



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

Przedmiot umowy pn:

Ochrona przed hałasem drogowym

Tytuł przedmiotu umowy*:

**Pomiary i analiza do opracowania metodyki badania hałaśliwości
urządzeniem OBSI**

*zgodny z opisem, stanowiącym załącznik nr 1 do umowy nr DZP/RID-I-76/15/NCBR/2016
wytyczne/instrukcja/analiza/metodologia/wzór/rekomendacje

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

Data rozpoczęcia: 01.01.2016

Data zakończenia: 30.05.2018



Załącznik 1.3.

Pomiary i analiza do opracowania metodyki badania hałaśliwości urządzeniem OBSI

Przygotowany przez:

Adam Zofka, IBDiM

Spis treści:

1.	Cel i zakres załącznika.....	5
2.	Czynniki wpływające na pomiary OBSI	5
3.	Wstępna metodyka pomiarów OBSI	7
4.	Odcinki testowe i plan eksperymentu	12
5.	Analiza wyników	22
5.1.	Precyzja	22
5.2.	Dokładność.....	29
5.3.	Powtarzalność i odtwarzalność	41
5.4.	Wpływ czynników pomiarowych.....	44
5.5.	Współczynniki korekcyjne	51
5.5.1.	Prędkość.....	51
5.5.2.	Ciśnienie w oponie	56
5.5.3.	Pozycja czujników nad nawierzchnią.....	58
5.5.4.	Wiek opony SRTT	59
5.6.	Kontrola jakości	63
6.	Podsumowanie i wnioski	70
6.1.	Podsumowanie analizy	70
6.2.	Wnioski do następnej iteracji wytycznych OBSI.....	71
7.	Bibliografia	73

Spis rysunków:

Rysunek 1.	Urządzenie OBSI zamontowane na samochodzie testowym	6
Rysunek 2.	Szczegółowy schemat zamocowania/pozycji urządzenia OBSI przy kole samochodowym (pozycja referencyjna przyjęta we wstępnej metodyce pomiarów)	8
Rysunek 3.	Przykładowe wyniki uśrednionych poziomów A-ważonych poziomów natężenia w 1/3 pasmach oktawy w dwóch sondach: przedniej i tylnej (kontrola jakości pomiarów)	10
Rysunek 4.	Przykładowe wyniki parametru PI w dwóch sondach: przedniej i tylnej (kontrola jakości pomiarów)	10
Rysunek 5.	Przykładowe wyniki parametru spójności C w dwóch sondach: przedniej i tylnej (kontrola jakości pomiarów)	11
Rysunek 6.	Przykład trzech ważnych przejazdów w postaci uśrednionych poziomów A-ważonych poziomów natężenia w 1/3 pasmach oktawy.....	11
Rysunek 7.	Zrzut ekranu oprogramowania do przeprowadzania pomiarów i kontroli jakości	12
Rysunek 8.	Urządzenie OBSI zamocowane na kole podczas pomiaru.....	12
Rysunek 9.	Odcinki testowe 001 (SMA i BA) oraz odcinek 003 (BC)	13
Rysunek 10.	Nawierzchnie BA SMA na odcinku 001 (27 i 28 maja 2017)	14
Rysunek 11.	Nawierzchnia BC na odcinku 003 (15 lipca 2017)	14
Rysunek 12.	Pełen zestaw przejazdów (PZ)	19

Rysunek 13. Krótki zestaw przejazdów (KZ)	19
Rysunek 14. Samochód testowy (Ford Mondeo)	21
Rysunek 15. Bieżnik opony testowej SRTT [2].....	21
Rysunek 16. Porównanie wariancji dla ogólnego poziomu natężenia dźwięku (IL) w funkcji typu nawierzchni, wieku opony i ciśnienia w oponie (72 km/h, pozycja 76 mm)...	23
Rysunek 17. Porównanie różnic w średnich wariancjach dla wariantu I.....	24
Rysunek 18. Porównanie różnic w średnich wariancjach dla wariantu II (interakcja nawierzchni i opony).....	27
Rysunek 19. Próba wyników wyjaśnienia wariancji dla kombinacji HMA/STN/L	28
Rysunek 20. Porównanie wyników ogólnego natężenia dźwięku (IL) dla nawierzchni SMA i opony STN w kontekście powtarzalności	30
Rysunek 21. Porównanie wyników ogólnego natężenia dźwięku (IL) dla nawierzchni BA i opony STN w kontekście powtarzalności	30
Rysunek 22. Porównanie wyników ogólnego natężenia dźwięku (IL) dla nawierzchni BC i opony STN w kontekście powtarzalności	31
Rysunek 23. Porównanie wyników ogólnego natężenia dźwięku (IL) dla nawierzchni SMA i opony STO w kontekście powtarzalności	31
Rysunek 24. Porównanie wyników ogólnego natężenia dźwięku (IL) dla nawierzchni BA i opony STO w kontekście powtarzalności	32
Rysunek 25. Wpływ prędkości na wariancję w przejazdach losowych w funkcji typu nawierzchni i ciśnienia.	39
Rysunek 26. Uśredniona wariancja z podziałem na typ nawierzchni i prędkość.	40
Rysunek 27. Uśredniona wariancja z podziałem na typ nawierzchni i ciśnienie w oponie.	40
Rysunek 28. Wyniki R&R w badaniu powtarzalności i odtwarzalności	43
Rysunek 29. Przykładowa demonstracja bardzo dobrej powtarzalności dla uśrednionych wyników A-ważonych poziomów natężenia w 1/3 pasmach oktawy.....	44
Rysunek 30. Ogólna prezentacja wpływu czynników pomiarowych i ich interakcji na podstawie wartości średnich	46
Rysunek 31. Wpływ prędkości pomiarowej dla wszystkich rodzajów nawierzchni przy pozycji czujników b , ciśnieniu N , opona STN; wąsy reprezentują 95% przedziały ufności dla wartości średniej	46
Rysunek 32. Wpływ prędkości pomiarowej dla wszystkich rodzajów nawierzchni przy pozycji czujników b , ciśnieniu H , opona STN; wąsy reprezentują 95% przedziały ufności dla wartości średniej	47
Rysunek 33. Wpływ prędkości pomiarowej dla wszystkich rodzajów nawierzchni przy pozycji czujników b , ciśnieniu L , opona STN; wąsy reprezentują 95% przedziały ufności dla wartości średniej	47
Rysunek 34. Wpływ ciśnienia w oponie dla wszystkich rodzajów nawierzchni przy pozycji czujników b i oponie STN; wąsy reprezentują 99% przedziały ufności dla wartości średniej	48
Rysunek 35. Wpływ pozycji czujników nad powierzchnią nawierzchni dla HMA (BA) (przy STN, N); wąsy reprezentują 99% przedziały ufności dla wartości średniej	48
Rysunek 36. Wpływ pozycji czujników nad powierzchnią nawierzchni dla HMA (BA) (przy STN, H); wąsy reprezentują 99% przedziały ufności dla wartości średniej	49
Rysunek 37. Wpływ pozycji czujników nad powierzchnią nawierzchni dla HMA (BA) (przy STN, L); wąsy reprezentują 99% przedziały ufności dla wartości średniej	49

Rysunek 38. Wpływ wieku opony SRTT w funkcji prędkości i ciśnienia w oponie przy pozycji czujników b i dla nawierzchni typu HMA (BA); wąsy reprezentują 99% przedziały ufności dla wartości średniej	50
Rysunek 39. Wpływ wieku opony SRTT w funkcji prędkości i ciśnienia w oponie przy pozycji czujników b i dla nawierzchni typu SMA; wąsy reprezentują 99% przedziały ufności dla wartości średniej	50
Rysunek 40. Reprezentacja graficzna współczynników normalizujących ze względu na prędkość dla SMA	51
Rysunek 41. Analiza reszty dla regresji liniowej przy współczynnikach normalizujących ze względu na prędkość dla SMA	52
Rysunek 42. Reprezentacja graficzna współczynników normalizujących ze względu na prędkość dla BA	54
Rysunek 43. Reprezentacja graficzna współczynników normalizujących ze względu na prędkość dla BC	55
Rysunek 44. Wpływ ciśnienia w oponie w funkcji rodzaju nawierzchni i prędkości pomiaru	57
Rysunek 45. Wpływ pozycji czujników w funkcji ciśnienia w oponie i prędkości pomiaru ..	58
Rysunek 46. Wpływ wieku (twardości) opony SRTT w funkcji ciśnienia w oponie, prędkości pomiaru i rodzaju nawierzchni	60
Rysunek 47. Porównanie współczynników normalizujących ze względu na twardość opony dla nawierzchni typu BA i SMA	62
Rysunek 48. Rozkład nieważnych przejazdów sekcji pomiarowych; wartość na zewnętrznym pierścieniu oznacza procent przejazdów nieważnych przy danych warunkach.....	65
Rysunek 49. Udział zidentyfikowanych przyczyn nieważnych przejazdów względem wszystkich pomiarów w eksperymencie na odcinkach 001 i 003.....	65
Rysunek 50. Nieważne przejazdy ze względu na przyczynę PI back @400 Hz.....	66
Rysunek 51. Nieważne przejazdy ze względu na przyczynę PI back @1600 Hz.....	66
Rysunek 52. Przykład wskaźnika ciśnienia-natężenia (PI) dla tylnej sondy natężenia dźwięku dla nieważnego przejazdu (przyczyna PI back @400 Hz).....	67
Rysunek 53. Przykład wskaźnika ciśnienia-natężenia (PI) dla tylnej sondy natężenia dźwięku dla nieważnego przejazdu (przyczyna PI back @1600 Hz).....	67
Rysunek 54. Przykład wskaźnika koherencji (C) dla tylnej sondy natężenia dźwięku dla nieważnego przejazdu (przyczyna Coherence @4000 Hz).....	68
Rysunek 55. Nawierzchnie (BA i BC) na których zostały opracowane wytyczne AASHTO dotyczące OBSI [1] [4]	68
Rysunek 56. Proponowane nowe granice dla wskaźnika PI	69

Spis tablic:

Tablica 1. Wartości graniczne wskaźnika PI	9
Tablica 2. Szczegóły odcinków testowych 001 i 003	13
Tablica 3. Czynniki i ich poziomy zaplanowane w eksperymencie na odcinkach 001 i 003 ..	14
Tablica 4. Plan eksperymentu na odcinku 001 – część 1, dzień pierwszy	15
Tablica 5. Plan eksperymentu na odcinku 001 – część 2, dzień pierwszy	16
Tablica 6. Plan eksperymentu na odcinku 001 – część 3, dzień drugi	17
Tablica 7. Plan eksperymentu na odcinku 001 – część 4, dzień drugi	18
Tablica 8. Plan eksperymentu na odcinku 003	20
Tablica 9. ANOVA dla wariantu I (badanie typu nawierzchni i ciśnienia w oponie)	24
Tablica 10. Test Bonferroni dla wielokrotnego porównania średnich wariancji dla wariantu I.	24

Tablica 11. Średnie wartości wariancji dla wariantu I.....	25
Tablica 12. ANOVA dla wariantu II (badanie wieku opony i ciśnienia w oponie).....	26
Tablica 13. Test Bonferroni dla wielokrotnego porównania średnich wariancji dla wariantu II (interakcja nawierzchni i opony).....	27
Tablica 14. Średnie wartości wariancji dla wariantu II (wartości dla STO).....	28
Tablica 15. Sprawdzenie średnich przejazdów dla SMA/STN (porównanie Bonferroni przy poziomie ufności 95%)	34
Tablica 16. Sprawdzenie średnich przejazdów dla BA/STN (porównanie Bonferroni przy poziomie ufności 95%)	35
Tablica 17. Sprawdzenie średnich przejazdów dla BC/STN (porównanie Bonferroni przy poziomie ufności 95%)	36
Tablica 18. Sprawdzenie średnich przejazdów dla SMA/STO (porównanie Bonferroni przy poziomie ufności 95%)	37
Tablica 19. Sprawdzenie średnich przejazdów dla BA/STO (porównanie Bonferroni przy poziomie ufności 95%)	38
Tablica 20. Przykład analizy ANOVA dla prędkości 97 km/h, pozycji I i ciśnienia N.....	41
Tablica 21. Wyniki R&R oraz P/T dla wszystkich kombinacji warunków w badaniu powtarzalności i odtwarzalności	42
Tablica 22. Współczynniki normalizujące ze względu na prędkość dla SMA	53
Tablica 23. Współczynniki normalizujące ze względu na prędkość dla BA	54
Tablica 24. Współczynniki normalizujące ze względu na prędkość dla BC	55
Tablica 25. Współczynniki normalizujące ze względu na ciśnienie w oponie w funkcji rodzaju nawierzchni i prędkości pomiaru	57
Tablica 26. Współczynniki normalizujące ze względu na pozycję czujników w funkcji ciśnienia w oponie i prędkości pomiaru.....	59
Tablica 27. Współczynniki normalizujące ze względu na oponę SRTT dla nawierzchni SMA w funkcji prędkości pomiaru i ciśnienia w oponie.....	60
Tablica 28. Współczynniki normalizujące ze względu na oponę SRTT dla nawierzchni BA w funkcji prędkości pomiaru i ciśnienia w oponie	61
Tablica 29. Sumaryczna tabela współczynników normalizujących w postaci liniowej	63
Tablica 30. Zaktualizowane graniczne wartości wskaźnika PI.....	69

1. CEL I ZAKRES ZAŁĄCZNIKA

Celem niniejszego załącznika pt. „Pomiary i analiza do opracowania metodyki badania hałaśliwości urządzeniem OBSI” jest udokumentowanie pomiarów hałaśliwości urządzeniem OBSI w Zadaniu 1. Pomiary zaprezentowane w tym Załączniku wykonano w celu zweryfikowania wstępnej metodyki OBSI opracowanej w oparciu o normy ISO, AASHTO, dostępne opracowania naukowe oraz zalecenia producentów. Tak opracowana metodyka została wykorzystana do badań na odcinkach testowych w Zadaniu 1, 2, 3 i 5. W Zadaniu 4 przeprowadzone zostały zaawansowane analizy statystyczne oraz badania na niezależnym odcinku testowym ITS, które zostały następnie wykorzystane do sprawdzenia wstępnej metodyki i do opracowania ostatecznej wersji proponowanych Wytycznych pomiarów hałaśliwości z wykorzystaniem metody OBSI.

W tym Załączniku przedstawiono kolejno: podsumowanie czynników wpływających na pomiary OBSI zidentyfikowanych na podstawie przeglądu literatury, przyjętą wstępną metodykę oraz opis odcinków testowych i przeprowadzonych eksperymentów wykorzystanych w tym Załączniku. Druga część Załącznika prezentuje odpowiednią analizę statystyczną do sprawdzenia następujących aspektów pomiarów metodą OBSI:

- precyzji, dokładności, powtarzalności, odtwarzalności,
- wpływu prędkości, wieku opony, ciśnienia w oponie, położenia czujników w funkcji typu nawierzchni,
- weryfikacji założonych współczynników korekcyjnych,
- weryfikacji procedur kontroli jakości wykonywanych pomiarów OBSI przez tzw. spójność sygnałów (ang. coherence), oraz wskaźnik natężenia ciśnienia (ang. PI index).

2. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA POMIARY OBSI

Pomiary metodą OBSI, jak i metodą CPX, mają na celu określenie hałaśliwości nawierzchni, lub inaczej określenie poziomu dźwięku generowanego na styku opony z nawierzchnią. Jak każda fala dźwiękowa wychodząca ze swego źródła, także fala generowana na styku opony z nawierzchnią dźwięku słabnie wraz ze wzrostem pokonanej odległości. Ta atenuacja fali zależy od właściwości kierunkowych źródła i od środowiska, w którym ta fala się rozchodzi. Więc jak można oczekiwać, pomiary OBSI (jak i podobnie pomiary CPX) zależą od szeregu czynników związanych zarówno ze zjawiskami zachodzącymi na styku opony z nawierzchnią, środowiskiem wokół koła i pojazdu, jak i samym umiejscowieniem czujników pomiarowych.

Cechą szczególną metody OBSI jest zastosowanie dwóch par sprzężonych ze sobą mikrofonów, które dzięki odpowiedniej interpretacji pomierzonych sygnałów pozwalają na wyznaczenie poziomu natężenia dźwięku (ang. sound intensity level, SIL). Dla porównania, w metodzie CPX, mikrofony mierzą ciśnienie dźwięku (ang. sound pressure level, SPL). W obu metodach najczęściej pomiary wykonuje się przed stykiem opony z nawierzchnią jak i za tym stykiem, co daje dwa niezależne pomiary, które są najczęściej uśredniane w klasycznym procesie interpretacji.

Rysunek 1 przedstawia zamontowane urządzenie OBSI na tym samym pojeździe testowym, gotowe do pomiarów na czterech różnych odcinkach.



Rysunek 1. Urządzenie OBSI zamontowane na samochodzie testowym

Na podstawie przeglądu literatury (który jest przedstawiony w osobnym **Załączniku**) można zidentyfikować szereg warunków badań hałaśliwości OBSI, które mają znaczący

wpływ na wysokość i charakterystykę mierzonego dźwięku. Znaczenie tych warunków może się różnić w zależności od zastosowanej metodyki badań, ale generalnie do głównych czynników można zaliczyć następujące warunki badań:

- prędkość przejazdu podczas pomiaru,
- rodzaj, ciśnienie, twardość i temperaturę opony,
- parametry otoczenia, np. drzewa, rowy, bariery, ekrany, budynki, temperatura, wiatr, ciśnienie,
- parametry drogi, np. długość odcinka, nachylenie, łuki,
- parametry samego urządzenia, np. prędkość akwizycji danych, zapis danych, rodzaj i parametry czujników, kalibracja czujników, ustawienie czujników,
- parametry nawierzchni, np. porowatość, tekstura, sztywność, temperatura.

Na podstawie wniosków z przeglądu literatury oraz możliwości technicznych i praktycznych głównego wykonawcy Zadania (tj. IBDiM), wybrano te warunki badań, które mają największy wpływ na pomiary i które można w racjonalny sposób kontrolować. Te warunki badania OBSI uwzględniono w planowaniu eksperymentu, który został przeprowadzony na dwóch różnych odcinkach testowych opisanych w tym Załączniku i potem jeszcze raz powtórzony na odcinku ITS (opisany w Zadaniu 4). W eksperymencie kontrolowano następujące warunki:

- wiek opony (nowa i 5-letnia opona o takim samym bieżniku),
- ciśnienie w oponie,
- prędkość pojazdu podczas pomiaru,
- wysokość położenia czujników nad powierzchnią nawierzchni.

Powyższe warunki zostały zbadane w funkcji typu nawierzchni: beton asfaltowy, SMA oraz beton cementowy z odkrytym kruszywem. Wszystkie nawierzchnie w czasie badań były nowo wykonane, przed oddaniem do ruchu w ciągu drogi ekspresowej S8.

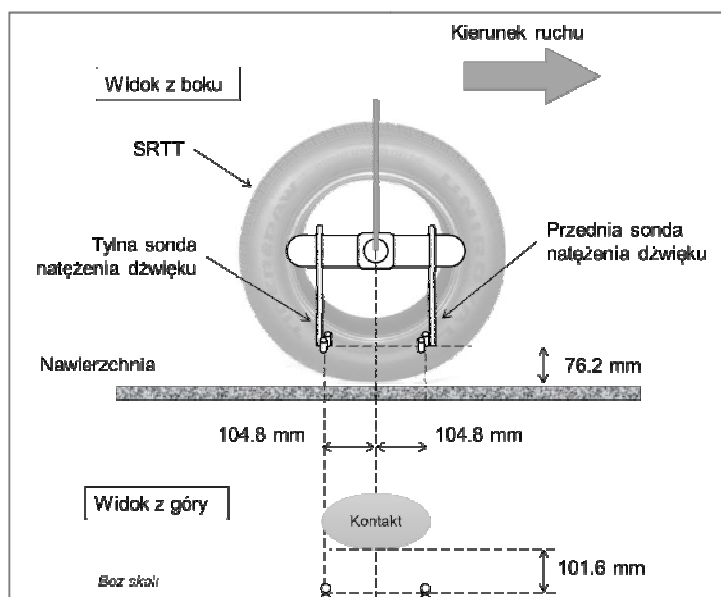
3. WSTĘPNA METODYKA POMIARÓW OBSI

Wstępna metodyka pomiarów OBSI została przygotowana na podstawie obowiązujących dokumentów normowych, zaleceń producenta urządzenia OBSI oraz ogólnodostępnych raportów z projektów badawczych [1]-[6]. Poniżej zostały przedstawione główne elementy przyjętej metodyki. Należy pamiętać, że ta metodyka została wykorzystana do pomiarów w innych Zadaniach projektu (2, 3 i 5) a w Zadaniu 4 przeprowadzone zostały dodatkowe analizy i badania na niezależnym odcinku testowym, które posłużyły do opracowania ostatecznej wersji proponowanych Wytucznych pomiarów hałaśliwości z wykorzystaniem metody OBSI.

Zestaw pomiarowy OBSI składa się z dwóch sond, służących do pomiarów natężenia dźwięku, przetwornika analogowo/cyfrowego, komputera PC z oprogramowaniem do rejestracji i przetwarzania danych oraz okablowania do zamontowania na pojeździe testowym. Każda sonda zawiera dwa mikrofony. Przetwornik analogowo cyfrowy analizuje sygnał pomierzony przez mikrofony i przesyła do komputera do interpretacji. Wynikiem, po

odpowiedniej interpretacji, jest poziom natężenia dźwięku w dBA osobno dla każdej z sond w zakresie częstotliwości pomiędzy 400 Hz a 5000Hz.

Do pomiarów używana jest opona standardowa typu SRTT (Standard Reference Test Tire) zgodna z normą ASTM F 2493 zainstalowana na prawe tylne koło pojazdu testowego. Po sprawdzeniu zgodności opony z normą ASTM (twardość, wiek, głębokość bieżnika, przebieg), procedura testowa na odcinku testowym rozpoczyna się od zamontowania koła z oponą SRTT. Zestaw sond OBSI zostaje następnie zamontowany na piaście koła z oponą SRTT według Rysunek 2. Po podłączeniu przetwornika i komputera, mikrofony umieszczone w sondach natężenia muszą być kolejno skalibrowane przed rozpoczęciem pomiarów i potem przynajmniej raz na 4 godziny badań. Ciśnienie w oponie należy doprowadzić do poziomu wymaganego (nominalnie 34 psi lub 234 kPa). Temperatura powietrza, ciśnienie powietrza oraz temperatura nawierzchni zostają zarejestrowane tuż przed rozpoczęciem pomiarów. Powierzchnia nawierzchni powinna być sucha i czysta. Tak przygotowanym pojazdem testowym wykonuje się badania przy stałej prędkości np. 72 lub 97 km/h. Zaleca się utrzymywanie prędkości z tolerancją ± 1.5 km/h przy pomocy tempomatu w samochodzie testowym. Tempomat powinien być okresowo (przynajmniej raz na 6 miesięcy) sprawdzany z niezależnym certyfikowanym urządzeniem do pomiaru prędkości.



Rysunek 2. Szczegółowy schemat zamocowania/pozycji urządzenia OBSI przy kole samochodowym (pozycja referencyjna przyjęta we wstępnej metodyce pomiarów)

Przy wyborze odcinka testowego trzeba wziąć pod uwagę fakt iż odcinek musi mieć wystarczającą długość aby pojazd testowy mógł bezpiecznie rozpędzić się do wymaganej prędkości. Długość sekcji pomiarowej wynosi 134 m (440 ft) niezależnie od prędkości badania. Badanie jest inicjowane manualnie przez operatora i po ustalonym okresie czasu jest automatycznie zatrzymywane. Pomiar z jednego przejazdu odcinka są wykorzystane do obliczenia najpierw uśrednionych energetycznie wartości natężenia dźwięku (A) w każdym paśmie o szerokości 1/3 oktawy w każdej sondzie, a potem uśrednionego (energetycznie) poziomu natężenia dźwięku w całym obserwowanym widmie w każdej sondzie według wzorów:

- do wyznaczenia uśrednionego energetycznie poziomu natężenia dźwięku w każdym paśmie i w każdej sondzie:

$$L_{E-avg} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (10^{(L_i/10)}) \right)$$

- do wyznaczenia uśrednionego (energetycznie) ogólnego poziomu natężenia dźwięku w każdej sondzie w całym obserwowanym widmie

$$\text{Ogólny poziom natężenia dźwięku} = 10 \times \log_{10} \left(\sum_{i=400}^{5000} (10^{(L_i/10)}) \right)$$

Pomiar z sekcji pomiarowej jest uznawany za ważny jeżeli są spełnione następujące warunki kontroli jakości pomiarów:

- Warunek spójności (koherencji) sygnałów (ang. coherence, C). W każdej sondzie osobno i dla każdej częstotliwości środkowej pasm 1/3 oktaowych (pomiędzy 400 a 4000Hz), koherencja pomiarów ciśnienia akustycznego pomiędzy dwoma mikrofonami powinna wynosić przynajmniej 0.8. Z definicji, koherencja jest funkcją częstotliwości demonstrującą jaki jest współczynnik korelacji pomiędzy dwoma procesami stochastycznymi zależnymi od częstotliwości. Dla każdej częstotliwości koherencja odpowiada współczynnikowi korelacji podniesionemu do kwadratu.
- Warunek wskaźnika ciśnienia-natężenie (ang. pressure-intensity index, PI). Wskaźnik PI oblicza się w każdej sondzie osobno i w każdym paśmie 1/3 oktaowym (pomiędzy 400 a 5000Hz). Jest to zwykła różnica pomiędzy średnim poziomem ciśnienia akustycznego (ang. sound pressure level, SPL) z dwóch mikrofonów sondy a poziomem natężenia dźwięku wyznaczonym na tej sondzie. Wartości graniczne dla wskaźnika PI są zaprezentowane w Tablica 1.

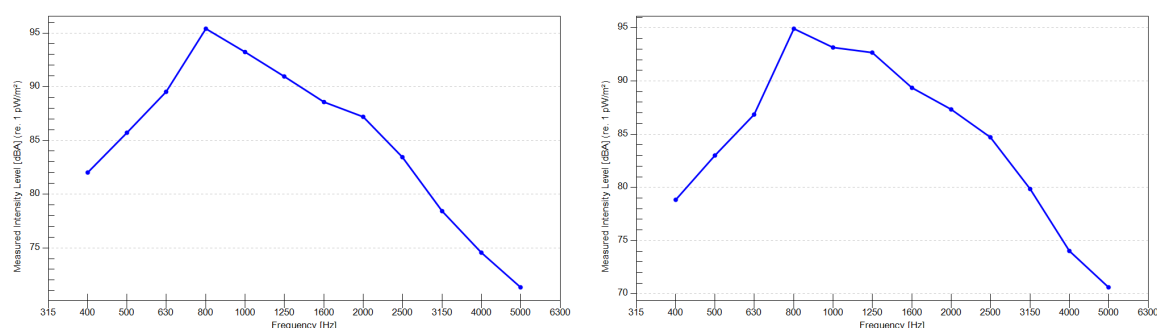
Tablica 1. Wartości graniczne wskaźnika PI

Częstotliwość centralna 1/3 pasma oktawy	Wartość minimalna PI (dB)	Wartość maksymalna PI (dB)
400	-1.0	5.0
500	-1.0	4.5
630	-1.0	3.5
800	-1.0	2.5
1000	-1.0	2.5
1250	-1.0	3.0
1600	-1.0	3.0
2000	-1.0	3.0
2500	-1.0	3.5
3150	-1.0	4.0
4000	-1.0	4.5
5000	-1.0	5.0

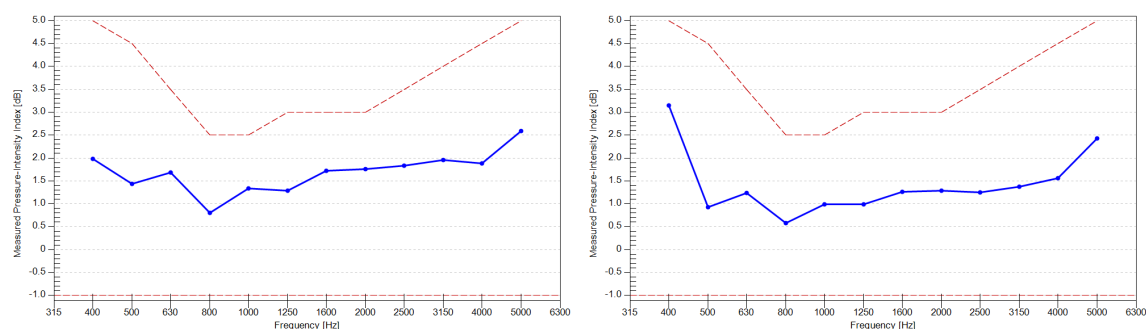
Przynajmniej dwa ważne przejazdy na tej samej sekcji pomiarowej są uśredniane: najpierw ogólne poziomy natężenia dźwięku z sond przód/tył z pojedynczych ważnych przejazdów są uśredniane energetycznie i tak uzyskane ogólne poziomy natężenia z różnych przejazdów są uśredniane arytmetycznie w celu obliczenia reprezentatywnego poziomu natężenia dźwięku. Przy tym uśrednianiu muszą być spełnione dwa dodatkowe warunki:

- 1) Reprezentatywne poziomy natężenia dźwięku z różnych przejazdów nie powinny się różnić więcej niż 1.0 dBA.
- 2) Poziomy natężenia dźwięku (A) w pasmach 1/3 oktawowych (dla częstotliwości środkowych w zakresie pomiędzy 400 Hz a 5000Hz) z poszczególnych przejazdów nie mogą się różnić o więcej niż 2.0 dB (A) w zadanym z pasm.

