średniej głębokości profilu MPD zawierają Tabele 3 – 6. Odcinki w tablicach zestawiono w kolejności, w jakiej wykonywano na nich badania współczynnika tarcia nawierzchni. Podstawowe statystyki wyników pomiarów współczynnika tarcia (średnia i odchylenie standardowe) przedstawiają również Rys. 6 – 8.

Tabela 3 ***Wyniki pomiarów współczynnika tarcia przy prędkości 30 km/h***

Nr odcinka	Nr drogi	Technologia	Barum Bravuris		PIARC	
			średnia	odch. stand.	średnia	odch. stand.
21	61	BA	0,526	0,020	0,438	0,025
23	61	SS	0,593	0,023	0,586	0,020
16	50	SMA	0,560	0,013	0,612	0,019
13	50	SMA	0,473	0,012	0,478	0,014
30	79	BA	0,464	0,012	0,398	0,013
36	79	BA	0,669	0,019	0,661	0,024
11	50	SMA	0,405	0,022	0,405	0,021
34	S8	BC	0,558	0,012	0,560	0,011
33	S8	BC	0,550	0,013	0,529	0,015

4	48	BA	0,606	0,042	0,551	0,023
5	48	PU	0,535	0,015	0,490	0,017
7	48	PU	0,477	0,089	0,542	0,106
2	9	PPU	0,524	0,021	0,548	0,027
1	9	BA	0,505	0,018	0,523	0,017
37	7	SMA	0,430	0,015	0,447	0,013

Tabela 4 ***Wyniki pomiarów współczynnika tarcia przy prędkości 60 km/h***

Nr odcinka	Nr drogi	Technologia	Barum Bravuris		PIARC	
			średnia	odch. stand.	średnia	odch. stand.
21	61	BA	0,435	0,012	0,350	0,010
23	61	SS	0,513	0,017	0,486	0,017
16	50	SMA	0,468	0,014	0,453	0,013
13	50	SMA	0,397	0,011	0,408	0,015
30	79	BA	0,374	0,012	0,328	0,018
36	79	BA	0,558	0,015	0,542	0,019
11	50	SMA	0,335	0,019	0,337	0,021
34	S8	BC	0,485	0,007	0,498	0,011
33	S8	BC	0,471	0,011	0,464	0,013
4	48	BA	0,540	0,014	0,477	0,015
5	48	PU	0,467	0,013	0,415	0,012
7	48	PU	0,352	0,044	0,415	0,012
2	9	PPU	0,454	0,017	0,461	0,018
1	9	BA	0,431	0,017	0,442	0,014
37	7	SMA	0,367	0,007	0,371	0,011

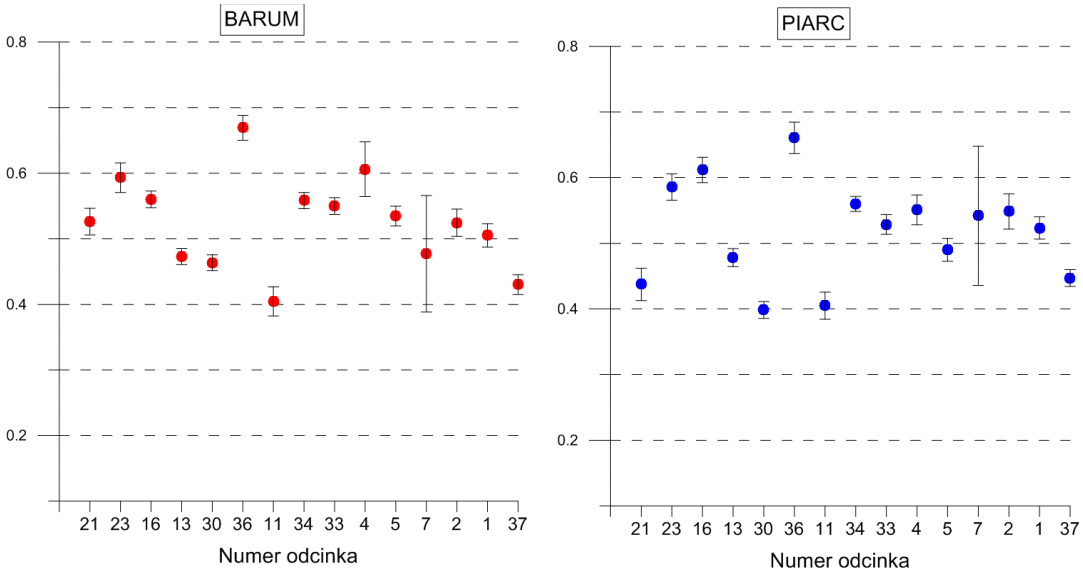
Tabela 5 ***Wyniki pomiarów współczynnika tarcia przy prędkości 90 km/h***

Nr odcinka	Nr drogi	Technologia	Barum Bravuris		PIARC	
			średnia	odch. stand.	średnia	odch. stand.
21	61	BA	0,347	0,015	0,263	0,010
23	61	SS	0,468	0,010	0,433	0,018
16	50	SMA	0,399	0,017	0,320	0,014
13	50	SMA	0,337	0,013	0,347	0,015
30	79	BA	0,306	0,025	0,266	0,017
36	79	BA	0,462	0,017	0,466	0,016
11	50	SMA	0,280	0,024	0,275	0,020
34	S8	BC	0,432	0,010	0,451	0,015
33	S8	BC	0,406	0,013	0,410	0,013
4	48	BA	0,491	0,022	0,428	0,021
5	48	PU	0,437	0,021	0,415	0,028
7	48	PU	0,325	0,029	0,261	0,031
2	9	PPU	0,394	0,020	0,389	0,016
1	9	BA	0,364	0,020	0,362	0,010
37	7	SMA	0,311	0,020	0,318	0,009

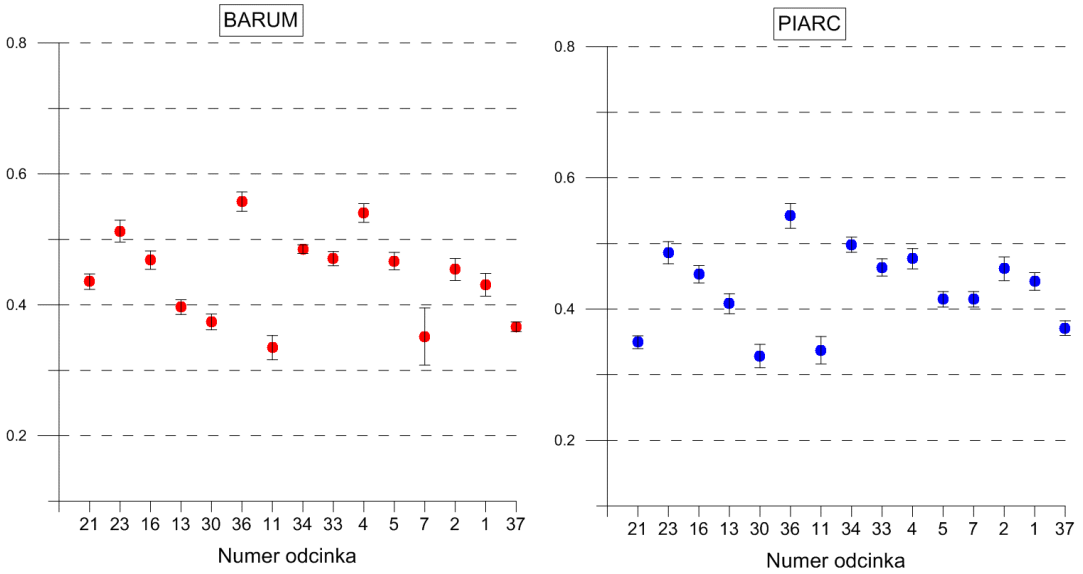
Tabela 6 ***Wyniki pomiarów tekstury metodą profilometryczną***

Nr odcinka	Nr drogi	Technologia	Tekstura MPD, mm	
			średnia	odch. stand.
21	61	BA	0,37	0,04
23	61	SS	0,81	0,08
16	50	SMA	0,80	0,08
13	50	SMA	0,85	0,09
30	79	BA	0,48	0,04
36	79	BA	0,41	0,03
11	50	SMA	0,82	0,14
34	S8	BC	1,13	0,12
33	S8	BC	0,79	0,09
4	48	BA	1,16	0,33

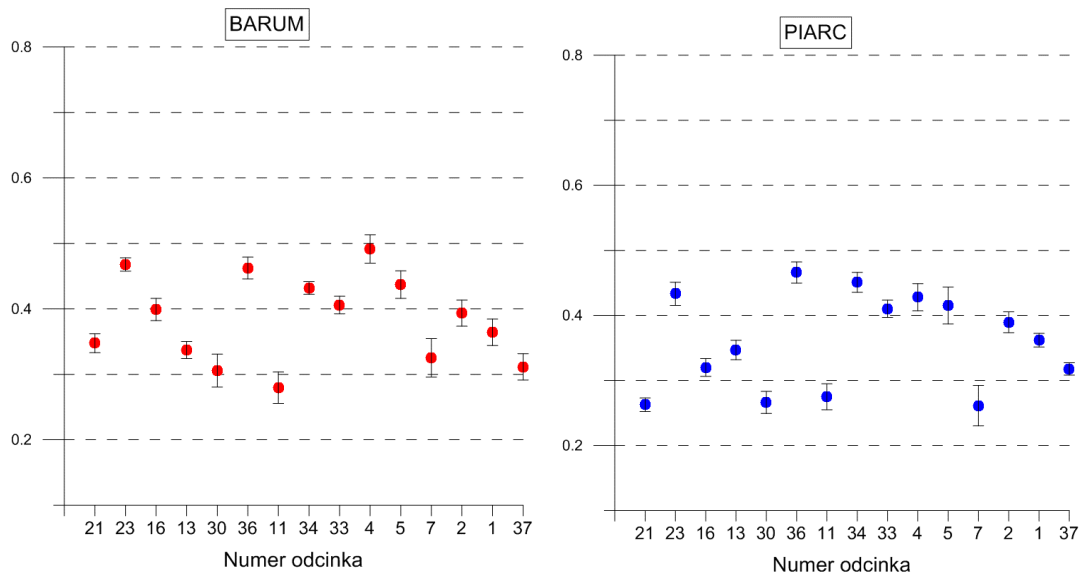
5	48	PU	1,44	0,21
7	48	PU	0,89	0,26
2	9	PPU	0,96	0,14
1	9	BA	0,51	0,06
37	7	SMA	0,83	0,11



