



**Projekt realizowany w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia RID,
finansowany ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju
oraz Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad**

**Wynik z osiągniętego etapu/etapów prac nad Projektem będącym
przedmiotem umowy pn:**

Ochrona przed hałasem drogowym

Zadanie 4. Wytyczne prowadzenia badań i oceny hałaśliwości nawierzchni drogowych

Akronim Projektu: OT1-1D/PK-PW-PWR-IBDiM-PL

Numer umowy: DZP/RID-I-76/15/NCBR/2016

Lider i Współwykonawcy: PK, PW, PWR, IBDiM, PL

Kierownik Projektu: prof. dr hab. inż. Marian Tracz

Lider i Współwykonawcy Zad. 4: Instytut Badawczy Dróg i Mostów

Kierownik Zad. 4: dr hab. inż. Adam Zofka, prof. nzw. IBDiM

Data rozpoczęcia Zad. 4: 01.06.2016

Data zakończenia Zad. 4: 31.01.2018



Spis treści:

1.	Cel i zakres Zadania 4.....	4
2.	Podsumowanie Etapu I (2016).....	4
2.1.	Analiza wyników pomiarów na odcinkach wstępnych	4
3.	Etap II (2017-2018)	6
3.1.	Pomiary hałaśliwości na dodatkowych odcinkach	6
3.2.	Analiza pomiarów hałaśliwości.....	9
3.2.1.	Zaawansowana analiza statystyczna pomiarów OBSI	9
3.2.2.	Korelacja pomiędzy metodami terenowymi.....	20
3.2.3.	Wnioski do Wytycznych z analizy	24
3.3.	Weryfikacja metodyki pomiaru hałaśliwości na niezależnym odcinku testowym ITS 26	
3.3.1.	Opis odcinka i zakres badań	26
3.3.2.	Weryfikacja metodyki pomiarów CPX	27
3.3.3.	Weryfikacja metodyki pomiarów OBSI.....	30
3.3.4.	Weryfikacja korelacji pomiędzy różnymi metodami	40
3.3.5.	Wnioski do Wytycznych z badań weryfikacyjnych	42
3.4.	Przygotowanie ostatecznych wersji proponowanych Wytycznych.....	43
4.	Podsumowanie oraz wnioski naukowe i praktyczne z Zadania 4.....	43
5.	Załączniki.....	45

Spis rysunków:

Rysunek 1.	Parametry stanu powierzchni oraz hałaśliwości według OBSI dla wybranych odcinków porównawczych.....	6
Rysunek 2.	Lokalizacja wszystkich odcinków badawczych w tym projekcie.....	8
Rysunek 3.	Odcinki badawcze w pobliżu Warszawy	8
Rysunek 4.	Uśrednione widmo akustyczne natężenia dźwięku z odcinka w grupie BAN.....	11
Rysunek 5.	Uśrednione widma akustyczne natężenia dźwięku z odcinków w grupie BBT....	11
Rysunek 6.	Uśrednione widma akustyczne natężenia dźwięku z odcinków w grupie HMA ..	11
Rysunek 7.	Uśrednione widma akustyczne natężenia dźwięku z odcinków w grupie PAA ...	12
Rysunek 8.	Uśrednione widma akustyczne natężenia dźwięku z odcinków w grupie PCC....	12
Rysunek 9.	Uśrednione widma akustyczne natężenia dźwięku z odcinków w grupie SBP	13
Rysunek 10.	Uśrednione widma akustyczne natężenia dźwięku z odcinków w grupie SMA.	13
Rysunek 11.	Uśrednione widma akustyczne natężenia dźwięku z odcinków w grupie VPH	14
Rysunek 12.	Współrzędne czynnikowe przypadków dla ośmiu grup nawierzchni	14
Rysunek 13.	Współrzędne czynnikowe przypadków dla 11 grup nawierzchni.....	15
Rysunek 14.	Korelacje pomiędzy wartościami IL uzyskanymi w poszczególnych częstotliwościach (MANOVA).....	15
Rysunek 15.	Wykres ładunków czynników (loading plot) w analizie PCA	16
Rysunek 16.	Procent wariancji pomiędzy grupami nawierzchni wyjaśniony przez poszczególne częstotliwości.....	16
Rysunek 17.	Macierz pomyłek (testowa i zbiorcza) dla ANN nauczanej na wynikach średnich	18
Rysunek 18.	Macierz pomyłek (testowa i zbiorcza) dla ANN nauczanej na wynikach indywidualnych	18

Rysunek 19. Walidacja modelu klasyfikacyjnego ANN z wartości średnich dla odcinka 002	19
Rysunek 20. Walidacja modelu klasyfikacyjnego ANN z wartości indywidualnych dla odcinka 002	19
Rysunek 21. Regresja liniowa pomiędzy CPX a OBSI przy 50 km/h	21
Rysunek 22. Regresja liniowa pomiędzy CPX a OBSI przy 80 km/h	21
Rysunek 23. Regresja liniowa pomiędzy CPX a OBSI przy 50 km/h po przesunięciu równoległym	22
Rysunek 24. Regresja liniowa pomiędzy CPX a OBSI przy 80 km/h po przesunięciu równoległym	22
Rysunek 25. Porównanie wyników z OBSI i SPBI	23
Rysunek 26. Porównanie wyników z CPX i SPBI	24
Rysunek 27. Przykłady spektrogramów dla nawierzchni, i) nowa SMA, ii) nowy BC, iii) BC na PCC04 (rok budowy 1938 r.) (x: czas s, y: częstotliwość Hz)	25
Rysunek 28. Plan sytuacyjny lotniska w Ułężu (51.618327, 22.099914)	26
Rysunek 29. Urządzenia OBSI, CPX oraz ROSSA (tuba) na lotnisku w Ułężu	27
Rysunek 30. Uśrednione wyniki pomiarów CPX na lotnisku w Ułężu	29
Rysunek 31. Wartości LCPX w zależności od wysokości instalacji mikrofonów	30
Rysunek 32. Weryfikacja pomiarów na odcinku 002 w zakresie średnich wariancji	33
Rysunek 33. Uśredniona wariancja z podziałem na prędkość i ciśnienie w oponie	34
Rysunek 34. Wpływ pozycji czujników nad powierzchnią nawierzchni dla odcinka 002 (przy STN, N); wąsy reprezentują 99% przedziały ufności dla wartości średniej; pionowe linie (przerywane-czerwone) reprezentują predykcje dla poziomu l	35
Rysunek 35. Wpływ ciśnienia w oponie dla odcinka 002 (STN, b, bez prędkości jako zmiennej niezależnej); ciągłe linie wyznaczają granice predykcji wyznaczone z odcinka 001	35
Rysunek 36. Wpływ prędkości pomiaru dla odcinka 002 (STN, b, N); przerywane linie wyznaczają granice predykcji wyznaczone z 001	36
Rysunek 37. Przykładowe przebiegi poziomów natężenia dźwięku (A) zmierzonych dla częstotliwości środkowych pasm 1/3 oktaowych dla odcinka 001 i 002 (BA, STN, b, N, 72 km/h)	38
Rysunek 38. Porównanie rozkładów ogólnego poziomy natężenia dźwięku dla odcinka 001 i 002 (BA, STN, b, N, 72 km/h)	38
Rysunek 39. Rozkład nieważnych sekcji pomiarowych (wartości oznaczają procent nieważnych przejazdów przy danych warunkach)	39
Rysunek 40. Przykład rozkładu PI dla nieważnych przejazdów (przekroczenie przy 1600 Hz)	40
Rysunek 41. Przykład rozkładu PI dla nieważnych przejazdów (przekroczenie przy 1250 i 1600 Hz)	40
Rysunek 42. Weryfikacja zależności pomiędzy CPX a OBSI przy 50 km/h	41
Rysunek 43. Weryfikacja zależności pomiędzy CPX a OBSI przy 80 km/h	42

Spis tablic:

Tablica 1. Odcinki wstępne i wybrane odcinki porównawcze wraz z wynikami badań (średnie wartości parametrów)	4
Tablica 2. Średnie wartości parametrów wyznaczone na podstawie pomiarów w Zadaniach 1 i 4	7
Tablica 3. Klasyfikacja w grupy na potrzeby analizy statystycznej	9

Tablica 4. Kody group nawierzchni w analizie ANN	17
Tablica 5. Wyniki pomiarów CPX na lotnisku w Ułężu.....	28
Tablica 6. Różnice między wartościami uzyskiwanymi w dwóch przejazdach w tych samych warunkach pomiarowych	29
Tablica 7. Wartości LCPX uzyskane dla różnych wysokości mikrofonów	30
Tablica 8. Czynniki i ich poziomy zaplanowane w eksperymencie na odcinku 002.....	31
Tablica 9. Plan eksperymentu na odcinku 002 – część 1	31
Tablica 10. Plan eksperymentu na odcinku 002 – część 2	32
Tablica 11. Test na równość wariancji na odcinkach 001 i 002	33
Tablica 12. Współczynniki normalizujące ze względu na prędkość – porównanie 002 i 001.	36

1. CEL I ZAKRES ZADANIA 4

Niniejsze opracowanie stanowi sprawozdanie z prac wykonanych w ramach programu badawczego Rozwój Innowacji Drogowych (RID) nr DZP/RID-I-76/NCBR/2016 pt. „Ochrona przed hałasem drogowym”, Zadanie 4: „Wytyczne prowadzenia badań i oceny hałaśliwości nawierzchni drogowych” na zlecenie Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie.

Celem Zadania 4 było przygotowanie wytycznych prowadzenia badań i oceny hałaśliwości nawierzchni drogowych z uwzględnieniem metodyki opracowanej w Zadaniu 1 oraz wyników pomiarów hałaśliwości z innych zadań. Cel został osiągnięty w postaci opracowania propozycji wytycznych pomiarów hałaśliwości dla metody CPX oraz OBSI. Wytyczne są zawarte w osobnych Załącznikach 4.2 i 4.3.

Zgodnie planem zawartym we Wniosku, Zadanie 4 zostało podzielone na trzy etapy:

1. Zaawansowana analiza wyników pomiarów terenowych z Zadania 1 oraz pozostałych zadań.
2. Weryfikacja metodyk pomiarów hałaśliwości i funkcji korelacji na niezależnym odcinku testowym ITS.
3. Opracowanie ostatecznych propozycji wytycznych prowadzenia badań hałaśliwości.

Wszystkie etapy wykonano zgodnie z planem i kolejne części niniejszego opracowania przedstawiają szczegółowe wyniki z poszczególnych etapów.

Całość zadania została wykonana przez IBDiM.

2. PODSUMOWANIE ETAPU I (2016)

2.1. Analiza wyników pomiarów na odcinkach wstępnych

W 2016 r. przeanalizowano wyniki pomiarów na wstępnych odcinkach z Zadania 1. W Tabeli zestawiono uśrednione wyniki wykonanych badań na wyjściowych 26 odcinkach. Wyróżnione zostały odcinki wytypowane do badań szczegółowych.

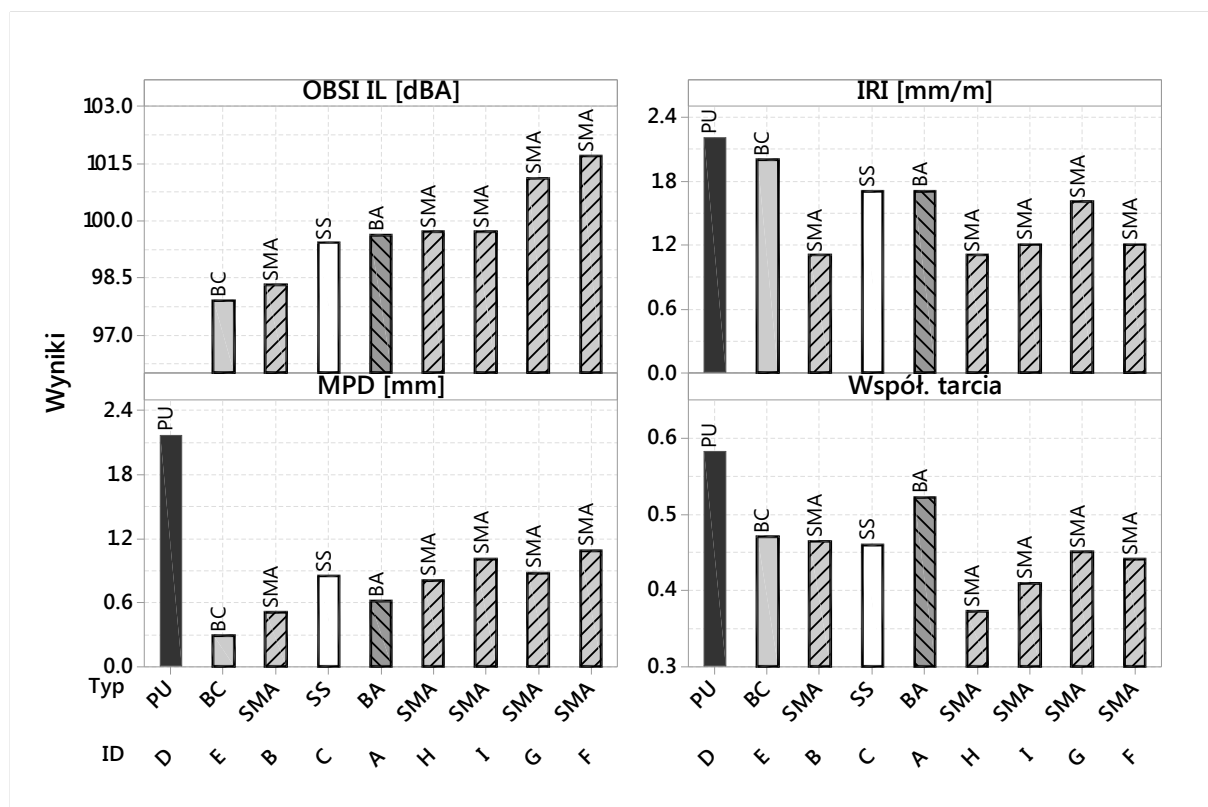
Tablica 1. Odcinki wstępne i wybrane odcinki porównawcze wraz z wynikami badań (średnie wartości parametrów)

lp.	Nr drogi	Technol.	km początk.	Współ. tarcia	MPD, mm	IRI, mm/m	OBSI IL [dBA] 72 km/h
1	DK-9	BA	26,200	0,344	0,55	1,8	99,3
2	DK-9	PU	32,000	0,418	0,60	1,2	98,3
3	DK-48	BA	50,000	0,393	0,53	1,0	96,7
4	A DK-50	BA	22,000	0,522	0,61	1,7	99,6
5	DK-50	BA	31,000	0,549	0,76	1,3	100,3

6	B	DK-50	SMA	262,400	0,464	0,51	1,1	98,3
7		DK-61	BA	55,000	0,329	0,39	1,3	98,0
8		DK-61	BA	82,000	0,502	0,57	2,0	98,8
9		DK-61	SS	85,300	0,461	0,85	1,8	99,2
10	C	DK-61	SS	87,300	0,460	0,85	1,7	99,4
11		DK-61	BA	96,000	0,421	0,83	1,3	100,5
12		DK-61	BA	107,300	0,441	0,70	1,8	99,5
13		DK-62	SMA	157,400	0,390	0,90	1,0	101,2
14		DK-62	SMA	202,500	0,437	0,75	1,5	99,3
15		DK-79	BA	116,800	0,458	0,80	2,0	100,4
16	D	Korytów	PU	0,000	0,582	2,17	2,2	-
17	E	DK-50	BC	72,800	0,470	0,29	2,0	97,9
18	F	DK-50	SMA	41,500	0,441	1,09	1,2	101,7
19		DK-50	SMA	51,300	0,448	0,86	1,7	100,5
20	G	DK-50	SMA	58,000	0,451	0,88	1,6	101,1
21	H	DK-50C	SMA	2,000	0,372	0,81	1,1	99,7
22	I	DK-50D	SMA	2,500	0,409	1,01	1,2	99,7
23		DK-79	SMA	58,200	0,386	0,93	0,7	98,8
24		DK-79	SS	101,000	0,454	0,89	1,3	99,2
25		DK-12	SMA	520,200	0,344	0,95	1,0	99,9
26	J	DK-48	SS	55,000	0,637	-	-	-

BA – beton asfaltowy, SMA – mastyks grysowy, BC – beton cementowy, PU – powierzchniowe utrwalenie, SS – mieszanka mineralno-emulsyjna (slurry seal).

Powyższe porównanie i analizy posłużyły do wytypowania 10 odcinków do dalszych pomiarów w 2017 r. Wybrano najczęściej spotykane rodzaje nawierzchni w Polsce – SMA, BA oraz BC. Rysunek 1 przedstawia graficznie zakres kluczowych parametrów (współczynnik tarcia, MPD, IRI oraz IL OBSI) dla wybranych 10 odcinków. Można zauważyć, że wybrane odcinki różniły się znacząco pod względem rozpatrywanych parametrów i hałaśliwości co ma zapewnić szeroką reprezentatywność wykonanych badań służących do opracowania propozycji wytycznych badań hałaśliwości.



Rysunek 1. Parametry stanu powierzchni oraz hałaśliwości według OBSI dla wybranych odcinków porównawczych

3. ETAP II (2017-2018)

3.1. Pomiary hałaśliwości na dodatkowych odcinkach

Pomiary hałaśliwości wykonano w kilku zadaniach niniejszego projektu:

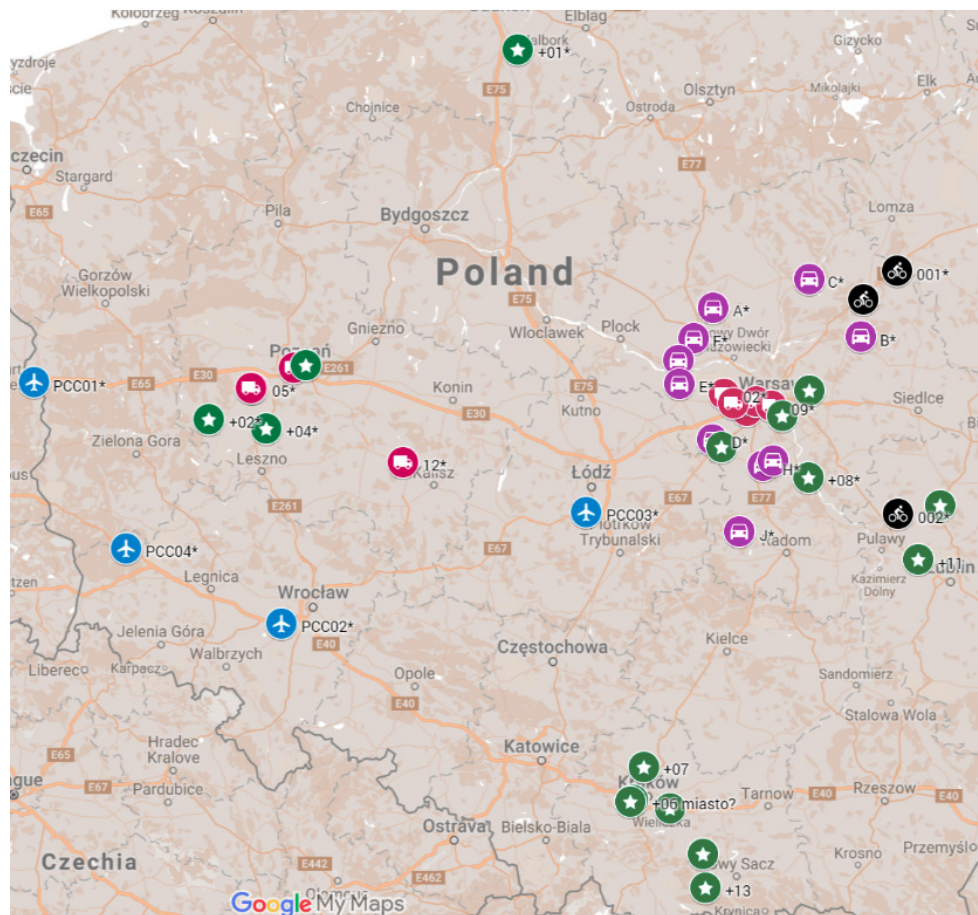
- 1) Zadanie 1 – na potrzeby opracowania i sprawdzenia Wytycznych do pomiarów hałaśliwości.
- 2) Zadanie 2 i 3 – w celu oceny rozwiązań materiałowych nawierzchni asfaltowych i betonowych.
- 3) Zadanie 4 – w celu weryfikacji Wytycznych do pomiarów hałaśliwości.
- 4) Zadanie 5 – do opracowania Katalogu hałaśliwości nawierzchni.

W każdym zadaniu wyniki pomiarów są w odpowiedni sposób zinterpretowane i wykorzystane w celu danego zadania. Dla porządku, w Tablica 2 są przedstawione średnie wartości parametrów wyznaczone na podstawie pomiarów w Zadaniach 1 i 4. Lokalizacje wszystkich odcinków pomiarowych są przedstawione na Rysunek 2 i Rysunek 3.