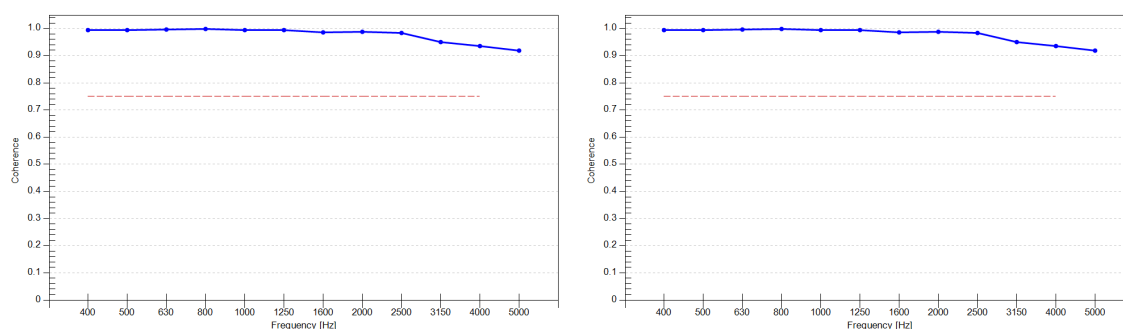
Przykładowe wykresy odnoszące się do wyżej opisanego procesu kontroli jakości pomiarów są pokazane na Rysunek 3 do Rysunek 6



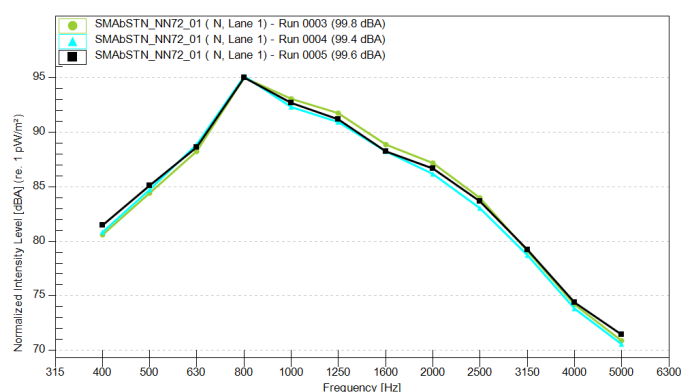
Rysunek 3. Przykładowe wyniki poziomów natężenia dźwięku (A) zmierzonych dla częstotliwości środkowych pasm 1/3 oktawowych w dwóch sondach: przedniej i tylnej (kontrola jakości pomiarów)



Rysunek 4. Przykładowe wyniki parametru PI w dwóch sondach: przedniej i tylnej (kontrola jakości pomiarów)



Rysunek 5. Przykładowe wyniki parametru spójności C w dwóch sondach: przedniej i tylnej (kontrola jakości pomiarów)



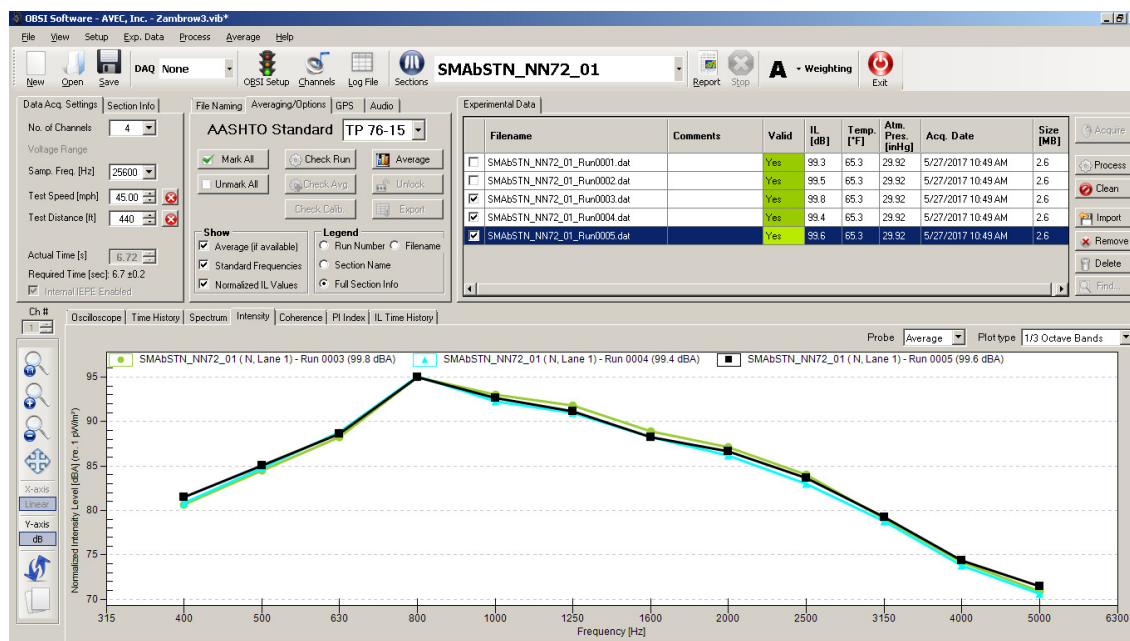
Rysunek 6. Przykład trzech ważnych przejazdów w postaci uśrednionych poziomów A-ważonych poziomów natężenia w 1/3 pasmach oktawy

Zazwyczaj powyższe procedury są wbudowane w oprogramowanie producenta systemu OBSI – przykład jest pokazany na Rysunek 7.

We wstępnych wytycznych poprawka na temperaturę została przyjęta za AASHTO [1]:

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

Optymalne ciśnienie powietrza podczas pomiarów powinno wynosić 29.921 Hg (1013.25 hPa) ale nie przyjęto żadnego współczynnika korekcyjnego.



Rysunek 7. Zrzut ekranu oprogramowania do przeprowadzania pomiarów i kontroli jakości

Rysunek 8 przedstawia pracujące urządzenie OBSI podczas pomiarów. Widoczne są również osłony przeciwwietrzne zamontowane na przedniej i tylnej sondzie natężenia dźwięku.

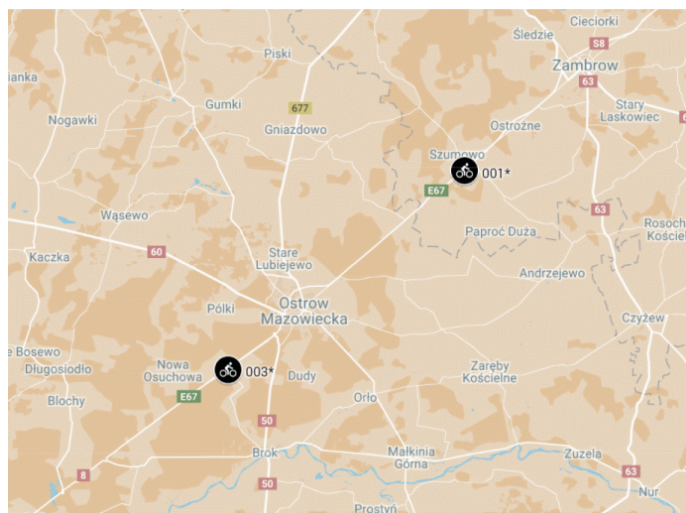


Rysunek 8. Urządzenie OBSI zamocowane na kole podczas pomiaru

4. ODCINKI TESTOWE I PLAN EKSPERYMENTU

W celu zweryfikowania wstępnej metodyki OBSI, przeprowadzono kontrolowane pomiary (eksperyment badawczy) na dwóch odcinkach. Oba odcinki znajdują się w ciągu trasy S8 i są wykonane w następujących technologiach: odcinek 001 wykonany jest z SMA, na tym odcinku znajduje się również droga serwisowa w technologii BA. Z kolei odcinek

oznaczony jako 003 jest wykonany z betonu cementowego z odkrytym kruszywem. Wszystkie nawierzchnie w czasie badań były nowo wykonane, czyli przed oddaniem do ruchu. Położenie odcinków 001 oraz 003 jest przedstawione na Rysunek 9.



Rysunek 9. Odcinki testowe 001 (SMA i BA) oraz odcinek 003 (BC)

Współrzędne geograficzne odcinków oraz dodatkowe szczegóły są przedstawione w Tablica 2 (oba w ciągu trasy S8, okolice Ostrowii Mazowieckiej).

Tablica 2. Szczegóły odcinków testowych 001 i 003

Oznaczenie odcinka	Współrzędne geograficzne	Data badania	Typ nawierzchni	Długość odcinka [m]
001	52.90703, 22.09097	27 i 28 maja 2017	SMA oraz BA	1000
003	52.75907, 21.80000	15 lipca 2017	BC	1300

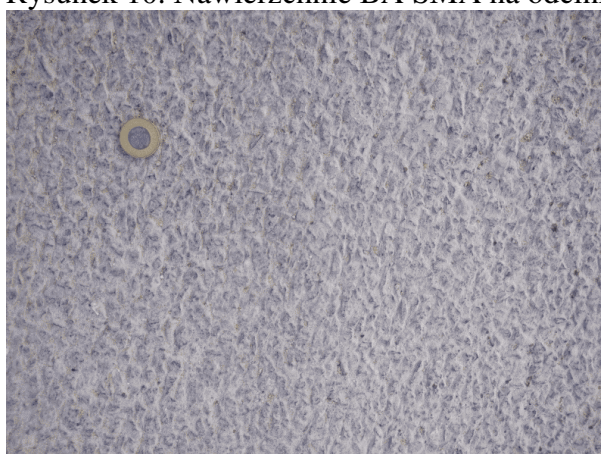
Oba odcinki testowe były odpowiednio dobrane do badań weryfikacyjnych metody OBSI, w szczególności posiadały następujące charakterystyki:

- proste i płaskie,
- o długości około 1.5 km,
- z dobrą widocznością,
- wolne od innych pojazdów i ruchu pieszego,
- nowo wybudowane i nie oddane do ruchu.

Badania na odcinkach testowych zostały wykonane za zgodą Wykonawców tych odcinków trasy S8. Pomiary zostały wykonane z najwyższą dbałością o bezpieczeństwo, w dniach wolnych od pracy (weekendy), słonecznych i suchych, z temperaturą powietrza pomiędzy 18 a 30°C. Zbliżenie poszczególnych nawierzchni na obu odcinkach jest przedstawione na Rysunek 10 oraz Rysunek 11.



Rysunek 10. Nawierzchnie BA SMA na odcinku 001 (27 i 28 maja 2017)



Rysunek 11. Nawierzchnia BC na odcinku 003 (15 lipca 2017)

W celu zweryfikowania wstępnej metodyki OBSI na obu odcinkach testowych zostały zaplanowane i wykonane wielokrotne badania w różnych warunkach. W celu wyeliminowania wpływu czynników przypadkowych, do zaplanowanego eksperymentu zostały wprowadzone elementy randomizacji. Eksperyment badał wpływ na pomiary OBSI następujących czynników:

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

Jako że eksperymenty zostały powtórzone na trzech rodzajach nawierzchni, wpływ powyższych czynników został zbadany w funkcji typu warstwy ścieralnej. Należy zaznaczyć, że w sposób losowy wybrano prędkości pomiarowe do kolejnych przejazdów, podczas gdy ciśnienie i typ opony oraz pozycja czujników była ustalona ze względów praktycznych. W Tablica 3 są zaprezentowane poszczególne poziomy dla wszystkich czynników. Należy zaznaczyć, że pogrubione zostały te poziomy, które są przyjęte jako referencyjne i do nich zostały dobrane kolejne wartości poziomów w celu zbadania wpływu poszczególnych czynników.

Tablica 3. Czynniki i ich poziomy zaplanowane w eksperymencie na odcinkach 001 i 003

Poziomy czynnik	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	~8 STO*
3	84	42/290 H	86 h	-
4	97	-	-	-

* Twardość Sha 70

W Tablica 4 do Tablica 8 przedstawiono zaplanowane i wykonane eksperymenty na odcinku 001 oraz 003 zgodnie z oznaczeniami z Tablica 3.

Tablica 4. Plan eksperymentu na odcinku 001 – część 1, dzień pierwszy

Czynnik obserwowane i kontrolowane	5/27/2017 9:32	5/27/2017 10:49	5/27/2017 12:06	5/27/2017 15:21	5/27/2017 16:57	5/27/2017 17:46
ID bloku*	001A1	001A2	001A3	001A4	001A5	001A6
Temperatura powietrza, °C	18	22	24	25	24	23
Temperatura opony, °C	29	28	27	28	34	38
Temperatura nawierzchni, °C	30	30	40	42	35	38
Ciśnienie powietrza, Hg	29.75	29.72	29.72	29.76	29.75	29.75
Typ nawierzchni	SMA	SMA	SMA	BA	BA	BA
Wiek opony	STN	STN	STN	STN	STN	STN
Pozycja	b	b	b	b	b	b
Ciśnienie w oponie	H	N	L	H	N	L
Zestaw prędkości	PZ**	PZ	PZ	PZ	PZ	PZ

* oznaczenie tego bloku eksperymentu

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

Tablica 5. Plan eksperymentu na odcinku 001 – część 2, dzień pierwszy

Czynnik obserwowane i kontrolowane	5/27/2017 19:21	5/27/2017 19:39	5/27/2017 19:56	5/27/2017 20:31	5/27/2017 20:48	5/27/2017 21:04
ID bloku*	001B1	001B2	001B3	001B4	001B5	001B6
Temperatura powietrza, °C	23	23	23	18	18	18
Temperatura opony, °C	35	35	35	35	35	35
Temperatura nawierzchni, °C	33	30	28	25	22	22
Ciśnienie powietrza, Hg	29.75	29.75	29.75	29.76	29.75	29.75
Typ nawierzchni	BA	BA	BA	BA	BA	BA
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	KZ**	KZ	KZ	KZ	KZ	KZ

* oznaczenie tego bloku eksperymentu

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

Tablica 6. Plan eksperymentu na odcinku 001 – część 3, dzień drugi

Czynnik obserwowane i kontrolowane	5/28/2017 9:57	5/28/2017 11:02	5/28/2017 11:20	5/28/2017 11:44	5/28/2017 12:03	5/28/2017 12:22
ID bloku*	001C1	001C2	001C3	001C4	001C5	001C6
Temperatura powietrza, °C	27	25	25	26	26	27
Temperatura opony, °C	27	37	34	37	42	43
Temperatura nawierzchni, °C	35	40	42	42	45	45
Ciśnienie powietrza, Hg	29.78	29.75	29.75	29.75	29.75	29.75
Typ nawierzchni	BA	BA	BA	BA	BA	BA
Wiek opony	STN	STN	STN	STN	STN	STN
Pozycja	I	I	I	h	h	h
Ciśnienie w oponie	H	N	L	H	N	L
Zestaw prędkości	KZ**	KZ	KZ	KZ	KZ	KZ

* oznaczenie tego bloku eksperymentu

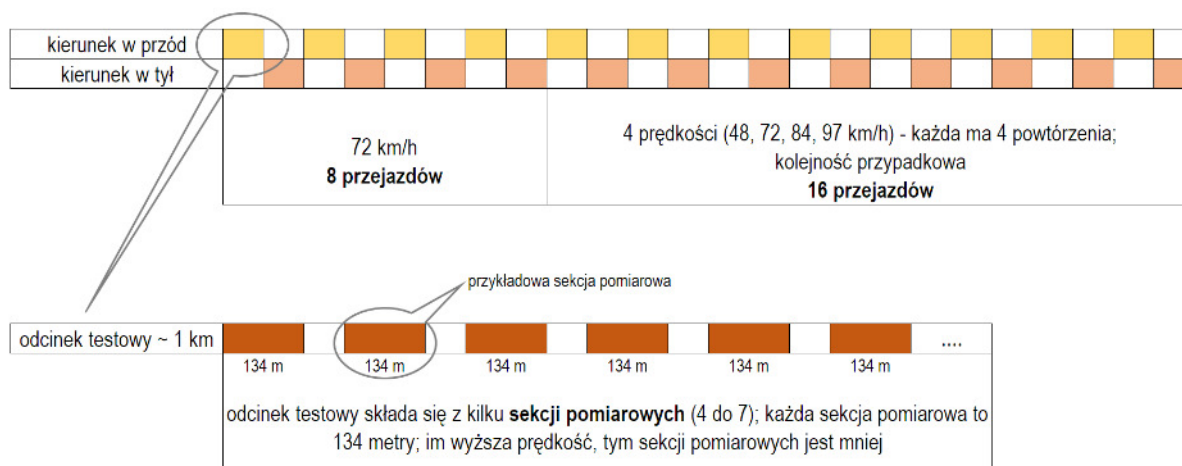
** pełen zestaw przejazdów (24 przejazdy), lub KZ – krótki zestaw przejazdów (8 przejazdów)

Tablica 7. Plan eksperymentu na odcinku 001 – część 4, dzień drugi

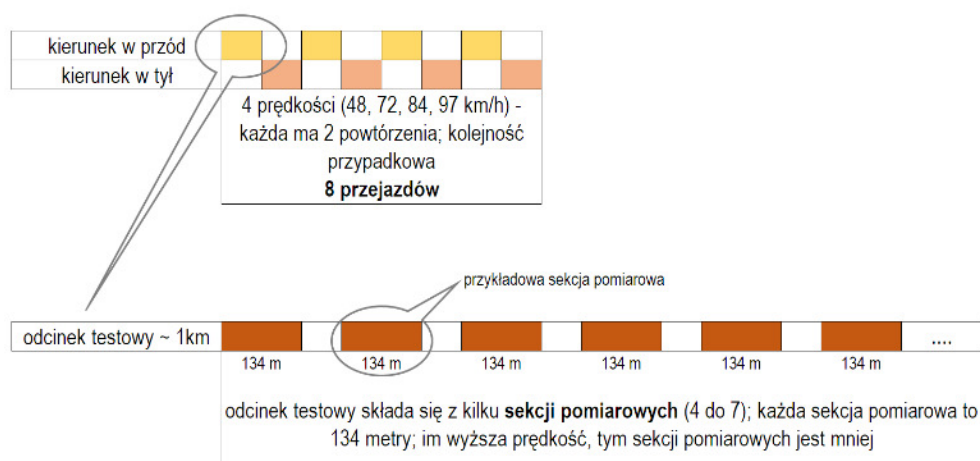
Czynnik obserwowane i kontrolowane	5/28/2017 13:59	5/28/2017 15:04	5/28/2017 15:43	5/28/2017 17:14	5/28/2017 17:52	5/28/2017 18:34
ID bloku*	001D1	001D2	001D3	001D4	001D5	001D6
Temperatura powietrza, °C	30	30	29	29	29	29
Temperatura opony, °C	34	42	42	38	40	43
Temperatura nawierzchni, °C	50	48	46	42	40	36
Ciśnienie powietrza, Hg	29.74	29.74	29.71	29.61	29.61	29.62
Typ nawierzchni	BA	BA	BA	SMA	SMA	SMA
Wiek opony	STO	STO	STO	STO	STO	STO
Pozycja	b	b	b	b	b	b
Ciśnienie w oponie	H	N	L	H	N	L
Zestaw prędkości	PZ**	PZ	PZ	PZ	PZ	PZ

* oznaczenie tego bloku eksperymentu

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



Rysunek 12. Pełen zestaw przejazdów (PZ)



Rysunek 13. Krótki zestaw przejazdów (KZ)

W nawiązaniu do Rysunek 12 i Rysunek 13 należy wyjaśnić kilka aspektów eksperymentu:

1. Pełen zestaw przejazdów (PZ) składa się z początkowych ośmiu przejazdów przy prędkości 72 km/h oraz 16-stu przejazdów przy 4 prędkościach gdzie każdy ma 4 powtórzenia. Kolejność prędkości w 16-stu przejazdach jest dobierana losowo.
2. Krótki zestaw przejazdów (KZ) składa się ośmiu przejazdów przy 4 prędkościach gdzie każdy ma 2 powtórzenia. Kolejność prędkości jest dobierana losowo.
3. Każdy przejazd 1-km odcinka testowego odbywa się ze stałą prędkością.
4. Pomiary wykonywano na odcinku testowym (o długości około 1 km) w obu kierunkach, ale w tym samym śladzie/pasie ruchu.
5. Kierunku pomiaru nie rozpartywano jako osobnego czynnika w eksperymencie.
6. Każdy przejazd 1-km odcinka testowego składa się z kilku sekcji pomiarowych (każda o długości 134 m).
7. Dokładna liczba sekcji pomiarowych zależy od prędkości, ponieważ zainicjowanie pomiaru jest wyzwalane manualnie przez operatora i zajmuje około 2-3 sekund licząc od

zakończenia pomiaru na poprzedniej sekcji. W tym czasie nie ma pomiaru. Szacunkowo można przyjąć, że każdy przejazd odcinka składa się z 4 do 7 sekcji pomiarowych.

8. Wynikiem z każdej sekcji pomiarowej jest ogólny poziom natężenia dźwięku (IL) w dBA, który spełnia warunki kontroli jakości przedstawione w Metodyce (warunek koherencji oraz warunek wskaźnika ciśnienia-natężenie PI).
9. Przy uśrednianiu ważnych przejazdów sekcji pomiarowych uwzględniano również warunki uśredniania przedstawione w Metodyce (różnice w reprezentatywnych wartościach IL < 1.0 dBA oraz różnice natężenia dźwięku w 1/3 pasmach oktawy < 2.0 dBA)

Tablica 8. Plan eksperymentu na odcinku 003

Czynnik obserwowane i kontrolowane	7/16/2017 14:17	7/16/2017 15:43	7/16/2017 16:56
ID bloku*	003A1	003A2	003A3
Temperatura powietrza, °C	25	26	27
Temperatura opony, °C	27	30	32
Temperatura nawierzchni, °C	32	32	32
Ciśnienie powietrza, Hg	29.74	29.75	29.77
Typ nawierzchni	BC (PCC)	BC (PCC)	BC (PCC)
Wiek opony	STN	STN	STN
Pozycja	b	b	b
Ciśnienie w oponie	H	N	L
Zestaw prędkości	PZ**	PZ	PZ

* oznaczenie tego bloku eksperymentu

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

Jak wynika z powyższych tablic i wyjaśnień, w zaplanowanym eksperymencie na odcinku 001 wykonano 384 przejazdy, a na odcinku 003 72 przejazdy. Zważywszy, że każdy przejazd składa się z kilku sekcji pomiarowych, można przyjąć, że do analizy przygotowano około 2000 widm natężenia dźwięku dla odcinka 001, oraz około 580 widm dla odcinka 003, który był dłuższy niż odcinek 001 dzięki czemu średnia liczba sekcji pomiarowych wyniosła 8.

Do zamontowania urządzenia OBSI i wykonania pomiarów wykorzystano samochód osobowy FORD Mondeo przedstawiony na Rysunek 14. Standardowe obciążenie tylnej osi wynosi 700 kg, samochód ma napęd na przód i jest wyposażony w tempomat.



Rysunek 14. Samochód testowy (Ford Mondeo)

Podczas pomiarów na odcinkach testowych prędkość była utrzymywana za pomocą tempomatu jednak nie korzystano z prędkościomierza w samochodzie testowym, ale wykorzystano wysokiej dokładności urządzenia GPS z częstotliwością odświeżania pozycji 10Hz. Pomiary prędkości z tego urządzenia były sprawdzone z laserowym miernikiem prędkości.

Do pomiarów wykorzystano oponę SRTT (ang. Standard Reference Test Tire) o oznaczeniu P225/60R16 97S [2]. Na Rysunek 15 przedstawiono bieżnik tej opony: można zauważyć, że ta opona ma wzór blokowy złożony z czterech prostych rowków, pięciu żeber i 81 bloków. Wykorzystane opony były fabrycznie nowe, zakupione w ramach projektu i wyprodukowane pod koniec 2016 roku. Twardość opony była kontrolowana raz na miesiąc durometrem, podczas okresu pomiarowego w 2017 roku i wynosiła średnio 65 ShA.



Rysunek 15. Bieżnik opony testowej SRTT [2]

Należy wspomnieć, że w przeprowadzonych eksperymentach nie kontrolowano szeregu czynników, m.in:

- temperatury powietrza,

- ciśnienia powietrza,
- temperatury opony.

Te czynniki nie były kontrolowane, ale były pomierzone i rejestrowane (są pokazane we wcześniejszych tablicach). Podczas przygotowania do analizy, jeden z tych czynników (temperatura powietrza) został uwzględniony w postaci współczynników korekcyjnych, żeby doprowadzić wszystkie wyniki do równoważnej temperatury 20°C:

$$IL_{norm} [dBA] = IL_{pomiar} [dBA] + 0.072 \times (Temp_{Pow} \text{ } ^\circ\text{C} - 20 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad \text{Równanie 2}$$

5. ANALIZA WYNIKÓW

Ten rozdział prezentuje odpowiednią analizę statystyczną w celu sprawdzenia następujących aspektów pomiarów metodą OBSI:

- precyzji, dokładności, powtarzalności, odtwarzalności,
- wpływu prędkości, wieku opony, ciśnienia w oponie, położenia czujników w funkcji typu nawierzchni,
- współczynników korekcyjnych,
- weryfikacji procedur kontroli jakości wykonywanych pomiarów OBSI przez tzw. warunek koherencji oraz warunek wskaźnika ciśnienia-natężenia PI.

Do dalszej dyskusji przyjęto następujące definicje:

- Dokładność (accuracy) – stopień zgodności uzyskanego wyniku pojedynczego pomiaru z wartością oczekiwaną (rzeczywistą).
- Precyzja (precision) – stopień zgodności między niezależnymi wynikami uzyskanymi w trakcie analizy danej próbki (pomiaru) z zastosowaniem danej procedury pomiarowej.
- Powtarzalność (repeatability) – precyzja wyników uzyskanych w tych samych warunkach pomiarowych (dany odcinek, operator, instrument pomiarowy, czujniki itp.).
- Odtwarzalność (reproducibility) – precyzja wyników uzyskanych przez różnych operatorów z zastosowaniem danej procedury pomiarowej.

5.1. Precyzja

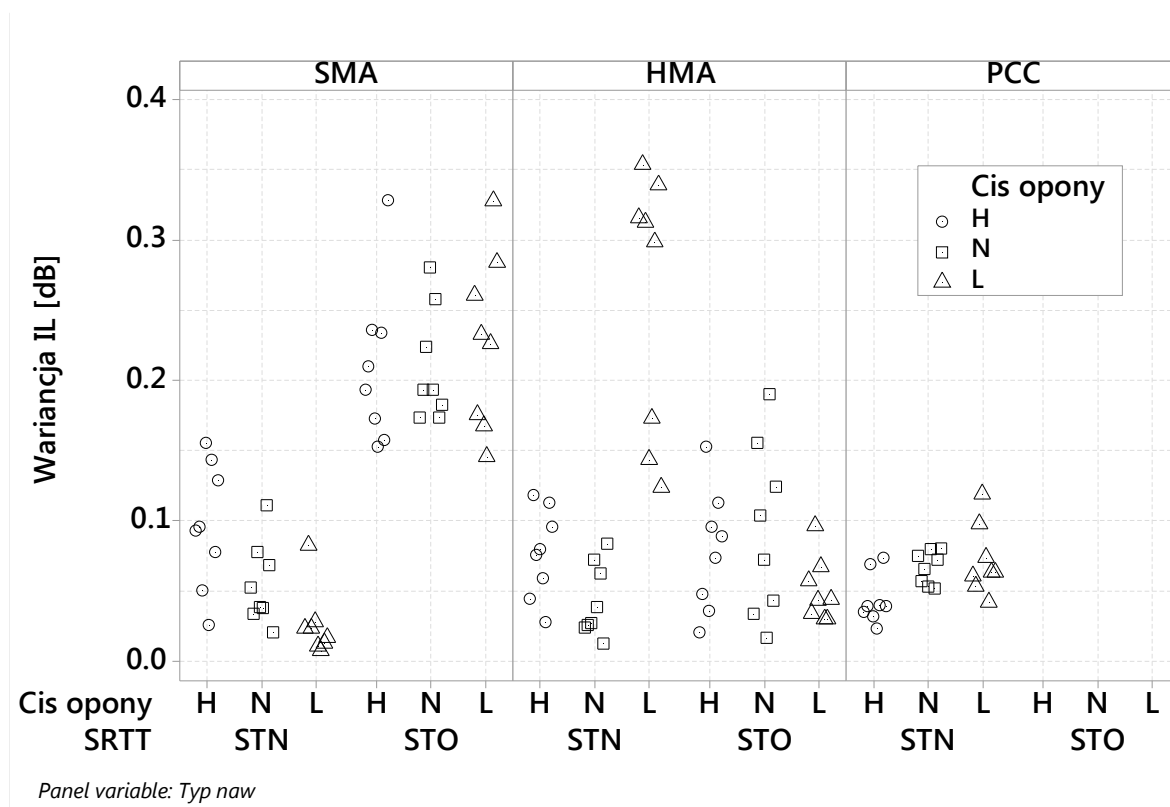
Precyzję pomiarów zbadano przez:

- Porównanie zmienności wariancji dla 72 km/h przy różnych warunkach (typ nawierzchni, wiek opony, ciśnienie w oponie). Pozycja czujników nominalna 76 mm (b).
- Porównanie precyzji wyników dla 72 km/h przez statystyczny test na równe wariancje.
- Analizę wariancji ANOVA, gdzie zostanie przetestowane który czynnik ma statystycznie znaczący wpływ na wariancję pomiarów przy 72 km/h.

Do tej analizy wykorzystano następujące bloki eksperymentu z pełnymi zakresami PZ:
001A1 001A2 001A3 001A4 001A5 001A6

001D1 001D2 001D3 001D4 001D5 001D6
 003A1 003A2 003A3

Z tych bloków uwzględniono jedynie wstępne osiem przejazdów przy 72 km/h.



Rysunek 16. Porównanie wariancji dla ogólnego poziomu natężenia dźwięku (IL) w funkcji typu nawierzchni, wieku opony i ciśnienia w oponie (72 km/h, pozycja 76 mm)

Każdy punkt na Rysunek 16 oznacza wartość wariancji z jednego przejazdu po odcinku testowym, tzn. wariancja jest wyznaczona z 5-8 sekcji pomiarowych. Można zauważyć, że:

- najmniejszą wariancję uzyskano na pomiarach na nawierzchni z PCC (beton cementowy),
- wpływ wieku opony jest wyraźny dla nawierzchni SMA, im starsza opona tym wariancja jest większa; na nawierzchni HMA z betonu asfaltowego (BA) nie zaobserwowano tego wpływu,
- wpływ ciśnienia w oponie jest niejednoznaczny i prawdopodobnie statystycznie nieznaczący, co zostanie sprawdzone przez odpowiednie testy.

Do testów statystycznych oraz analizy ANOVA, przeprowadzono dwie osobne analizy na następujących podzbiorach:

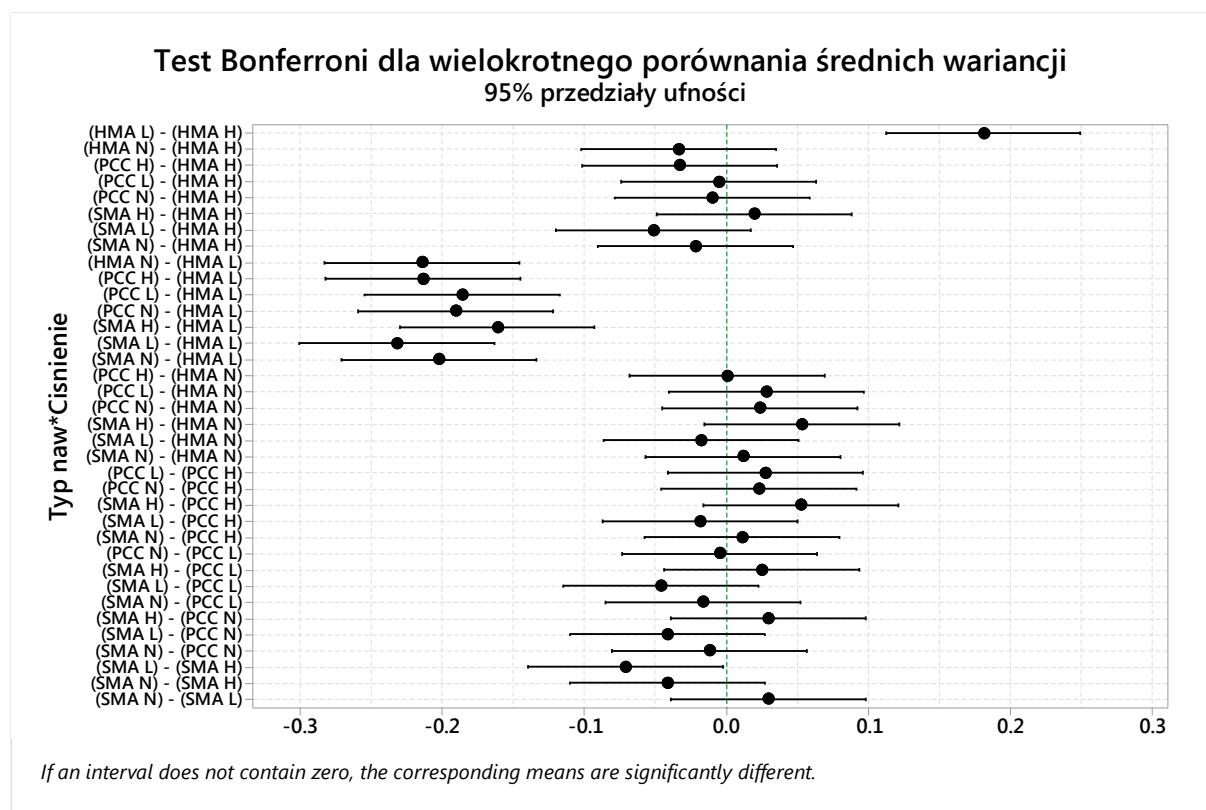
- wszystkie typy nawierzchni, ale tylko opona STN (wariant I),
- obie opony (STN i STO) ale bez nawierzchni PCC (wariant II).