Rysunek 6 ***Wyniki pomiarów współczynnika tarcia – prędkość 30 km/h***

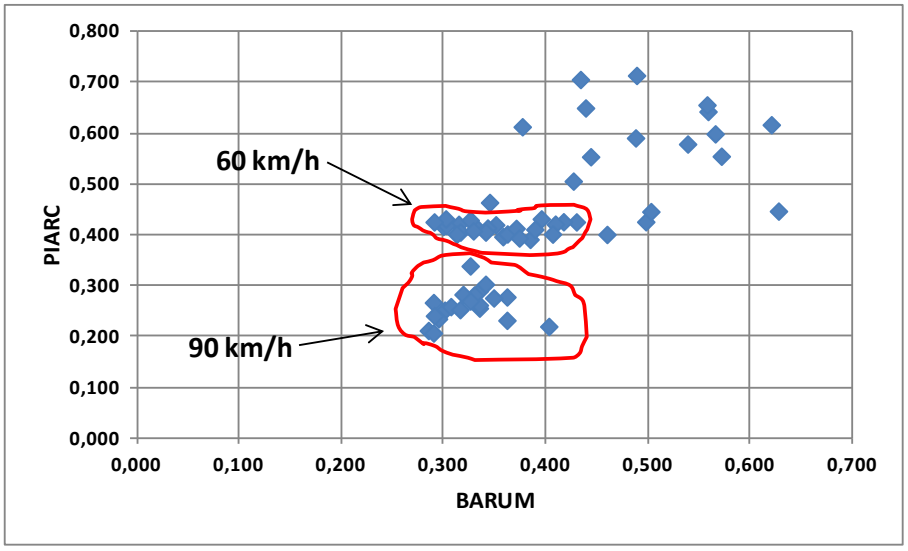


Rysunek 7 ***Wyniki pomiarów współczynnika tarcia – prędkość 60 km/h***



Rysunek 8 ***Wyniki pomiarów współczynnika tarcia – prędkość 60 km/h***

Wątpliwości budziły wyniki uzyskane na dwóch odcinkach: 7 i 21. Pierwszy z nich (nr 7 na drodze DK-48), wykonany w technologii powierzchniowego utrwalenia zastąpił odcinek z niskimi wartościami współczynnika tarcia, na którym wykonano zabieg powierzchniowy. W badaniach zasadniczych okazało się, że nawierzchnia odcinka nr 7 charakteryzuje się dużą zmiennością współczynnika tarcia, dla prędkości 30 km/h: 0,329 ÷ 0,628 na oponie Barum oraz 0,394 ÷ 0,714 na oponie PIARC. Z kolei dla prędkości 60 km/h przy zmiennych wartościach współczynników na oponie Barum: 0,291 ÷ 0,430 otrzymano praktycznie stałe wartości współczynnika na oponie PIARC: 0,391 ÷ 0,432. Jeszcze inny charakter ma zależność dla prędkości 90 km/h (Rys. 9). W dalszych analizach postanowiono zrezygnować z odcinka 7.



Rysunek 9 ***Wyniki pomiarów współczynnika tarcia – prędkość 60 km/h***

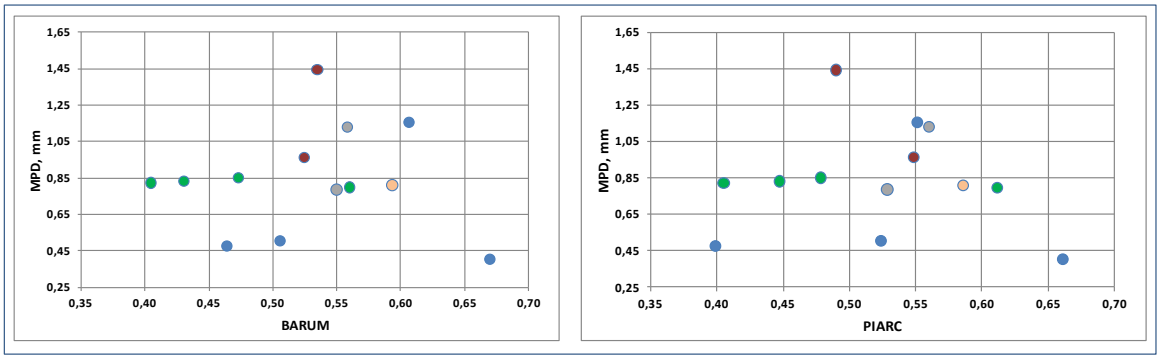
Na odcinku 21 stwierdzono znaczne różnice wyników pomiarów w serii badań wstępnych i zasadniczych. Wartości średnie z pomiarów przy prędkości 60 km/h różnią się o ok. 10 SN (0,10). Wyższe wartości uzyskano w pomiarach zasadniczych. Terminy tych badań różnią się tylko o ok. dwa tygodnie (odpowiednio: 13 i 25 października). Większość pozostałych odcinków badawczych również wykazuje różnice między badaniami wstępnymi a zasadniczymi, lecz są one znacznie mniejsze, średnio o 0,03 do 0,05. Wyników tych nie należy jednak interpretować jako brak odtwarzalności metody pomiarowej. Urządzenie rejestruje takie wartości jakie występują w czasie badania na drodze. Należy pamiętać, że pomiary rozpoznawcze (wstępne) wykonywane były bez specjalnego przygotowania, tak jak są realizowane w badaniach rutynowych (w systemie DSN/SOSN). Jeżeli na nawierzchni występują zabrudzenia, nawet w postaci kurzu, to współczynnik tarcia ma niższe wartości niż na nawierzchni czystej. W badaniach zasadniczych nawierzchnia w punktach pomiarowych została „umyta" przez kolejne serie badań. Ponadto na uzyskiwane wartości mogą mieć wpływ czynniki „sezonowości". We wnioskach z pracy [13] autorzy stwierdzają, że: istnieje duża zmienność wartości współczynnika tarcia w ciągu całego roku, na tych samych odcinkach, dochodząca nawet do 13 SN (0,13). Mniejsza zmienność wyników pomiarów jest w miesiącach: od kwietnia do października i wynosi ok. 6 SN. Występowanie różnic w wartościach współczynnika tarcia między badaniami wstępnymi i zasadniczymi na poziomie 0,10 w ciągu 2 tygodni może budzić jednak duże wątpliwości, więc w dalszych analizach postanowiono zrezygnować z odcinka 21. Przemawia za tym również fakt, że w przypadku wszystkich prędkości pomiarowych wartości uzyskane dla odcinka 21 najbardziej odbiegają od wyznaczonych funkcji regresji (funkcji przeliczeniowych PIARC – Barum).

W kolejnym kroku, dla pomiarów przy prędkości 60 km/h, wyznaczono wartości średnie z 3 serii pomiarowych (dla odcinka 16, z 2 serii), dla każdego punktu pomiarowego. W ten sposób uzyskano zbiór wyników z badań na wszystkich 13 odcinkach, dla obu opon, dla 3 prędkości pomiarowych, po 21 wartości w każdej serii.

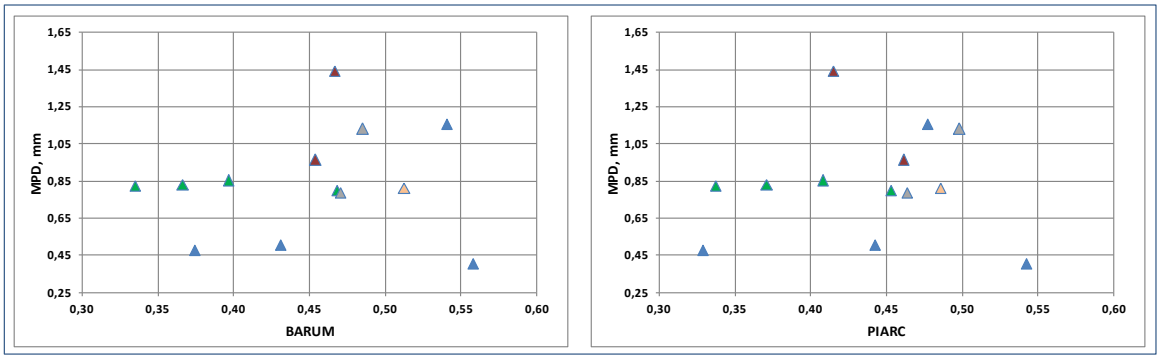
Ze zbioru wyników pomiarów tekstury nie wyeliminowano żadnych wartości. Poddano je jednak obróbce, w celu uzyskania dla każdego odcinka badawczego 21 wartości odpowiadających punktom pomiarów współczynnika tarcia. Spośród 200 wyników dla każdego odcinka badawczego wybierano tylko te, które były zlokalizowane w sąsiedztwie miejsc oceny współczynnika tarcia (10 m przed i za punktem pomiaru SRT-3). W ten sposób uzyskano wyniki badań na wszystkich 15 odcinkach, po 21 wartości.

7 Ocena korelacji współczynnika tarcia i tekstury nawierzchni

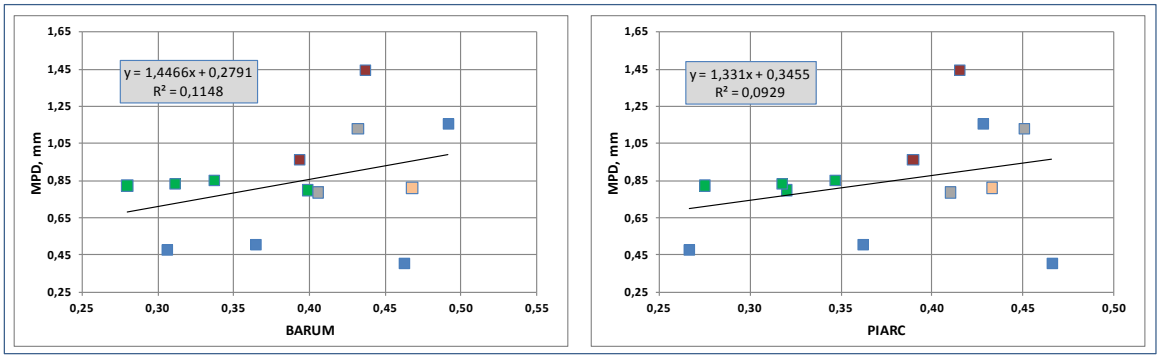
Wykorzystując wyniki przeprowadzonych pomiarów wykonano analizę zależności wartości współczynnika tarcia od wielkości tekstury mierzonej metodą profilometryczną. Zależności te przedstawiają Rys. 10 - 12. W analizach wykorzystano uśrednione wartości współczynnika tarcia i tekstury (Tabele 3 – 6).



Rysunek 10 ***Współczynnik tarcia a tekstura nawierzchni – prędkość 30 km/h***



Rysunek 11 ***Współczynnik tarcia a tekstura nawierzchni – prędkość 60 km/h***



Rysunek 12 ***Współczynnik tarcia a tekstura nawierzchni – prędkość 90 km/h***

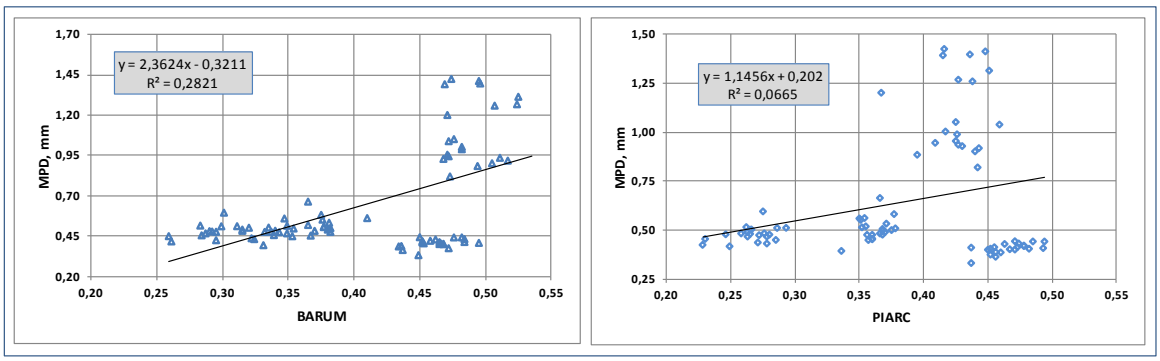
Dla wszystkich analizowanych konfiguracji uśrednionych wyników pomiarów współczynnika tarcia i tekstury obliczono współczynnik korelacji „r” i zestawiono w Tabeli 7.