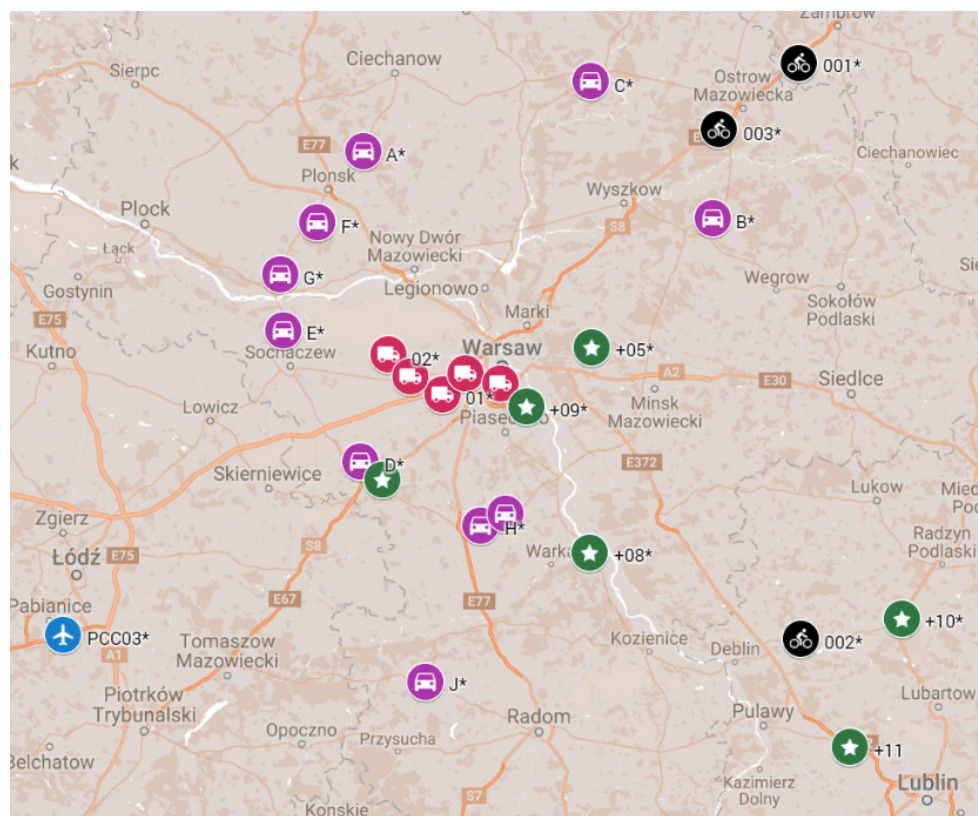
Należy zauważyć, iż pomiary z odcinka 002 będą jeszcze dokładnie analizowane w kolejnych rozdziałach, a wyniki i analiza pomiarów rurą impedancyjną są zaprezentowane w Załączniku 1.4 i 1.5 do opisu Zadania 1.

Tablica 2. Średnie wartości parametrów wyznaczone na podstawie pomiarów w Zadaniach 1 i 4

L.p.	ID odcinka	Typ naw.	OBSI IL przy 48 km/h [dBA]	OBSI IL przy 72 km/h [dBA]	OBSI IL przy 97 km/h [dBA]	LCPX:P1. 50 [dBA]	LCPX:P1. 80 [dBA]	SPBI [dBA]
1	A	BA	92.7	98.8	102.7	90.5	97.7	
2	B	SMA	92.6	98.0	102.1	89.9	96.6	
3	C	SS	92.9	98.8	102.2	90.3	97.2	
4	D	PU				90.6		70.5
5	E	BC	92.6	99.1	104.2	91.3	98.8	79.7
6	F	SMA		100.5	104.0	92.7	99.6	80.6
7	G	SMA	94.8	100.3	103.5	91.9	98.9	79.8
8	H	SMA	94.6	99.8	103.1	90.8	97.4	
9	I	SMA		100.7	103.7	91.7	98.1	
10	J	SS		99.9	104.3	90.6	98.2	76.6
11	001	SMA	93.3	99.4	103.5			
12	001	BA	91.8	98.4	101.6			
13	002	BA	92.9	99.1	103.5	90.7	97.9	
14	003	BC	91.6	97.6	101.7			
15	+01	SBP	100.4	107.0				
16	+02	Viaphone	93.3	99.1				
17	+03	Viaphone	93.9	99.7				
18	+04	Viaphone	94.2	99.7	103.2	91.6	98.7	
19	+05	BBTM 8A+CR	91.3	97.0	100.8	89.1	95.7	
20	+08	PU	92.4	99.3	104.0			
21	+09	SMA CR	92.1	98.2				
22	+10	SMA 8		99.8	103.5	91.4	98.3	76.9
23	+11	SMA 8						80.1
24	+12	BA		101.8	105.4	92.7	99.1	83.1
25	+13	BBTM						71.8
26	+14	BBTM						71.8
27	+15	BBTM						72.8
28	+16	BBTM						69.4
29	+17	b.d.						75.6
30	+18	b.d.						75.9



Rysunek 2. Lokalizacja wszystkich odcinków badawczych w tym projekcie



Rysunek 3. Odcinki badawcze w pobliżu Warszawy

3.2. Analiza pomiarów hałaśliwości

W tej części zostały przedstawione dwie oddzielne analizy:

1. Zaawansowana analiza wyników z pomiarów OBSI.
2. Sprawdzenie powiązania pomiędzy wynikami z metod CPX, OBSI i SPB.

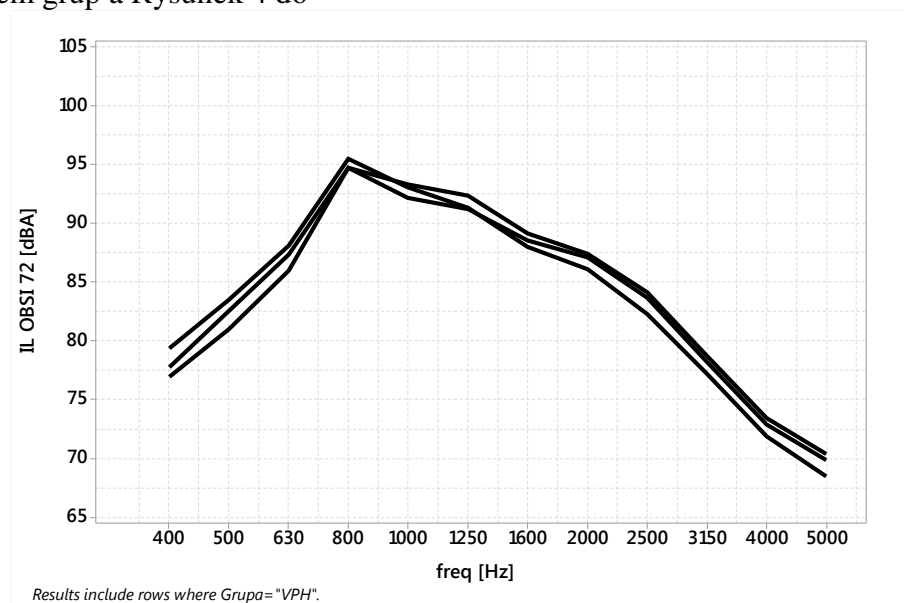
W obu analizach uwzględniono pomiary z Zadań 1 do 5 za wyjątkiem odcinka 002, który posłużył do weryfikacji wyznaczonych zależności i jest opisany w kolejnych rozdziałach.

3.2.1. Zaawansowana analiza statystyczna pomiarów OBSI

Analiza została wykonana na dostępnych uśrednionych widmach akustycznych ze wszystkich pomiarów OBSI przy prędkości 72 km/h (inne warunki: pozycja b, opona STN, ciśnienie N). Zostały wykorzystane dwie zaawansowane techniki:

- wielowymiarowa analiza wariancji (MANOVA),
- sztuczna sieć neuronowa (ANN) wraz z analizą głównych składowych (PCA).

Na potrzeby obu analiz, nawierzchnie na poszczególnych odcinkach zostały sklasyfikowane w osiem grup. Klasyfikacja została wykonana na podstawie rodzaju mieszanki w warstwie ścieralnej i podobieństwa widma akustycznego. Tablica 3 przedstawia osiem grup a Rysunek 4 do



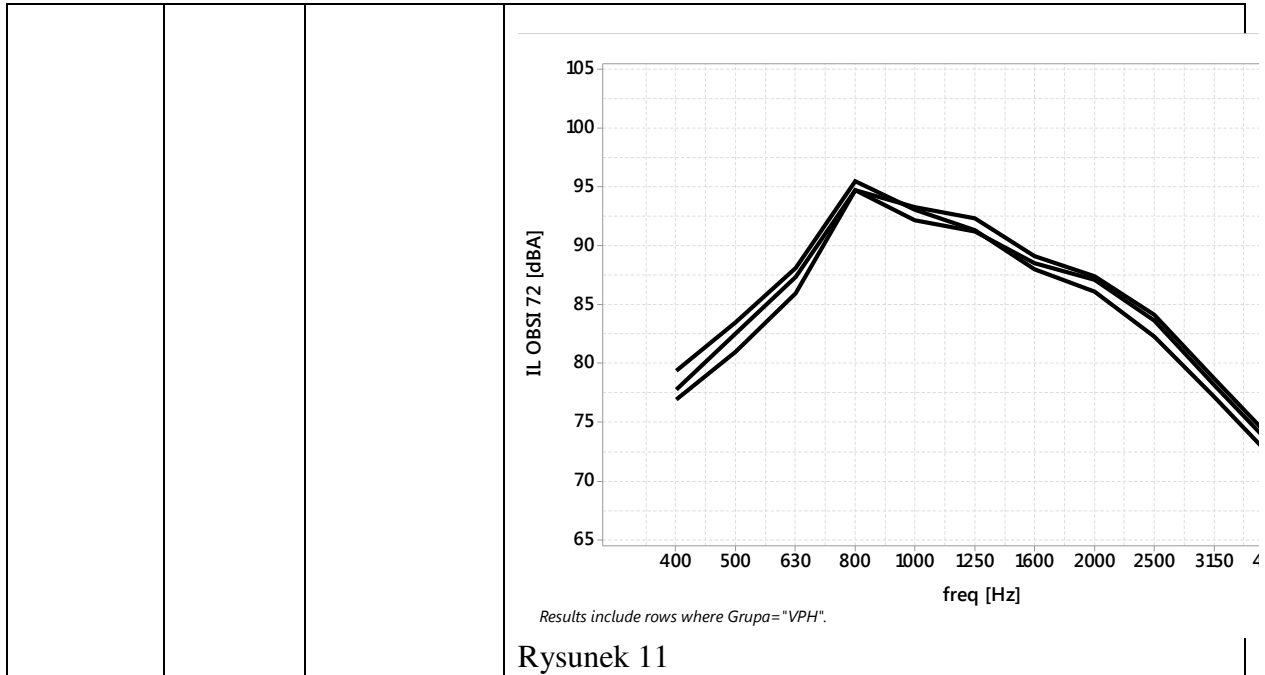
Rysunek 11 reprezentatywne (średnie) widma akustyczne natężenia dźwięku dla każdej z grup. Wizualnie można dostrzec różnice w przebiegu widm pomiędzy poszczególnymi grupami. Należy zaznaczyć, że:

- zarówno grupa BAN jak i HMA zawierają betony asfaltowe, ale mimo to grupa BAN została wyznaczona jako osobna grupa, gdyż przebieg był znacząco inny od grupy HMA,
- grupa PAA zawiera dwa odcinki z mieszanką PA, ale różnią się one rokiem budowy, standardem utrzymania i wielkością obciążenia ruchem; jest to odzwierciedlone poprzez równoległe przesunięcie dwóch widm (Rysunek 7),

- grupa PCC zawiera zróżnicowane widma, ale żeby nie powiększać liczby grup, zdecydowano zachować wszystkie odcinki z nawierzchniami betonowymi w jednej grupie,
- grupa SBP zawiera tylko jeden odcinek z nawierzchnią z kostki kamiennej, która charakteryzowała się wysokimi poziomami IL i unikalnym przebiegiem widma (Rysunek 9).

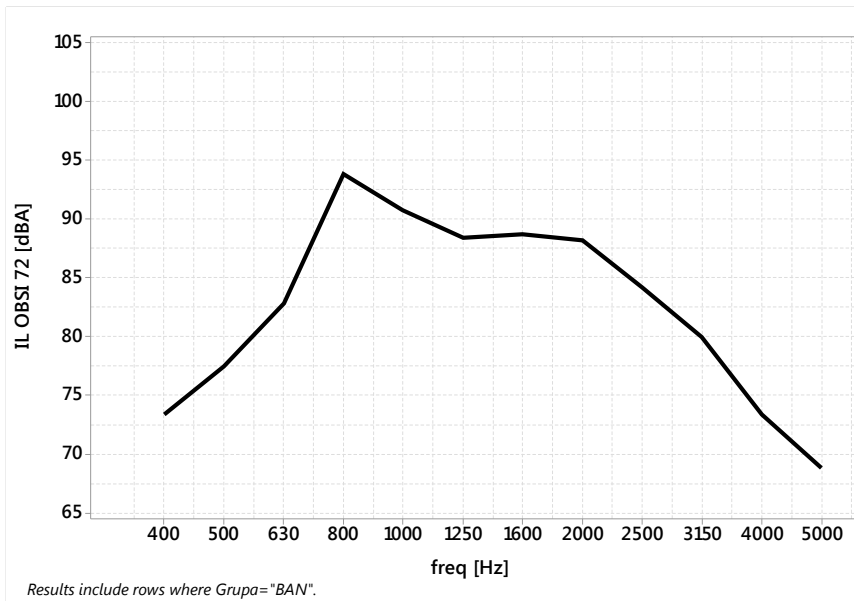
Tablica 3. Klasyfikacja w grupy na potrzeby analizy statystycznej

GRUPA klasyfikacyjna	ID odcinka	Typ nawierzchni	Widma
BAN	001 HMA	HMA new	Rysunek 4
BBT	+05	BBTM 8A + CR	Rysunek 5
BBT	06	BBTM8	
HMA	002 HMA*	BA (old)	Rysunek 6
HMA	02	AC11S	
HMA	A	BA	
HMA	C	SS	
HMA	J	SS	
PAA	+12	PA (2010)	Rysunek 7
PAA	05	PA8	
PCC	003 PCC	PCC (new)	Rysunek 8
PCC	E	PCC	
PCC	PCC01	PCC	
PCC	PCC02	PCC	
PCC	PCC03	PCC	
PCC	PCC04	PCC (old)	
SBP	+01	SBP	Rysunek 9
SMA	+08	PU (2017)	Rysunek 10
SMA	+09	SMA CR	
SMA	+10	SMA8	
SMA	001SMA	SMA new	
SMA	03	SMA8	
SMA	04	SMA11	
SMA	10	SMA-LA	
SMA	11	SMA-LA	
SMA	12	SMA-LA	
SMA	B	SMA	
SMA	F	SMA	
SMA	G	SMA	
SMA	H	SMA	
SMA	I	SMA	
VPH	+02	Viaphone	
VPH	+03	Viaphone	
VPH	+04	Viaphone	

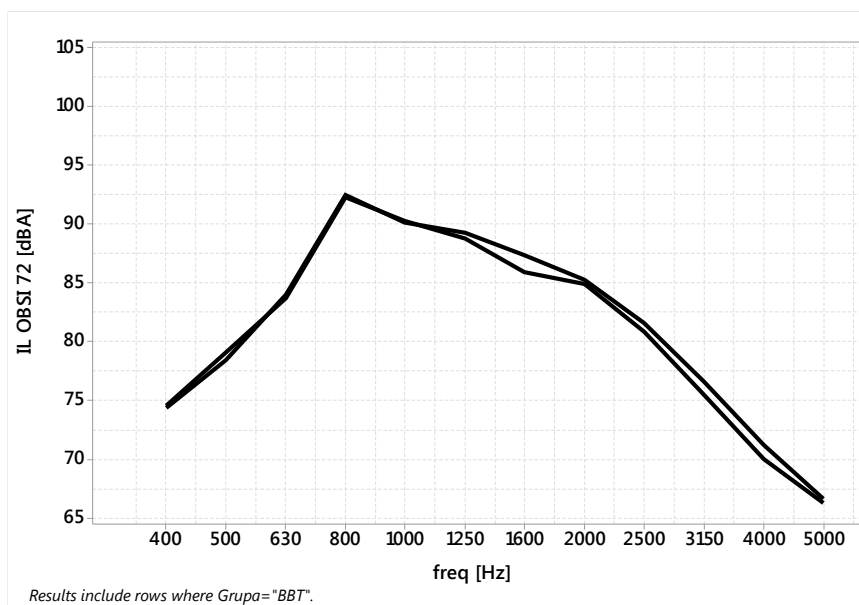


Rysunek 11

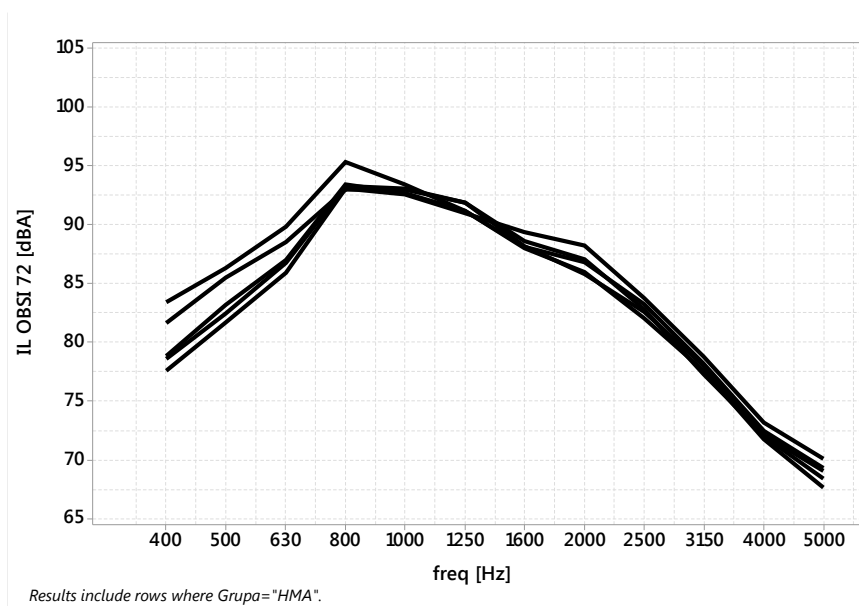
* uwzględniony tylko w procesie weryfikacji



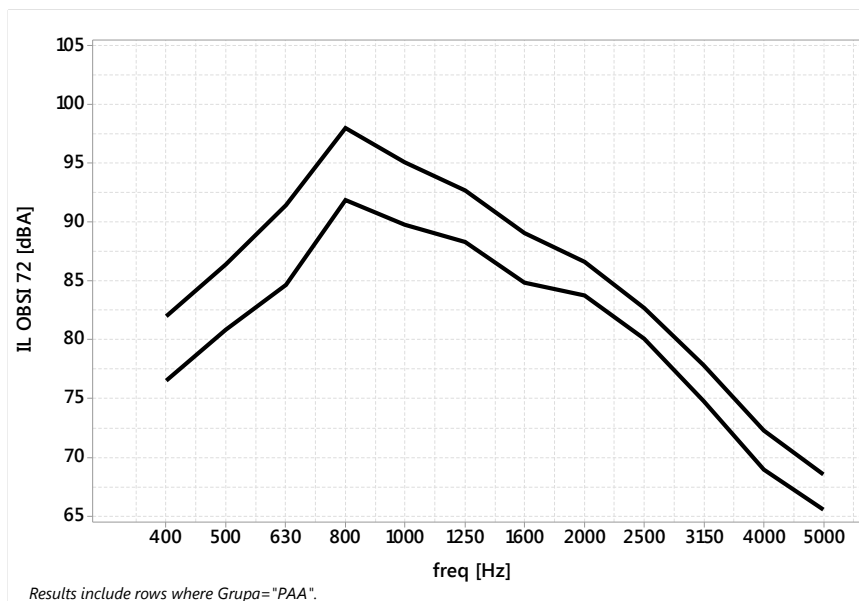
Rysunek 4. Uśrednione widmo akustyczne natężenia dźwięku z odcinka w grupie BAN