Tablica 9 przedstawia wyniki ANOVA dla wariantu I na wartościach wariancji. Nawierzchnia i ciśnienie podobnie wpływają na wariancję (zbliżone wartości SS). Ale można

zauważyć że czynnik interakcji ma duży wpływ na zmienność w wariancji, dlatego też można oczekiwać statystycznych różnic dla niektórych kombinacji nawierzchnia / ciśnienie. Te różnice są przedstawione w Tablica 10 i na Rysunek 17.

Tablica 9. ANOVA dla wariantu I (badanie typu nawierzchni i ciśnienia w oponie)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Typ naw	2	0.06978	0.034892	20.78	0.000
Cisnienie	2	0.05096	0.025478	15.17	0.000
Typ naw*Cisnienie	4	0.18503	0.046257	27.55	0.000
Error	63	0.10578	0.001679		
Total	71	0.41155			



Rysunek 17. Porównanie różnic w średnich wariancjach dla wariantu I.

Tablica 10. Test Bonferroni dla wielokrotnego porównania średnich wariancji dla wariantu I.

Difference of Typ naw*Cisnienie Levels	Difference of Means	Simultaneous 95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
(HMA L) - (HMA H)	0.1808	(0.1122, 0.2493)	8.82	0.000
(HMA N) - (HMA H)	-0.0333	(-0.1018, 0.0352)	-1.62	1.000
(PCC H) - (HMA H)	-0.0329	(-0.1014, 0.0357)	-1.61	1.000
(PCC L) - (HMA H)	-0.0052	(-0.0738, 0.0633)	-0.26	1.000
(PCC N) - (HMA H)	-0.0098	(-0.0784, 0.0587)	-0.48	1.000
(SMA H) - (HMA H)	0.0196	(-0.0490, 0.0881)	0.96	1.000
(SMA L) - (HMA H)	-0.0512	(-0.1197, 0.0173)	-2.50	0.542
(SMA N) - (HMA H)	-0.0216	(-0.0902, 0.0469)	-1.06	1.000

(HMA N) - (HMA L)	-0.2140	(-0.2826, -0.1455)	-10.45	0.000
(PCC H) - (HMA L)	-0.2136	(-0.2822, -0.1451)	-10.43	0.000
(PCC L) - (HMA L)	-0.1860	(-0.2545, -0.1175)	-9.08	0.000
(PCC N) - (HMA L)	-0.1906	(-0.2591, -0.1221)	-9.30	0.000
(SMA H) - (HMA L)	-0.1612	(-0.2297, -0.0926)	-7.87	0.000
(SMA L) - (HMA L)	-0.2320	(-0.3005, -0.1634)	-11.32	0.000
(SMA N) - (HMA L)	-0.2024	(-0.2709, -0.1338)	-9.88	0.000
(PCC H) - (HMA N)	0.0004	(-0.0681, 0.0689)	0.02	1.000
(PCC L) - (HMA N)	0.0280	(-0.0405, 0.0966)	1.37	1.000
(PCC N) - (HMA N)	0.0234	(-0.0451, 0.0920)	1.14	1.000
(SMA H) - (HMA N)	0.0529	(-0.0157, 0.1214)	2.58	0.439
(SMA L) - (HMA N)	-0.0179	(-0.0865, 0.0506)	-0.87	1.000
(SMA N) - (HMA N)	0.0117	(-0.0569, 0.0802)	0.57	1.000
(PCC L) - (PCC H)	0.0276	(-0.0409, 0.0962)	1.35	1.000
(PCC N) - (PCC H)	0.0230	(-0.0455, 0.0916)	1.12	1.000
(SMA H) - (PCC H)	0.0525	(-0.0161, 0.1210)	2.56	0.463
(SMA L) - (PCC H)	-0.0183	(-0.0869, 0.0502)	-0.89	1.000
(SMA N) - (PCC H)	0.0113	(-0.0573, 0.0798)	0.55	1.000
(PCC N) - (PCC L)	-0.0046	(-0.0731, 0.0639)	-0.22	1.000
(SMA H) - (PCC L)	0.0248	(-0.0437, 0.0934)	1.21	1.000
(SMA L) - (PCC L)	-0.0460	(-0.1145, 0.0226)	-2.24	1.000
(SMA N) - (PCC L)	-0.0164	(-0.0849, 0.0522)	-0.80	1.000
(SMA H) - (PCC N)	0.0294	(-0.0391, 0.0980)	1.44	1.000
(SMA L) - (PCC N)	-0.0414	(-0.1099, 0.0272)	-2.02	1.000
(SMA N) - (PCC N)	-0.0118	(-0.0803, 0.0568)	-0.57	1.000
(SMA L) - (SMA H)	-0.0708	(-0.1393, -0.0023)	-3.46	0.036
(SMA N) - (SMA H)	-0.0412	(-0.1097, 0.0273)	-2.01	1.000
(SMA N) - (SMA L)	0.0296	(-0.0390, 0.0981)	1.44	1.000

Z Tablica 10 i Rysunek 17 można zauważyć, że wyniki przy betonie asfaltowym (HMA) i przy niskim ciśnieniu w oponie (L) dają statystycznie większą wariancję, co można było graficznie zaobserwować również na Rysunek 16. W Tablica 10 zaznaczone są statystycznie różne kombinacje nawierzchni i ciśnienia w oponie. Poza wspomnianą już kombinacją HMA/L, jest jeszcze jeden przypadek dla SMA, gdzie różnica pomiędzy ciśnieniem L i H jest statystycznie znacząca. Obserwując Rysunek 16 można stwierdzić, że przypadek HMA/L jest dość zastanawiający, tzn. 3 z 8 przejazdów miały stosunkowo niską wariancję, a pozostałe 5 przejazdów charakteryzowała wariancja ponad dwukrotnie większa. Być może było to spowodowane jakimiś niezarejestrowanymi warunkami pomiarowymi – dane pochodzą z bloku 001A6 z Tablica 4, tym bardziej że nie zaobserwowano podobnego zachowania dla opony STO (blok 001D3). W podsumowaniu można wyliczyć następujące średnie wartości wariancji dla wariantu I (Tablica 11).

Tablica 11. Średnie wartości wariancji dla wariantu I

Typ naw. = HMA, Opona = STN

Variable	C iś. opona	Odch yl. Stand [dB]	Wari ancja [dB]

Ogólny IL [dBA]	H	0.287	0.0821
	L	0.481	0.232
	N	0.188	0.0352

Typ naw. = PCC, Opona = STN

Variable	C iś. opona	Odch yl. Stand [dB]	Wari ancja [dB]
Ogólny IL [dBA]	H	0.317	0.100
	L	0.341	0.116
	N	0.298	0.0890

Typ naw. = SMA, Opona = STN

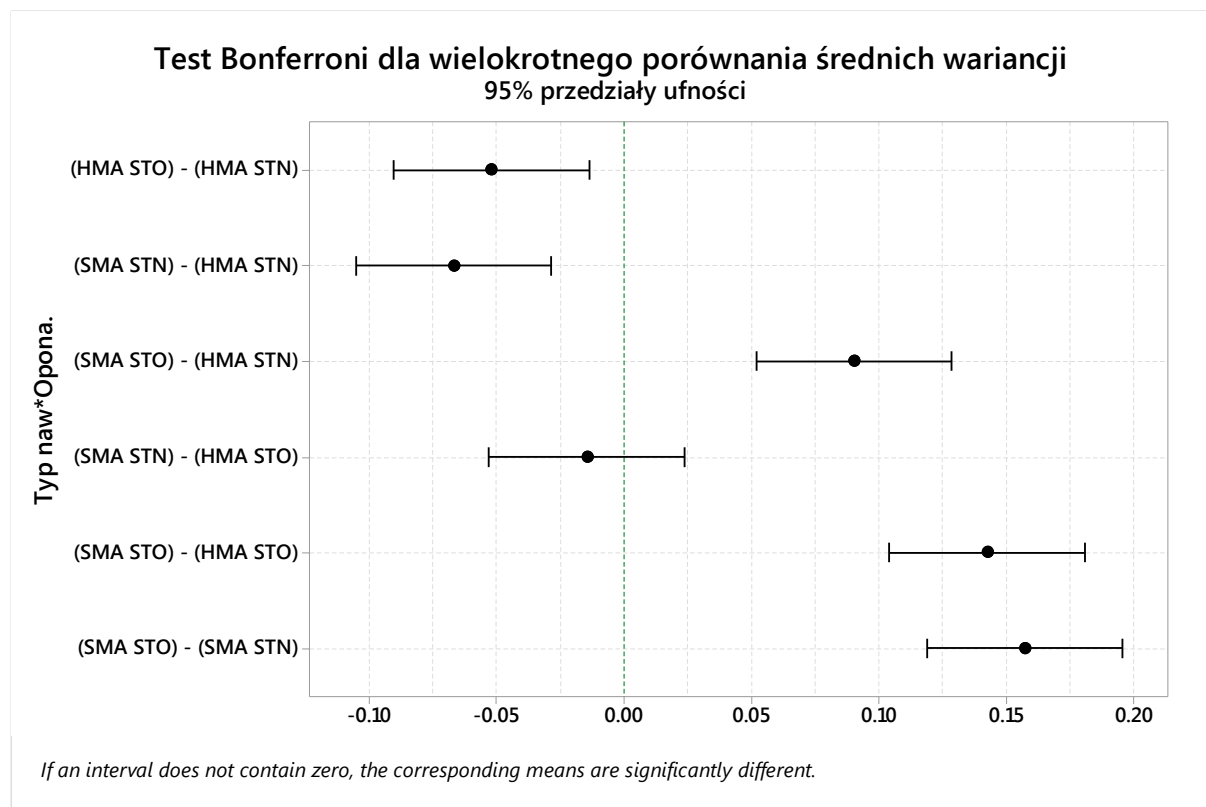
Variable	C iś. opona	Odch yl. Stand [dB]	Wari ancja [dB]
Ogólny IL [dBA]	H	0.325	0.106
	L	0.314	0.0984
	N	0.289	0.0837

Tablica 12 przedstawia wyniki ANOVA dla wariantu II na wartościach wariancji. Nawierzchnia, ciśnienie i opona podobnie wpływają na wariancję (zbliżone wartości SS) jak i większość ich interakcji. Można zauważyć że czynnik interakcji „Typ naw*Opona” ma największy wpływ na zmienność w wariancji, dlatego też zbadano bliżej różnice między różnymi kombinacjami nawierzchni i opony. Te różnice przedstawione zostały na Rysunek 18 i w Tablica 13.

Tablica 12. ANOVA dla wariantu II (badanie wieku opony i ciśnienia w oponie)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Typ naw	1	0.03409	0.034088	14.08	0.000
Cisnienie	2	0.02601	0.013004	5.37	0.006
Opona.	1	0.06605	0.066045	27.28	0.000
Typ naw*Cisnienie	2	0.05134	0.025669	10.60	0.000
Typ naw*Opona.	1	0.26254	0.262539	108.44	0.000
Cisnienie*Opona.	2	0.04410	0.022049	9.11	0.000

Typ naw*Cisnienie*Opona.	2	0.11998	0.059989	24.78	0.000
Error	84	0.20336	0.002421		
Total	95	0.80746			



Rysunek 18. Porównanie różnic w średnich wariancjach dla wariantu II (interakcja nawierzchni i opony)

Tablica 13. Test Bonferroni dla wielokrotnego porównania średnich wariancji dla wariantu II (interakcja nawierzchni i opony)

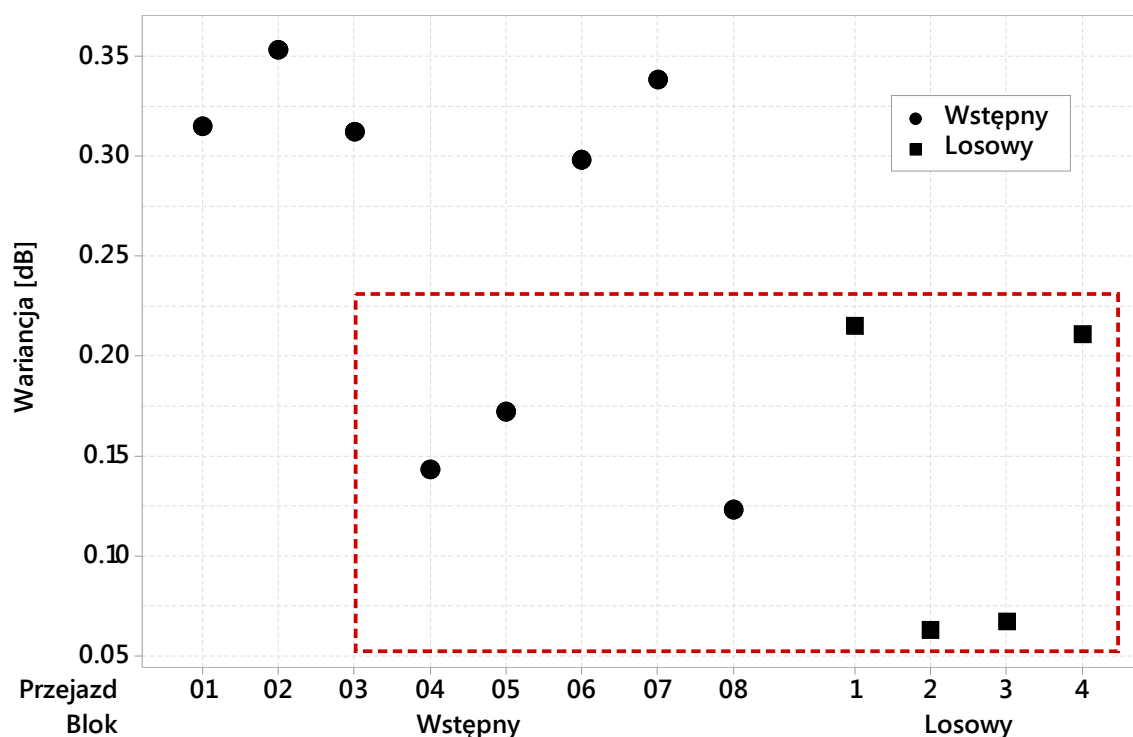
Difference of Typ naw*Opona. Levels	Difference of Means	Simultaneous 95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
(HMA STO) - (HMA STN)	-0.0521	(-0.0905, -0.0138)	-3.67	0.003
(SMA STN) - (HMA STN)	-0.0669	(-0.1053, -0.0285)	-4.71	0.000
(SMA STO) - (HMA STN)	0.0901	(0.0518, 0.1285)	6.35	0.000
(SMA STN) - (HMA STO)	-0.0148	(-0.0532, 0.0236)	-1.04	1.000
(SMA STO) - (HMA STO)	0.1423	(0.1039, 0.1807)	10.02	0.000
(SMA STO) - (SMA STN)	0.1570	(0.1187, 0.1954)	11.06	0.000

Testy wielokrotnego porównania potwierdzają, że:

- wariancja dla opony STN dla dwóch różnych nawierzchni (SMA i HMA) jest statystycznie różna – jest to spowodowane wysoką wariancją dla kombinacji HMA/STN/L, jak dyskutowano wcześniej,

- opona STO (starsza) zawsze prowadzi do statystycznie różnych wyników, i tak w przypadku SMA spowodowała znacząco większą wariancję, a dla HMA wnioski byłyby podobne gdyby nie ponowne wyniki dla HMA/STN/L.

Wyniki dla kombinacji HMA/STN/L sprawdzono z pełnego bloku 001A6, tzn. porównano wartości wariancji z ośmiu początkowych przejazdów przy 72 km/h z wartościami z czterech przejazdów dalszej „losowej” części tego samego bloku (porównaj Rysunek 4 i Tablica 12). Jak pokazuje Rysunek 19, wyniki wariancji z przejazdów w bloku „losowym” są poniżej 0.22, a więc zdecydowanie bliżej do wartości uzyskanych przy ciśnieniu N i H. Potwierdza to przypuszczenie, że tych pięć wysokich wyników wariancji z przejazdu wstępnego jest obciążone nieznanym błędem przypadkowym.



Rysunek 19. Próba wyników wyjaśnienia wariancji dla kombinacji HMA/STN/L

Tablica 14. Średnie wartości wariancji dla wariantu II (wartości dla STO)

Results for Typ naw. = HMA, Opona = STO

Variable	Ciś. opona	Odchyl. Stand [dB]	Wariancja [dB]
Ogólny IL [dBA]	H	0.269	0.0724
	L	0.209	0.0439
	N	0.290	0.0841

Results for Typ naw. = SMA, Opona = STO

Variable	Ciś. opona	Odchyl. Stand [dB]	Wariancja [dB]
Ogólny IL [dBA]	H	0.538	0.289

	L	0.512	0.262
	N	0.491	0.241

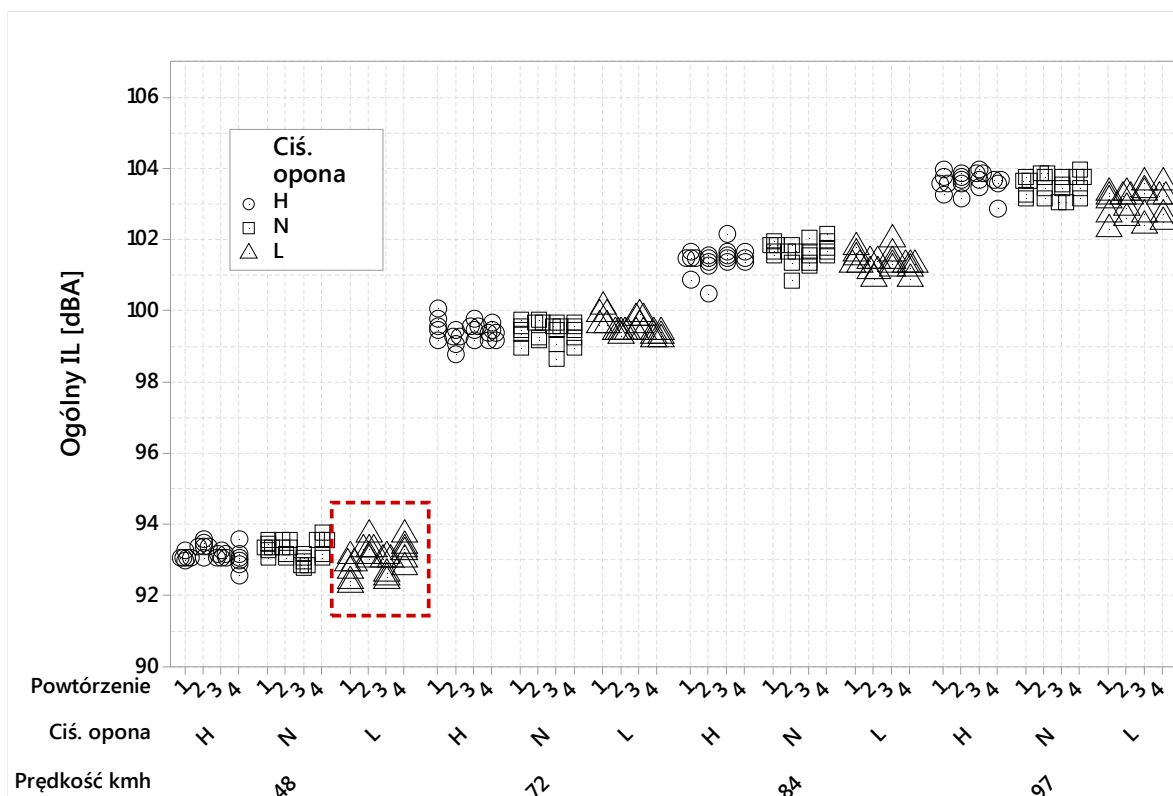
5.2. Dokładność

W odróżnieniu od poprzedniego rozdziału, który rozpatrywał wartości wariancji w aspekcie precyzji pomiarów, ten rozdział skupia się na wartościach oczekiwanych z różnych pomiarów, czyli na wartościach średnich. Do tej analizy wykorzystano następujące bloki eksperymentu z pełnymi zakresami PZ:

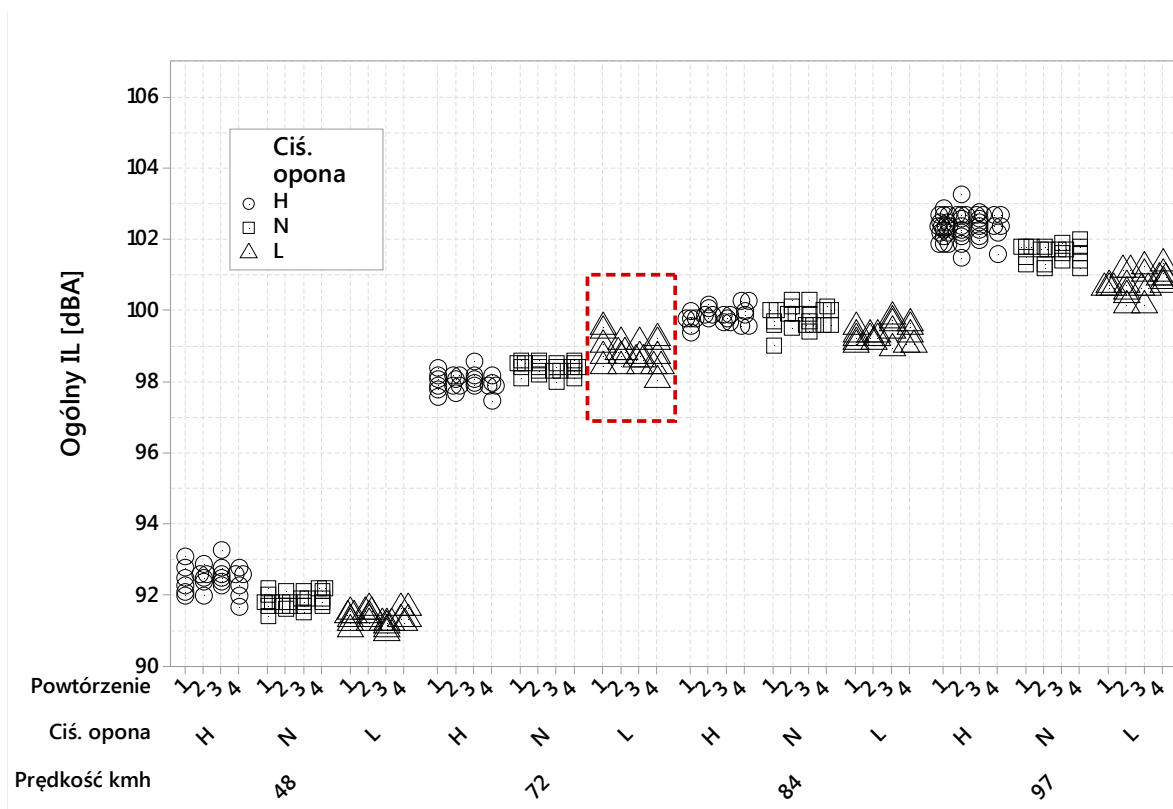
001A1	001A2	001A3	001A4	001A5	001A6
001D1	001D2	001D3	001D4	001D5	001D6
003A1	003A2	003A3			

Z tych bloków uwzględniono 16-ście przejazdów losowych przy czterech różnych prędkościach z czterema powtórzeniami dla każdej z prędkości czyli jest to inny zestaw wyników niż w poprzednim rozdziale. Dokładność rozpatrywana jest w funkcji: rodzaju nawierzchni, prędkości, wieku opony, ciśnienia w oponie. Cała analiza jest wykonana dla nominalnej pozycji czujników b (76 mm).

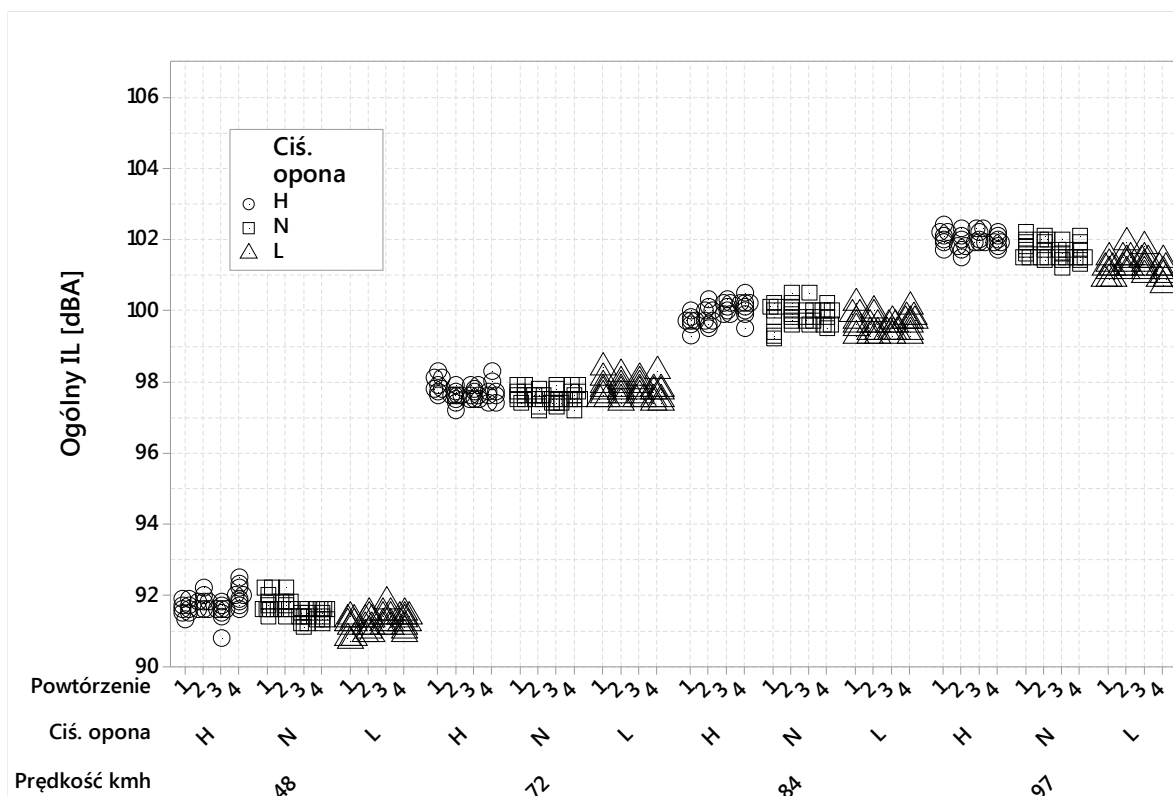
Graficznie wyniki uwzględnione w analizie dokładności są pokazane na Rysunek 20 do Rysunek 24. Pojedyncze punkty to wartości ogólnego IL dla indywidualnych sekcji pomiarowych. W analizie dokładności porównuje się między sobą wartości średnie z czterech powtórzeń przy tych samych warunkach. Należy też zwrócić uwagę, że analiza została wykonana osobno dla STN i STO (bez BC) ze względu na wnioski z poprzedniego rozdziału o precyzji. Ogólnie/wizualnie można zaobserwować dużą dokładność w obrębie każdej kombinacji opony, nawierzchni, ciśnienia i prędkości. Są różnice, np. SMA/STN/48/L lub BA/STN/72/L gdzie można zaobserwować pewne różnice między powtórzeniami. Ale dopiero analiza statystyczna pozwoli ocenić czy rzeczywiście powtórzenia w obrębie tych kombinacji czynników są statystycznie różne.



