Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu
Instytut Inżynierii Lądowej

Przemysław Górnaś

Nośność doraźna asfaltowych nawierzchni drogowych w aspekcie dynamicznych obciążeń wywołanych ruchem pojazdów

Rozprawa doktorska

Promotor: dr hab. inż. Mieczysław Słowik, prof. PP

Promotor pomocniczy: dr inż. Andrzej Pożarycki

Poznań, 2022

Essentially, all models are wrong, but some are useful.

George E. P. Box

Dziękuję Promotorom
dr. hab. inż. Mieczysławowi Słowikowi, prof. PP oraz dr. inż. Andrzejowi Pożaryckiemu
za cenne uwagi, poświęcony czas i wsparcie w trakcie pisania niniejszej rozprawy doktorskiej.

Dziękuję przyjaciołom Agnieszce, Marcie i Pawłowi za wsparcie i motywację.

Niniejszą pracę pragnę zadedykować mojej wspaniałej żonie Magdalenie i córce Alicji.

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów **5**

Streszczenie **6**

Abstract **7**

1 Wstęp **8**

2 Studium literatury na temat nośności nawierzchni asfaltowych **9**
2.1 Empiryczne metody oceny nośności nawierzchni asfaltowych 9
2.1.1 Metoda wizualnej inwentaryzacji uszkodzeń nawierzchni 10
2.1.2 Metoda pomiaru ugięć nawierzchni 12
2.2 Mechanistyczne metody oceny nośności nawierzchni asfaltowych 15
2.2.1 Modele nawierzchni asfaltowych 16
2.2.2 Metody wyznaczania wartości parametrów modeli nawierzchni 21
2.2.3 Empiryczne zależności oceny nośności nawierzchni 31
2.3 Podsumowanie studium literatury 33

3 Teza, cel i zakres pracy **34**

4 Wprowadzenie pojęcia nośności doraźnej nawierzchni oraz przyjęcie założeń autorskiej metody jej oceny **35**

5 Metody wyznaczania wartości parametrów modeli nawierzchni asfaltowych **37**
5.1 Wyznaczanie grubości warstw nawierzchni 38
5.2 Wyznaczanie wartości parametrów materiałowych warstw modeli nawierzchni 51
5.3 Skanowanie profilu nawierzchni jezdni 88

6 Weryfikacja doświadczalna metod wyznaczania wartości parametrów modeli nawierzchni asfaltowych **115**
6.1 Weryfikacja metody wyznaczania grubości warstw nawierzchni 116
6.2 Weryfikacja metody wyznaczania wartości parametrów materiałowych warstw modeli nawierzchni 122
6.3 Weryfikacja metody skanowania profilu nawierzchni jezdni 129

7 Opracowanie modelu nawierzchni **133**

8 Implementacja empirycznych zależności do obliczenia nośności doraźnej nawierzchni asfaltowych **141**

9 Analiza wyników obliczeń nośności doraźnej nawierzchni na odcinku testowym **143**

10 Wnioski **150**

11 Kierunki dalszych prac badawczych **151**

Bibliografia **152**

Załączniki **171**
Załącznik 1. Kod programu MATLAB - jednowymiarowy model pomiaru metodą GPR
Załącznik 2. Kody programu MATLAB - obliczenie FFT i iFFT
Załącznik 3. Kody programu MATLAB - modele systemów mechanicznych
Załącznik 4. Kod programu MATLAB - model mechaniczny nawierzchni LET
Załącznik 5. Kod programu MATLAB - moduł obciążenia modelu nawierzchni

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

Oznaczenia

A_k – amplituda k-ej składowej harmonicznej sygnału [-]
c – prędkość światła w próżni $[\frac{m}{s}]$
c_i – współczynnik tłumienia i-tego tłumika dyskretnego modelu mechanicznego $[\frac{N \cdot s}{m}]$
E – moduł sprężystości $[MPa]$
E_i – moduł sprężystości i-tej warstwy modelu nawierzchni $[MPa]$
E^* – zespolony moduł sztywności $[MPa]$
$|E^*|$ – (dynamiczny) moduł sztywności $[MPa]$
E' – część rzeczywista zespolonego modułu sztywności $[MPa]$
E'' – część urojona zespolonego modułu sztywności $[MPa]$
h_i – grubość i-tej warstwy nawierzchni $[m]$
i – jednostka urojona ($i^2 = -1$) [-]
k_i – współczynnik sprężystości i-tej sprężyny dyskretnego modelu mechanicznego $[\frac{N}{m}]$
m_i – masa i-tego węzła dyskretnego modelu mechanicznego $[kg]$
t_i – czas propagacji fali elektromagnetycznej przez i-tą warstwę nawierzchni $[s]$
ν_i – współczynnik Poissona i-tej warstwy modelu nawierzchni [-]
φ_k – faza początkowa k-ej składowej harmonicznej sygnału $[rad]$
$\varepsilon_{r,i}$ – względna wartość stałej dielektrycznej i-tej warstwy nawierzchni [-]
ω – częstotliwość kątowa $[rad]$

Skróty

AVCF – funkcja celu użyta w obliczeniach odwrotnych (z ang. Area Value with Correction Factor)
BB – belka Benkelmana
FEM – metoda elementów skończonych (z ang. Finite Element Method)
FFT – szybka transformata Fouriera (z ang. Fast Fourier Transform)
iFFT – szybka odwrotna transformata Fouriera (z ang. Inverse Fast Fourier Transform)
FWD – ugięciomierz dynamiczny (z ang. Falling Weight Deflectometer)
GPR – georadar (z ang. Ground Penetrating Radar)
KŁSM – kruszywo łamane stabilizowane mechanicznie
LET – teoria warstw sprężystych (z ang. Layer Elastic Theory)
MMA – mieszanka mineralno-asfaltowa
PMS – system utrzymania nawierzchni (z ang. Pavement Management System)
SDOF – dyskretny model mechaniczny (z ang. Single Degree-of-Freedom model)
VSS – płyta obciążona statycznie (z szw. Vereinigung Schweizerischer Straßenfachleute)

Streszczenie

W niniejszej rozprawie doktorskiej zaprezentowano autorską metodę oceny nośności doraźnej asfaltowych nawierzchni drogowych, w której uwzględnia się dynamiczne obciążenia wywołane ruchem pojazdów po nawierzchni jezdni z nierównościami. Na elementy przedstawionych rozwiązań składają się metody wyznaczania wartości parametrów modeli nawierzchni na podstawie wyników pomiarów in situ, model nawierzchni oraz empiryczne zależności do obliczania trwałości zmęczeniowej warstw nawierzchni i jej podłoża. Do weryfikacji opisanych w rozprawie metod numerycznych wykorzystano wyniki badań empirycznych wykonanych przy użyciu urządzenia GPR, modułu typu FWD w urządzeniu ZiSPON oraz metody triangulacji laserowej.

Oryginalnym rozwiązaniem podjętego problemu naukowego (oceny nośności doraźnej asfaltowych nawierzchni drogowych) jest wyznaczanie wartości parametrów materiałowych warstw modeli nawierzchni w oparciu o obliczenia odwrotne. Algorytmy obliczeniowe zbudowano na podstawie analizy wyników pomiarów dynamicznych ugięć nawierzchni jezdni w dziedzinie częstotliwości.

Wszystkie elementy opracowanej metody obliczeniowej zaprezentowano w oparciu o eksperymenty numeryczne, zbudowane w oparciu o oryginalne kody komputerowe w środowisku programu MATLAB. Poszczególne rozwiązania umieszczono w załącznikach. Weryfikację doświadczalną opracowanych metod wykonano na zbiorach wyników badań nawierzchni jezdni asfaltowej na odcinku testowym. Program badań terenowych obejmował następujący zakres: a) pomiary georadarem i wiercenia geotechniczne w celu rozpoznaniu rodzaju i układu warstw przedmiotowej nawierzchni, b) pomiary dynamicznych ugięć nawierzchni jezdni urządzeniem ZiSPON, c) pomiary cech geometrycznych profilu nawierzchni jezdni metodą triangulacji laserowej.

Postawiona została hipoteza o zgodności między warunkami brzegowymi w statycznym modelu, a dynamicznymi warunkami badań ugięć nawierzchni jezdni wywołanych obciążeniem impulsowym. Analiza wyników obliczeń pozyskanych z eksperymentów numerycznych i badań nawierzchni na odcinku testowym, potwierdziły skuteczność opracowanych algorytmów obliczeniowych oraz weryfikowaną w rozprawie hipotezę.

Abstract

This dissertation presents the author's method of estimating the temporary load capacity of asphalt road pavements, which takes into account the dynamic loads caused by vehicle traffic on a road surface with roughness. The elements of the presented solutions include methods of determining the values of pavement model parameters based on the results of in situ measurements, pavement model and empirical relations for calculating the fatigue life of pavement layers and its subgrade. To verify the numerical methods described in the thesis, the results of empirical tests using GPR, FWD type module in ZiSPON device and laser triangulation method were used.

An original solution to the research problem (assessment of the temporary load capacity of asphalt road pavements) is the determination of the values of material parameters of pavement model layers based on inverse calculations. Calculation algorithms were constructed on the basis of an analysis of dynamic measurements of road surface deflections in the frequency domain.

All elements of the developed computational method were presented based on numerical experiments built using original computer codes in MATLAB software environment. Particular solutions are included in the appendices. Experimental verification of the developed methods was performed on sets of test results of asphalt road pavement on the test section. The program of field investigations included the following scope: a) GPR measurements and geotechnical borings to recognize the type and arrangement of the layers type of the pavement in question, b) measurements of dynamic deflections of the road surface with the ZiSPON device, c) measurements of geometric features of the road surface profile with the laser triangulation method.

A hypothesis was formulated about the correspondence between the boundary conditions in the static model and the dynamic conditions of testing the deflections of road surface induced by impulsive loading. The analysis of calculation results obtained from numerical experiments and pavement tests on the test section confirmed the effectiveness of the developed calculation algorithms and the hypothesis verified in the thesis.

1 Wstęp

W ramach intensywnej rozbudowy sieci dróg, od 2004 roku wybudowano w Polsce ponad pięć tysięcy kilometrów dróg ekspresowych i autostrad [1]. Obecnie okres eksploatacji wielu wybudowanych odcinków zbliża się do końca czasu przewidzianego w projektach. Dlatego, aby zapewnić dobry stan techniczny ich nawierzchni, wkrótce będzie konieczne wykonanie remontów nawierzchni na bardzo szeroką skalę. Zakresy, koszty i rezultaty przeprowadzonych napraw będą zależały od uzyskanych wyników diagnostyki nawierzchni, zarówno na poziomie utrzymaniowym, jak i projektowym. Obecnie na poziomie utrzymaniowym typowane są odcinki do przeprowadzenia remontów, a na poziomie projektowym zakres i technologia ich wykonania. Poprzez intensywny rozwój Systemów Utrzymania Nawierzchni, znanych pod nazwą PMS (ang. *Pavement Management System*), poziom utrzymaniowy i projektowy stają się coraz bardziej powiązane ze sobą, czego rezultatem jest efektywniejsze wydatkowanie środków finansowych na utrzymanie sieci drogowych. Dalszy rozwój PMS między innymi związany jest z postępem w diagnostyce nawierzchni, której wyniki są bezpośrednim źródłem danych wejściowych do systemów utrzymaniowych oraz punktem wyjścia do projektowania przebudów i wzmocnień nawierzchni. Budowa nowych urządzeń diagnostycznych, montaż coraz precyzyjniejszych czujników pomiarowych na istniejących urządzeniach, czy szybko rosnące moce obliczeniowe komputerów dają możliwość opracowywania nowych metod diagnostyki nawierzchni. Za otwarty temat badawczy należy więc uznać poszukiwanie i rozwój metod oceny stanu technicznego nawierzchni, którym w zakresie określenia parametru nośności zajął się autor w niniejszej rozprawie doktorskiej. W systematyczny sposób, w kolejnych rozdziałach pracy zaprezentowano oraz zweryfikowano w oparciu o przeprowadzone eksperymenty numeryczne i doświadczalne wszystkie elementy opracowanej oryginalnej metody oceny nośności doraźnej asfaltowych nawierzchni drogowych, w której uwzględnia się dynamiczne obciążenia wywołane ruchem pojazdów pokonujących nierówności nawierzchni jezdni.

2 Studium literatury na temat nośności nawierzchni asfaltowych

Nośność w słowniku języka polskiego jest określona jako *"największe dopuszczalne obciążenie czegoś (np. urządzeń, środków transportowych)"* [2]. Z definicji w użyciu słowa nośność istotne jest podanie przedmiotu, którego dotyczy, co jest związane z szerokim zakresem stosowania tego pojęcia, np. nośność statku [3], nośność łożyska [4], nośność opakowań tekturowych [5] oraz w budownictwie ogólnym [6, 7], mostowym [8, 9], kolejowym [10, 11] i lotniskowym [12, 13]. Pojęcie nośności jest również wykorzystywane w budownictwie drogowym między innymi w odniesieniu do nośności nawierzchni drogowych [14, 15, 16] i ich podłoży gruntowych [17, 18, 19]. Z kolei inżynierowie budownictwa drogowego posługują się następującą definicją nośności nawierzchni: *"nośność nawierzchni jest to zdolność nawierzchni do przenoszenia obciążeń od ruchu drogowego"* [20, 21, 22]. Główną przyczyną utraty nośności nawierzchni są obciążenia mechaniczne [23] i termiczne [24]. Utrata nośności nawierzchni (szczególnie asfaltowych [25]) najczęściej nie jest następstwem jednokrotnego obciążenia przekraczającego dopuszczalną wartość poszczególnych wielkości opisujących stany graniczne, lecz przejawia się stopniową utratą nośności pod wpływem wielokrotnego obciążania (trwałość zmęczeniowa). Nośność nawierzchni należy więc traktować jako parametr zmienny w czasie, którego zmiany będą zależne, między innymi od obciążenia nawierzchni wyrażanego w sposób jakościowy i ilościowy [26]. Ważne jest tutaj stwierdzenie *między innymi*, ponieważ na nośność nawierzchni oprócz obciążeń, mają wpływ też inne czynniki np. odwodnienie korpusu drogowego [27], starzenie asfaltu w przypadku nawierzchni asfaltowej [28], oddziaływanie mrozu [29], czy szkody górnicze [30]. Poprzez wpływ na nośność nawierzchni (na jej utratę) wielu czynników, nie tylko obciążeń od ruchu pojazdów, dobrym przybliżeniem definicji nośności nawierzchni jest ta stosowana przez inżynierów budownictwa drogowego. Mnogość czynników mających wpływ na nośność nawierzchni drogowych sprawia, że jest to najbardziej niejednoznaczna do oznaczenia cecha nawierzchni, dla oceny której opracowano wiele metod. Istnieje ogólny podział na empiryczne i mechanistyczne metody oceny nośności nawierzchni [31, 32]. W podpunktach 2.1 oraz 2.2 dokonano przeglądu metod oznaczania nośności asfaltowych nawierzchni jezdni.

2.1 Empiryczne metody oceny nośności nawierzchni asfaltowych

Podstawą oceny nośności nawierzchni asfaltowych metodami empirycznymi jest mierzalny parametr, którego wartość związana jest z nośnością poprzez odniesienie się do wyników analizy statystycznej, na podstawie zasobów gromadzonych w bazach danych zasilanych wynikami badań. Do metod pomiarów parametrów wyrażających nośność nawierzchni należy zaliczyć przede wszystkim [31, 32]:

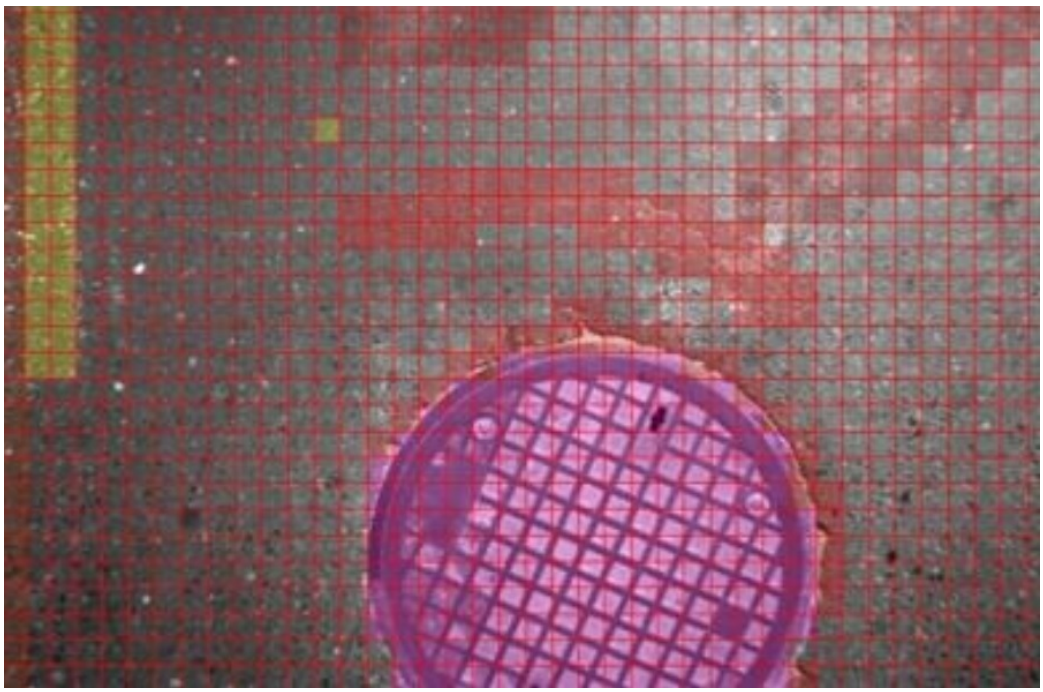
1. wizualną inwentaryzację uszkodzeń nawierzchni,
2. pomiary ugięć nawierzchni.

Wymienione metody pomiarów parametrów nawierzchni związanych z jej nośnością, omówiono kolejno w podpunktach 2.1.1 i 2.1.2.

2.1.1 Metoda wizualnej inwentaryzacji uszkodzeń nawierzchni

Ocena nośności nawierzchni na podstawie rozpoznania wizualnego dotyczy przede wszystkim rejestracji uszkodzeń na powierzchni badanej jezdni. W trakcie pomiarów np. metodą wizualnej inwentaryzacji stanu technicznego nawierzchni [33] rejestracji podlega cała lista uszkodzeń (przykładowy zakres rejestrowanych uszkodzeń zestawiono w katalogu [34]). Z listy rejestrowanych uszkodzeń, związek z utratą nośności nawierzchni w głównej mierze przypisuje się uszkodzeniom typu "spękania" (np. według [35] nośność nawierzchni zostaje utracona w przypadku kiedy nie mniej niż 20% powierzchni jest pokryte pęknięciami zmęczeniowymi o rozwartości większej niż 2 mm). Pomimo opracowanych metod kwantyfikacji uszkodzeń nawierzchni [32, 34, 36, 37], nośność na podstawie wizualnej inwentaryzacji jest wyrażana jakościowo, a nie ilościowo. Konsekwencją oceny jakościowej jest ograniczona możliwość zastosowania wyników metody wizualnej inwentaryzacji w ocenie nośności nawierzchni [38].

Obecnie poprzez rozwój technologii rejestracji uszkodzeń nawierzchni, pomiary realizowane są poprzez wykonanie serii zdjęć na całej długości badanego odcinka. Wykonane zdjęcia poddaje się analizie coraz doskonalszymi algorytmami komputerowymi [39, 40, 41, 42], których podstawą działania są również sztuczne sieci neuronowe [43, 44, 45, 46]. Rezultatem obliczeń jest półautomatyczna, a nawet automatyczna detekcja i kwantyfikacja uszkodzeń. Przykładowy wynik działania algorytmu automatycznej analizy zdjęć na potrzeby inwentaryzacji uszkodzeń widocznym gołym okiem na nawierzchni jezdni przedstawiono na rysunku nr 1.



Rys. 1: Przykładowy wynik działania algorytmu inwentaryzacji uszkodzeń nawierzchni zarejestrowanych na ortogonalnym zdjęciu [44]

Rejestrację uszkodzeń nawierzchni dla oceny jej nośności przeprowadza się również poprzez wykonanie odkrywek lub pobranie próbek z nawierzchni, dla których rozpoznaje się stan techniczny poszczególnych jej warstw oraz ich połączeń [38]. W przypadku rejestracji spękań próbek pobranych z nawierzchni, istotną korzyścią jest możliwość precyzyjnej klasyfikacji, poprzez określenie głębokości oraz typu spękania (spękania od góry do dołu lub od dołu do góry) [47]. Zdjęcie przykładowej próbki pobranej z nawierzchni w miejscu spękanym, na której zaobserwowano spękanie typu "z góry na dół" przedstawiono na rysunku nr 2.



Rys. 2: Próbka pobrana z nawierzchni, na której zaobserwowano spękanie typu "z góry na dół" [48]

Zważywszy, że wykonanie odkrywek i pobranie próbek jest pracochłonne oraz wiąże się z uszkodzeniem nawierzchni, podstawową wadą tych metod jest ograniczona liczba próbek, które można pobrać z nawierzchni. Atrakcyjną alternatywą dla wymienionych metod inwazyjnych są metody analizy rozchodzenia się fal w ośrodku wielowarstwowym, jakim jest nawierzchnia. Ze względu na źródło wzbudzenia fali, wyróżnia się fale:

1. elektromagnetyczne [49, 50],
2. sejsmiczne [51],
3. ultradźwiękowe [52, 53].

Podstawowymi atutami metod analizy rozchodzenia się wymienionych fal jest ich bezinwazyjność i możliwość identyfikacji nieciągłości warstw nawierzchni w trybie tzw. pomiarów ciągłych.

2.1.2 Metoda pomiaru ugięć nawierzchni

Ocena nośności nawierzchni na podstawie wyników pomiarów jej ugięcia związana jest z założeniem, że nośność nawierzchni zależy od sztywności jej poszczególnych warstw i podłoża. W odniesieniu np. do założeń metody ugięć [31, 32] przekłada się to na sytuację, w której poddana temu samemu obciążeniu nawierzchnia o większej nośności ugnie się o wartość mniejszą niż nawierzchnia o mniejszej nośności. Zmierzona wartość ugięcia nawierzchni jest w tym przypadku podstawą oceny jej nośności i może być określana z wykorzystaniem następujących metod pomiarowych [38, 54, 55]:

- metoda VSS,

- metoda belki Benkelmana (BB),

- metoda de la Croix,

- krzywiznomierz,

- urządzenia typu Falling Weight Deflectometer (FWD),

- ugięciomierz laserowy Traffic Speed Deflectometer (TSD).

Wymienione metody pomiaru ugięć nawierzchni jezdni różnią się między sobą sposobem obciążenia nawierzchni. Dobrym przykładem jest tutaj porównanie dwóch metod:

- metoda VSS − obciążenie statyczne nawierzchni,

- urządzenie FWD − obciążenie dynamiczne nawierzchni,

dla których bezpośrednie porównanie zmierzonych wartości ugięć jest z założenia niepoprawne zważywszy chociażby na warstwy nawierzchni wykonane z materiałów reologicznie złożonych (np. mieszanki mineralno-asfaltowe [56]), w przypadku których czas obciążenia ma bezpośredni wpływ na wartości ich modułu sztywności. Dla przeprowadzenia oceny nośności nawierzchni empiryczną metodą ugięć na podstawie wyników uzyskanych różnymi metodami pomiarowymi, ważne jest ustalenie referencji, dla której kryteria oceny mają wspólną płaszczyznę porównawczą. Przykładem jest tutaj założenie odnośnie metody ugięć przedstawionej w katalogu [32], gdzie wartością odniesienia są wyniki uzyskane przy użyciu metody belki Benkelmana (BB). To oznacza, że chcąc wykorzystać wyniki pomiarów uzyskane inną metodą niż metoda BB, należy znać korelację między nimi. Zestawienie wzorów przeliczeniowych wyrażających związki korelacyjne między metodami pomiaru BB i FWD można znaleźć między innymi w pracy [57]. Na podstawie pozycji [58] do przeliczenia wartości ugięć między tymi metodami można posłużyć się następującymi wzorami:

a) nawierzchnie podatne:

$$U_{BB} = 1,08 \cdot U_{FWD} \tag{1}$$

b) nawierzchnie półsztywne:

$$U_{BB} = 1,16 \cdot U_{FWD} \tag{2}$$

gdzie: U_{FWD} – średnia wartość ugięcia obliczona z wartości ugięć zmierzonych urządzeniem FWD i przyporządkowanych do odcinka jednorodnego badanej nawierzchni, U_{BB} – średnia wartość ugięcia, jaką uzyskano by z analizy ugięć nawierzchni jezdni zmierzonych metodą belki Benkelmana i na tym samym odcinku jednorodnym badanej nawierzchni.

Dla wzorów nr 1 i 2 istotny jest rozdział na typy konstrukcji nawierzchni, co świadczy o wpływie układu i materiałów poszczególnych warstw na wartości mierzonych ugięć, które zależą przede wszystkim od grubości [59] i sztywności [60] poszczególnych warstw nawierzchni oraz sztywności jej podłoża [61]. Na sztywność warstw nawierzchni i jej podłoża mają wpływ jeszcze inne czynniki powiązane ze sobą różnymi zależnościami, czego przykładem są:

- warstwy asfaltowe, których sztywność zależy od ich temperatury [62], która jest zależna od grubości i materiałów z jakich wykonane są poszczególne warstwy nawierzchni [63],
- zmienne w czasie eksploatacji nawierzchni parametry jej podłoża w zakresie wilgotności i zagęszczenia [64].

Konsekwencją istotnego wpływu relatywnie dużej liczby czynników na wartości ugięć nawierzchni są opracowane procedury standaryzacji oceny nośności metodami empirycznymi, które opisano między innymi w pracach [20, 36, 65, 66, 67]. Przykładem są wytyczne [68], w których wartość ugięcia nawierzchni D_0 (maksymalna zarejestrowana wartość ugięcia nawierzchni) przemnaża się kolejno przez współczynniki f_T, f_S i f_P oraz iloraz $50/F$. Obliczona tym sposobem wartość ugięcia standaryzowanego DST jest znormalizowana w zakresie:

a) temperatury warstw asfaltowych do 20^oC (współczynnik f_T),

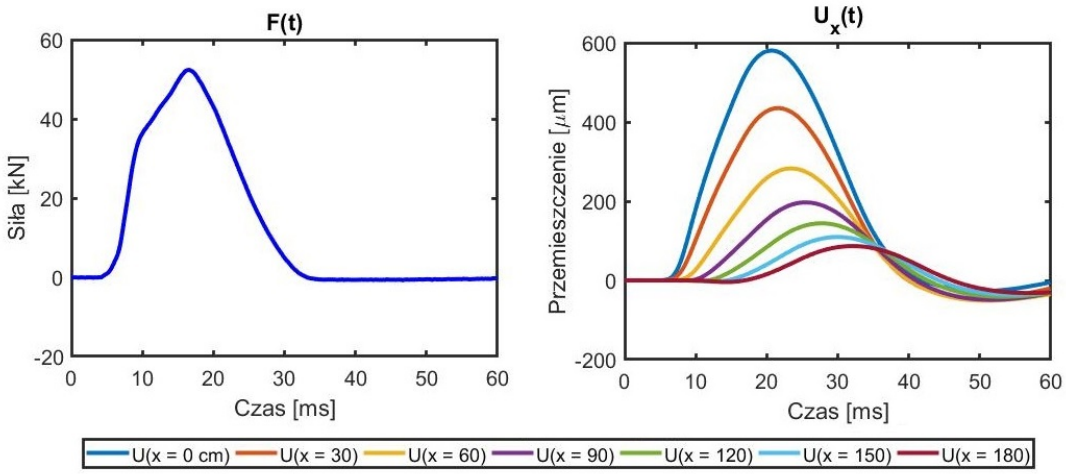
b) tzw. okresu pomiarów (współczynnik f_S),

c) typu konstrukcji nawierzchni (współczynnik f_P),

d) maksymalnej wartości zarejestrowanego obciążenia, w tym przypadku do 50 kN (iloraz $50/F$).

Jednym z efektów standaryzacji wartości ugięć jest uzyskanie lepszego dopasowania wyników bazy doświadczalnej do ustalonej empirycznie zależności oceny nośności nawierzchni (wartość współczynnika determinacji R^2 bliższa jedności). W pracy [69] poprzez wprowadzenie korekty w postaci współczynników standaryzujących typ podbudowy udało się istotnie poprawić korelację (z $R^2 = 0,152$ do $R^2 = 0,653$) między poszukiwanymi grubościami warstwy wzmacniającej z mieszanki mineralno-asfaltowej przy użyciu metody ugięć i mechanistycznej.

Za milowy krok w ocenie nośności nawierzchni na podstawie jej ugięcia należy uznać wprowadzenie do pomiarów urządzeń typu FWD [70, 71], których wykorzystanie umożliwia przeprowadzenie szerszego zakresu analizy nośności nawierzchni w porównaniu do innych wspomnianych wcześniej. Przed wprowadzeniem FWD zakres pomiaru np. metodą VSS obejmował rejestrację wartości siły i przemieszczenia zlokalizowanego w osi obciążenia nawierzchni przyłożonego w sposób statyczny. W trakcie pomiaru urządzeniami typu FWD rejestrowane w czasie dynamicznego obciążenia nawierzchni są wartości z poszczególnych przetworników, jednego siłomierza zlokalizowanego w osi obciążenia oraz najczęściej zestawu siedmiu geofonów zlokalizowanych w odległości x = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 cm od osi obciążenia. Przykładowy zestaw wyników pomiaru ugięć nawierzchni urządzeniem FWD przedstawiono na rysunku nr 3.



Rys. 3: Przykład wykresów siły i przemieszczenia w funkcji czasu, uzyskanych na podstawie analizy wyników pomiarów wykonanych urządzeniem typu FWD

Zaletą metody FWD jest to, że warunki obciążenia odpowiadają przejazdowi pojazdu ciężkiego nie tylko w odniesieniu do maksymalnej zarejestrowanej wartości, ale również zmiany jej wartości w czasie pojedynczego obciążenia, co potwierdzają wyniki uzyskane między innymi w pracach [72, 73, 74]. W celu ograniczania ilości danych do interpretacji, analizy i obliczenia w zakresie oceny nośności nawierzchni na podstawie ugięć wywołanych obciążeniem dynamicznym przeprowadza się tylko dla maksymalnych zarejestrowanych wartości, a więc tzw. linii przemieszczeń (dalej w pracy nazywaną klasyczną krzywą ugięć). Schematycznie opracowanie klasycznej krzywej ugięć nawierzchni przedstawiono na rysunku nr 4.

Klasyczna krzywa ugięć nawierzchni była przedmiotem wielu prac, w których analizie poddano jej kształt [75, 76], parametry krzywej [77, 78, 79] oraz parametry funkcji aproksymującej krzywą [80] (w pracy [80] zestawiono 20 najczęściej spotykanych parametrów krzywej ugięć nawierzchni). W myśl ogólnych zasad metod empirycznych dla parametrów krzywej ugięć opracowano między innymi:

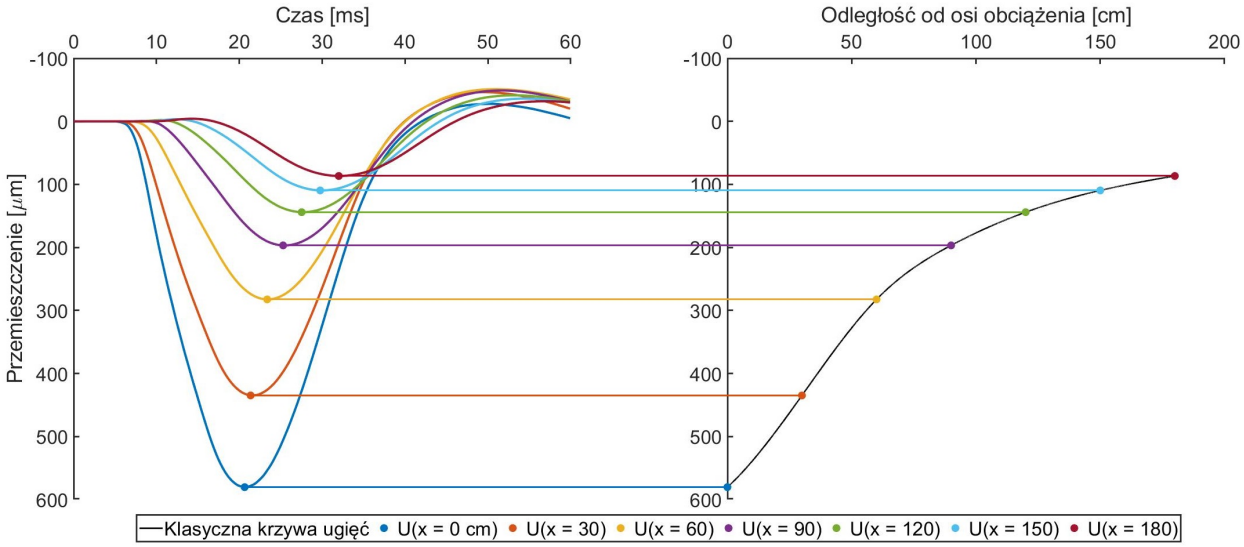
- graniczne wartości parametrów krzywej ugięć nawierzchni na potrzeby klasyfikacji jej stanu technicznego [67, 81, 82],

- zależności między wartościami danego parametru krzywej ugięć, a odkształceniem na spodzie warstw asfaltowych [83, 84, 85],

- zależności między wartościami parametru, a nośnością nawierzchni wyrażoną ilościowo pozostałą trwałością zmęczeniową [86, 87]

- koncepcję nazywaną z języka angielskiego "Surface Moduli", którą można wykorzystać do przybliżenia sztywności półprzestrzeni wyrażonej modułem sprężystości [61, 88],

- metodę prognozowania zmian głębokości kolein na podstawie analizy wyników pomiarów ugięć w waunkach cyklicznych obciążeń nawierzchni [89].