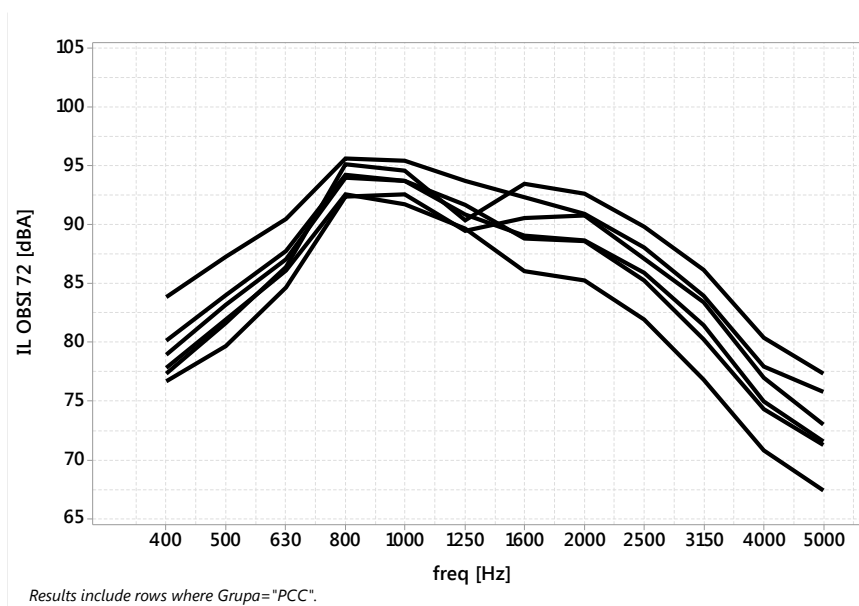
Rysunek 5. Uśrednione widma akustyczne natężenia dźwięku z odcinków w grupie BBT



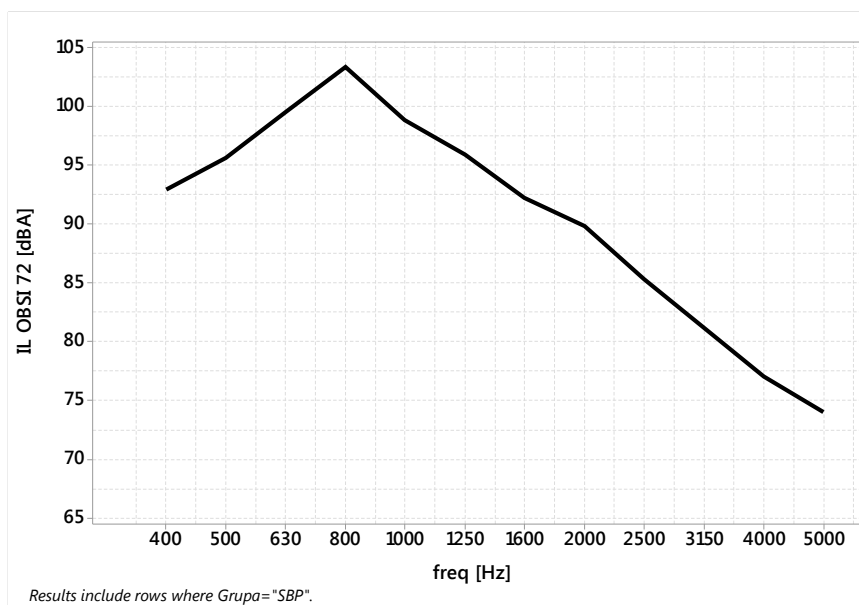
Rysunek 6. Uśrednione widma akustyczne natężenia dźwięku z odcinków w grupie HMA



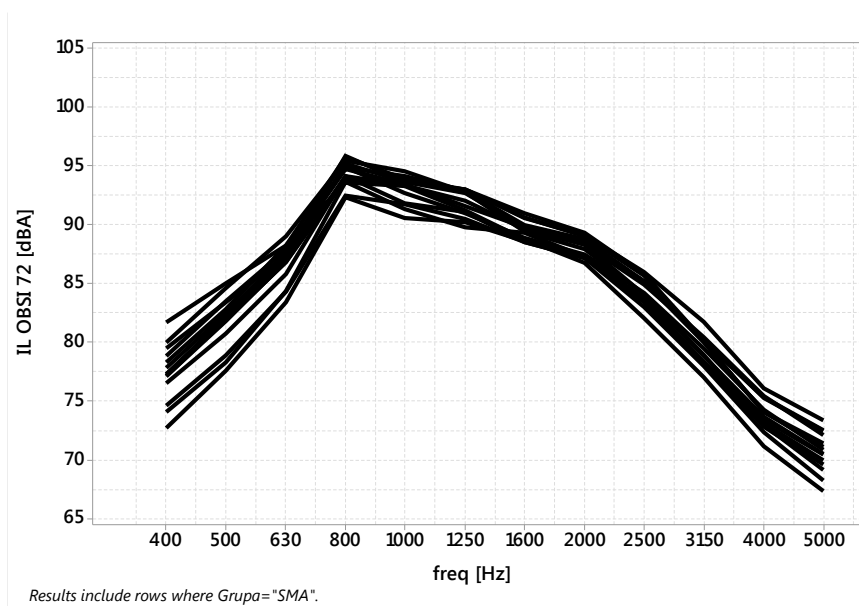
Rysunek 7. Uśrednione widma akustyczne natężenia dźwięku z odcinków w grupie PAA



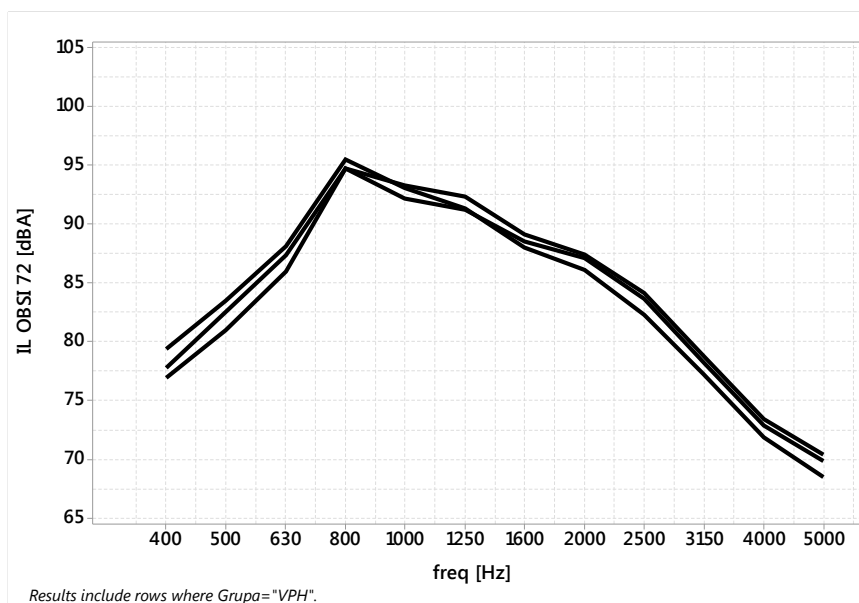
Rysunek 8. Uśrednione widma akustyczne natężenia dźwięku z odcinków w grupie PCC



Rysunek 9. Uśrednione widma akustyczne natężenia dźwięku z odcinków w grupie SBP



Rysunek 10. Uśrednione widma akustyczne natężenia dźwięku z odcinków w grupie SMA

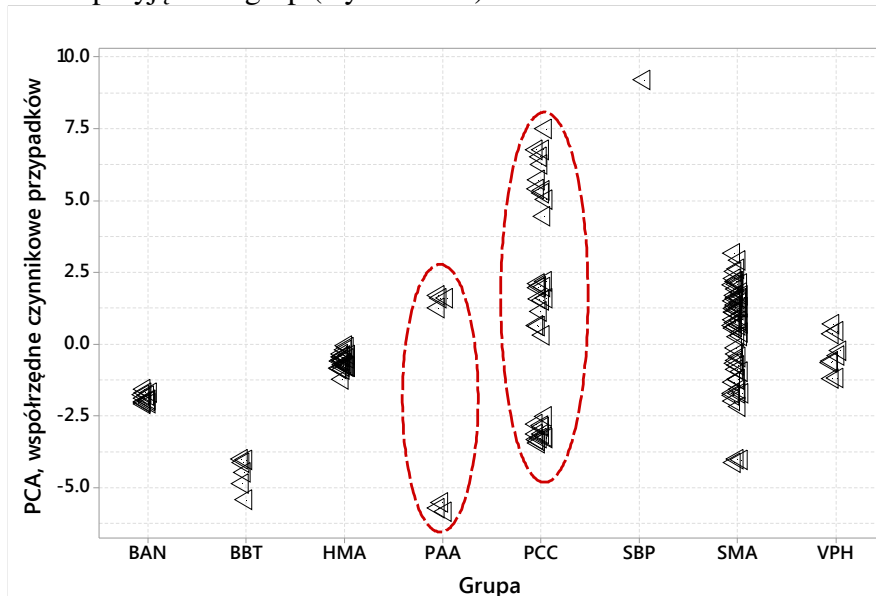


Rysunek 11. Uśrednione widma akustyczne natężenia dźwięku z odcinków w grupie VPH

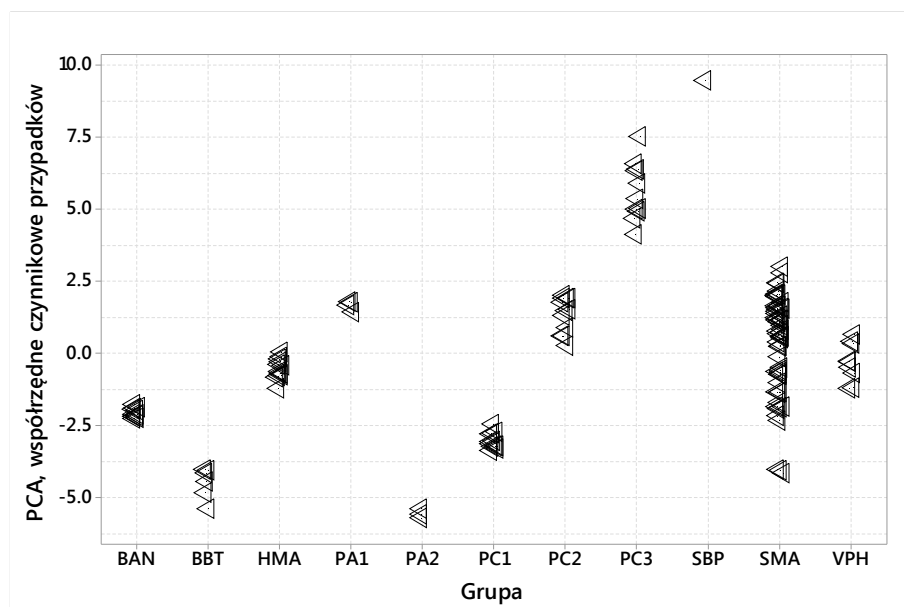
W celu zweryfikowania podziału na grupy, przeprowadzono analizę PCA i wyznaczono tzw. współrzędne czynnikowe przypadków (ang. scores) dla poszczególnych grup (Rysunek 12). Można zauważyć iż:

- grupa PAA ma dwie wyraźne podgrupy,
- grupa PCC ma trzy wyraźne podgrupy,

Na podstawie tych obserwacji, podzielono odpowiednio grupy PAA i PCC i do dalszych analiz przyjęto 11 grup (Rysunek 13).



Rysunek 12. Współrzędne czynnikowe przypadków dla ośmiu grup nawierzchni

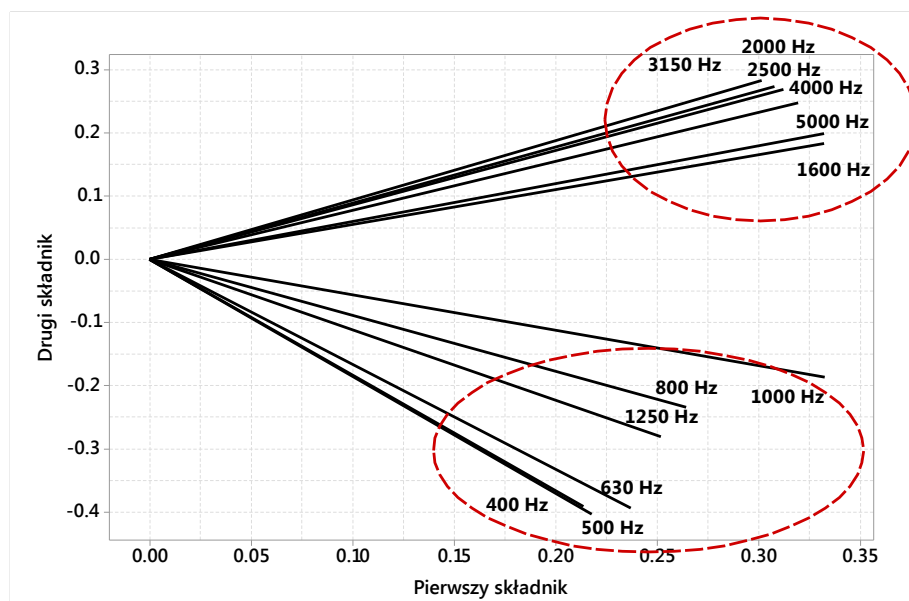


Rysunek 13. Współrzędne czynnikowe przypadków dla 11 grup nawierzchni

Analiza MANOVA posłużyła do sprawdzenia korelacji pomiędzy wartościami IL przy różnych częstotliwościach oraz wpływem częstotliwości na wariację pomiędzy grupami nawierzchni. Rysunek 14 przedstawia częściową korelację pomiędzy wartościami IL uzyskanymi w poszczególnych częstotliwościach. Można zaobserwować dwie wyraźne grupy częstotliwości, przy czym 1250 Hz jest częstotliwością rozgraniczającą. Podobne obserwację można wykonać na wykresie ładunków czynników PCA (Rysunek 15).

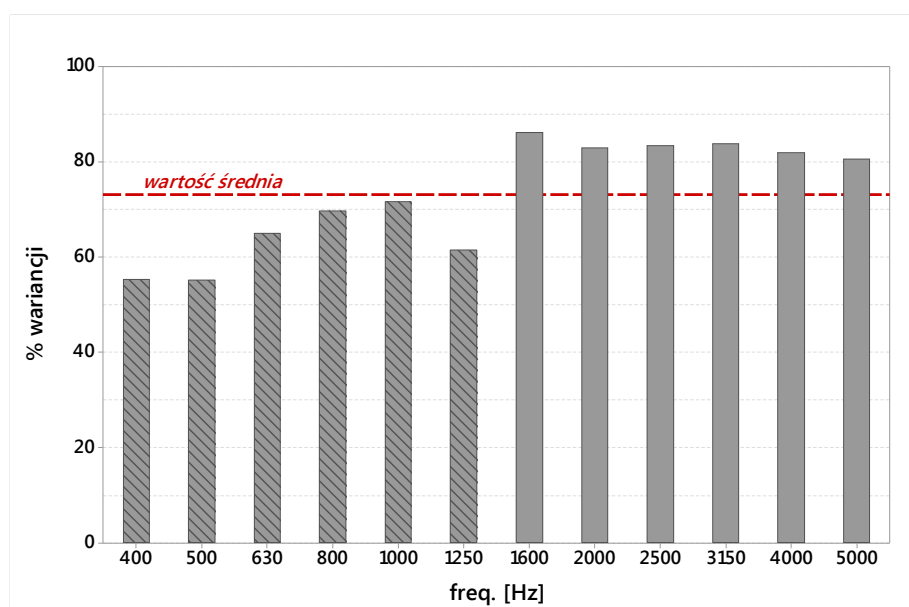
	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz
400 Hz	1.0	1.0	0.9	0.7	0.7	0.6	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	0.0
500 Hz	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	0.7	0.0	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	0.0
630 Hz	0.9	1.0	1.0	0.8	0.8	0.7	0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
800 Hz	0.7	0.8	0.8	1.0	0.7	0.6	0.2	0.0	0.2	0.2	0.2	0.3
1000 Hz	0.7	0.8	0.8	0.7	1.0	0.8	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.4
1250 Hz	0.6	0.7	0.7	0.6	0.8	1.0	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0.3
1600 Hz	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.5	0.4	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
2000 Hz	-0.2	-0.2	-0.1	0.0	0.4	0.2	0.9	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8
2500 Hz	-0.1	-0.1	0.0	0.2	0.4	0.2	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9
3150 Hz	-0.1	-0.1	0.0	0.2	0.3	0.1	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9
4000 Hz	-0.1	-0.1	0.0	0.2	0.2	0.1	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0
5000 Hz	0.0	0.0	0.1	0.3	0.4	0.3	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0

Rysunek 14. Korelacje pomiędzy wartościami IL uzyskanymi w poszczególnych częstotliwościach (MANOVA)



Rysunek 15. Wykres ładunków czynników (loading plot) w analizie PCA

Przebieg jednoczynnikowych analiz wariancji z MANOVA wykazał, że zidentyfikowane dwie grupy pomiarów IL w funkcji częstotliwości w zróżnicowanym stopniu wyjaśniają wariancję pomiędzy grupami nawierzchni. Pomiarzy poniżej 1250 Hz w statystycznie mniejszym stopniu wyjaśniają wariancję niż wyniki powyżej 1250 Hz. Świadczy to o wpływie rodzaju nawierzchni w większym stopniu dla wartości IL uzyskanych w wyższym częstotliwościach.



Rysunek 16. Procent wariancji pomiędzy grupami nawierzchni wyjaśniony przez poszczególne częstotliwości

Analizę ANN wykonano w celu opracowania modelu klasyfikacyjnego dla wydzielonych 11 grup nawierzchni, czyli 11 rodzin przebiegu widma akustycznego. Analizę przeprowadzono w dwóch scenariuszach:

1. Scenariusz ze wszystkimi indywidualnymi wynikami:

- Dane wejściowe: wartości natężenia dźwięku dla każdej częstotliwości środkowej pasm 1/3 oktawowych (pomiędzy 400 a 5000Hz), czyli 12 wartości, ogólny poziom natężenia dźwięku IL (1 wartość), współrzędna czynnikowa przypadku (ang. score) z analizy PCA (1 wartość)
- Architektura ANN: jednokierunkowa, 1 warstwa ukryta, 20 neuronów.
- Wynik: klasyfikacja grupy nawierzchni dla każdego indywidualnego widma (kody grup przedstawiono w Tablica 4).

2. Scenariusz na wartościach średnich:

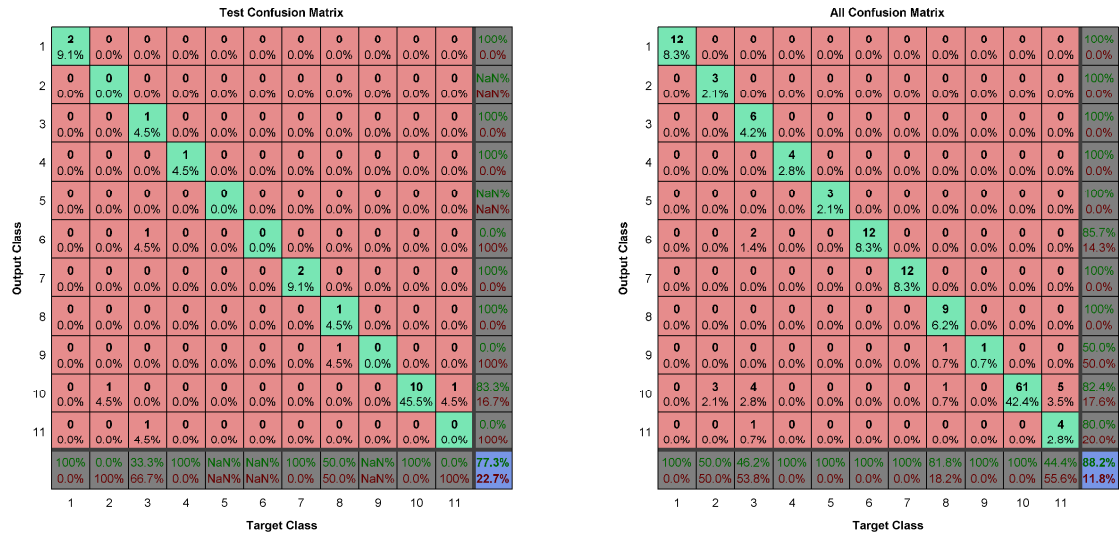
- Dane wejściowe: wartości natężenia dźwięku dla każdej częstotliwości środkowej pasm 1/3 oktawowych (pomiędzy 400 a 5000Hz), czyli 12 wartości, ogólny poziom natężenia dźwięku IL (1 wartość), współrzędna czynnikowa przypadku (ang. score) z analizy PCA (1 wartość).
- Architektura ANN: jednokierunkowa, 1 warstwa ukryta, 20 neuronów.
- Wynik: klasyfikacja grupy nawierzchni dla każdego średniego widma.

W scenariuszu indywidualnym uwzględniono 868 indywidualnych widm akustycznych w opracowaniu modelu i 65 widm z odcinka 002 (Ułęż) do walidacji modelu. W analizie na wartościach średnich były to odpowiednio 144 widma do opracowania a sprawdzenie zostało wykonane na 12 przypadkach (widma z odcinka 002 Ułęż).