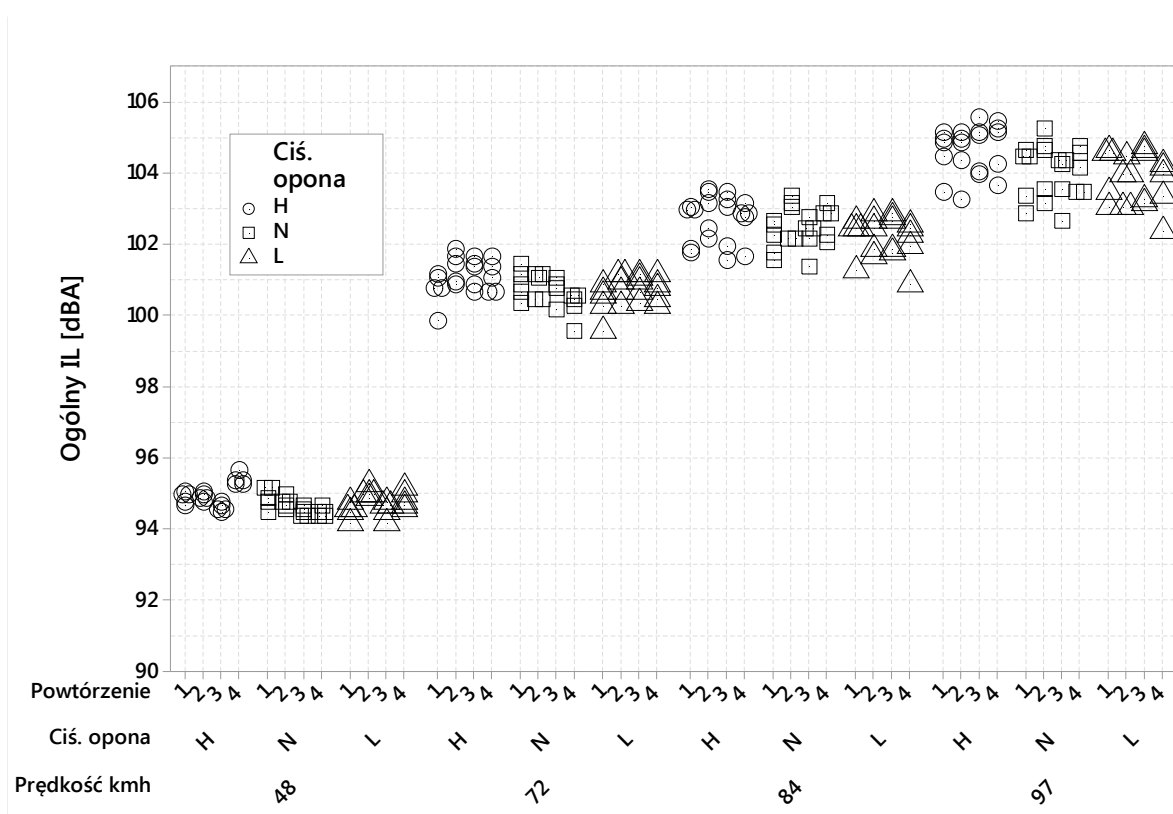
Rysunek 20. Porównanie wyników ogólnego natężenia dźwięku (IL) dla nawierzchni SMA i opony STN w kontekście powtarzalności



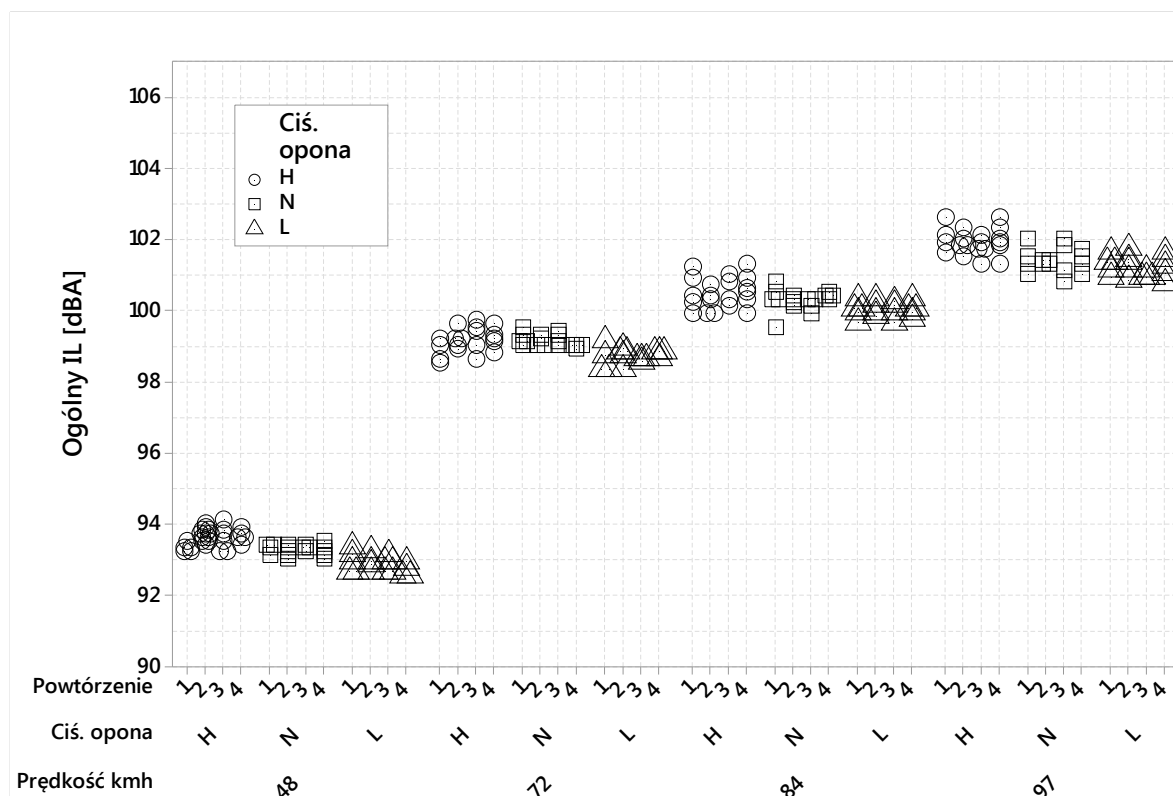
Rysunek 21. Porównanie wyników ogólnego natężenia dźwięku (IL) dla nawierzchni BA i opony STN w kontekście powtarzalności



Rysunek 22. Porównanie wyników ogólnego natężenia dźwięku (IL) dla nawierzchni BC i opony STN w kontekście powtarzalności



Rysunek 23. Porównanie wyników ogólnego natężenia dźwięku (IL) dla nawierzchni SMA i opony STO w kontekście powtarzalności



Rysunek 24. Porównanie wyników ogólnego natężenia dźwięku (IL) dla nawierzchni BA i opony STO w kontekście powtarzalności

Porównanie statystyczne pomiędzy powtórzeniami zostało wykonane za pomocą testu równości dwóch średnich (test dla dwóch prób) i wyniki są przedstawione w Tablica 15 do Tablica 19. W tych tabelach są pogrupowane wyniki w obrębie każdej kombinacji opony, nawierzchni, ciśnienia i prędkości oznaczone literami A, B itd. Kombinacje, które należą do tej samej grupy, mają statystycznie takie same wartości średnie. Niejako przy okazji można zaobserwować różnice pomiędzy poszczególnymi poziomami prędkości i ciśnienia. Na podstawie analizy można sformułować następujące wnioski:

- SMA/STN: bardzo dobra powtarzalność potwierdzona prawie bezbłędnym grupowaniem poszczególnych kombinacji i ich powtórzeń. W przypadku SMA/STN/48/L potwierdziło się, że dwa z czterech powtórzeń są statystycznie różne (grupa E) ale z kolei wszystkie powtórzenia zostały sklasyfikowane do wspólnej grupy F.
- BA/STN: mimo większej liczby grup (która świadczy o większym wpływie różnych poziomów prędkości i ciśnienia na ogólny poziom natężenia dźwięku), we wszystkich kombinacjach analiza pogrupowała powtórzenia. Dla BA/STN/72/L, analiza nie potwierdziła obserwacji z Rysunek 21 – wszystkie powtórzenia są sklasyfikowane w grupie J.
- BC/STN: we wszystkich kombinacjach z wyjątkiem jednej, analiza poprawnie pogrupowała powtórzenia; dla BC/STN/48/H, jedno z powtórzeń (numer 4) nie zostało sklasyfikowane do wspólnej grupy z innymi. Trzeba jednak zauważyć, że różnice są na poziomie jednego odchylenia standardowego, więc praktycznie niewielkie.
- SMA/STO: duża liczba grup jest pochodną znacznego rozrzutu w pomiarach (porównaj Rysunek 23) ale dla powtórzeń dla każdej prędkości jest jedna grupa, która statystycznie znacząco grupuje powtórzenia do odpowiednio grup: A, I, R oraz S.

- BA/STO: dla każdej kombinacji prędkości i ciśnienia, analiza jednoznacznie grupuje powtórzenia w oczekiwane zbiory.

Tablica 15. Sprawdzenie średnich przejazdów dla SMA/STN (porównanie Bonferroni przy poziomie ufności 95%)

Kombinacje	N	Średnia	GRUPY	
97 N 4	5	103.6	A	B
97 N 3	5	103.4	A	B
97 N 2	5	103.6	A	B
97 N 1	5	103.5	A	B
97 L 4	5	103.0	A	B
97 L 3	5	103.1	A	B
97 L 2	5	103.0	A	B
97 L 1	5	102.9		B
97 H 4	4	103.4	A	B
97 H 3	5	103.8	A	
97 H 2	5	103.6	A	B
97 H 1	5	103.6	A	B
84 N 4	5	101.8		C
84 N 3	5	101.6		C
84 N 2	5	101.5		C
84 N 1	5	101.8		C
84 L 4	5	101.2		C
84 L 3	5	101.5		C
84 L 2	5	101.2		C
84 L 1	5	101.5		C
84 H 4	3	101.5		C
84 H 3	5	101.6		C
84 H 2	5	101.2		C
84 H 1	5	101.4		C
72 N 4	5	99.4		D
72 N 3	6	99.3		D
72 N 2	5	99.5		D
72 N 1	5	99.4		D
72 L 4	6	99.3		D
72 L 3	6	99.6		D
72 L 2	6	99.4		D
72 L 1	5	99.8		D
72 H 4	6	99.4		D
72 H 3	5	99.5		D
72 H 2	5	99.2		D
72 H 1	5	99.6		D
48 N 4	6	93.4		E
48 N 3	6	92.9		E F
48 N 2	6	93.3		E F
48 N 1	6	93.3		E F
48 L 4	6	93.2		E F
48 L 3	6	92.8		F
48 L 2	6	93.3		E F
48 L 1	6	92.7		F
48 H 4	6	93.0		E F
48 H 3	6	93.1		E F
48 H 2	6	93.4		E F
48 H 1	6	93.1		E F

Tablica 16. Sprawdzenie średnich przejazdów dla BA/STN (porównanie Bonferroni przy poziomie ufności 95%)

Kombinacje	N	Średnia	GRUPY			
97 N 4	5	101.6	B	C		
97 N 3	5	101.6	B	C		
97 N 2	5	101.5		C		
97 N 1	5	101.6	B	C		
97 L 4	6	100.9		C	D	
97 L 3	5	100.7			D	
97 L 2	6	100.7			D	E
97 L 1	4	100.6			D	E F
97 H 4	6	102.3	A	B		
97 H 3	9	102.4	A			
97 H 2	11	102.4	A			
97 H 1	17	102.3	A			
84 N 4	5	99.8			F	G
84 N 3	6	99.7			G	H
84 N 2	5	99.9			F	G
84 N 1	5	99.6			G	H
84 L 4	5	99.3			G	H I J
84 L 3	5	99.5			G	H I
84 L 2	5	99.2			G	H I J
84 L 1	5	99.2			G	H I J
84 H 4	6	99.9			F	G
84 H 3	5	99.8			G	H
84 H 2	5	99.9			E	F G
84 H 1	6	99.7			G	H
72 N 4	6	98.4				K L M N
72 N 3	5	98.3				K L M N
72 N 2	5	98.4				K L M N
72 N 1	5	98.4				K L M N
72 L 4	6	98.6			J	K L M
72 L 3	5	98.7			J	K L M
72 L 2	5	98.8			I	J K L
72 L 1	5	99.0			H	I J K
72 H 4	5	97.9				N
72 H 3	5	98.1			L	M N
72 H 2	6	98.0				M N
72 H 1	6	98.0				M N
48 N 4	6	92.0				O P Q
48 N 3	6	91.8				P Q R
48 N 2	6	91.8				P Q R
48 N 1	6	91.8				P Q R
48 L 4	5	91.4				Q R
48 L 3	6	91.1				R
48 L 2	6	91.4				Q R
48 L 1	6	91.3				Q R
48 H 4	6	92.3				O P
48 H 3	6	92.6				O
48 H 2	6	92.5				O P
48 H 1	6	92.4				O P

Tablica 17. Sprawdzenie średnich przejazdów dla BC/STN (porównanie Bonferroni przy poziomie ufności 95%)

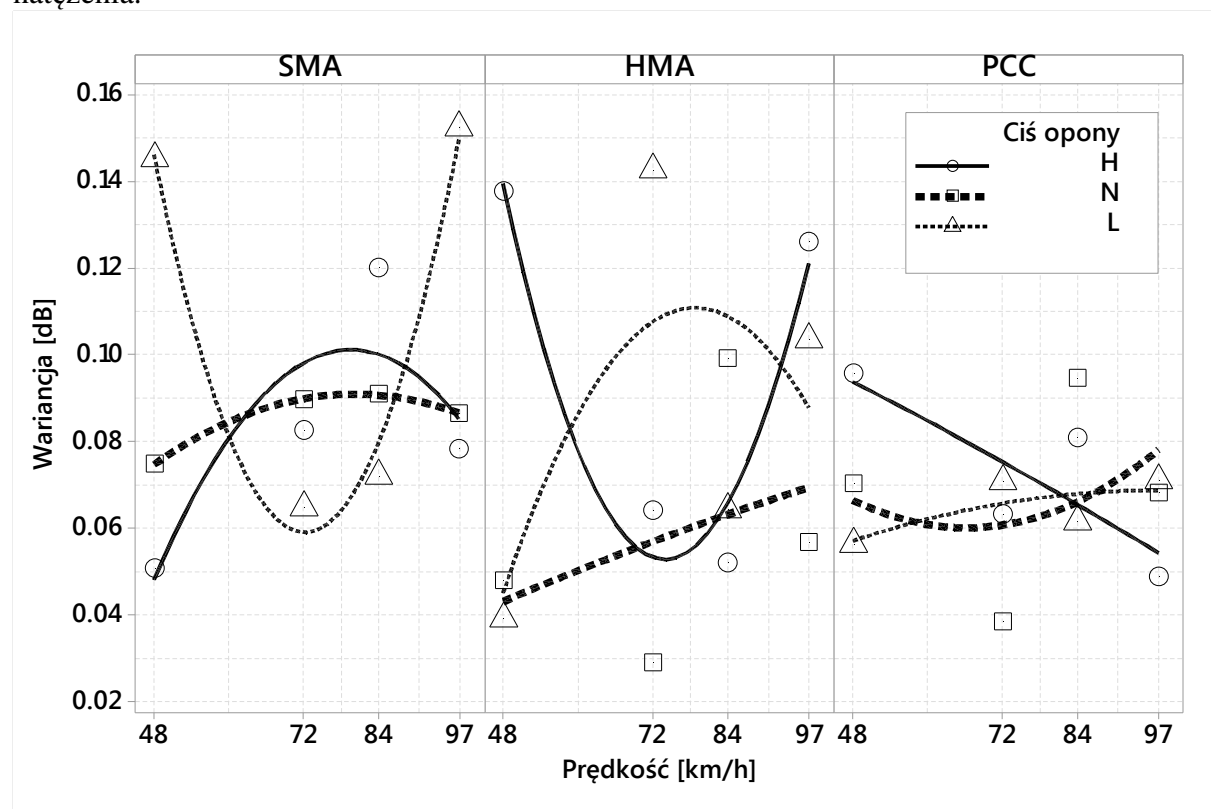
Kombinacje	N	Średnia	GRUPY			
97 N 4	8	101.6	A	B	C	D
97 N 3	8	101.6	A	B	C	D
97 N 2	8	101.8	A	B	C	
97 N 1	8	101.8	A	B	C	
97 L 4	8	101.1				E
97 L 3	8	101.3			C	D E
97 L 2	8	101.4		B	C	D E
97 L 1	8	101.1				D E
97 H 4	7	101.9	A			
97 H 3	7	102.1	A			
97 H 2	7	101.9	A	B		
97 H 1	7	102.1	A			
84 N 4	8	99.8				F G
84 N 3	8	99.9				F G
84 N 2	8	100.0				F G
84 N 1	8	99.8				F G
84 L 4	9	99.7				F G
84 L 3	8	99.5				G
84 L 2	8	99.6				G
84 L 1	7	99.7				F G
84 H 4	8	100.1				F
84 H 3	7	100.1				F
84 H 2	8	99.9				F G
84 H 1	7	99.7				F G
72 N 4	9	97.6				H
72 N 3	9	97.5				H
72 N 2	8	97.5				H
72 N 1	9	97.6				H
72 L 4	9	97.7				H
72 L 3	8	97.8				H
72 L 2	8	97.8				H
72 L 1	8	97.8				H
72 H 4	8	97.7				H
72 H 3	9	97.7				H
72 H 2	9	97.6				H
72 H 1	8	97.9				H
48 N 4	10	91.4				J K L
48 N 3	10	91.4				J K L
48 N 2	9	91.7			I	J
48 N 1	10	91.8			I	J
48 L 4	10	91.2				K L
48 L 3	9	91.4				J K L
48 L 2	9	91.2				K L
48 L 1	9	91.1				L
48 H 4	9	92.0			I	
48 H 3	8	91.5				J K L
48 H 2	8	91.8			I	J
48 H 1	9	91.6			I	J K

Tablica 18. Sprawdzenie średnich przejazdów dla SMA/STO (porównanie Bonferroni przy poziomie ufności 95%)

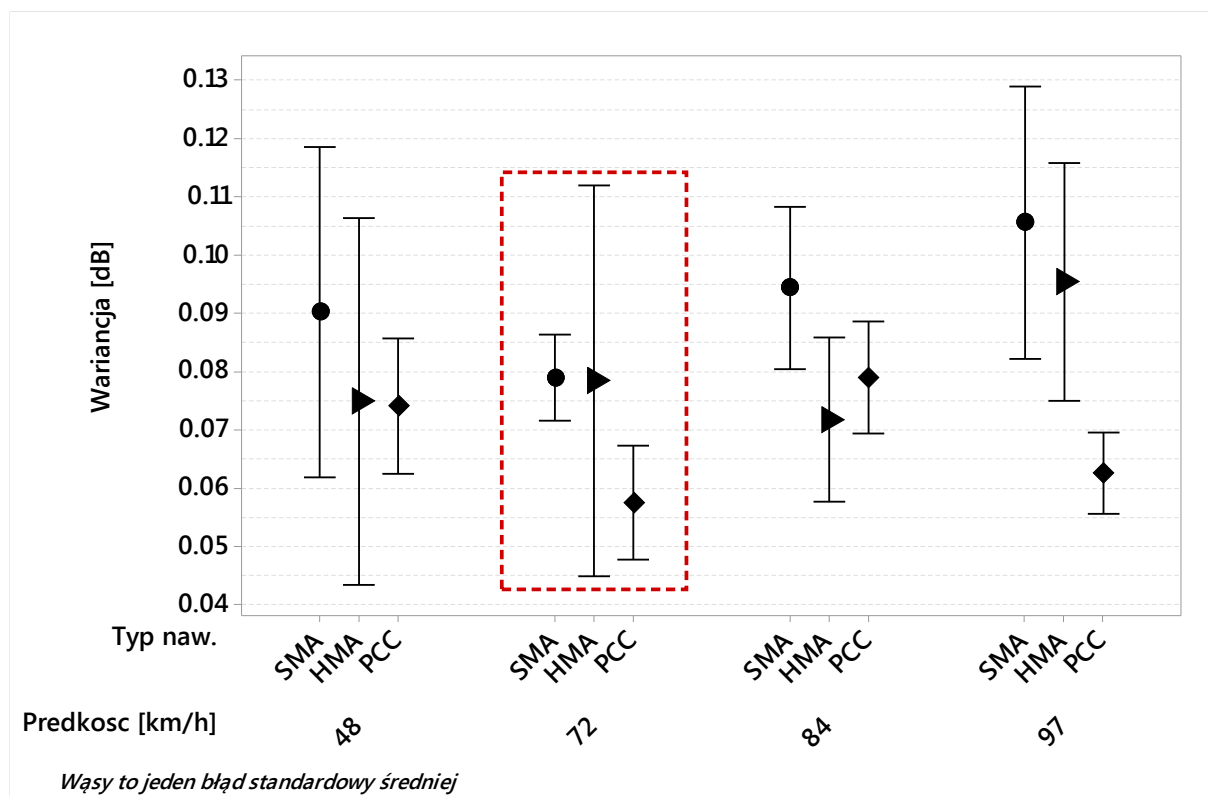
Kombinacje	N	Średnia	GRUPY																			
97 N4	5	104.1	A	B	C																	
97 N3	5	103.8	A	B	C	D	E	F														
97 N2	5	104.3	A	B																		
97 N1	5	103.9	A	B	C	D	E															
97 L4	5	103.6	A	B	C	D	E	F	G	H												
97 L3	5	104.1	A	B	C																	
97 L2	5	103.7	A	B	C	D	E	F	G													
97 L1	5	104.0	A	B	C	D																
97 H4	5	104.7	A																			
97 H3	5	104.7	A																			
97 H2	5	104.5	A																			
97 H1	5	104.6	A																			
84 N4	5	102.6					E	F	G	H	I	J										
84 N3	5	102.2								H	I	J	K	L	M	N	O					
84 N2	5	102.8			C	D	E	F	G	H	I											
84 N1	5	102.1									I	J	K	L	M	N	O	P				
84 L4	5	102.0									I	J	K	L	M	N	O	P	Q			
84 L3	5	102.4							G	H	I	J	K	L								
84 L2	5	102.3							G	H	I	J	K	L	M							
84 L1	5	102.2								H	I	J	K	L	M	N						
84 H4	5	102.6				D	E	F	G	H	I	J										
84 H3	5	102.6				D	E	F	G	H	I	J										
84 H2	5	102.9	B	C	D	E	F	G	H	I												
84 H1	5	102.5					F	G	H	I	J	K										
72 N4	5	100.3																				R
72 N3	4	100.7																P	Q	R		
72 N2	5	100.8														N	O	P	Q	R		
72 N1	5	100.9													M	N	O	P	Q	R		
72 L4	5	100.7																			Q	R
72 L3	5	100.8																O	P	Q	R	
72 L2	5	100.8																O	P	Q	R	
72 L1	5	100.4																				R
72 H4	5	101.1													L	M	N	O	P	Q	R	
72 H3	5	101.2												K	L	M	N	O	P	Q	R	
72 H2	5	101.3								J	K	L	M	N	O	P	Q	R				
72 H1	5	100.7																		Q	R	
48 N4	5	94.4																				S
48 N3	5	94.5																				S
48 N2	5	94.7																				S
48 N1	5	94.9																				S
48 L4	5	94.8																				S
48 L3	5	94.5																				S
48 L2	5	95.0																				S
48 L1	5	94.5																				S
48 H4	5	95.4																				S
48 H3	5	94.6																				S
48 H2	5	94.9																				S
48 H1	5	94.9																				S

Korzystając jeszcze z tych wyników (czyli 16-ście przejazdów losowych przy czterech różnych prędkościach z czterema powtórzeniami dla każdej z prędkości, pozycja bazowa b 76mm) można sprawdzić czy istnieje „optymalna” prędkość przy której wariancja jest najmniejsza. Rysunek 25 przedstawia wartości wariancji w funkcji rodzaju nawierzchni i ciśnienia w oponie. Można zauważyć, że nie ma jednoznacznego trendu, jaka prędkość byłaby optymalna jednocześnie dla wszystkich nawierzchni. Ale gdy rozpatrzmy ciśnienie normalne w oponie (poziom N), to wówczas można by uznać 72 km/h za najbardziej optymalną prędkość uwzględniając wszystkie prędkości. Podobnie na Rysunek 26 można zauważyć, że średnia wartość wariancji przy 72 km/h jest najniższa dla dwóch z trzech rozpatrywanych typów nawierzchni (BC i SMA) i tylko nieznacznie większa dla BA. Można więc przyjąć prędkość 72 km/h za optymalną ze względu na wariancję ogólnego poziomu natężenia.

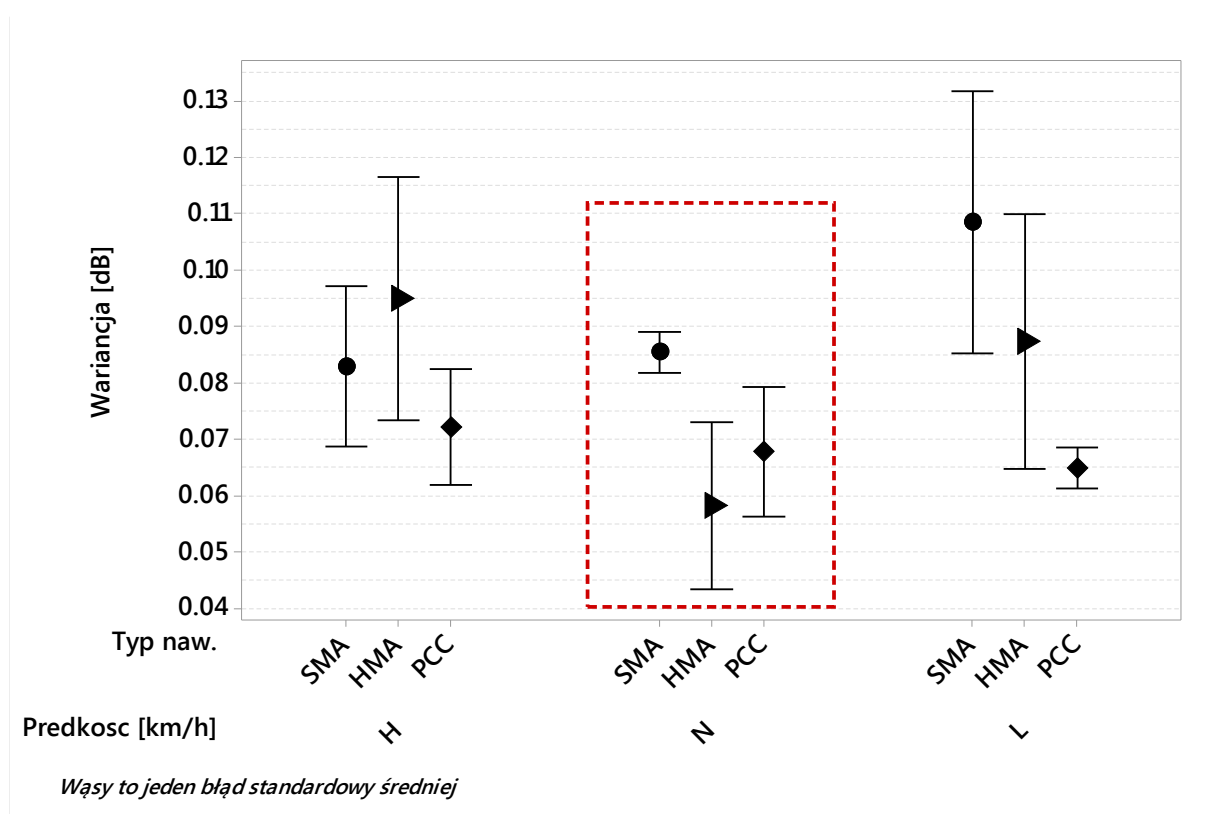
W podobny sposób można wyznaczyć „optymalne” ciśnienie w oponie. Rysunek 27 prezentuje odpowiednie porównanie i można wywnioskować, że przyjęte ciśnienie nominalne oznaczone jako N (34 psi) jest optymalne ze względu na wariancję ogólnego poziomu natężenia.



Rysunek 25. Wpływ prędkości na wariancję w przejazdach losowych w funkcji typu nawierzchni i ciśnienia.



Rysunek 26. Uśredniona wariancja z podziałem na typ nawierzchni i prędkość.



Rysunek 27. Uśredniona wariancja z podziałem na typ nawierzchni i ciśnienie w oponie.

5.3. Powtarzalność i odtwarzalność

Do tej analizy wykorzystano następujące bloki eksperymentu z krótkimi zakresami przejazdów KZ:

001B1	001B2	001B3	001B4	001B5	001B6
001C1	001C2	001C3	001C4	001C5	001C6

Z tych bloków uwzględniono wszystkie osiem przejazdów losowych przy czterech różnych prędkościach z dwoma powtórzeniami dla każdej z prędkości. Jest to inny zestaw wyników niż w poprzednich rozdziałach. W tych przejazdach wykorzystano tylko oponę STN (nową) i pozycje czujników h i l. Pomiary wykonano na nawierzchni z BA.

Powtarzalność i odtwarzalność wyznaczono na podstawie analizy wariancji ANOVA (metoda R&R). Jako obiekt pomiaru przyjęto przejazd na odcinku testowym przy określonych warunkach prędkości, pozycji i ciśnienia. Każdy przejazd składał się z kilku sekcji pomiarowych, czyli powtórzeń. Każdy z przejazdów w ustalonych warunkach został wykonany dwukrotnie (raz pierwszego dnia i raz drugiego dnia pomiarowego) przez innych operatorów.

Metoda R&R składa się z następujących etapów:

- 1) Przeprowadzenie analizy ANOVA dla przejazdów w ustalonych warunkach (porównaj Tablica 20)
- 2) Wyznaczenie wartości wariancji dla operatora σ_o (proxy odtwarzalności) i błędu σ_e (proxy powtarzalności).
- 3) Obliczenie wartości błędu metody, R&R, ze wzoru:

$$R\&R = \sqrt{\sigma_e + \sigma_o}$$

- 4) Przyjęcie tolerancji wyników pomiaru, T (np. T=3 dB dla +/- 1.5 dB)
- 5) Wyznaczenie wskaźnika precyzji do tolerancji P/T ze wzoru:

$$P/T = \frac{5.15 \cdot R\&R}{T}$$

Wartość P/T powinna być mniejsza od 0.3, żeby system pomiarowy uznać za akceptowalny a pomiędzy 0.3 i 0.5 względnie akceptowalny.

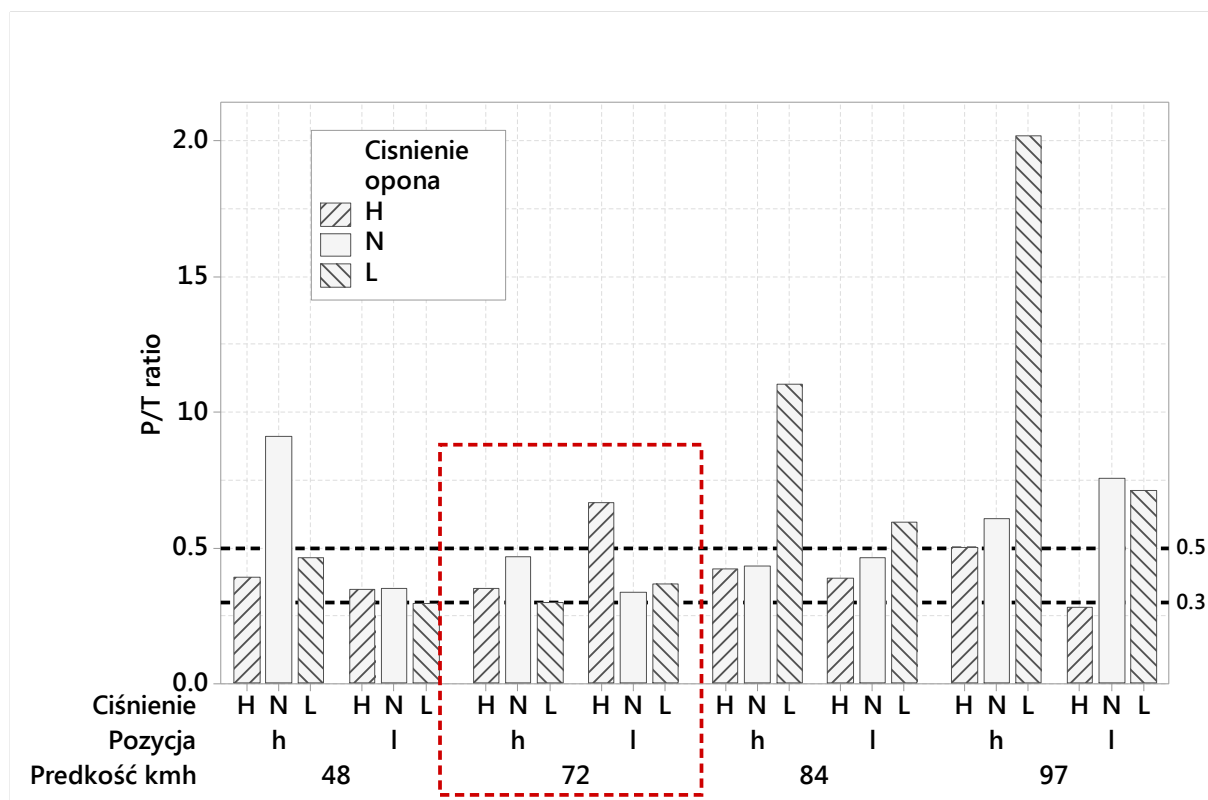
Tablica 20. Przykład analizy ANOVA dla prędkości 97 km/h, pozycji l i ciśnienia N

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Dzień	1	0.64800	0.648000	5.08	0.038
Przejazd	1	0.16200	0.162000	1.27	0.275
Error	17	2.16800	0.127529		
Lack-of-Fit	1	0.00800	0.008000	0.06	0.811
Pure Error	16	2.16000	0.135000		
Total	19	2.97800			

Tablica 21 przedstawia wyniki R&R oraz P/T dla wszystkich kombinacji warunków pomiarowych. Graficznie porównanie wyników P/T jest zaprezentowane na Rysunek 28.