Tabela 7 ***Wyniki obliczeń współczynnika korelacji***

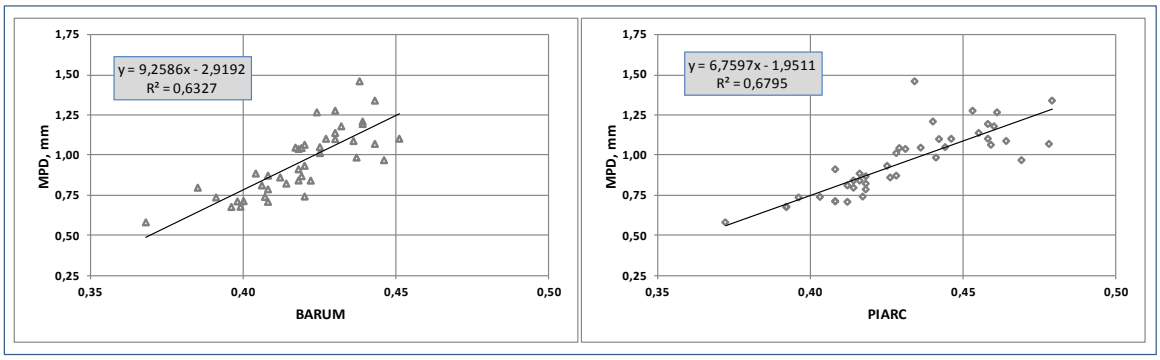
Prędkość pomiarowa, km/h	Współczynnik korelacji r	
	Barum / MPD	PIARC / MPD
30	0,02	- 0,06
60	0,15	0,05
90	0,34	0,30

Jak widać z danych na przedstawionych wykresach oraz zestawienia w Tabeli 7 brak jest ścisłej zależności wielkości współczynnika tarcia od makrotekstury nawierzchni. Otrzymane wartości współczynnika korelacji r są bardzo niskie. Wykonane testy istotności dla współczynnika korelacji, przy poziomie istotności α = 0,05, potwierdzają te obserwacje. Wszystkie oceniane współczynniki korelacji oceniono jako nieistotne. Zauważalne jest jednak, że dla prędkości 90 km/h wartość współczynnika korelacji jest znacznie wyższa niż dla niższych prędkości pomiarowych. Można stąd wysnuć wniosek, że tekstura może mieć pewien wpływ na wielkość współczynnika tarcia przy wysokich prędkościach ruchu pojazdów.

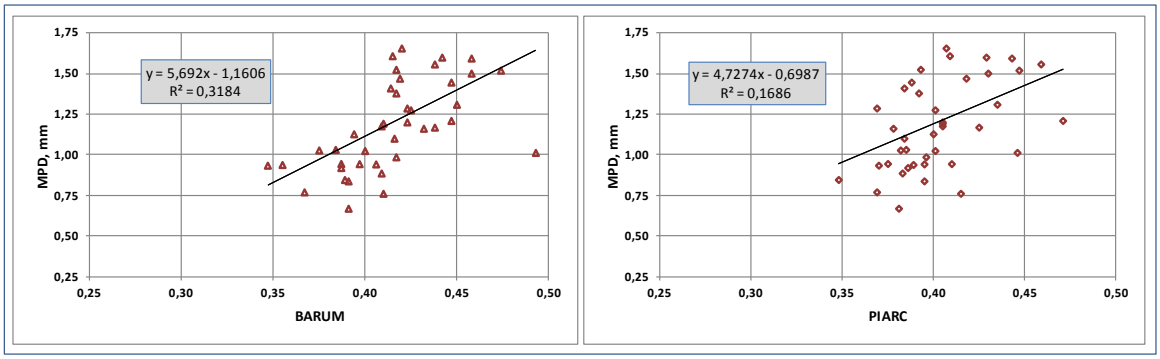
Zbadano również zależność między współczynnikiem tarcia i teksturą dla różnych technologii wykonania warstwy ścieralnej. Wyznaczone wartości współczynników korelacji oraz przeprowadzone testy istotności wskazują, że najlepszą zgodność tekstury i współczynnika tarcia otrzymano dla prędkości pomiarowej 90 km/h. W obliczeniach wykorzystano wartości tekstury i współczynnika tarcia dla wszystkich punktów pomiarowych (dla danej technologii). Wykresy liniowej funkcji regresji, dla trzech technologii, dla których uzyskano najwyższe wartości współczynnika korelacji, przy prędkości pomiarowej 90 km/h, przedstawiono na Rys. 13 - 15.



Rysunek 13 ***Współczynnik tarcia a tekstura nawierzchni – technologia BA (90 km/h)***



Rysunek 14 ***Współczynnik tarcia a tekstura nawierzchni – technologia BC (90 km/h)***



Rysunek 15 ***Współczynnik tarcia a tekstura nawierzchni – technologia PU (90 km/h)***

Współczynniki korelacji, dla wszystkich analizowanych technologii i prędkości pomiarowych, dla których uzyskano wartości istotne (w teście istotności) zestawiono w Tabeli 8.

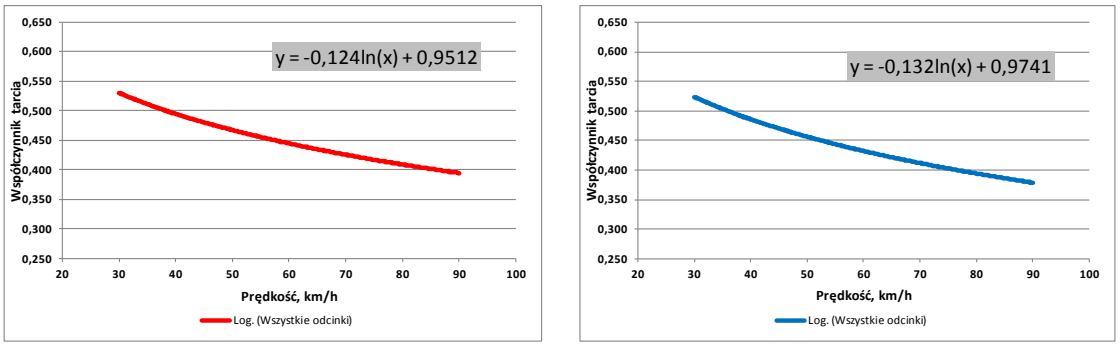
Tabela 8 ***Wyniki obliczeń współczynnika korelacji dla różnych technologii wykonania warstwy ścieralnej***

Technologia wykonania warstwy ścieralnej, prędkość pomiarowa	Współczynnik korelacji r		Ocena korelacji	
	Barum / MPD	PIARC / MPD	Barum / MPD	PIARC / MPD
BA, 90 km/h	0,53	0,26	średnia	słaba
SMA, 90 km/h	-	0,26	-	słaba
BC, 90 km/h	0,80	0,82	silna	silna
PU, 90 km/h	0,56	0,41	średnia	średnia
BA, 60 km/h	0,36	-	słaba	-
BC, 60 km/h	0,77	0,83	silna	silna
PU, 60 km/h	0,40	-0,65	słaba	średnia
BC, 30 km/h	0,38	0,74	słaba	silna
PU, 30 km/h	0,30	-0,60	słaba	średnia

Z przeprowadzonych pomiarów i obliczeń wynika, że korelacja współczynnika tarcia z teksturą, szczególnie dla prędkości 90 km/h, jest znacznie lepsza jeżeli badamy ją w odniesieniu do technologii wykonania warstwy ścieralnej. Najsilniejszą korelację uzyskano dla technologii betonu cementowego (BC), dla wszystkich trzech prędkości pomiarowych. Niższą dla technologii betonu asfaltowego (BA) i powierzchniowego utrwalenia (PU). Praktycznie nie stwierdzono korelacji dla technologii SS i SMA.

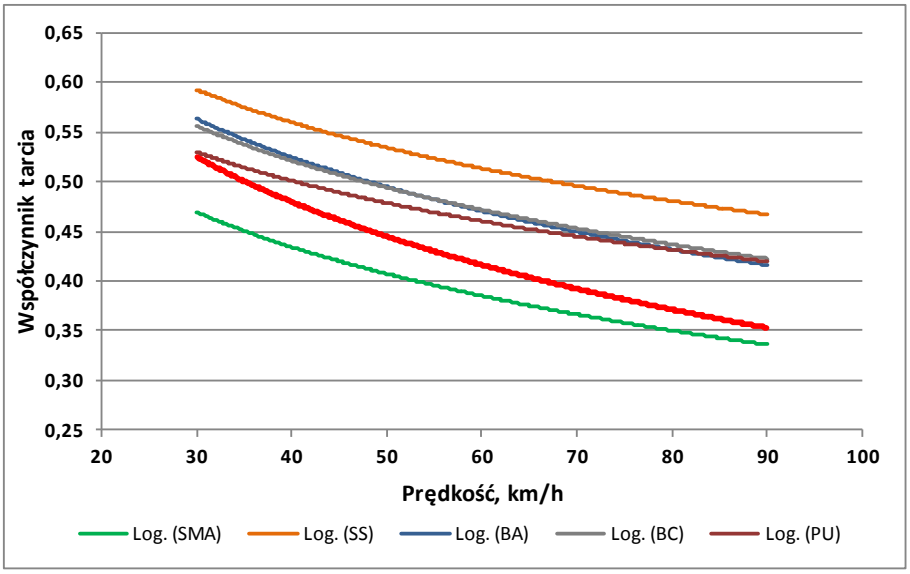
8 Analiza zmienności współczynnika tarcia nawierzchni w funkcji prędkości pomiarowej

W ocenie zmienności współczynnika tarcia w funkcji prędkości pomiarowej analizowano różne zależności funkcyjne (linie trendu). W uzyskane z pomiarów dane najlepiej „wpisuje" się funkcja logarytmiczna. Analizy zmienności prowadzono zarówno dla poszczególnych technologii (uśrednione wartości ze wszystkich odcinków w danej technologii) jak i dla poszczególnych odcinków (uśrednione wartości dla danego odcinka). Wyniki analiz przedstawiono na Rys. 16 - 20. Na Rys. 17 przedstawiono dodatkowo zmienność współczynnika tarcia w funkcji prędkości odpowiadającą wymaganiom wg Rozporządzenia [2], dla dróg klasy G.