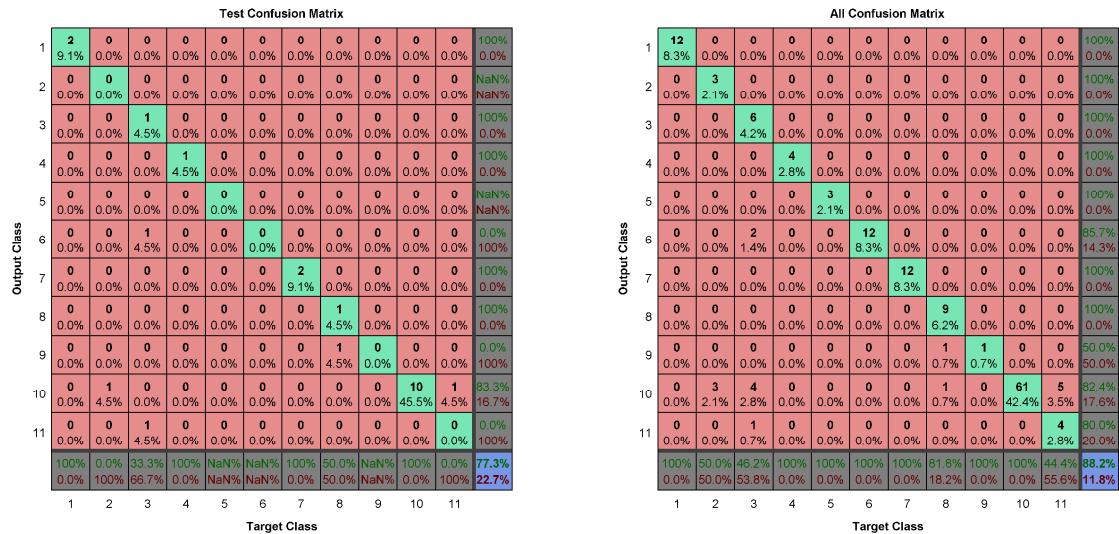
Tablica 4. Kody grup nawierzchni w analizie ANN

Grupa	Kod
BAN	1
BBT	2
HMA	3
PA1	4
PA2	5
PC1	6
PC2	7
PC3	8
SBP	9
SMA	10
VPH	11

Wyniki z analiz ANN przedstawiono w postaci tzw. macierzy pomylek (ang. confusion matrix) na

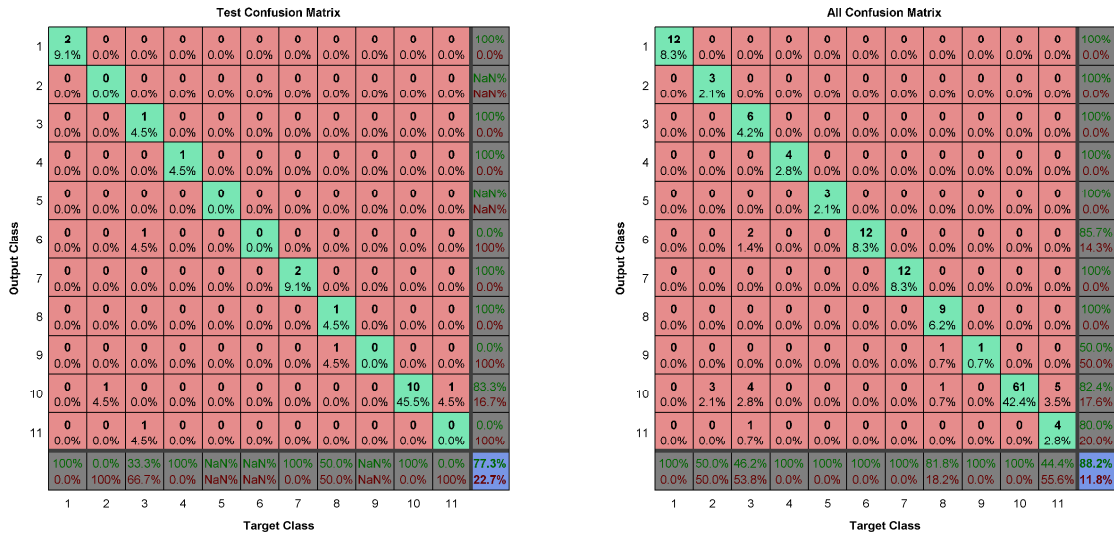


Rysunek 17 oraz Rysunek 18, a Rysunek 19 oraz Rysunek 20 przedstawiają walidację obu modeli klasyfikacyjnych na wynikach z niezależnego odcinka 002 w Ułężu. Każdy z rysunków

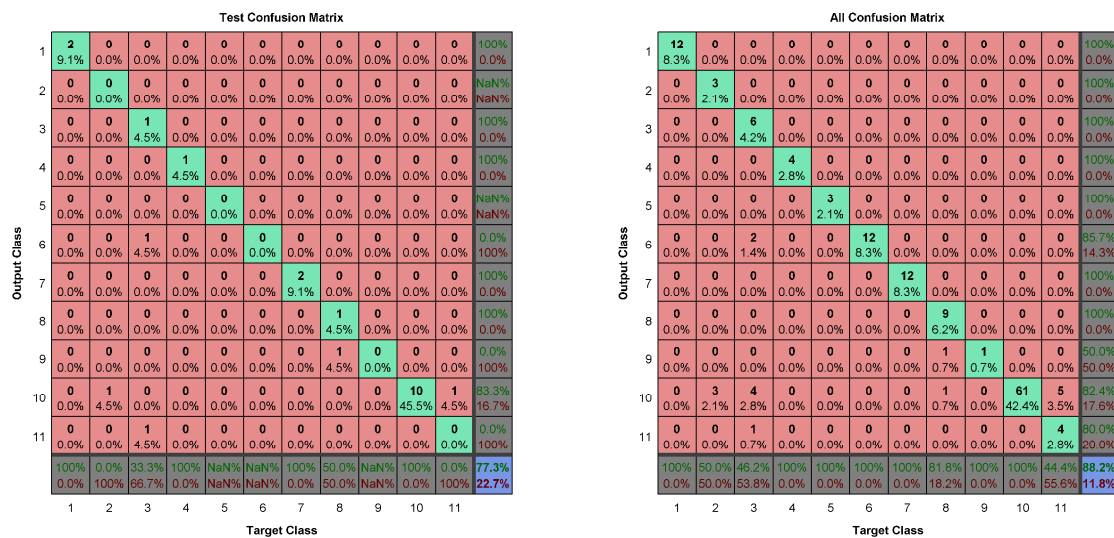


Rysunek 17 oraz Rysunek 18) zawiera dwie macierze: po lewej stronie z wynikami na zbiorze testowym (nie uwzględnionym przy kalibracji modelu ANN) oraz po prawej stronie, która uwzględnia wszystkie rozpatrywane wartości. Można zauważyć następujące prawidłowości:

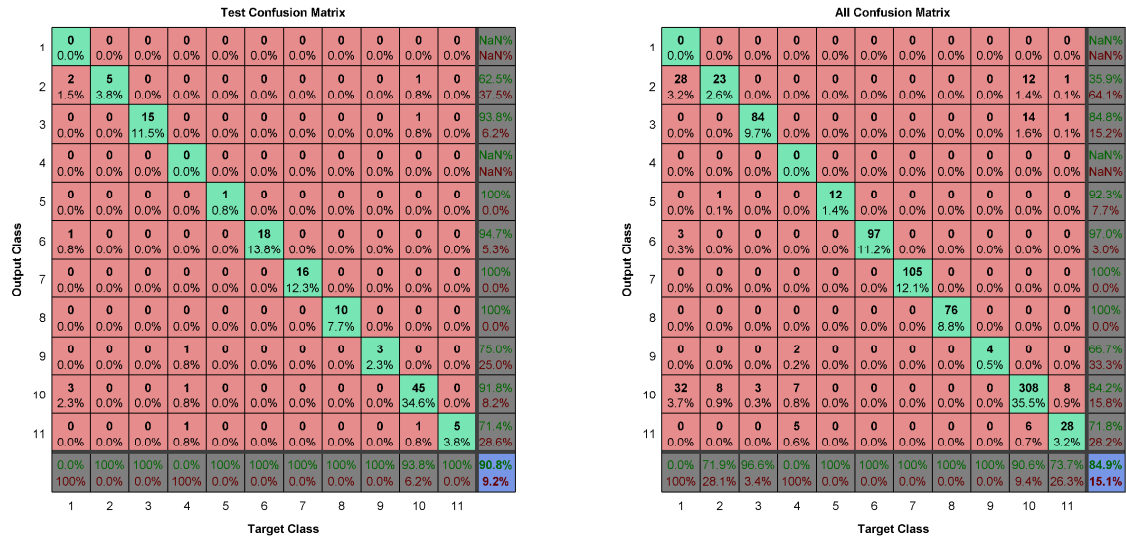
- ANN nauczona na wynikach indywidualnych prowadzi do wyższego prawdopodobieństwa prawidłowej klasyfikacji; na



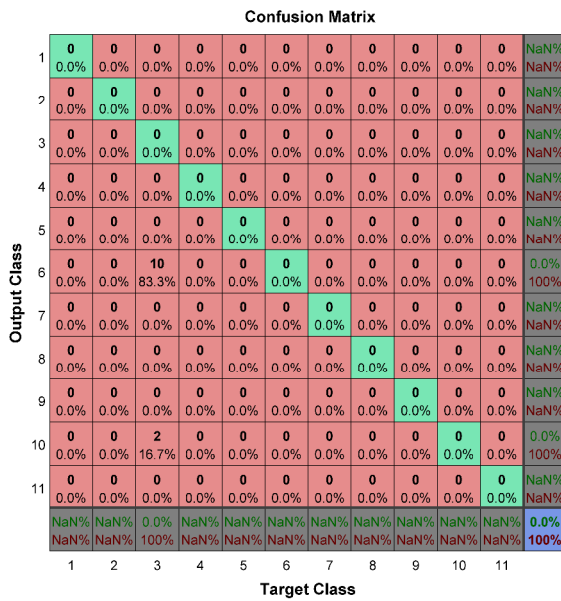
- Rysunek 17 oraz Rysunek 18 z macierzy testowych (strona lewa) można porównać, że ogólny wskaźnik sukcesu dla ANN nauczonej na wynikach indywidualnych wynosi 90.8% podczas gdy dla ANN nauczonej na wynikach średnich ten wskaźnik wynosi 77.3%.
- W zakresie walidacji (Rysunek 19 oraz Rysunek 20), model na wynikach indywidualnych był bezbłędny (100%), podczas gdy model na wynikach średnich dał całkowicie błędą klasyfikację (0%).
- Pewnym zaskoczeniem jest zachowanie modelu na wynikach indywidualnych dla grupy 1 (BAN) – model całkowicie błędnie sklasyfikował tą grupę i przypisał widma do grupy 2 (BBT) i 10 (SMA).



Rysunek 17. Macierz pomyłek (testowa i zbiorcza) dla ANN nauczonej na wynikach średnich



Rysunek 18. Macierz pomyłek (testowa i zbiorcza) dla ANN nauczonej na wynikach indywidualnych



Rysunek 19. Walidacja modelu klasyfikacyjnego ANN z wartości średnich dla odcinka 002

Confusion Matrix

Output Class	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	NaN%
2	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	NaN%
3	0 0.0%	0 0.0%	65 100%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	NaN%
5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	NaN%
6	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	NaN%
7	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	NaN%
8	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	NaN%
9	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	NaN%
10	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	NaN%
11	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	NaN%
	NaN%	NaN%	100%	NaN%	NaN%	NaN%	NaN%	NaN%	NaN%	NaN%	100%
	NaN%	NaN%	0%	NaN%	NaN%	NaN%	NaN%	NaN%	NaN%	NaN%	0%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Target Class										

Rysunek 20. Walidacja modelu klasyfikacyjnego ANN z wartości indywidualnych dla odcinka 002

Należy zauważyć, że nie przeprowadzono optymalizacji modeli ANN zaprezentowanych powyżej. Ograniczono się jedynie do porównania dwóch scenariuszy (na wartościach indywidualnych i wartościach średnich). Ponadto można by zwiększyć skuteczność i użyteczność takich modeli poprzez dodanie nowych danych wejściowych, jak np. cechy powierzchniowe czy informację o porowatości czy sztywności. Nie mniej jednak, modele ANN zaprezentowane powyżej skutecznie klasyfikowały grupy nawierzchni na podstawie przebiegu ich widm i taka interpretacja powinna być dalej rozwijana w celu kompleksowego opisu widma akustycznego.

3.2.2. Korelacja pomiędzy metodami terenowymi

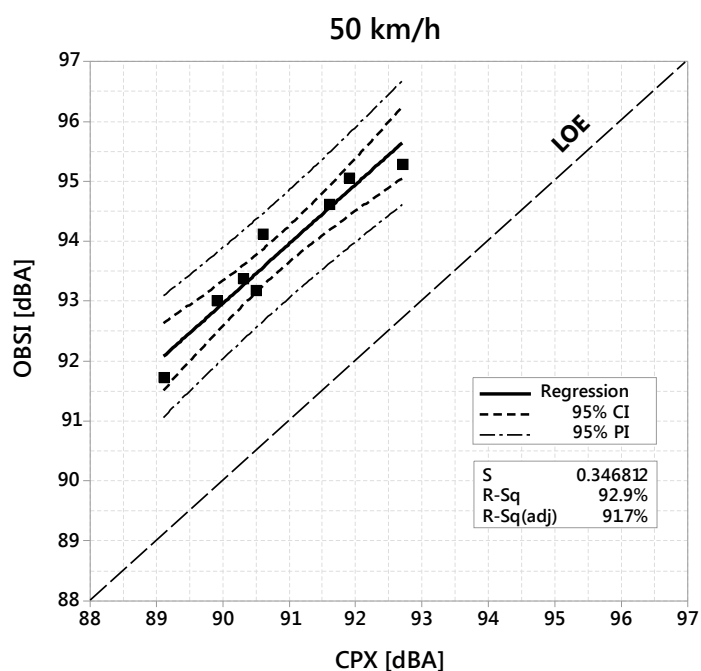
Jak omówiono wcześniej (porównaj Tablica 2), na znacznej liczbie odcinków pomiary zostały wykonane więcej niż jedną metodą w celu określenia ich wzajemnej korelacji. Należy jednak ponownie zwrócić uwagę (porównaj Zadanie 1, punkt 3.2), że rozpatrywane metody terenowe (czyli CPX, OBSi i SPB) koncepcyjnie różnią się i albo nie mierzą tych samych wielkości (CPX vs. OBSi, SPB vs. OBSi) albo potencjalnie rozpatrują różne źródła dźwięku (SPB vs. CPX). Mimo tych różnic, w literaturze można spotkać szereg prac, w których zostały porównane te metody, więc i w tym zadaniu zestawiono ze sobą wyniki uzyskane z tych trzech metod terenowych.

Przeprowadzono następujące porównania na wartościach średnich, dla opony SRTT i innych warunków nominalnych:

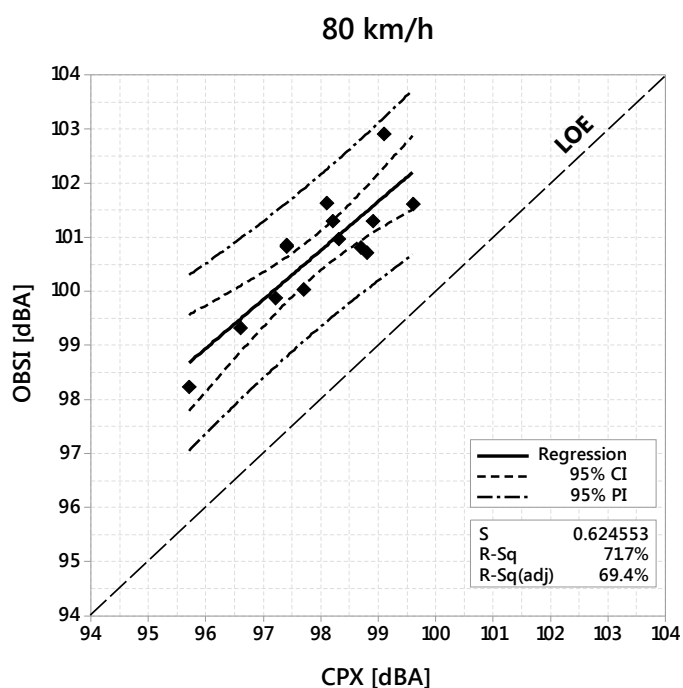
- CPX i OBSi przy 50 km/h,
- CPX i OBSi przy 80 km/h,
- CPX i SPBI,
- OBSi i SPBI.

Należy pamiętać o niepewności pomiarów – w metodach CPX i OBSI wynosi ona w przybliżeniu 0.3 do 0.5 dBA. Analiza w tym rozdziale została wykonana z uwzględnieniem tylko wartości średnich.

Rysunek 21 i Rysunek 22 pokazują regresje przy dwóch różnych prędkościach. W celu wykonania tych obliczeń, wyniki OBSI interpolowano liniowo pomiędzy prędkościami pomiarowymi. Na obu rysunkach widać dobrą (Rysunek 22) bądź bardzo dobrą (Rysunek 21) zbieżność obu metod. Przy 80 km/h można zaobserwować większy rozrzut wyników i z tego względu większe zakresy przedziałów predykcji (PI).

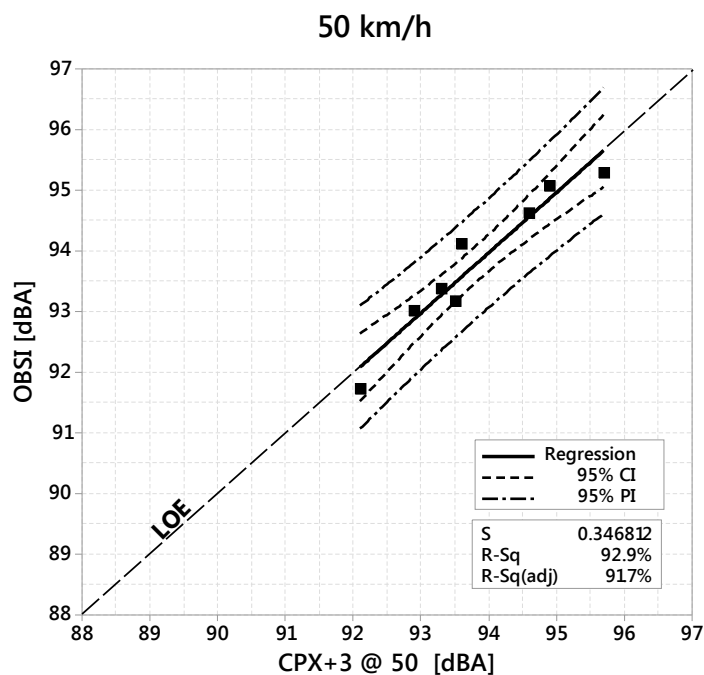


Rysunek 21. Regresja liniowa pomiędzy CPX a OBSI przy 50 km/h

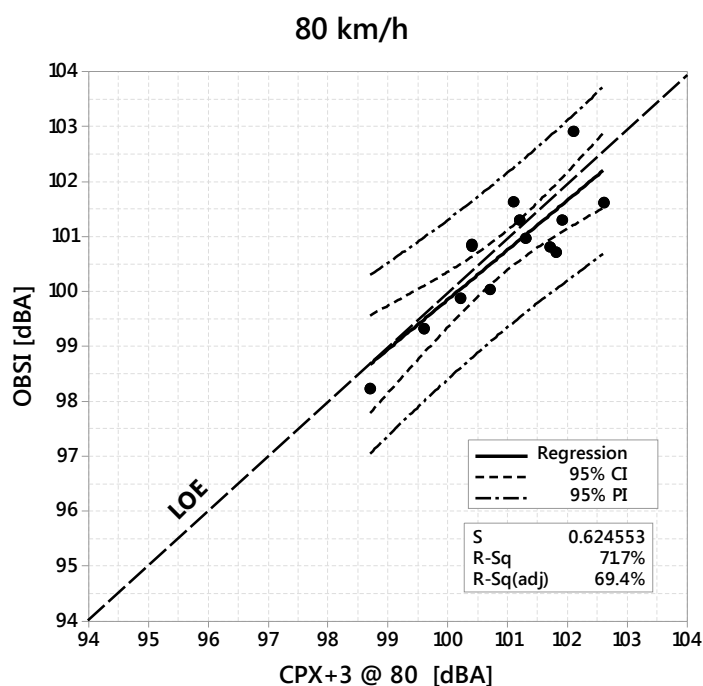


Rysunek 22. Regresja liniowa pomiędzy CPX a OBSI przy 80 km/h

Po analizie regresji i na podstawie literatury, przesunięto równolegle krzywą regresji o 3 dBA (czyli dodano do wyników CPX +3.0 dBA) przy każdej prędkości. Wyniki są pokazane na Rysunek 23 i Rysunek 24. Współczynnik determinacji oczywiście nie uległ zmianie, ale otrzymano punkty leżące po obu stronach prostej 1:1 (ang. line of equality, LOE). Dla porównania w literaturze takie przesunięcie jest równe np. 2.4 lub 2 dBA w zależności od prędkości (więcej w przeglądzie literatury w załączniku do Zadania 1).