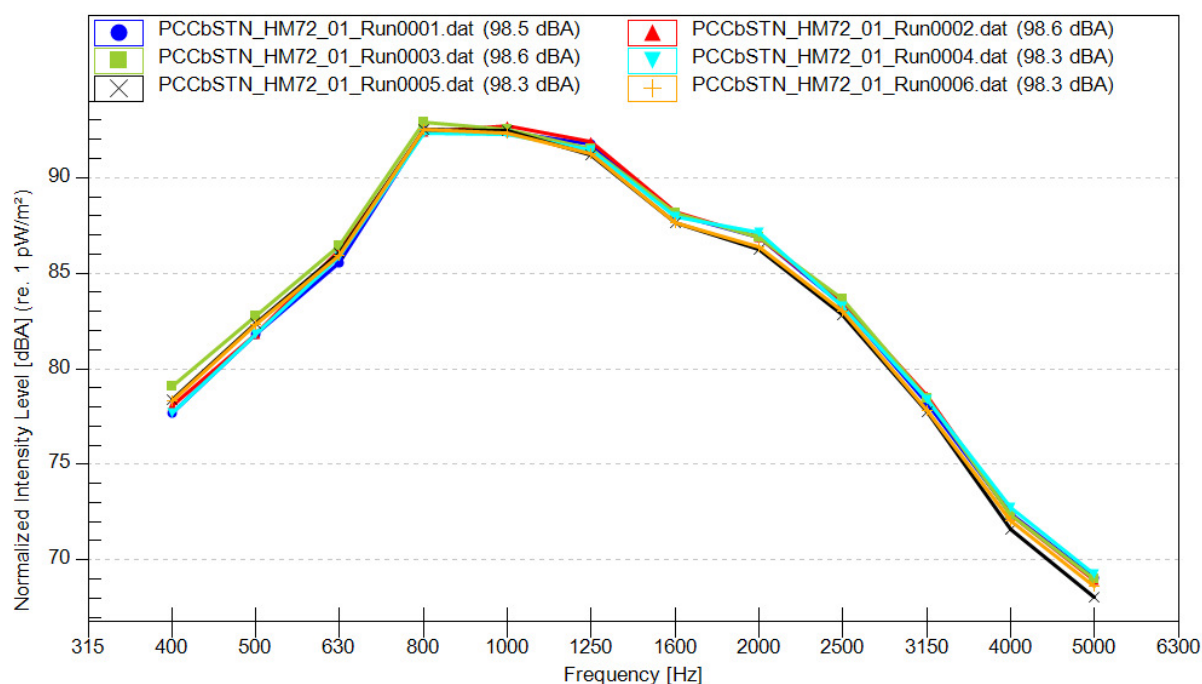
Tablica 21. Wyniki R&R oraz P/T dla wszystkich kombinacji warunków w badaniu powtarzalności i odtwarzalności

Prędkość	Pozycja	Ciśnienie	Powtarzalność σ_e	Odtwarzalność σ_o	R&R [dB]	Tolerancja [dB]	Wskaźnik P/T [-]	Średni P/T [-]
48	h	H	0.079	0.127	0.454	6	0.39	0.46
48	h	L	0.097	0.192	0.538	6	0.46	
48	h	N	0.119	1.009	1.062	6	0.91	
48	l	H	0.140	0.022	0.402	6	0.34	
48	l	L	0.062	0.056	0.344	6	0.30	
48	l	N	0.077	0.088	0.407	6	0.35	
72	h	H	0.064	0.103	0.409	6	0.35	0.41
72	h	L	0.116	0.004	0.347	6	0.30	
72	h	N	0.051	0.246	0.545	6	0.47	
72	l	H	0.100	0.502	0.776	6	0.67	
72	l	L	0.169	0.013	0.427	6	0.37	
72	l	N	0.048	0.106	0.392	6	0.34	
84	h	H	0.099	0.145	0.493	6	0.42	0.57
84	h	L	0.083	1.568	1.285	6	1.10	
84	h	N	0.171	0.085	0.505	6	0.43	
84	l	H	0.109	0.096	0.453	6	0.39	
84	l	L	0.117	0.365	0.694	6	0.60	
84	l	N	0.092	0.200	0.540	6	0.46	
97	h	H	0.134	0.208	0.585	6	0.50	0.81
97	h	L	0.105	5.436	2.354	6	2.02	
97	h	N	0.130	0.373	0.710	6	0.61	
97	l	H	0.107	0.001	0.328	6	0.28	
97	l	L	0.058	0.629	0.829	6	0.71	
97	l	N	0.128	0.648	0.881	6	0.76	



Rysunek 28. Wyniki R&R w badaniu powtarzalności i odtwarzalności

W podsumowaniu do wyników obliczeń powtarzalności i odtwarzalności można stwierdzić, że przy prędkości 72 km/h badana metoda OBSI jest względnie akceptowalna i przy tej prędkości uzyskano najniższe wartości wskaźnika P/T. Niepewność standardowa dla 72 km/h wynosi 0.5 dB (średnia dla wszystkich zbadanych warunków, średnia R&R). Dla współczynnika rozszerzenia $k=2$, niepewność rozszerzona wynosi odpowiednio 1.0 dB. Przykład rozkładu widma natężenia dźwięku dla sześciu sekcji pomiarowych przy tych samych warunkach jest pokazana na Rysunek 29.



Rysunek 29. Przykładowa demonstracja bardzo dobrej powtarzalności dla uśrednionych wyników A-ważonych poziomów natężenia w 1/3 pasmach oktawy

5.4. Wpływ czynników pomiarowych

Przy badaniu wpływu czynników pomiarowych wykorzystano komplet wyników ze wszystkich bloków eksperymentów na odcinkach 001 i 003, w sumie 2582 indywidualne sekcje pomiarowe z następujących bloków:

001A1	001A2	001A3	001A4	001A5	001A6
001B1	001B2	001B3	001B4	001B5	001B6
001C1	001C2	001C3	001C4	001C5	001C6
001D1	001D2	001D3	001D4	001D5	001D6
003A1	003A2	003A3			

Wpływ czynników został graficznie przedstawiony na kolejnych rysunkach. W większości porównań wpływ czynnika jest jednoznaczny i pod względem praktycznym/inżynierskim można ocenić wpływ na podstawie wizualnej obserwacji przedstawionych rysunków. Rysunek 30 przedstawia ogólną interakcję czynników na wartościach średnich. Można zauważyć, który z czynników (zdecydowanie prędkość, potem pozycja czujników i wiek opony) powoduje największe zmiany w średnim natężeniu dźwięku IL. Jednak niektóre zmiany są na tyle niewielkie, że przygotowano osobne rysunki do wizualnej obserwacji wpływu czynników. Poza tym, większość linii na poszczególnych rysunkach jest równoległa, co świadczy o małej interakcji pomiędzy czynnikami. Analiza statystyczna i wyznaczenie odpowiednich współczynników normalizujących dla pomierzonych wartości natężenia dźwięku jest przedstawiona w następnym rozdziale.

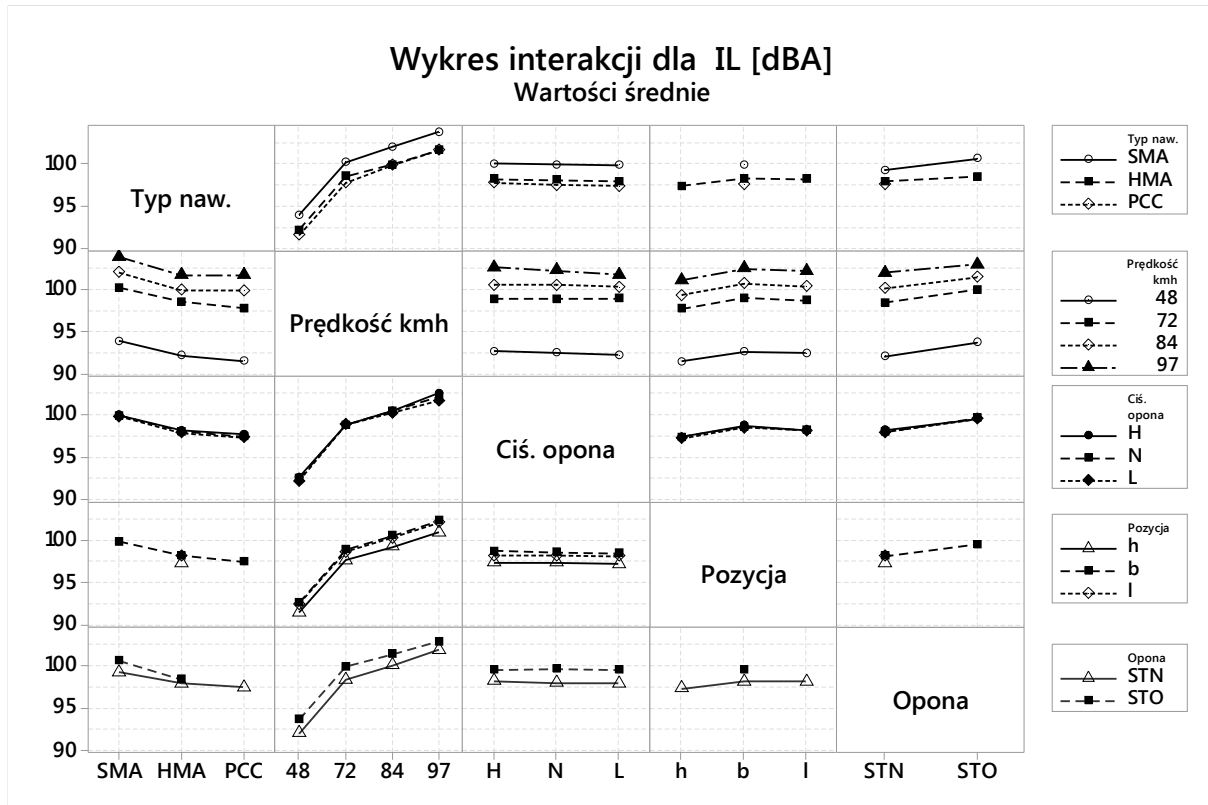
Wpływ czynników z Rysunek 31 do Rysunek 39 jest przedstawiony w uporządkowanym kontekście typu nawierzchni (SMA, BA, BC) w następującej kolejności czynników:

- prędkość pomiarów,
- ciśnienia w oponie,
- pozycja czujników nad powierzchnią nawierzchni,
- wiek opony SRTT.

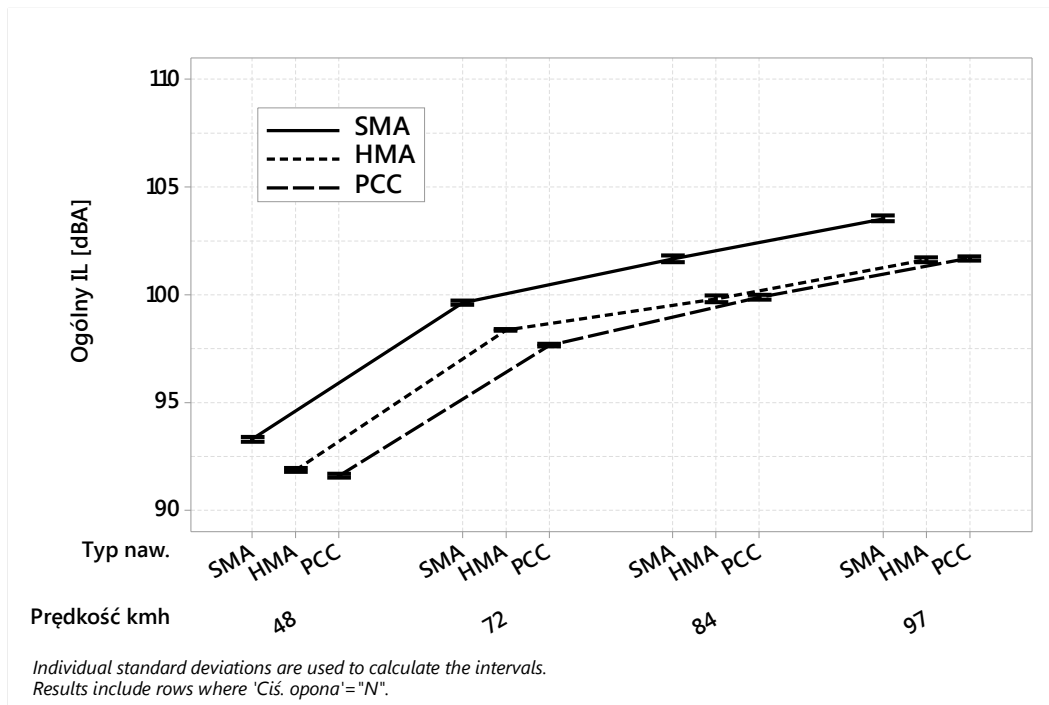
W podsumowaniu wizualnej obserwacji przedstawionych rysunków z wpływem poszczególnych czynników na ogólne natężenie dźwięku (IL) można stwierdzić, iż:

- prędkość pomiarów – największy wpływ na Rysunek 30 co jest potwierdzone na Rysunek 31 do Rysunek 33 znacznymi zmianami w ogólnym IL w zakresie badanych prędkości dla wszystkich trzech nawierzchni i przy trzech poziomach ciśnienia w oponie. Im wyższa prędkość tym wyższy IL.
- ciśnienia w oponie – niewielki wpływ jak wynika z Rysunek 30; Rysunek 34 pokazuje, że dla niektórych kombinacji nawierzchni i prędkości pomiarowej, wpływ ciśnienia w oponie jest statystycznie znaczący, np. dla HMA/48 czy HMA/97. Ogólnie im wyższe ciśnienie, tym ogólny poziom IL maleje lub pozostaje na podobnym poziomie. Jedynie dla HMA/72 wydaje się, że ze spadkiem ciśnienia w oponie ogólny IL wzrasta. Ponadto można zaobserwować, że nawierzchnia HMA jest szczególnie podatna na ciśnienie w oponie.
- pozycja czujników – potencjalnie średni wpływ z Rysunek 30; w oparciu o Rysunek 35 do Rysunek 37 można ocenić, że wysokość czujników nad nawierzchnią ma prawie zawsze znaczenie, aczkolwiek jest ono powiązane (czyli istnieje interakcja) z ciśnieniem w oponie. Różnica może wynieść nawet 2dB w najbardziej niekorzystnym przypadku, co nie jest oczywiste na Rysunek 30.
- wiek opony SRTT – potencjalnie średni wpływ z Rysunek 30. Na podstawie Rysunek 38 oraz Rysunek 39 można ocenić, że średni wpływ 8-letniej opony SRTT to zwiększenie poziomu IL o 1 dB przy 72 km/h dla obu typu nawierzchni (HMA i SMA). Można też zaobserwować brak interakcji dla nawierzchni SMA, tzn. wpływ wieku opony SRTT jest stały bez względu na prędkość czy ciśnienie w oponie. Dla nawierzchni BA, interakcja występuje szczególnie dla wyższych prędkości (84 i 97 km/h).

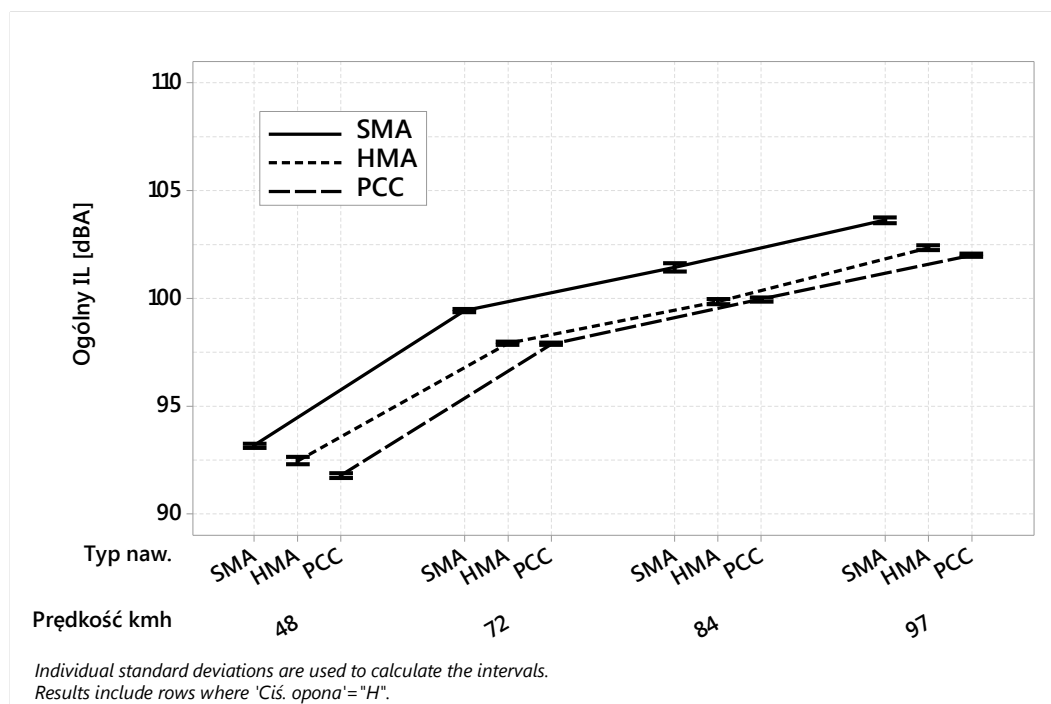
Odpowiednia analiza statystyczna do sprawdzenia tych obserwacji jest zaprezentowana w następnym rozdziale.



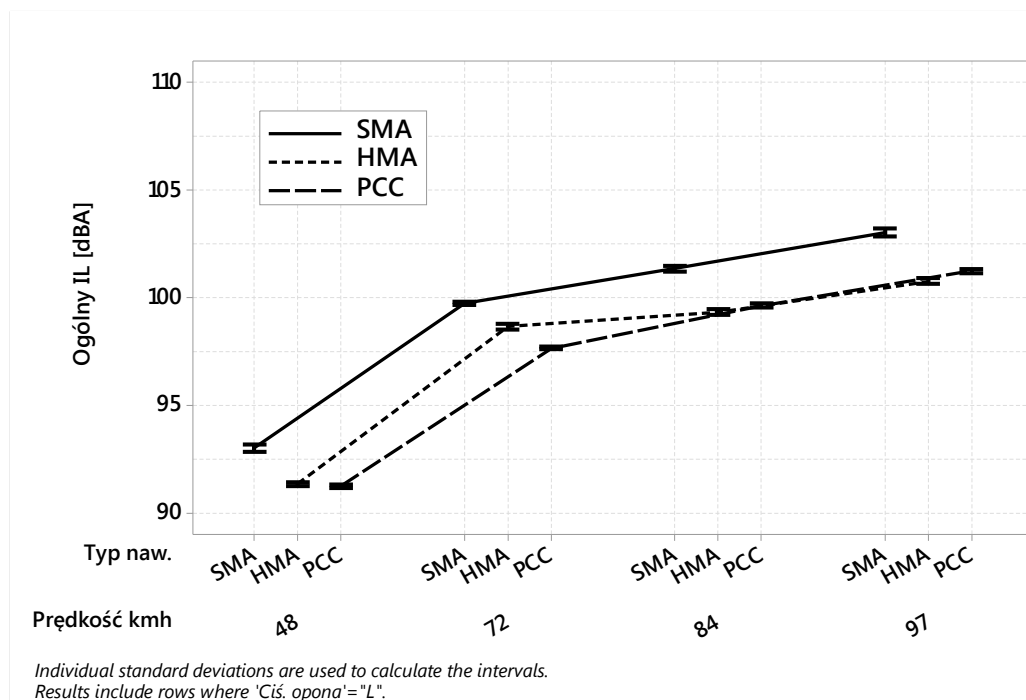
Rysunek 30. Ogólna prezentacja wpływu czynników pomiarowych i ich interakcji na podstawie wartości średnich



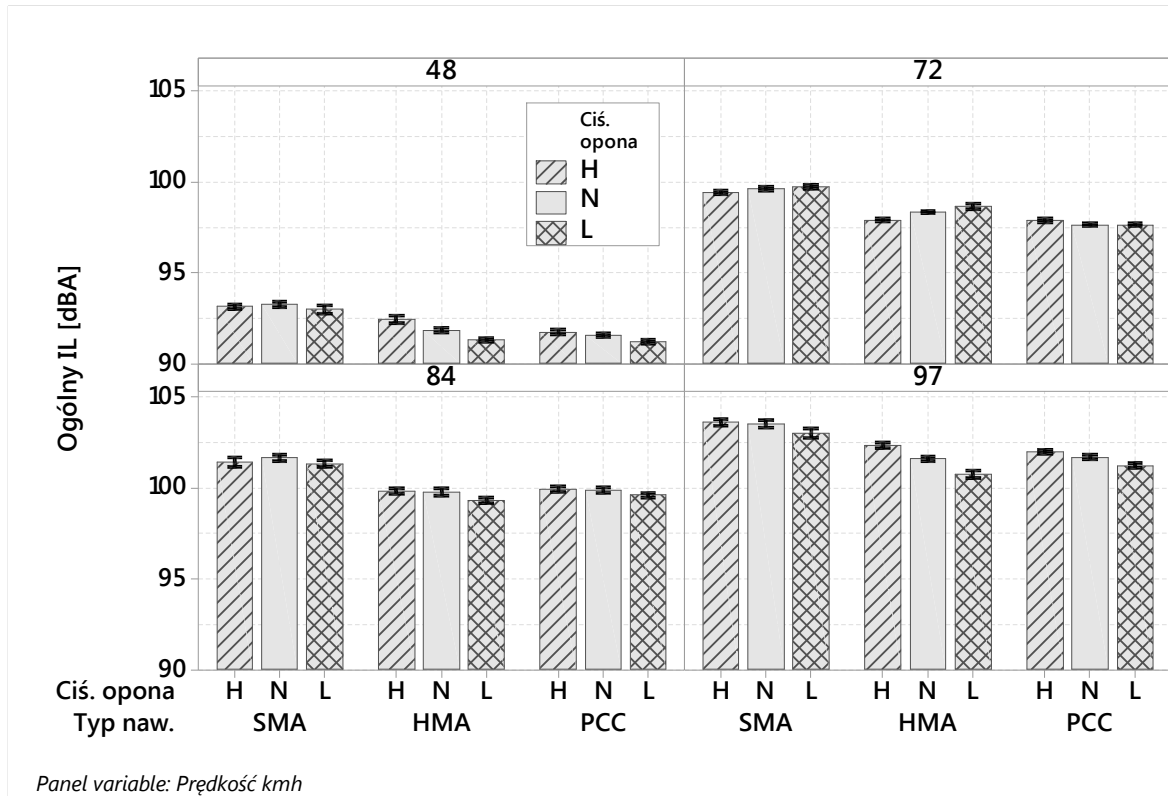
Rysunek 31. Wpływ prędkości pomiarowej dla wszystkich rodzajów nawierzchni przy pozycji czujników b, ciśnieniu N, opona STN; wąsy reprezentują 95% przedziały ufności dla wartości średniej



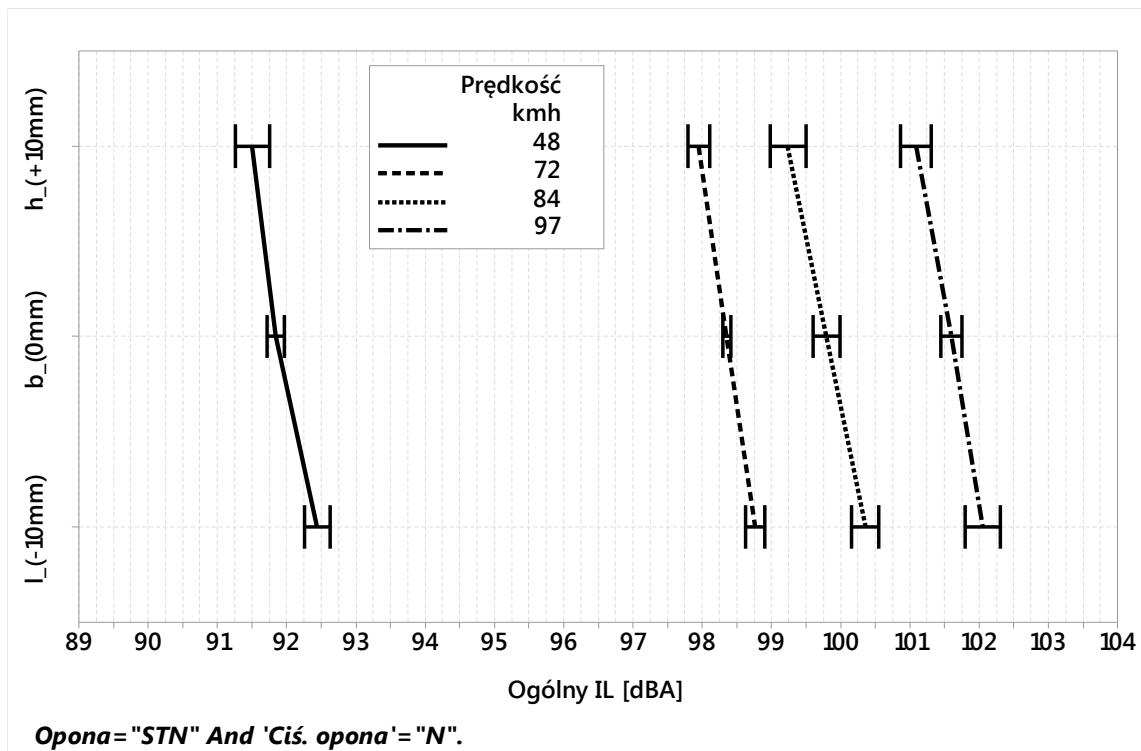
Rysunek 32. Wpływ prędkości pomiarowej dla wszystkich rodzajów nawierzchni przy pozycji czujników *b*, ciśnieniu *H*, opona STN; wąsy reprezentują 95% przedziały ufności dla wartości średniej



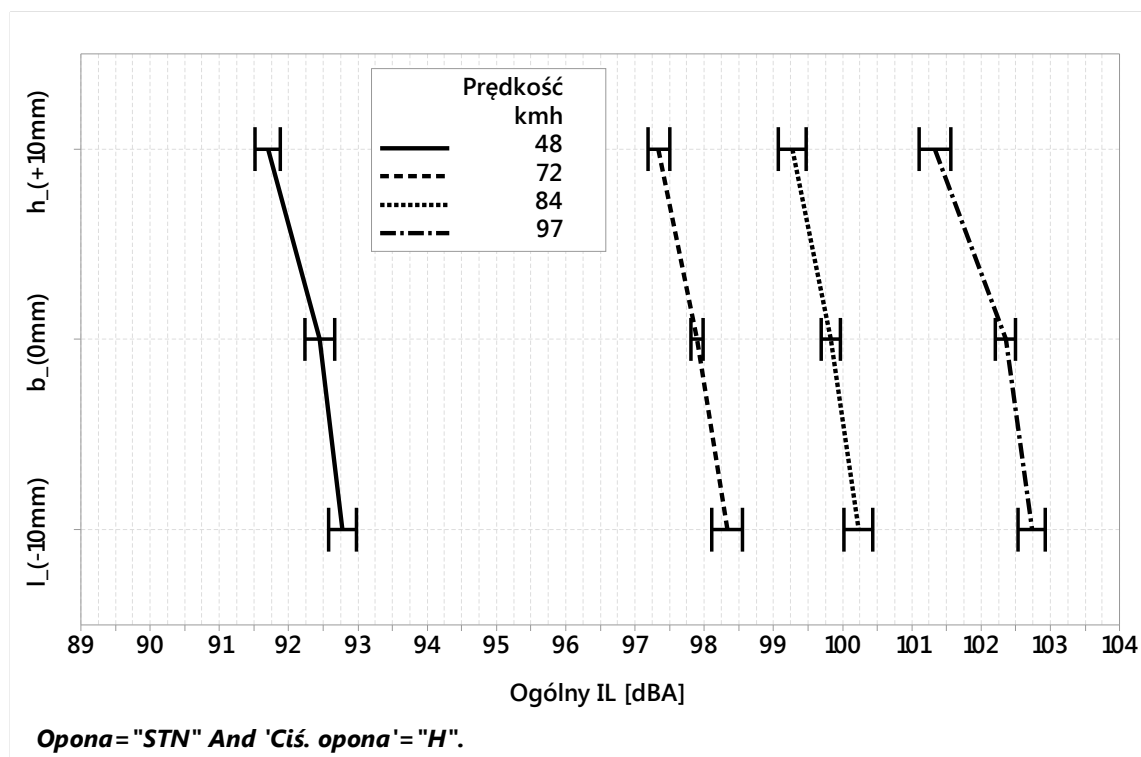
Rysunek 33. Wpływ prędkości pomiarowej dla wszystkich rodzajów nawierzchni przy pozycji czujników *b*, ciśnieniu *L*, opona STN; wąsy reprezentują 95% przedziały ufności dla wartości średniej



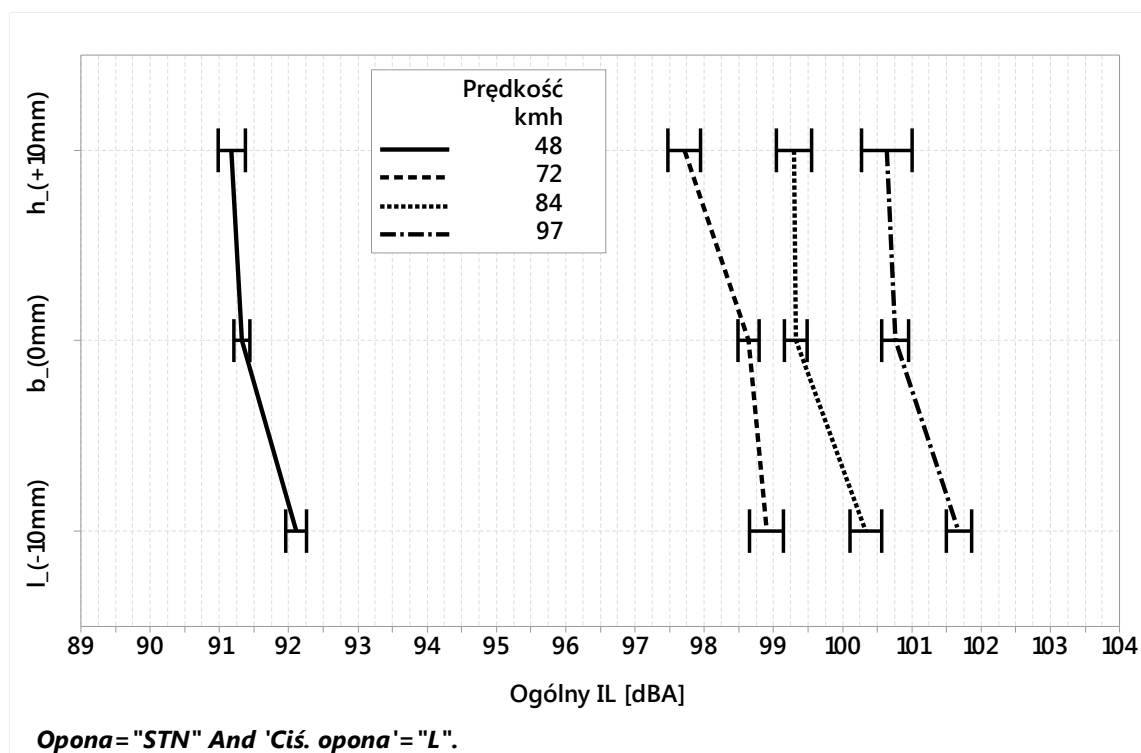
Rysunek 34. Wpływ ciśnienia w oponie dla wszystkich rodzajów nawierzchni przy pozycji czujników *b* i oponie STN; wąsy reprezentują 99% przedziały ufności dla wartości średniej