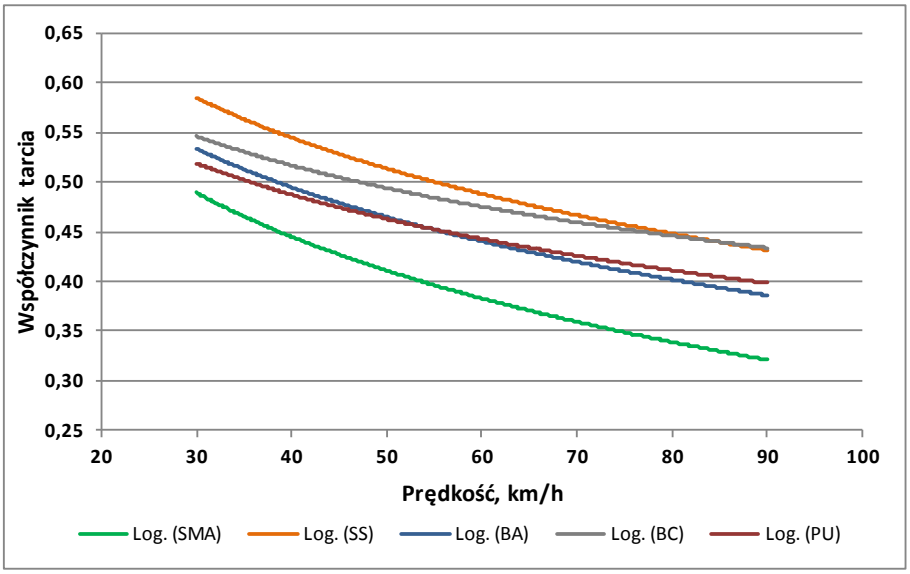


BARUM **PIARC**

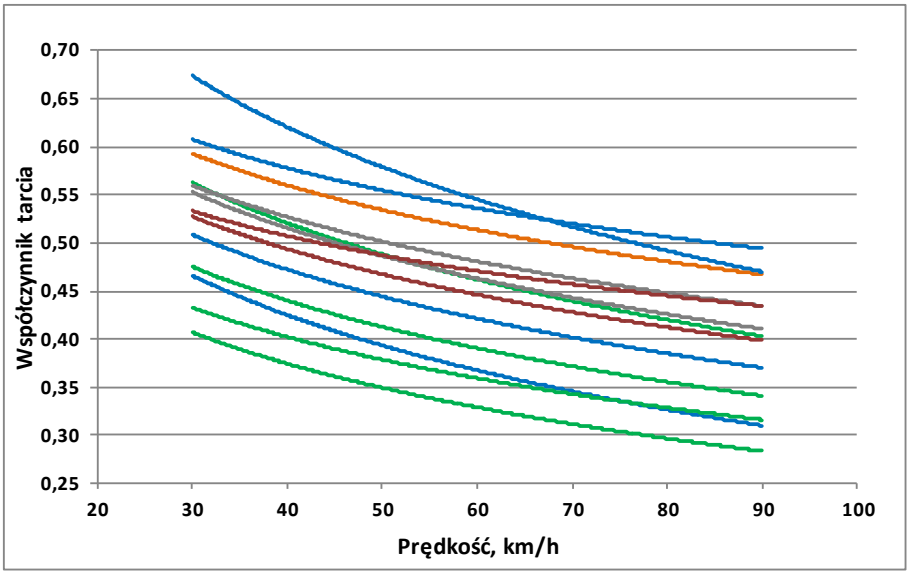
Rysunek 16 ***Zmienność współczynnika tarcia w funkcji prędkości, dla uśrednionych wartości współczynnika tarcia ze wszystkich odcinków badawczych***



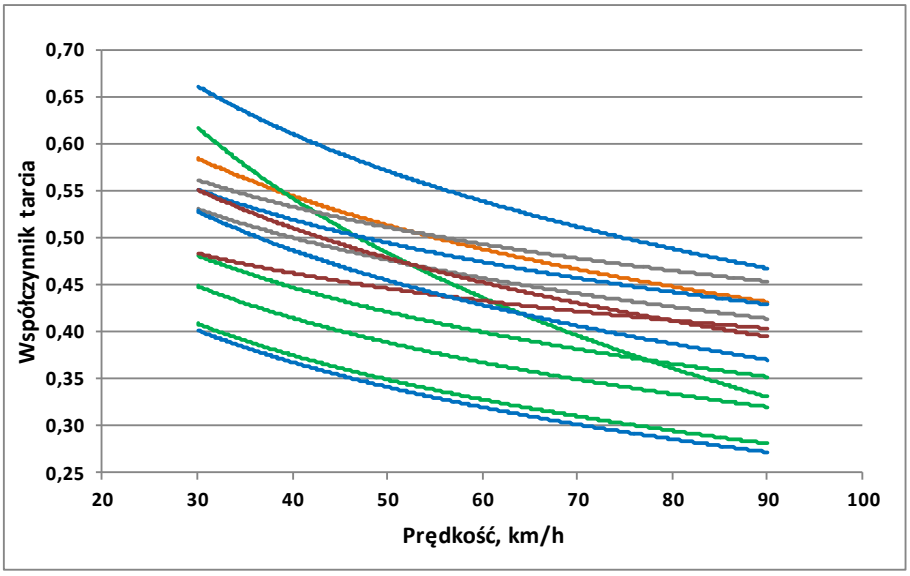
Rysunek 17 ***Zmienność współczynnika tarcia w funkcji prędkości, dla poszczególnych technologii warstwy ścieralnej – opona Barum Bravuris***



Rysunek 18 ***Zmienność współczynnika tarcia w funkcji prędkości, dla poszczególnych technologii warstwy ścieralnej – opona PIARC***



Rysunek 19 ***Zmienność współczynnika tarcia w funkcji prędkości, dla wszystkich odcinków badawczych – opona Barum Bravuris***



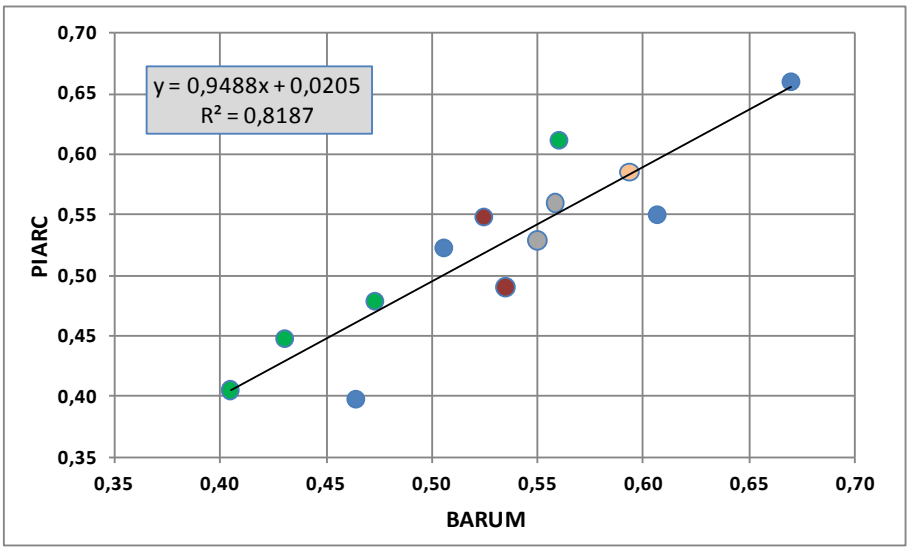
Rysunek 20 ***Zmienność współczynnika tarcia w funkcji prędkości, dla wszystkich odcinków badawczych – opona PIARC***

Nawierzchnie odcinków pomiarowych mają zbliżone charakterystyki zmienności współczynnika tarcia w funkcji prędkości pomiarowej. Dotyczy to przede wszystkim pomiarów na oponie Barum. W przypadku charakterystyk uzyskanych na oponie PIARC kilka odcinków odbiega od głównego trendu. Również charakterystyka krzywej opisującej wymagania wg Rozporządzenia [2] (Rys. 16) nieco odbiega od funkcji wyznaczonych dla ocenianych odcinków badawczych.

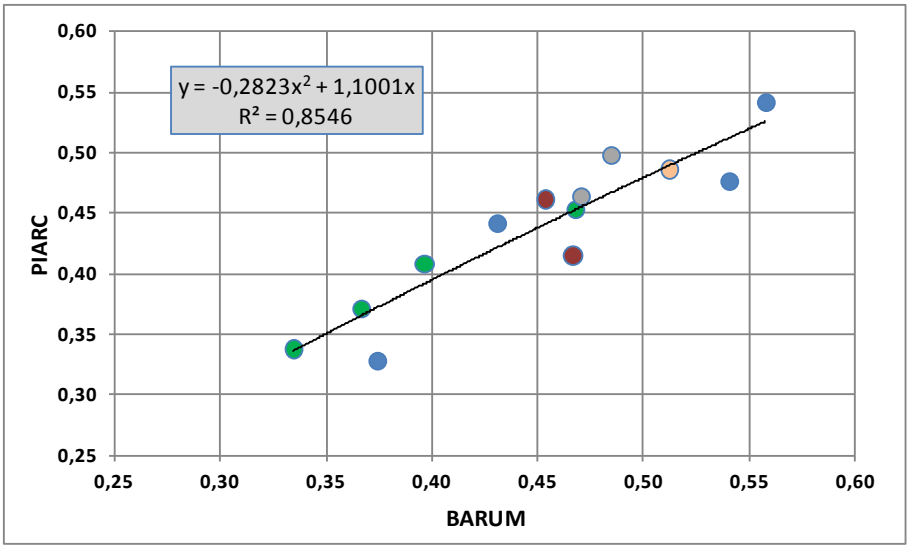
9 Opracowanie funkcji przeliczeniowych między oponami PIARC i Barum

Wykonano badanie korelacji zbioru wyników pomiarów urządzeniem SRT-3 na oponach PIARC i Barum Bravuris. Ocenę prowadzono oddzielnie dla każdej z trzech prędkości pomiarowych, przyjmując linię trendu: liniową, liniową przechodzącą przez „0", logarytmiczną, potęgową, wielomianową (wielomian 2-go stopnia), wielomianową przechodzącą przez „0" oraz wykładniczą. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że z dalszych analiz należy wykluczyć funkcje regresji: wykładniczą, wielomianową oraz logarytmiczną. Dla wartości leżących poza obszarem wyznaczonym przez wyniki pomiarów współczynnika tarcia (poniżej 0,30 i powyżej 0,55) otrzymywano wyniki znacznie odbiegające od głównego trendu.

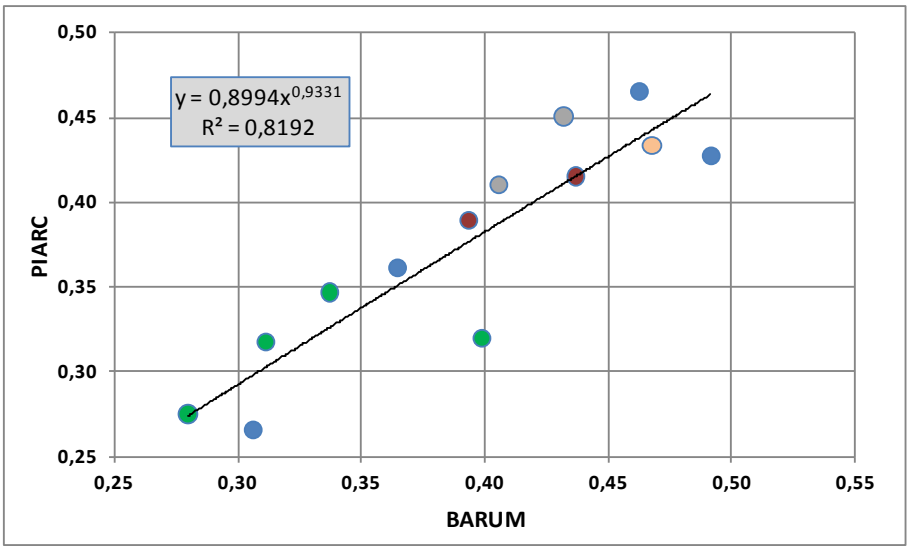
Przykłady wykresów przedstawiających analizę korelacji przedstawiają Rys. 21 - 26.