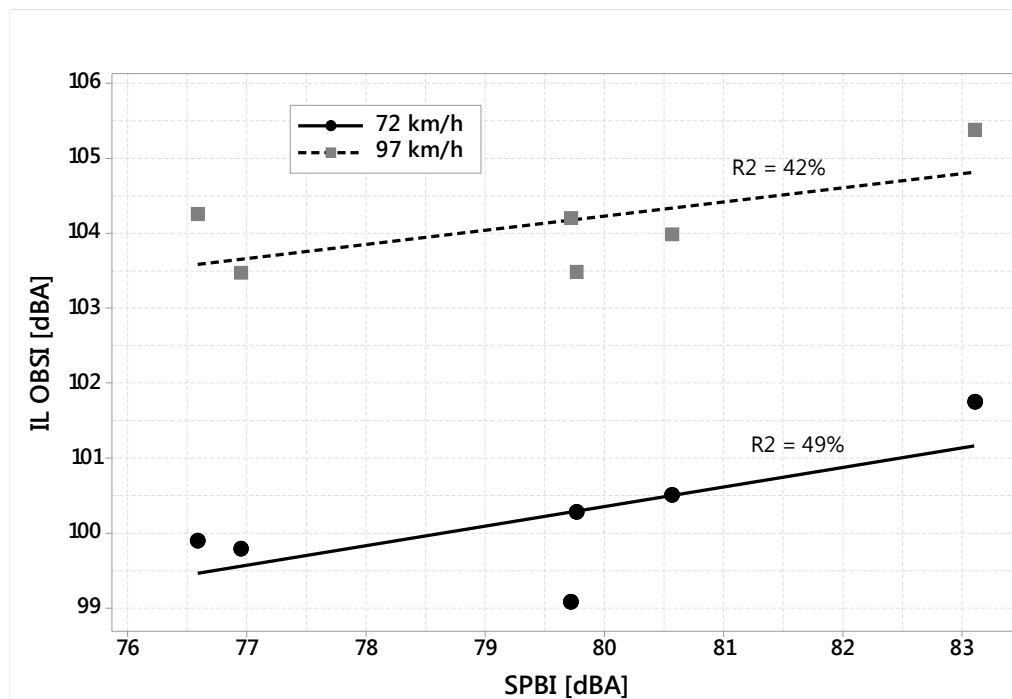
Rysunek 23. Regresja liniowa pomiędzy CPX a OBSI przy 50 km/h po przesunięciu równoległym



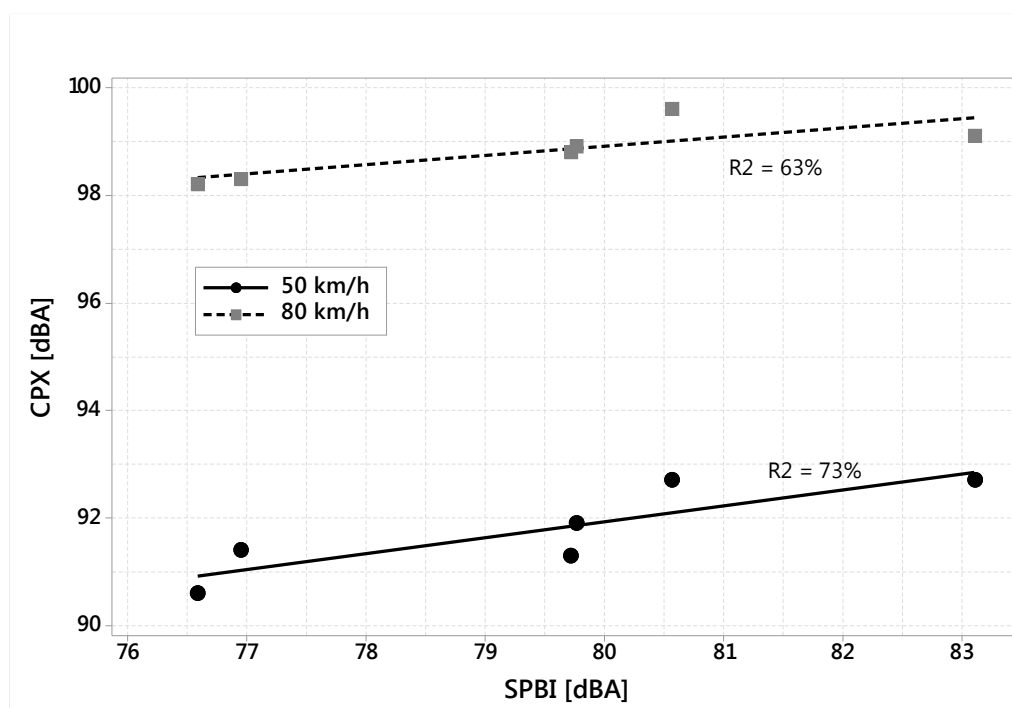
Rysunek 24. Regresja liniowa pomiędzy CPX a OBSI przy 80 km/h po przesunięciu równoległym

Oczywiście należy pamiętać, że współczynniki regresji mają również przedziały ufności i tak na przykład dla regresji przy 50 km/h 95% przedział ufności dla współczynnika nachylenia wynosi (0.717, 1.266) a odpowiednio dla 80 km/h (0.547, 1.261). Są to zdecydowanie znaczące przedziały i tylko więcej pomiarów porównawczych mogłoby zweryfikować te przedziały.

Przeprowadzono również porównanie obu metod „przy źródle” z metodą SPB (Rysunek 25 i Rysunek 26). Porównania dla obu metod, bez względu na prędkość są statystycznie niewielkie. Dla przykładu, 95% przedziały ufności dla współczynnika nachylenia wynoszą odpowiednio (-0.106, 0.627) dla OBSI przy 72 km/h oraz (0.0482, 0.5420) dla CPX przy 50 km/h. Widać że oba są blisko lub poniżej zera, co świadczy właściwie o braku korelacji.



Rysunek 25. Porównanie wyników z OBSI i SPBI



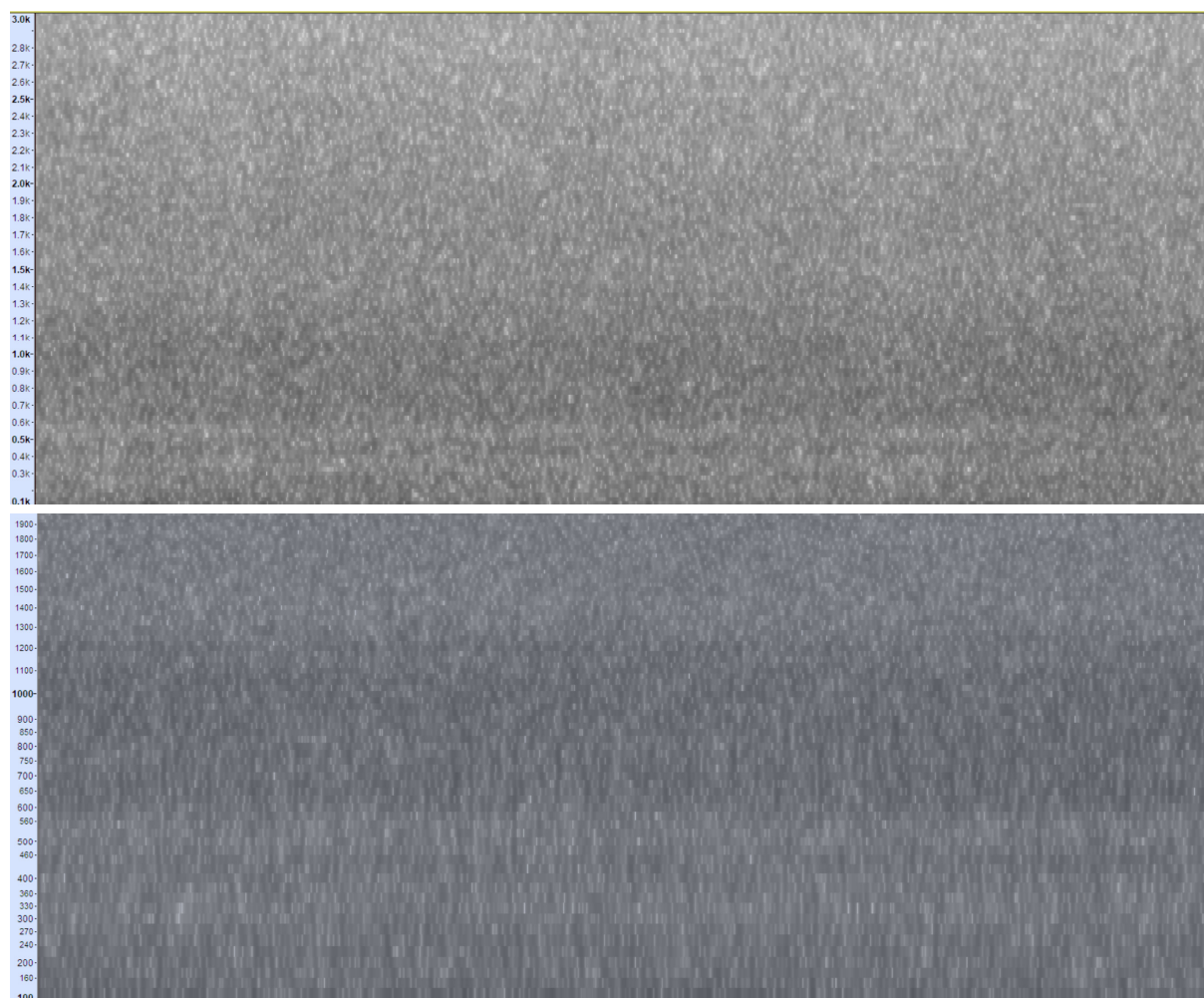
Rysunek 26. Porównanie wyników z CPX i SPBI

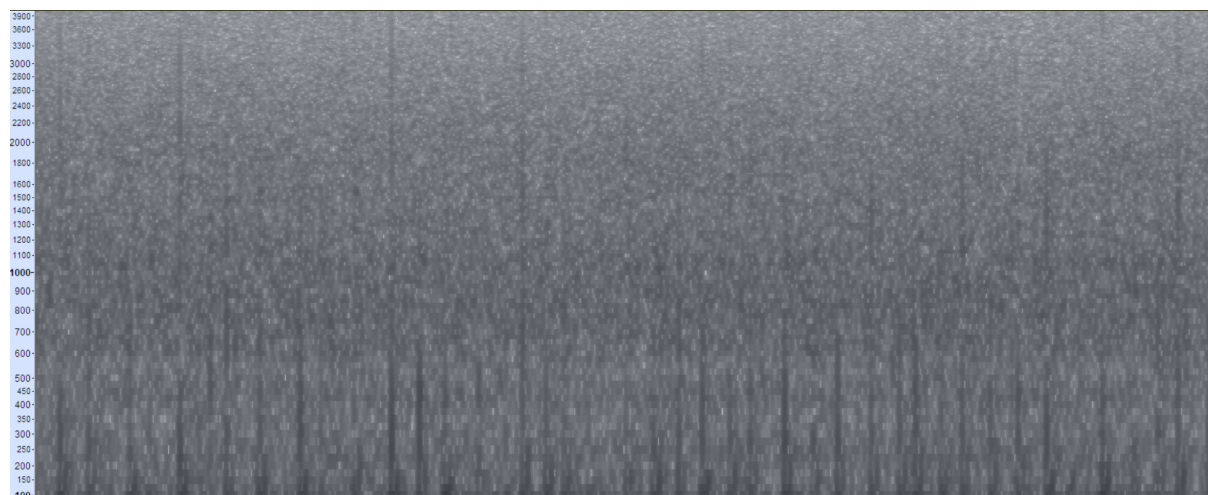
3.2.3. Wnioski do Wytycznych z analizy

Na podstawie powyższych analiz można sformułować następujące wnioski:

1. Można pogrupować wszystkie pomierzone nawierzchnie w 11 charakterystycznych grup.

2. Istnieje częstotliwość rozgraniczająca (1250 Hz), która dzieli wyznaczone wartości IL na dwie grupy. Wartości IL w górnej grupie (powyżej 1250 Hz) w statystycznie większym stopniu wyjaśniają wariancję pomiędzy grupami nawierzchni.
3. W zakresie modeli klasyfikacyjnych pokazano, że znacznie wyższą skuteczność ma model ANN nauczony na wynikach indywidualnych. Aczkolwiek, nawet ten model miał duże trudności z klasyfikacją grupy BAN (nowa nawierzchnia z BA) i błędnie sklasyfikował ją jako grupę z nawierzchniami BBTM lub jako grupę z nawierzchniami SMA. Tego typu analiza wymaga dalszych prac i nie została uwzględniona w Wytocznych.
4. Zidentyfikowano bardzo dobrą fenomenologiczną zależność pomiędzy wynikami z pomiarów CPX i OBSI, która praktycznie doprowadza obie metody do zgodności 1:1. Należy jednak zwrócić uwagę na znaczne przedziały predykcji dla przyszłych obserwacji (szerokości nawet 2.5 dBA dla 80 km/h) co oznacza, że powiązanie wyników z obu metod jest niepewne i korzystanie z takiego modelu predykcji może prowadzić do znacznych błędów.
5. Powiązanie obu metod „przy źródle” (czyli CPX i OBSI) z metodą SPB jest znacznie słabsze co nie jest „zaskoczeniem”, gdyż te metody różnią się pod względem źródła dźwięków i mierzonych wielkości.
6. Warto w przyszłości zbadać sygnały z różnych nawierzchni z wykorzystaniem analizy czasowo-częstotliwościowej i cyfrowej analizy obrazu. Przykłady z pomiarów na trzech różnych nawierzchniach w tym projekcie RID pokazano na Rysunek 27.





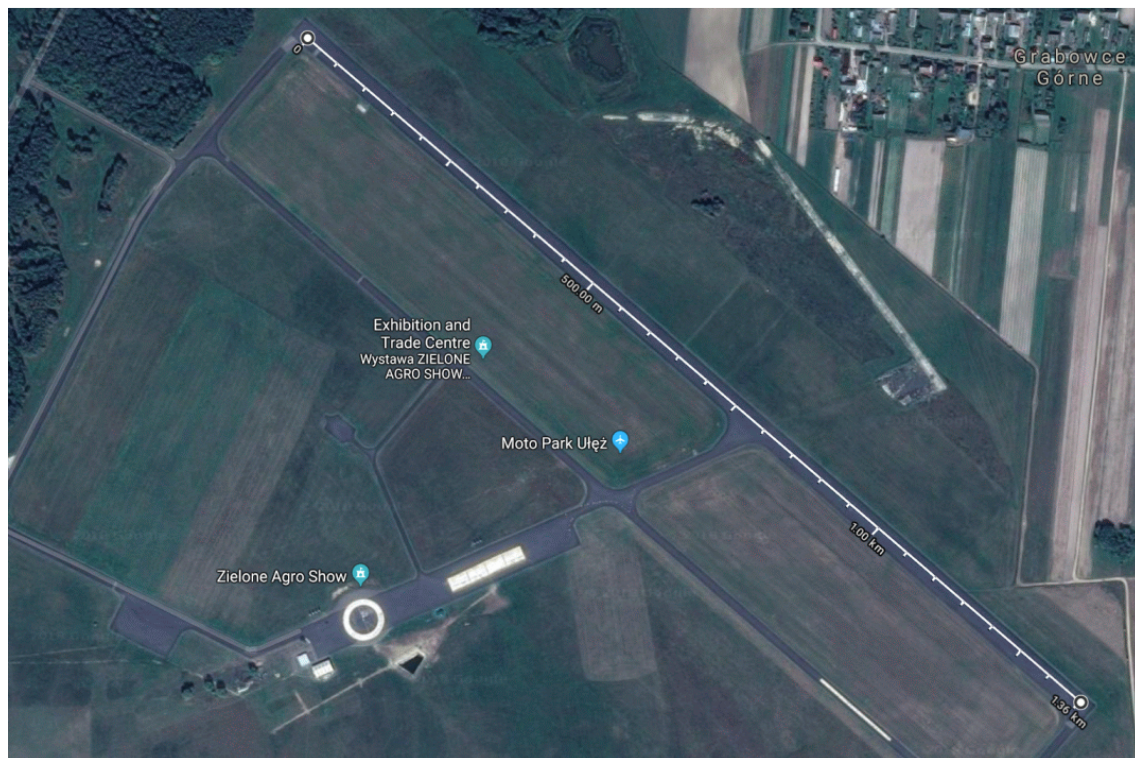
Rysunek 27. Przykłady spektrogramów dla nawierzchni, i) nowa SMA, ii) nowy BC, iii) BC na PCC04 (rok budowy 1938 r.) (x: czas s, y: częstotliwość Hz)

3.3. Weryfikacja metodyki pomiaru hałaśliwości na niezależnym odcinku testowym ITS

Po zakończeniu większości pomiarów na innych odcinkach (do Zadań 1, 2, 3, 5), przeprowadzono weryfikację metodyk pomiarów hałaśliwości i funkcji korelacji na niezależnym odcinku testowym ITS (odcinek 002). Odcinek testowy znajduje się na nieczynnym lotnisku w Ułężu, niedaleko Dębłina, około 120 km na południowy-wschód od Warszawy. Odcinek ma oznaczenie 002 na mapie na Rysunek 2 i Rysunek 3.

3.3.1. Opis odcinka i zakres badań

Nieczynne lotnisko, a obecnie Moto Park Ułęż, dysponuje pasem startowym o szerokości 30 m i długości około 1400 m (Rysunek 28). W całości pas ma nawierzchnię asfaltową (beton asfaltowy, BA), w ogólnie średnim stanie z licznymi spękaniami i nierównościami wynikającymi z wieku nawierzchni (około 20 lat).



Rysunek 28. Plan sytuacyjny lotniska w Uleżu (51.618327, 22.099914)

W ramach badań weryfikacyjnych, na lotnisku przeprowadzono pomiary trzema urządzeniami: CPX, OBSI oraz ROSSA (rura impedancyjna) – porównaj Rysunek 29. Kolejne rozdziały przedstawiają w szczególności zakres pomiarów i odpowiadającą analizę.



Rysunek 29. Urządzenia OBSI, CPX oraz ROSSA (tuba) na lotnisku w Uleżu

3.3.2. Weryfikacja metodyki pomiarów CPX

Badania metodą CPX na lotnisku w Ułężu służyły kilku celom:

- zebraniu danych pomiarowych do porównania z metodą OBSI oraz wynikami z badań tubą impedancji akustycznej, w warunkach zbliżonych do wzorcowych, bez udziału innych źródeł hałasu niż opona poruszająca się po nawierzchni drogi, bez odbić dźwięku od innych powierzchni niż nawierzchnia drogi,
- określeniu zmienności poziomu dźwięku w metodzie CPX w zależności od prędkości pomiarowej,
- sprawdzeniu wpływu wysokości instalacji mikrofonów w stosunku do powierzchni drogi.

Na nawierzchni pasa startowego lotniska w Ułężu ustalono tor pomiarowy, o długości 1000 m, na którym prowadzono badania w obu kierunkach. Łącznie wykonano ok. 70 przejazdów, z czego część miała charakter próbny i służyła ustaleniu miejsca lokalizacji początku i końca toru testowego i sprawdzeniu osiągow zestawu pomiarowego. Pozostałe pomiary, w liczbie 56 wykorzystano do analiz. Badania z prędkością 100 km/h wykonywano na odcinku długości 500 m, ze względu na trudności z rozpędzeniem, a następnie wyhamowaniem urządzenia na pasie startowym.

Dla każdej prędkości pomiarowej: 30 km/h, 50 km/h, 60 km/h, 80 km/h, 100 km/h oraz na obu oponach referencyjnych wykonano po 4 przejazdy, po 2 w każdym kierunku. Ponadto przeprowadzono badania, w których zmieniano wysokość instalacji mikrofonów. Przyjęto dwie pozycje: 9 cm i 11 cm nad powierzchnią jezdni. Badania prowadzono w dwóch prędkościach 50 km/h i 80 km/h, na obu oponach referencyjnych.

Niektóre zarejestrowane dla segmentów testowych wartości L_{CPX} należało odrzucić ze względu na lokalne zakłócenia dźwięku wynikające z jednoczesnych badań metodami CPX i OBSI. Dotyczy to przypadku, gdy pojazd z zestawem pomiarowym OBSI przejeżdżał w pobliżu wykonującej pomiary przyczepy Tiresonic Mk.4.