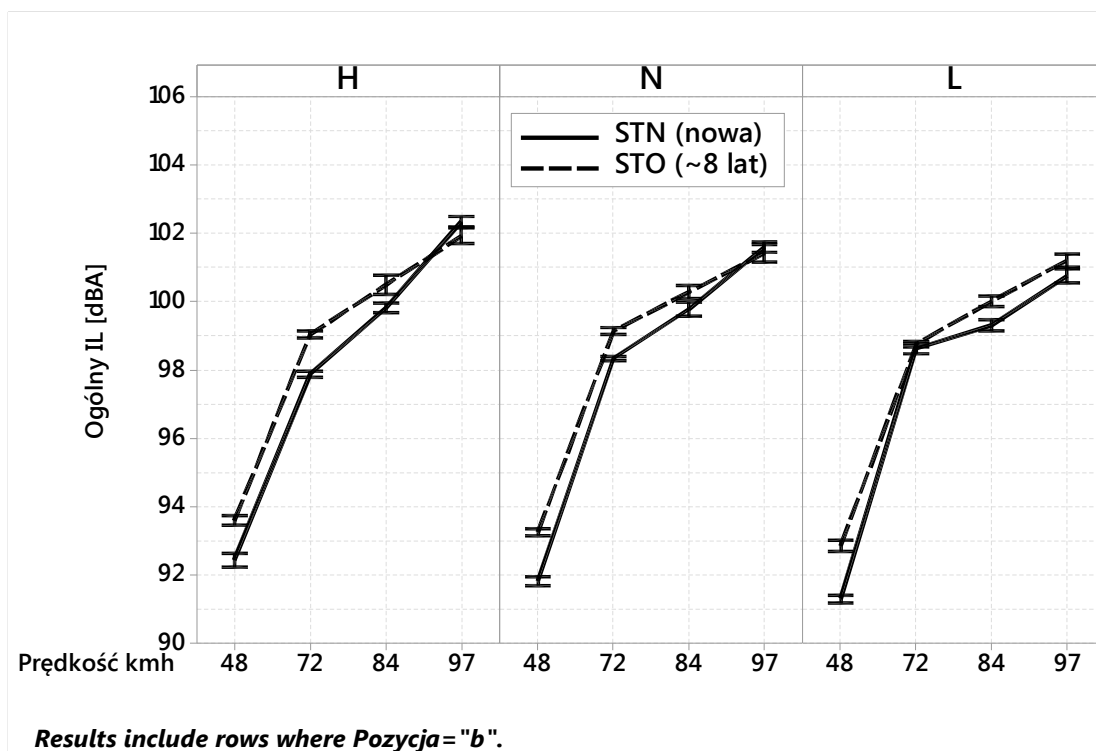
Rysunek 35. Wpływ pozycji czujników nad powierzchnią nawierzchni dla HMA (BA) (przy STN, N); wąsy reprezentują 99% przedziały ufności dla wartości średniej



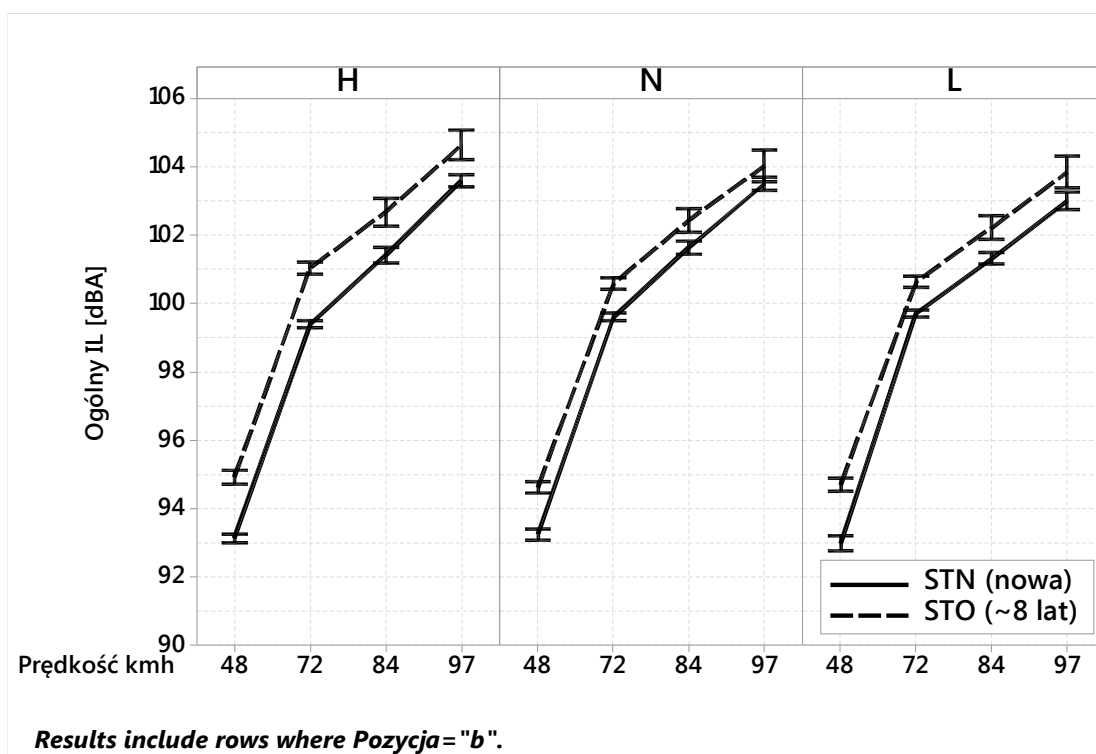
Rysunek 36. Wpływ pozycji czujników nad powierzchnią nawierzchni dla HMA (BA) (przy STN, H); wąsy reprezentują 99% przedziały ufności dla wartości średniej



Rysunek 37. Wpływ pozycji czujników nad powierzchnią nawierzchni dla HMA (BA) (przy STN, L); wąsy reprezentują 99% przedziały ufności dla wartości średniej



Rysunek 38. Wpływ wieku opony SRTT w funkcji prędkości i ciśnienia w oponie przy pozycji czujników *b* i dla nawierzchni typu HMA (BA); wasy reprezentują 99% przedziały ufności dla wartości średniej



Rysunek 39. Wpływ wieku opony SRTT w funkcji prędkości i ciśnienia w oponie przy pozycji czujników *b* i dla nawierzchni typu SMA; wasy reprezentują 99% przedziały ufności dla wartości średniej

5.5. Współczynniki korekcyjne

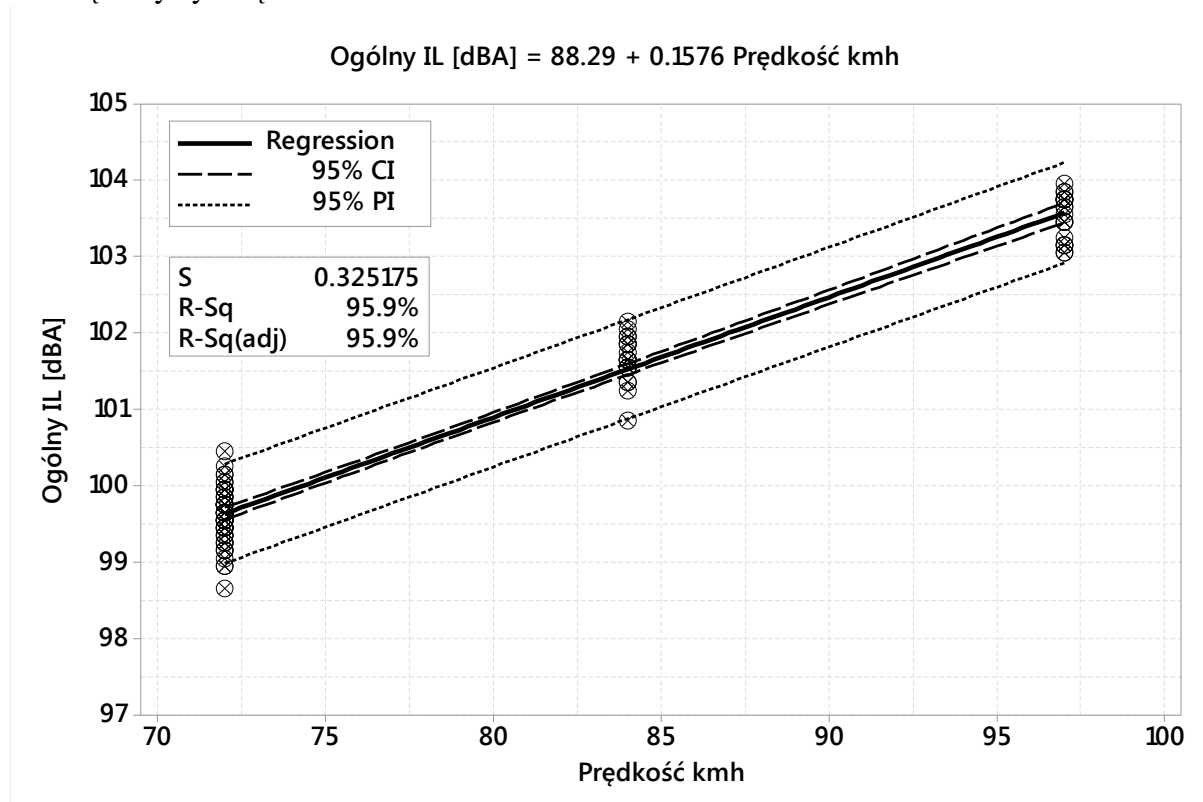
W tym rozdziale przedstawione zostały analizy statystyczne czynników kontrolowanych podczas eksperymentu i wyznaczenie odpowiednich współczynników normalizujących pomierzone wartości ogólnego natężenia dźwięku, do przyjętych wartości nominalnych. Wykorzystano wszystkie wyniki pozyskane na odcinkach 001 i 003. Dla porównania pokazano również podobne współczynniki normalizujące z projektu NCHRP nt. metody OBSI [4] oraz poprawki na twardość opony zaprezentowanej np. w [7]. Współczynniki wyznaczone z regresji liniowej, zmieniając wartości badanego czynnika pomiarowego i przy ustalonych wartościach nominalnych innych czynników.

Należy podkreślić, że współczynniki korekcyjne wyznaczone dla warunków przyjętych w eksperymencie na odcinkach 001 i 003, które są pokazane w Tablica 3. Nie są to uniwersalne współczynniki i nie mogą być stosowane poza rozpatrywanymi zakresami czynników pomiarowych.

5.5.1. Prędkość

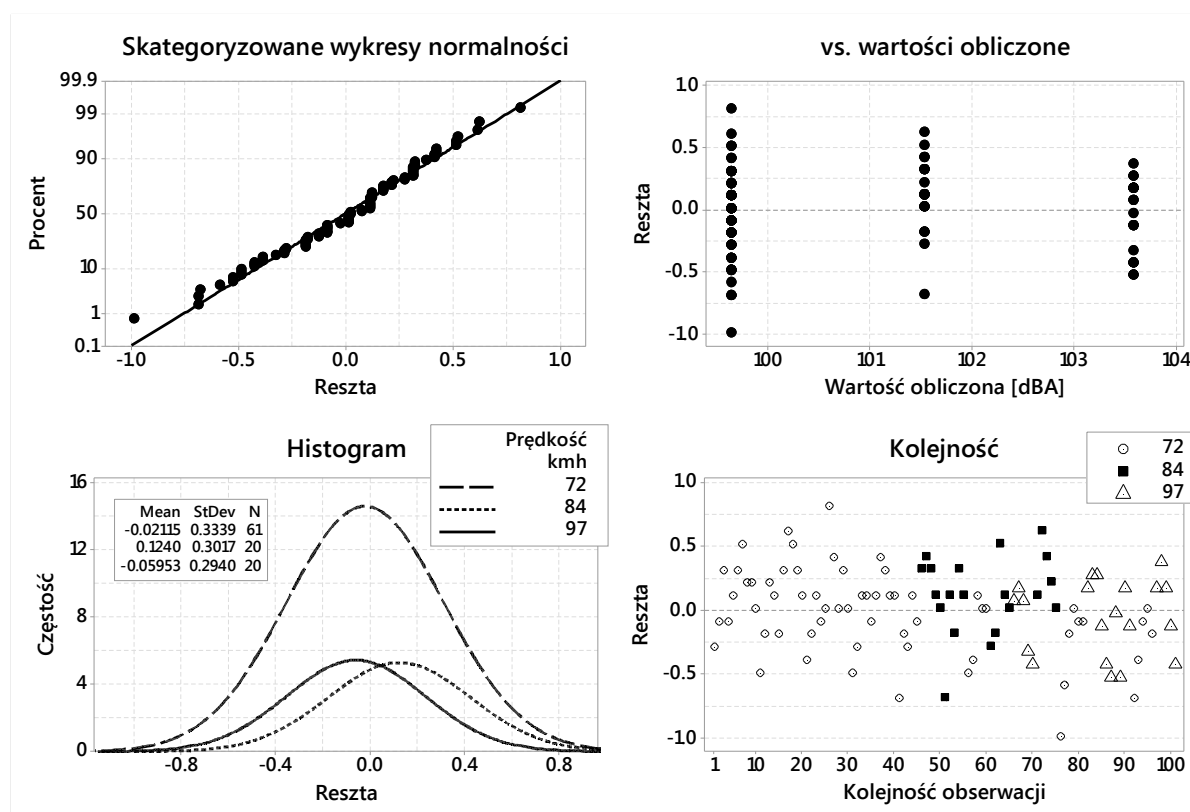
Współczynniki normalizujące ze względu na prędkość wyznaczone osobno dla rozpatrywanych rodzajów nawierzchni, tj. SMA, BA i BC. Wykorzystano pomiary przy prędkościach 72, 84 i 97 km/h. Pozostałe czynniki były ustalone na: N (ciśnienie w oponie), b (pozycja nad nawierzchnią), STN (opona SRTT).

Rysunek 40 przedstawia graficznie wyznaczenie współczynników dla nawierzchni SMA, Rysunek 41 pokazuje odpowiadającą resztę i w końcu Tablica 22 przedstawia powiązaną analizę statystyczną.



Rysunek 40. Reprezentacja graficzna współczynników normalizujących ze względu na prędkość dla SMA

Regresja liniowa dla nawierzchni SMA jest przedstawiona na Rysunek 40. Jakościowo regresja jest akceptowalna, ze współczynnikiem determinacji 95% i średnim odchyleniem standardowym 0.32 dBA czyli na poziomie niepewności standardowej wyznaczonej wcześniej (0.5 dBA). Należy zauważyć, że przedział ufności (CI) dotyczy wartości średniej zmiennej zależnej podczas gdy przedział predykcji (PI) informuje o pojedynczych prognozach zmiennej zależnej. Czyli w przedziale predykcji można oczekiwać, z prawdopodobieństwem 95%, przyszłych obserwacji zmiennej zależnej (czyli ogólnego IL) przy danych wartościach zmiennych niezależnych (czyli prędkości). Należy zauważyć, że przedziały ufności są mniejsze, ponieważ dotyczą średniej, a nie pojedynczych obserwacji.



Rysunek 41. Analiza reszty dla regresji liniowej przy współczynnikach normalizujących ze względu na prędkość dla SMA

Rysunek 41 przedstawia przykładową analizę reszty dla nawierzchni typu SMA. Można zaobserwować, że rozkład wartości reszty jest zbliżony do rozkładu normalnego, nie zaobserwowano żadnych tendencji w funkcji kolejności czy w funkcji wartości obliczonych, ale być może regresja z wykorzystaniem wielomianu drugiego stopnia byłaby bardziej odpowiednia niż regresja liniowa. Jednak ze względów praktycznych i ze względów na to, że interpretacja wielomianu jest bardziej skomplikowana, regresja liniowa jest bardziej pożądana.

W końcu Tablica 22 przedstawia powiązaną analizę statystyczną dla współczynnika normalizującego dla nawierzchni SMA. Można zauważyć, że regresja wyjaśnia znaczącą część wariacji zmiennej zależnej, oraz że oba współczynniki regresji liniowej są statystycznie znaczące i ich przedziały ufności (CI) nie zawierają wartości zerowej.

Tablica 22. Współczynniki normalizujące ze względu na prędkość dla SMA

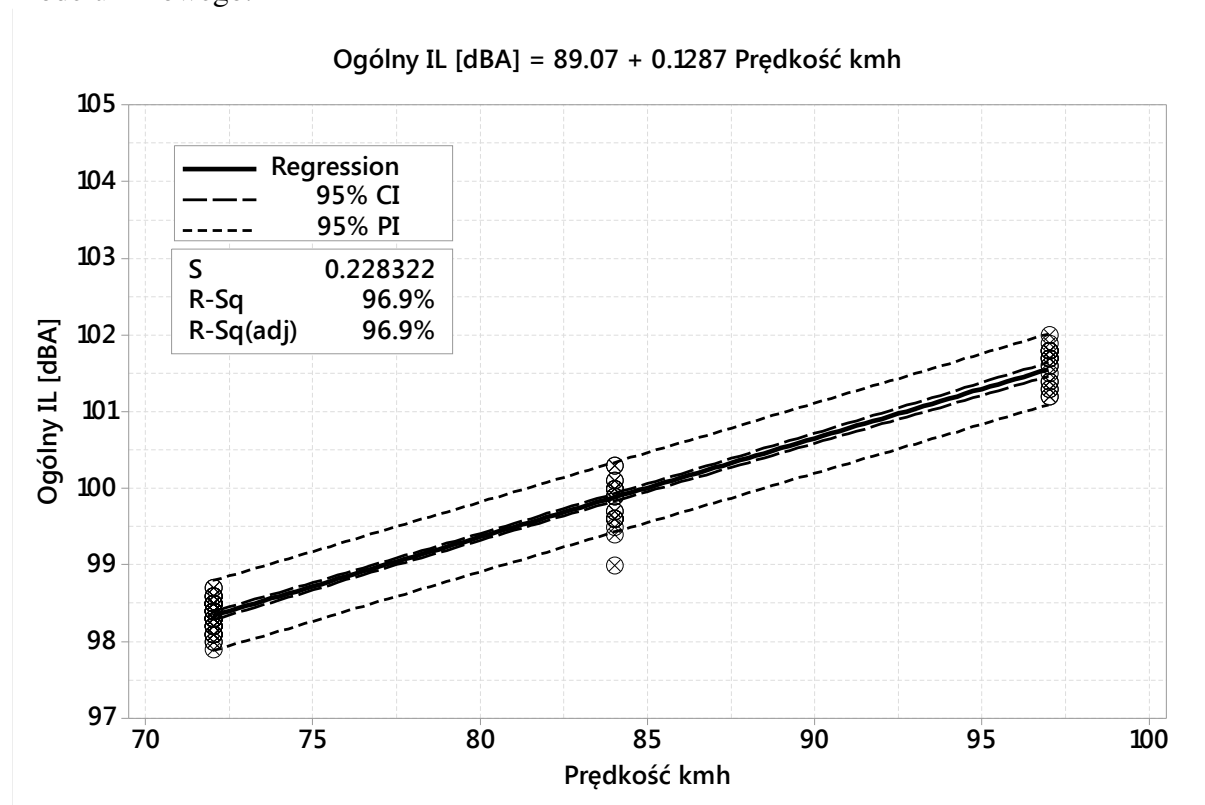
Analiza wariancji

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	247.281	95.94%	247.281	247.281	2338.61	0.000
Prędkość kmh	1	247.281	95.94%	247.281	247.281	2338.61	0.000
Error	99	10.468	4.06%	10.468	0.106		
Lack-of-Fit	1	0.406	0.16%	0.406	0.406	3.95	0.050
Pure Error	98	10.062	3.90%	10.062	0.103		
Total	100	257.750	100.00%				

Współczynniki

Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value	VIF
Constant	88.288	0.261	(87.771, 88.805)	338.91	0.000	
Prędkość kmh	0.15758	0.00326	(0.15112, 0.16405)	48.36	0.000	1.00

Rysunek 42 przedstawia graficznie wyznaczenie współczynników dla nawierzchni BA, zaś Tablica 23 przedstawia powiązaną analizę statystyczną. Analizę reszty sprawdzono ale jej nie zaprezentowano. Podobnie jak dla nawierzchni SMA, oba współczynniki regresji liniowej są statystycznie znaczące, a parametry regresji wskazują na bardzo dobre dopasowanie modelu liniowego.



Rysunek 42. Reprezentacja graficzna współczynników normalizujących ze względu na prędkość dla BA

Tablica 23. Współczynniki normalizujące ze względu na prędkość dla BA

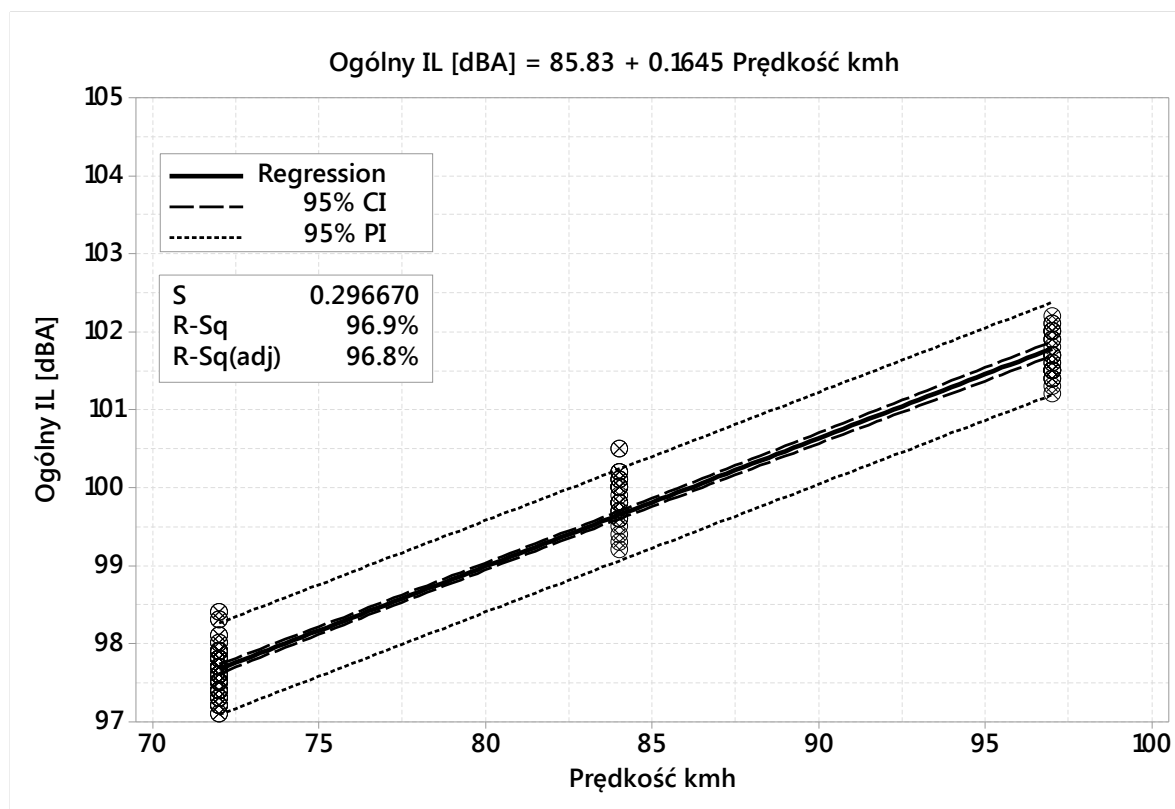
Analiza wariancji

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	167.127	96.92%	167.127	167.127	3205.92	0.000
Prędkość kmh	1	167.127	96.92%	167.127	167.127	3205.92	0.000
Error	102	5.317	3.08%	5.317	0.052		
Lack-of-Fit	1	0.231	0.13%	0.231	0.231	4.58	0.035
Pure Error	101	5.087	2.95%	5.087	0.050		
Total	103	172.445	100.00%				

Współczynniki

Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value	VIF
Constant	89.066	0.182	(88.706, 89.426)	490.69	0.000	
Prędkość kmh	0.12872	0.00227	(0.12421, 0.13323)	56.62	0.000	1.00

Rysunek 43 przedstawia graficznie wyznaczenie współczynników dla nawierzchni BC a Tablica 24 przedstawia powiązaną analizę statystyczną. Analizę reszty sprawdzono ale jej nie zaprezentowano. Podobnie jak w przypadku analizy dla SMA i BA, z oba współczynniki są statystycznie znaczące, i współczynnik determinacji jest równie wysoko i wynosi prawie 97%.



Rysunek 43. Reprezentacja graficzna współczynników normalizujących ze względu na prędkość dla BC

Tablica 24. Współczynniki normalizujące ze względu na prędkość dla BC

Analiza wariancji

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	430.271	96.85%	430.271	430.271	4888.71	0.000
Prędkość kmh	1	430.271	96.85%	430.271	430.271	4888.71	0.000
Error	159	13.994	3.15%	13.994	0.088		
Lack-of-Fit	1	2.009	0.45%	2.009	2.009	26.49	0.000
Pure Error	158	11.985	2.70%	11.985	0.076		
Total	160	444.265	100.00%				

Współczynniki

Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value	VIF
Constant	85.830	0.188	(85.458, 86.201)	456.17	0.000	
Prędkość kmh	0.16450	0.00235	(0.15985, 0.16914)	69.92	0.000	1.00

Dla porównania, średni współczynnik normalizujący w projekcie NCHRP [4] wyniósł 0.19 dBA / (1 km/h), czyli był wyższy od wyliczonych w niniejszym opracowaniu wartości 0.16, 0.13 i 0.16. Należy zauważyć, że w projekcie NCHRP badania wykonano wokół prędkości 97 km/h (+/- 4 km/h) podczas gdy w niniejszym projekcie zakres był znacznie

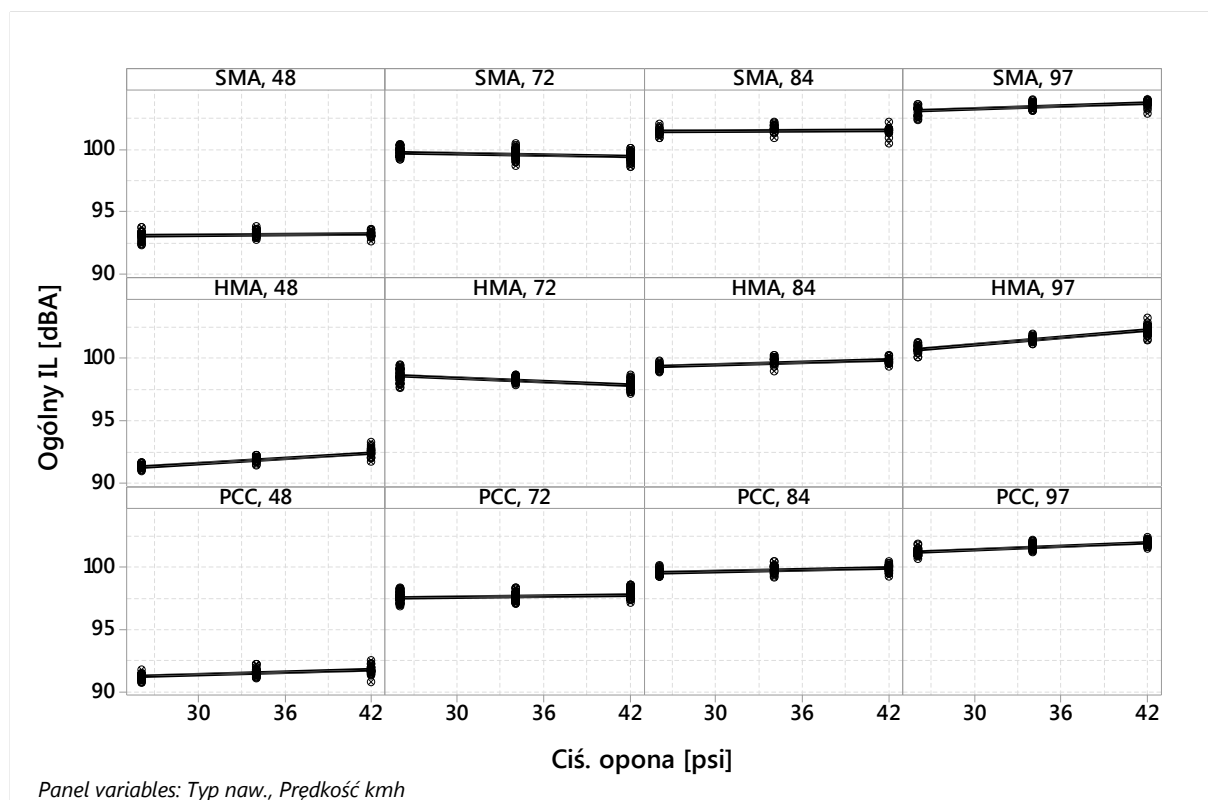
większy. Jako że zależność od prędkości nie jest liniowa, to powyższa różnica nie powinna być nieoczekiwana.

5.5.2. Ciśnienie w oponie

Współczynniki normalizujące ze względu na ciśnienie w oponie wyznaczono indywidualnie dla wszystkich kombinacji rozpatrywanych rodzajów nawierzchni, tj. SMA, BA i BC oraz prędkości 48, 72, 84 i 97 km/h. Pozostałe czynniki były ustalone na: b (pozycja nad nawierzchnią), STN (opona SRTT).

Zmianę ogólnych IL w funkcji typu nawierzchni i prędkości pomiaru pokazano na Rysunek 44. Jak można zaobserwować, w kilku przypadkach linia regresji jest praktycznie pozioma, co świadczy o braku wpływu ciśnienia na wyniki IL. Z kolei w innych przypadkach, np. dla HMA (BA) linia regresji ma wyraźną tendencję przyrostu lub spadku. Analiza statystyczna dla tych regresji liniowych jest pokazana w Tablica 25. Na podstawie tej analizy można stwierdzić, że:

- większość współczynników pochylenia (a) jest statystycznie znacząca, ale przyjmuje niewielkie wartości, tzn. ma praktycznie małe znaczenie. Dopiero odchyłka np. 5 psi (około 35 kPa) może wprowadzić zmianę IL w zakresie -0.2 do 0.5 dBA ale średnia zmiana to jedynie 0.12 dBA. W porównaniu do niepewności standardowej pomiaru (0.5 dBA) jest to wartość niewielka.
- Nawierzchnia HMA charakteryzuje się największymi współczynnikami pochylenia (a), co zostało zaobserwowane już wcześniej. Średnia wartość współczynnika pochylenia (a) dla tej nawierzchni to 0.038 dBA/psi podczas gdy dla SMA wynosi 0.008 dBA/psi a dla PCC to 0.028 dBA/psi.
- Wszystkie regresje liniowe dla ciśnienia w oponie jako zmiennej niezależnej mają niskie współczynniki determinacji (niepokazane ale w niektórych przypadkach poniżej 20%).