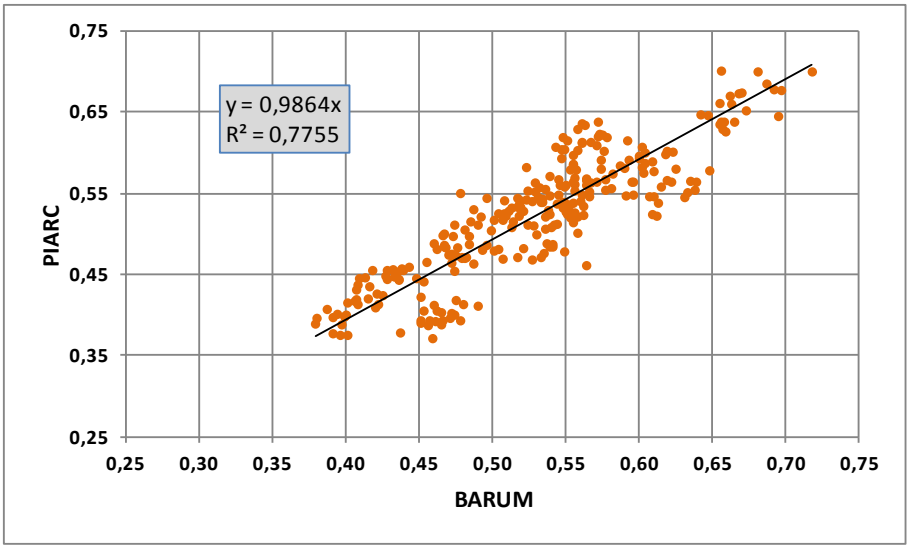
Rysunek 21 ***Zależność (liniowa) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – uśrednione wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 30 km/h***



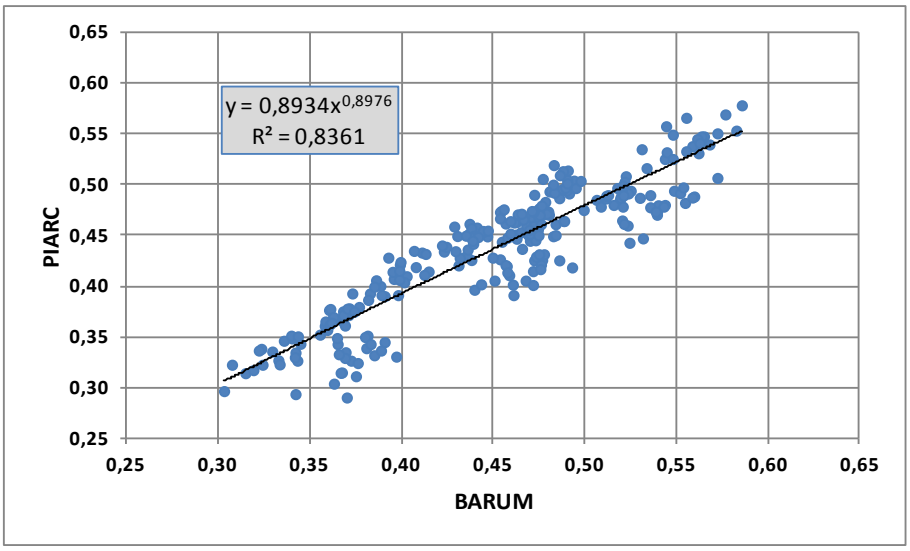
Rysunek 22 ***Zależność (wielomianowa „0”) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – uśrednione wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 60 km/h***



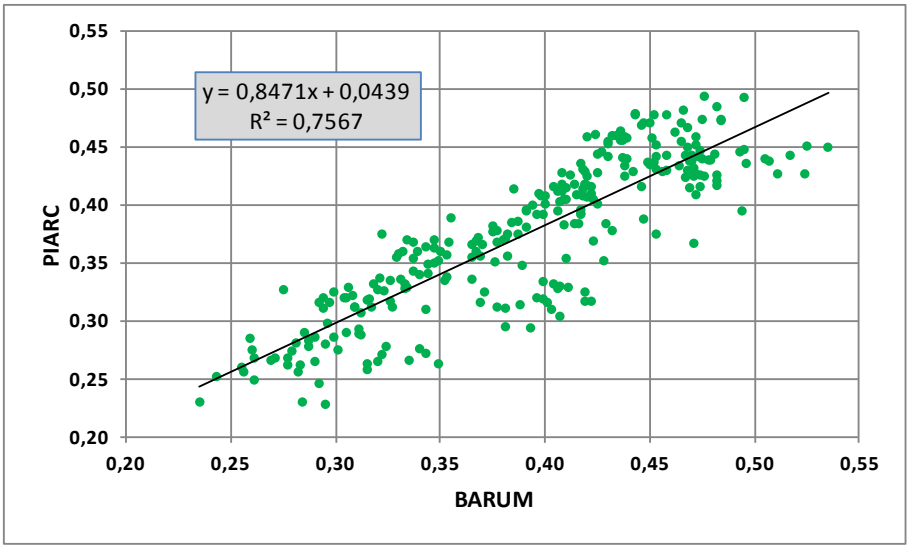
Rysunek 23 ***Zależność (potęgowa) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – uśrednione wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 90 km/h***



Rysunek 24 ***Zależność (liniowa „0”) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – wszystkie wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 30 km/h***



Rysunek 25 ***Zależność (potęgowa) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – wszystkie wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 60 km/h***



Rysunek 26 ***Zależność (liniowa) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – wszystkie wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 90 km/h***

Wyznaczone w analizach współczynniki determinacji zestawiono w Tabeli 9.

Tabela 9 ***Wyniki analizy korelacji wyników pomiarów uzyskiwanych na oponach PIARC i Barum Bravuris***

Funkcja regresji	Współczynnik determinacji R^2		
	30 km/h	60 km/h	90 km/h
Uśrednione wartości wsp. tarcia dla odcinków pomiarowych			
Liniowa	0,819	0,852	0,809
Liniowa „0”	0,817	0,837	0,803
Wielomianowa „0”	0,819	0,855	0,812
Potęgowa	0,814	0,854	0,819
Wszystkie wartości wsp. tarcia dla odcinków pomiarowych			
Liniowa	0,780	0,834	0,757
Liniowa „0”	0,776	0,820	0,744
Wielomianowa „0”	0,780	0,837	0,759
Potęgowa	0,778	0,836	0,764

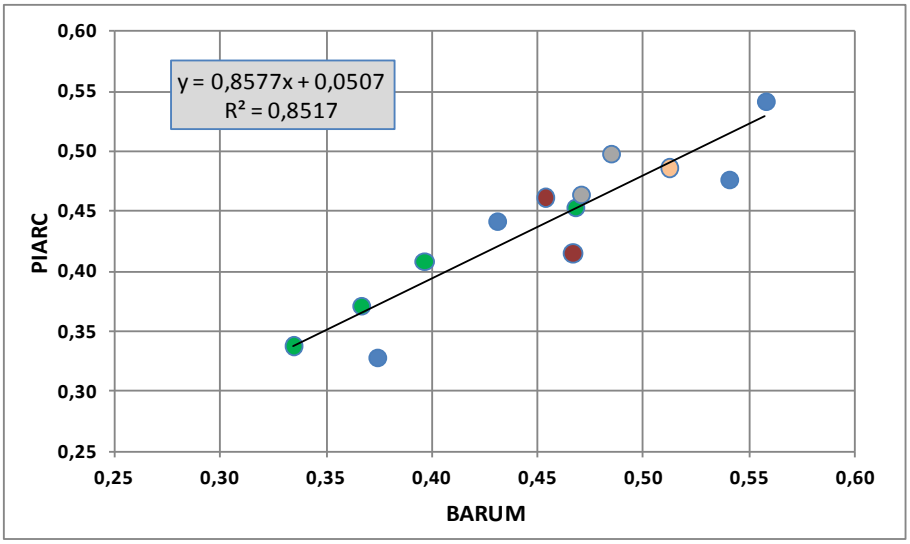
Dla wszystkich analizowanych przypadków uzyskano silną korelację wyników pomiarów na obu oponach. Ponadto uzyskane wartości R^2, niezależnie od zastosowanej funkcji regresji, są bardzo do siebie podobne. Przeanalizowano więc dodatkowo wpływ

zastosowania wyznaczonych funkcji na wielkość obliczonych wartości współczynnika tarcia (dla opony PIARC). Praktycznie identyczne wartości uzyskano dla funkcji liniowej, wielomianowej „0” oraz potęgowej, przy wszystkich trzech prędkościach pomiarowych. Oznacza to, że niezależnie od tego, którą z tych trzech funkcji zastosujemy do przeliczenia wartości współczynnika tarcia z opony Barum Bravuris na oponę PIARC otrzymamy takie same wartości.

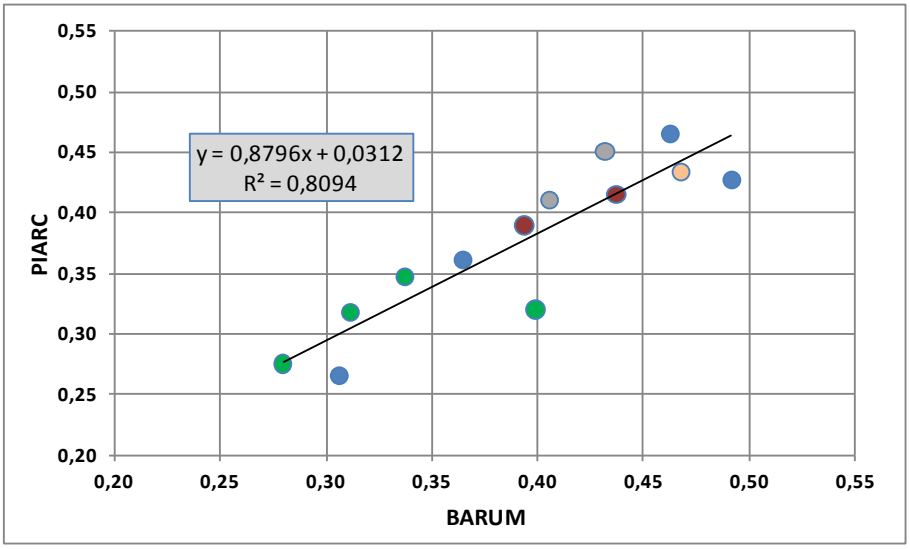
Proponuje się stosować w przeliczeniach wartości współczynnika tarcia z opony Barum Bravuris (μ_B) na oponę PIARC (μ_P) funkcję liniową:

- dla 30 km/h: $\mu_P = 0{,}949\mu_B + 0{,}020$,
- dla 60 km/h: $\mu_P = 0{,}858\mu_B + 0{,}051$,
- dla 90 km/h: $\mu_P = 0{,}880\mu_B + 0{,}031$.

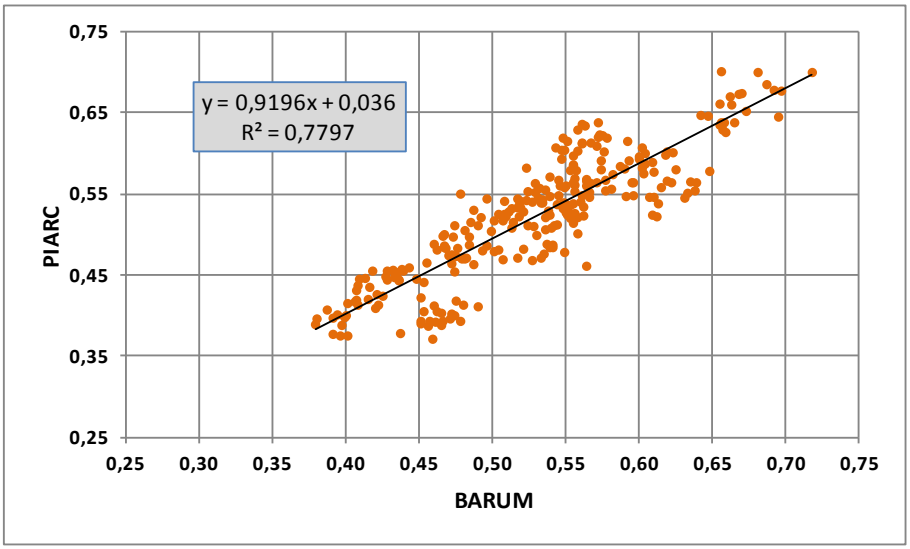
Poniżej, na Rys. 26 – 29 przedstawiono pozostałe wykresy dla zależności liniowej typu: y = ax + b, tj: uśrednionych wartości, dla prędkości 60 i 90 km/h oraz wszystkich wartości, dla prędkości 30 i 60 km/h.