Rys. 4: Schemat opracowania klasycznej krzywej ugięć nawierzchni

2.2 Mechanistyczne metody oceny nośności nawierzchni asfaltowych

Mechanistyczne metody oceny nośności nawierzchni asfaltowych są rozszerzeniem metod empirycznych o wykorzystanie mechaniki teoretycznej, stąd zastosowanie ma dla nich również nazwa *metody mechanistyczno-empiryczne*. Dla określenia nośności metodami mechanistycznymi wykorzystuje się modele nawierzchni, z wykorzystaniem których oblicza się stan naprężenia i odkształcenia jaki wystąpiłby w rzeczywistej konstrukcji pod wpływem zadanego obciążenia w zależności od właściwości fizyko-mechanicznych materiałów poszczególnych warstw nawierzchni i jej podłoża. Następnie obliczone wartości stanów naprężenia i odkształcenia porównuje się z wynikami badań doświadczalnych i określa się nośność nawierzchni wyrażoną liczbą obciążeń, której przekroczenie oznacza

utratę nośności wyrażonej trwałością zmęczeniową. Na algorytm obliczeniowy nośności nawierzchni metodą mechanistyczną składają się trzy podstawowe elementy: model nawierzchni, metody wyznaczania wartości parametrów modelu oraz empirycznie ustalone zależności do obliczenia nośności nawierzchni [90, 91]. W kolejnych podpunktach dokonano przeglądu opisanych w literaturze modeli, metod wyznaczania wartości ich parametrów oraz zależności empirycznych stosowanych w metodzie mechanistycznej do obliczania nośności nawierzchni asfaltowych.

2.2.1 Modele nawierzchni asfaltowych

Klasyfikację mechanicznych modeli nawierzchni można znaleźć między innymi w pracach [92, 93], z których między innymi wynika, że do obliczenia stanów naprężenia i odkształcenia w nawierzchniach asfaltowych mają zastosowanie różne:

a) metody obliczeniowe (kolejno skróty od nazw angielskich):

- MET (method of equivalent thickness) [94, 95],
- LET (layers elastic theory) [96, 97],
- FEM (finite element method) [98, 99],
- BEM (boundary element method) [100, 101],
- SEM (spectral element method) [102, 103].

b) modele obliczeniowe: dwuwymiarowe [104], trójwymiarowe [105], osiowo-symetryczne [106],

c) rodzaje analiz: statyczne [107], dynamiczne [108], termodynamiczne [109, 110],

d) modele materiałów: liniowe i nieliniowe [111],

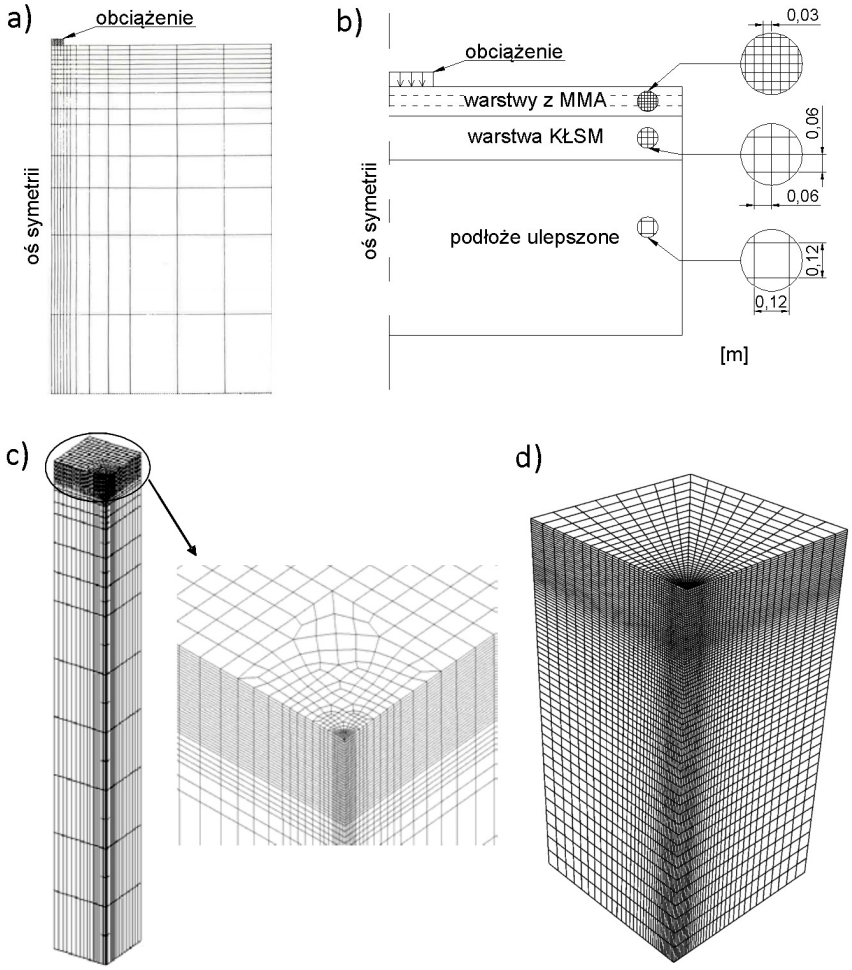
e) modele połączeń międzywarstwowych [112],

f) modele obciążeń [113].

Z przedstawioną listą rozwiązań stosowanych w modelach nawierzchni, związany jest zakres parametrów wymaganych do zdefiniowania modelu obliczeniowego. Przegląd wybranych modeli opisano w dalszej części niniejszego podpunktu.

Założenia metody obliczeniowej

W zależności od przyjętej metody obliczeniowej, wymagane jest określenie parametrów obliczeniowych. Przykładem jest metoda elementów skończonych, która wymaga zdefiniowania siatki elementów skończonych, a więc przeprowadzenia dyskretyzacji modelu, która obejmuje przyjęcie układu, wymiarów oraz typów elementów skończonych. Między innymi w pracach [98, 105, 114, 115, 116], można znaleźć modele nawierzchni, w których zastosowano różne typy i układy elementów skończonych. Kilka z nich zaprezentowano na rysunku nr 5.



Rys. 5: Przykładowe schematy siatek elementów skończonych zastosowanych w modelach nawierzchni wykorzystanych kolejno w pracach: a) [98], b) [115], c) [105], d) [114]

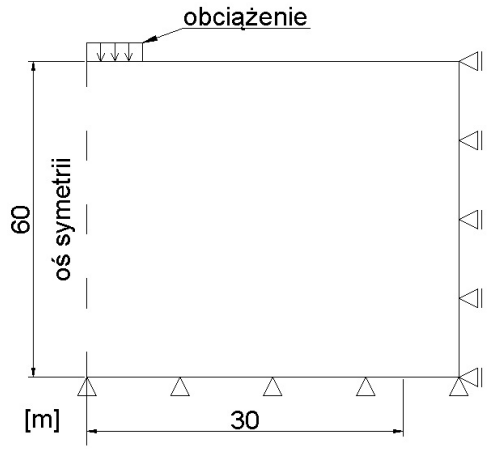
Warunki brzegowe i parametry geometryczne modelu

Układ warunków brzegowych i wymiarów geometrycznych modelu nawierzchni powinien w możliwie najwierniejszy sposób odwzorowywać warunki pracy rzeczywistej konstrukcji. Wybór ich konfiguracji nie może być przypadkowy i powinien spełniać określone założenia. Dla modeli nawierzchni drogowej przyjmuje się, że jest to konstrukcja wielowarstwowa o nieograniczonej szerokości, nieskończonej długości oraz skończonej lub nieskończonej grubości warstwy podłoża [97]. Założenie o nieskończonych wymiarach jest zgodne z warunkami brzegowymi modeli analitycznych np. LET, natomiast modele numeryczne np. FEM mają z założenia metody obliczeniowej ograniczone wymiary. Dla spełnienia zasady o nieskończonych wymiarach, w modelach numerycznych stosuje się następujące metody ograniczenia wpływu ich skończonych wymiarów:

- przyjęcie odpowiednio dużych wymiarów modelu,
- zastosowanie tzw. elementów nieskończonych.

Wymienione metody poddano weryfikacji oraz ustalono ich parametry między innymi w pracach [115, 117, 118].

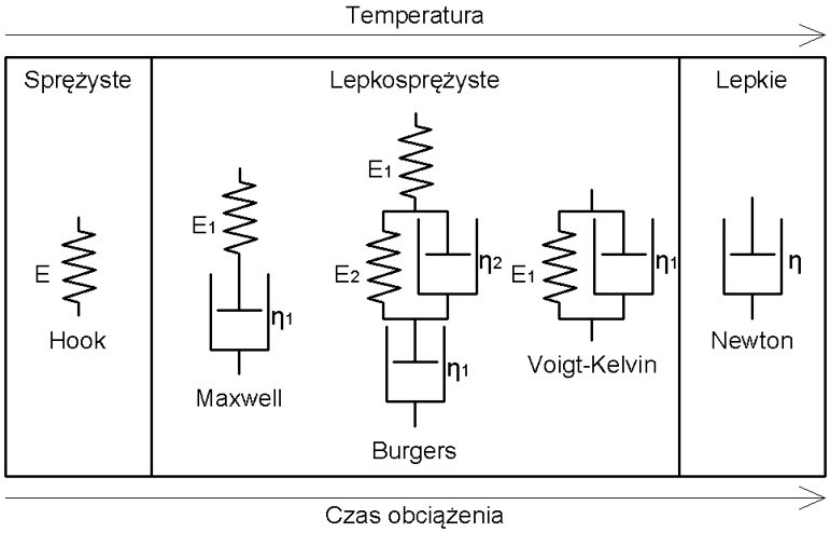
W literaturze opisano różne konfiguracje warunków brzegowych i wymiarów geometrycznych zastosowanych w modelach nawierzchni FEM, które można podzielić ze względu na wymiar przestrzeni, a mianowicie: dwuwymiarowe [92, 97], osiowo-symetryczne [119, 120] i trójwymiarowe [121, 122]. Konfiguracje warunków brzegowych i wymiarów geometrycznych modelu osiowo-symetrycznego, którą ustalono w pracy [120], przedstawiono na rysunku nr 6.



Rys. 6: Konfiguracja warunków brzegowych i wymiarów geometrycznych modelu osiowo-symetrycznego, którą ustalono w pracy[120]

Parametry modeli materiałowych

Liczba parametrów materiałowych warstw modelu nawierzchni jest zależna od zastosowanego modelu materiału, którego wybór jest związany z rodzajem materiałów z jakich wykonane są poszczególne warstwy modelowanej nawierzchni, czy jej podłoże. Na wybór modelu materiału mają również wpływ symulowane w trakcie analizy zjawiska, które są zależne przede wszystkim od warunków obciążenia nawierzchni np. statyczne, dynamiczne krótkotrwałe i dynamiczne cykliczne. Wpływ warunków obciążenia jest szczególnie ważny dla materiałów reologiczne złożonych, do których zaliczają się mieszanki mineralno-asfaltowe. Ze względu na właściwości mechaniczne, które zależą od temperatury i czasu obciążenia, dla warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych zastosowanie mają modele: sprężyste, lepkie, lepkosprężyste, lepkosprężystoplastyczne [92]. Na rysunku nr 7 przedstawiono schematy mechaniczne podstawowych modeli materiałowych stosowanych w modelowaniu warstw nawierzchni wykonanych z mieszanek mineralno-asfaltowych, których dobór jest zależny w szczególności od przyjętego czasu obciążenia i temperatury.



Rys. 7: Schematy mechaniczne podstawowych modeli materiałowych wykorzystywanych do modelowania warstw nawierzchni z mieszanek mineralno-asfaltowych

Wybór modelu obliczeniowego materiału w sposób oczywisty dotyczy również pozostałych warstw nawierzchni i jej podłoża. Najczęściej są to warstwy, które wykonuje się z kruszyw niezwiązanych lub związanych spoiwem hydraulicznym. Przeglądu modeli obliczeniowych dokonano między innymi w pracy [123].

Parametry połączeń międzywarstwowych

W modelowaniu nawierzchni najczęściej stosuje się jeden z trzech typów połączeń międzywarstwowych [97, 112]:

- pełna sczepność,

- brak sczepności,

- częściowa sczepność.

W rzeczywistych nawierzchniach połączenia międzywarstwowe klasyfikują się do sczepności częściowej, a pełną i brak sczepności należy traktować jako wyidealizowane przypadki [124]. Mają one zastosowanie w programach komputerowych powszechnie wykorzystywanych przez inżynierów (np. MnPave, Everstress, Bisar) oraz w pracach naukowych [125, 126, 127, 128, 129]. Stosowanie w obliczeniach uproszczonych modeli połączeń międzywarstwowych wynika z konieczności deklarowania dodatkowych, często problematycznych do zdefiniowania parametrów, szczególnie w przypadku obliczeń z zastosowaniem częściowej sczepności międzywarstwowej. Trudność w oznaczeniu parametrów połączeń, związana jest przede wszystkim z wpływem na szczepność wielu czynników (między innymi temperatury i ilości lepiszcza asfaltowego, warunków starzenia lepiszcza asfaltowego, uziarnienia czy zagęszczenia warstw z mieszanek

mineralno-asfaltowych), a także złożonością realizacji połączenia, szczególnie w przypadku warstwy pośredniej z geosyntetyków [112, 130, 131, 132].

Za podstawę sczepności międzywarstwowej w modelowaniu nawierzchni przyjmuje się klinowanie kruszywa oraz adhezję lepiszczy w przypadku połączenia warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych, stąd sczepność częściową realizuje się poprzez modele połączeń [112]:

- kontakt z tarciem,

- kontakt kohezyjny,

- kontakt z tarciem i kohezją.

Przeglądu modeli częściowej sczepności połączeń międzywarstowych dokonano w pracy [133], a ich implementacja numeryczna jest możliwa poprzez np. model nieskończenie cienkiej warstwy [134].

Parametry modelu obciążenia

Rozwój metod obliczeniowych, a w szczególności metod numerycznych, umożliwia przeprowadzanie z wykorzystaniem modeli nawierzchni coraz bardziej złożonych symulacji, w których uwzględnia się wiele zjawisk i oddziaływań występujących w rzeczywistych nawierzchniach. Nie jest to regułą, ale dla większości modeli obliczeniowych wraz z malejącą liczbą przyjmowanych uproszczeń, wzrasta liczba wymaganych do zdefiniowania parametrów. Od przyjętej złożoności modelu będzie więc zależała lista parametrów definiujących jego obciążenie, a dla większości rozwiązań również liczba wszystkich parametrów wymaganych do zdefiniowania w modelu. Za jeden z najłatwiejszych w implementacji modeli obciążenia należy uznać model obciążenia równomiernie rozłożonego na powierzchni kołowej [97], którego realizacja wymaga określenia tylko dwóch parametrów: wartości siły i promienia koła, na którym jest rozłożone obciążenie. W przypadku kombinacji obciążeń równomiernie rozłożonych do określenia wymagane są jeszcze ich wzajemne lokalizacje [135]. Dwa przykładowo wybrane modele nawierzchni różniące się kombinacjami rozłożonych równomiernie obciążeń, przedstawiono na rysunku nr 8.

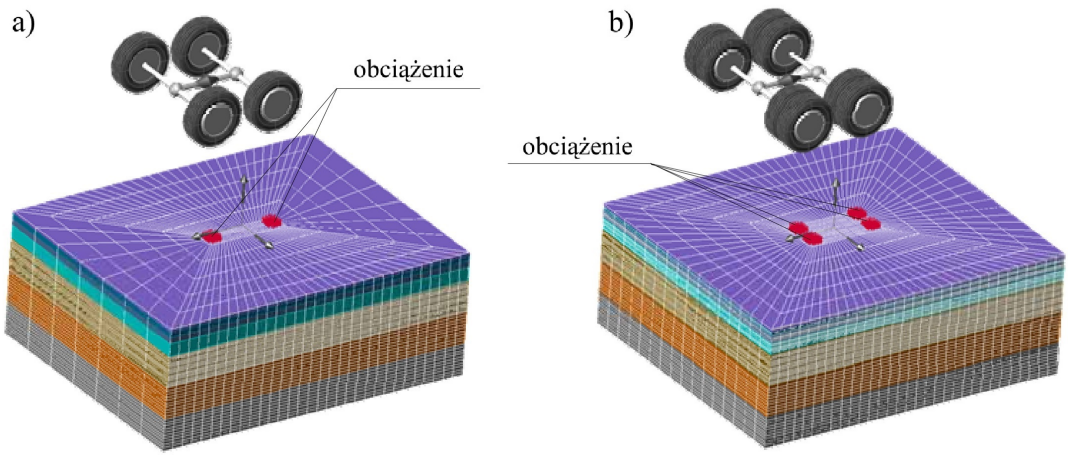
Do wykonania obliczeń z wykorzystaniem bardziej złożonych modeli obciążeń, do których można zaliczyć:

- dwuwymiarowy model pojazdu [136],

- trójwymiarowy model opony [137],

- trójwymiarowy model pojazdu [138],

wymaga się określenia szeregu parametrów, w tym parametrów mechanicznych pojazdów [139].



Rys. 8: Przykładowe dwa modele nawierzchni ze zdefiniowanymi kombinacjami rozłożonych równomiernie obciążeń, odpowiadających obciążeniu od osi podwójnej pojazdu ciężarowego o układzie kół odpowiednio: a) pojedynczym, b) bliźniaczym [135]

2.2.2 Metody wyznaczania wartości parametrów modeli nawierzchni

Do przeprowadzenia obliczeń stanów naprężenia i odkształcenia modelem nawierzchni, zasadniczo wymagane jest: a) przyjęcie grubości warstw modelu (dotyczy warstw o skończonych grubościach), b) deklaracji parametrów modeli materiałowych, c) deklaracji połączeń międzywarstwowych, d) deklaracji obciążenia. Do wyznaczania wartości wymienionych parametrów stosuje się różne metody, których przeglądu dokonano w dalszej części niniejszego podpunktu.

Wyznaczanie grubości warstw nawierzchni

Do wyznaczania grubości warstw nawierzchni mają zastosowanie metody, które klasyfikuje się do jednej z dwóch grup:

a) metody inwazyjne: wykonanie odkrywek, odwiertów w nawierzchni [38],

b) metody bezinwazyjne i/lub semi-bezinwazyjne:

- GPR (z ang. Ground Penetrating Radar) [140],
- SPA (z ang. Seismic Pavement Analyzer) [141],
- FWD (z ang. Falling Weight Deflectometer) [142].

Dla metod bezinwazyjnych i/lub semi-bezinwazyjnych istotne jest to, że GPR, SPA i FWD są wyłącznie nazwami urządzeń pomiarowych, a dopiero obliczenia z użyciem wyników uzyskanych przy ich wykorzystaniu umożliwiają wyznaczenie grubości poszczególnych warstw nawierzchni. Zasadniczym elementem są więc opracowane i wykorzystywane algorytmy obliczeniowe, których podstawą jest analiza zjawisk falowych rejestrowanych w trakcie pomiarów [143]. Opracowano między innymi następujące metody:

a) dla wyników pomiarów urządzeniem GPR:

- metoda refleksyjna (wymaga kalibracji w oparciu o grubości określone np. na podstawie odwiertów wykonanych w nawierzchni) [144],
- metoda profilowania wielokanałowego (nie wymaga kalibracji w oparciu o grubości określone np. na podstawie wykonanych odwiertów w nawierzchni) [145, 146].

b) dla wyników pomiarów urządzeniem SPA:

- metoda SASW (z ang. Spectral Analysis of Surface Waves) [147],
- metoda MASW (z ang. Multichannel Analysis of Surface Waves) [148].

c) dla wyników pomiarów urządzeniem FWD:

- obliczenia odwrotne [149],
- obliczenia z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych [150, 151].

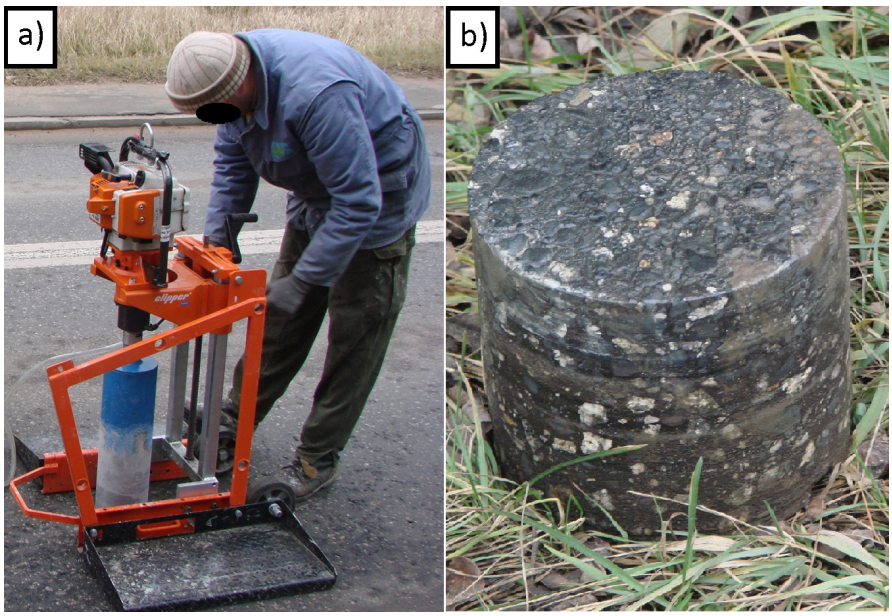
Wyznaczanie wartości parametrów materiałowych warstw nawierzchni

Wyznaczanie wartości parametrów materiałowych warstw nawierzchni i jej podłoża jest możliwe do realizacji między innymi poprzez przeprowadzenie:

a) badań laboratoryjnych próbek pobranych z nawierzchni i jej podłoża,

b) obliczeń z użyciem wyników pomiarów przeprowadzonych w warunkach in situ.

Najczęściej próbki pobierane są poprzez wykonanie przewiertów w nawierzchni (rysunek nr 9).



Rys. 9: Fotografie: a) wykonanie przewiertu w nawierzchni, b) próbka pobrana z pakietu warstw asfaltowych

W trakcie pobierania próbek z nawierzchni wykonuje się rozpoznanie, które sprowadza się do określenia [31, 32]:

- rodzaju i jakości materiałów poszczególnych warstw nawierzchni,

- grubości warstw nawierzchni,

- rodzaju i jakości podłoża gruntowego,

- stanu połączeń międzywarstwowych.

Następnie przede wszystkim na podstawie ustalonych rodzajów materiałów z jakich wykonane są próbki pobrane z warstw nawierzchni, przeprowadza się badania laboratoryjne, których wyniki są analizowane pod kątem wykorzystania do definicji modeli materiałowych warstw nawierzchni. Za podstawową listę badań można uznać tę podaną w katalogach [31, 32], a mianowicie:

- oznaczenie modułu sztywności warstw asfaltowych [155],

- oznaczenie odporności warstw asfaltowych na koleinowanie [156],

- oznaczenie właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych: zawartości lepiszcza rozpuszczalnego [157], składu ziarnowego [158], gęstości [159], gęstości objętościowej [160], zawartości wolnych przestrzeni [161],

- oznaczenie modułu sprężystości warstw wykonanych z mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym [162],

- oznaczenie kalifornijskiego wskaźnika nośności podłoża CBR (z ang. California Bearing Ratio) [163, 164],

- badania połączeń międzywarstwowych [165] np. metodą Leutnera [166].

Pobranie próbek z nawierzchni jest klasyczną metodą niszczącą, której wadą jest ograniczona liczba próbek, które można pobrać z nawierzchni, co jest związane z ich degradującym wpływem na poddaną badaniom nawierzchnię. Konsekwencją ograniczania liczności zbioru z wynikami jest ograniczona możliwość analizy statystycznej wyników badań laboratoryjnych dla niejednorodnych materiałów, przez co zwiększa się ryzyko formułowania przypadkowych wniosków. Istotny jest również fakt, że badanie w jednym miejscu pomiarowym może być wykonane tylko jeden raz w czasie eksploatacji nawierzchni, stąd oznaczanie parametrów materiałowych poszczególnych warstw nawierzchni i jej podłoża dla celów utrzymaniowych tą metodą należy uznać za ograniczone [38].

Alternatywnym źródłem parametrów materiałowych warstw modeli nawierzchni są obliczenia przeprowadzane z wykorzystaniem wyników pomiarów bezinwazyjnych i/lub semi-bezinwazyjnych wykonywanych w warunkach in situ:

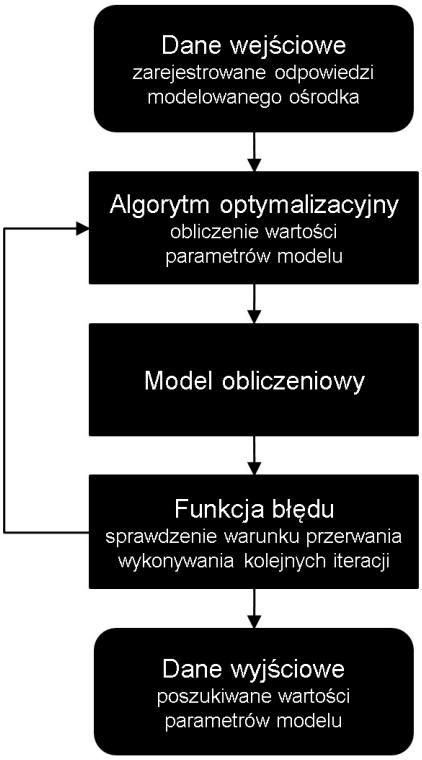
- urządzeniem FWD [26],

- urządzeniem RWD [152],

- urządzeniem SPA [153],

- ultrasonografem [154].

Obecnie za najczęściej wykorzystywaną metodę obliczeniową można uznać obliczenia odwrotne przeprowadzane na wynikach pomiarów metodą FWD [54, 167]. W ujęciu ogólnym, obliczenia odwrotne (z ang. backcalculation) definiuje się jako proces wyznaczania wartości parametrów dowolnego modelu fizycznego, który stosuje się do matematycznego opisu zachowania się rzeczywistego obiektu. Procedura obliczeniowa sprowadza się do iteracyjnej formuły poszukiwania takich wartości parametrów modelu, dla których uzyskuje się zadowalającą dokładność aproksymacji w odniesieniu do wartości wielkości fizycznych, które w danym modelu traktowane są jako odpowiedź obiektu [115]. Trzy elementy: model obliczeniowy, algorytm optymalizacyjny i funkcja błędu, składają się na iteracyjny algorytm realizujący obliczenia odwrotne, którego ogólny schemat przedstawiono na rysunku nr 10.



Rys. 10: Schemat algorytmu realizującego obliczenia odwrotne

Na wyniki obliczeń odwrotnych wpływ mają wszystkie elementy. W przypadku nawierzchni wybór konkretnego modelu spośród dostępnych rozwiązań (patrz punkt 2.2.1), wiąże się z przyjęciem uproszczeń, których celem jest ograniczenie liczby wartości parametrów

do wyznaczania obliczeniami odwrotnymi. Przy tak zredagowanych założeniach można liczyć na to, że rozwiązanie jest bardziej jednoznaczne niż w przypadku zastosowania rozbudowanego i złożonego modelu. Z drugiej strony, bardziej złożony model obliczeniowy dokładniej opisuje zachowanie się rzeczywistego obiektu niż model, w którym przyjęto szereg uproszczeń. Konsekwencją istnienia zależności między złożonością modelu, a jednoznacznością uzyskiwanych wyników obliczeń odwrotnych jest ciągłe poszukiwanie przez badaczy uniwersalnego algorytmu, którego rezultatem są między innymi znane rozwiązania:

- obliczenia z użyciem modelu ze zdefiniowaną tzw. warstwą sztywną [168, 169],
- obliczenia z wykorzystaniem wyników pomiarów metodą FWD poddanych filtracji efektów dynamicznych [170, 171],
- pomiary ugięć w waunkach cyklicznych obciążeń nawierzchni [172, 173],
- obliczenia odwrotne z zastosowaniem metody Ritza (przybliżonego rozwiązywania zagadnień wariacyjnych) [174],
- obliczenia odwrotne z wykorzystaniem filtra Kalmana [175],
- obliczenia odwrotne z wykorzystaniem technik eksploracji danych (z ang. data mining) [176],
- obliczenia dotyczące linii przemieszczeń skorygowanych do statycznych wartości [54],
- wykorzystanie metody obliczeniowej SF-PL [26],
- wielopoziomowy algorytm realizujący obliczenia odwrotne [177].

Przeprowadzenie obliczeń odwrotnych wymaga iteracyjnego algorytmu, który przy minimalnej liczbie iteracji, wyszukuje takie wartości parametrów modelu, dla których funkcja błędu osiąga minimum. W przypadku obliczeń bazujących na klasycznej krzywej ugięć nawierzchni, funkcja celu jest miarą aproksymacji tzw. odpowiedzi modelowanego obiektu. Do realizacji tego celu znalazły zastosowanie między innymi:

- lokalne algorytmy optymalizacyjne: Newtona (gradientowy) [178], Nelder Mead (simpleksowy) [179],
- globalne algorytmy optymalizacyjne: genetyczny [180], Particle Swarm Optimization [181],
- hybrydowe algorytmy optymalizacyjne [182, 183],
- sztuczne sieci neuronowe [184, 185],
- metody probabilistyczne [186, 187].

Funkcja celu (błędu) będąca elementem obliczeń odwrotnych, w stosunku do modeli obliczeniowych i algorytmów optymalizacyjnych, była tematem podjętym w znacznie mniejszej liczbie prac naukowych. Wpływ postaci tej funkcji na jednoznaczność szukanych wartości parametrów uznaje się w pracach [149, 188, 189] za statystycznie istotny. W literaturze można znaleźć między innymi następujące postacie funkcji celu, które wykorzystano do obliczeń odwrotnych z modelami nawierzchni:

- RMSE (z ang. Root Mean Squared Error) [190], którą opisuje wzór nr 3.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} (\frac{d_i^c - d_i^m}{d_i^m})^2} \cdot 100\,[\%] \tag{3}$$

gdzie: n – liczba punktów składających się na linię przemieszczeń, d_i – wartość przemieszczenia w i-tym miejscu pomiaru (odległość geofonu od osi obciążenia w rzucie poziomym) ugięciomierzem FWD, m, c – indeksy wskazujące odpowiednio na zmierzone, obliczone wartości przemieszczeń.

- MAE (z ang. Mean Approximation Error) [167, 191], którą opisują wzory nr 4 i 5.

$$\delta_{MAE} = \frac{\sqrt{\frac{F}{n}}}{\sum_{i=1}^{n} d_i^c} \cdot n \cdot 100\,[\%] \tag{4}$$

$$F = \sum_{i=1}^{n} (d_i^c - d_i^m)^2 \tag{5}$$

gdzie: n – liczba punktów składających się na linię przemieszczeń, d_i – wartość przemieszczenia w i-tym miejscu pomiaru (odległość geofonu od osi obciążenia w rzucie poziomym) ugięciomierzem FWD, m, c – indeksy wskazujące odpowiednio na zmierzone, obliczone wartości przemieszczeń.

- AVCF (z ang. Area Value with Correction Factor) [149, 188], którą opisują wzory nr 6 i 7.

$$\delta_{AVCF} = \left\{ \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{A_k^c - A_k^m}{A_k^m} \right)^2 \right\}^{1/2} + \left| \frac{d_1^c - d_1^m}{d_1^m} \right|, [-] \tag{6}$$

$$A_k = \frac{\sum_{i=1}^{k-1} (d_i + d_{i+1}) \cdot (r_{i+1} - r_i)}{2 \cdot d_1}, (k \leq n) \tag{7}$$

gdzie: n – liczba punktów składających się na linię przemieszczeń, d_i – wartość przemieszczenia w i-tym miejscu pomiaru (odległość geofonu od osi obciążenia w rzucie poziomym) ugięciomierzem FWD, r_i – odległość i-tego miejscu pomiaru od osi obciążenia w rzucie poziomym, A_i – parametr skalujący dla i-tego miejsca pomiaru wartości przemieszczenia, m, c – indeksy wskazujące odpowiednio na zmierzone, obliczone wartości przemieszczeń.