Rysunek 44. Wpływ ciśnienia w oponie w funkcji rodzaju nawierzchni i prędkości pomiaru

Tablica 25. Współczynniki normalizujące ze względu na ciśnienie w oponie w funkcji rodzaju nawierzchni i prędkości pomiaru

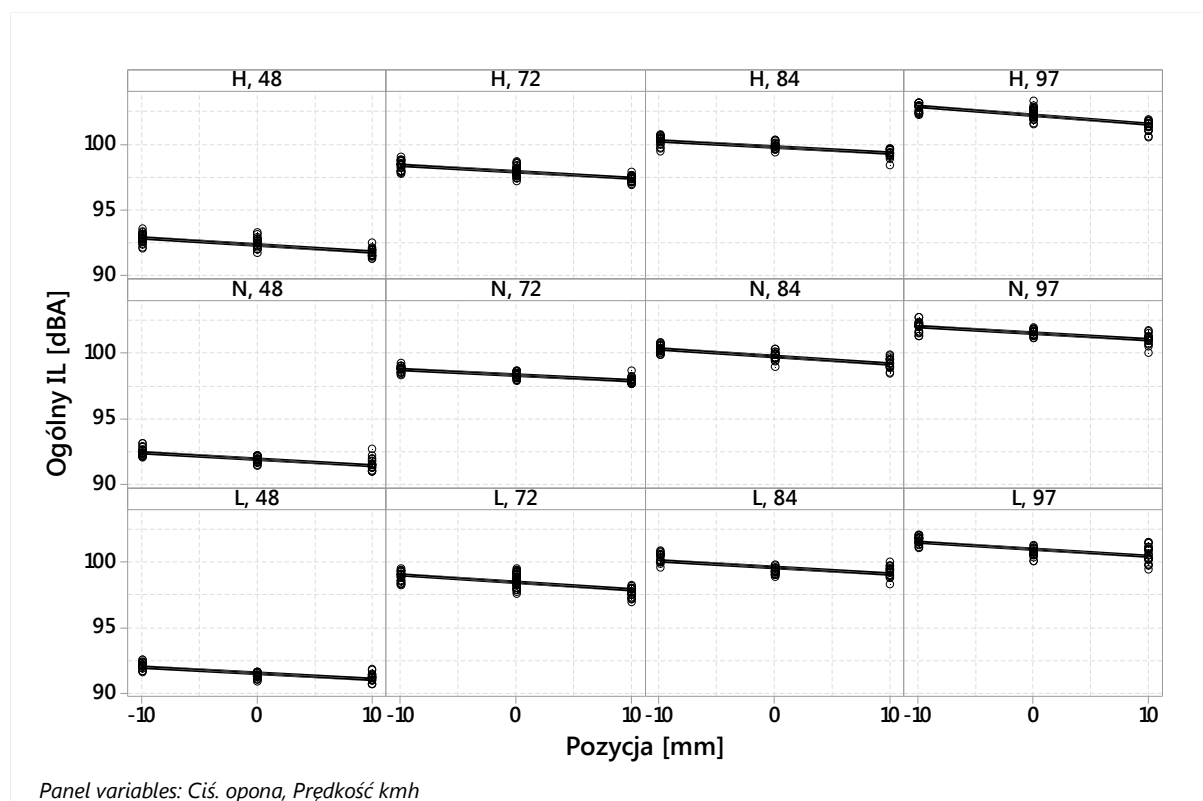
Naw.	Prędkość	Term	Wpół.	Błąd stand.	95% przedział uf.	t-value	p-value
SMA	48	b: Constant dBA	92.798	0.194	(92.410, 93.185)	477.29	0.000
		a: Ciś. Opona dbA/psi	0.00972	0.00562	(-0.00148, 0.02092)	1.73	0.088
	72	b: Constant dBA	100.243	0.120	(100.007, 100.480)	835.69	0.000
		a: Ciś. Opona dbA/psi	-0.01955	0.00349	(-0.02643, -0.01266)	-5.60	0.000
	84	b: Constant dBA	101.260	0.230	(100.799, 101.721)	440.16	0.000
		a: Ciś. Opona dbA/psi	0.00622	0.00670	(-0.00720, 0.01964)	0.93	0.357
97	b: Constant dBA	102.094	0.233	(101.627, 102.561)	437.91	0.000	
	a: Ciś. Opona dbA/psi	0.03776	0.00676	(0.02422, 0.05130)	5.59	0.000	
HMA	48	b: Constant dBA	89.461	0.173	(89.116, 89.807)	516.74	0.000
		a: Ciś. Opona dbA/psi	0.07076	0.00499	(0.06081, 0.08070)	14.19	0.000
	72	b: Constant dBA	99.879	0.124	(99.633, 100.124)	802.66	0.000
		a: Ciś. Opona dbA/psi	-0.04667	0.00356	(-0.05368, -0.03965)	-13.12	0.000
	84	b: Constant dBA	98.579	0.192	(98.195, 98.962)	513.78	0.000
		a: Ciś. Opona dbA/psi	0.03129	0.00550	(0.02029, 0.04230)	5.69	0.000
97	b: Constant dBA	98.198	0.193	(97.814, 98.582)	508.11	0.000	
	a: Ciś. Opona dbA/psi	0.09896	0.00527	(0.08848, 0.10943)	18.79	0.000	
PCC	48	b: Constant dBA	90.390	0.140	(90.113, 90.668)	646.26	0.000
		a: Ciś. Opona dbA/psi	0.03298	0.00407	(0.02492, 0.04105)	8.11	0.000
	72	b: Constant dBA	97.2303	0.0967	(97.0401, 97.4206)	1005.91	0.000
		a: Ciś. Opona dbA/psi	0.01427	0.00281	(0.00875, 0.01980)	5.08	0.000
84	b: Constant dBA	99.117	0.155	(98.809, 99.424)	639.87	0.000	

		a: Ciś. Opona dbA/psi	0.02017	0.00450	(0.01124, 0.02910)	4.49	0.000
	97	b: Constant dBA	99.995	0.140	(99.718, 100.273)	715.27	0.000
		a: Ciś. Opona dbA/psi	0.04820	0.00408	(0.04010, 0.05631)	11.81	0.000

Należy wspomnieć, że również wyniki z literatury np. projekt NCHRP [4], wskazują na niewielki wpływ ciśnienia w oponie na pomiary OBSI. W tym projekcie NCHRP, średnie pochylenie (a) wyniosło 0.05 dBA/ 1 psi dla nawierzchni asfaltowych i 0.025 dBA/ 1 psi dla nawierzchni betonowych. Jest to ten sam rząd wielkości co w niniejszym opracowaniu.

5.5.3. Pozycja czujników nad nawierzchnią

Współczynniki normalizujące ze względu na pozycję czujników nad nawierzchnią wyznaczono w funkcji ciśnienia tak jak było wcześniej zasygnalizowane oraz prędkości pomiaru. Wykorzystano wyniki z odcinka 003 dla nawierzchni HMA, pozostałe czynniki były ustalone na: STN (opona SRTT). Podobnie jak dla analizy ciśnienia w oponie, Rysunek 45 przedstawia wpływ pozycji w funkcji pozostałych dwóch czynników. Można zauważyć, że wszystkie linie regresji liniowej mają bardzo podobny kształt, tzn. pochylenie, podczas gdy pionowe przesunięcie jest naturalnie wynikiem prędkości pomiaru. Analiza statystyczna dla wszystkich regresji linowych jest pokazana w Tablica 26. Na podstawie tej analizy można stwierdzić, że praktycznie we wszystkich przypadkach współczynniki pochylenia (a) są bardzo zbliżone i statystycznie znaczące. Biorąc pod uwagę ich przedziały ufności można praktycznie przyjąć je za równe. Wartość średnia współczynnika pochylenia wynosi -0.052 dBA / 1 mm, co jest zbliżone do wartości w projekcie NCHRP [4], która wynosiła 0.062 dBA / 1 mm zarówno dla nawierzchni typu BA i BC.



Rysunek 45. Wpływ pozycji czujników w funkcji ciśnienia w oponie i prędkości pomiaru

Tablica 26. Współczynniki normalizujące ze względu na pozycję czujników w funkcji ciśnienia w oponie i prędkości pomiaru

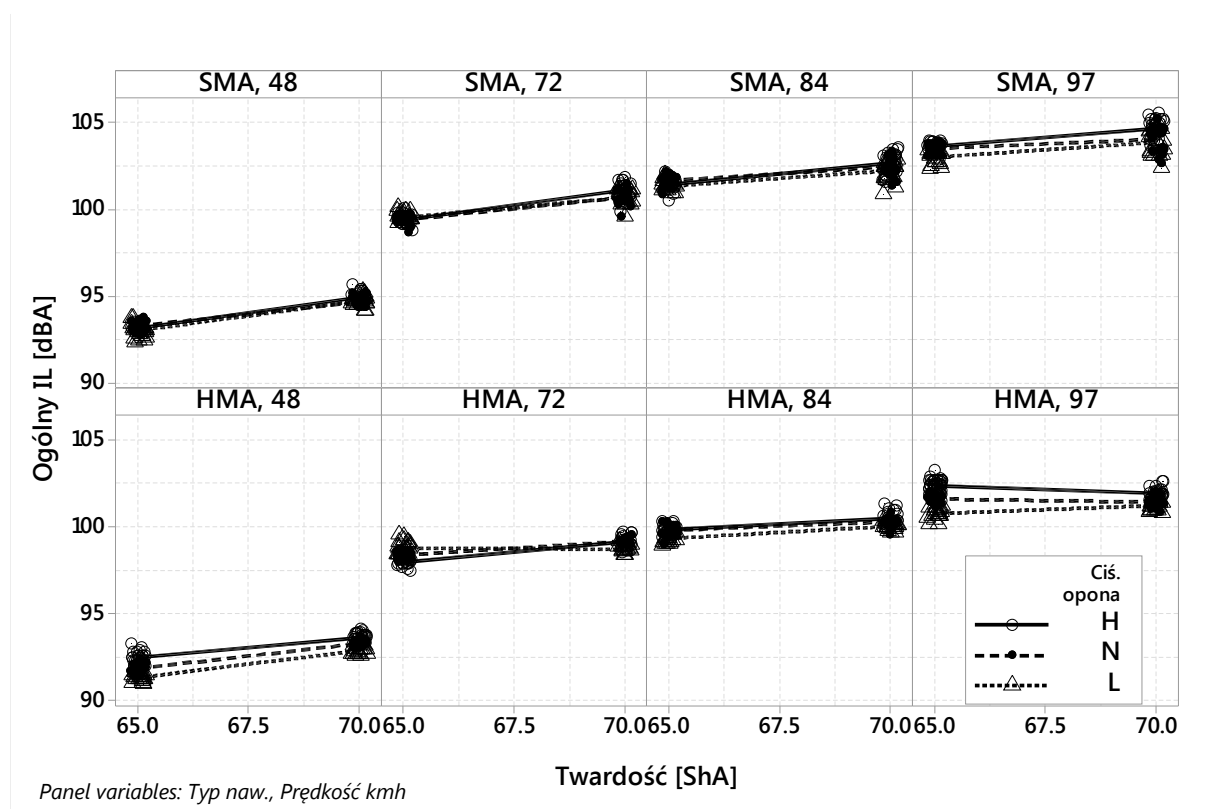
Ciś. opona [psi]	Prędkość [km/h]	Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value	
42	48	b: Constant dBA	92.3085	0.0431	(92.2225, 92.3946)	2141.11	0.000	
		a: Pozycja dBA / mm	-0.05358	0.00532	(-0.06419, -0.04297)	-10.07	0.000	
	72	b: Constant dBA	97.8698	0.0277	(97.8149, 97.9247)	3534.25	0.000	
		a: Pozycja dBA / mm	-0.04951	0.00449	(-0.05841, -0.04062)	-11.03	0.000	
	84	b: Constant dBA	99.7724	0.0370	(99.6984, 99.8463)	2697.91	0.000	
		a: Pozycja dBA / mm	-0.04792	0.00458	(-0.05709, -0.03875)	-10.45	0.000	
	97	b: Constant dBA	102.191	0.042	(102.108, 102.274)	2455.09	0.000	
		a: Pozycja dBA / mm	-0.07008	0.00596	(-0.08193, -0.05822)	-11.76	0.000	
	34	48	b: Constant dBA	91.9228	0.0391	(91.8448, 92.0008)	2351.71	0.000
			a: Pozycja dBA / mm	-0.04686	0.00484	(-0.05652, -0.03720)	-9.68	0.000
		72	b: Constant dBA	98.3515	0.0200	(98.3118, 98.3912)	4914.62	0.000
			a: Pozycja dBA / mm	-0.04081	0.00316	(-0.04708, -0.03453)	-12.90	0.000
84		b: Constant BA	99.7910	0.0433	(99.7043, 99.8776)	2304.12	0.000	
		a: Pozycja dBA / mm	-0.05575	0.00535	(-0.06645, -0.04505)	-10.42	0.000	
97		b: Constant dBA	101.577	0.043	(101.490, 101.663)	2346.33	0.000	
		a: Pozycja dBA / mm	-0.04841	0.00526	(-0.05893, -0.03789)	-9.20	0.000	
24		48	b: Constant dBA	91.5239	0.0364	(91.4511, 91.5967)	2511.37	0.000
			a: Pozycja dBA / mm	-0.04683	0.00452	(-0.05585, -0.03781)	-10.37	0.000
	72	b: Constant dBA	98.5012	0.0453	(98.4114, 98.5911)	2175.24	0.000	
		a: Pozycja dBA / mm	-0.05988	0.00714	(-0.07405, -0.04571)	-8.38	0.000	
	84	b: Constant dBA	99.6437	0.0531	(99.5373, 99.7500)	1875.84	0.000	
		a: Pozycja dBA / mm	-0.05175	0.00651	(-0.06477, -0.03873)	-7.95	0.000	
	97	b: Constant dBA	101.020	0.059	(100.903, 101.137)	1721.69	0.000	
		a: Pozycja dBA / mm	-0.05193	0.00716	(-0.06624, -0.03762)	-7.25	0.000	

5.5.4. Wiek opony SRTT

Współczynniki normalizujące ze względu na wiek opony (proxy twardości opony) sprawdzono w funkcji ciśnienia w oponie oraz prędkości odpowiednio dla nawierzchni HMA i SMA w pozycji czujników *b*.

Jak zaobserwowano wcześniej (Rysunek 38 i Rysunek 39), nawierzchnia typu SMA charakteryzuje się mniejszą interakcją czynników niż nawierzchnia typu HMA. Z kolei obserwując Rysunek 46 – dokładniejszą prezentacją wyników pomiarów IL, można wysnuć hipotezę, że im wyższa prędkość tym wpływ twardości opony jest mniejszy szczególnie dla nawierzchni HMA. Z kolei wpływ ciśnienia jest pomijalny dla nawierzchni SMA (za wyjątkiem 97 km/h) a dla nawierzchni HMA wpływ ciśnienia nie jest jednoznaczny. Podobnie jak w poprzednich rozważaniach wpływu ciśnienia w oponie oraz pozycji czujników, Tablica 27 oraz Tablica 28 prezentują wyniki regresji liniowej dla wszystkich kombinacji typu nawierzchni, prędkości pomiaru i ciśnienia w oponie. Wyniki regresji można podsumować w następujący sposób:

- wartości współczynników dla nawierzchni SMA są wyższe w porównywalnych warunkach niż dla nawierzchni typu HMA,
- wartości współczynników dla obu typu nawierzchni maleją wraz ze wzrostem prędkości,
- wpływ ciśnienia w oponie jest niejednoznaczny,
- dla obu typów nawierzchni współczynniki wydają się jakościowo powiązane, co zostało zbadane w Rysunek 47. Rzeczywiście istnieje między tymi współczynnikami korelacja liniowa ($R^2 = 54\%$) i wartości median wynoszą 0.14 dBA/ 1 ShA dla BA oraz 0.24 dBA/ 1 ShA dla SMA. Są to wartości bardzo zbliżone do wartości poprawki zawartej w obowiązującej normie ISO dla CPX [3][7], która wynosi 0.20 dBA/ 1 ShA.



Rysunek 46. Wpływ wieku (twardości) opony SRTT w funkcji ciśnienia w oponie, prędkości pomiaru i rodzaju nawierzchni

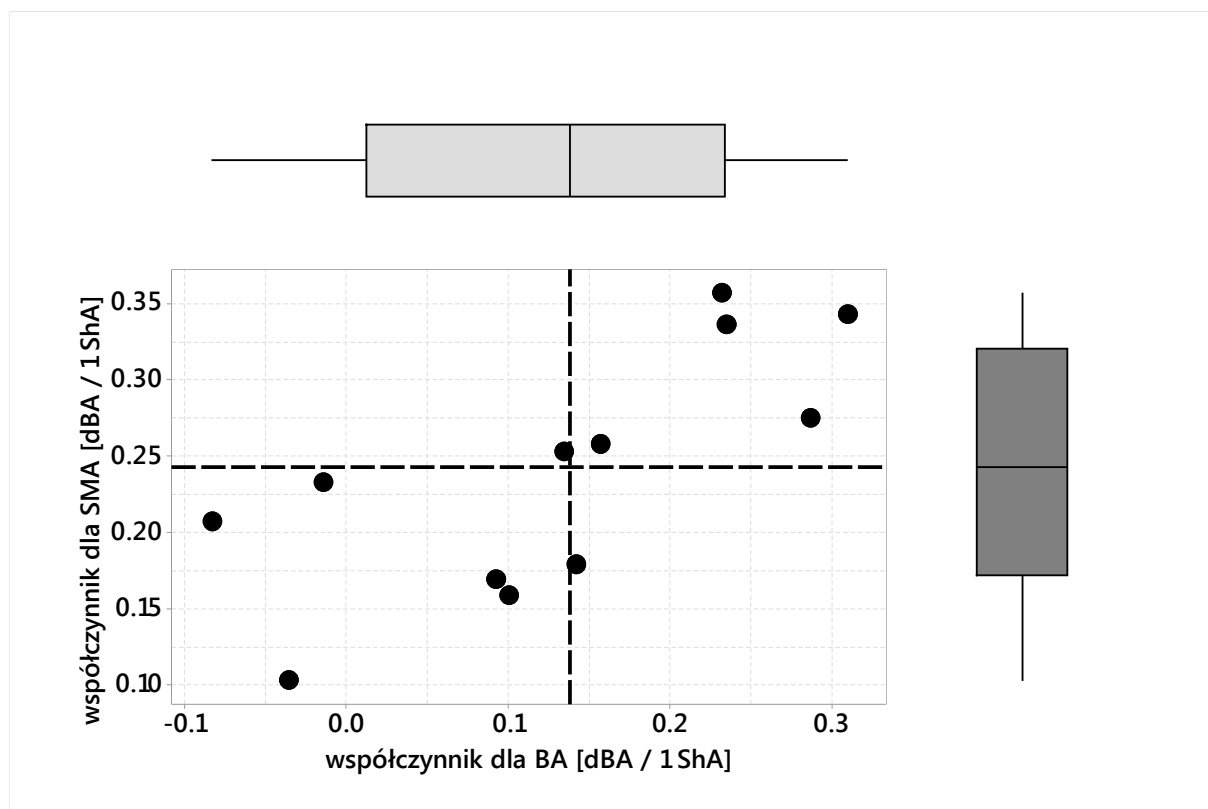
Tablica 27. Współczynniki normalizujące ze względu na oponę SRTT dla nawierzchni SMA w funkcji prędkości pomiaru i ciśnienia w oponie

Prędkość	Ciś. opony	Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value
48	H	b: Constant dBA	69.95	1.10	(67.73, 72.16)	63.59	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.3569	0.0163	(0.3239, 0.3899)	21.84	0.000
	N	b: Constant dBA	75.37	1.07	(73.20, 77.53)	70.24	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.2751	0.0159	(0.2430, 0.3073)	17.26	0.000
L	b: Constant dBA	70.69	1.40	(67.87, 73.51)	50.62	0.000	
	a: Twardość dBA/ ShA	0.3430	0.0207	(0.3011, 0.3849)	16.53	0.000	
72	H	b: Constant dBA	77.57	1.66	(74.21, 80.93)	46.69	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.3358	0.0246	(0.2860, 0.3856)	13.64	0.000

	N	b: Constant dBA	82.65	1.61	(79.38, 85.92)	51.22	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.2575	0.0239	(0.2090, 0.3059)	10.76	0.000
	L	b: Constant dBA	84.38	1.39	(81.58, 87.19)	60.72	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.2328	0.0206	(0.1911, 0.2744)	11.28	0.000
84	H	b: Constant dBA	84.97	2.32	(80.28, 89.67)	36.68	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.2531	0.0342	(0.1837, 0.3225)	7.39	0.000
	N	b: Constant dBA	91.33	1.88	(87.52, 95.13)	48.58	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.1588	0.0278	(0.1025, 0.2151)	5.71	0.000
	L	b: Constant dBA	89.70	1.84	(85.96, 93.43)	48.64	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.1790	0.0273	(0.1237, 0.2343)	6.56	0.000
97	H	b: Constant dBA	90.16	2.27	(85.56, 94.77)	39.69	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.2069	0.0336	(0.1388, 0.2750)	6.16	0.000
	N	b: Constant dBA	96.83	2.35	(92.08, 101.59)	41.21	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.1028	0.0348	(0.0324, 0.1732)	2.96	0.005
	L	b: Constant dBA	92.02	2.45	(87.06, 96.99)	37.53	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.1690	0.0363	(0.0955, 0.2425)	4.66	0.000

Tablica 28. Współczynniki normalizujące ze względu na oponę SRTT dla nawierzchni BA w funkcji prędkości pomiaru i ciśnienia w oponie

Prędkość	Ciś. opony	Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value
48	H	b: Constant dBA	77.39	1.17	(75.03, 79.75)	65.86	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.2316	0.0173	(0.1968, 0.2665)	13.35	0.000
	N	b: Constant dBA	73.222	0.802	(71.601, 74.843)	91.32	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.2864	0.0119	(0.2623, 0.3105)	24.00	0.000
	L	b: Constant dBA	71.183	0.930	(69.301, 73.065)	76.51	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.3097	0.0138	(0.2817, 0.3377)	22.38	0.000
72	H	b: Constant dBA	82.73	1.27	(80.16, 85.30)	65.05	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.2345	0.0189	(0.1964, 0.2727)	12.42	0.000
	N	b: Constant dBA	88.156	0.751	(86.633, 89.679)	117.39	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.1570	0.0112	(0.1344, 0.1797)	14.07	0.000
	L	b: Constant dBA	99.70	1.39	(96.87, 102.53)	71.51	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	-0.0142	0.0207	(-0.0562, 0.0278)	-0.69	0.497
84	H	b: Constant dBA	91.10	1.44	(88.19, 94.00)	63.46	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.1343	0.0213	(0.0912, 0.1773)	6.31	0.000
	N	b: Constant dBA	93.25	1.31	(90.59, 95.92)	71.08	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.1005	0.0195	(0.0610, 0.1401)	5.15	0.000
	L	b: Constant dBA	90.09	1.04	(87.98, 92.20)	86.58	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.1420	0.0154	(0.1107, 0.1733)	9.20	0.000
97	H	b: Constant dBA	107.75	1.29	(105.18, 110.33)	83.71	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	-0.0832	0.0193	(-0.1218, -0.0446)	-4.31	0.000
	N	b: Constant dBA	103.91	1.31	(101.24, 106.58)	79.15	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	-0.0356	0.0195	(-0.0753, 0.0041)	-1.82	0.077
	L	b: Constant dBA	94.74	1.31	(92.09, 97.39)	72.39	0.000
		a: Twardość dBA/ ShA	0.0925	0.0194	(0.0532, 0.1318)	4.76	0.000



Rysunek 47. Porównanie współczynników normalizujących ze względu na twardość opony dla nawierzchni typu BA i SMA

W podsumowaniu tego rozdziału, została przygotowana Tablica 29. W tym zestawieniu są porównane ze sobą współczynniki korekcyjne ze względu na rozpatrywane w tym eksperymencie czynniki, tzn. prędkość pomiaru, ciśnienie w oponie, pozycję czujników oraz wiek opony. Rozpatrując wartości tych współczynników, należy rozważyć obecne możliwości techniczne oraz aspekty praktyczne. Przy zachowaniu odpowiedniej staranności w wykonywaniu pomiarów i dbałość o odpowiednią kalibrację urządzeń, jest możliwe ograniczenie błędów przypadkowych. Podczas badań prędkość musi być absolutnie utrzymywana przy wykorzystaniu sprawdzonego tempomatu. Ciśnienie w oponie ma stosunkowo niewielki wpływ, ale należy pamiętać o jego częstym sprawdzaniu podczas badań, gdyż będzie ono wzrastało wraz ze wzrostem temperatury opony. Niezmiernie ważnym czynnikiem o znaczeniu praktycznym jest pozycja czujników nad nawierzchnią. Nawet 5 mm odchyłki od pozycji nominalnej może wprowadzić znaczący błąd równy niepewności standardowej pomiaru OBSI. W podobny sposób powinna być kontrolowana twardość opony, gdyż po dwóch latach od wyprodukowania może ona wzrosnąć na tyle, że wyniki pomiarów również przekroczą niepewność standardową.

Należy tutaj wspomnieć o współczynniku korekcyjnym ze względu na temperaturę. Wpływ temperatury nie został przebadany w niniejszym opracowaniu ale został przyjęty zgodnie z literaturą jako $0.072 \text{ dBA} / 1^\circ\text{C}$. Przy takiej wielkości współczynnika, odchyłka 5°C od wartości nominalnej (20°C) wprowadza poprawkę 0.36 dBA co jest porównywalne z niepewnością standardową pomiaru OBSI.

Tablica 29. Sumaryczna tabela współczynników normalizujących w postaci liniowej

Czynnik	Czynnik grupujący	Wartość oczekiwana współczynnika, jednostka	95% przedział ufności dla współczynnika
Prędkość	SMA	a: 0.157 dBA / 1 km/h b: 88.3 dBA	(0.151, 0.164) (87.7, 88.8)
	BA	a: 0.128 dBA / 1 km/h b: 89.1 dBA	(0.124, 0.133) (88.7, 89.4)
	BC	a: 0.164 dBA / 1 km/h b: 85.8 dBA	(0.159, 0.169) (85.4, 86.2)
Ciśnienie w oponie*	SMA	a: -0.0071 dBA / 1 psi b: 99.4 dBA	(-0.0567, 0.0426) (97.772, 101.188)
	BA	a: 0.0506 dBA / 1 psi b: 96.3 dBA	(0.0042, 0.0970) (94.705, 97.977)
	BC	a: 0.0225 dBA / 1 psi b: 96.7 dBA	(-0.0181, 0.0630) (95.342, 98.129)
Pozycja czujników**	n/a	a: -0.05181 dBA / 1 mm b: 0.000	(-0.05488, -0.04875) (-0.0228, 0.0228)
Wiek opony SRTT***	SMA	a: 0.2753 dBA / 1 ShA b: 81.539 dBA	(0.2476, 0.3031) (79.670, 83.409)
	BA	a: 0.1281 dBA / 1 ShA b: 90.037 dBA	(0.0995, 0.1568) (88.110, 91.965)

* regresja bez uwzględniania prędkości jako zmiennej niezależnej

** regresja bez uwzględniania innych czynników; jako zmienną zależną przyjęto ustandaryzowane wartości IL wyliczone jako różnica pomiędzy pomierzoną ogólną wartością IL a średnią wartością IL w każdej z grup; standaryzację wykonano osobno dla każdej kombinacji dwóch czynników (ciśnienia w oponie i prędkości), czyli łącznie 12 grup

*** regresja liniowa dla 72 km/h

5.6. Kontrola jakości

Podczas pomiarów na odcinkach 001 i 003 w tym eksperymencie zauważono, że nie uzyskano ważnych wyników z niektórych sekcji pomiarowych ze względu na przekroczenie warunku koherencji sygnałów (C) i/lub warunku ciśnienia-natężenia (PI). Te warunki zostały wcześniej omówione przy Wstępnych wytycznych pomiarów OBSI (Rozdział 3) i w Tablica 1.

Po przeanalizowaniu wyników okazało się, że jest 254 „nieważnych” sekcji pomiarowych (z 2582, czyli blisko 10%). Rozkład warunków przy których nastąpiły te pomiary jest zaprezentowany na Rysunek 48. Można zaobserwować, że są to głównie pomiary na HMA (BA) oraz PCC (BC) oraz przeważają wysokie prędkości (84 i 97 km/h).

Po bliższym przejrzaniu wszystkich nieważnych wyników pomiarów okazało się, że istnieje ograniczona liczba przyczyn ze względu na które pomiary zostały uznane za nieważne według kryteriów przyjętych we Wstępnych wytycznych. Zidentyfikowano następujące przyczyny – dwie główne i cztery marginalne (Rysunek 49):

- 1) PI back @400 – przekroczenie wskaźnika PI dla tylnej sondy poza górny limit dla 400 Hz; zaobserwowany w ponad 200 przypadkach, najczęstsza przyczyna „nieważności przejazdu”, w różnych warunkach (porównaj Rysunek 50); przykład na Rysunek 52,

- 2) PI back @1600 - przekroczenie wskaźnika PI dla tylnej sondy poza górny limit dla 1600 Hz; zaobserwowany wyłącznie dla PCC przy niskim ciśnieniu (L) oraz prędkościach 97 i 84 km/h (porównaj Rysunek 51); przykład na Rysunek 53,
- 3) Coherence back @4000 - przekroczenie wskaźnika koherencji C dla tylnej sondy poza górny limit dla 4000 Hz; przykład na Rysunek 54, zaobserwowany na 0.8% pomiarów, często wspólnie z innymi przyczynami,
- 4) PI back @5000 - przekroczenie wskaźnika PI dla tylnej sondy poza górny limit dla 5000 Hz,
- 5) PI front @400 - przekroczenie wskaźnika PI dla przedniej sondy poza górny limit dla 400 Hz,
- 6) Coherence back @400 - przekroczenie wskaźnika koherencji C dla tylnej sondy poza górny limit dla 400 Hz.