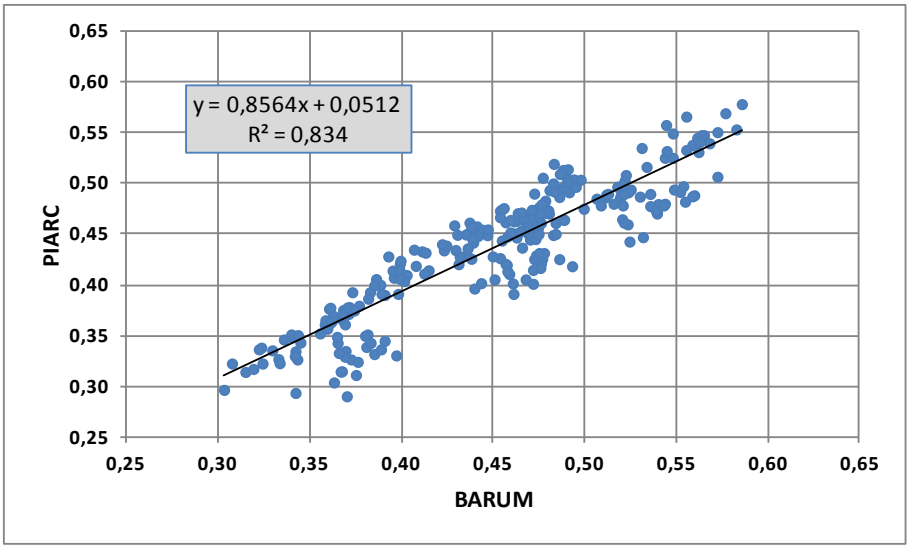
Rysunek 27 ***Zależność (liniowa) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – uśrednione wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 60 km/h***



Rysunek 28 ***Zależność (liniowa) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – uśrednione wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 90 km/h***

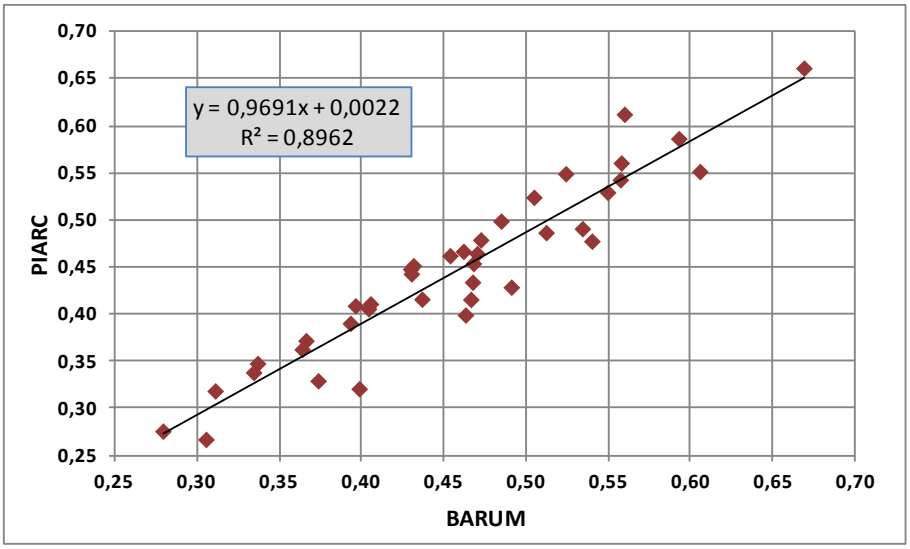


Rysunek 29 ***Zależność (liniowa) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – wszystkie wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 30 km/h***

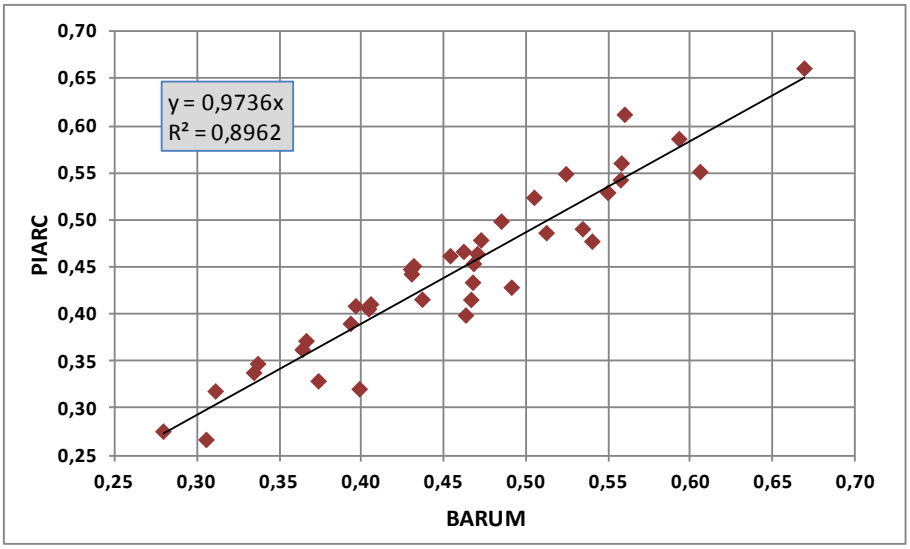


Rysunek 30 ***Zależność (liniowa) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – wszystkie wartości dla odcinków, prędkość pomiarowa 60 km/h***

Wyznaczono również funkcje regresji przy założeniu, że analizowanym zbiorem będą wszystkie pary uśrednionych wartości współczynnika tarcia, niezależnie od prędkości pomiarowej. Najwyższe wartości współczynnika determinacji otrzymano dla funkcji liniowej i liniowej „0" (Rys. 31 i 32). Współczynnik korelacji dla analizowanego zbioru wartości wyniósł r = 0,95 (bardzo silna korelacja) i był wyższy od uzyskanych dla poszczególnych prędkości pomiarowych.



Rysunek 31 ***Zależność (liniowa) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – uśrednione wartości dla odcinków, wszystkie prędkości pomiarowe razem***



Rysunek 32 ***Zależność (liniowa „0”) wyników uzyskiwanych na oponie PIARC od wyników uzyskiwanych na oponie Barum – uśrednione wartości dla odcinków, wszystkie prędkości pomiarowe razem***

10 Ocena zużycia opony PIARC i określenie jej wydajności pomiarowej

W trakcie realizacji pracy, po każdym dniu pomiarowym dokonywano oceny głębokości bieżnika opony roboczej PIARC. Pomiary głębokości wykonywano suwmiarką, z dokładnością do 0,01 mm, w 4 przekrojach, trzykrotnie w każdym rowku.

Po zakończeniu etapu docierania opony głębokość bieżnika wahała się w granicach od 7,54 mm do 7,79 mm. Po wykonaniu wszystkich pomiarów na odcinkach badawczych głębokość rowków wynosiła od 7,41 mm do 7,70 mm. Maksymalne zużycie wyniosło tylko 0,2 mm.

Pomierzono również głębokość bieżnika opony Barum Bravuris, przed i po pomiarach na odcinkach badawczych. Największe zużycie zaobserwowano w środkowym rowku bieżnika: 1,1 mm. W rowkach zewnętrznych stwierdzono mniejszą zmianę głębokości: 0,6 mm.

Pomiary zmiany głębokości bieżnika obu opon wskazują, że zużycie opony Barum Bravuris jest ok. 3-krotnie większe niż opony PIARC. Jeżeli podczas dalszej eksploatacji zachowane będzie dotychczasowe tempo zużycia opony PIARC, to jedna opona powinna wystarczyć na wykonanie kilkunastu tysięcy pomiarów. Należy jednak podchodzić do tych szacunków z dużą rezerwą. Aby w sposób wiarygodny można było ocenić „wydajność” opony należałoby wykonywać na niej pomiary, aż do momentu jej zużycia. Obserwacje powierzchni kontaktowej opony pokazują, że opona zużywa się w największym stopniu po stronie zewnętrznej a nie w środkowej, gdzie znajdują się obwodowe rowki. Można się więc spodziewać, że w dalszej części eksploatacji również w części środkowej nastąpi szybsze ścieranie gumy i zmniejszenie głębokości. Ponadto

specyfikacja [7] nie definiuje granicy, po przekroczeniu której oponę uznaje się za zużytą. W przypadku opony Barum Bravuris taką nieprzekraczalną granicą jest głębokość bieżnika wynosząca 4,5 mm. Być może w przypadku opony PIARC, ze względu na mniejszą powierzchnię odprowadzającą wodę, granica ta znajduje się na większej głębokości bieżnika, co z kolei obniżyłoby jej wydajność pomiarową.

W trakcie wykonywania badań zasadniczych na odcinkach drogowych prowadzono każdego dnia pomiarowego kalibrację czujników siły i opony pomiarowej PIARC. Jedynie dnia 5.11.13r nie kalibrowano opony PIARC ponieważ poprzedniego dnia wykonano badania tylko na jednym odcinku. Oponę Barum kalibrowano, zgodnie z instrukcją, raz na ok. 1000 pomiarów. Pliki konfiguracyjne dołączono do Raportu, na płycie CD. Skalowania czujników siły dokonywano gdy na przyczepie zainstalowana była opona Barum, a wyniki były automatycznie zapisywane w katalogu z oprogramowaniem i wynikami dla opony Barum. Plik z aktualnym skalowaniem był kopiowany do katalogu opony PIARC. Przed pomiarami na oponie PIARC wprowadzano do głównego pliku config.cfg wartości: rd (promień dynamiczny) i cofo (współczynnik zrównania opon). Wartość rd dla opony PIARC wynosi 0,308 m (dla opony Barum rd = 0,278 m) natomiast cofo był wyznaczany z pomiarów porównawczych opon: wzorcowej i roboczej, według standardowej procedury ustalonej dla urządzenia SRT-3. Pierwszy odcinek pomiarowy (odcinek nr 21) był badany przy wartościach wsp. zrównania opony 1,000, dla obu rodzajów opon. W trakcie realizacji pomiarów współczynnik ten zmieniał się i na koniec serii pomiarów na odcinkach zasadniczych wynosił: opona PIARC cofo = 1,036 a opona Barum cofo = 1,023.

11 Określenie zasad przeliczania wyników pomiarów w badaniach oponą PIARC na wartości wymagań zawartych w polskich przepisach technicznych

Jak już wspomniano wcześniej, w polskich przepisach technicznych wymagania dotyczące wartości współczynnika tarcia odnoszone są do różnych opon testowych. W niniejszym rozdziale podjęto się próby uporządkowania „sprawy opon” i opracowano kryteria oparte na pomiarach oponą rowkowaną PIARC.

Poniżej w tabelach 10 – 29 przedstawiono wymagania wg obowiązujących w Polsce przepisów oraz wymagania przeliczone do opony PIARC. Przeliczenia dokonano w trzech wariantach:

Wariant 1 – przeliczenie wykorzystujące uzyskane funkcje regresji liniowej:

- dla 30 km/h: $\mu_P = 0{,}949\mu_B + 0{,}020$,
- dla 60 km/h: $\mu_P = 0{,}858\mu_B + 0{,}051$,
- dla 90 km/h: $\mu_P = 0{,}880\mu_B + 0{,}031$.