Wyznaczanie parametrów połączeń międzywarstwowych

Do wyznaczania parametrów połączeń międzywarstwowych stosuje się następujące:

a) metody niszczące - badania laboratoryjne próbek pobranych z nawierzchni [112]:

- rozszczepienie klinem lub rozciąganie pośrednie,
- odrywanie lub rozciąganie w kierunku prostopadłym do płaszczyzny powiązania międzywarstwowego,
- skręcanie proste,
- ścinanie bezpośrednie,
- ścinanie z siłą normalną.

b) metody nieniszczące i/lub quasi-nieniszczące - analiza i obliczenia dotyczące wyników badań przeprowadzonych w warunkach in situ:

- urządzeniem FWD [192, 193],
- urządzeniem GPR [194].

Wyznaczanie parametrów obciążenia nawierzchni

Wyznaczanie parametrów obciążenia nawierzchni asfaltowych wiąże się przede wszystkim z określeniem obciążenia od ruchu drogowego, które zasadniczo jest realizowane poprzez pomiary:

a) liczby pojazdów, wykonywane poprzez [195]:

- pomiary krótkookresowe,
- pomiary prowadzone w sposób ciągły np. urządzeniem Golden River, PAT, Fisher-Porter, EasyCOUNT, RPP-2 oraz RPP-5,

b) obciążenia wywieranego przez pojazdy, z wykorzystaniem metod [23, 196, 197]:

- ważenia na wagach stacjonarnych z ograniczeniem się do losowo wybranych pojazdów,
- ważenia pojazdów w ruchu (WIM z ang. Weight In Motion), gdzie kontroli podlega cały potok ruchu pojazdów.

Z wymienionym zakresem pomiarów ruchu drogowego związane jest wyrażenie obciążenia nawierzchni w sposób jakościowy i ilościowy. Do oceny nośności nawierzchni obciążenie ruchem drogowym ma zastosowanie w dwóch przypadkach:

- określenia utraconej części nośności nawierzchni pod wpływem obciążenia wywołanego dotychczasowym ruchem drogowym,
- określenia okresu pozostałego do utraty nośności nawierzchni pod wpływem obciążenia wywołanego prognozowanym ruchem drogowym.

Określenie dotychczasowego ruchu drogowego powiązane jest z obliczeniami w oparciu o wyniki pomiarów ruchu drogowego, które są również podstawą do prognozowania obciążenia ruchem. Najbardziej powszechne metody prognozowania ruchu to [198, 199, 200, 201, 202]:

- metoda wskaźników wzrostu ruchu,

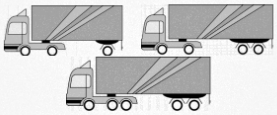
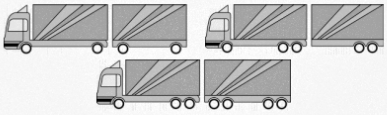
- metoda trendów wzrostu ruchu,

- metoda wskaźników wzrostu PKB,

- metoda komputerowego modelowania ruchu.

Do opisu archiwalnego i prognozowanego ruchu drogowego zastosowanie mają różne klasyfikacje pojazdów, które można znaleźć między innymi w pracach [135, 203, 204, 205, 206]. Źródłem tych różnic jest różnorodność tzw. sylwetki pojazdów, a w tym różne: masy całkowite pojazdów, liczby osi, konfiguracje kół, typy opon [72]. Wybraną klasyfikację pojazdów na przykładzie pracy [207], przedstawiono w tabeli nr 1.

Tab. 1: Klasyfikacja pojazdów według [207]

Kategoria	Sylwetka pojazdu	Opis
1		samochody osobowe, sam. osobowe z lekkimi przyczepami i samochody dostawcze o masie <3,5 t
2		samochody ciężarowe 2-osiowe
3		samochody ciężarowe 3-osiowe samochody ciężarowe 4-osiowe
4		ciągniki siodłowe 2 i 3-osiowe z naczepami 1 i 2-osiowymi
5		ciągniki siodłowe z naczepami 3-osiowymi
6		samochody ciężarowe z przyczepami
7		autobusy
8		inne pojazdy

W pracach [208, 209] oraz późniejszych ich wydaniach [25, 210], ustalono ograniczony wpływ pojazdów lekkich (według [21] pojazd, którego dopuszczalna masa całkowita nie przekracza 3,5 t) na nośność nawierzchni wyrażanej jej pozostałą trwałością zmęczeniową. Następstwem tej decyzji są powszechnie przyjęte uproszczenia, które zgodnie z aktualnie obowiązującymi w Polsce katalogami [21, 32] przy wymiarowaniu nowych i wzmacnianych konstrukcji nawierzchni, zalecają tylko trzy kategorie pojazdów:

- C − samochody ciężarowe bez przyczep,

- C+P − samochody ciężarowe z przyczepami,

- A − autobusy.

Ustalenie prognozowanej liczby poszczególnych typów pojazdów uwzględnianych w obliczeniach nośności nawierzchni jest pierwszym etapem wyznaczania parametrów obciążenia od ruchu drogowego. W drugim etapie prognozowane liczby pojazdów poszczególnych typów przelicza się do równoważnego modelu obciążenia. Idea równoważnego modelu obciążenia powstała po wprowadzeniu do obliczeń współczynnika równoważności obciążenia osi EALF (z ang. Equivalent Axle Load Factor) przez Amerykańskie Stowarzyszenie Urzędów ds. Autostrad i Transportu - AASHO (z ang. American Association of State Highway Officials), które przeprowadziło wielkoskalowy test drogowy [211]. Wprowadzony współczynnik równoważności obciążenia osi wyraża wzór nr 8.

$$N_s = F_j \cdot N_j \tag{8}$$

gdzie: N_s − liczba osi standardowych odpowiadająca N_j osiom rzeczywistym, N_j − liczba osi rzeczywistych o określonym j-tym nacisku, F_j − współczynnik równoważności obciążenia osi [25].

Koncepcja EALF opiera się na założeniu, że N_s standardowych osi równoważnych powoduje degradację nawierzchni równoważną oddziaływaniu liczbie N_j osi rzeczywistych o określonym j-tym nacisku. Obliczenie wartości obciążenia równoważnego wiąże się z określeniem wartości współczynnika równoważności metodą, którą można przyporządkować do jednej z dwóch grup:

a) metody empiryczne wykorzystujące statystyczne modele, których przeglądu dokonano w pracy [212], a jeden relatywnie prosty do zastosowania w praktyce opisuje wzór nr 9, tzw. wzór czwartej potęgi [209].

$$F_j = (\frac{Q_j}{Q_s})^n \tag{9}$$

gdzie: F_j − współczynnik równoważności obciążenia osi j, Q_j − obciążenie danej osi j [kN], Q_s − obciążenie równoważnej osi standardowej [kN], n − wykładnik potęgi równy 4.

b) metody mechanistyczno-empiryczne, których podstawą wyznaczania współczynnika są obliczane nośności nawierzchni wyrażane trwałością zmęczeniową [213, 214, 215, 216].

Koncepcję współczynnika równoważności osi obciążenia dla oceny nośności oraz wymiarowania nawierzchni rozszerzono poprzez wprowadzenie współczynników przeliczeniowych pojazdów na równoważne osie, które zastosowano do zwymiarowania typowych konstrukcji nawierzchni drogowych między innymi w katalogach: niemieckim RSTO [217], austriackim RVS [218] oraz polskim KTKNPiP [21]. Wykorzystywane aktualnie w Polsce wartości współczynników przeliczeniowych grup pojazdów na równoważne osie zestawiono w tabeli nr 2.

Tab. 2: Zestawienie wartości współczynników przeliczeniowych grup pojazdów na osie równoważne, które są wykorzystywane aktualnie w Polsce [21]

Lp.	Kategoria pojazdów	Przykładowe typy pojazdów	Rodzaj drogi			
			Autostrady i drogi ekspresowe	Drogi krajowe	Pozostałe drogi	
			Dopuszczalny nacisk osi pojedynczej przyjęte do projektowania nawierzchni			
			115 kN	115 kN	115 kN	100 kN
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
1.	Samochody ciężarowe bez przyczep **C**		0,50	0,50	0,45	0,45
2.	Samochody ciężarowe z przyczepami **C+P**		1,95	1,80	1,70	1,60
3.	Autobusy **A**		1,25	1,20	1,15	1,05

Osie równoważne do oceny nośności są sprowadzeniem prognozowanej liczby obciążeń przez pojazdy różnego typu do zastępczej wartości, która nie uwzględnia szeregu czynników związanych z dynamiką ich ruchu:

- prędkości i systemu zawieszenia pojazdów oraz nierówności nawierzchni [219, 220, 221, 222],
- rozkładu obciążeń od kół pojazdów na szerokości pasa ruchu [223].

Mając na celu uwzględnienie czynników związanych z dynamiką ruchu dla obliczanych parametrów obciążenia nawierzchni, opracowano między innymi następujące współczynniki obliczeniowe:

a) współczynnik obciążenia dynamicznego DLC (z ang. Dynamic Load Coefficient) będący miarą charakteryzującą rozkład prawdopodobieństwa dynamicznego oddziaływania osi pojazdu poprzez koła na nawierzchnie [224, 225],

b) wskaźnik obciążenia dynamicznego DIF (z ang. Dynamic Impact Factor), którego wartość zależy od prędkości i parametrów zawieszenia pojazdu oraz równości nawierzchni wyrażonej wskaźnikiem IRI [220],

c) współczynnik dynamicznego oddziaływania osi pojazdu poprzez koła na nawierzchnię k_d (w pracy [226] nazwany skrótem DSC z ang. Dynamic Susceptibility Coefficient), będący zmienioną postacią współczynnika obciążenia dynamicznego DLC, który nie zależy od statycznego obciążenia [221],

d) współczynnik szerokości pasa ruchu f_2, który wykorzystuje się do obliczenia liczby równoważnych osi standardowych N_{100} według katalogu [21], wzór nr 10.

$$N_{100} = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot (N_C \cdot r_C + N_{C+P} \cdot r_{C+P} + N_A \cdot r_A) \tag{10}$$

gdzie: N_{100} – ruch projektowy, czyli sumaryczna liczba równoważnych osi standardowych 100 kN w całym okresie projektowym nawierzchni przypadająca na pas obliczeniowy, N_C, N_{C+P}, N_A – kolejno sumaryczna liczba samochodów ciężarowych bez przyczep, ciężarowych z przyczepami i autobusów w całym okresie projektowym, r_C, r_{C+P}, r_A – kolejno współczynnik przeliczeniowy liczby samochodów ciężarowych bez przyczep, ciężarowych z przyczepami i autobusów na liczbę osi standardowych 100 kN, f_1, f_2 i f_3 – kolejno współczynnik obliczeniowego pasa ruchu, szerokości pasa ruchu i pochylenia niwelety.

Alternatywnym podejściem względem współczynników przeliczeniowych obciążenia nawierzchni ruchem drogowym jest procedura obliczeniowa wprowadzona w przewodniku do mechnistyczno-empirycznego projektowania nawierzchni MEPDG (z ang. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) z 2004 roku [204], w której zrezygnowano z koncepcji równoważnych osi. Podstawą przyjętą w przewodniku MEPDG są obliczenia narastającej szkody zmęczeniowej nawierzchni wywołanej osiami rzeczywistych pojazdów. W pracach [227, 228] podjęto problem adaptacji metody MEPDG do jej zastosowania w polskich warunkach.

2.2.3 Empiryczne zależności oceny nośności nawierzchni

Ocena nośności nawierzchni metodą mechanistyczną powiązana jest z wykorzystaniem do obliczeń empirycznie ustalonych zależności, których wynikiem jest liczba obciążeń nawierzchni, po której wystąpi utrata jej nośności. Istotne w metodzie mechanistycznej jest to, że utratę nośności nawierzchni łączy się z powstaniem konkretnego uszkodzenia, które najczęściej dotyczy pojedynczej warstwy lub podłoża nawierzchni. Strukturę tej logiki buduje się poprzez:

1) obliczenie stanu naprężenia i odkształcenia, jaki wystąpiłby w określonej warstwie lub podłożu nawierzchni pod wpływem obciążenia,

2) obliczenie nośności nawierzchni wyrażanej trwałością zmęczeniową jej warstwy lub podłoża poprzez podstawienie obliczonej wartości stanu naprężenia lub odkształcenia do empirycznie ustalonej zależności odporności materiału na zmęczenie.

Najbardziej wiarygodnym źródłem określenia empirycznych zależności odporności materiału na zmęczenie są badania nawierzchni w skali naturalnej, które ze względu na wysokie koszty badań dotychczas były prowadzone w ograniczonym zakresie [229, 230, 231], również w Polsce [232, 233]. Poprzez odniesienie empirycznych zależności do trwałości zmęczeniowej materiału, z którego jest wykonana warstwa nawierzchni lub jej podłoże, rozwijane są jeszcze dwa inne kierunki badań [234]:

- badania właściwości zmęczeniowych materiałów w warunkach laboratoryjnych,

- rozwój teorii naukowych i ich praktyczne zastosowanie w postaci modeli matematycznych.

Poszukiwanie zależności empirycznych oraz teoretyczno-empirycznych w warunkach laboratoryjnych jest mniej kosztowne niż badania w skali naturalnej, stąd są one prowadzone w bardziej intensywny sposób. Przykładem są badania procesu zmęczenia mieszanek mineralno-asfaltowych w warunkach laboratoryjnych, które były i są prowadzone w wielu jednostkach naukowych, czego potwierdzeniem są opublikowane prace [235, 236, 237], w tym autorstwa polskich badaczy [234, 238, 239, 240] oraz opracowane procedury badań [241, 242].

Istotnym problemem badawczym związanym z wyznaczeniem empirycznych zależności, które służą do oceny nośności nawierzchni drogowych metodą mechanistyczną jest identyfikacja miejsc wrażliwych w przekroju poprzecznym nawierzchni, które są odpowiedzialne za utratę jej nośności. W ogólnym ujęciu utratę nośności nawierzchni wiąże się osiągnięciem jednego ze stanów granicznych [35], co w Polsce za sprawą katalogów [31, 32], w przypadku nawierzchni asfaltowych łączy się z powstaniem:

a) spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych,

b) spękań zmęczeniowych podbudów związanych spoiwem hydraulicznym,

c) deformacji strukturalnych nawierzchni, które obejmują trwałe deformacje lepkoplastyczne warstw asfaltowych oraz deformacje strukturalne podłoża nawierzchni.

Do obliczenia metodą mechanistyczną liczby obciążeń potrzebnych do wywołania uszkodzeń związanych z utratą nośności nawierzchni, obecnie zastosowanie mają tzw. kryteria zmęczeniowe, których przeglądu dokonano między innymi w pracach [48, 91, 243, 244]. Wyznaczanie kryteriami zmęczeniowymi wyłącznie liczby obciążeń do utraty nośności nawierzchni jest istotnym ograniczaniem ich stosowania w myśl idei metody projektowania nawierzchni MEPDG [204], w której obliczana jest narastająca w czasie eksploatacji szkoda zmęczeniowa. Ograniczenie liczby uproszczeń w obliczaniu praktycznie w sposób ciągły przyrostu degradacji nawierzchni wiąże się z prognozowaniem rozwoju między innymi spękań, nierówności podłużnych i poprzecznych, przy jednoczesnym uwzględnieniu zmiennych czynników środowiskowych np. temperatury warstw asfaltowych, wilgotności podłoża nawierzchni. Za najbardziej istotną dla prognozowania zmian nośności nawierzchni asfaltowych można uznać analizę propagacji pęknięć warstw asfaltowych [245]. Obecnie badacze poprzez łączenie numerycznych metod obliczeniowych i mechaniki pękania uzyskują coraz dokładniejsze rozwiązania w zakresie propagacji spękań warstw asfaltowych nawierzchni [239, 246, 247] oraz próbek laboratoryjnych wykonanych z MMA [248, 249], co można uznać za istotny krok w rozwoju precyzyjnych metod oceny nośności nawierzchni.

2.3 Podsumowanie studium literatury

Na podstawie przeprowadzonego studium literatury ustalono, że pomimo prowadzonych już kilkadziesiąt lat prac nad poszukiwaniem i udoskonalaniem metod oceny nośności asfaltowych nawierzchni drogowych, jest to nadal aktualny i perspektywiczny temat badawczy. Zasadniczym potwierdzeniem aktualności zagadnienia jest szereg prac naukowych publikowanych przez badaczy, którzy wskazują w nich kolejne konieczne do realizacji kierunki prowadzenia dalszych prac badawczych. W praktyce, zważywszy na szereg czynników mających wpływ na nośność nawierzchni, kolejne udoskonalenia metod pomiarowych i/lub algorytmów obliczeniowych często dotyczą rozszerzenia ich złożoności. Dobrym przykładem jest tutaj metoda mechanistyczna, w której obliczenia są podzielone na kilka etapów. Następstwem wprowadzenia podziału obliczeń na etapy jest ukierunkowanie się dużej części naukowców na prowadzenie prac badawczych głównie pod kątem jednego konkretnego kroku obliczeniowego, czego efektem jest szereg opublikowanych prac naukowych podejmujących temat konkretnego elementu procedury obliczania nośności nawierzchni. Dla rozwoju metod oceny nośności nawierzchni ważne są udoskonalenia poszczególnych elementów procedur obliczeniowych, jak również ich kompleksowe ujęcie bazujące na dotychczasowym stanie wiedzy, dla którego uzyska się ulepszenie poprzez wprowadzenie pewnych innowacyjnych zmian w metodzie pomiarowej i/lub obliczeniowej, czego podjął się autor w niniejszej rozprawie doktorskiej.

3 Teza, cel i zakres pracy

Celem rozprawy jest opracowanie autorskiej metody oceny nośności doraźnej asfaltowych nawierzchni drogowych (pojęcie nośności doraźnej nawierzchni zdefiniowano w rozdziale 4), w której uwzględnia się dynamiczne obciążenia wywołane ruchem pojazdów pokonujących nierówności nawierzchni jezdni. Głównym podjętym problemem naukowym jest ocena nośności doraźnej asfaltowych nawierzchni drogowych. Oryginalne rozwiązanie problemu naukowego polega na wyznaczeniu wartości parametrów materiałowych warstw modeli nawierzchni uzyskanych z obliczeń na podstawie analizy wyników pomiarów ugięć nawierzchni, wywołanych obciążeniem dynamicznym. W pracy stawia się hipotezę, że istnieje zgodność między warunkami brzegowymi w statycznym modelu nawierzchni, a warunkami, które wymuszane są w trakcie pomiarów ugięć nawierzchni jezdni wywołanych obciążeniem dynamicznym. Do badań terenowych wykorzystano urządzenie typu FWD, które było źródłem analizowanych w pracy sygnałów, dla których przetwarzanie numeryczne przeprowadzone zostało w dziedzinie częstotliwości. W następstwie rozważań dowodzi się, że uzyskane rozwiązanie pozbawione jest wad, charakterystycznych dla realizowanej tego typu analizy w dziedzinie czasu.

Na zakres rozprawy doktorskiej składają się:

a) studium literatury krajowej i zagranicznej dotyczącej oceny nośności asfaltowych nawierzchni drogowych,

b) sformułowanie tezy, celu i zakresu pracy,

c) wprowadzenie pojęcia nośności doraźnej oraz przygotowanie założeń dla opracowanej autorskiej metody jej oceny dla asfaltowych nawierzchni drogowych,

d) omówienie opracowanych metod wyznaczania wartości parametrów modeli nawierzchni asfaltowych na przykładzie przeprowadzonych eksperymentów numerycznych procedur interpretacji wyników pomiarów wybranych metod badań asfaltowych nawierzchni drogowych przeprowadzanych w warunkach in situ,

e) weryfikacja metod wyznaczania wartości parametrów modeli nawierzchni asfaltowych na podstawie obliczeń z wykorzystaniem wyników badań nawierzchni odcinka testowego,

f) opracowanie modelu obliczeniowego nawierzchni,

g) implementacja empirycznych zależności do obliczania nośności doraźnej nawierzchni asfaltowych wyrażanej ilościowo pozostałą trwałością zmęczeniową,

h) wykonanie obliczeń opracowaną autorską metodą oceny nośności doraźnej dla modelu nawierzchni odcinka testowego,

i) analiza wyników obliczeń nośności doraźnej nawierzchni na odcinku testowym,

j) sformułowanie wniosków.

4 Wprowadzenie pojęcia nośności doraźnej nawierzchni oraz przyjęcie założeń autorskiej metody jej oceny

Obecnie, między innymi za sprawą opracowanej procedury MEPDG [204], możliwe jest już nie tylko prognozowanie czasu pozostającego do utraty nośności przez nawierzchnię, ale również prognozowanie zmian nośności w czasie jej eksploatacji. Taka możliwość ma istotne znaczenie dla systemowego zarządzania drogami [250, 251, 252], a w szczególności dla systemów uwzględniających koszty cyklu życia nawierzchni (w skrócie LCCA, z ang. *Life Cycle Cost Analysis*) [253, 254, 255]. Podstawowymi danymi wejściowymi do przeprowadzenia obliczeń są konstrukcja nawierzchni i jej istniejący stan techniczny wyrażony wartościami parametrów, których zmiany w czasie eksploatacji są prognozowane. Jakość uzyskiwanych wyników obliczeń prognostycznych jest więc zależna przede wszystkim od wyznaczonych parametrów istniejącej nawierzchni i od ustalonych zależności zmian ich wartości w czasie eksploatacji. Najbardziej wiarygodnym źródłem wyznaczania zależności zmian wartości parametrów stanu technicznego nawierzchni (np. funkcji przeniesienia i równań regresji [204]) są bazy danych zasilane wynikami badań z długotrwałych obserwacji nawierzchni (w skrócie LTPP z ang. *Long-Term Pavement Performance*). Kluczowymi elementami są parametry określające stan techniczny nawierzchni wraz z metodami ich wyznaczania. W podejściu MEPDG obliczenia dotyczące zmian stanu technicznego nawierzchni są bezpośrednio powiązane z prognozowaniem degradacji nawierzchni w czasie jej eksploatacji, spękaniami siatkowymi, głębokością kolein, poprzecznymi spękaniami termicznymi oraz równością podłużną, z pominięciem bezpośredniego prognozowania zmian nośności wyrażanej trwałością zmęczeniową. Za uzupełniające albo alternatywne można by uznać podejście, w którym nośność nawierzchni jest traktowana jako parametr, którego zmiany wartości w czasie eksploatacji są prognozowane na podstawie wyników z bazy danych. Tak obliczona nośność nie służyłaby do wyznaczania czasu pozostałego do jej utraty przez nawierzchnię, tylko byłaby podstawą do wyznaczania statystycznie jednorodnych odcinków. Tym sposobem uzyskano by jednorodny zbiór wyników obliczeń do prognozowania dalszej degradacji nawierzchni, w tym jej nośności. Podstawową korzyścią wykorzystania tak ujętej nośności w obliczeniach byłoby to, że uzyskane wyniki dotyczyłyby odcinków nawierzchni, o zbliżonych właściwościach z uwzględnieniem stopnia redukcji nośności. W takim przypadku obliczaną nośność należałoby traktować w sposób doraźny jako parametr przypisany konkretnemu stanowi technicznemu nawierzchni oraz warunkom w jakich wykonano pomiary. W odniesieniu np. do pomiarów ugięć nawierzchni jezdni, takie podejście niweluje potrzebę przeliczania modułu sztywności warstw asfaltowych do temperatury ekwiwalentnej [256]. W kontekście założeń i umownej definicji wielkości jaką jest temperatura ekwiwalentna, koncepcja wprowadzenia doraźnego stanu technicznego nawierzchni jest silnie uzasadniona. Zważywszy na różnicę w takim ujęciu nośności, w pracy wprowadzono pojęcie nośności doraźnej nawierzchni, którą należy rozumieć jako nośność nawierzchni wyrażoną trwałością zmęczeniową określoną dla konkretnych warunków, w których wykonano pomiary.

W niniejszej rozprawie doktorskiej opracowano autorską metodę oceny nośności doraźnej asfaltowych nawierzchni drogowych, dla której przyjęto konwencję stosowaną w metodach mechanistycznych, a ogólną procedurę pomiarowo-obliczeniową sprowadzono do:

a) przeprowadzenia badań asfaltowej nawierzchni drogowej uznanymi powszechnie metodami pomiarowymi w warunkach in situ,

b) wyznaczenia parametrów modelu nawierzchni opracowanymi metodami obliczeniowymi na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów w warunkach in situ,

c) obliczenia modelem stanu deformacji, odkształcenia i naprężenia jaki powstałby w nawierzchni testowanego odcinka pod wpływem jej obciążenia,

d) obliczenia nośności doraźnej nawierzchni poprzez podstawienie wyników obliczeń wykonanych z użyciem modelu do powszechnie wykorzystywanych zależności empirycznych tzw. kryteriów zmęczeniowych.

W dalszej części pracy przedstawiono poszczególne etapy opracowanej metody oceny nośności doraźnej asfaltowej nawierzchni drogowej, które zweryfikowano w oparciu o przeprowadzone eksperymenty numeryczne oraz obliczenia wykonane z wykorzystaniem wyników badań nawierzchni odcinka testowego.

5 Metody wyznaczania wartości parametrów modeli nawierzchni asfaltowych

W ocenie nośności nawierzchni drogowych metodami mechanistycznymi istotne jest to, żeby wyniki przeprowadzonych obliczeń w postaci stanów naprężenia i odkształcenia w jak największym zakresie odpowiadały wartościom, jakie powstałyby w warunkach rzeczywistych. Za szczególnie ważne należy więc uznać wyznaczenie wartości parametrów modelu obliczeniowego, których zakres poprzez przyjęte założenia dla opracowanej w pracy metody oceny nośności doraźnej nawierzchni jest związany z określeniem:

1. grubości poszczególnych warstw nawierzchni wymaganych do zdefiniowania w jej modelu wykorzystanym do obliczana wartości stanu odkształcenia i naprężenia,
2. wartości parametrów materiałowych poszczególnych warstw modelu nawierzchni i jej podłoża wykorzystanym do obliczana wartości stanu odkształcenia i naprężenia,
3. profilu nawierzchni jezdni wykorzystanym do obliczania wartości dynamicznych oddziaływań na nawierzchnię na podstawie zdefiniowanych parametrów dyskretnego modelu pojazdu.

Do wyznaczenia wartości parametrów wymaganych do zdefiniowania w modelu, zdecydowano się wykorzystać wyniki następujących pomiarów przeprowadzanych w warunkach in situ:

1. prześwietleń georadarowych w celu wyznaczenia grubości poszczególnych warstw nawierzchni,
2. pomiarów urządzeniem FWD w celu wyznaczenia wartości parametrów materiałowych poszczególnych warstw modeli nawierzchni i jej podłoża,
3. skanowanie profilu nawierzchni jezdni metodą triangulacji laserowej.

W kolejnych podpunktach niniejszego rozdziału, poprzez zaprezentowane eksperymenty numeryczne przedstawiono przyjęte procedury interpretacji wyników badań nawierzchni na potrzeby wyznaczania wartości parametrów jej modelu.

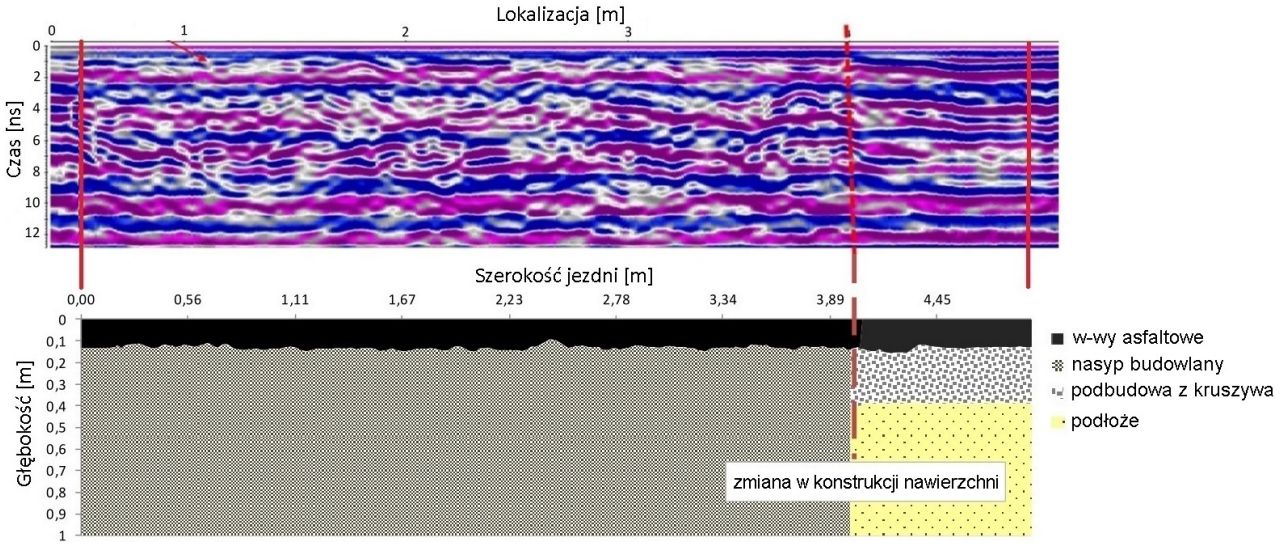
5.1 Wyznaczanie grubości warstw nawierzchni

Do wyznaczania grubości poszczególnych warstw nawierzchni można zastosować metodę prześwietleń georadarowych, w której wykorzystuje się pomiary urządzeniami GPR. Podstawą działania urządzeń GPR jest wysłanie za pośrednictwem anteny nadawczej ukierunkowanej fali elektromagnetycznej w głąb ośrodka warstwowego, jakim jest nawierzchnia, a następnie wykorzystując antenę odbiorczą, przechwycenie części sygnału odbitych od napotkanych przeszkód. Częściowe odbicie fali, następuje w chwili jej przejścia z jednego ośrodka do drugiego, których przenikalności elektryczne wyrażane stałymi dielektrycznymi różnią się. Poprzez określenie czasów pomiędzy wysłaniem fali, a chwilami odebrania jej odbitych części, wykorzystując wzór nr 11, można obliczyć grubości warstw nawierzchni [144].

$$h_i = \frac{c \cdot t_i}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_{r,i}}} \tag{11}$$

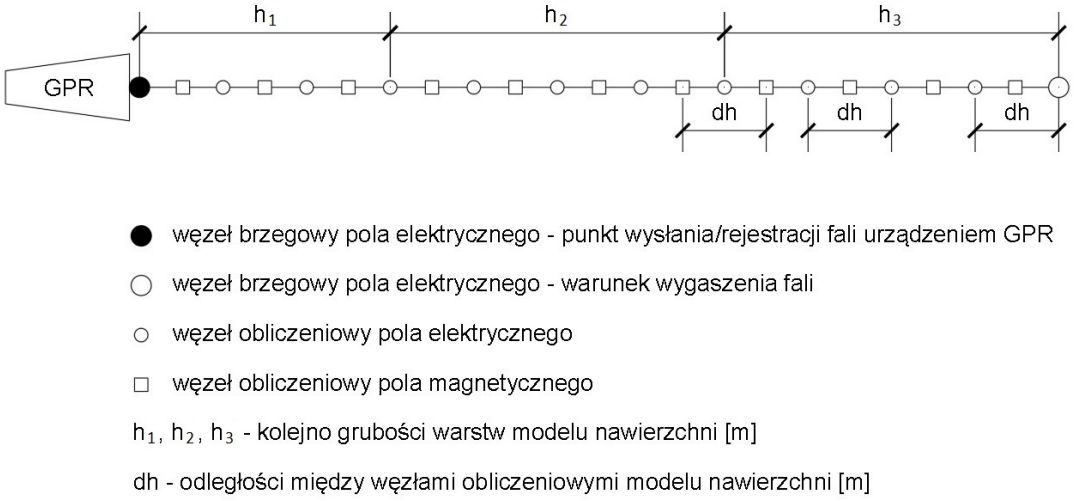
gdzie: h_i – grubość i-tej warstwy nawierzchni $[m]$, c – prędkość światła w próżni $[\frac{m}{s}]$, t_i – czas propagacji fali elektromagnetycznej przez i-tą warstwę nawierzchni (w dwóch kierunkach, to znaczy: od górnej do dolnej granicy warstwy i z powrotem) $[s]$, $\varepsilon_{r,i}$ – względna wartość stałej dielektrycznej i-tej warstwy nawierzchni [-].

Do obliczenia grubości poszczególnych warstw nawierzchni z wykorzystaniem wzoru nr 11 wymagana jest znajomość wartości względnych stałych dielektrycznych. Obecnie źródłem wartości względnych stałych dielektrycznych jest najczęściej czasochłonna analiza wyników pomiarów wykonanych urządzeniem GPR i manualnego, lokalnego określenia grubości warstw nawierzchni najczęściej na podstawie wykonanych wierceń. Na rysunku nr 11 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów urządzeniem GPR w postaci tzw. echogramu wraz z jego interpretacją i rezultatami analizy.