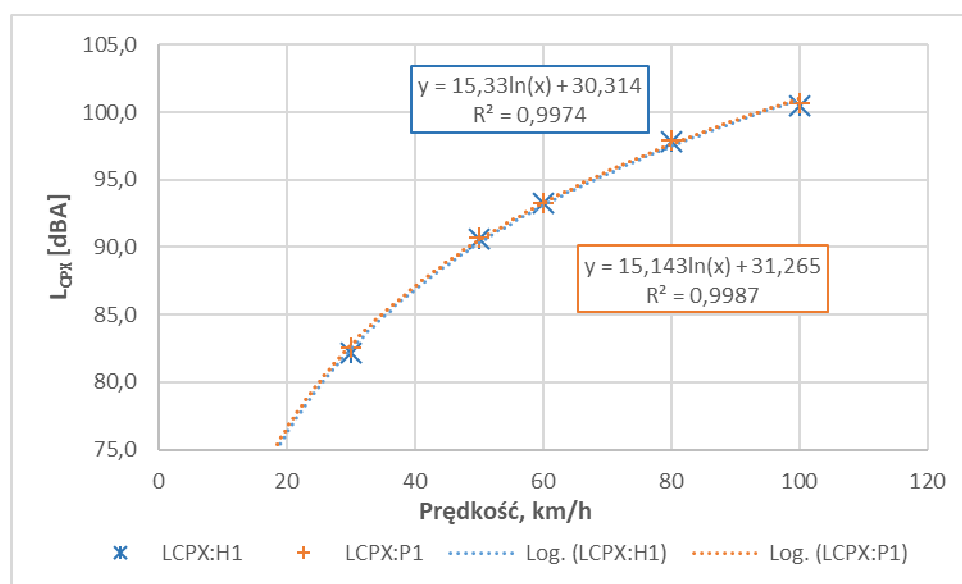
Badania wykonywano zgodnie z „Propozycją wytycznych prowadzenia pomiarów hałaśliwości nawierzchni dla metody CPX” (Załącznik 4.2). Należy stwierdzić, że stosowanie w badaniach przyczepy Tiresonic Mk.4 (wraz z oponami referencyjnymi P1 i H1) zapewnia spełnienie wszystkich wymagań określonych w normie „PN-EN ISO 11819-2:2017-06 - Akustyka - Pomiary wpływu nawierzchni dróg na hałas drogowy - Część 2: Metoda pomiaru w polu bliskim” i opracowanej w niniejszej pracy metodyce.

Poniżej, w Tablica 5 zestawiono uśrednione wyniki pomiarów metodą CPX na lotnisku, w różnych prędkościach pomiarowych. Wyniki te przedstawiono również w formie graficznej, na Rys. 1.

Tablica 5. Wyniki pomiarów CPX na lotnisku w Ułężu

Prędkość	Statystyki	Wyniki pomiarów w kolejnych przejazdach			
		1	2	3	4
Opona AVON (H1)					
30 km/h	średnia	82,1	82,3	82,1	82,2
	odchylenie stand.	0,4	0,5	0,5	0,4
50 km/h	średnia	90,7	90,7	90,5	90,5
	odchylenie stand.	0,5	0,4	0,4	0,4
60 km/h	średnia	93,2	93,5	93,1	93,1

	odchylenie stand.	0,5	0,6	0,5	0,4
80 km/h	średnia	98,0	97,8	97,8	97,7
	odchylenie stand.	0,6	0,5	0,5	0,5
100 km/h	średnia	100,6	100,2	100,6	100,4
	odchylenie stand.	0,7	0,4	0,6	0,7
Opona SRTT (P1)					
30 km/h	średnia	82,7	82,5	82,5	82,5
	odchylenie stand.	0,9	0,6	0,9	0,9
50 km/h	średnia	90,8	90,8	90,7	90,7
	odchylenie stand.	0,7	0,5	0,6	0,6
60 km/h	średnia	93,4	93,5	93,2	93,3
	odchylenie stand.	0,6	0,6	0,6	0,5
80 km/h	średnia	97,9	97,8	97,9	97,9
	odchylenie stand.	0,5	0,5	0,6	0,5
100 km/h	średnia	100,8	100,6	100,5	100,7
	odchylenie stand.	0,7	0,8	0,6	0,6



Rysunek 30. Uśrednione wyniki pomiarów CPX na lotnisku w Ułężu

Wyniki badań wskazują na niewielkie różnice w badaniach uzyskanych na obu oponach. Związane jest to prawdopodobnie ze specyfiką powierzchni, na której wykonywano pomiary. Podobieństwo widać również w funkcji linii trendu wyznaczonej dla wartości uśrednionych z przejazdów (Rysunek 30). W większości badań wykonanych w niniejszej pracy, na innych odcinkach, wyższe wartości notowano w pomiarach prowadzonych na oponie testowej H1, średnio o ok. 0,6 dB. Na kilku odcinkach obserwowano jednak podobny trend jak na lotnisku w Ułężu.

Przeprowadzono również analizę różnic między wartościami L_{CPX} uzyskanymi w przejazdach przez odcinek testowy, na tej samej oponie, w tym samym kierunku i w takiej samej prędkości pomiarowej. Wyniki porównania przedstawiono w Tablica 6.

Tablica 6. Różnice między wartościami uzyskiwanymi w dwóch przejazdach w tych samych warunkach pomiarowych

Prędkość	Różnice w poziomach L_{CPX} w kolejnych przejazdach	
	opona AVON (H1)	opona SRTT (P1)

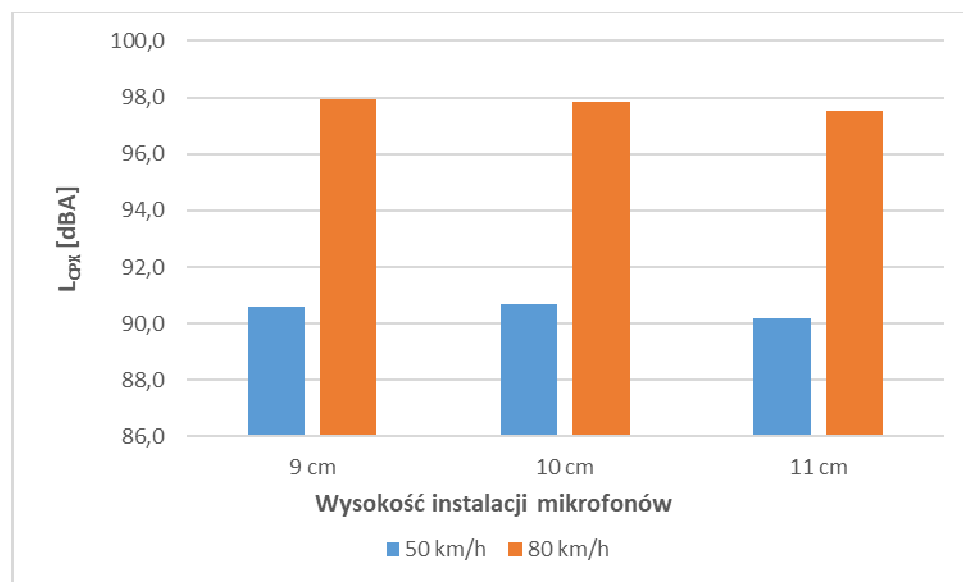
	1 i 3	2 i 4	1 i 3	2 i 4
30 km/h	0,0	0,1	0,2	0,1
50 km/h	0,2	0,2	0,1	0,1
60 km/h	0,0	0,4	0,2	0,2
80 km/h	0,2	0,1	0,0	0,1
100 km/h	0,1	0,2	0,3	0,1

Wyniki, przedstawione w Tablica 6 wskazują na niewielkie różnice poziomów L_{CPX} wartości w kolejnych przejazdach. Nie przekraczają wartości granicznych 0,5 dB, określonych w normie oraz w „Propozycji wytycznych ...”. Średnia wartość uzyskanych różnic wyniosła 0,14 dB.

Wykonano serie pomiarów, na obu oponach referencyjnych P1 i H1 w dwóch prędkościach pomiarowych 50 km/h i 80 km/h, przy trzech wysokościach mikrofonów nad powierzchnią jezdni: 9 cm, 10 cm i 11 cm. Wysokością zalecaną w normie PN-EN ISO 11819-2:2017-06, dla mikrofonów 1 i 2 (lokalizacja obowiązkowa) jest 10 cm, z tolerancją ± 1 cm. Poniżej w Tablica 7. zestawiono wyniki uzyskane w badaniach. Przedstawiono je również na Rysunek 31.

Tablica 7. Wartości L_{CPX} uzyskane dla różnych wysokości mikrofonów

Prędkość	Wysokość mikrofonów nad powierzchnią drogi		
	9 cm	10 cm	11 cm
50 km/h	90,6	90,7	90,2
80 km/h	97,9	97,8	97,5



Rysunek 31. Wartości L_{CPX} w zależności od wysokości instalacji mikrofonów

Z uzyskanych wyników pomiarów wynika, że obniżenie wysokości mikrofonów o 1 cm nie wpływa w zasadniczy sposób na uzyskiwane wartości L_{CPX} , natomiast w przypadku zwiększenia wysokości montażu mikrofonów o 1 cm zaobserwowano obniżenie wartości L_{CPX} , średnio o ok. 0,4 dB.

3.3.3. Weryfikacja metodyki pomiarów OBSI

Pomiary OBSI na torze w Ułężu przeprowadzono według podobnej procedury co pomiary na odcinkach eksperymentalnych 001 i 002, które są zaprezentowane w Zadaniu 1. W eksperymencie na odcinku w Ułężu zbadano wpływ następujących czynników:

- prędkość pojazdu w czasie pomiaru,
- ciśnienie w oponie,
- pozycja czujników nad nawierzchnią.

W sposób losowy wybrano prędkości pomiarowe do kolejnych przejazdów, podczas gdy ciśnienie w oponie oraz pozycja czujników była ustalona ze względów praktycznych. Używano tylko opony STN (nowa SRTT). Dla wszystkich rozpatrywanych kombinacji czynników wykonano przynajmniej dwa przejazdy a każdy przejazd składał się z kilku 134 metrowych sekcji pomiarowych. Procedura jest dokładnie wyjaśniona w Załączniku 1.3 do raportu z Zadania 1. Czynniki i ich poziomy w tym eksperymencie są pokazane w Tablica 8.

Tablica 8. Czynniki i ich poziomy zaplanowane w eksperymencie na odcinku 002

Poziomy czynnika	Prędkość pomiaru [km/h]	Ciśnienie w oponie [psi/kPa] i oznaczenie	Pozycja czujników nad nawierzchnią [mm] i oznaczenie	Wiek opony SRTT [lata] i oznaczenie
1	48	26/179 L	66 l	0 STN
2	72	34/234 N	76 b	-
3	84	42/290 H	86 h	-
4	97	-	-	-

Tablica 9 i Tablica 10 prezentują szczegółowy przebieg eksperymentu. Sumarycznie wykonano 120 przejazdów, w których pozyskano 662 widma akustyczne. Obliczony poziom natężenia dźwięku (IL) sprowadzono do równoważnej temperatury 20°C za pomocą równania:

$$IL_{norm} [dBA] = IL_{pomiar} [dBA] + 0.072 \times (Temp_{Pow} \text{ } ^\circ\text{C} - 20 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad \text{Równanie 1}$$

Tablica 9. Plan eksperymentu na odcinku 002 – część 1

Czynnik obserwowane i kontrolowane	10/18/2017 11:43	10/18/2017 13:03	10/18/2017 14:01
ID bloku*	002A1	002A2	002A3
Temperatura powietrza, °C	21.1	21.9	25.6
Temperatura opony, °C***	25	25	25
Temperatura nawierzchni, °C***	30	30	30

Ciśnienie powietrza, Hg	29.45	29.41	29.42
Typ nawierzchni	HMA	HMA	HMA
Wiek opony	STN	STN	STN
Pozycja	b	b	b
Ciśnienie w oponie	H	N	L
Zestaw prędkości	PZ**	PZ	PZ

* oznaczenie bloku eksperymentu

** pełen zestaw przejazdów (24 przejazdy), lub KZ – krótki zestaw przejazdów (8 przejazdów)

*** oszacowane

Tablica 10. Plan eksperymentu na odcinku 002 – część 2

Czynnik obserwowane i kontrolowane	10/18/2017 15:04	10/18/2017 15:22	10/18/2017 15:58	10/18/2017 16:28	10/18/2017 16:43	10/18/2017 17:02
ID bloku*	002B1	002B2	002B3	002C1	002C2	002C3
Temperatura powietrza, °C	24.1	24.1	24.1	21.3	21.3	21.3
Temperatura opony, °C***	25	25	25	25	25	25
Temperatura nawierzchni, °C***	30	30	30	30	30	30
Ciśnienie powietrza, Hg	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4
Typ nawierzchni	HMA	HMA	HMA	HMA	HMA	HMA
Wiek opony	STN	STN	STN	STN	STN	STN
Pozycja	l	l	l	h	h	h
Ciśnienie w oponie	H	N	L	H	N	L
Zestaw prędkości	PZ**	PZ	PZ	PZ	PZ	PZ

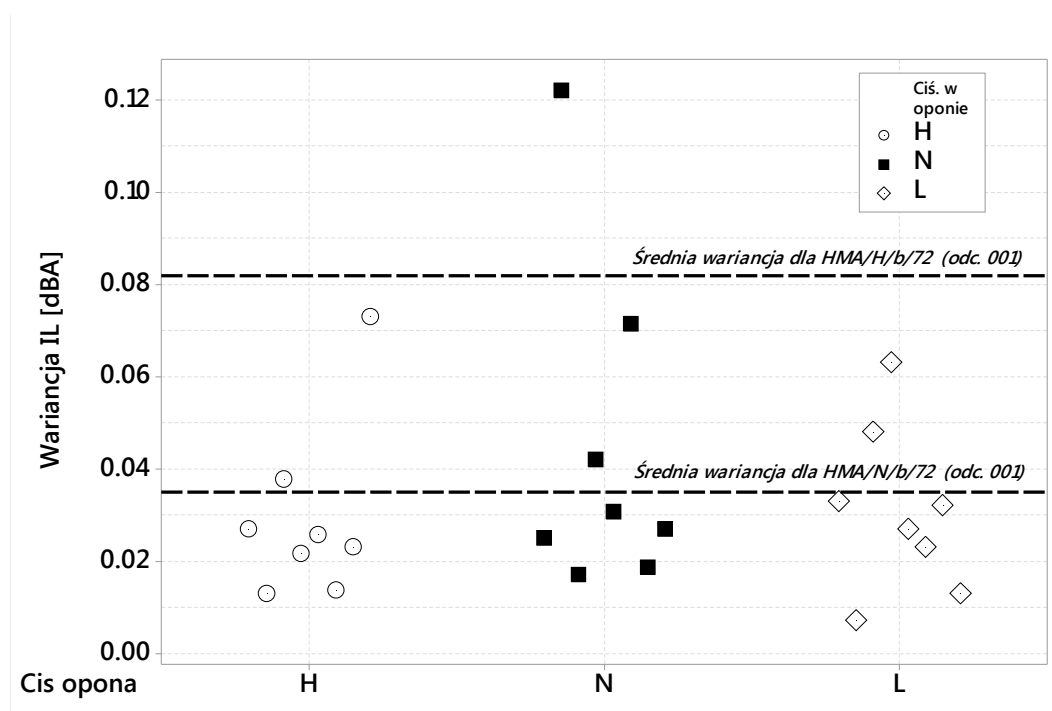
* oznaczenie bloku eksperymentu

** pełen zestaw przejazdów (24 przejazdy), lub KZ – krótki zestaw przejazdów (8 przejazdów)

*** oszacowane

Weryfikacja metodyki polegała na statystycznym sprawdzeniu otrzymanych wyników i porównaniu odpowiednich wielkości z podobnymi wartościami wyznaczonymi w Zadaniu 1 z odcinka 001 (SMA i BA). Należy zwrócić uwagę, że pomiędzy eksperymentem na odcinku 001 a 002 upłynęło blisko pięć miesięcy, więc porównanie wyników pomiarów będzie również zawierało niemierzalne czynniki takie jak wzrost „doświadczenia” operatora czy „zużycie” podzespołów urządzenia OBSI.

Otrzymane wartości wariancji przy 72 km/h są pokazane na Rysunek 32. Dodano również wartości dla nawierzchni BA z odcinka 001 (przy ciśnieniu H i N) – porównaj Rysunek 16 i Tablica 11 w Załączniku 1.3. Sprawdzenie hipotezy o równości wariancji jest przedstawione w Tablica 11. Można stwierdzić, że nie można odrzucić hipotezy o równych wartościach wariancji, więc zastosowana metodyka, ze względu na wariancję, jest stabilna i powtarzalna.



Rysunek 32. Weryfikacja pomiarów na odcinku 002 w zakresie średnich wariancji

Tablica 11. Test na równość wariancji na odcinkach 001 i 002

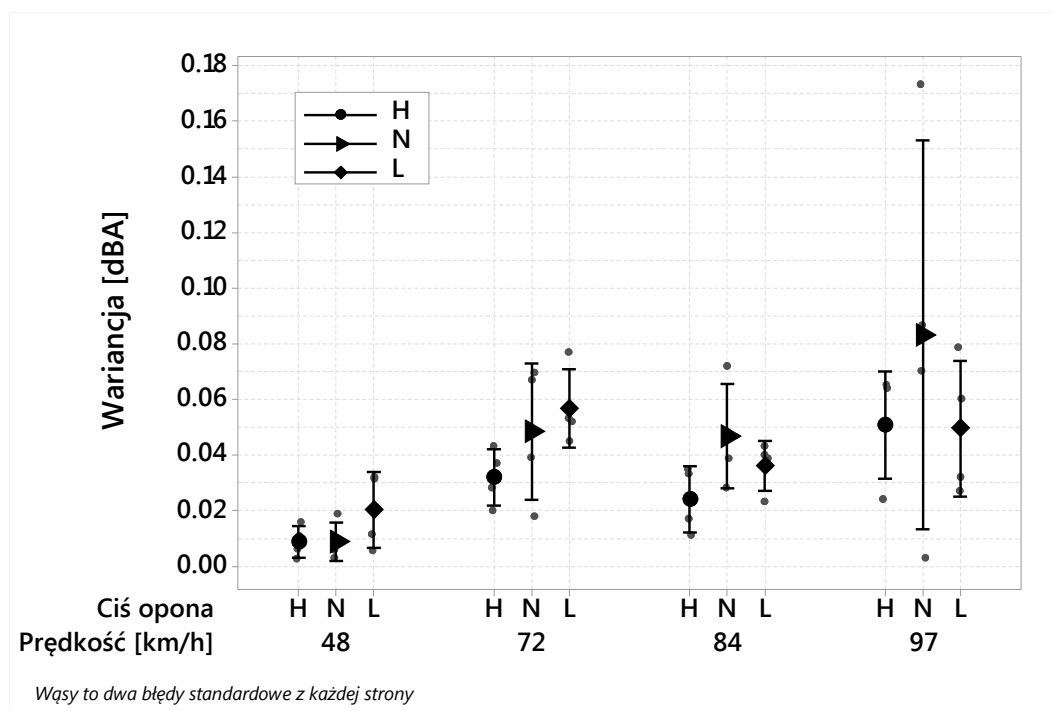
Typ naw. = HMA, Opona = STN, Prędkość 72 km/h, Pozycja b

Ciś. opona	001 Wariancja [dBA]	002 Wariancja [dBA]	F-test: równe wariancje? ($\alpha = 0.05$)	
			p-value	wniosek
H	0.0821	0.0441	0.056	Tak

L	0.232	0.0628	0.000	Nie*
N	0.0352	0.0542	0.182	Tak

* jak zostało wyjaśnione w Załączniku 1.3, pomiary na odcinku 001 przy kombinacji HMA/STN/L były zaburzone i stąd wysoka wariancja (0.232)

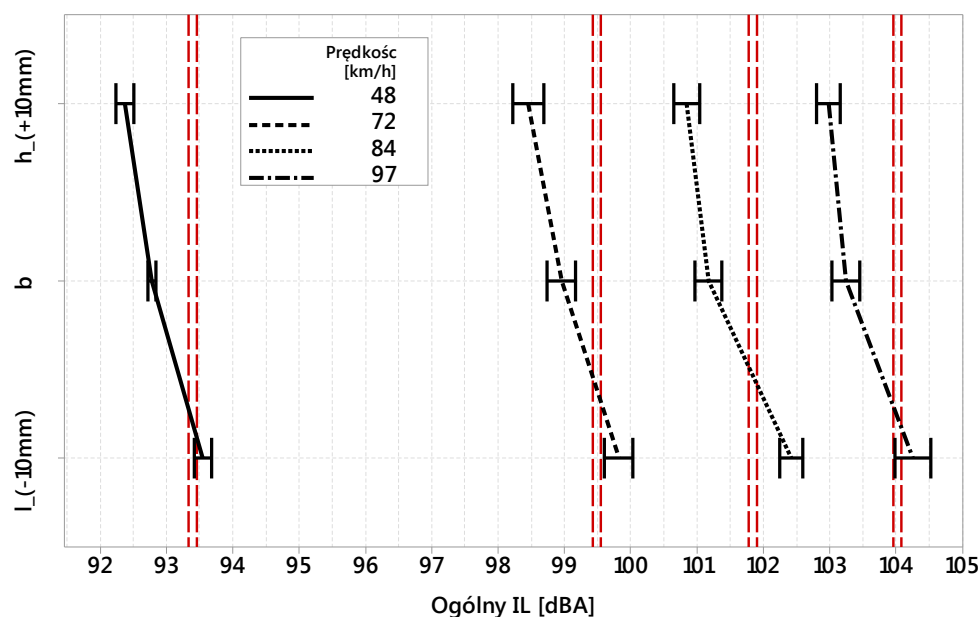
Wariancja została sprawdzona w również w funkcji prędkości. Dokładniej, została wyznaczona z „losowych” części przejazdów z bloków 002A1, 002A2, 002A3 (czyli po cztery przejazdy na każdą prędkość), przy pozycji czujników *b* (76 mm). Okazało się (porównaj Rysunek 33), że największa wariancja jest przy 97 km/h a najmniejsza przy 48 km/h. Przy prędkościach pośrednich (72 i 84 km/h) wariancja jest statystycznie równa. Jest to inna obserwacja niż w przypadku odcinka 001, gdzie uśredniona wariancja była najniższa dla 72 km/h. Nie mniej jednak, wariancja przy 72 km/h na odcinku 002 jest niewielka, rzędu 0.05 dBA co prowadzi do odchylenia standardowego na poziomie 0.22 dBA co jest poniżej wyznaczonej w Zadaniu 1 niepewności standardowej. Należy zwrócić uwagę, na bardzo małe wartości wariancji dla 48 km/h i również stosunkowo niewielkie wartości wariancji dla 72 i 84 km/h – w porównaniu do wartości uzyskanych z pomiarów na odcinku 002 (porównaj Rysunek 25 w Załączniku 1.3).