Wariant 2 – przeliczenie wykorzystujące bezpośrednie porównanie średnich wartości pomiarów uzyskanych dla wszystkich ocenianych odcinków:

- dla 30 km/h: $\mu_P = 0{,}988\mu_B$,
- dla 60 km/h: $\mu_P = 0{,}970\mu_B$,
- dla 90 km/h: $\mu_P = 0{,}959\mu_B$.

Wariant 3 – przeliczenie wykorzystujące wyznaczoną funkcję regresji liniowej „0” dla wszystkich uśrednionych wartości współczynnika tarcia, niezależnie od prędkości pomiarowej (Rys. 32):

- dla wszystkich prędkości pomiarowych: $\mu_P = 0{,}974\mu_B$,

oznaczenia we wzorach:

μ_B – wynik pomiaru na oponie Barum Bravuris,

μ_P – wynik pomiaru na oponie PIARC.

Korzystając z podanych dla wariantu 1 zależności między wartościami uzyskiwanymi na oponach PIARC i Barum należy pamiętać, że są one prawdziwe tylko gdy stosujemy zapis współczynnika tarcia w postaci ułamka dziesiętnego. W przypadku zapisu w postaci SN (Skid Number), stosując powyższe równania otrzymamy błędne wartości.

W obliczeniach stosowano następujący sposób przeliczania wartości współczynnika tarcia na różnych oponach stosowanych w urządzeniu SRT-3:

- z opony „Stomil” Olsztyn z bieżnikiem tzw. generalskim (do której odnoszą się wymagania dla autostrad płatnych, wg [3]) na oponę rowkowaną „Dębica” (wymagania wg [4]) – mnożnik 1,377,
- z opony rowkowanej „Dębica” (do której odnoszą się wymagania dla dróg publicznych, wg [4]) na oponę bieżnikowaną Barum Bravura (klasyfikacja DSN [14]) – mnożnik 1,079,
- z opony Barum Bravura (do której odnosi się klasyfikacja DSN [14]) na oponę bieżnikowaną Barum Bravuris (opona obecnie stosowana, nowe wymagania OST) – mnożnik 1,007,
- z opony Barum Bravuris na oponę rowkowaną PIARC – przeliczenie wg formuł podanych wyżej (trzy warianty).

Przykładowo, aby wyznaczyć kryteria dla autostrad płatnych przeprowadzono następujące obliczenia: wartość kryterium dla danej prędkości i elementu nawierzchni mnożono przez 1,377 (przeliczenie z opony „Stomil” na oponę „Dębica”), wynik mnożono przez 1,079 (przeliczenie z opony „Dębica” na oponę Barum Bravura), uzyskaną z obliczeń wartość mnożono przez 1,007 (przeliczenie z opony Barum Bravura na oponę Barum Bravuris) a na koniec wynik przeliczano na oponę PIARC jednym z podanych wyżej równań (w zależności od analizowanego wariantu).

W przypadku wyznaczenia klasyfikacji wg DSN dla prędkości pomiarowej 50 km/h wykorzystano zależność funkcyjną zmiany współczynnika tarcia, na oponie Barum w funkcji prędkości pomiarowej (Rys. 16):

$$\mu_B = - 0{,}124\ln(v) + 0{,}9512,$$

gdzie:

v – wartość prędkości pomiarowej, km/h.

Rozporządzenie dla dróg publicznych [4]

Poniżej, w Tabeli 10 przedstawiono wymagania obecnie obowiązujące, a w Tabelach 11 - 13 te same kryteria, lecz przeliczone do warunków pomiarów na oponie PIARC.

Tabela 10 ***Wymagania wg [4], dla opony rowkowanej „Dębica", rozmiaru 165 R13***

Klasa drogi	Element nawierzchni	Miarodajny współczynnik tarcia			
		30 km/h	60 km/h	90 km/h	120 km/h
A	Pasy ruchu zasadniczego	0,52	0,46	0,42	0,37
	Pasy włączania i wyłączania, jezdnie łącznic	0,52	0,48	0,44	-
S, GP, G	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,48	0,39	0,32	0,30

Tabela 11 ***Wymagania wg [4], dla opony PIARC – wariant 1***

Klasa drogi	Element nawierzchni	Miarodajny współczynnik tarcia			
		30 km/h	60 km/h	90 km/h	120 km/h
A	Pasy ruchu zasadniczego	0,56	0,48	0,43	-
	Pasy włączania i wyłączania, jezdnie łącznic	0,56	0,50	0,45	-
S, GP, G	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,52	0,41	0,34	-

Tabela 12 ***Wymagania wg [4], dla opony PIARC – wariant 2***

Klasa drogi	Element nawierzchni	Miarodajny współczynnik tarcia			
		30 km/h	60 km/h	90 km/h	120 km/h
A	Pasy ruchu zasadniczego	0,56	0,48	0,44	-
	Pasy włączania i wyłączania, jezdnie łącznic	0,56	0,51	0,46	-
S, GP, G	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,52	0,41	0,33	-

Tabela 13 ***Wymagania wg [4], dla opony PIARC – wariant 3***

Klasa drogi	Element nawierzchni	Miarodajny współczynnik tarcia			
		30 km/h	60 km/h	90 km/h	120 km/h
A	Pasy ruchu zasadniczego	0,55	0,49	0,44	-
	Pasy włączania i wyłączania, jezdnie łącznic	0,55	0,51	0,47	-
S, GP, G	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,51	0,41	0,34	-

Rozporządzenie dla autostrad płatnych [3]

Poniżej, w Tabeli 14 przedstawiono wymagania obecnie obowiązujące, a w Tabelach 15 - 17 te same kryteria, lecz przeliczone do warunków pomiarów na oponie PIARC.

Tabela 14 ***Wymagania wg [3], dla opony o bieżniku „generalskim”***

Element nawierzchni	Miarodajny współczynnik tarcia			
	30 km/h	60 km/h	90 km/h	120 km/h
Pasy ruchu zasadnicze i dodatkowe, pasy awaryjne	0,45	0,38	0,32	0,27
Pasy włączania i wyłączania, jezdnie łącznic i PPO	0,46	0,40	0,35	-
Jezdnie SPO	0,43	0,35	-	-

Tabela 15 ***Wymagania wg [3], dla opony PIARC – wariant 1***

Element nawierzchni	Miarodajny współczynnik tarcia			
	30 km/h	**60 km/h**	**90 km/h**	**120 km/h**
Pasy ruchu zasadnicze i dodatkowe, pasy awaryjne	0,66	0,54	0,45	-
Pasy włączania i wyłączania, jezdnie łącznic i PPO	0,67	0,56	0,49	-
Jezdnie SPO	0,63	0,50	-	-

Tabela 16 ***Wymagania wg [3], dla opony PIARC – wariant 2***

Element nawierzchni	Miarodajny współczynnik tarcia			
	30 km/h	**60 km/h**	**90 km/h**	**120 km/h**
Pasy ruchu zasadnicze i dodatkowe, pasy awaryjne	0,67	0,55	0,46	-
Pasy włączania i wyłączania, jezdnie łącznic i PPO	0,68	0,58	0,50	-
Jezdnie SPO	0,64	0,51	-	-

Tabela 17 ***Wymagania wg [3], dla opony PIARC – wariant 3***

Element nawierzchni	Miarodajny współczynnik tarcia			
	30 km/h	**60 km/h**	**90 km/h**	**120 km/h**
Pasy ruchu zasadnicze i dodatkowe, pasy awaryjne	0,66	0,55	0,47	-
Pasy włączania i wyłączania, jezdnie łącznic i PPO	0,67	0,58	0,51	-
Jezdnie SPO	0,63	0,51	-	-

Wytyczne DSN [14]

Poniżej, w Tabeli 18 przedstawiono kryteria klasyfikacji stanu dróg krajowych obecnie obowiązujące, a w Tabelach 19 - 21 te same kryteria, lecz przeliczone do warunków pomiarów na oponie PIARC. Dodatkowo podano wartości wymagań dla prędkości pomiarowej 50 km/h, które można stosować na odcinkach przejazdu przez teren zabudowany.

Tabela 18 ***Kryteria klasyfikacji wg [14], dla opony Barum Bravura***

Klasa	Ocena stanu nawierzchni	Miarodajny współczynnik tarcia, przy prędkości 60 km/h	Miarodajny współczynnik tarcia, przy prędkości 50 km/h
A	stan dobry	≥ 0,52	≥ 0,55
B	stan zadowalający	0,37 ÷ 0,51	0,39 ÷ 0,54
C	stan niezadowalający	0,30 ÷ 0,36	0,32 ÷ 0,38
D	stan zły	≤ 0,29	≤ 0,31

Tabela 19 ***Kryteria klasyfikacji wg [14], dla opony PIARC – wariant 1***

Klasa	Ocena stanu nawierzchni	Miarodajny współczynnik tarcia, przy prędkości 60 km/h	Miarodajny współczynnik tarcia, przy prędkości 50 km/h
A	stan dobry	≥ 0,50	≥ 0,53
B	stan zadowalający	0,37 ÷ 0,49	0,39 ÷ 0,52
C	stan niezadowalający	0,31 ÷ 0,36	0,33 ÷ 0,38
D	stan zły	≤ 0,30	≤ 0,32

Tabela 20 ***Kryteria klasyfikacji wg [14], dla opony PIARC – wariant 2***

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

Tabela 21 ***Kryteria klasyfikacji wg [14], dla opony PIARC – wariant 3***

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

Nowe Ogólne Specyfikacje Techniczne (OST) GDDKiA

Poniżej, w Tabelach 22 i 23 przedstawiono wymagania według obecnie opracowywanych Ogólnych Specyfikacji Technicznych, a w Tabelach 24 - 29 te same wymagania, lecz przeliczone do warunków pomiarów na oponie PIARC.