Rys. 11: Przykładowe wyniki pomiaru urządzeniem GPR w postaci tzw. echogramu wraz z jego interpretacją i rezultatami analizy

Opracowanie algorytmu obliczeniowego na potrzeby analizy wyników pomiarów urządzeniem GPR, którego rezultatem są wyznaczone grubości poszczególnych warstw badanej nawierzchni, było tematem wielu prac naukowych [257, 258, 259, 260]. W wymienionych pracach uzyskano błędy względne w wyznaczeniu grubości mniejsze niż 10%. Zważywszy jednak na złożoną naturę zachodzących zjawisk: odbicia, załamania, dyfrakcji, interferencji oraz dyspersji w trakcie rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w głąb konstrukcji nawierzchni drogowych, poszukiwanie uniwersalnego algorytmu obliczeniowego jest ciągle otwartym tematem badawczym. Obecnie wraz z rozwojem i coraz powszechniejszym wykorzystaniem modelowania, do analizy wyników pomiarów metodą GPR znalazła zastosowanie metoda tzw. modelowania numerycznego [261], która daje nowe możliwości obliczeniowe. W myśl idei modelowania, w dalszej części podpunktu, poprzez eksperymenty numeryczne przedstawiono algorytm jaki wykorzystano w tej pracy do obliczeń w oparciu o wyniki pomiarów metodą GPR, które zostały przeprowadzone na odcinku testowym rzeczywistej nawierzchni, w celu oznaczenia grubości jej warstw i dalej nośności doraźnej. Podstawą przeprowadzonych eksperymentów numerycznych był wyidealizowany jednowymiarowy numeryczny model badania nawierzchni metodą GPR, który bazując na pracach [262, 263] autor rozprawy zaimplementował w postaci skryptu środowiska komputerowego MATLAB (kod zamieszczony został w załączniku nr 1). Ogólny schemat numerycznego modelu badania GPR metodą profilowania refleksyjnego (pomiar jedną anteną nadawczo-odbiorczą) dla przykładowego zdefiniowanego układu trójwarstwowego, przedstawiono na rysunku nr 12.



Rys. 12: Ogólny schemat numerycznego modelu badania GPR metodą profilowania refleksyjnego dla przykładowego zdefiniowanego układu trójwarstwowego

Eksperyment numeryczny nr 1

Do obliczeń przeprowadzonych z użyciem opracowanego modelu przyjęto następujące założenia:

- symulacja metody GPR dotyczy urządzenia z antenami typu air-coupled (antena umieszczona nad powierzchnią badanej nawierzchni),
- obciążenie modelu impulsem elektromagnetycznym o kształcie odpowiadającym funkcji "Mexican hat" i częstotliwości 1 GHz,
- brak oporności elektrycznej materiałów warstw modelu (wartość oporności elektrycznej każdej warstwy modelu, sigme=0),
- brak oporności magnetycznej materiałów warstw modelu (wartość oporności magnetycznej każdej warstwy modelu, sigmm=0).

Ponadto serią przeprowadzonych obliczeń z wykorzytaniem modelu ustalono odległości między węzłami obliczeniowymi równe dh = 0,001 m. W tabeli nr 3 zestawiono wartości pozostałych parametrów warstw modelu, które przyjęto tak, aby odpowiadały w swoim zakresie losowo wybranej konstrukcji katalogowej KR5 TYP B [21].

Tab. 3: Zestawienie wartości parametrów warstw modelu na potrzeby symulacji numerycznej metody badań przy użyciu urządzenia GPR

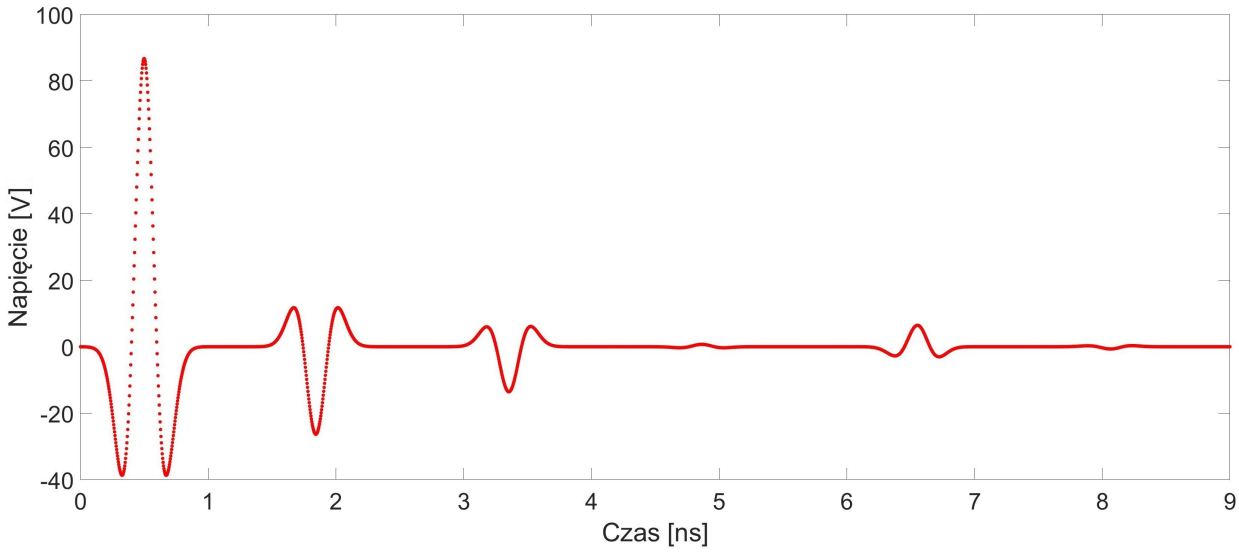
Nr warstwy	Materiał warstwy	Grubość	Względna wartość przenikalności elektrycznej*
[-]	[-]	[m]	[-]
0	powietrze	0,20	1,0
1	MMA	0,12	3,5
2	kruszywo wapienne	0,18	7,0
3	piasek suchy	inf**	5,0

* wartości parametrów przyjęte na podstawie zakresów podanych w [264, 265]
** do obliczeń przyjęto grubość warstwy równą 0,20 m, która poprzez zastosowany warunek brzegowy wygaszenia w modelu odpowiada warstwie o nieskończonej grubości

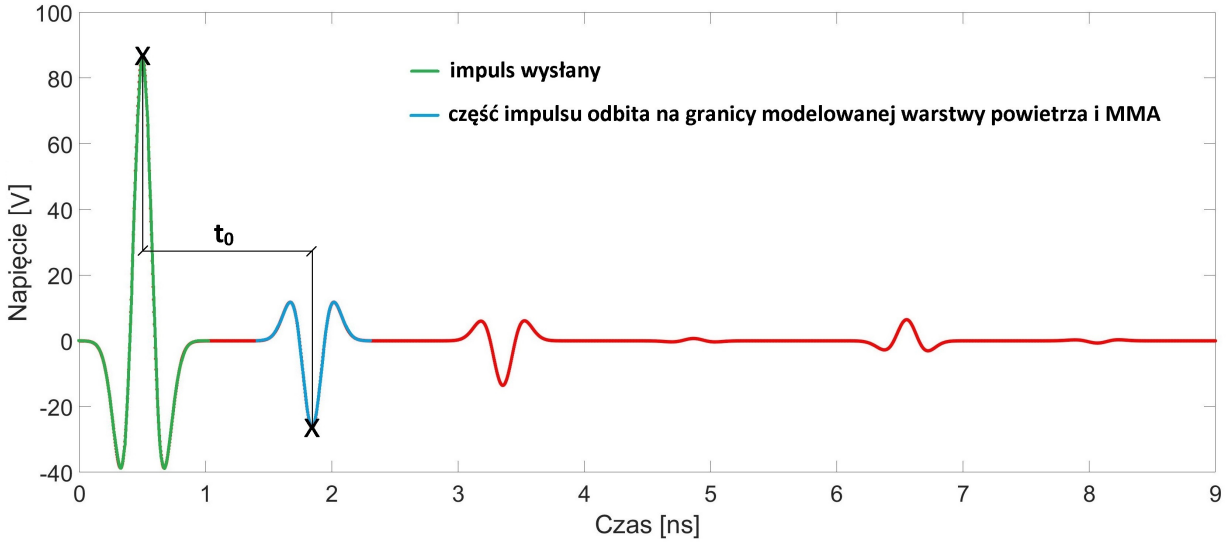
Na rysunku nr 13 przedstawiono wyniki obliczeń otrzymane dla modelu, które w swoim zakresie odpowiadają wykonanemu pojedynczemu prześwietleniu urządzeniem GPR.

Pierwszym krokiem przyjętej procedury obliczeniowej opartej na wynikach uzyskanych poprzez symulację badań metodą GPR jest "usunięcie" warstwy powietrza poprzez ustalenie pierwszej odbitej części wysłanego impulsu. W analizowanym przypadku ważne jest to, że pierwszy zapisany w czasie impuls "Mexican hat" jest impulsem wysłanym, a dopiero drugi jest odbitym na granicy modelowanych warstw powietrza i MMA.

Na rysunku nr 14 przedstawiono wyniki obliczeń z zaznaczonymi impulsami, wysłanym oraz jego częścią odbitą.



Rys. 13: Ilustracja graficzna wyników obliczeń dla modelu, które w swoim zakresie odpowiadają wykonanemu pojedynczemu prześwietleniu urządzeniem GPR, wektor wartości napięć w dziedzinie czasu obliczony dla węzła brzegowego - punktu wysłania/rejestracji fali



Rys. 14: Wyniki obliczeń dla modelu badania GPR z zaznaczonymi zarejestrowanymi impulsami, wysłanym oraz jego częścią odbitą na granicy modelowanych warstw powietrza i MMA

Na rysunku nr 14 zaznaczono znakami "x" odpowiadające sobie punkty impulsów "Mexican hat", których oznaczona odległość t_0 jest równa okresowi propagacji fali przez warstwę nr 0

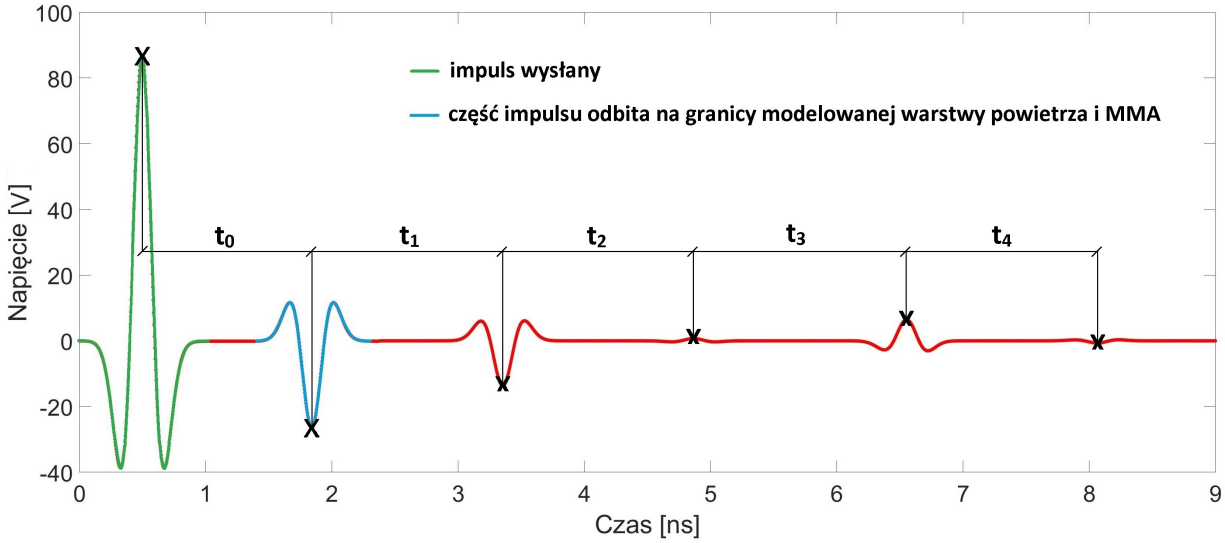
(powietrza). Poprzez podstawienie do wzoru nr 11 odczytanej wartości $t_0 \approx 1,33\ ns$, przyjęcie wartości $\varepsilon_{r,0} = 1$ oraz $c = 299792458\ \frac{m}{s}$, obliczono grubość modelowanej warstwy powietrza, która w przypadku wyników pomiarów realizowanych in situ, odpowiadałaby wysokości anteny GPR nad powierzchnią badanej nawierzchni:

$$h_0 = \frac{299792458 \cdot 1,33}{2 \cdot \sqrt{1}} \approx 0,20\ m$$

Pamiętając, że warunki symulacji pomiaru metodą GPR przyjęte zostały a‘priori, do kompletu danych o wyidealizowanym modelu, brakuje tylko stałych dielektrycznych. W przeciwieństwie do warstwy powietrza, której wartość stałej dielektrycznej w każdych warunkach jest zbliżona do 1,0, w przypadku modelowania materiałów warstw nawierzchni, przyjętej wartości na podstawie zakresów podawanych w literaturze może generować istotne błędy, co między innymi zostało potwierdzone w pracy [265]. Do obliczenia stałych dielektrycznych przekształcono wzór nr 11 do postaci wyrażonej wzorem nr 12.

$$\varepsilon_{r,i} = (\frac{c \cdot t_i}{2 \cdot h_i})^2 \tag{12}$$

Ten etap wymagał ustalenia lokalizacji w czasie pozostałych impulsów "Mexican hat" odbitych na granicach warstw. Na rysunku nr 15 zaznaczono wszystkie wartości szczytowe zidentyfikowanych impulsów "Mexican hat".



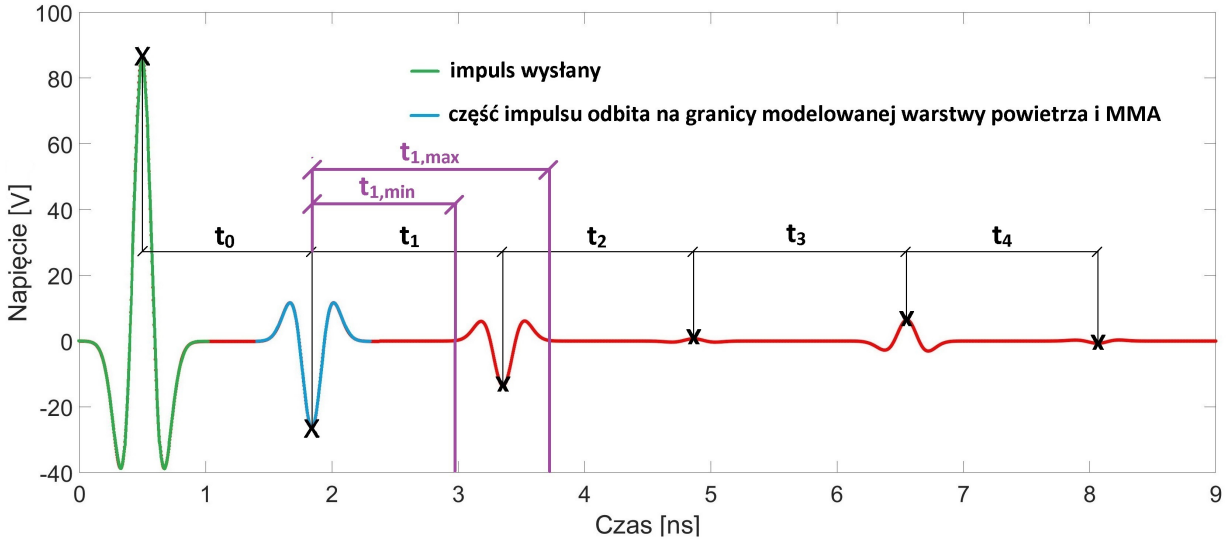
Rys. 15: Ilustracja graficzna wyników obliczeń dla wyidealizowanego modelu badania metodą GPR z zaznaczonymi wartościami szczytowymi sygnału "Mexican hat"

Obliczenie stałej dielektrycznej warstwy przy użyciu wzoru nr 12 wymaga podstawienia grubości i czasu propagacji fali przez warstwę. Dla analizowanych wyników symulacji pomiaru metodą GPR zidentyfikowano pięć wartości czasów propagacji fal t_i (rysunek nr 15), wiedząc, że źródłem jest model o zdefiniowanych trzech warstwach o skończonej grubości. Z pierwszego kroku obliczeniowego wiadomo, że wartość t_0 odpowiada okresowi

propagacji fali przez modelowaną warstwę powietrza, stąd zadanie obliczeniowe upraszcza się do wyboru spośród czterech wartości t_1, t_2, t_3, t_4, dwóch odpowiadających warstwom o grubościach kolejno $h_1 = 0,12\ m$, $h_2 = 0,18\ m$. Mając na celu ograniczenie przypadkowości przy identyfikacji impulsu, który stanowi faktyczne odbicie, w przyjętej procedurze założono obliczenie granicznych czasów propagacji fal przez kolejne warstwy. Jest to możliwe poprzez zastosowanie wzoru nr 13, który jest kolejną postacią przekształconego wzoru nr 11.

$$t_i = \frac{h_i \cdot 2 \cdot \sqrt{\varepsilon_{r,i}}}{c} \tag{13}$$

Należy zaznaczyć, że wykorzystanie wzoru nr 13 wymusza zastosowanie iteracyjnej formuły obliczeniowej. Pierwsza iteracja dotyczyła obliczenia minimalnego i maksymalnego czasu propagacji fali przez modelowaną warstwę MMA. Do obliczenia wartości granicznych przyjęto na podstawie literatury kolejno $\varepsilon_{r,1\,min} = 2$ i $\varepsilon_{r,1\,max} = 5$ [264, 265]. Obliczone wartości graniczne $t_{1,min} \approx 1,13\ ns$ i $t_{1,max} \approx 1,79\ ns$, zaznaczono na wykresie przedstawionym na rysunku nr 16.

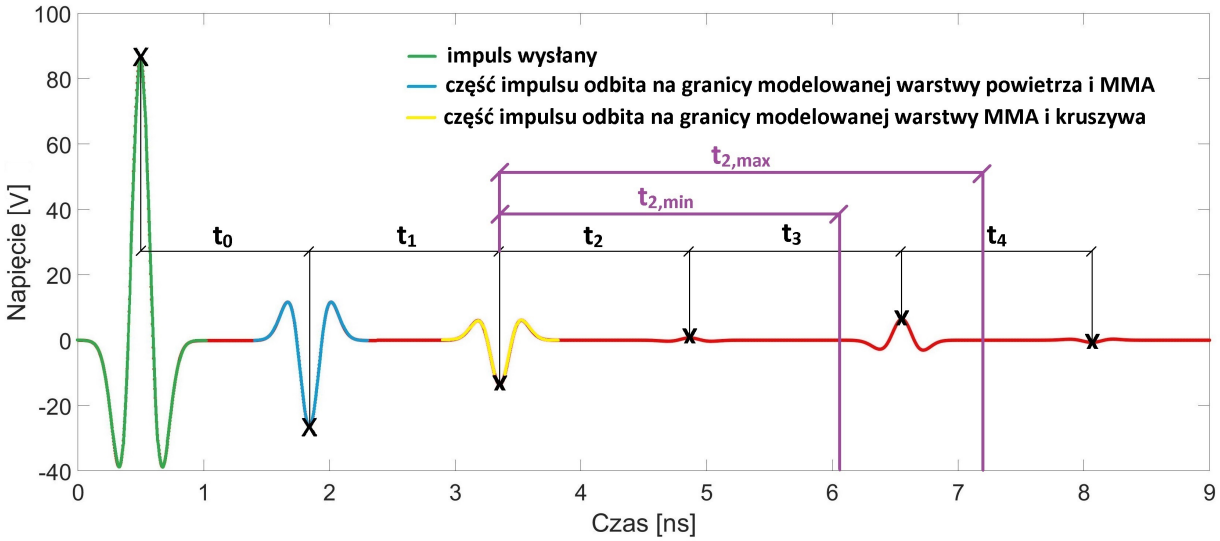


Rys. 16: Ilustracja graficzna wyników obliczeń dla wyidealizowanego modelu badania metodą GPR z zaznaczonymi granicznymi wartościami $t_{1,min}$ i $t_{1,max}$ czasów propagacji fali przez warstwę MMA

Na podstawie wyznaczonego zakresu $t_{1,min}$ i $t_{1,max}$ ustalono, że czas propagacji fali przez warstwę MMA o grubości 0,12 m jest równy $t_1 = 1,51\ ns$. Podstawiając do wzoru nr 12 ustalone wartości zmiennych obliczono względną wartość stałej dielektrycznej warstwy MMA równą 3,56. Należy zauważyć, że zgodnie z oczekiwaniami, jest to wartość zbliżona do wartości $\varepsilon_{r,1} = 3,5$ przypisanej w modelu.

Kolejną iterację obliczeniową przeprowadzono w analogiczny sposób wyznaczając względną wartość stałej dielektrycznej kolejnej warstwy modelu, odpowiadającej warstwie z kruszywa

wapiennego o grubości 0,18 m. Graniczne czasy propagacji fali $t_{2,min} = 2,69\ ns$ i $t_{2,max} = 3,80\ ns$ obliczono odpowiednio dla $\varepsilon_{r,1\,min} = 5$ i $\varepsilon_{r,1\,max} = 10$, które przyjęto biorąc pod uwagę zakresy podawane w literarurze [264, 265]. Obliczone, graniczne wartości pokazane są na rysunku nr 17.



Rys. 17: Ilustracja graficzna wyników obliczeń dla wyidealizowanego modelu badania metodą GPR z zaznaczonymi granicznymi wartościami $t_{2,min}$ i $t_{2,max}$ czasów propagacji fali przez warstwę kruszywa

Wyznaczony zakres $t_{2,min}$ i $t_{2,max}$ był podstawą do identyfikacji części impulsu odbitego na granicy modelowanych warstw kruszywa i podłoża, którego czas propagacji przez warstwę wynosi $t_2 + t_3$. Warto zauważyć, że algorytm ignoruje impuls zlokalizowany w czasie równym t_2, co oznacza, że nie każde zarejestrowane odbicie można docelowo wykorzystać do wyznaczenia grubości warstw. Źródłem impulsu, dla którego czas propagacji wynosi t_2, są wielokrotne odbicia od granic dwóch pierwszych warstw (powietrza i MMA). Przyjęcie czasu propagacji t_2 do obliczeń wiązałoby się z błędnie wyznaczoną wartością stałej dielektrycznej. Tym samym potwierdzono słuszność obliczenia granicznych czasów propagacji fal elektromagnetycznych. Przyjmując za czas propagacji $t_2 + t_3 = 3,20\ ns$ i grubość warstwy kruszywa 0,18 m, obliczono (wykorzystując wzór nr 12) wartość stałej dielektrycznej warstwy kruszywa równą 7,10, bliską zdefiniowanej w modelu ($\varepsilon_{r,2} = 7,0$).

W rezultacie zastosowania przedstawionej procedury udało się wyznaczyć wartości względnych stałych dielektrycznych poszczególnych warstw modelu. Mając na celu ocenę dokładności obliczonych wartości parametrów $\varepsilon_{r,i}$, w dalszej kolejności, wykorzystując wzór nr 11, obliczono grubości poszczególnych warstw modelu, które zestawiono w tabeli nr 4.

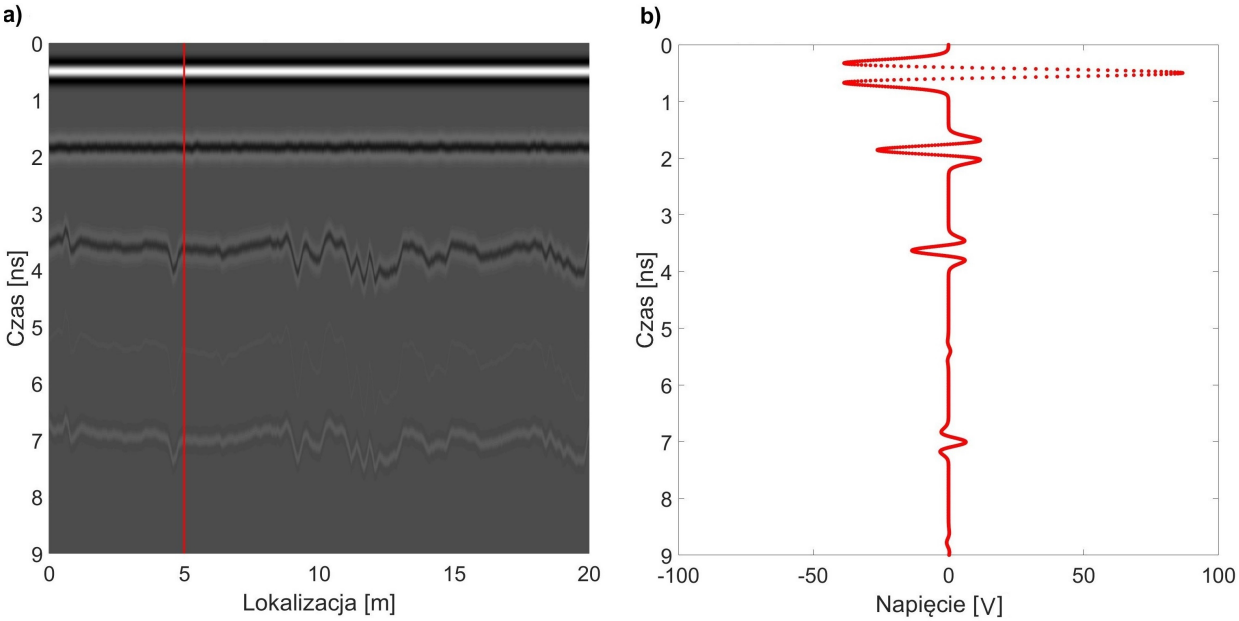
W przypadku danych zestawionych w tabeli nr 4 istotne jest to, że różnice wartości $\varepsilon_{r,i}$ między wartościami przyjętymi dla modelu i obliczonymi, nie mają wpływu na obliczone grubości warstw, zważywszy na założoną tolerancję wyznaczenia grubości do 1 cm.

Tab. 4: Zestawienie wyznaczonych i obliczonych wartości parametrów warstw modelu

Nr warstwy	Materiał warstwy	Wyznaczona wartość t_i	Obliczona wartość $\varepsilon_{r,i}$	Obliczona grubość warstwy h_i
[-]	[-]	[ns]	[-]	[m]
1	MMA	1,51	3,56	0,12
2	kruszywo wapienne	3,20	7,10	0,18

Eksperyment numeryczny nr 2

W praktyce najczęściej analiza wyników pomiarów metodą GPR prowadzona jest dla echogramu będącego przedstawieniem rezultatów co najmniej kilkunastu pojedynczych prześwietleń wykonanych wzdłuż lub w poprzek badanej nawierzchni. W dalszej części podpunktu zaprezentowano zastosowanie opisanej procedury w odniesieniu do bazy wyników wygenerowanych dla szerszego spektrum symulacji metody GPR. Zakres tego spektrum przedstawiono na rysunku nr 18a).



Rys. 18: Wyniki obliczeń przedstawione w postaci: a) echogramu, b) wizualizacji pojedynczego impulsu wygenerowanego w odległości 5 metrów od miejsca, w którym echogram ma swój początek

Przedstawiony na rysunku nr 18a) echogram składa się z wyników obliczeń dla 2000 modeli nawierzchni, które uzyskano z przeprowadzonej symulacji pomiaru metodą GPR. Losowo wybrany wynik obliczeń zaznaczony czerwoną linią na echogramie, przedstawiono na rysunku 18b. Dla wszystkich 2000 modeli obliczeniowych, przyjęto założenia takie same jak w eksperymencie numerycznym nr 1, a mianowicie:

- symulacja metody GPR dotyczy urządzenia z antenami typu air-coupled (antena umieszczona nad powierzchnią badanej nawierzchni),
- obciążenie modelu impulsem elektromagnetycznym o kształcie odpowiadającym funkcji "Mexican hat" i częstotliwości 1 GHz,
- brak oporności elektrycznej materiałów warstw modelu (wartość oporności elektrycznej każdej warstwy modelu, sigme=0),
- brak oporności magnetycznej materiałów warstw modelu (wartość oporności magnetycznej każdej warstwy modelu, sigmm=0),
- odległości między węzłami obliczeniowymi dh = 0,001 m.

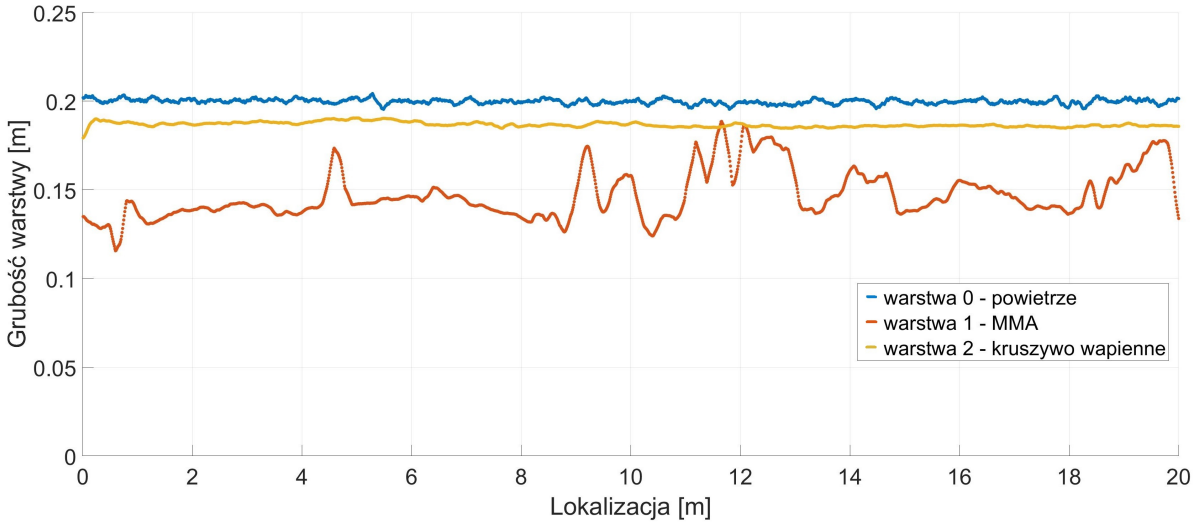
Dla wszystkich modeli przyjęto takie same wartości parametrów modelowanych warstw nawierzchni, które zestawiono w tabeli nr 5.

Tab. 5: Zestawienie wartości parametrów warstw modeli obliczeniowych

Nr warstwy	Materiał	Względna wartość przenikalności elektrycznej*
[-]	[-]	[-]
0	powietrze	1,0
1	MMA	3,5
2	kruszywo wapienne	7,0
3	piasek suchy	5,0

* przyjęte na podstawie zakresów podanych w [264, 265]

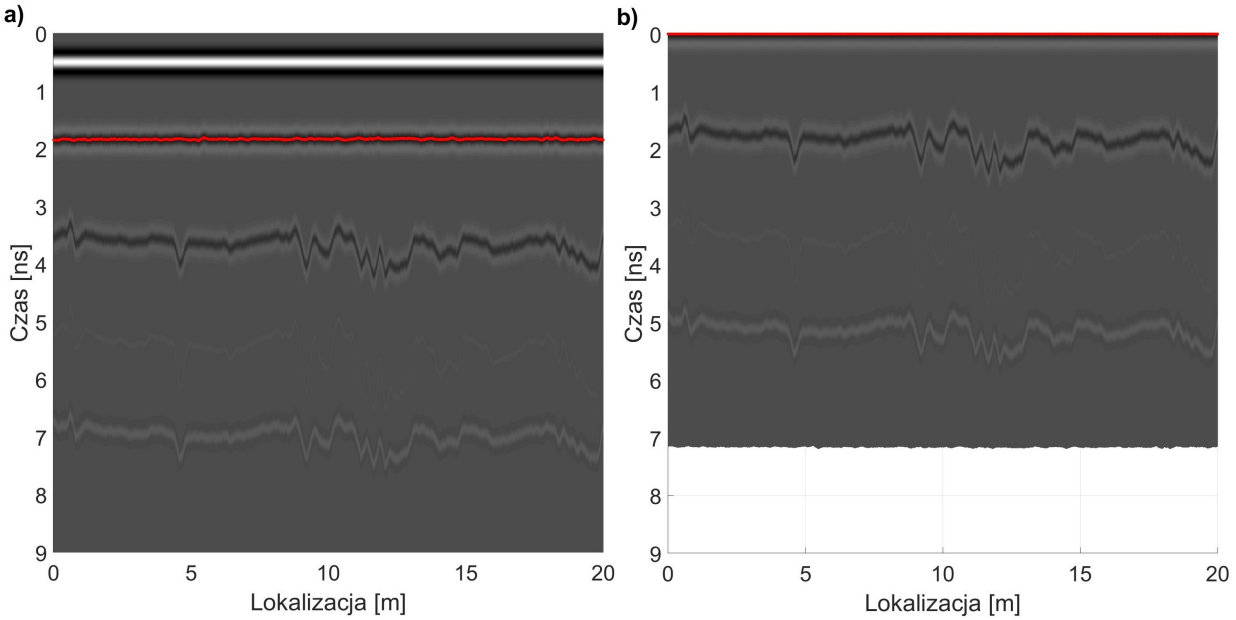
Grubości warstw modeli uzależniono od lokalizacji, co przestawiono na rysunku nr 19.