Rysunek 33. Uśredniona wariancja z podziałem na prędkość i ciśnienie w oponie

W zakresie wpływu pozycji czujników nad powierzchnią, pomiary na odcinku 002 w Ujeździe wykazały zbliżone zależności jak w przypadku odcinka 001 z BA. (porównaj Załącznik 1.3 Rysunek 35). Jak można zauważyć na Rysunek 34, ogólny poziom natężenia dźwięku wzrasta wraz ze zmniejszaniem się odległości do źródła (czyli styku opony z nawierzchnią) ale ta zależność nie jest już liniowa jak było w przypadku pomiarów na odcinku 001. W pomiarach na odcinku 002 można zaobserwować gwałtowniejszy przyrost poziomu IL pomiędzy pozycją zerową (b) a dolną pozycją (l) niż dla przejścia pomiędzy górną pozycją (h) a pozycją zerową (b). Ma to swoje konsekwencje dla predykcji ogólnego IL dla poziomu

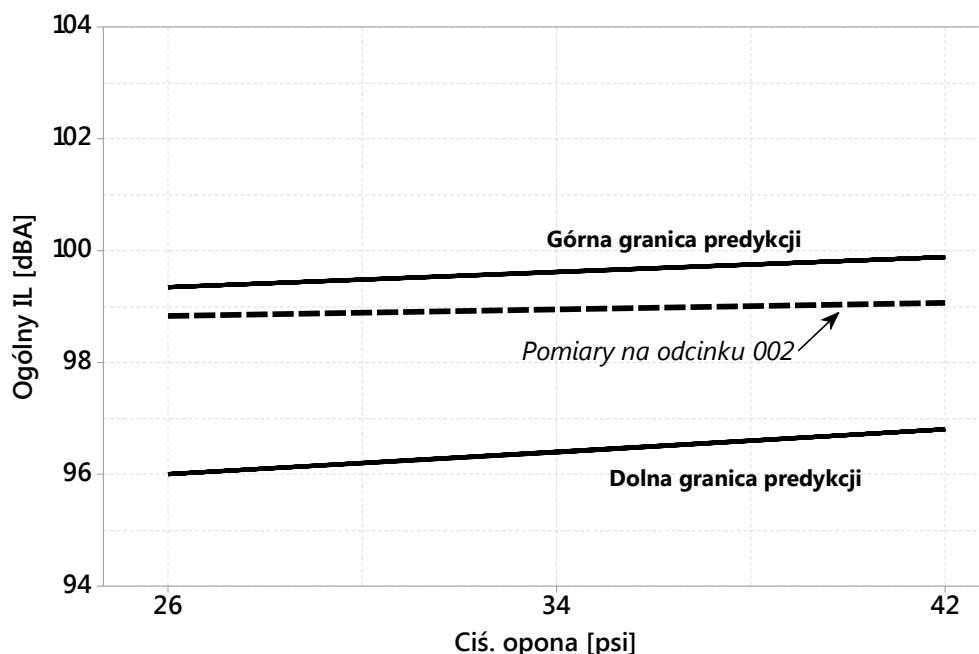
czujników (b) co graficznie reprezentują czerwone pionowe linie przerywane. Zostały one obliczone na podstawie współczynników korekcyjnych zaproponowanych w Zadaniu 1 (porównaj Tablica 29 w Załączniku 1.3). Przyjęto dwa współczynniki korekcyjne do obliczeń, tj. dolny i górny zakres przedziału ufności. Na Rysunek 34 można zaobserwować, że w większości przypadków obliczone wartości IL są zgodne z pomierzonymi wartościami, aczkolwiek wszystkie predykcje są niedoszacowane. Jedną z przyczyn może być stan nawierzchni na odcinku 001 (nowa nawierzchnia dla której były obliczone współczynniki korekcyjne) w porównaniu do nawierzchni na odcinku 002 (nawierzchnia po znaczącym okresie eksploatacji, w średnim stanie).



Results include rows where 'Ciś. opona'="N".

Rysunek 34. Wpływ pozycji czujników nad powierzchnią nawierzchni dla odcinka 002 (przy STN, N); wąsy reprezentują 99% przedziały ufności dla wartości średniej; pionowe linie (przerywane-czerwone) reprezentują predykcje dla poziomu l

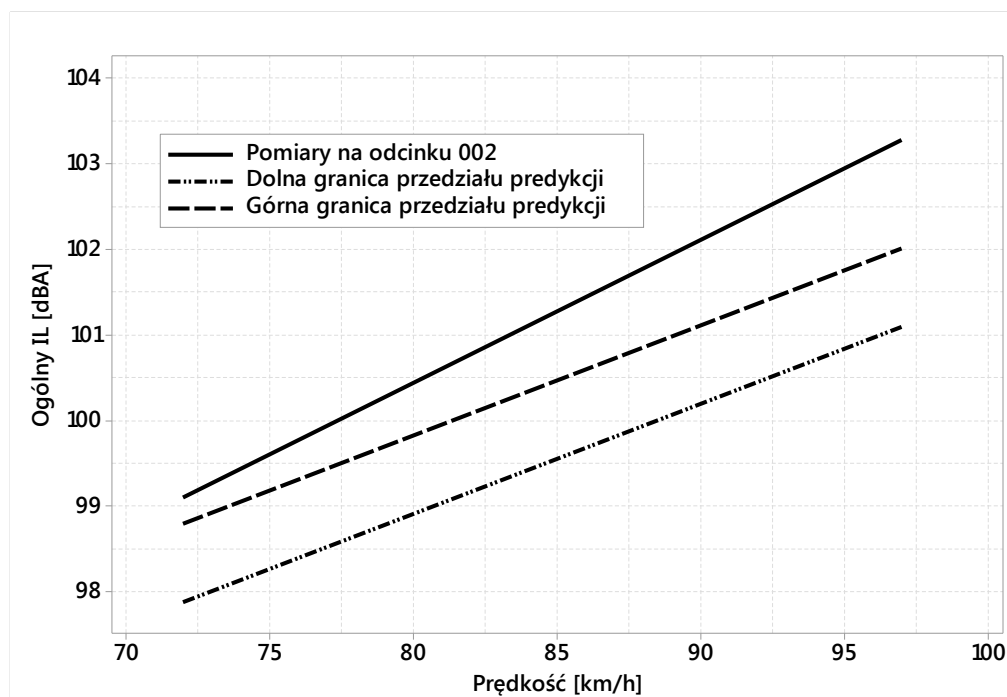
W podobny sposób sprawdzono wpływ ciśnienia na ogólny poziom natężenia dźwięku IL. Rysunek 35 pokazuje linię regresji obliczoną z pomiarów na odcinku 002 i dwie granice predykcji (górną i dolną) wyznaczone na podstawie analizy odcinka 001 (Zadanie 1). Należy zauważyć, że linia reprezentująca pomiary na odcinku 002 znajduje się pomiędzy granicami co potwierdza poprawność współczynników wyznaczonych w Zadaniu 1.



Rysunek 35. Wpływ ciśnienia w oponie dla odcinka 002 (STN, b, bez prędkości jako zmiennej niezależnej); ciągłe linie wyznaczają granice predykcji wyznaczone z odcinka 001

Kolejnym czynnikiem, który został sprawdzony jest prędkość podczas pomiaru. Rysunek 36 i Tablica 12 przedstawiają kolejne porównanie pomiędzy granicami predykcji wyznaczonymi w trakcie Zadania 1 na odcinku 001 a wynikami z pomiarów na odcinka 002. Można wywnioskować, że:

- badania na odcinku 002 doprowadziły do statystycznie wyższego współczynnika przyrostu ogólnego natężenia dźwięku IL w funkcji prędkości; najprawdopodobniej jest to spowodowane gorszym stanem nawierzchni na tym odcinku w porównaniu do odcinka 001 z Zadania 1; wyższy współczynnik można zaobserwować zarówno na Rysunek 36, porównując nachylenie krzywych, jak i w Tablica 12 porównując wartości średnie jak i odpowiadające 95% przedziału ufności,
- ogólnie pomiary na odcinku 002 miały wyższe poziomy natężenia dźwięku niż na odcinku 001 i ta różnica rośnie wraz z prędkością,
- w ujęciu praktycznym, powyższe obserwacje prowadzą do wniosku, że wrażliwość na prędkość dla nawierzchni BA w gorszym stanie może być znacząco większa niż dla nowych nawierzchni.



Rysunek 36. Wpływ prędkości pomiaru dla odcinka 002 (STN, b, N); przerywane linie wyznaczają granice predykcji wyznaczone z 001

Tablica 12. Współczynniki normalizujące ze względu na prędkość – porównanie 002 i 001

001

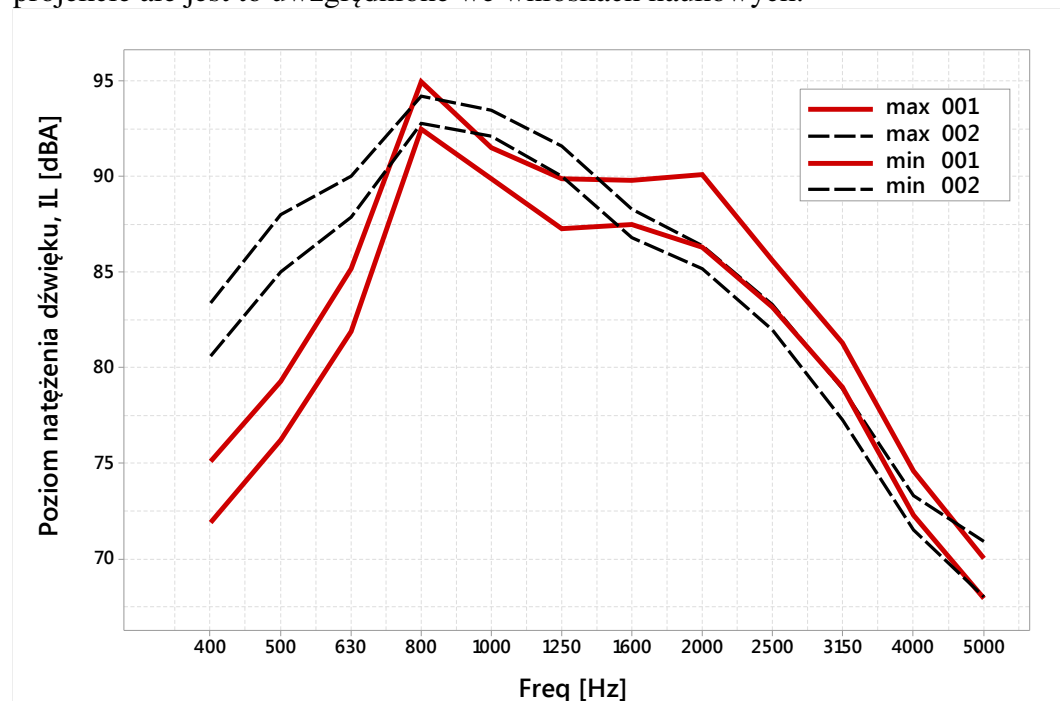
Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value
Constant	89.066	0.182	(88.706, 89.426)	490.69	0.000
Prędkość [km/h]	0.12872	0.00227	(0.12421, 0.13323)	56.62	0.000

002

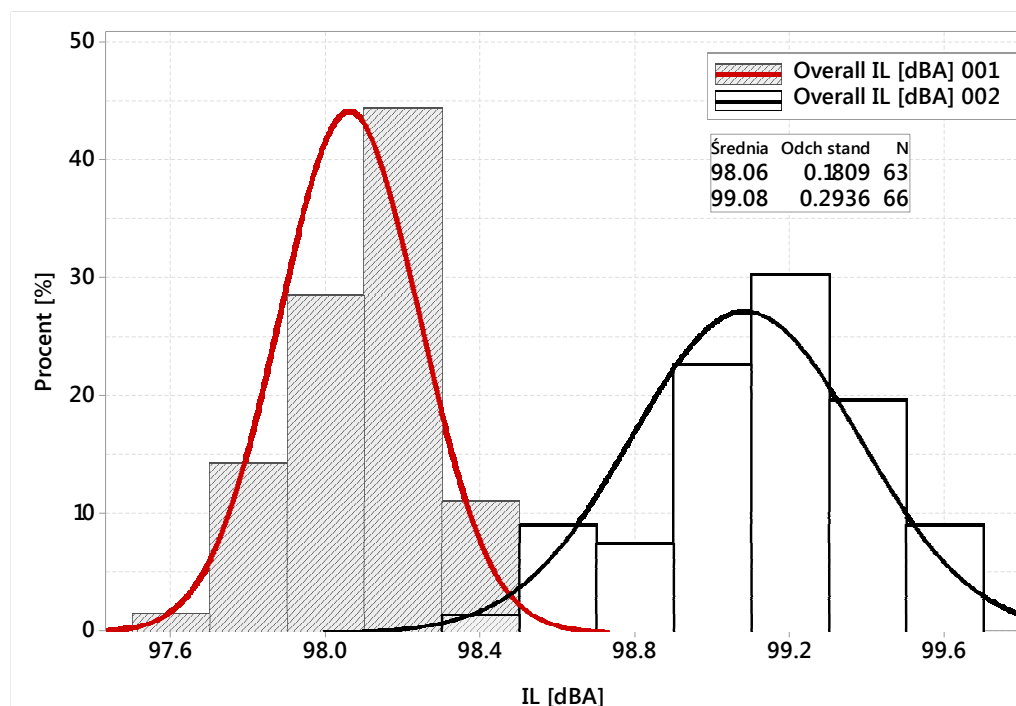
Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value
Constant	87.041	0.244	(86.557, 87.524)	356.98	0.000
Prędkość [km/h]	0.16743	0.00308	(0.16133, 0.17353)	54.43	0.000

W dyskusji nad ogólnym poziomem natężenia dźwięku IL w metodzie OBSI (ale podobna dyskusja dotyczy również ciśnienia dźwięku dla np. metody CPX) należy pamiętać, że wartości reprezentatywne jak np. 98 dBA, są obliczone na podstawie średniej energetycznej wartości poziomu natężenia wyznaczonego dla każdej częstotliwości środkowej pasm 1/3 oktawowych (pomiędzy 400 a 5000Hz). Zatem jest możliwa sytuacja, gdzie różne widma, tj. różne przebiegi uśrednionych poziomów A-ważonych poziomów natężenia w 1/3 pasmach oktawy, prowadzą do zbliżonych wartości reprezentatywnych, tj. ogólnego poziomu natężenia dźwięku IL. Różne widma mogą wynikać z innych zjawisk zachodzących u źródła dźwięku, tj. na styku opony z nawierzchnią i/lub na skutek fali akustycznej pochodzącej od źródeł obcych, tj. zakłóceń pomiarów. Z taką świadomością należy uważnie rozpatrywać wartości reprezentatywne, gdyż percepcja osób wewnątrz

pojazdów jak i na zewnątrz jest również funkcją częstotliwości. Dla przykładu Rysunek 37 przedstawia dwa zestawy widm, jeden dla odcinka 001 a drugi dla odcinka 002. Zakresy widma (min i max) zostały wyznaczone na podstawie wielokrotnych pomiarów na sekcjach pomiarowych obydwu odcinków. Dla przypomnienia, warstwy ściernalne na obu odcinkach są wykonane z BA, ale o zdecydowanie różnym stanie powierzchni. Można zauważyć, że właściwie w całym zakresie częstotliwości oba zakresy widm różnią się znacząco (poza 800 Hz i częściowo 1600 oraz 5000 Hz). Co ciekawe, wartości reprezentatywne dla obu odcinków, czyli ogólne poziomy natężenia dźwięku różnią się statystycznie o 1 dBA co jest przedstawione na Rysunek 38 (95% przedział ufności dla różnicy to (-1.1076, -0.9382)). Główny wniosek z tej dyskusji to konieczność opracowania alternatywnego sposobu przedstawiania wartości reprezentatywnych z pomierzonych wartości natężenia dźwięku tak aby były one bardziej miarodajne i kompletne niż sama wartość średnia z pasm 1/3 oktaowych. W ten sposób byłoby możliwe uwzględnienie np. konceptu wirtualnego widma referencyjnego. Opracowanie takiego sposobu przekraczało zakres prac w niniejszym projekcie ale jest to uwzględnione we wnioskach naukowych.