Tabela 22 ***Wymagania wg OST, dla opony Barum Bravuris*** **wymagane przed dopuszczeniem nawierzchni do ruchu i w okresie 4 do 8 tygodni od oddania nawierzchni do eksploatacji**

Klasa drogi	Element nawierzchni	Miarodajny współczynnik tarcia przy prędkości zablokowanej opony względem nawierzchni		
		30 km/h	60 km/h	90 km/h
A, S	Pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, awaryjne	-	0,46*)	0,40
	Pasy włączania i wyłączania, jezdnie łącznic	0,52*)	0,47	-
GP	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,50*)	0,45	-
G, Z	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,48*)	0,39	-

*) Wartości wymagań w przypadku odbioru odcinków nawierzchni, na których nie można wykonać pomiarów z prędkością 60 km/h lub w 90 km/h (pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, awaryjne)

Tabela 23 ***Wymagania wg OST, dla opony Barum Bravuris*** **wymagane na koniec okresu gwarancyjnego**

Klasa drogi	Element nawierzchni	Miarodajny współczynnik tarcia przy prędkości zablokowanej opony względem nawierzchni		
		30 km/h	60 km/h	90 km/h
A, S	Pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, awaryjne	-	0,43*)	0,37
	Pasy włączania i wyłączania, jezdnie łącznic	0,49*)	0,44	-
GP	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,47*)	0,43	-
G, Z	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,45*)	0,37	-
*) Wartości wymagań w przypadku odbioru odcinków nawierzchni, na których nie można wykonać pomiarów z prędkością 60 km/h lub w 90 km/h (pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, awaryjne)				

Tabela 24 ***Wymagania wg OST, dla opony PIARC*** **wymagane przed dopuszczeniem nawierzchni do ruchu i w okresie 4 do 8 tygodni od oddania nawierzchni do eksploatacji – wariant 1**

Klasa drogi	Element nawierzchni	Miarodajny współczynnik tarcia przy prędkości zablokowanej opony względem nawierzchni		
		30 km/h	60 km/h	90 km/h
A, S	Pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, awaryjne	-	0,45*)	0,38
	Pasy włączania i wyłączania, jezdnie łącznic	0,51*)	0,45	-
GP	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,49*)	0,44	-
G, Z	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,48*)	0,39	-
*) Wartości wymagań w przypadku odbioru odcinków nawierzchni, na których nie można wykonać pomiarów z prędkością 60 km/h lub w 90 km/h (pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, awaryjne)				

Tabela 25 ***Wymagania wg OST, dla opony PIARC*** **wymagane na koniec okresu gwarancyjnego – wariant 1**

Klasa drogi	Element nawierzchni	Miarodajny współczynnik tarcia przy prędkości zablokowanej opony względem nawierzchni		
		30 km/h	60 km/h	90 km/h
A, S	Pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, awaryjne	-	0,42 *)	0,36
	Pasy włączania i wyłączania, jezdnie łącznic	0,49 *)	0,43	-
GP	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,47 *)	0,42	-
G, Z	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,45 *)	0,37	-
*) Wartości wymagań w przypadku odbioru odcinków nawierzchni, na których nie można wykonać pomiarów z prędkością 60 km/h lub w 90 km/h (pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, awaryjne)				

Tabela 26 ***Wymagania wg OST, dla opony PIARC*** **wymagane przed dopuszczeniem nawierzchni do ruchu i w okresie 4 do 8 tygodni od oddania nawierzchni do eksploatacji – wariant 2**

Klasa drogi	Element nawierzchni	Miarodajny współczynnik tarcia przy prędkości zablokowanej opony względem nawierzchni		
		30 km/h	60 km/h	90 km/h
A, S	Pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, awaryjne	-	0,45 *)	0,38
	Pasy włączania i wyłączania, jezdnie łącznic	0,51 *)	0,46	-
GP	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,49 *)	0,44	-
G, Z	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,47 *)	0,38	-
*) Wartości wymagań w przypadku odbioru odcinków nawierzchni, na których nie można wykonać pomiarów z prędkością 60 km/h lub w 90 km/h (pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, awaryjne)				

Tabela 27 ***Wymagania wg OST, dla opony PIARC*** **wymagane na koniec okresu gwarancyjnego – wariant 2**

Klasa drogi	Element nawierzchni	Miarodajny współczynnik tarcia przy prędkości zablokowanej opony względem nawierzchni		
		30 km/h	60 km/h	90 km/h
A, S	Pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, awaryjne	-	0,42*)	0,35
	Pasy włączania i wyłączania, jezdnie łącznic	0,48*)	0,43	-
GP	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,46*)	0,42	-
G, Z	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,44*)	0,36	-
*) Wartości wymagań w przypadku odbioru odcinków nawierzchni, na których nie można wykonać pomiarów z prędkością 60 km/h lub w 90 km/h (pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, awaryjne)				

Tabela 28 ***Wymagania wg OST, dla opony PIARC*** **wymagane przed dopuszczeniem nawierzchni do ruchu i w okresie 4 do 8 tygodni od oddania nawierzchni do eksploatacji – wariant 3**

Klasa drogi	Element nawierzchni	Miarodajny współczynnik tarcia przy prędkości zablokowanej opony względem nawierzchni		
		30 km/h	60 km/h	90 km/h
A, S	Pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, awaryjne	-	0,45*)	0,39
	Pasy włączania i wyłączania, jezdnie łącznic	0,51*)	0,46	-
GP	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,49*)	0,44	-
G, Z	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,47*)	0,38	-
*) Wartości wymagań w przypadku odbioru odcinków nawierzchni, na których nie można wykonać pomiarów z prędkością 60 km/h lub w 90 km/h (pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, awaryjne)				

Tabela 29 ***Wymagania wg OST, dla opony PIARC*** **wymagane na koniec okresu gwarancyjnego – wariant 3**

Klasa drogi	Element nawierzchni	Miarodajny współczynnik tarcia przy prędkości zablokowanej opony względem nawierzchni		
		30 km/h	60 km/h	90 km/h
A, S	Pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, awaryjne	-	0,42*)	0,36
	Pasy włączania i wyłączania, jezdnie łącznic	0,48*)	0,43	-
GP	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,46*)	0,42	-
G, Z	Pasy ruchu zasadniczego, dodatkowe, utwardzone pobocza	0,44*)	0,36	-
*) Wartości wymagań w przypadku odbioru odcinków nawierzchni, na których nie można wykonać pomiarów z prędkością 60 km/h lub w 90 km/h (pasy ruchu zasadnicze, dodatkowe, awaryjne)				

Bardzo podobne wartości wymagań i klasyfikacji otrzymano dla wariantów 2 i 3. W szczególności dotyczy to klasyfikacji DSN [14], dla której uzyskano identyczne wartości dla obu wariantów oraz wymagań wg nowych OST, dla których różnice występują tylko dla prędkości pomiarowej 90 km/h (o 0,01). Ponieważ są to przepisy techniczne, które będą najczęściej wykorzystywane w ocenie stanu dróg eksploatowanych oraz w ocenie jakości nowych warstw ścieralnych (po wprowadzeniu nowych OST) więc do przeliczania wartości współczynników tarcia otrzymanych z badań na oponie Barum Bravuris na wyniki uzyskiwane na oponie PIARC, proponuje się stosować równanie, wg wariantu 3:

$$\boldsymbol{\mu_P = 0{,}974\mu_B} \qquad (3)$$

Średni błąd oszacowania wartości współczynnika tarcia na oponie PIARC przy wykorzystaniu powyższej funkcji wynosi: $S_\epsilon = 0{,}030$.

W przypadku przeliczania wartości współczynników tarcia otrzymanych z badań na oponie PIARC na wyniki uzyskiwane na oponie Barum Bravuris, proponuje się stosować równanie (odwrotne do równania 3):

$$\mu_B = 1{,}027\mu_P \qquad (4)$$

12 Wnioski z przeprowadzonych prac i analiz

Wyniki badań i analiz przeprowadzonych w ramach pracy pozwalają na sformułowanie następujących wniosków i spostrzeżeń:

1. Brak jest ścisłej zależności wielkości współczynnika tarcia od makrotekstury nawierzchni.
2. Korelacja współczynnika tarcia z teksturą, szczególnie dla prędkości 90 km/h, jest znacznie lepsza jeżeli badamy ją w odniesieniu do technologii wykonania warstwy ścieralnej. Najsilniejszą korelację uzyskano dla technologii betonu cementowego (BC), dla wszystkich trzech prędkości pomiarowych. Niższą dla technologii betonu asfaltowego (BA) i powierzchniowego utrwalenia (PU). Praktycznie nie stwierdzono korelacji dla technologii SS i
3. Nawierzchnie ocenianych odcinków badawczych mają zbliżone charakterystyki zmienności współczynnika tarcia w funkcji prędkości pomiarowej. Dotyczy to przede wszystkim pomiarów na oponie Barum. W przypadku charakterystyk uzyskanych na oponie PIARC kilka odcinków odbiega od głównego trendu. Również charakterystyka krzywej opisującej wymagania wg Rozporządzenia [2] nieco odbiega od funkcji wyznaczonych dla ocenianych odcinków badawczych.
4. Podczas oceny zależności funkcyjnej pomiarów na oponach PIARC i Barum Bravuris uzyskano silną korelację wyników badań na obu oponach. Ponadto uzyskane wartości R^2, niezależnie od zastosowanej funkcji regresji, są bardzo do siebie zbliżone.
5. Analizy zależności funkcyjnych między pomiarami na obu oponach pozwoliły na opracowanie korekty wartości wymagań i klasyfikacji w polskich przepisach technicznych, w oparciu na pomiarach oponą rowkowaną PIARC. Przeliczenia wykonano dla trzech wariantów: wykorzystując opracowane funkcje regresji liniowej, stosując bezpośrednie porównanie średnich wartości pomiarów uzyskanych dla wszystkich ocenianych odcinków (oddzielnie dla każdej prędkości pomiarowej) oraz wykorzystując wyznaczoną funkcję regresji liniowej „0” dla wszystkich uśrednionych wartości współczynnika tarcia, niezależnie od prędkości pomiarowej.
6. Oszacowano wydajność opony pomiarowej na kilkanaście tysięcy pomiarów. Ze względu jednak na inny sposób pracy i zużycia opony należy podchodzić do tych szacunków z dużą rezerwą.
7. Analizy funkcji regresji pokazują, że w przeliczeniach wartości współczynnika tarcia z opony Barum Bravuris (μ_B) na oponę PIARC (μ_P) najwłaściwsze i najwygodniejsze jest stosowanie funkcji liniowej:

$$\mu_P = 0{,}974\mu_B$$

Bibliografia

[1] Mechowski T., Pokorski J., Szwabik B., Kowalski L.: Badanie opon handlowych w celu wyboru nowej opony testowej do zestawu SRT-3, IBDiM, 1999 rok

[2] Mechowski T., Borucki R., Grączewski A.: Testowanie opon do badań właściwości przeciwpoślizgowych, IBDiM, 2003 rok

[3] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 16.01.2002r w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących autostrad płatnych. Dziennik Ustaw nr 12, poz. 116

[4] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999r w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. Dziennik Ustaw nr 43, Poz. 430

[5] Diagnostyka Stanu Nawierzchni „DSN". Tom 1 Organizacja i standardy kampanii diagnostyki stanu nawierzchni. Część 3 Wymagania jakościowe, IBDiM na zlecenie GDDKiA, 2012

[6] Wallman C., Astrom H.: Friction measurement methods and the correlation between road friction and traffic safety, VTI 2001 rok

[7] Specification for a standard test tyre for friction coefficient measurement of a pavement surface: Ribbed test tyre, PIARC Technical Committee 1 Surfaces characteristics (2004)

[8] Surface characteristics of road and airfield pavements, Technical specifications: Procedure for determining the skid resistance of a pavement surface using a device with longitudinal controlled slip: the ADHERA

[9] Surface characteristics of road and airfield pavements, Technical specifications: Procedure for determining the skid resistance of a pavement surface by measurement of the longitudinal friction coefficient (LFCD): The DWW NL skid resistance trailer

[10] Surface characteristics of road and airfield pavements, Technical specifications: Procedure for determining the skid resistance of a pavement surface using a device with longitudinal fixed slip ratio (LFCS): the RoadSTAR

[11] Surface characteristics of road and airfield pavements, Technical specifications: Procedure for determining the skid resistance of a pavement surface using a device with longitudinal block measurement: the Skiddometer BV-8

[12] PN-EN ISO 13473-1:2005 Charakterystyka struktury nawierzchni przy użyciu profili powierzchniowych. Część 1: Określenie Średniego Profilu Głębokości (tytuł oryginału: Characterization of pavement texture by use of surface profiles. Part 1: Determination of Mean Profile Depth)

[13] Mechowski T., Szwabik B., Sudyka J.: Badania poznawcze wpływu sezonowości i warunków zewnętrznych na zmienność współczynnika tarcia nawierzchni drogowych, IBDiM, 2002 rok

[14] Diagnostyka Stanu Nawierzchni „DSN”. Tom 4 Prace analityczne. Część 3 Ocena stanu, tzn. obliczenie wartości stanu oraz wskaźników zespolonych, IBDiM na zlecenie GDDKiA, 2012