Rys. 19: Wykres grubości warstw modeli obliczeniowych

Dla wszystkich modeli przyjęto grubość ostatniej warstwy (nr 4 - piasek suchy) równą 0,20 m, która poprzez zastosowany warunek brzegowy wygaszenia odpowiada warstwie o nieskończonej grubości.

Obliczenie grubości warstw, analogicznie jak w poprzednim eksperymencie numerycznym, rozpoczęto od "usunięcia" warstwy powietrza. Na rysunku nr 20a) przedstawiono echogram z zaznaczonymi ustalonymi lokalizacjami sygnałów odbitych od granicy warstw 0 i 1 (powietrza i MMA), a na rysunku nr 20b) echogram, dla którego "usunięto" warstwę powietrza.



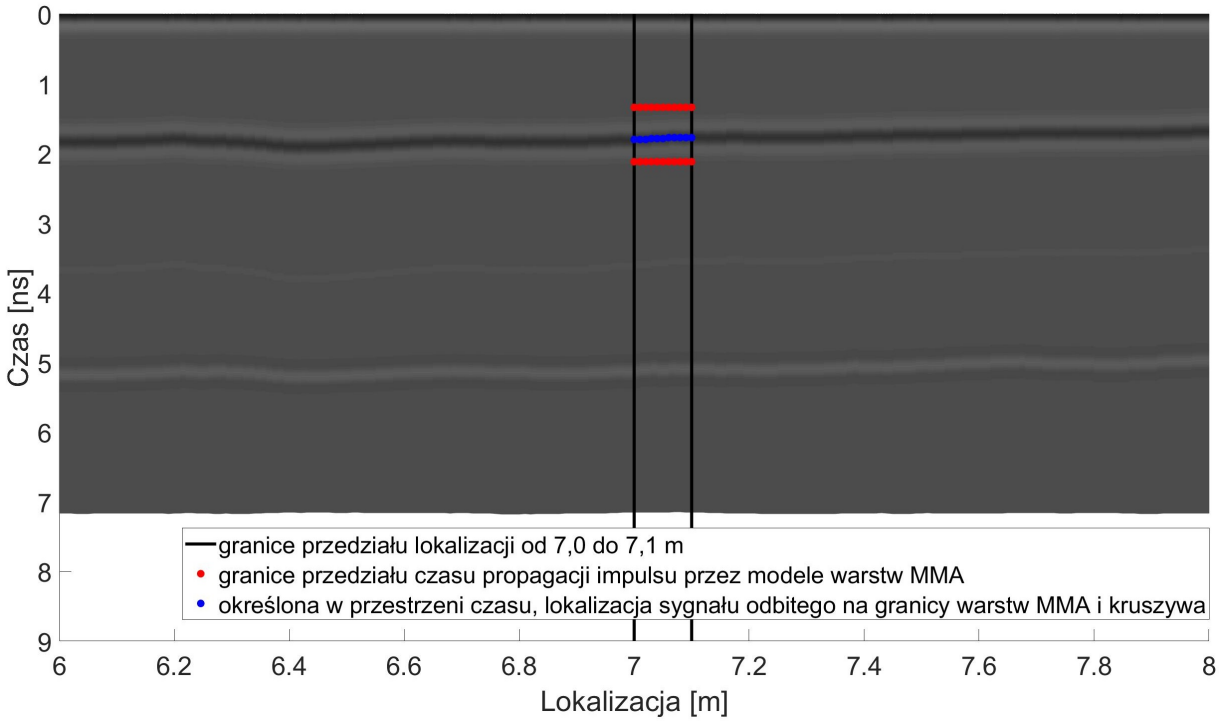
Rys. 20: Echogramy z zaznaczonymi lokalizacjami sygnałów odbitych od granicy warstwy nr 0 i 1: a) bez "usuniętej" warstwy powietrza, b) z "usuniętą" warstwą powietrza

W eksperymencie obliczeniowym przyjęto, że znane są liczba i materiały warstw, a lokalne rozpoznanie grubości, sprowadzono do obliczenia średnich grubości warstw modeli odpowiadających lokalizacjom od 7,00 m do 7,10 m. Grubości warstw modeli oraz obliczone średnie wartości zawarto w tabeli nr 6.

Po obliczeniu średnich grubości, rozpoczęto iteracyjną formułę wyznaczenia wartości stałych dielektrycznych kolejnych warstw modeli. Podstawiając do wzoru nr 11, obliczoną średnią grubość modeli warstw MMA, a następnie kolejno przyjęte graniczne wartości stałych dielektrycznych $\varepsilon_{r,1\,min} = 2$ i $\varepsilon_{r,1\,max} = 5$, obliczono minimalny $t_{1,min} \approx 1,34\,ns$ i maksymalny $t_{1,max} \approx 2,12\,ns$ czas propagacji fali przez warstwę nr 1. Na rysunku nr 21 zaznaczono na echogramie obliczone graniczne czasy propagacji fali dla wybranych lokalizacji.

Tab. 6: Grubości warstw modeli odpowiadających lokalizacjom od 7,00 m do 7,10 m

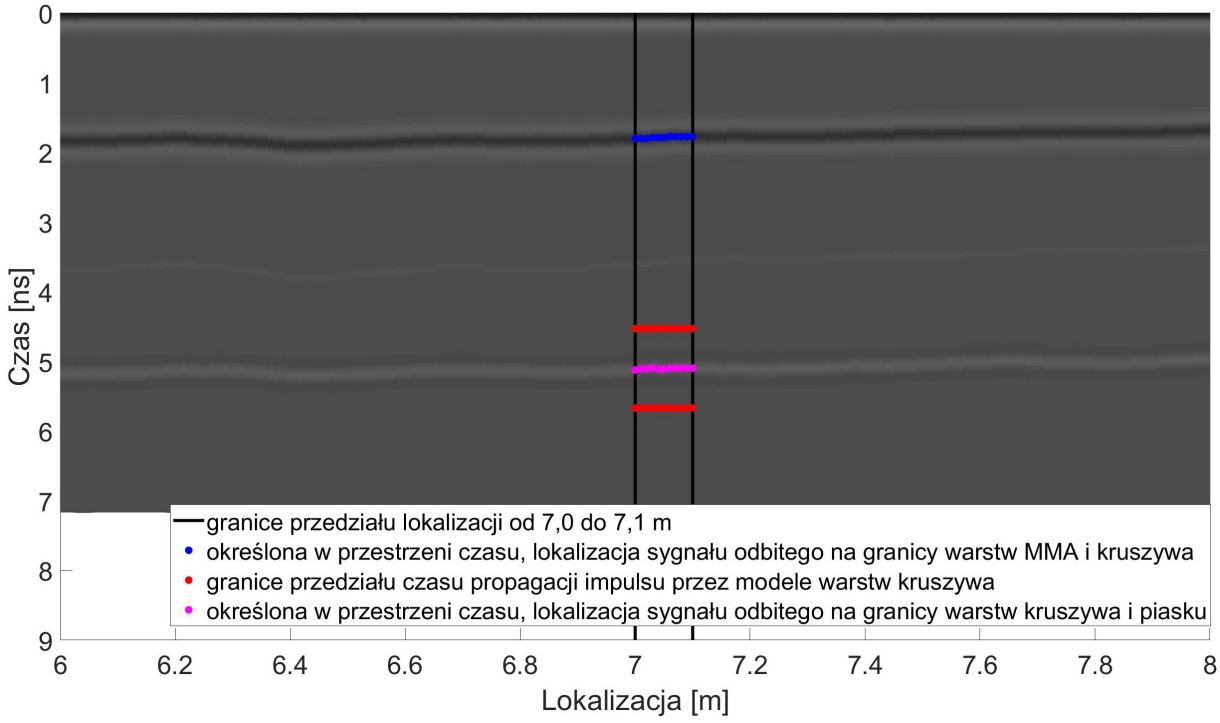
Lokalizacja modelu	Grubość warstwy		
	MMA	kruszywo	piasek
[m]	[m]		
7,00	0,144	0,187	
7,01	0,144	0,187	
7,02	0,143	0,187	
7,03	0,143	0,187	
7,04	0,142	0,187	
7,05	0,142	0,187	∞
7,06	0,142	0,187	
7,07	0,142	0,187	
7,08	0,142	0,187	
7,09	0,142	0,187	
7,10	0,141	0,188	
Średnia	0,142	0,187	∞



Rys. 21: Echogram z zaznaczonymi granicznymi czasami propagacji impulsów przez modele warstw MMA oraz określonymi w przestrzeni czasu, lokalizacjami sygnału odbitego na granicy warstw MMA i kruszywa

Dla czasów impulsów odbitych na granicy warstw MMA i kruszywa (w zakresie analizowanych lokalizacji) obliczono średnią wartość czasu propagacji impulsu przez warstwę MMA $t_1 \approx 1,79\ ns$. Kolejno podstawiając do wzoru nr 12, średnią grubość i wartość czasu propagacji impulsu przez warstwę MMA, obliczono wartość jej stałej dielektrycznej $\varepsilon_{r,1} = 3,57$.

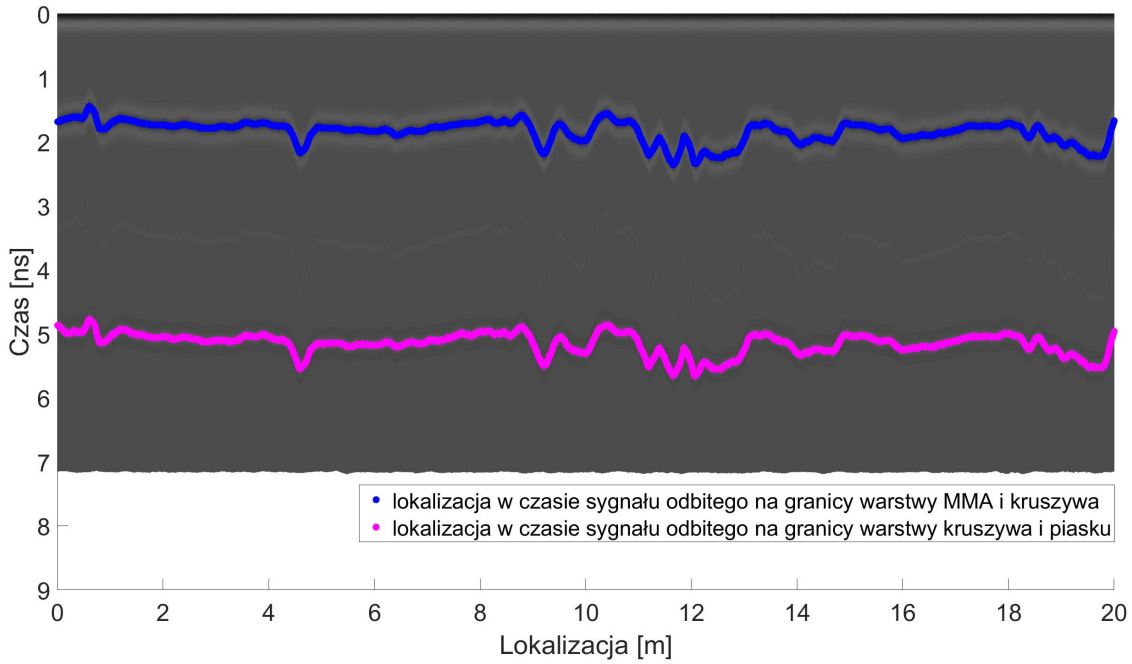
Iteracyjną procedurę powtórzono w celu uzyskania wartości stałej dielektrycznej warstwy nr 2 (kruszywa wapiennego). Na rysunku nr 22 zaznaczono obliczone graniczne czasy propagacji impulsu przez warstwę nr 2 dla lokalizacji od 7,0 do 7,1 m ($t_{2,min} \approx 2,74\ ns$, $t_{2,max} \approx 3,88\ ns$ obliczone dla przyjętych $\varepsilon_{r,2\,min} = 5$, $\varepsilon_{r,2\,max} = 10$ i średniej grubości warstwy 0,187 m) oraz ustalono lokalizacje impulsów odbitych na granicy warstw kruszywa i piasku.



Rys. 22: Echogram z zaznaczonymi granicznymi czasami propagacji impulsów przez modele warstw kruszywa oraz określonymi w przestrzeni czasu, lokalizacjami sygnału odbitego na granicy warstw kruszywa i piasku

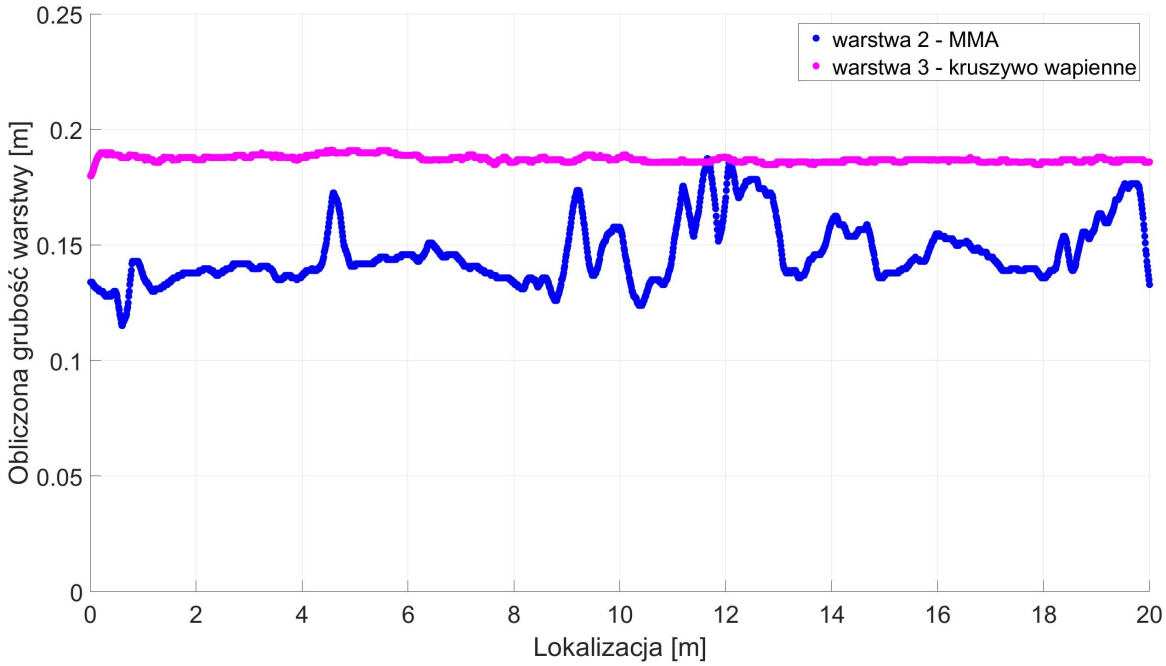
Podstawiając obliczony średni czas propagacji impulsów przez warstwę kruszywa $t_2 \approx 3,31\ ns$ oraz jej średnią grubość $h_2 = 0,187\ m$ do wzoru nr 12, obliczono wartość stałej dielektrycznej warstwy $\varepsilon_{r,2} = 7,03$.

W kolejnym kroku obliczone wartości stałych dielektrycznych warstw modeli, wykorzystano do wyznaczenia lokalizacji impulsów odbitych na granicach warstw na całej długości echogramu, co przedstawiono na rysunku 23.



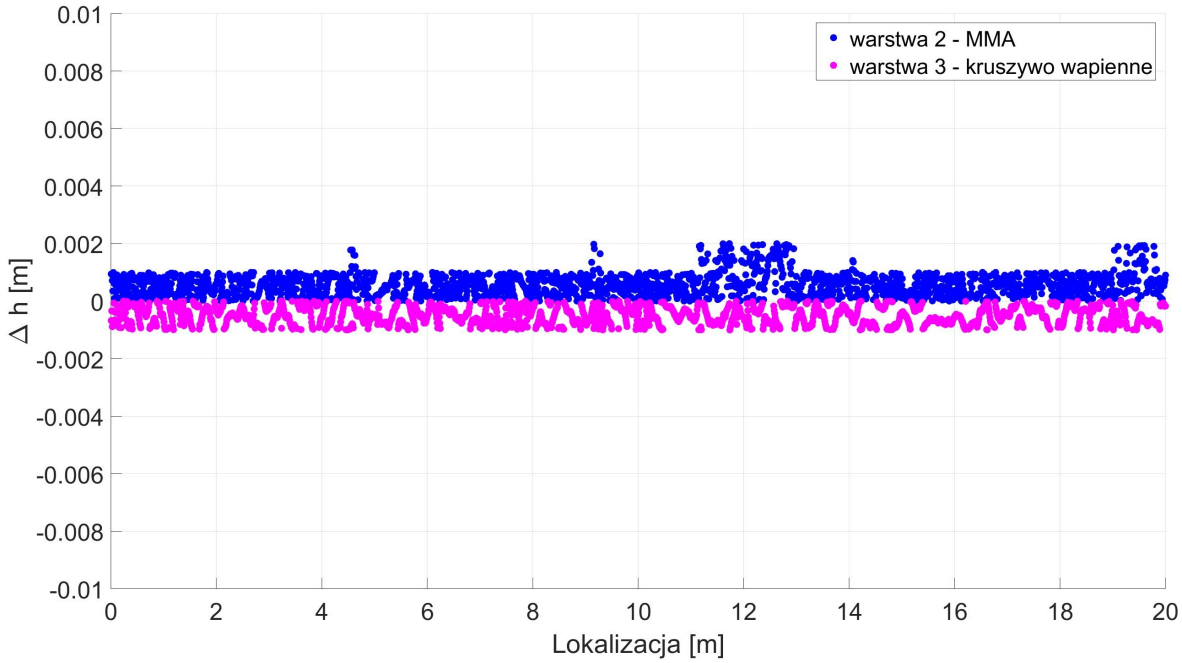
Rys. 23: Wyznaczone pokazane na tle echogramu lokalizacje impulsów odbitych na granicach warstw

Dalej podstawiając do wzoru nr 11, wartości stałych dielektrycznych oraz wyznaczone czasy propagacji impulsów, obliczono grubości, które przedstawiono na rysunku nr 24.



Rys. 24: Wykres obliczonych grubości warstw

Mając na celu ocenę dokładności uzyskanych wyników eksperymentu numerycznego, obliczono bezwzględne różnice przyjętych i obliczonych grubości warstw modeli $\triangle$h. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku nr 25.



Rys. 25: Wykres różnic grubości warstw modeli przyjętych i obliczonych przyjętą procedurą

Dla wszystkich wyników przeprowadzonego eksperymentu numerycznego obliczone różnice przyjętych i obliczonych grubości warstw są mniejsze niż 5 mm, czym potwierdzono skuteczność działania opracowanego algorytmu obliczeniowego.

5.2 Wyznaczanie wartości parametrów materiałowych warstw modeli nawierzchni

Kierując się potrzebą poszerzenia dostępnej wiedzy o modelowaniu właściwości materiałów stosowanych do budowy warstw nawierzchni, autor rozprawy opracował procedurę obliczeniową, opartą na wynikach uzyskanych z pomiarów urządzeniem typu FWD. Źródłem inspiracji dla opracowanej procedury były prace [170, 171], w których do obliczeń zastosowano teorię sygnałów [266, 267, 268]. W przytoczonych pracach, zarejestrowane w czasie pomiaru urządzeniem FWD funkcje siły i przemieszczeń są traktowane jako sygnały, które są poddawane transformacji Fouriera dla uzyskania spektrum funkcji harmonicznych w dziedzinie częstotliwości. W oparciu o uzyskane wartości można zbudować krzywą, nazywana w pracach [269, 270] quasi-statyczną krzywą ugięć. W przeciwieństwie do klasycznej krzywej ugięć (patrz punkt 2.1.2), otrzymana krzywa, zbudowana jest na wartościach pozbawionych efektów dynamicznych, które są nieodłączną cechą pomiarów realizowanych urządzeniami FWD. Proponowany algorytm realizujący obliczenia odwrotne do wyznaczania wartości parametrów materiałowych warstw modeli

nawierzchni pozwala na połączenie statycznego modelu i quasi-statycznej krzywej ugięć, zapewniając jednocześnie zgodność warunków brzegowych, między dynamicznym charakterem badań FWD, a statyczną definicją obciążenia w modelu sprężystym nawierzchni, wykorzystanym w obliczeniach na potrzeby niniejszej pracy. W przypadku wykorzystania klasycznej krzywej ugięć, powszechnie stosowanej w tym obszarze badawczym, brak zgodności warunków brzegowych łagodzi się poprzez założenie uproszczenia modelu. Na potrzebę oceny nośności doraźnej nawierzchni asfaltowych, autor rozprawy doktorskiej rozszerzył zakres wykorzystywanych wartości obliczanych transformacją Fouriera z wyników pomiarów urządzeniem FWD, na podstawie których można wyznaczyć wartości zbioru parametrów dynamicznych modeli materiałowych warstw nawierzchni. W dalszej części zostały przedstawione krok po kroku rozważania, których rezultatem jest zbiór wspomnianych parametrów.

Podstawę opracowanej metody stanowi wykorzystanie w obliczeniach transformaty Fouriera autorstwa francuskiego matematyka Jean Baptiste Joseph Fourier'a, którą wyrażono wzorem nr 14.

$$Y(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} y(x) e^{-2\pi i \cdot x \cdot \xi} dx \tag{14}$$

gdzie: $Y(\xi)$ – transformata Fouriera funkcji $y(x)$, ξ – argument transformaty, x – argument funkcji, i – jednostka urojona ($i^2 = -1$).

W praktyce transformatę Fouriera wykorzystuje się do obliczeń dla sygnałów dyskretnych, gdzie całkę zastępuje się sumą, znaną z literatury jako szybka transformata Fouriera (z ang. Fast Fourier Transform, FFT), którą wyraża się wzorem nr 15.

$$Y_k = \sum_{n=0}^{N-1} y_n \cdot e^{-\frac{2\pi i}{N} \cdot n \cdot k}, \quad k = 0, 1, .., N-1 \tag{15}$$

gdzie: Y_k – k-ta próbka dyskretnej transformaty Fouriera, y_n – n-ta próbka sygnału, N – liczba próbek sygnału, i – jednostka urojona.

Wynikiem obliczeń przy wykorzystaniu wzoru nr 15 dla sygnału dyskretnego, określonego w dziedzinie czasu jest dyskretna transformata Fouriera w postaci ciągu liczb zespolonych (wzór nr 16), którego elementy przyporządkowane są odpowiednim częstotliwościom. Poprzez obliczenie modułu z liczby zespolonej (wzór nr 17) i logarytmu naturalnego z części urojonej (wzór nr 18) uzyskuje się odpowiednio ciągi wartości amplitud oraz faz początkowych (przesunięcia składowych harmonicznych w fazie względem początku układu współrzędnych) składowych harmonicznych wejściowego sygnału dyskretnego.

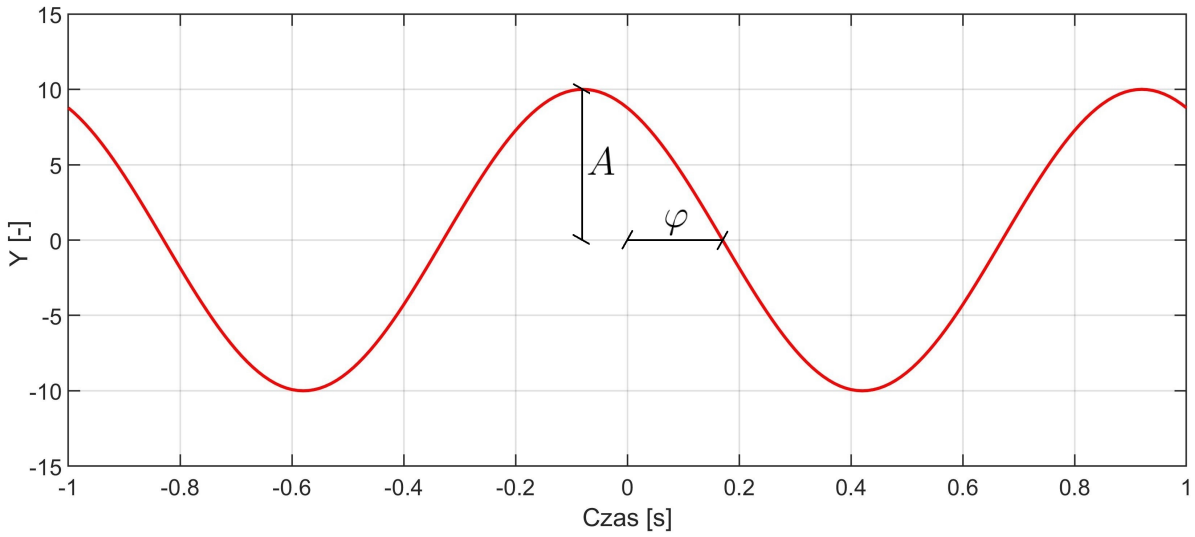
$$Y_k = y_{1k} + y_{2k} i \tag{16}$$

$$abs(Y_k) = \sqrt{y_{1k}^2 + y_{2k}^2} = A_k \tag{17}$$

$$im(ln(F_k)) = \varphi_k \tag{18}$$

gdzie: A_k i φ_k – odpowiednio amplituda [-] i faza początkowa $[rad]$ k-ej składowej harmonicznej dyskretnego sygnału wejściowego [268].

Na rysunku nr 26 przedstawiono przykładową funkcję harmoniczną o częstotliwości 1 Hz z zaznaczeniem jej amplitudy i fazy początkowej.



Rys. 26: Wykres funkcji harmonicznej z zaznaczeniem jej amplitudy A i fazy początkowej φ

Mając na celu przedstawienie działania transformaty Fouriera, przeprowadzono obliczenia z wykorzystaniem opracowanego przez autora skryptu w środowisku komputerowym MATLAB (kod skryptu zamieszczono w załączniku nr 2) dla funkcji harmonicznej o przebiegu cosinusoidalnym, opisanej dyskretnym sygnałem zależnym od czasu, który wyrażono wzorem nr 19.

$$Y_k = a \cdot cos(2\pi \cdot X_k \cdot fre + \varphi) \tag{19}$$

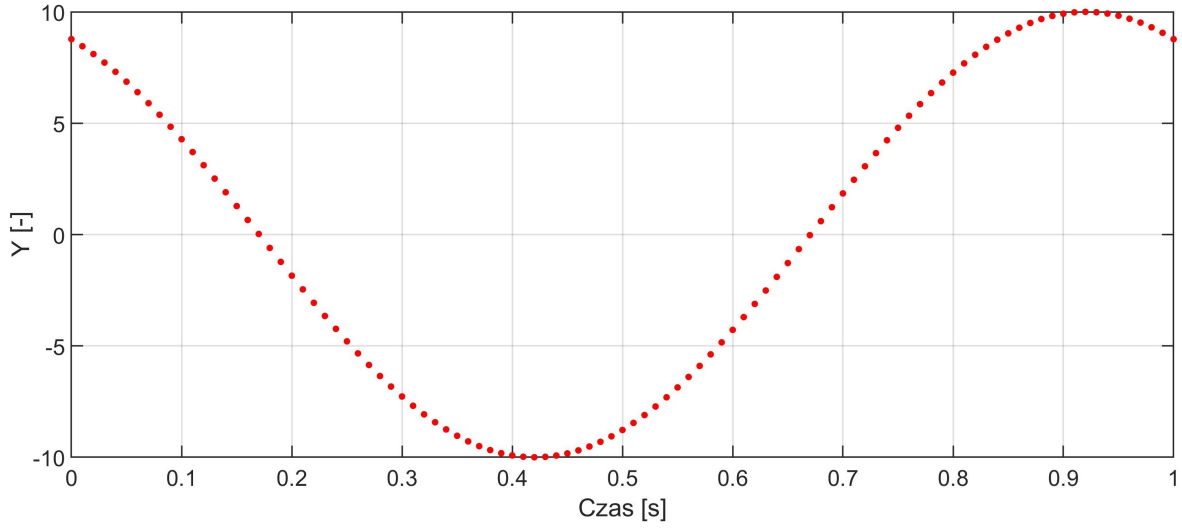
gdzie: Y_k – k-ta próbka sygnału [-], X_k – k-ty argument sygnału $[s]$, fre – częstotliwość funkcji harmonicznej $[Hz]$, a – amplituda funkcji harmonicznej [-], φ – faza początkowa funkcji harmonicznej $[rad]$.

Obliczenie FFT przeprowadzono dla dyskretnego sygnału wyrażonego wzorem nr 19 przyjmując następujące wartości parametrów:

- czas próbkowania $T = 1\ s$,
- częstotliwość próbkowania $f_s = 100\ Hz$,
- częstotliwość funkcji harmonicznej $fre = 1\ Hz$,
- amplituda funkcji harmonicznej $a = 10$,

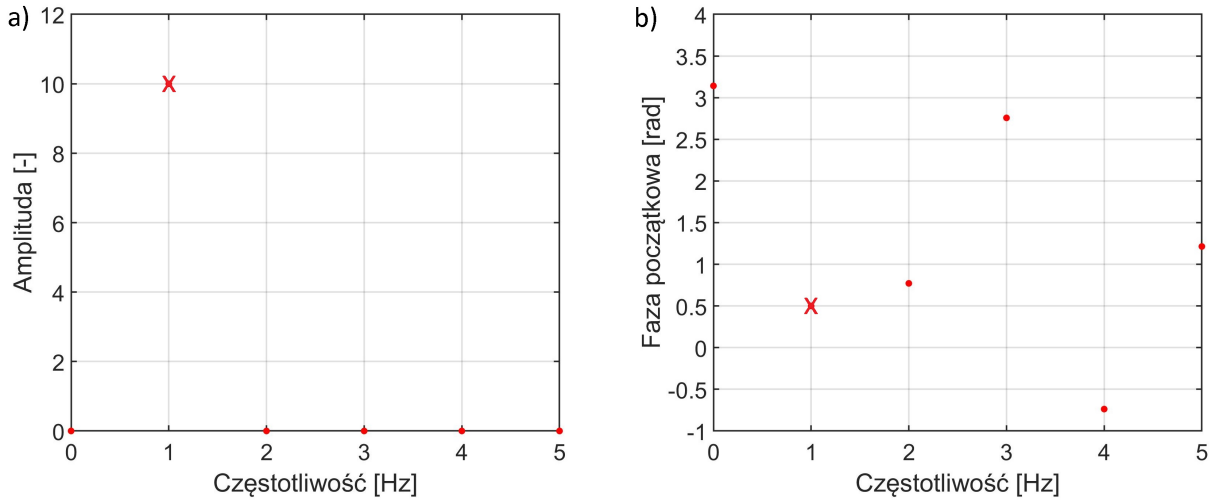
- faza początkowa funkcji harmonicznej $\varphi = 0,5\,rad$.

Na rysunku nr 27 przedstawiony jest wykres przedmiotowego sygnału w postaci dyskretnej.



Rys. 27: Wykres dyskretnego sygnału o przebiegu cosinusoidalnym

Wyniki obliczeń FFT dla sygnału pokazanego na rysunku nr 27 przedstawiono na rysunku nr 28.