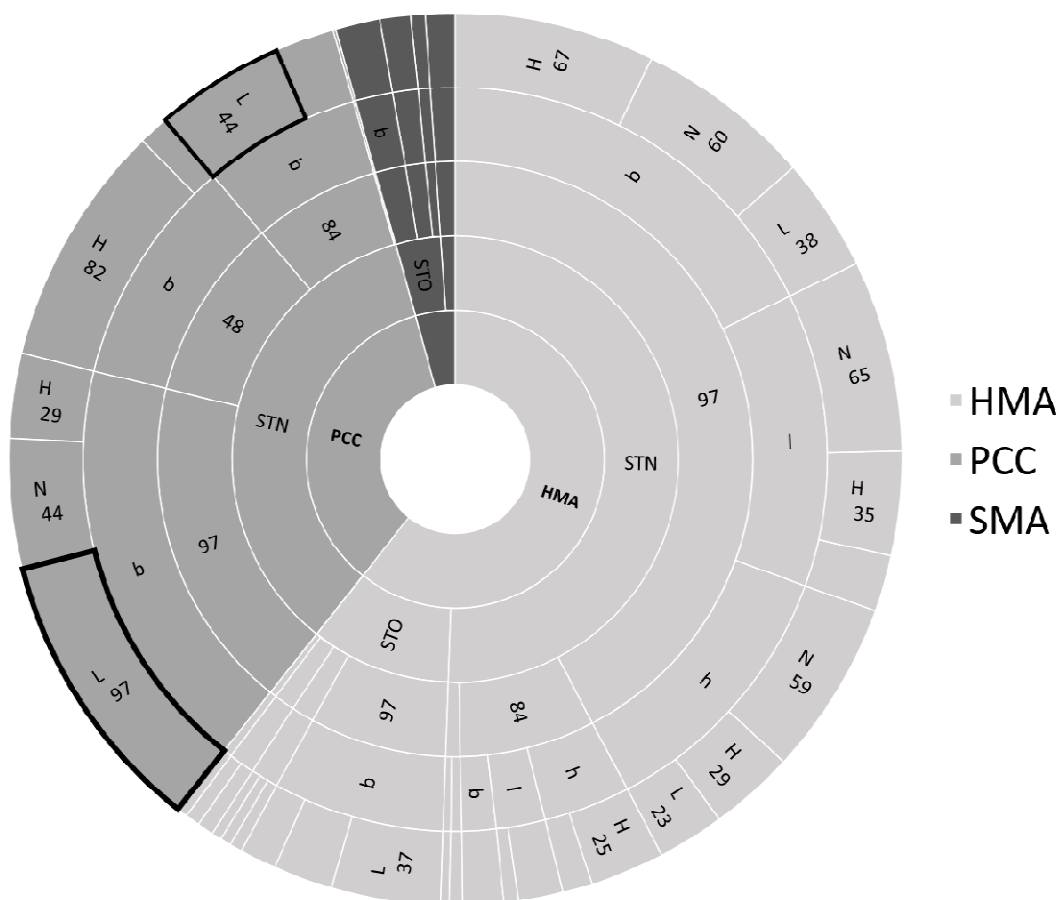
Porównanie udziału powyższych przyczyn w ogólnej liczbie pomiarów na odcinkach 001 i 003 znajduje się na Rysunek 49. Łatwo można zauważyć, że PI back @400 oraz PI back @1600 stanowią znakomitą większość przypadków.

W określonych powyżej warunkach (BA i BC plus wysokie prędkości) następują zjawiska na styku opony z nawierzchnią, które generują falę dźwiękową, która przekracza przyjęte we Wstępnych wytycznych limity. Takie zjawiska są przedstawione w literaturze fachowej [8]. Zbadanie tych zjawisk wykracza poza zakres niniejszego opracowania aczkolwiek stanowi bardzo ciekawe zagadnienie naukowe.

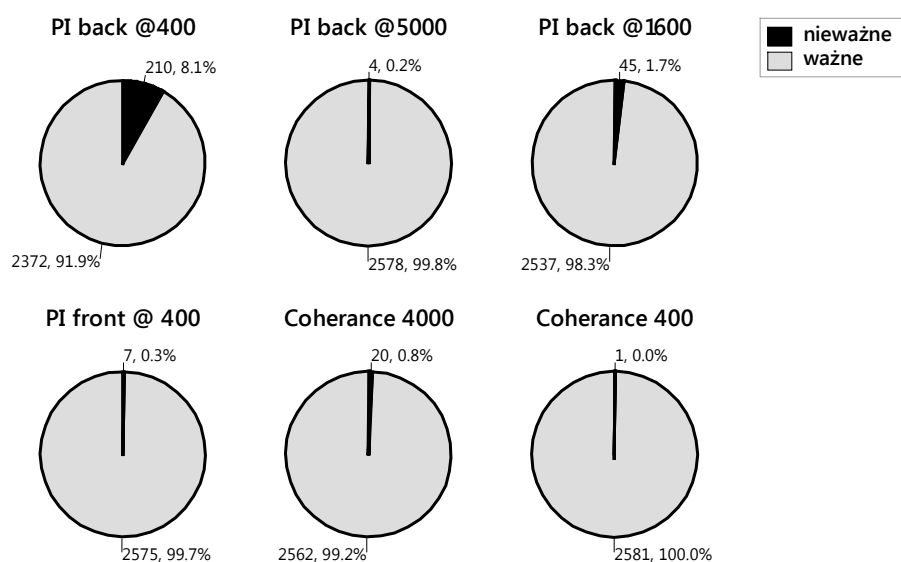
Należy zaznaczyć, że granice/limity przyjęte we Wstępnych wytycznych zostały opracowane na nawierzchniach typu BA i BC, które miały w czasie badań OBSI przynajmniej kilka lat eksploatacji (porównaj Rysunek 55). Z tych zdjęć można zaobserwować znaczne różnice w uziarnieniu i teksturze nawierzchni w odniesieniu do nawierzchni przebadanych w niniejszym opracowaniu (porównaj Rysunek 10 i Rysunek 11). W związku z tymi różnicami w wykończeniu nawierzchni, a być może także w sztywności czy porowatości, nie jest wykluczone, że zaobserwowane przekroczenia granic/limitów są całkowicie uzasadnione. Wobec tego, na podstawie zaobserwowanych „nieważnych” przejazdów oraz analizy ich przyczyn, należy zaproponować rozszerzenie granic/limitów dla nawierzchni występujących w warunkach polskich. Uwzględniając częstość występowania przyczyn przejazdów nieważnych, można skupić się na dwóch głównych przyczynach i zaproponować następujące zmiany:

- dla wskaźnika PI przy 400 Hz podwyższyć górną granicę do 7 dB (obecnie 5 dB),
- dla wskaźnika PI przy 1600 Hz podwyższyć górną granicę do 4 dB (obecnie 3 dB) – szczególnie ważne dla nawierzchni betonowych (BC).

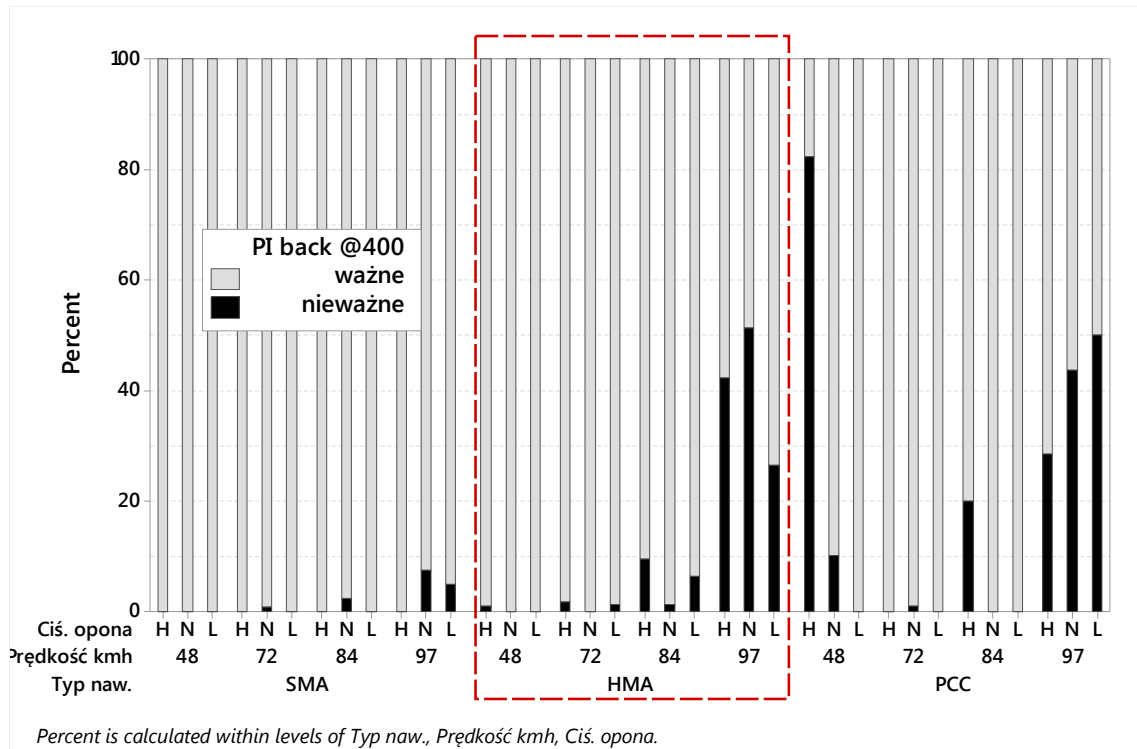
Rysunek 56 przedstawia oryginalne granice przyjęte we Wstępnych wytycznych oraz proponowane nowe wartości graniczne. Wprowadzenie takich granic dla wskaźnika PI zredukowałoby liczbę “nieważnych” przejazdów o przynajmniej 90 %, co doprowadziłoby do liczby nieważnych przejazdów na poziomie 1-2 %, co byłoby



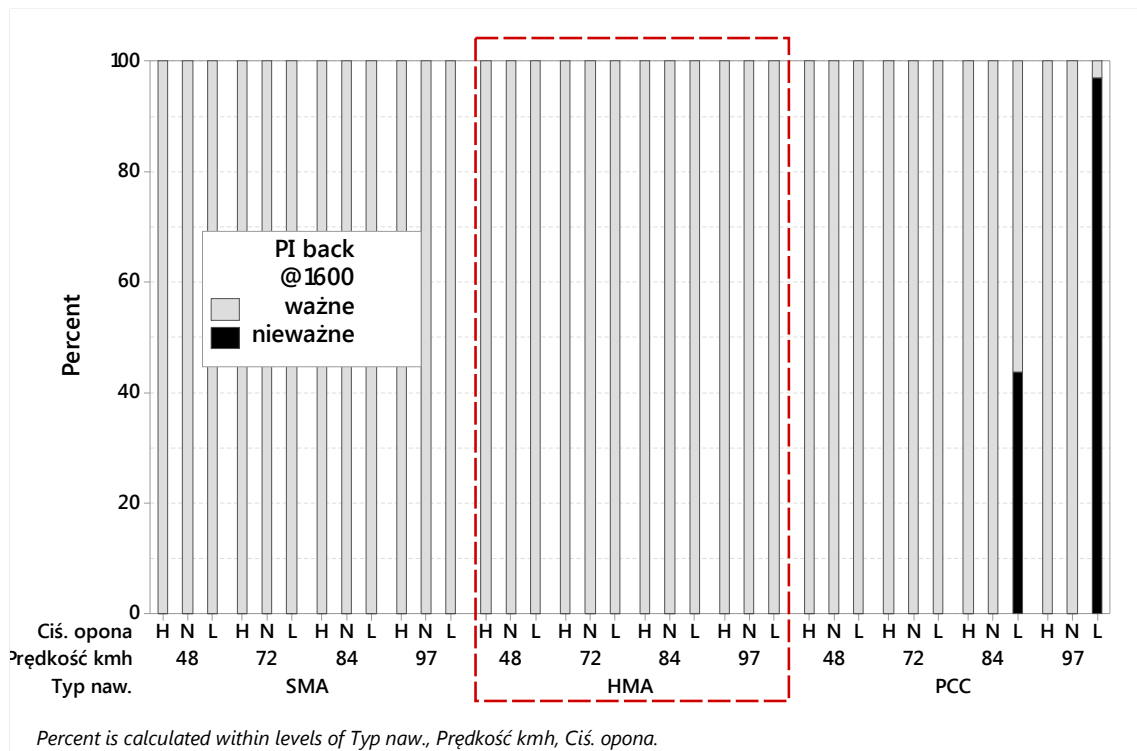
Rysunek 48. Rozkład nieważnych przejazdów sekcji pomiarowych; wartość na zewnętrznym pierścieniu oznacza procent przejazdów nieważnych przy danych warunkach



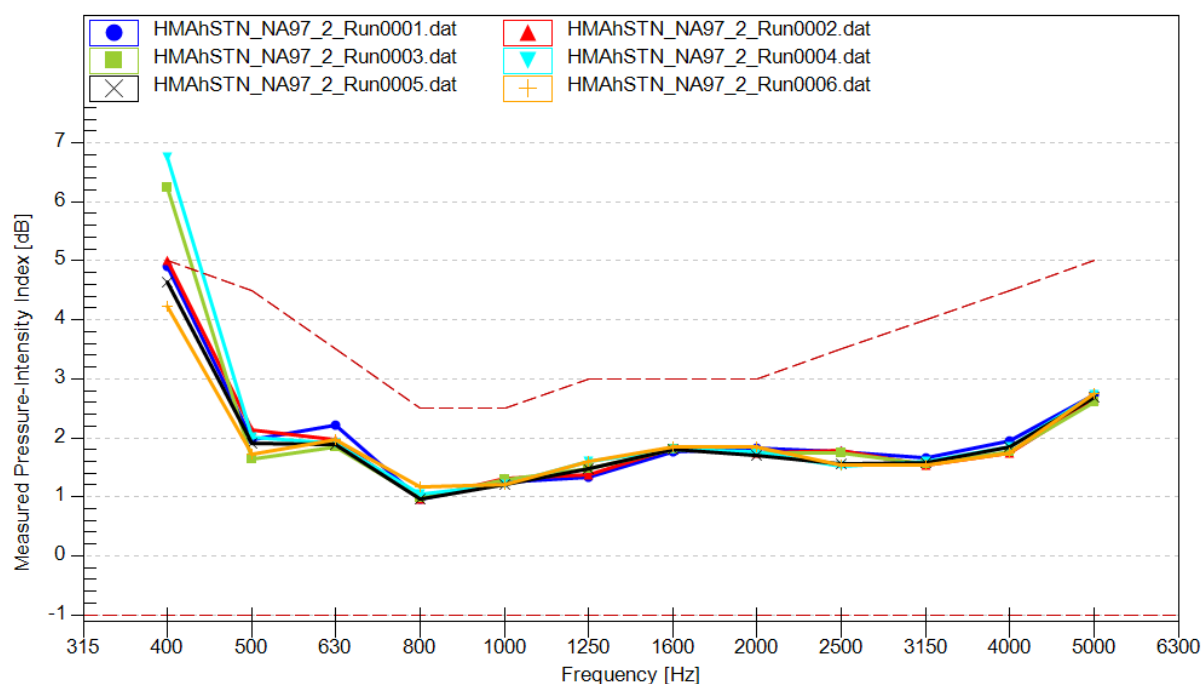
Rysunek 49. Udział zidentyfikowanych przyczyn nieważnych przejazdów względem wszystkich pomiarów w eksperymencie na odcinkach 001 i 003



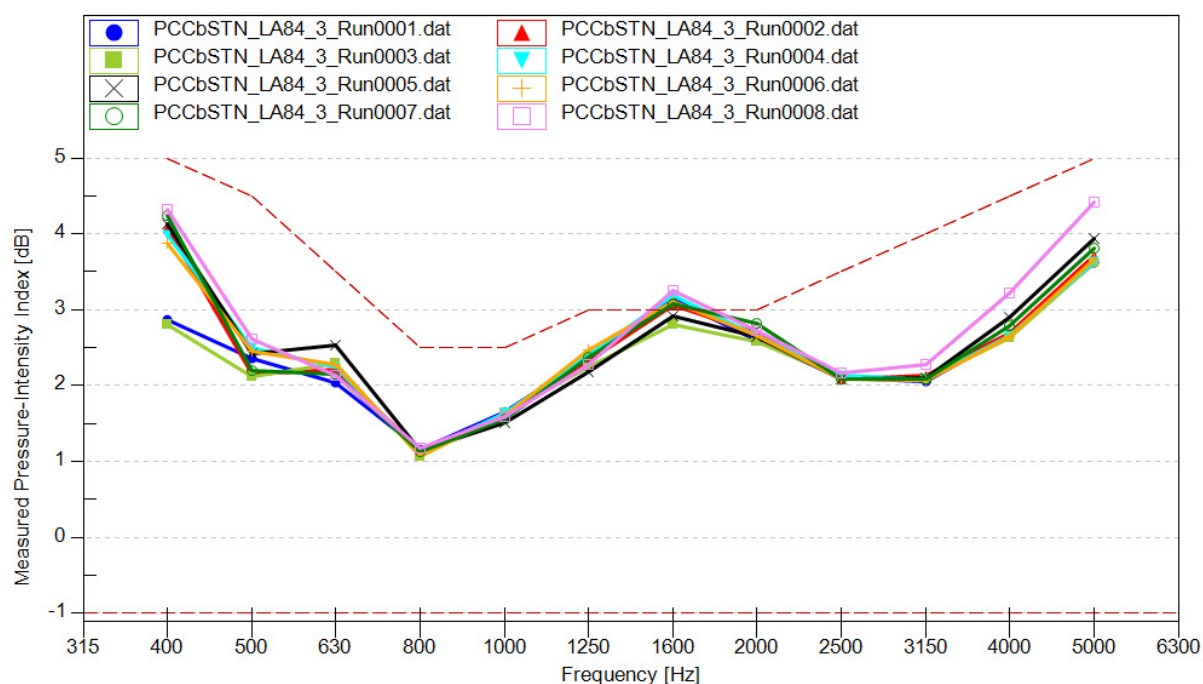
Rysunek 50. Nieważne przejazdy ze względu na przyczynę PI back @400 Hz



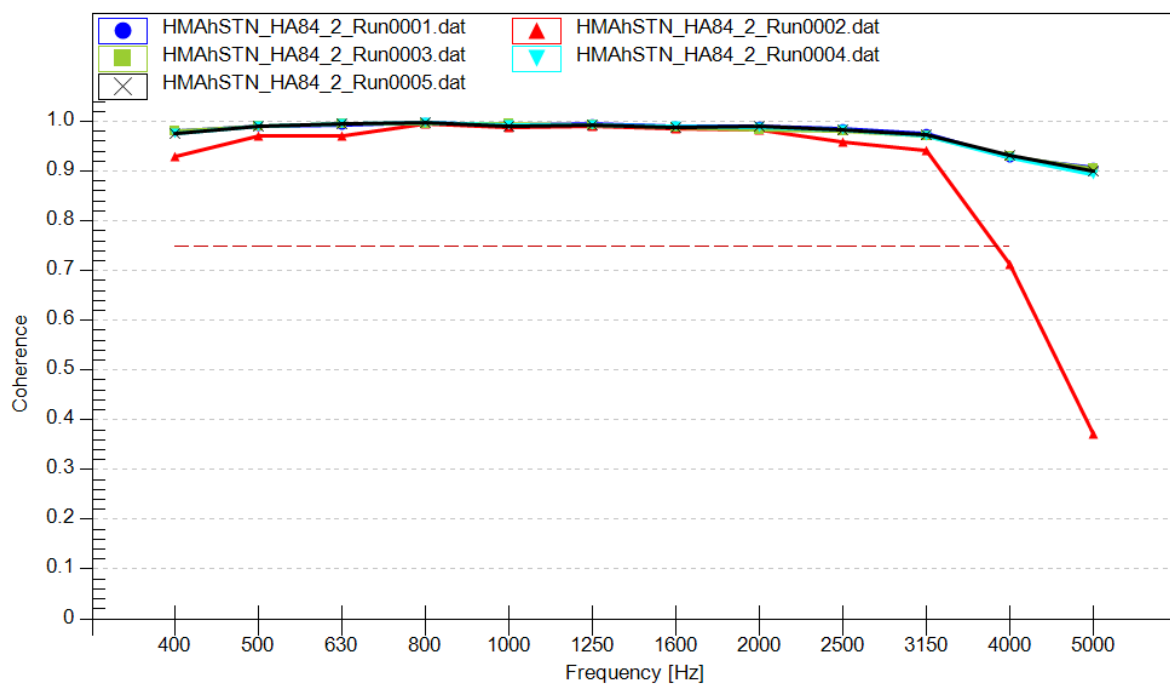
Rysunek 51. Nieważne przejazdy ze względu na przyczynę PI back @1600 Hz



Rysunek 52. Przykład wskaźnika ciśnienia-natężenia (PI) dla tylnej sondy natężenia dźwięku dla nieważnego przejazdu (przyczyna PI back @400 Hz)



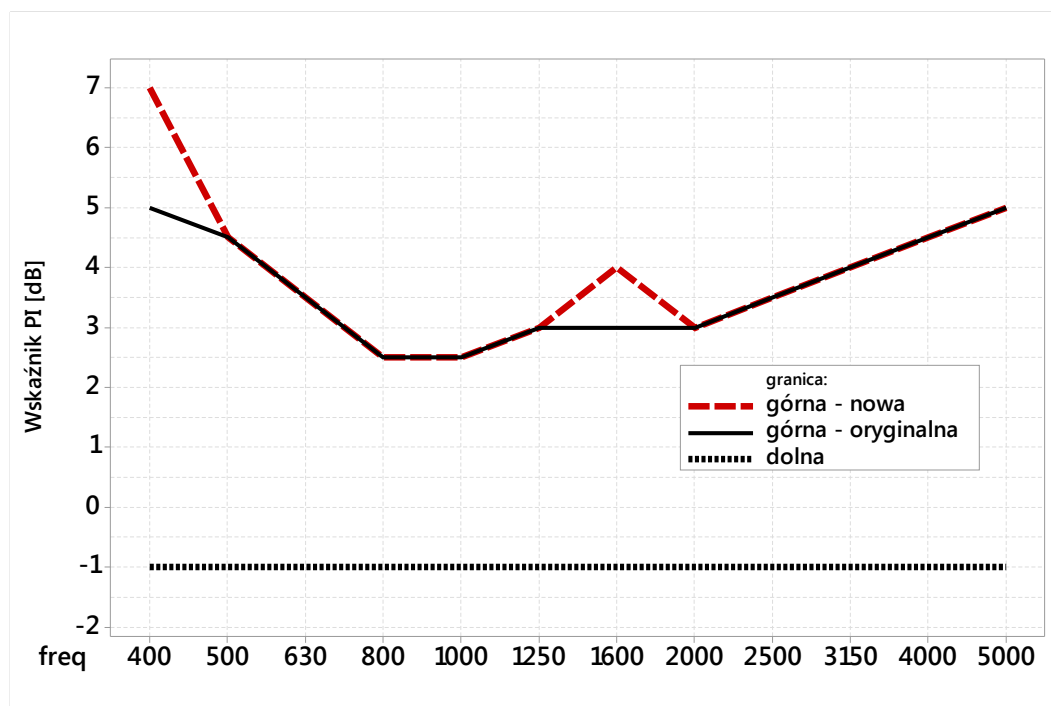
Rysunek 53. Przykład wskaźnika ciśnienia-natężenia (PI) dla tylnej sondy natężenia dźwięku dla nieważnego przejazdu (przyczyna PI back @1600 Hz)



Rysunek 54. Przykład wskaźnika koherencji (C) dla tylnej sondy natężenia dźwięku dla nieważnego przejazdu (przyczyna Coherence @4000 Hz)



Rysunek 55. Nawierzchnie (BA i BC) na których zostały opracowane wytyczne AASHTO dotyczące OBSI [1] [4]



Rysunek 56. Proponowane nowe granice dla wskaźnika PI

Tablica 30. Zaktualizowane graniczne wartości wskaźnika PI

Częstotliwość centralna 1/3 pasma oktawy	Wartość minimalna PI (dB)	Wartość maksymalna PI (dB)
400	-1.0	7.0
500	-1.0	4.5
630	-1.0	3.5
800	-1.0	2.5
1000	-1.0	2.5
1250	-1.0	3.0
1600	-1.0	4.0
2000	-1.0	3.0
2500	-1.0	3.5
3150	-1.0	4.0
4000	-1.0	4.5
5000	-1.0	5.0

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

6.1. Podsumowanie analizy

W tym dokumencie została przedstawiona analiza wyników z pomiarów na odcinkach testowych 001 i 003 oraz z przeprowadzonego eksperymentu. W podsumowaniu można stwierdzić co następuje:

1. Precyzja:

- przypadek HMA/L dla STN daje znaczącą wyższą wariancję (średnio 0.23, czyli odchylenie standardowe 0.48 dB), ale być może było to spowodowane niezarejestrowanymi warunkami pomiarowymi,
- poza tym przypadkiem, średnie wariancje dla innych kombinacji nawierzchnia/ciśnienie dla STN była na poziomie 0.03 do 0.11 dB co przekłada się na odchylenie standardowe 0.18 do 0.33 dB (zgodne z literaturą),
- opona STO daje statystycznie wyższe wariancje dla różnych typów nawierzchni asfaltowych (dla BC nie było badań z STO),
- pomiary z STO prowadzą do znacznego odchylenia standardowego sięgającego 0.54 dB,
- wniosek ogólny – średnie odchylenie standardowe 0.3 dB, podobnie jak w literaturze, dla nowej opony STN, podobnie na BA, BC i SMA.

2. Dokładność:

- przeprowadzone testy statystyczne potwierdziły wysoką powtarzalność pomiarów OBSI przy różnych kombinacjach typu nawierzchni, prędkości pomiaru, ciśnienia oraz typu (wieku) opony,
- pokazano, że można przyjąć: prędkość 72 km/h i ciśnienie 34 psi za optymalne warunki pomiarowe ze względu na wariancję ogólnego poziomu natężenia.

3. Powtarzalność i odtwarzalność:

- w podsumowaniu do wyników obliczeń powtarzalności i odtwarzalności można stwierdzić, że przy prędkości 72 km/h badana metoda OBSI jest względnie akceptowalna i przy tej prędkości uzyskano najniższe wartości wskaźnika P/T (wartość średnia 0.41),
- niepewność standardowa dla 72 km/h wynosi 0.5 dB (średnia dla wszystkich zbadanych warunków, średnia R&R); dla współczynnika rozszerzenia $k=2$, niepewność rozszerzona wynosi odpowiednio 1.0 dB.

4. Wpływ czynników pomiarowych:

- prędkość pomiarów - oczekiwane, że największy wpływ dla wszystkich trzech nawierzchni i przy trzech poziomach ciśnienia w oponie. Im wyższa prędkość tym wyższy IL,
- ciśnienia w oponie - ogólnie im wyższe ciśnienie, tym ogólny poziom IL maleje lub pozostaje na podobnym poziomie. Jedynie dla HMA/72 wydaje się, że wraz ze spadkiem ciśnienia w oponie ogólny IL wzrasta. Ponadto można zaobserwować, że nawierzchnia HMA jest szczególnie podatna na ciśnienie w oponie,
- pozycja czujników - wysokość czujników nad nawierzchnią ma prawie zawsze znaczenie, aczkolwiek jest ono powiązane (czyli istnieje interakcja) z ciśnieniem w oponie. Różnica może wynieść nawet 2dB w najbardziej niekorzystnym przypadku,

- wiek opony SRTT - średni wpływ 8-letniej opony SRTT to zwiększenie poziomu IL o 1 dB przy 72 km/h dla obu typu nawierzchni (HMA i SMA). Można też zaobserwować brak interakcji dla nawierzchni SMA, tzn. wpływ wieku opony SRTT jest stały bez względu na prędkość czy ciśnienie w oponie. Dla nawierzchni BA, interakcja występuje szczególnie dla wyższych prędkości (84 i 97 km/h).
5. Współczynniki korekcyjne ze względu na:
- prędkość – dla nawierzchni SMA, BA, i BC wynosi odpowiednio 0.16, 0.13 i 0.16 dBA / (1km/h), porównywalne do literatury (0.19); znaczny wpływ ale z tempomatami w samochodach utrzymanie stałej prędkości podczas pomiarów jest możliwe, z tym że ważne jest żeby tempomaty były zweryfikowane z niezależnymi i certyfikowanymi urządzeniami (np. laserowe mierniki prędkości),
 - ciśnienie w oponie – ogólnie mały wpływ, średnio 0.025 dBA/ 1 psi, nawierzchnia ma znaczenie, małe ale koniecznie trzeba kontrolować ciśnienie w oponie SRTT przez każdymi pomiarami i w trakcie pomiarów co 4 godziny,
 - pozycja czujników nad nawierzchnią - sprawdzony wpływ przy różnych kombinacjach ciśnienia w oponie i prędkości, ale współczynnik jest stały i wynosi średnio -0.052 dBA / 1 mm; jest to ważne z praktycznego punktu widzenia – montaż robi się każdorazowo przed pomiarami,
 - wiek opony (proxy twardości) – współczynnik normalizujący maleje ze wzrostem prędkości, średnio przy 72 km/h można przyjąć 0.2 dBA / 1 ShA – dokładnie tyle co w ISO na CPX. Przez 8 lat twardość opony SRTT wzrosła około 5 ShA, więc wiek może mieć znaczenie po 2 latach, a zależy to jeszcze od warunków przechowywania opony.
6. Kontrola jakości pomiarów:
- Zostały ustalone nowe górne granice dla wskaźnika PI przy 400 i 1600 Hz w porównaniu do granic przyjętych we Wstępnych wytycznych.

6.2. Wnioski do następnej iteracji wytycznych OBSI

Pomiary zaprezentowane w tym Załączniku wykonano w celu zweryfikowania wstępnej metodyki OBSI opracowanej w oparciu o normy ISO, AASHTO, dostępne opracowania naukowe oraz zalecenia producentów. Tak opracowana metodyka została wykorzystana do badań na odcinkach testowych w Zadaniu 1, 2, 3 i 5. W Zadaniu 4 przeprowadzone zostały zaawansowane analizy statystyczne oraz badania na niezależnym odcinku testowym ITS, które zostały następnie wykorzystane do sprawdzenia wstępnej metodyki i do opracowania ostatecznej wersji proponowanych Wytycznych pomiarów hałaśliwości z wykorzystaniem metody OBSI.

Na podstawie wyników i analizy zaprezentowanej w tym Załączniku należy wprowadzić następujące poprawki do metodyki/wytycznych pomiarów metodą OBSI:

- przyjąć niepewność standardową jako 0.3 dBA,
- ograniczyć używalność opon SRTT do dwóch lat, ewentualnie do 4 lat, z tym że wówczas wprowadzić poprawkę na twardość 0.2 dBA / 1 ShA (poziom nominalny 65 ShA),
- przyjąć 72 km/h jako preferowaną prędkość pomiarową ze względu na najmniejszą średnią wariancję i najmniejszy wskaźnik P/T,
- zmniejszyć tolerancję prędkości podczas pomiarów do 1 km/h,

- przyjąć 34 psi (234 kPa) jako ciśnienie nominalne ze względu na najmniejszą średnią wariancję,
- wprowadzić fakultatywny współczynnik korekcyjny ze względu na pozycję czujników nad nawierzchnią, w wysokości -0.052 dBA / 1 mm liczony od pozycji nominalnej 76 mm,
- wprowadzić nowe wartości graniczne dla wskaźnika PI używanego podczas kontroli jakości danych pozyskanych podczas pomiarów.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Standard Method of Test for Measurement of Tire/Pavement Noise Using the On-Board Sound Intensity (OBSI) Method, AASHTO T 360-16
- [2] Standard Specification for P225/60R16 97S Radial Standard Reference Test Tire, ASTM F2493 - 14
- [3] Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The close-proximity method, ISO 11819-2, 2017
- [4] Donovan, P. R., & Lodico, D. M. (2009). Measuring Tire-Pavement Noise at the Source, NCHRP 630
- [5] Donavan, P. R. (2007). Comparative Measurements of Tire/Pavement Noise in Europe and the United States: Noise Intensity Testing in Europe (NITE) Study.
- [6] Hanson, D. I., James, R. S., & Nesmith, C. (2004). Tire / Pavement Noise Study. NCAT Report 04-02
- [7] Sandberg, U., Buhlmann, E., Conter, M., Mioduszewski, P., & Wehr, R. (2016). Improving the CPX method by specifying reference tyres and including corrections for rubber hardness and temperature. In Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future (pp. 4913–4923)
- [8] Sandberg U. and Ejsmont J. A. 2002 Tyre/Road Noise Reference Book (INFORMEX Sweden) p. 640