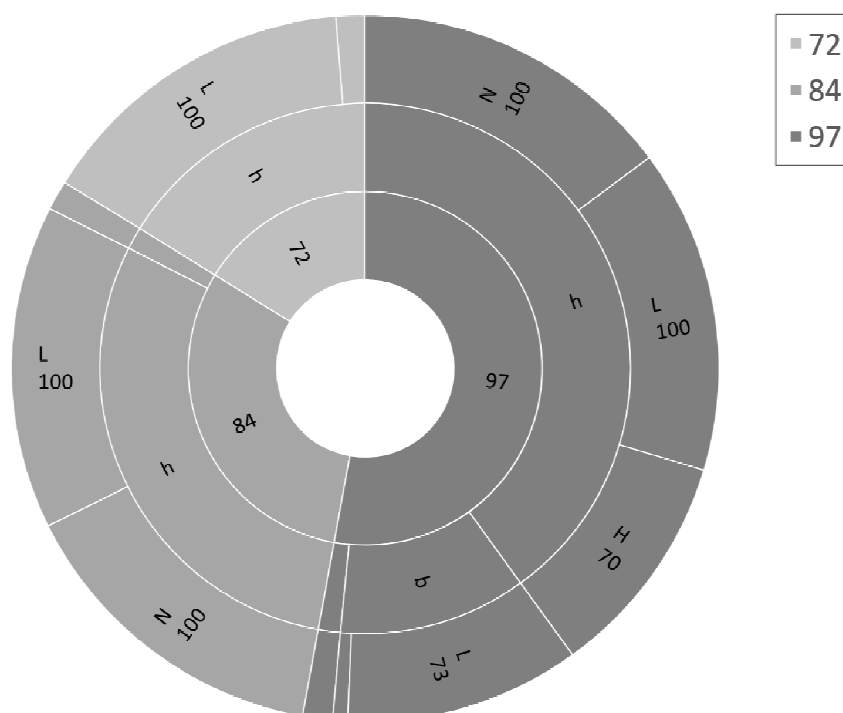


Rysunek 37. Przykładowe przebiegi poziomów natężenia dźwięku (A) zmierzonych dla częstotliwości środkowych pasm 1/3 oktaowych dla odcinka 001 i 002 (BA, STN, b, N, 72 km/h)



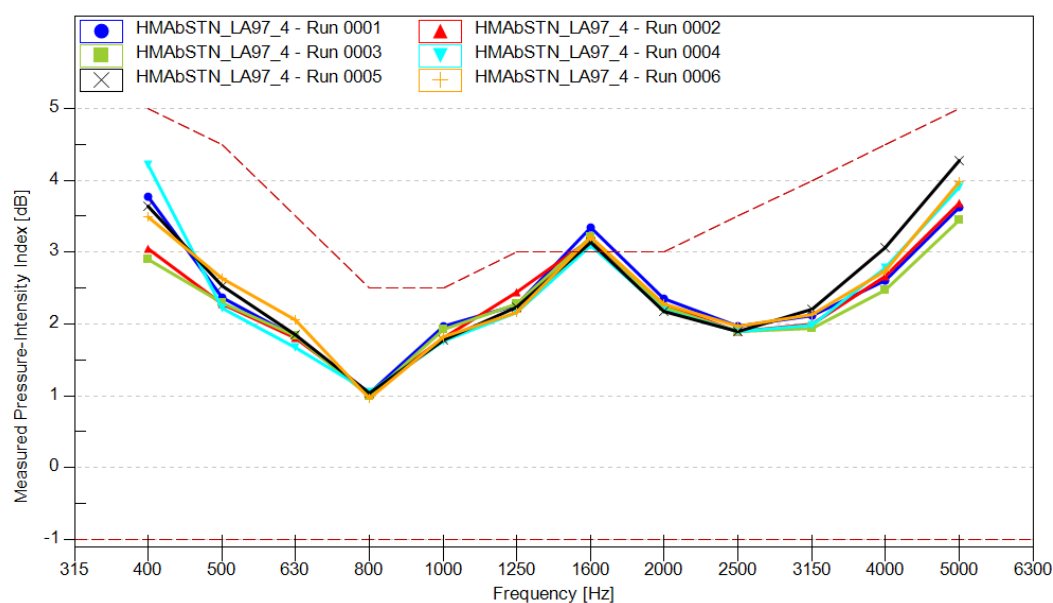
Rysunek 38. Porównanie rozkładów ogólnego poziomu natężenia dźwięku dla odcinka 001 i 002 (BA, STN, b, N, 72 km/h)

Kontrola jakości pomiarów na odcinku 002 wykazała, że 12% pomiarów (80 sekcji pomiarowych) była nieważna według oryginalnych wartości granicznych wskaźnika ciśnienia-natężenie PI założonych we Wstępnych wytycznych (Zadanie 1). Rozkład sekcji z nieważnymi pomiarami jest zaprezentowany na Rysunek 39. Można zauważyć, że większość nieważnych przejazdów miała miejsce przy wysokim poziomie czujników (h) i niskim ciśnieniu (L). Przy najwyższej prędkości 97 km/h każda kombinacja wysokiego poziomu czujników i ciśnienia prowadziła praktycznie do nieważnych przejazdów. Dodatkowo przy 84 km/h, oprócz niskiego ciśnienia (L), także sekcje z nominalnym poziomem ciśnienia (N) były nieważne. Na uwagę zasługuje fakt, że przy normalnym poziomie czujników (b) otrzymano błędy tylko dla niskiego ciśnienia i tylko przy 97 km/h. To jest jeszcze jeden argument świadczący o słusznym wyborze pozycji 76 mm (czyli poziom *b*) jako podstawowej w propozycji Wytycznych.

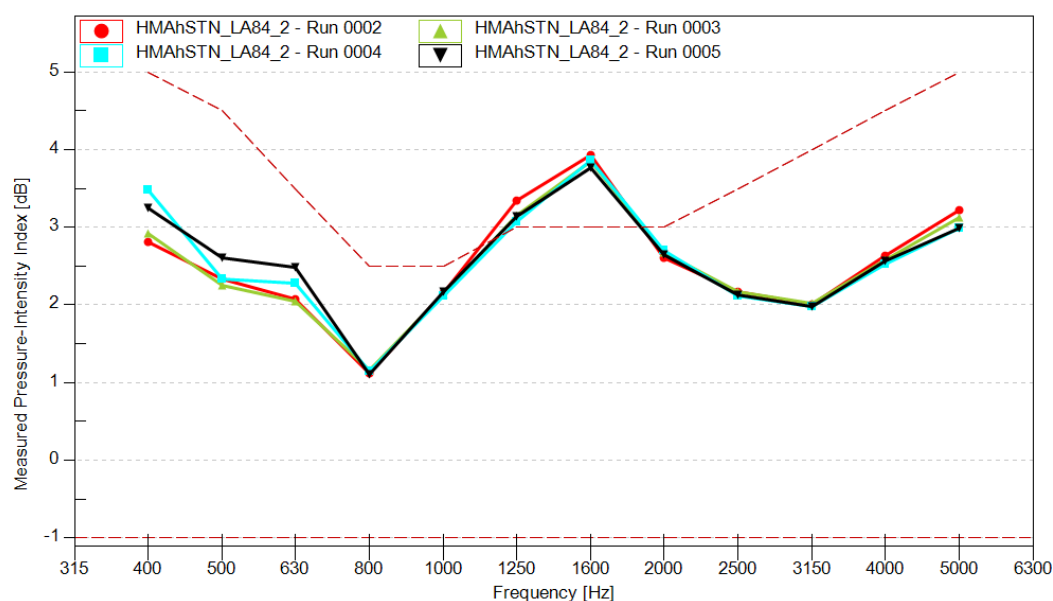


Rysunek 39. Rozkład nieważnych sekcji pomiarowych (wartości oznaczają procent nieważnych przejazdów przy danych warunkach)

Jako dominującą przyczynę nieważnych przejazdów zidentyfikowano przekroczenie górnej granicy wskaźnika PI przy 1600 Hz na tylnej sondzie natężenia dźwięku. Wystąpiło to w 79 nieważnych sekcjach (na 80). Przykład rozkładu wskaźnika PI w takich nieważnych przejazdach jest pokazany na Rysunek 40. Wcześniej takie nieważne sekcje zaobserwowano w Zadaniu 1 dla nawierzchni betonowych (BC) również przy niskim ciśnieniu i wysokich prędkościach (porównaj Rysunek 51 w Załączniku 1.3). Jako naprawę zaproponowano rozszerzenie granic przy 400 i 1600 Hz (porównaj Tablica 30 w Załączniku 1.3). Dodatkową przyczyną nieważnych sekcji na odcinku 002 w 17 przypadkach było jednoczesne przekroczenie górnej granicy przy 1250 Hz co nie było zaobserwowane w Zadaniu 1. Przykład takich nieważnych sekcji jest pokazany na Rysunek 41. Ze względu na specyficzne kombinacje czynników przy których zaobserwowano przekroczenie granicy wskaźnika PI przy 1250 Hz, nie zdecydowano zmieniać granic dopuszczalnych wartości PI. Pozostają więc one niezmienione tak jak zostały zaprezentowane po analizie eksperymentu na odcinkach 001 i 003 w Zadaniu 1.



Rysunek 40. Przykład rozkładu PI dla nieważnych przejazdów (przekroczenie przy 1600 Hz)

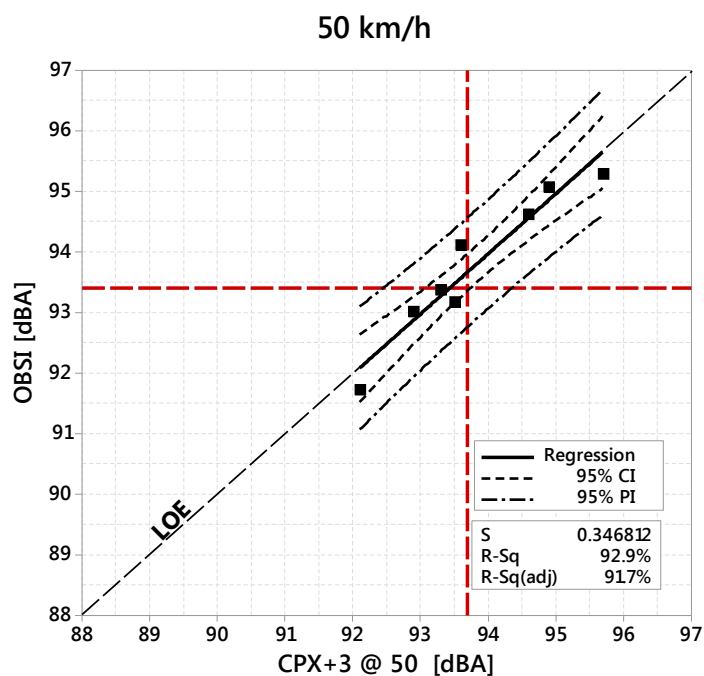


Rysunek 41. Przykład rozkładu PI dla nieważnych przejazdów (przekroczenie przy 1250 i 1600 Hz)

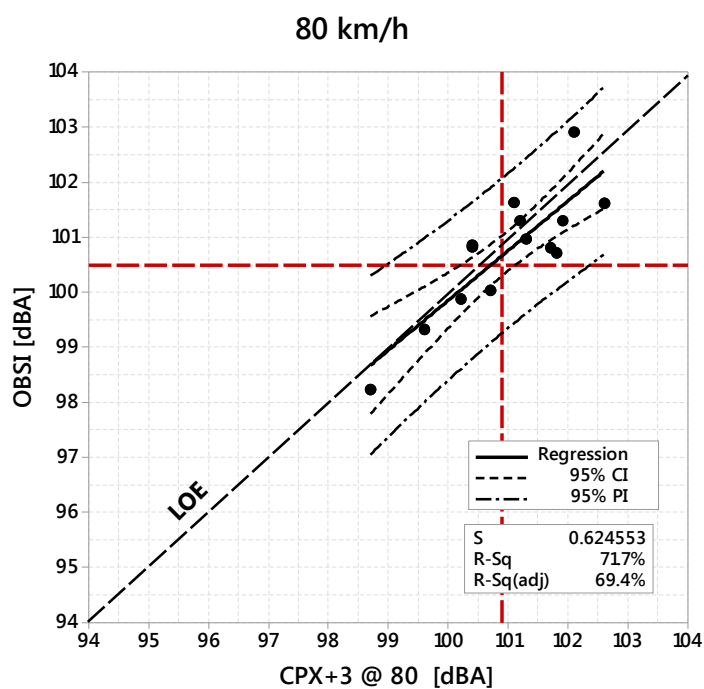
3.3.4. Weryfikacja korelacji pomiędzy różnymi metodami

Wyniki z badań na odcinku 002 porównano również z wyznaczonymi wcześniej równaniami regresji pomiędzy pomiarami CPX i OBSI. Na Rysunek 42 i Rysunek 43 można zaobserwować, że po przesunięciu równoległym wyników CPX o 3 dBA (jak zaproponowano wcześniej) pomiary z odcinka 002 leżą wewnątrz przedziału ufności (CI) i predykcji (PI) co potwierdza przydatność wyznaczonych zależności. Oczywiście należy sprawdzić te

zależności na większej liczbie odcinków co nie było celem tego projektu i nie było w jego zakresie.



Rysunek 42. Weryfikacja zależności pomiędzy CPX a OBSI przy 50 km/h



Rysunek 43. Weryfikacja zależności pomiędzy CPX a OBSI przy 80 km/h

3.3.5. Wnioski do Wytucznych z badań weryfikacyjnych

Odnosnie metody CPX:

Badania na lotnisku w Ułężu potwierdziły możliwość wykonywania pomiarów metodą CPX przy zastosowaniu przyczepy Tiresonic Mk.4. Spełnia ona wymagania normy „PN-EN ISO 11819-2:2017-06 - Akustyka - Pomiary wpływu nawierzchni dróg na hałas drogowy - Część 2: Metoda pomiaru w polu bliskim” zarówno w zakresie sprzętowym, jak i możliwości realizacji procedury pomiarowej. Wykonywanie badań zgodnie z opracowaną na podstawie normy „Propozycją wytycznych prowadzenia pomiarów hałaśliwości nawierzchni dla metody CPX” (Załącznik 4.2) pozwala na porównywanie różnych technologii wykonania warstwy ścieralnej drogi pod względem hałaśliwości, niezależnie od lokalizacji ocenianego odcinka drogi jak i jednostki wykonującej badanie. Metodyka pomiarowa umożliwia również sprawdzenie trwałości akustycznej nawierzchni i jednorodności odcinka drogi. Jest także pomocna w rozwoju technologii „cichych nawierzchni drogowych” i badaniu zjawisk zachodzących na styku opony z drogą.

Wyniki pomiarów potwierdziły obserwacje z innych odcinków, że na obu oponach można uzyskiwać zbliżone poziomy hałaśliwości nawierzchni. Należy również zwrócić uwagę na dokładne, zgodne z opracowaną procedurą montowanie mikrofonów w pobliżu opony referencyjnej.

Odnosnie metody OBSI:

- wariancja przy 72 km/h statystycznie taka sama jak w eksperymencie na odcinku 001 dla opony STN i BA,
- wariancja przy 72 km/h jest „średnia” tzn. jest pomiędzy wariancją dla 48 km/h (najmniejsza wariancja) a wariancją dla 97 km/h (największa wariancja). Nie zaprzecza to zaleceniu do wytycznych OBSI, że najbardziej optymalną prędkością pomiaru jest właśnie 72 km/h. Z drugiej strony daje to dobry argument, żeby pomiary przy 97 km/h zawierały odpowiednią analizę statystyczną ze względu na potencjalną znaczącą wariancję,
- predykcje ogólnego IL dla dolnej pozycji czujników są niedoszacowane, co mogłoby świadczyć o konieczności zwiększenia współczynnika korekcyjnego zaproponowanego w Zadaniu 1. Jednak ze względu na znacząco różny stan nawierzchni na odcinku 001 i 002, zdecydowano nie zmieniać współczynnika korekcyjnego ze względu na pozycję czujników,
- zostały potwierdzone współczynniki korekcyjne ze względu na ciśnienie w oponie; linia (IL w funkcji ciśnienia) bazująca na pomiarach na odcinku 002 znajduje się pomiędzy granicami predykcji wyznaczonymi w Zadaniu 1,
- w zakresie wpływu prędkości zaobserwowano statystycznie wyższe współczynniki nachylenia przyrostu ogólnego poziomu IL dla odcinka 002. Należy dodać do Wytucznych zapis, który podkreśla, że wrażliwość na prędkość dla nawierzchni w gorszym stanie może być większa niż dla nawierzchni nowych (lub w dobrym stanie),
- konieczne jest opracowanie alternatywnego sposobu przedstawiania wartości reprezentatywnych z pomierzonych wartości natężenia dźwięku. Nowa miara powinna być bardziej miarodajna i kompletna niż sama wartość średnia z pasm 1/3 oktaowych, która jest obecnie stosowana,
- kontrola jakości pomiarów wykazała, że przy pozycji czujników 76 mm od nawierzchni, nieważne sekcje są jedynie przy 97 km/h i niskim ciśnieniu w oponie. Z kolei dla

prędkości 72 km/h, nieważne przejazdy zaobserwowano jedynie dla kombinacji h/L. Rozkład nieważnych przejazdów popiera więc pozycję 76 mm oraz prędkość 72 km/h jako „optymalne” z punktu widzenia jakości pomiarów,

- kontrola jakości pomiarów pokazała również, że górne wartości graniczne wskaźnika PI zostały przekroczone w około 12% pomiarów przy 1600 Hz, co było również zaobserwowane na odcinku 001 w Zadaniu 1 dla nawierzchni BC. Dodatkowo, na odcinku 002 zaobserwowano przekroczenie również górnej granicy przy 1250 Hz. Jednak ze względu na specyficzne kombinacje czynników przy których zaobserwowano przekroczenie granicy wskaźnika PI przy 1250 Hz, nie zdecydowano zmieniać granic dopuszczalnych wartości PI przy tej częstotliwości,
- pozytywnie zweryfikowano przesunięcie równoległe o 3 dBA pomiędzy wynikami CPX i OBSI wykorzystując niezależne pomiary na odcinku 002. Należałoby zweryfikować tą zależność na większej liczbie niezależnych odcinków.

3.4. Przygotowanie ostatecznych wersji proponowanych Wytycznych

Ostateczne wersje proponowanych Wytycznych prowadzenia pomiarów przedstawiono w Załącznikach. Proces przygotowania tych Wytycznych składał się z następujących etapów:

1. Opracowanie i sprawdzenie wstępnej metodyki w Zadaniu 1 (w oparciu o normy ISO, AASHTO oraz instrukcje producentów).
2. Pomiary w Zadaniu 1.
3. Doskonalenie metodyki na pomiarach i analizie w Zadaniu 2 3 i 5.
4. Poprawki na podstawie analizy statystycznej oraz badań/analizy weryfikacyjnej w Zadaniu 4.
5. Opracowanie wersji ostatecznych.

4. PODSUMOWANIE ORAZ WNIOSKI NAUKOWE I PRAKTYCZNE Z ZADANIA 4

W podsumowaniu Zadanie zostało wykonane zgodnie z planem, a cele Zadania zostały osiągnięte, tzn. przygotowano wytyczne prowadzenia badań i oceny hałaśliwości nawierzchni drogowych, które są zawarte w osobnych Załącznikach 4.2 i 4.3. W przygotowaniu Wytycznych uwzględniono wstępną metodykę opracowaną w Zadaniu 1 oraz wyniki pomiarów hałaśliwości z innych zadań. Wyniki z pomiarów według wstępnej metodyki zostały użyte w zaawansowanej analizie, która doprowadziła do szeregu ciekawych wniosków. Ponadto przeprowadzono weryfikację metodyk pomiarów hałaśliwości i funkcji korelacji na niezależnym odcinku testowym ITS, na którym wykonano pomiary metodą OBSI, CPX o raz ROSSA (rura impedancyjna).

Na podstawie badań i analizy wykonanych w Zadaniu 4 można sformułować następujące wnioski **praktyczne**:

1. Pomierzone widma akustyczne na różnych typach nawierzchni zostały sklasyfikowane w unikalne grupy pod względem ich kształtu i wartości.
2. Na podstawie analizy statystycznej zaobserwowano, że wyższe częstotliwości w większym stopniu wpływają na różnice w widmach dla różnych rodzajów nawierzchni
3. Zidentyfikowano bardzo dobrą fenomenologiczną zależność pomiędzy wynikami z pomiarów CPX i OBSI, która praktycznie doprowadza obie metody do zgodności 1:1. Jednak ze względu na znaczne przedziały predykcji (PI) dla przyszłych obserwacji, korzystanie z tej zależności może być obciążone błędami, które znacznie przewyższają niepewność standardową pomiaru którejkolwiek z tych metod.
4. Powiązanie metod CPX i OBSI z metodą SPB jest znacznie słabsze co jest zgodne z literaturą i było oczekiwane gdyż te metody różnią się pod względem źródła dźwięków i mierzonych wielkości.
5. Ze względu na specyficzne kombinacje czynników przy których zaobserwowano przekroczenie granicy wskaźnika PI przy 1250 Hz w badaniach weryfikacyjnych na odcinku 002 w Ułężu, nie zdecydowano zmieniać granic dopuszczalnych wartości PI.

Na podstawie badań i analizy wykonanych w Zadaniu 4 można sformułować następujące wnioski **naukowe**:

1. Zidentyfikowano dwie grupy częstotliwości (poniżej i powyżej 1250 Hz), przy których wyznaczone wartości IL w różnych stopniu wyjaśniają różnice pomiędzy różnymi grupami nawierzchni. W przyszłych badaniach można skupić się na tym zagadnieniu.
2. Model ANN nauczony na indywidualnych wynikach ma wyższy ogólny wskaźnik sukcesu niż model ANN nauczony na wartościach średnich.
3. Nie przeprowadzono optymalizacji modeli ANN zaprezentowanych w tym Zadaniu. Ograniczono się jedynie do porównania dwóch scenariuszy (na wartościach indywidualnych i wartościach średnich). W przyszłych analizach można zwiększyć skuteczność i użyteczność takich modeli poprzez dodanie nowych danych wejściowych, jak np. cechy powierzchniowe czy informację o porowatości czy sztywności warstwy ściernalnej nawierzchni.
4. Istnieje konieczność opracowania alternatywnego sposobu interpretacji wartości reprezentatywnych z pomierzonych wartości natężenia dźwięku, tak aby były one bardziej miarodajne i kompletne niż sama wartość średnia z pasm 1/3 oktaowych. W ten sposób byłoby możliwe uwzględnienie np. konceptu wirtualnego widma referencyjnego.
5. Zaprezentowano przykład alternatywnej interpretacji, która opiera się na analizie czasowo-częstotliwościowej. Połączenie takiej analizy oraz cyfrowej analizy obrazu z pewnością dostarczyłoby nowych informacji na temat spektralnej charakterystyki badanych nawierzchni.
6. Należy poznać przyczyny zmiany natężenia przy różnych częstotliwościach - granice PI zostały zmienione przy 400 i 1600 Hz, ale właściwie nie zbadano przyczyny takich obserwacji, jak i nie są znane przyczyny wysokich wartości wskaźnika PI przy 1250 Hz dla pomiarów na odcinku 002.

5. ZAŁĄCZNIKI

List załączników powiązana z niniejszym Raportem z Zadania 4:

Załącznik 4.2. Wytyczne prowadzenia pomiarów hałaśliwości nawierzchni dla metody CPX

Załącznik 4.3. Wytyczne prowadzenia pomiarów hałaśliwości nawierzchni dla metody OBSI