Rys. 28: Ilustracja graficzna wyników obliczeń FFT: a) amplitudy, b) fazy początkowe dla dyskretnego sygnału o przebiegu cosinusoidalnym

Na wykresach przedstawionych na rysunku nr 28 zaznaczono znakiem "x" wartość amplitudy i fazy początkowej dla częstotliwości 1 Hz, a więc częstotliwości funkcji harmonicznej sygnału poddanego obliczeniom FFT. Obliczone dla częstotliwości 1 Hz

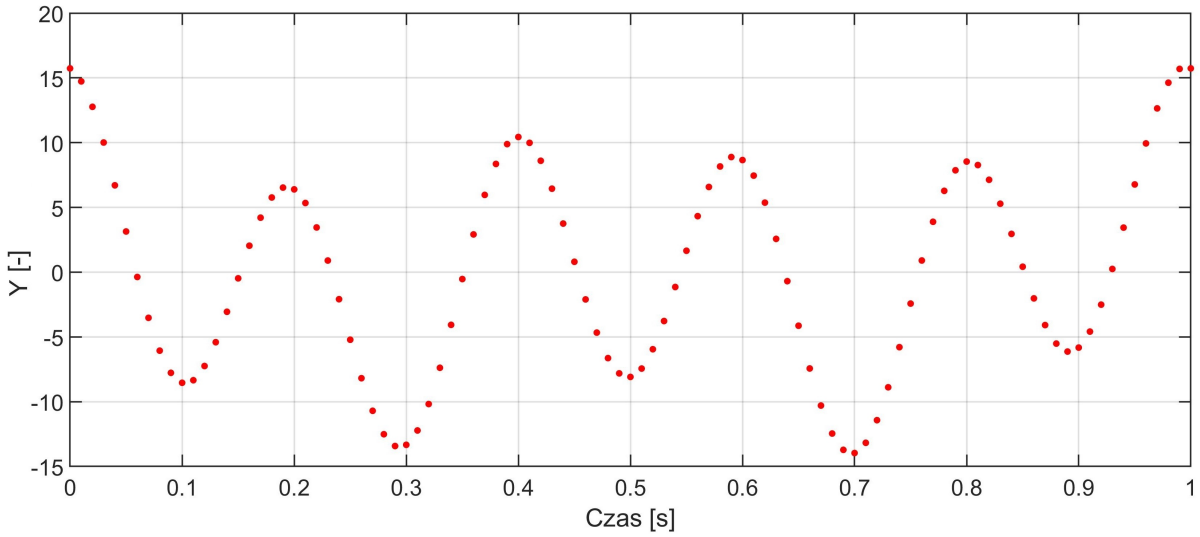
wartości wynoszą $a' = 10$ oraz $\varphi' = 0,5\,rad$ i zgodnie z oczekiwaniami są równe wartościom parametrów wejściowej cosinusoidalnej funkcji harmonicznej. Dla sprawdzenia możliwości obliczenia z wykorzystaniem FFT parametrów sygnału funkcji, na który składa się kilka harmonicznych o różnych częstotliwościach, przeprowadzono procedurę obliczeniową dla sygnału wyrażonego wzorem nr 20.

$$Y_k = a_1 \cdot cos(2\pi \cdot X_k \cdot fre_1 + \varphi_1) + a_2 \cdot cos(2\pi \cdot X_k \cdot fre_2 + \varphi_2) + a_3 \cdot cos(2\pi \cdot X_k \cdot fre_3 + \varphi_3) \quad (20)$$

Na sygnał wyrażony wzorem nr 20 składają się trzy funkcje harmoniczne o parametrach:

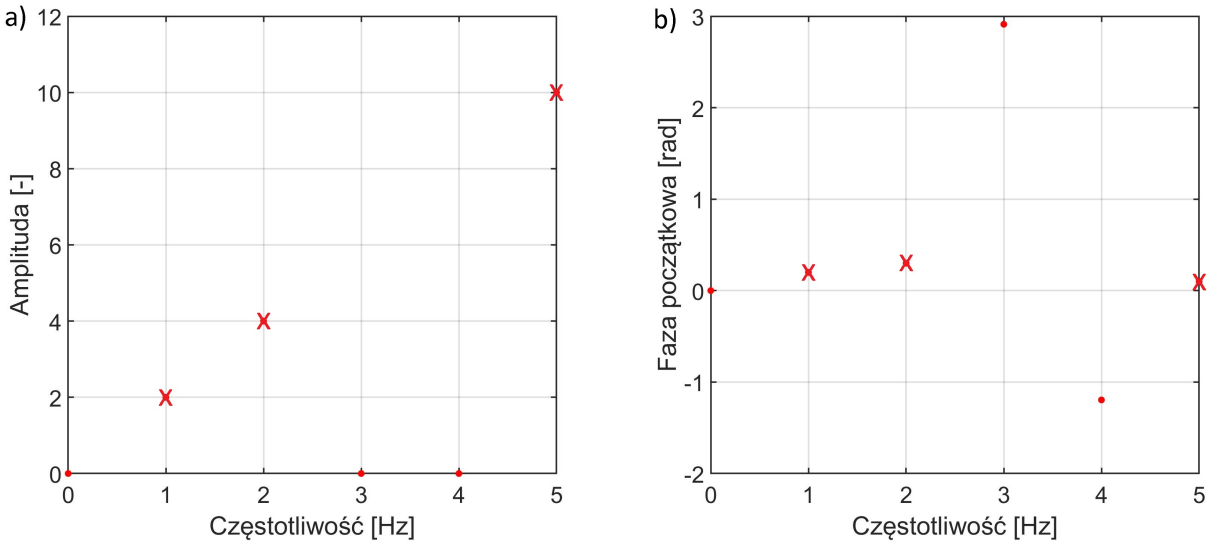
- czas próbkowania $T = 1\ s$,
- częstotliwość próbkowania $f_s = 100\ Hz$,
- częstotliwości składowych harmonicznych $fre_1 = 1\ Hz$, $fre_2 = 2\ Hz$ i $fre_3 = 5\ Hz$,
- amplitudy składowych harmonicznych $a_1 = 2$, $a_2 = 4$ i $a_3 = 10$,
- fazy początkowe składowych harmonicznych $\varphi_1 = 0,2\,rad$, $\varphi_2 = 0,3\,rad$ i $\varphi_3 = 0,1\,rad$.

Przygotowany kształt dyskretnego sygnału w postaci sumy trzech funkcji harmonicznych przedstawiono na rysunku nr 29.



Rys. 29: Wykres dyskretnego sygnału, na który składają się trzy funkcje harmoniczne

Wyniki obliczeń FFT dla sygnału pokazanego na rysunku nr 29 przedstawiono na rys. nr 30.



Rys. 30: Ilustracja graficzna wyników obliczeń FFT: a) amplitudy, b) fazy początkowe obliczone dla dyskretnego sygnału, na który składają się trzy funkcje harmoniczne

Analogicznie jak dla poprzedniego przypadku, na rysunku nr 30 zaznaczono znakami "x" wartości amplitud i faz początkowych dla częstotliwości odpowiednio 1, 2 i 5 Hz, które zgodnie z oczekiwaniami odpowiadają przyjętym wartościom parametrów trzech składowych funkcji harmonicznych sygnału wejściowego.

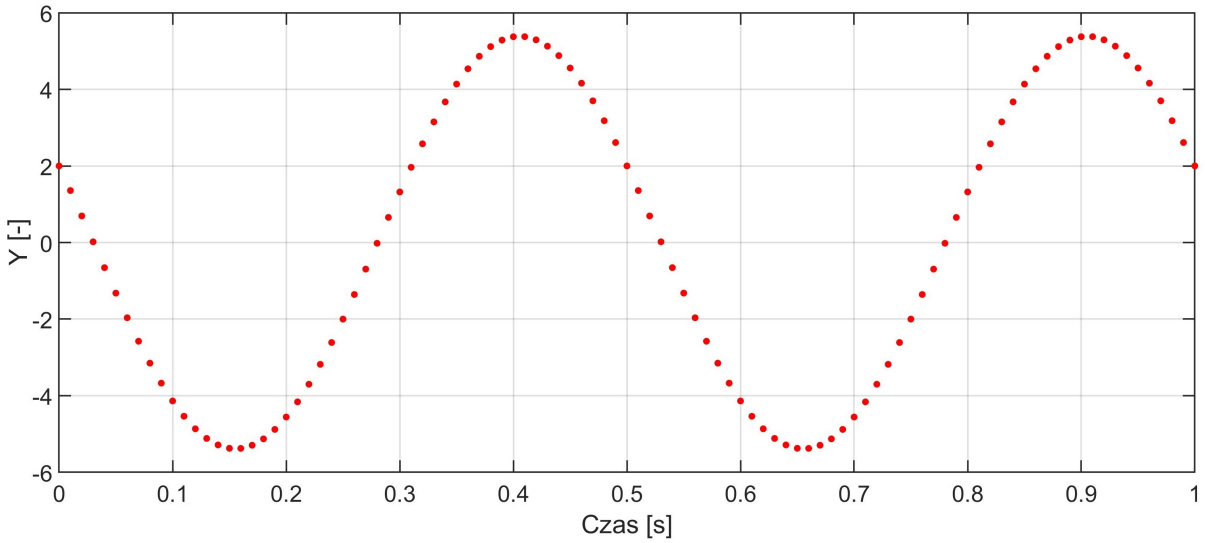
Kolejny sygnał poddany FFT wyrażono wzorem nr 21, na który składa się suma dwóch funkcji harmonicznych określonych tą samą częstotliwością oraz przesuniętych w fazie względem siebie o kąt 90 stopni ($90^o = \frac{\pi}{2}\ rad$). Zadaniem, które sobie postawiono jest weryfikacja twierdzenia, że istnieje możliwość wykorzystania FFT dla sygnału funkcji, które spełnia równanie różniczkowe (wzór nr 31), o którym jest mowa w dalszej części niniejszej rozprawy.

$$Y_k = a_1 \cdot cos(2\pi \cdot X_k \cdot fre + \varphi) + a_2 \cdot cos(2\pi \cdot X_k \cdot fre + (\varphi + \frac{\pi}{2})) \tag{21}$$

Do obliczeń przyjęto następujące wartości parametrów sygnału:

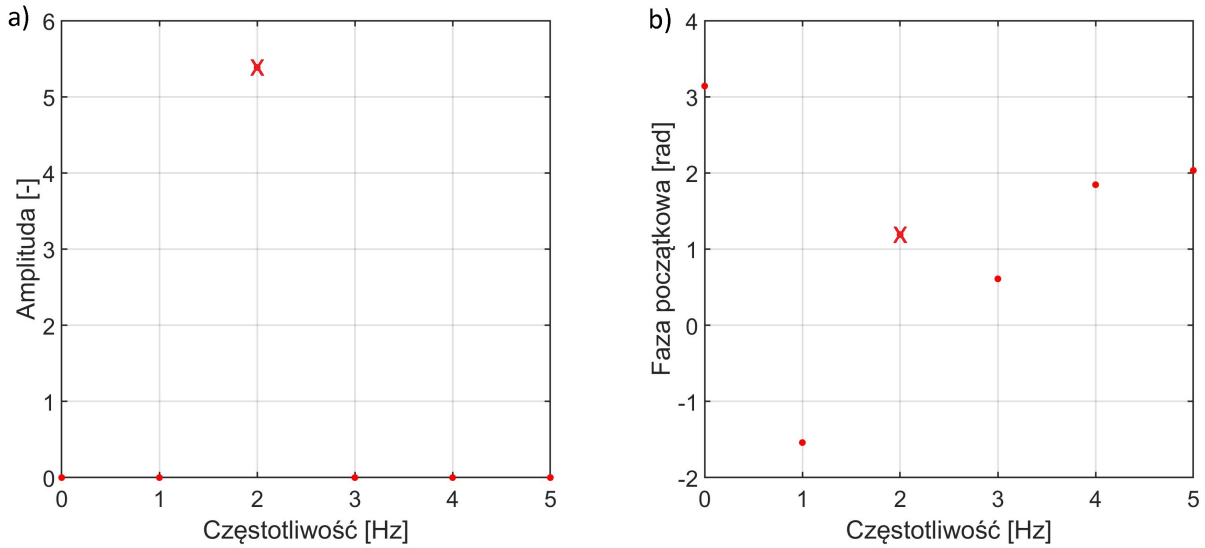
- czas próbkowania $T = 1\ s$,
- częstotliwość próbkowania $f_s = 100\ Hz$,
- częstotliwość funkcji harmonicznych $fre = 2\ Hz$,
- amplitudy składowych harmonicznych $a_1 = 2$ i $a_2 = 5$,
- faza początkowa funkcji harmonicznych $\varphi = 0\ rad$.

Na rysunku nr 31 przedstawiono na wykresie dyskretny sygnał sumy dwóch funkcji harmonicznych o częstotliwości 2 Hz, przesuniętych w fazie względem siebie o $\frac{\pi}{2}\ rad$.



Rys. 31: Wykres dyskretnego sygnału sumy dwóch funkcji harmonicznych o częstotliwości 2 Hz i przesuniętych w fazie względem siebie o $\frac{\pi}{2}\,rad$

Wyniki obliczeń FFT dla sygnału pokazanego na rysunku nr 31 przedstawiono na rysunku nr 32.



Rys. 32: Ilustracja graficzna wyników obliczeń FFT: a) amplitudy, b) fazy początkowe obliczone dla dyskretnego sygnału sumy dwóch harmonicznych o częstotliwości 2 Hz i przesuniętych w fazie względem siebie o $\frac{\pi}{2}\,rad$

Obliczone wartości amplitudy $a' \approx 5,3852$ i fazy początkowej $\varphi' \approx 1,1903\,rad$ zaznaczono znakami "x" na rysunku nr 32. W przeciwieństwie do wcześniej omawianych przypadków, obliczone wartości nie są równe przyjętym wartościom parametrów sygnału,

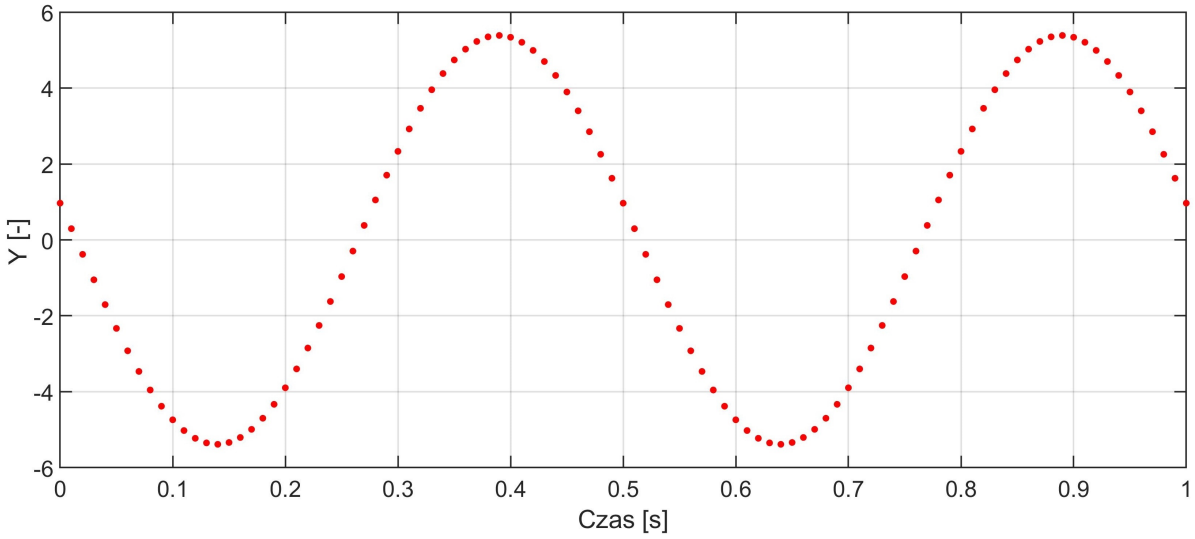
co jest związane z tym, że dwie składowe harmoniczne sygnału mają tą samą częstotliwość. Natomiast poprzez to, że składowe harmoniczne sygnału są przesunięte względem siebie w fazie o $\frac{\pi}{2}\,rad$ możliwe jest obliczenie wartości przyjętych amplitud a_1 i a_2. Kolejno a_1 i a_2 są równe wartościom amplitud części rzeczywistej (faza początkowa $\varphi = 0\,rad$) i urojonej (faza początkowa $\varphi = \frac{\pi}{2}\,rad$). Wartości a'_1 i a'_2 równe przyjętym parametrom a_1 i a_2 sygnału poddanego FFT otrzymano po wykonaniu następujących obliczeń:

$$a'_1 = a' \cdot cos(\varphi') = 5,3852 \cdot cos(1,1903\,rad) \approx 2,0$$

$$a'_2 = a' \cdot sin(\varphi') = 5,3852 \cdot sin(1,1903\,rad) \approx 5,0$$

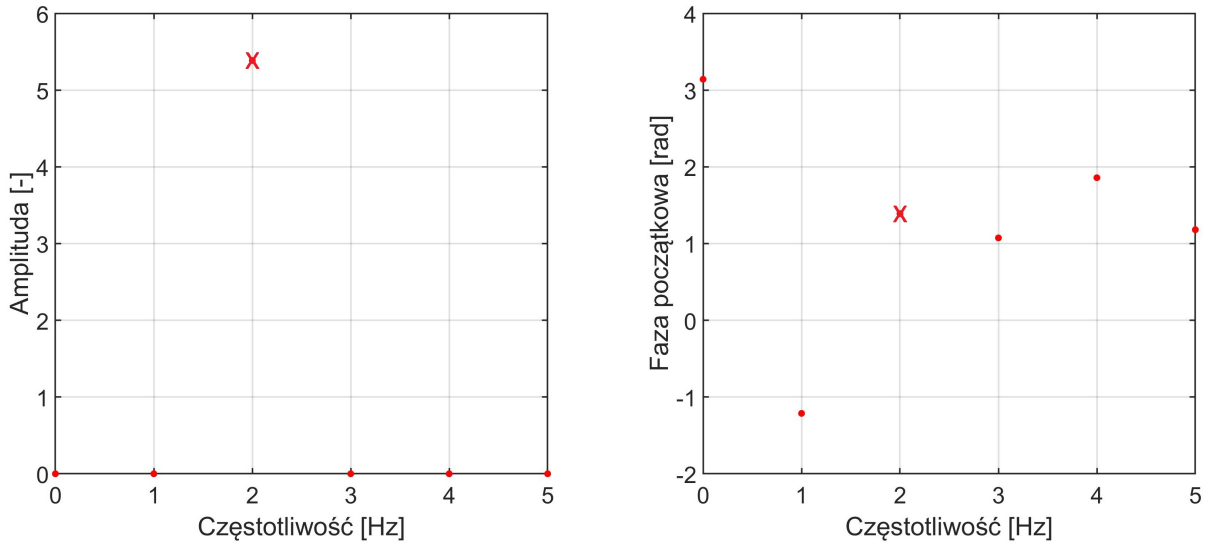
Przy obliczaniu wartości parametrów a_1 i a_2 wejściowego dyskretnego sygnału na podstawie wyników FFT istotne jest przyjęcie wartości parametru $\varphi = 0\,rad$. W przypadku kiedy przyjęto by $\varphi \neq 0\,rad$, obliczone wartości amplitud nie byłyby równe przyjętym wartościom parametrów sygnału wejściowego. Potwierdzeniem tego są wyniki obliczeń, które zostały powtórzone przy założeniu, że $\varphi = 0,2\,rad$.

Na rysunku nr 33 przedstawiono na wykresie dyskretny sygnał sumy dwóch harmonicznych o częstotliwości 2 Hz, wartości $\varphi = 0,2\,rad$ i przesuniętych w fazie względem siebie o $\frac{\pi}{2}\,rad$.



Rys. 33: Wykres dyskretnego sygnału sumy dwóch harmonicznych o częstotliwości 2 Hz, wartości $\varphi = 0,2\,rad$ i przesuniętych w fazie względem siebie o $\frac{\pi}{2}\,rad$

Wyniki obliczeń FFT dla dyskretnego sygnału sumy dwóch harmonicznych o częstotliwości 2 Hz, wartości $\varphi = 0,2\,rad$ i przesuniętych w fazie względem siebie o $\frac{\pi}{2}\,rad$, przedstawiono na rysunku nr 34.



Rys. 34: Ilustracja graficzna wyników obliczeń FFT: a) amplitudy, b) fazy początkowe obliczone dla dyskretnego sygnału sumy dwóch harmonicznych o częstotliwości 2 Hz, wartości $\varphi = 0,2\,rad$ i przesuniętych w fazie względem siebie o $\frac{\pi}{2}\,rad$

Obliczono wartości amplitudy $a' \approx 5,3852$ oraz fazy początkowej $\varphi' \approx 1,3903\,rad$, które zaznaczono znakami "x" na rysunku nr 34. Następnie obliczono wartości amplitud części rzeczywistej i urojonej harmonicznej sygnału o częstotliwości równej 2 Hz:

$a'_1 = 5,3852 \cdot cos(1,3903\,rad) \approx 0,97$

$a'_2 = 5,3852 \cdot sin(1,3903\,rad) \approx 5,30$

Obliczone wartości a'_1 i a'_2 nie są równe wartościom przyjętych parametrów sygnału poddanego FFT ($a_1 = 2,0$ i $a_2 = 5,0$), czym potwierdzono, że wartość fazy początkowej nie pozostaje obojętna wobec identyfikacji wartości amplitud składowych harmonicznych sygnału wejściowego. Dla rezultatów przedstawionego przykładu istotne jest to, że wartość amplitudy funkcji harmonicznej odpowiadającej częstotliwości 2 Hz jest równa wartości obliczonej dla sygnału, dla którego przyjęto $\varphi = 0\,rad$. Natomiast obliczone wartości faz początkowych wynoszą $1,1903\,rad$ i $1,3903\,rad$. Należy tu zauważyć, że ich różnica jest równa $0,2\,rad$, a więc jest równa wartości przypisanej do parametru φ. Z rozważań tych wynika, że wykorzystanie FFT w celu identyfikacji wartości parametrów a_1 i a_2 sygnału w postaci sumy dwóch harmonicznych o częstotliwości 2 Hz, wartości $\varphi = 0,2\,rad$ i przesuniętych w fazie względem siebie o $\frac{\pi}{2}$ (przypadek sygnału gdzie $\varphi \neq 0\,rad$), jest możliwe pod warunkiem wykorzystania następujących wzorów nr 22 i 23.

$$a'_1 = a' \cdot cos(\varphi' - \varphi) \tag{22}$$

$$a'_2 = a' \cdot sin(\varphi' - \varphi) \tag{23}$$

Wykorzystując odpowiednio wzory nr 22 i 23 do wyników uzyskanych z transformacji FFT sygnału sumy dwóch harmonicznych o częstotliwości 2 Hz, wartości $\varphi = 0,2\ rad$ i przesuniętych w fazie względem siebie o $\frac{\pi}{2}\ rad$, obliczono $a_1' \approx 2$ i $a_2' \approx 5$, które są równe wejściowym wartościom parametrów a_1 i a_2 sygnału, co jest zgodne z oczekiwaniami.

Dla przedstawionych obliczeń FFT istotne jest to, że postać sygnału będącego sumą dwóch harmonicznych określonych tą samą częstotliwością i przesuniętych w fazie względem siebie o $\frac{\pi}{2}\ rad$ (co wyrażono wzorem nr 24), można zapisać wzorem nr 25, wiedząc że $cos(x + \frac{\pi}{2}) = sin(x)$.

$$Y_k = a_1 \cdot cos(X_k + \frac{\pi}{2}) + a_2 \cdot cos(X_k) \tag{24}$$

$$Y_k = a_1 \cdot sin(X_k) + a_2 \cdot cos(X_k) \tag{25}$$

Następnie, wiedząc że pochodną funkcji sinus jest funkcja cosinus, postać wzoru nr 25 zapisano w ogólniejszej postaci równania różniczkowego, które wyrażono wzorem nr 26.

$$Y_k = a_1 \cdot f'(X_k) + a_2 \cdot f(X_k) \tag{26}$$

gdzie: Y_k – k-ta próbka sygnału [-], X_k – k-ty argument sygnału [s], $f(X_k)$ – wartość funkcji f dla argumentu X_k [-], $f'(X_k)$ – wartość pochodnej funkcji f' dla argumentu X_k [-], a_1 i a_2 – parametry sygnału [-].

Wyznaczanie wartości parametrów a_1 i a_2 poprzez transformatę FFT sygnału, którego ogólną postać można zapisać równaniem różniczkowym (wzór nr 26), wymagało istotnej modyfikacji procedury obliczeniowej, którą przedstawiono w kolejnym przykładzie obliczeniowym.

Sygnał, dla którego przeprowadzono kolejne obliczenia w ogólnej postaci można zapisać równaniem różniczkowym pierwszego rzędu zapisanym wyrażeniem nr 26, a przyjętą postać funkcji $f(X_k)$ oraz jej pochodną $f'(X_k)$ wyrażono odpowiednio wzorami nr 27 i 28.

$$f(X_k) = sin(2\pi \cdot X_k \cdot fre + \varphi) \tag{27}$$

$$f'(X_k) = cos(2\pi \cdot X_k \cdot fre + \varphi) \cdot (2\pi \cdot fre) \tag{28}$$

Postać sygnału wejściowego po podstawieniu do wzoru nr 26 przyjętej postaci funkcji $f(X_k)$ oraz jej pochodnej $f'(X_k)$, zapisano wzorem nr 29.

$$Y_k = a_1 \cdot cos(2\pi \cdot X_k \cdot fre + \varphi) \cdot (2\pi \cdot fre) + a_2 \cdot sin(2\pi \cdot X_k \cdot fre + \varphi) \tag{29}$$

Istotną różnicą w stosunku do poprzednich przypadków, będzie uwzględnienie w obliczeniach mnożenia przez $(2\pi \cdot fre)$. Do obliczenia FFT przyjęto następujące wartości parametrów sygnału:

- czas próbkowania $T = 1\ s$,

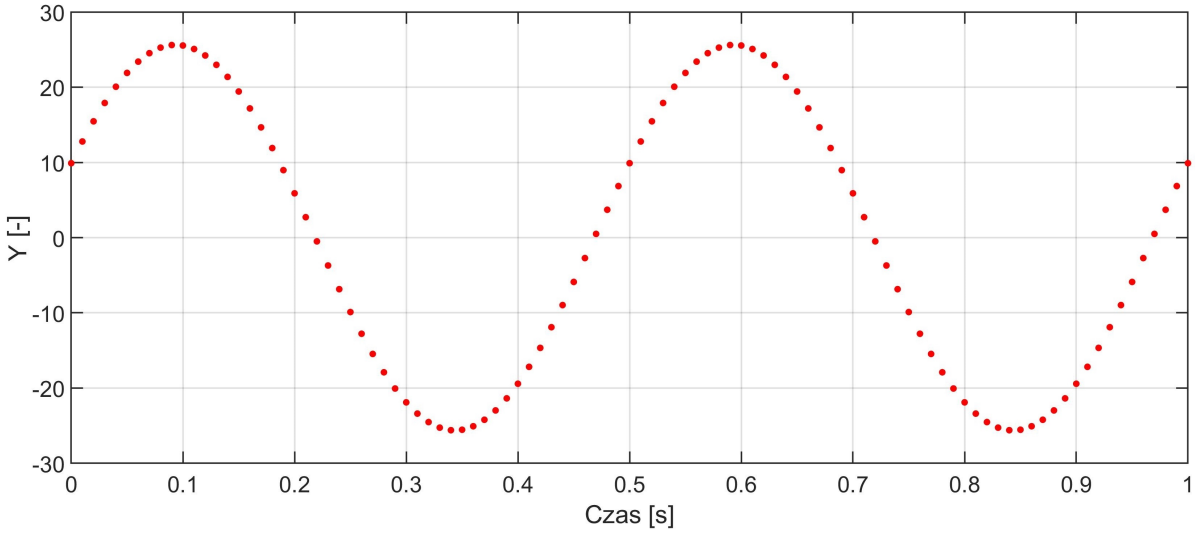
- częstotliwość próbkowania $f_s = 100\ Hz$,

- częstotliwość funkcji harmonicznych $fre = 2\ Hz$,

- amplitudy składowych harmonicznych $a_1 = 5$ i $a_2 = 2$,

- faza początkowa funkcji harmonicznych $\varphi = 0,2\ rad$.

Ostateczna postać sygnału przyjętego do rozważań, pokazana jest na rysunku nr 35.



Rys. 35: Wykres dyskretnego sygnału wyrażonego równaniem nr 29

Natomiast wyniki obliczeń FFT dla dyskretnego sygnału pokazanego na rysunku nr 35 przedstawiono na rysunku nr 36.

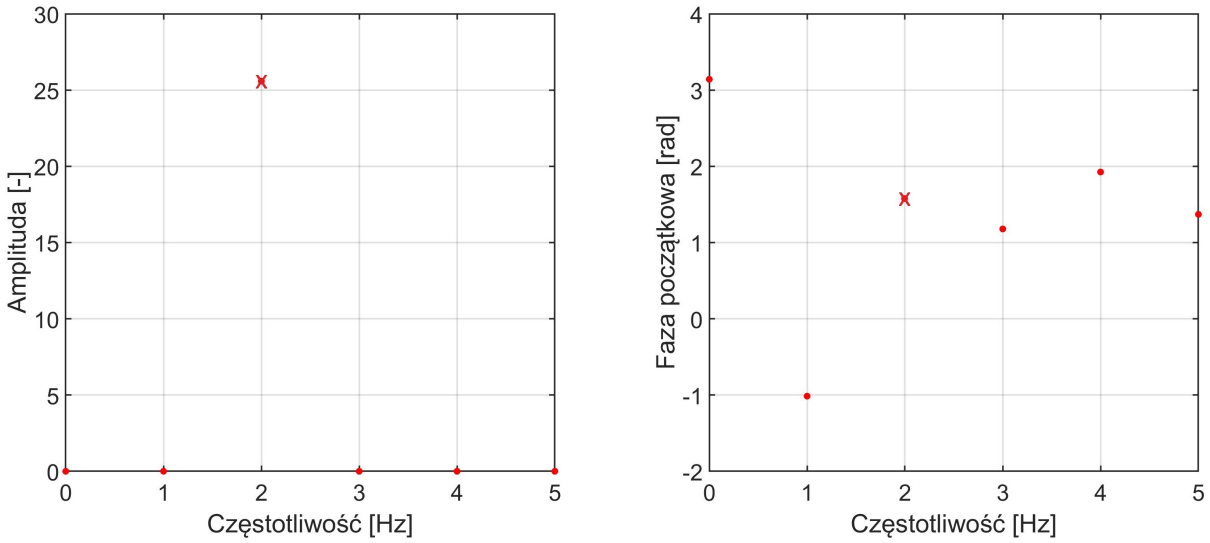
Znakami "x" zaznaczono wartości na wykresach, które odpowiadają częstotliwości $fre = 2$ Hz sygnału poddanego FFT, dla których odczytano wartości: amplitudy $a' \approx 25,6253$ oraz fazy początkowej $\varphi' \approx 1,5744\ rad$. Następnie wykorzystując postacie wzorów nr 22 i 23, obliczono wartość $a'_1 \approx 5,0$ równą przyjętemu parametrowi a_1 sygnału oraz wartość $a'_2 \approx 25,1327$, która różni się od wartości przyjętego parametru $a_2 = 5$. Różnica wartości przyjętej a_2 i obliczanej a'_2 wynika z mnożenia a_2 przez $(2\pi \cdot fre)$, co uwzględniono w postaci wzoru nr 30.

$$a'_2 = a' \cdot sin(\varphi' - \varphi) \div (2\pi \cdot fre) \tag{30}$$

Wzór nr 30 wykorzystano do obliczenia wartości a'_2:

$$a'_2 = a' \cdot sin(\varphi' - \varphi) \div (2\pi \cdot fre) = 25,6253 \cdot sin(1.5744 - 0.2) \div (2\pi \cdot 2) \approx 2,0$$

Przedstawionymi przykładami obliczeniowymi potwierdzono możliwość wykorzystania obliczeń FFT w przypadku sygnałów funkcji spełniających analizowane równanie różniczkowe pierwszego rzędu, co jest istotną właściwością transformaty Fouriera z punktu widzenia jej zastosowania do interpretacji wyników pomiarów urządzeniem FWD.



Rys. 36: Ilustracja graficzna wyników obliczeń FFT: a) amplitudy, b) fazy początkowe obliczone dla dyskretnego sygnału pokazanego na rysunku nr 35

Rejestrowane w czasie pomiaru metodą FWD wartości funkcji przemieszczenia są zależne od wartości rejestrowanej w dziedzinie czasu funkcji siły. Dla opisu zależności przemieszczenie-siła w ogólnym przypadku prawdziwe jest równanie ruchu, które w postaci równania różniczkowego wyraża się wzorem nr 31.

$$m \cdot \frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} + c \cdot \frac{\partial u(t)}{\partial t} + k \cdot u(t) = F(t) \tag{31}$$

gdzie: $u(t)$ – funkcja przemieszczenia w dziedzinie czasu [m], $F(t)$ – funkcja siły w dziedzinie czasu [N], m – parametr bezwładności $[\frac{N \cdot s^2}{m}]$, c – parametr tłumienia $[\frac{N \cdot s}{m}]$, k – parametr sprężystości $[\frac{N}{m}]$.

Zastosowanie FFT do analizy sygnałów uzyskanych z pomiarów metodą FWD, wiąże się z przeprowadzeniem obliczeń dla funkcji spełniającej równanie różniczkowe ruchu, które jest równaniem różniczkowym drugiego rzędu. Mając na celu weryfikację możliwości zastosowania FFT do funkcji spełniającej równanie różniczkowe drugiego rzędu, przeprowadzono obliczenia dla sygnału wyrażonego wzorem nr 32.

$$Y_k = a_1 \cdot f''(X_k) + a_2 \cdot f'(X_k) + a_3 \cdot f(X_k) \tag{32}$$

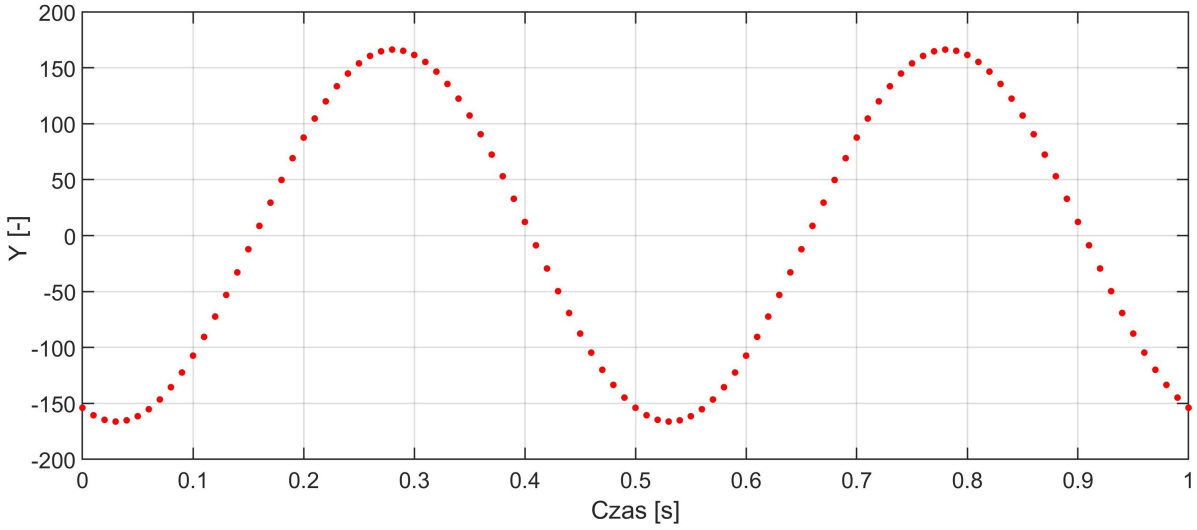
Do obliczenia wartości próbek sygnału przyjęto funkcję harmoniczną w postaci $f(X_k) = cos(2\pi \cdot X_k \cdot fre + \varphi)$, stąd ostateczną postać sygnału wyrażono wzorem nr 33.

$$Y_k = -a_1 \cdot cos(2\pi \cdot X_k \cdot fre + \varphi) \cdot (2\pi \cdot fre)^2$$
$$-a_2 \cdot sin(2\pi \cdot X_k \cdot fre + \varphi) \cdot (2\pi \cdot fre)$$
$$+ a_3 \cdot cos(2\pi \cdot X_k \cdot fre + \varphi) \tag{33}$$

Do obliczeń przyjęto następujące wartości parametrów sygnału:

- czas próbkowania $T = 1\ s$,
- częstotliwość próbkowania $f_s = 100\ Hz$,
- częstotliwość funkcji harmonicznych $fre = 2\ Hz$,
- amplitudy składowych harmonicznych $a_1 = 1$, $a_2 = 5$ i $a_3 = 4$,
- faza początkowa funkcji harmonicznych $\varphi = 0,0\ rad$.

Wykres sygnału branego pod uwagę w tym przykładzie pokazany jest na rysunku nr 37.

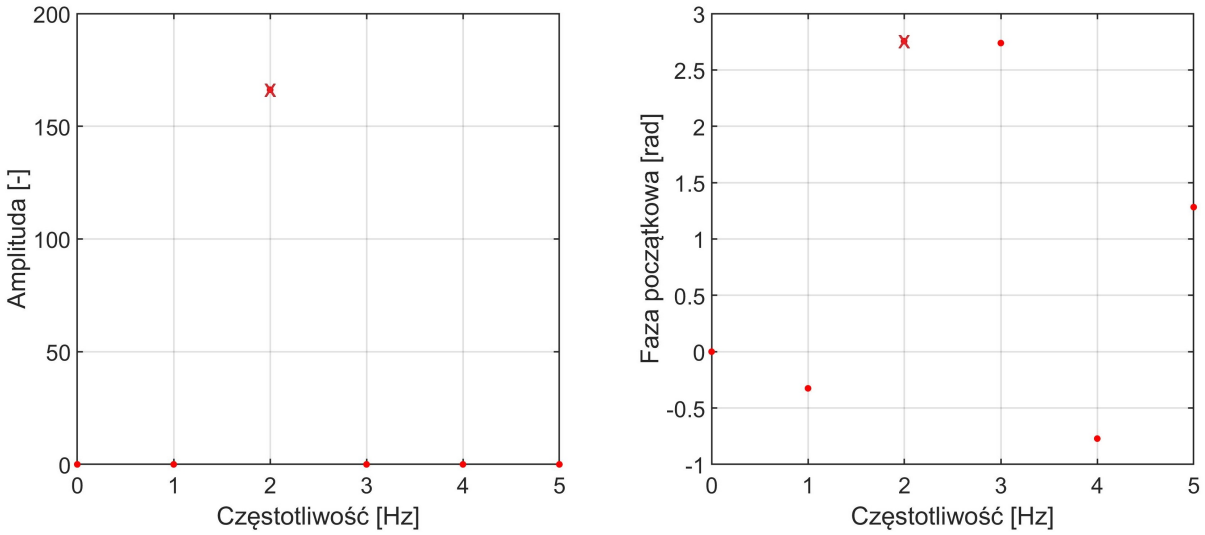


Rys. 37: Wykres dyskretnego sygnału opisanego wzorem nr 33

Wyniki obliczeń FFT przedstawiono na rysunku nr 38.

Obliczone wartości amplitudy $a' \approx 166,2446$ i fazy początkowej $\varphi' \approx 2,7540\ rad$ na rysunku nr 38 zaznaczono znakami "x". Następnie wykorzystując wzory nr 22 i 30, obliczono wartość części rzeczywistej $a'_1 \approx -153,9137$ i urojonej $a'_2 \approx 5,0$ amplitudy harmonicznej o częstotliwości 2 Hz. Porównując obliczone wartości a'_1 i a'_2 harmonicznej o częstotliwości 2 Hz z przyjętymi wartościami parametrów sygnału a_1, a_2, oraz a_3, ustalono następujące zależności między nimi: $a'_1 = a_3 - a_1 \cdot (2\pi \cdot fre)^2$ i $a'_2 = a_2$. Mając na celu sprawdzenie czy na ustalone zależności ma wpływ wartość $\varphi \neq 0\ rad$, przeprowadzono obliczenia dla sygnału wyrażonego wzorem 33, dla którego przyjęto następujące wartości parametrów:

- czas próbkowania $T = 1\ s$,
- częstotliwość próbkowania $f_s = 100\ Hz$,
- częstotliwość funkcji harmonicznych $fre = 2\ Hz$,
- amplitudy składowych harmonicznych $a_1 = 1$, $a_2 = 5$ i $a_3 = 4$,
- faza początkowa funkcji harmonicznych $\varphi = 0,2\ rad$.



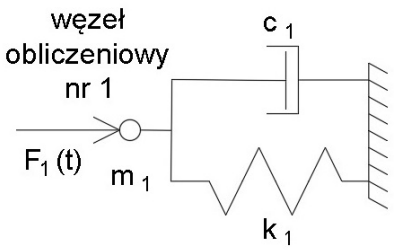
Rys. 38: Ilustracja graficzna wyników obliczeń FFT: a) amplitudy, b) fazy początkowe obliczone dla dyskretnego sygnału wyrażonego wzorem nr 33

Wykorzystując FFT dla dyskretnego sygnału opisanego wzorem nr 33, dla którego przyjęto $\varphi \neq 0\ rad$, obliczono wartości $a' \approx 166,2445$ i $\varphi' \approx 2,9540\ rad$ dla harmonicznej o częstotliwości równej 2 Hz. Identycznie jak w poprzednim przykładzie, obliczona wartość amplitudy jest równa wartości dla sygnału z przyjętą wartością $\varphi = 0\ rad$. Natomiast między sygnałami różnica w wartościach φ' wynosi $d\varphi' = 2,9540 - 2,7540 = 0,2\ rad$ i jest równa przyjętej wartości parametru φ, dla którego przyjęto $\varphi \neq 0\ rad$.

Tytułem podsumowania tego przykładu należy zauważyć, że obliczenie wartości a'_1 i a'_2, które spełnią ustalone zależności $a'_1 = a_3 - a_1 \cdot (2\pi \cdot fre)^2$ i $a'_2 = a_2$, wiąże się z wykorzystaniem wzorów nr 22 i 30. Wykazano, że do przeprowadzenia obliczeń wymagana jest znajomość wartości φ, którą można obliczyć poprzez zastosowanie FFT dla dyskretnego sygnału funkcji $f(X_k)$. Istotna w tym przypadku jest więc znajomość dyskretnej postaci sygnału Y_k i $f(X_k)$, co wydaje się spełnione dla danych, które podlegają akwizycji w trakcie pomiaru urządzeniem FWD, siły $F(t)$ i przemieszczenia $U(t)$ w funkcji czasu.

Mając na celu weryfikację możliwości obliczenia wartości parametrów dynamicznych modeli nawierzchni przy użyciu FFT, przeprowadzono kolejne eksperymenty numeryczne, których podstawę stanowiły wyniki przeprowadzonych obliczeń przy wykorzystaniu modelu mechanicznego spełniającego warunki równania ruchu. Autor rozprawy bazując na pracy [272], opracował w postaci skryptu środowiska komputerowego MATLAB dyskretny model obliczeniowy układu mas, sprężyn i tłumików, w literaturze nazywany w skrócie modelem SDOF (z ang. Single Degree-of-Freedom model). Kody skryptów realizujące statyczną i dynamiczną analizę dyskretnych układów mechanicznych mas, sprężyn i tłumików, zamieszczono w załączniku nr 3.

Pierwszy eksperyment numeryczny z wykorzystaniem dynamicznego modelu SDOF przeprowadzono dla dyskretnego układu mas, sprężyn, tłumików oraz warunków brzegowych zgodnych ze schematem przedstawionym na rysunku nr 39.

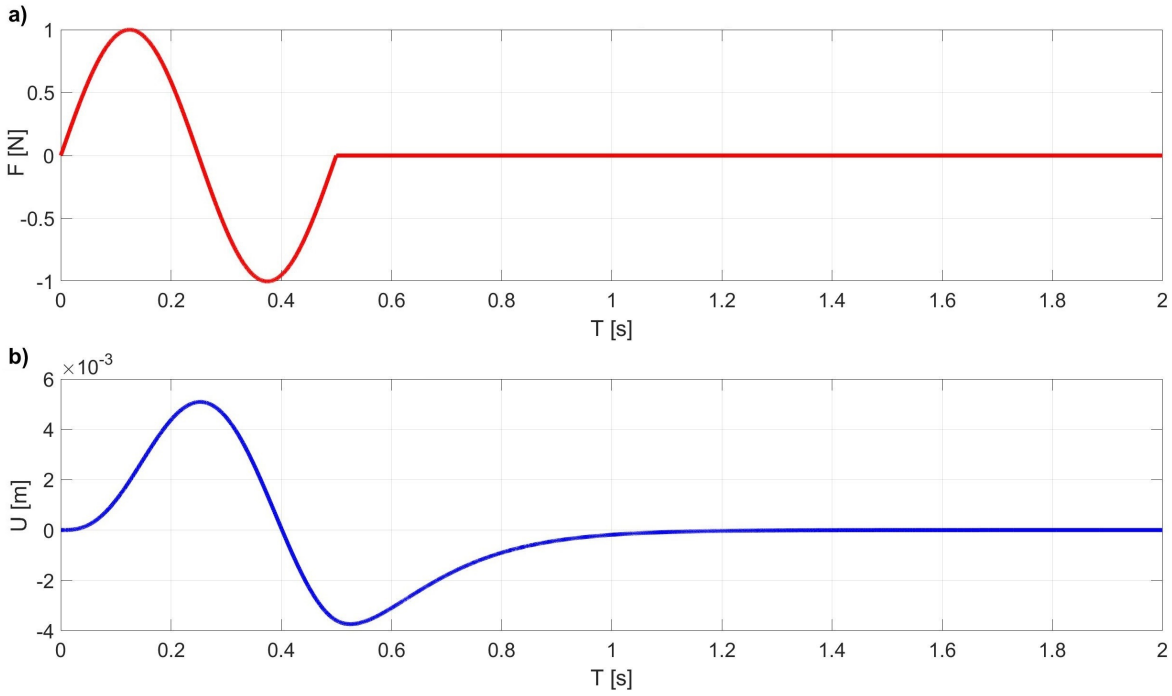


$F_i(t)$ - funkcja obciążenia w dziedzinie czasu węzła nr i [N]
k_i - współczynnik sprężystości sprężyny nr i $[\frac{N}{m}]$
c_i - współczynnik tłumienia tłumika nr i $[\frac{N \cdot s}{m}]$
m_i - masa węzła nr i [kg]

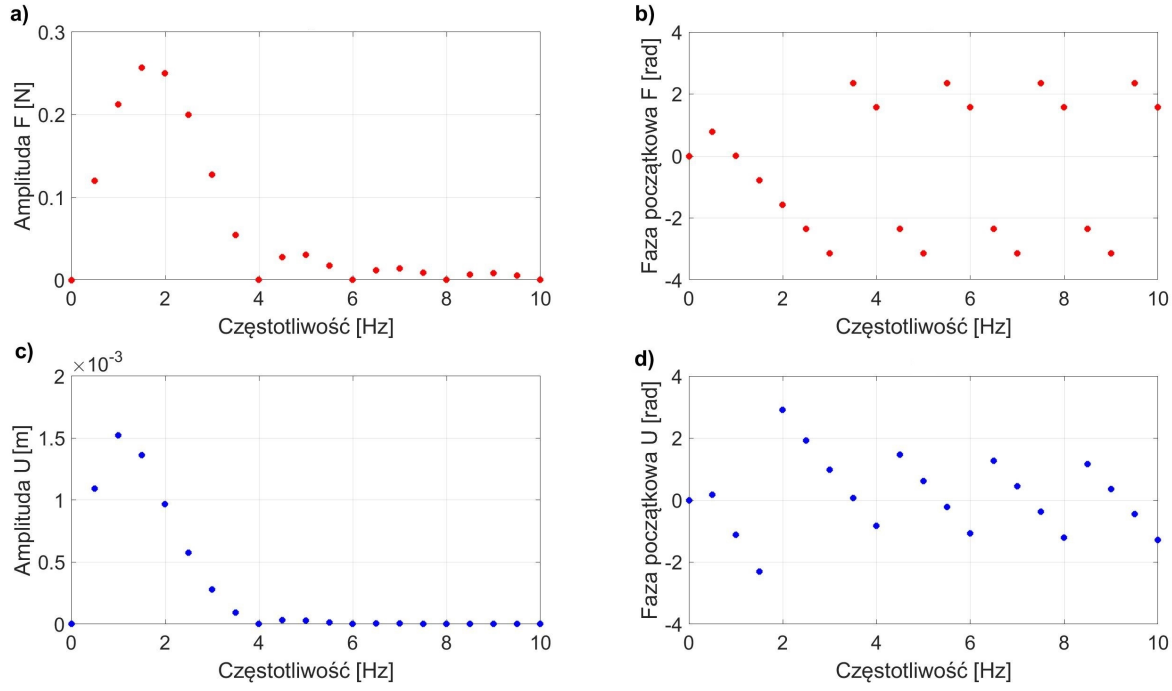
Rys. 39: Schemat zdefiniowanego dyskretnego układu mas, sprężyn, tłumików oraz warunków brzegowych modelu SDOF

Przyjęty i przedstawiony na rysunku nr 39 schemat modelu nie był przypadkowy, ponieważ wykonanie obliczeń (obliczenie przemieszczenia węzła nr 1 wywołanego obciążeniem) w tym przypadku sprowadza się do rozwiązania układu równań różniczkowych w postaci wyrażonej wzorem nr 32, gdzie $a_1 = m_1$, $a_2 = c_1$ i $a_3 = k_1$. Do obliczeń przyjęto następujące wartości parametrów modelu: $m_1 = 1\ kg$, $c_1 = 20\ \frac{N \cdot s}{m}$, $k_1 = 100\ \frac{N}{m}$, oraz zdefiniowane obciążenie w funkcji dziedzinie czasu węzła nr 1, które przedstawiono na rysunku nr 40a).

Uzyskane wyniki obliczeń przedstawione na rysunku nr 40 poddano FFT, a otrzymane rezultaty przedstawiono na rysunku nr 41.



Rys. 40: Wykres funkcji: a) zdefiniowanego obciążenia, b) obliczonego przemieszczenia węzła nr 1 w dziedzinie czasu



Rys. 41: Ilustracja graficzna uzyskanych widm częstotliwościowych: a) amplitudy siły, b) faz początkowych siły, c) amplitudy przemieszczenia, d) faz początkowych przemieszczenia

W przypadku przedstawionych na rysunku nr 41 wyników obliczeń FFT istotne jest to, że na zdefiniowaną siłę i obliczone przemieszczenie węzła nr 1 składa się spektrum funkcji harmonicznych o różnych częstotliwościach. W pierwszym kroku obliczono wartości a'_1 i a'_2 składowej funkcji harmonicznej o częstotliwości 2 Hz, dla której odczytano z wykresów wartości $a'_F(2\ Hz) = 0,2500\ N$, $\varphi'_F(2\ Hz) = -1,5706\ rad$, $a'_U(2\ Hz) = 9,6935 \cdot 10^{-4}\ m$, $\varphi'_U(2\ Hz) = 2,9153\ rad$, które następnie podstawiono do wzorów nr 22 i 30. Wykonane obliczenia opisano wyrażeniami:

$a_1(2\ Hz)' = a'_F(2\ Hz) \cdot cos(\varphi'_F(2\ Hz) - \varphi'_U(2\ Hz)) =$
$0,2500 \cdot cos(-1,5706 - 2,9153) = -0,0561$

$a'_2(2\ Hz) = a'_F(2\ Hz) \cdot sin(\varphi'_F(2\ Hz) - \varphi'_U(2\ Hz)) \div (2\pi \cdot 2\ Hz) =$
$0,2500 \cdot sin(-1,5706 - 2,9153) \div (2\pi \cdot 2) = 0,0194$

Następnie znając przyjęte wartości parametrów modelu m_1, c_1, k_1 oraz ustalone zależności $a'_1 = a_3 - a_1 \cdot (2\pi \cdot fre)^2$ i $a'_2 = a_2$, obliczono wartości porównawcze $a'_{1por}(2Hz)$ i $a'_{2por}(2Hz)$, co opisano następującymi wyrażeniami:

$a'_{1por}(2Hz) = k_1 - m_1 \cdot (2\pi \cdot fre)^2 = 100 - 1 \cdot (2\pi \cdot 2)^2 = -57,8977$

$a'_{2por}(2Hz) = c_1 = 20$

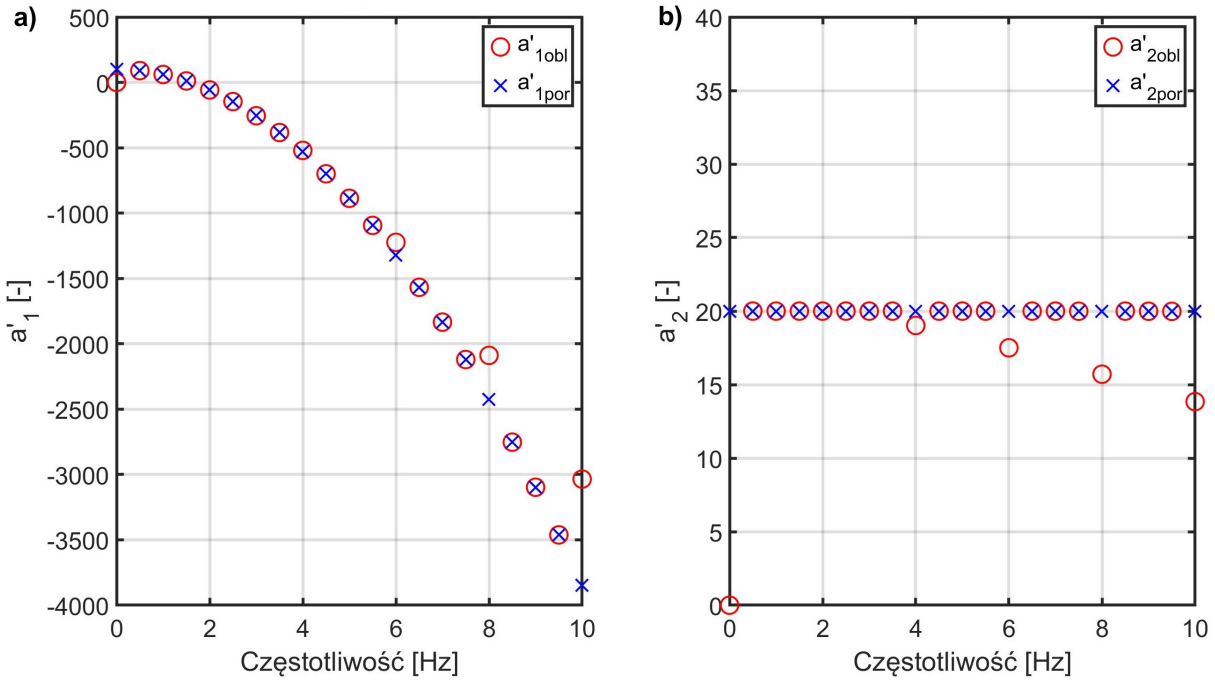
Ustalono, że różnice między obliczonymi wartościami $a'_1(2\ Hz) \neq a_{1por}(2\ Hz)$ i $a_2(2\ Hz)' \neq a_{2por}(2\ Hz)$ są związane z wartością amplitudy przemieszczenia funkcji harmonicznej o częstotliwości 2 Hz, która jest różna od jedności i jest mnożnikiem obliczanych wartości $a'_1(2\ Hz)$ i $a'_2(2\ Hz)$. Do obliczenia właściwych wartości $a'_1(2\ Hz)$ i $a'_2(2\ Hz)$ we wzorach nr 22 i 30 wprowadzono dzielenie przez wartość amplitudy przemieszczenia składowej funkcji harmonicznej odpowiadającej określonej częstotliwości, uzyskując wzory nr 34 i 35.

$$a'_1(fre) = \frac{a'_F(fre) \cdot cos(\varphi'_F(fre) - \varphi'_U(fre))}{a'_U(fre)} \tag{34}$$

$$a'_2(fre) = \frac{a'_F(fre) \cdot sin(\varphi'_F(fre) - \varphi'_U(fre))}{a'_U(fre) \cdot (2\pi \cdot fre)} \tag{35}$$

Po wykonaniu obliczeń, uzyskano odpowiednio $a'_1(2\ Hz) = -57,8977$ i $a'_2(2\ Hz) = 20$, a więc wartości równe porównawczym $a'_1(2\ Hz) = a'_{1por}(2\ Hz)$ i $a'_2(2\ Hz) = a'_{2por}(2\ Hz)$, czym potwierdzono możliwość obliczenia wartości parametrów analizowanego modelu SDOF przy wykorzystaniu FFT dla składowej harmonicznej o częstotliwości 2 Hz.

Zważywszy na to, że zarówno na zdefiniowaną siłę i obliczone przemieszczenie węzła nr 1 składa się spektrum funkcji harmonicznych, w następnym kroku obliczono wartości $a'_{1obl}(fre)$, $a'_{2obl}(fre)$ oraz odpowiadające im wartości porównawcze $a'_{1por}(fre)$ i $a'_{2por}(fre)$ dla zakresu częstotliwości od 0 do 10 Hz. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku nr 42.



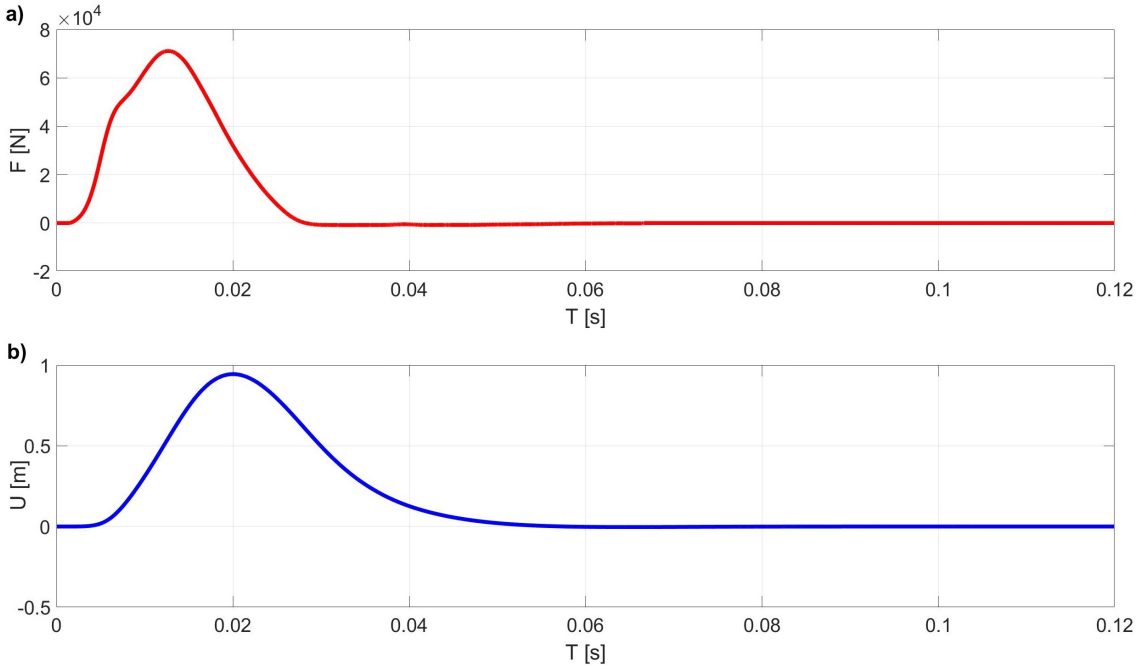
Rys. 42: Wykresy z wynikami obliczeń parametrów: a) a'_{1obl} i a'_{1por} b) a'_{2obl} i a'_{2por} dla zakresu częstotliwości od 0 do 10 Hz

Wyniki przedstawione na rysunku nr 42 potwierdzają możliwość obliczenia parametrów $a'_1(fre)$ i $a'_2(fre)$ dla spektrum funkcji harmonicznych, dla których wartości amplitud siły i przemieszczenia nie są bliskie zeru (nie są na tyle małe, żeby mieścić się w granicach błędu numerycznego). Ustalono więc, że zakres częstotliwości, dla których można obliczyć wartości parametrów $a'_1(fre)$ i $a'_2(fre)$ jest zależny od warunków zmienności wartości siły w czasie, która wywołuje zmiany wartości przemieszczenia w czasie. Analizę tych warunków w odniesieniu do rzeczywistego kształtu sygnału z badań metodą FWD, poddano weryfikacji wykonanej w kolejnym eksperymencie numerycznym.

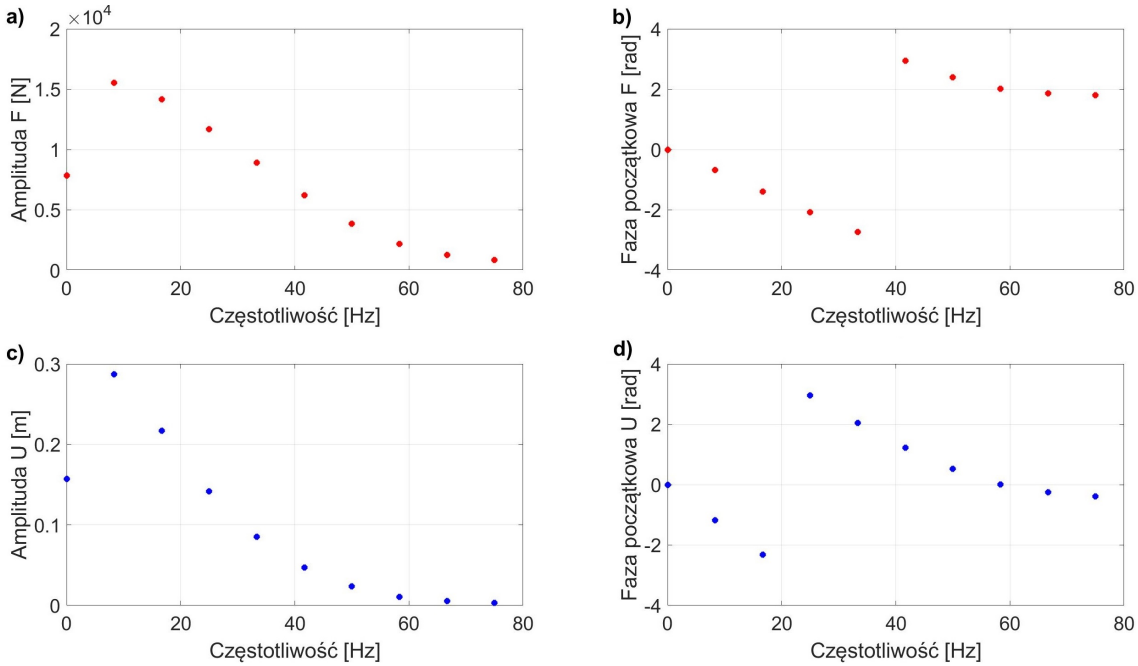
Podstawą wykonanych obliczeń na tym etapie był model SDOF o przyjętym takim samym jak poprzednio układzie sprężyn, tłumików i mas (patrz rysunek nr 39) oraz wartościach parametrów: $m_1 = 1\,kg$, $c_1 = 500\,\frac{N \cdot s}{m}$, $k_1 = 50000\,\frac{N}{m}$.

Do wykonania obliczeń przyjęto obciążenie, którego wartości w dziedzinie czasu były równe zarejestrowanym wartościom siły w trakcie pomiaru urządzeniem FWD, który losowo wybrano z bazy danych autora rozprawy. Na rysunku nr 43a przedstawiono na wykresie przyjętą siłę w dziedzinie czasu, a na rysunku nr 43b obliczone z wykorzystaniem modelu wartości przemieszczeń węzła nr 1.

Następnie dla wyników przedstawionych na rysunku nr 43 wykonano obliczenia FFT, których rezultaty przedstawiono na rysunku nr 44.

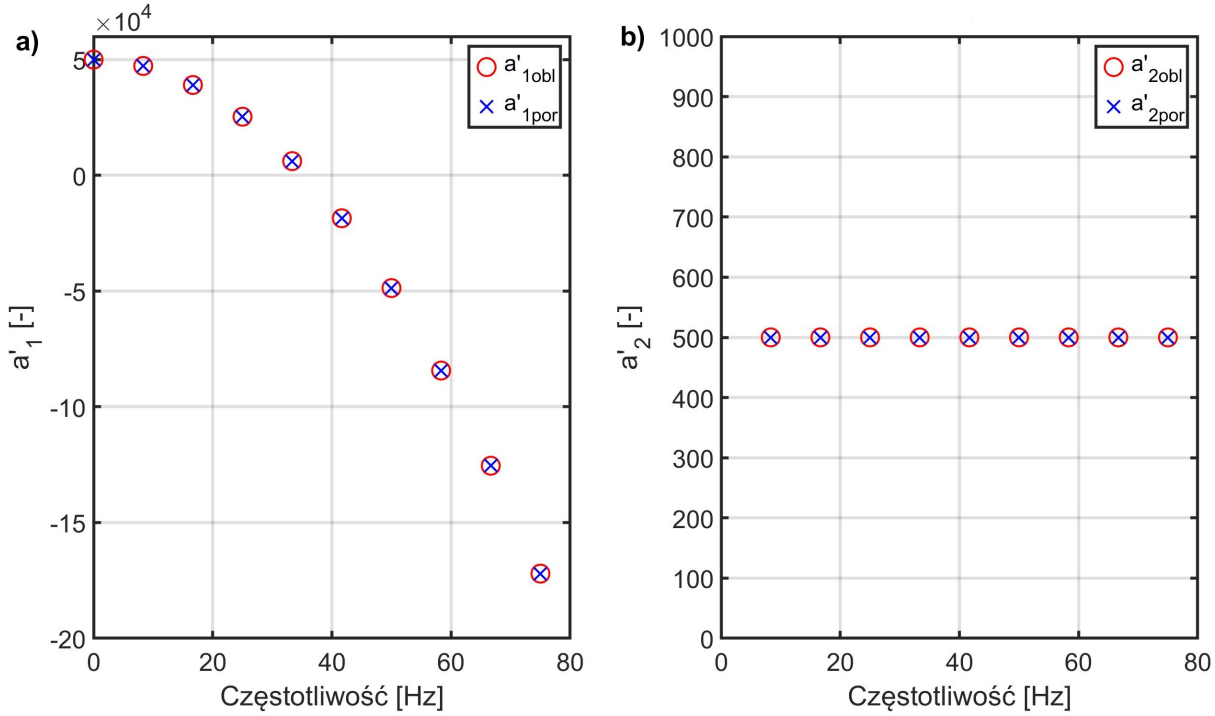


Rys. 43: Wykresy przedstawiające: a) przyjętą siłę w dziedzinie czasu z badań nawierzchni metodą FWD, b) obliczone przemieszczenie w dziedzinie czasu węzła nr 1 modelu



Rys. 44: Ilustracja graficzna uzyskanych widm częstotliwościowych: a) amplitudy siły, b) faz początkowych siły, c) amplitudy przemieszczenia, d) faz początkowych przemieszczenia dla przypadku kształtu funkcji obciążenia z badań nawierzchni metodą FWD

Dysponując wynikami obliczeń FFT dla zakresu częstotliwości od 0 do 80 Hz obliczono z wykorzystaniem wzorów nr 34 i 35 wartości parametrów a'_{1obl}, a'_{2obl} oraz ustalonymi zależnościami $a'_1 = a_3 - a_1 \cdot (2\pi \cdot fre)^2$ i $a'_2 = a_2$ wartości porównawcze a'_{1por}, a'_{2por}, które przedstawiono na rysunku nr 45.



Rys. 45: Wykresy przedstawiające obliczone wartości parametrów: a) a'_{1obl} i a'_{1por} b) a'_{2obl} i a'_{2por}

Uzyskanymi i przedstawionymi na rysunku nr 45 wynikami potwierdzono wpływ zmian wartości siły i przemieszczeń w dziedzinie czasu na zakres częstotliwości, dla których można obliczyć wartości parametrów a'_1, a'_2 równe wartościom porównawczym a'_{1por} i a'_{2por}. W przypadku uzyskanych wyników istotne jest też to, że obliczona wartość parametru a'_1 dla częstotliwości 0 Hz jest równa przyjętej wartości parametru sprężyny k_1, czego dowodzi następujące równanie:

$$a'_{1por}(fre = 0\ Hz) = k_1 - m_1 \cdot (2\pi \cdot fre)^2 = k_1 - m_1 \cdot (2\pi \cdot 0\ Hz)^2 = k_1$$

Uzyskując wartość parametru k_1 potwierdzono quasistatyczność obliczanych wartości amplitud siły i przemieszczenia dla częstotliwości 0 Hz, co w pracach [269, 270, 271] stanowi podstawę metody filtracji efektów dynamicznych z wyników pomiarów urządzeniem FWD.

Dla przeprowadzonych dotychczas obliczeń z użyciem modelu SDOF ważne jest to, że ustalone zależności dotyczą tylko jednego konkretnego układu sprężyny, tłumika i masy, który przedstawiono na rysunku nr 39. Natomiast wyniki uzyskiwane z pomiarów metodą FWD nawierzchni drogowych dotyczą układów:

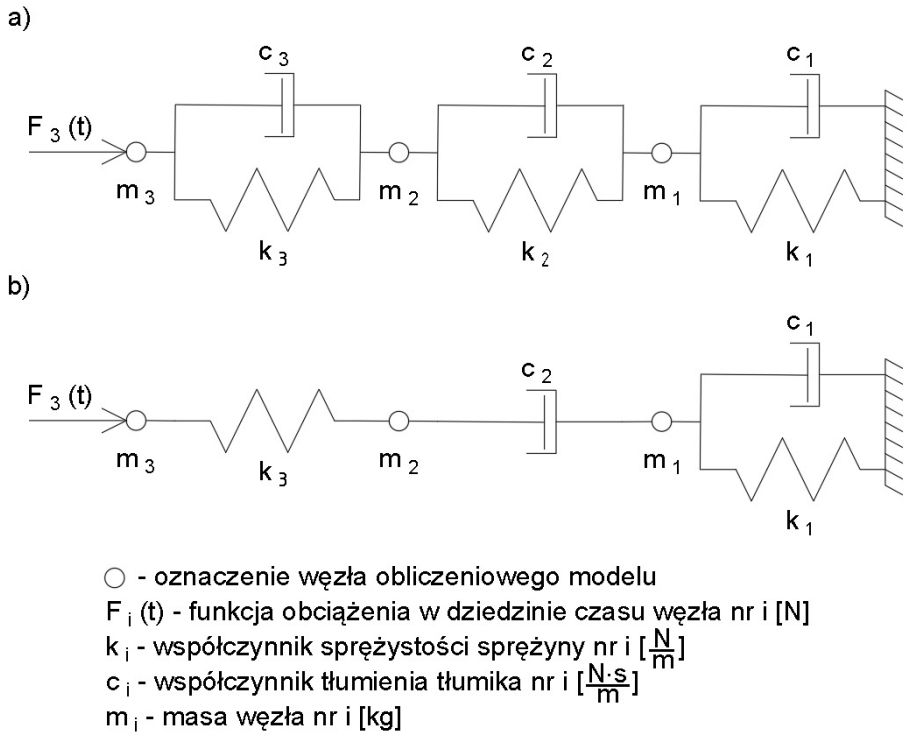
- wielowarstwowych,

- warstw z materiałów wykazujących właściwości reologicznie złożone,

dla których modelowania zastosowanie mają inne, bardziej złożone modele. Mając na celu weryfikację możliwości zastosowania FFT dla wyników pomiarów metodą FWD, w kolejnym kroku wykonano obliczenia dla dwóch modeli SDOF różniących się układem sprężyn, tłumików i mas. Na rysunku nr 46 przedstawiono przyjęty układ:

- modelu A, modelowany układ trójwarstwowy (układ tłumików i sprężyn odpowiada potrójnemu modelowi Kelvina, w którym założono, że każdy odrębny układ tłumika i sprężyny oraz masy w węźle odpowiada innej warstwie),

- modelu B, modelowany materiał reologicznie złożony (układ tłumików i sprężyn odpowiada modelowi Burgersa, który jest jednym z powszechnie stosowanych w modelowaniu mechanicznych właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych).



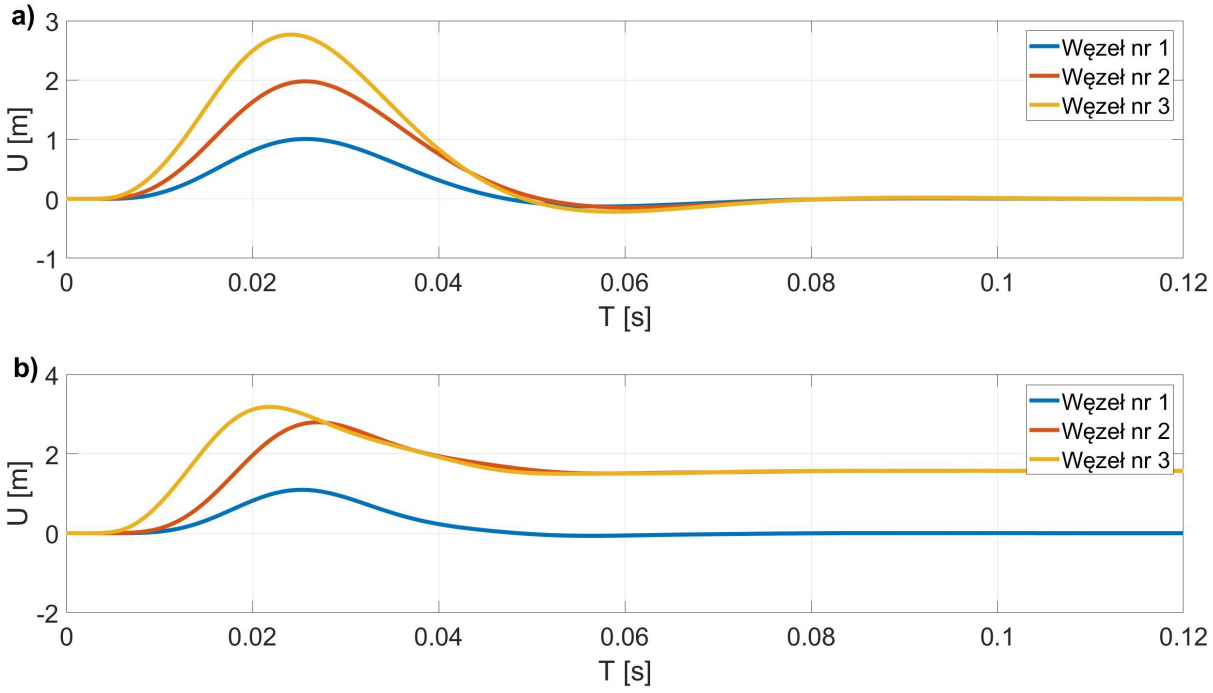
Rys. 46: Kolejno układ sprężyn, tłumików i mas: a) modelu A, b) modelu B

W modelu A i B obciążenie w dziedzinie czasu dla węzła nr 3 ($F_3(t)$), zdefiniowano tak, aby jego wartości odpowiadały wartościom siły zarejestrowanej w trakcie pomiarów urządzeniem FWD, podobnie jak w poprzednim przykładzie obliczeniowym (patrz wykres na rysunku nr 43a). Przyjęte wartości parametrów modeli m_i, c_i oraz k_i zestawiono w tabeli nr 7.

Tab. 7: Zestawienie przyjętych do obliczeń wartości parametrów modeli m_i, c_i oraz k_i,

Model	m_1	m_2	m_3	c_1	c_2	c_3	k_1	k_2	k_3
	$[kg]$			$[\frac{N \cdot s}{m}]$			$[\frac{N}{m}]$		
A	1,0	0,5	0,8	500	600	400	50000	40000	60000
B						-		-	

Wyniki obliczeń dla modeli w postaci wartości przemieszczeń węzłów w dziedzinie czasu przedstawiono kolejno na rysunku nr 47.

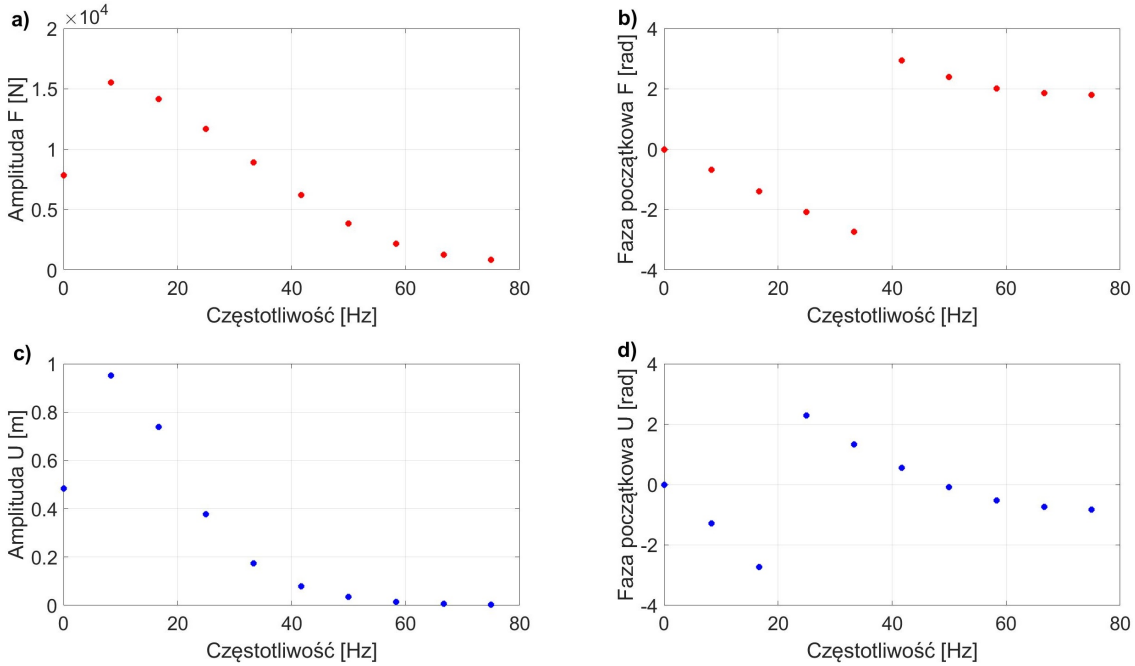


Rys. 47: Wykresy obliczonych wartości przemieszczeń węzłów: a) modelu A, b) modelu B

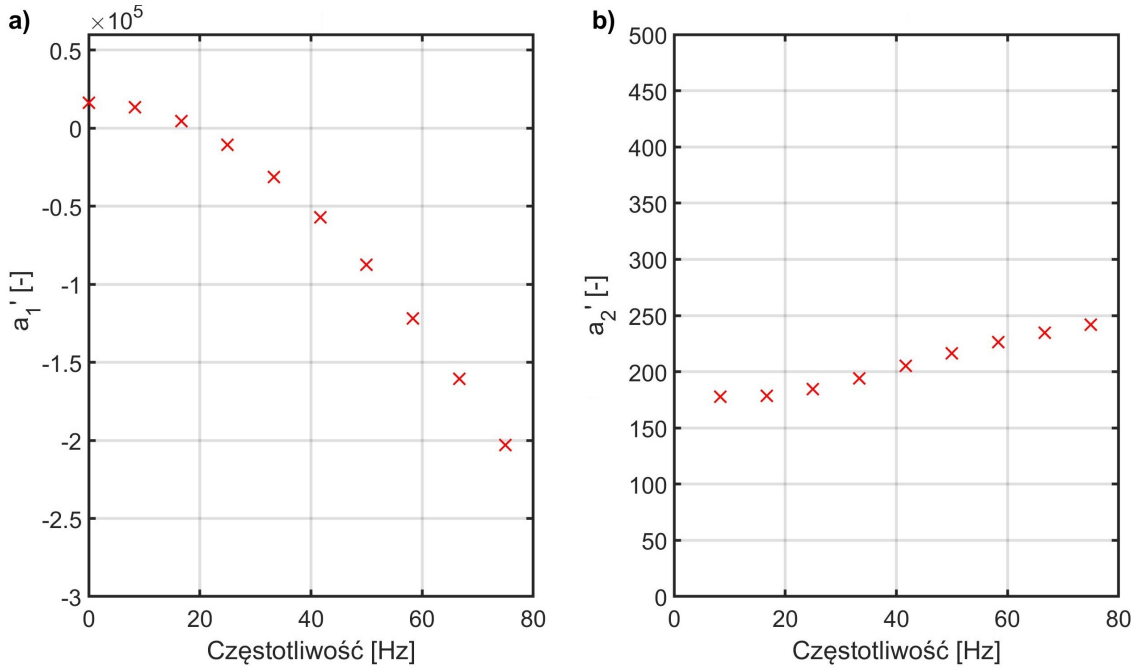
Dalsze obliczenia przeprowadzono wyłącznie dla przemieszczeń w dziedzinie czasu węzła nr 3, bezpośrednio obciążonego, co w swoim zakresie odpowiada warunkom pomiaru ugięcia nawierzchni w osi obciążenia przy użyciu urządzenia FWD.

W pierwszej kolejności obliczenia FFT przeprowadzono dla zdefiniowanej funkcji obciążenia i rezultatów uzyskanych modelem A, wartości przemieszczeń w dziedzinie czasu węzła nr 3. Rezultaty obliczeń FFT przedstawiono na rysunku nr 48.

Następnie na podstawie wyników FFT obliczono wykorzystując kolejno wzory nr 34 i 35 parametry a'_1, a'_2 dla zakresu częstotliwości od 0 do 80 Hz, które przedstawiono na rysunku nr 49.

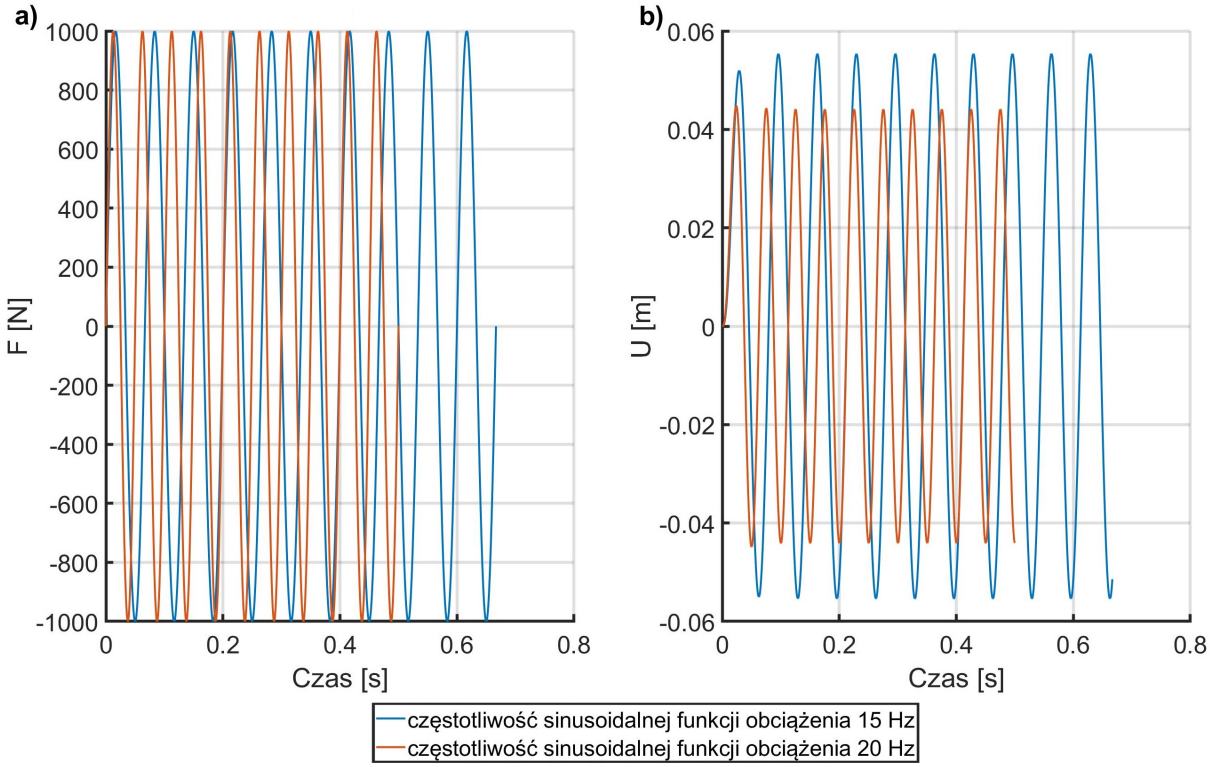


Rys. 48: Ilustracja graficzna uzyskanych dla węzła nr 3 modelu A widm częstotliwościowych: a) amplitudy siły, b) faz początkowych siły, c) amplitudy przemieszczenia, d) faz początkowych przemieszczenia



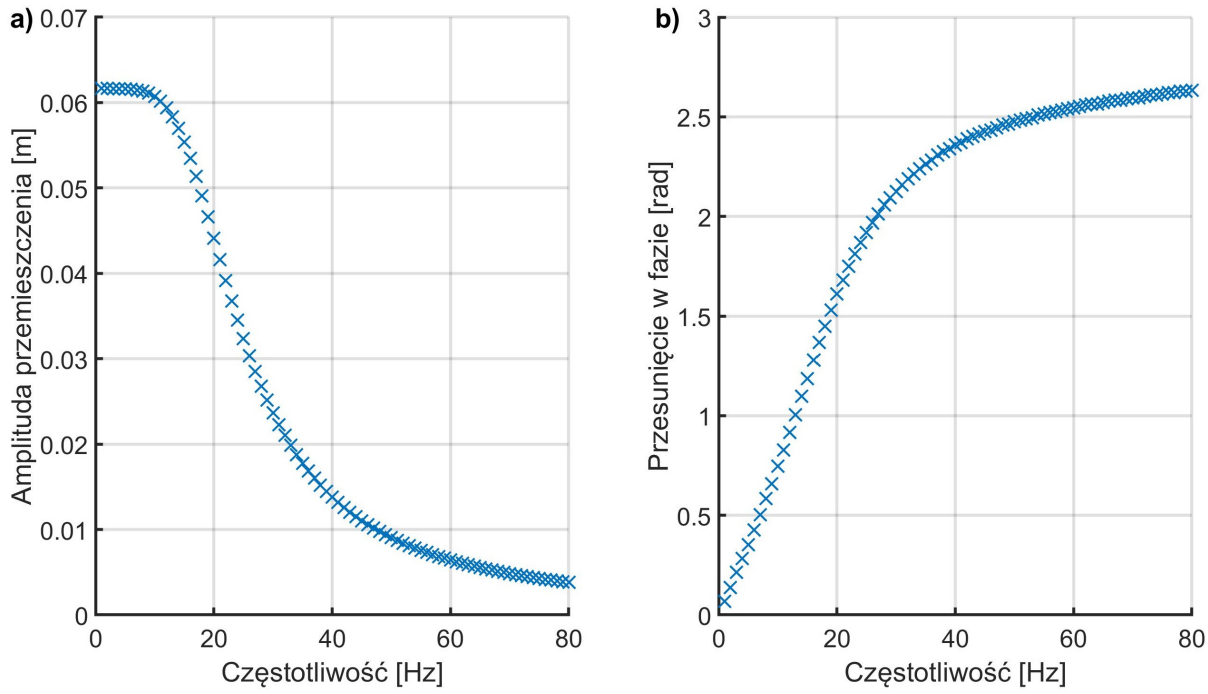
Rys. 49: Wykres obliczonych dla węzła nr 3 modelu A wartości: a) a_1', b) a_2'

Poprzez analizę wyników przedstawionych na rysunku nr 49, ustalono że obliczone wartości a_1' i a_2' nie są równe zdefiniowanym wartościom parametrów modelu A i nie można ich obliczyć za pomocą przedstawionej metody wykorzystującej FFT. Należy jednak pamiętać, że poprzez zastosowanie FFT dla wyników uzyskanych za sprawą użycia modelu A obliczono wartości amplitud przemieszczeń, które uzyskano by poprzez definicję w modelu obciążenia w postaci jednej funkcji harmonicznej o określonej częstotliwości i amplitudzie. W celu weryfikacji tej tezy, wykonano kolejne obliczenia z wykorzystaniem modelu A, dla którego zdefiniowano obciążenia w postaci funkcji sinusoidalnej o określonych parametrach: amplitudzie równej 1000 N i częstotliwości od 1 do 80 Hz, z krokiem co 1 Hz. Przykładowe zestawy wyników obliczeń dla modelu A odpowiadających częstotliwości 15 oraz 20 Hz funkcji sinusoidalnej obciążenia przedstawiono na rysunku nr 50.



Rys. 50: Wykresy dwóch przykładowych funkcji opisujących: a) zdefiniowane obciążenie, b) obliczone wartości przemieszczeń węzła nr 3 modelu A

Dla wykonanych obliczeń istotne było zdefiniowanie obciążenia w postaci funkcji sinusoidalnej określonej jedną częstotliwością i dziesięcioma okresami dla uzyskania ustabilizowanej wartości amplitudy przemieszczenia. Wszystkie z zakresu od 1 do 80 Hz obliczone wartości amplitud przemieszczenia (odczytane dla 10 okresu obciążenia) oraz ich przesunięcia w fazie względem zdefiniowanej funkcji obciążenia przedstawiono na rysunku nr 51.



Rys. 51: Ilustracja graficzna wyników obliczeń dla zakresu przypadków częstotliwości od 1 do 80 Hz sinusoidalnej funkcji obciążenia modelu A: a) wartości amplitud przemieszczeń, b) wartości przesunięć fazowych przemieszczeń względem funkcji obciążenia

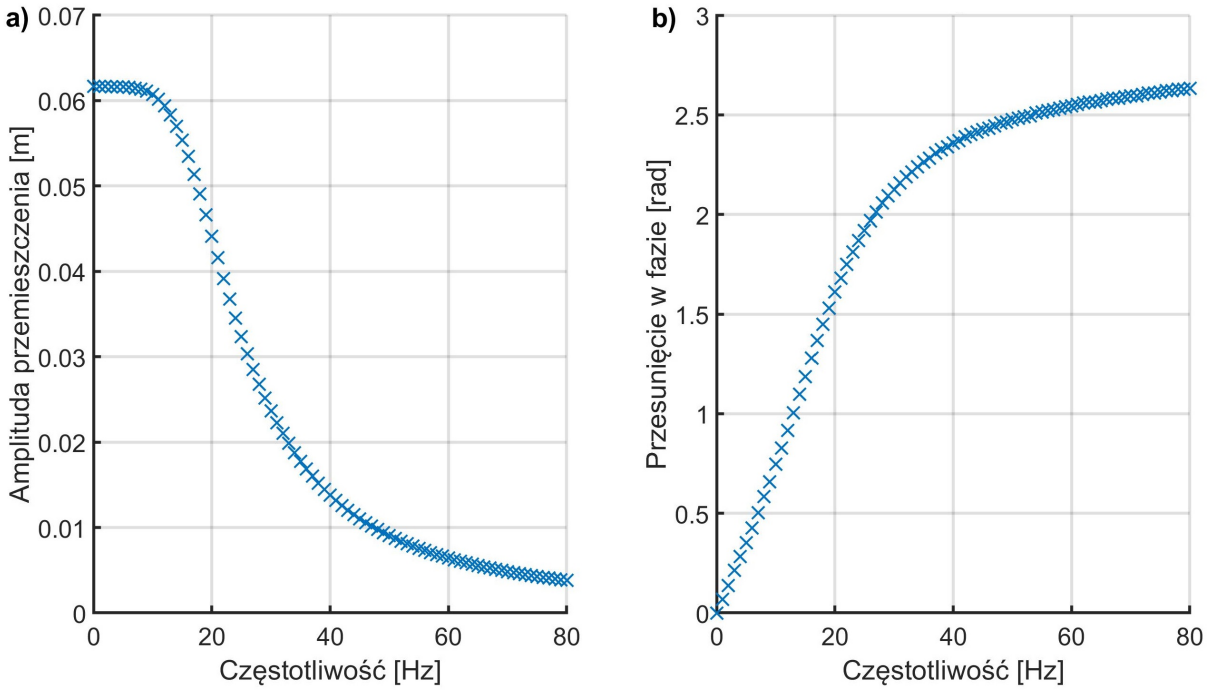
Do kompletu wyników z zakresu częstotliwości od 0 do 80 Hz brakowało wartości odpowiadających częstotliwości 0 Hz, dla której można założyć brak wpływu tłumienia i bezwładności, stąd obliczenia wykonano wykorzystując statyczną analizę modelu SDOF (obliczenie dla modelu, na którego układ składają się tylko sprężyny). Do wykonania statycznej analizy modelu zdefiniowano układ węzłów i sprężyn odpowiadający modelowi A oraz wartość obciążenia równą 1000 N. Kompletny zbiór wyników obliczeń, uzupełniony o obliczoną wartość amplitudy przemieszczenia i przesunięcia fazowego równego 0 rad dla częstotliwości sinusoidalnej funkcji obciążenia równej 0 Hz, przedstawiono na rysunku nr 52.

Na tym etapie, obliczone wartości amplitud przemieszczeń oraz ich przesunięć w fazie względem funkcji obciążenia (przedstawione na rysunku nr 52) przyjęto jako referencyjne (dalej oznaczane $U_{amp,ref}(fre)$ i $\varphi_{ref}(fre)$), i które w dalszej części rozważań wykorzystano do porównania z obliczeniami na zbiorze wyników FFT przedstawionych na rysunku nr 48. Do obliczenia odpowiednio wartości $U_{amp,fft}(fre)$ i $\varphi_{fft}(fre)$ autor ustalił następujące postacie wzorów nr 36 i 37.

$$U_{amp,fft}(fre) = a_U(fre) \cdot \frac{F_{amp}}{a_F(fre)} \tag{36}$$

$$\varphi_{fft}(fre) = \varphi_F(fre) - \varphi_U(fre) \tag{37}$$

gdzie: $U_{amp,fft}(fre)$ – obliczona wartość amplitudy przemieszczenia odpowiadająca częstotliwości fre harmonicznej funkcji obciążenia, $\varphi_{fft}(fre)$ – obliczona wartość przesunięcia w fazie harmonicznej przemieszczenia o częstotliwości fre względem harmonicznej obciążenia o tej samej częstotliwości, $a_U(fre)$ – obliczona wartość amplitudy przemieszczenia, $\varphi_U(fre)$ – obliczona wartość fazy początkowej przemieszczenia, $a_F(fre)$ – obliczona wartość amplitudy obciążenia, $\varphi_F(fre)$ – obliczona wartość fazy początkowej obciążenia, F_{amp} – wartość referencyjnej amplitudy harmonicznej funkcji obciążenia, którą w eksperymencie numerycznym przyjęto równą 1000 N.



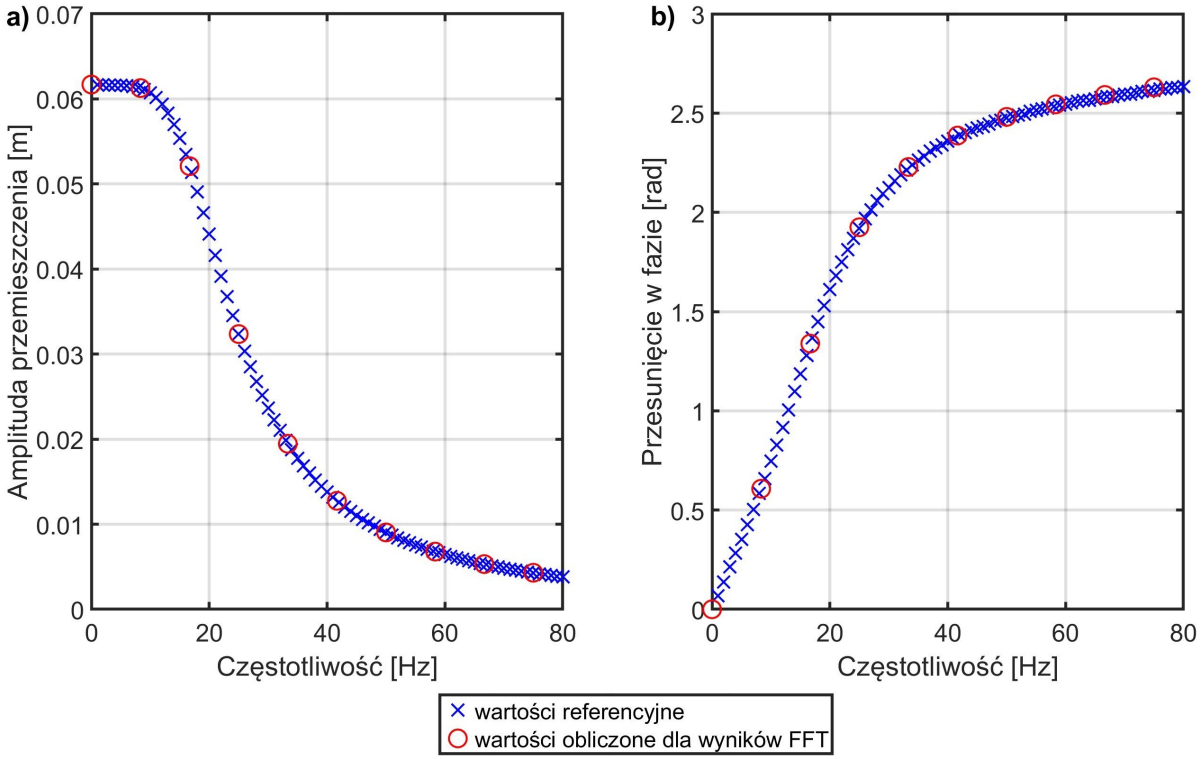
Rys. 52: Ilustracja graficzna wyników obliczeń dla zakresu przypadków częstotliwości od 0 do 80 Hz sinusoidalnej funkcji obciążenia modelu A: a) wartości amplitud przemieszczeń, b) wartości przesunięć fazowych przemieszczeń względem funkcji obciążenia

Obliczone wartości $U_{amp,fft}(fre)$ i $\varphi_{fft}(fre)$ na tle wartości referencyjnych $U_{amp,ref}(fre)$ i $\varphi_{ref}(fre)$ przedstawiono na rysunku nr 53.

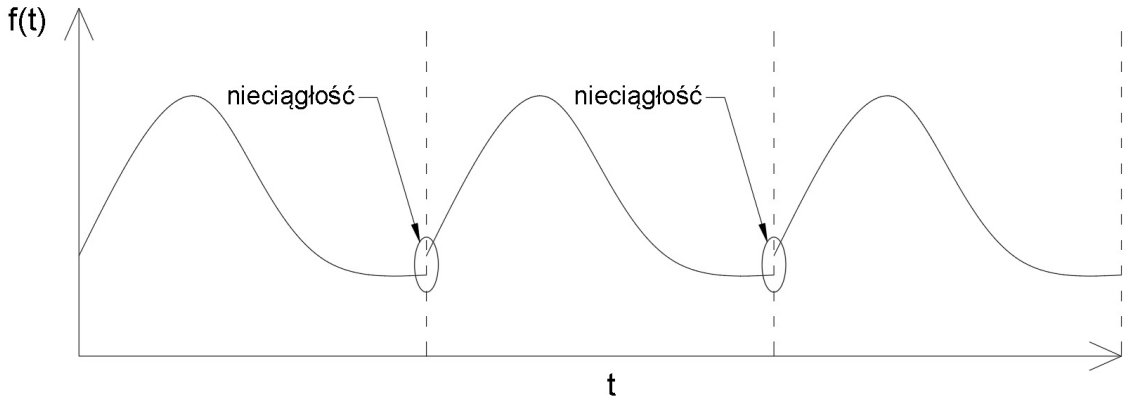
Na podstawie uzyskanych wyników eksperymentu numerycznego (wykresy na rysunku nr 53) potwierdzono możliwość obliczenia FFT wartości $U_{amp}(fre)$ i $\varphi(fre)$ na podstawie funkcji obciążenia i przemieszczenia obliczonej z użyciem modelu A.

Następnie w analogiczny sposób jak dla modelu A podjęto się obliczenia wartości $U_{amp}(fre)$ i $\varphi(fre)$ dla modelu B poprzez transformatę FFT obliczonych wartości obciążenia i przemieszczeń w dziedzinie czasu dla węzła nr 3 (odpowiednio wykresy na rysunkach nr 43a i 47b). W tym przypadku zastosowanie FFT wiązało się z przeprowadzeniem obliczeń dla funkcji przemieszczenia, której wartość pierwszej

i ostatniej próbki nie są sobie równe, czego następstwem są błędy w obliczanych wartościach FFT związane z tzw. efektem przecieku widmowego (nieciągłości wydłużonego w nieskończoność sygnału poprzez wielokrotne powtórzenie w trakcie obliczania FFT, którą przedstawiono na rysunku nr 54).

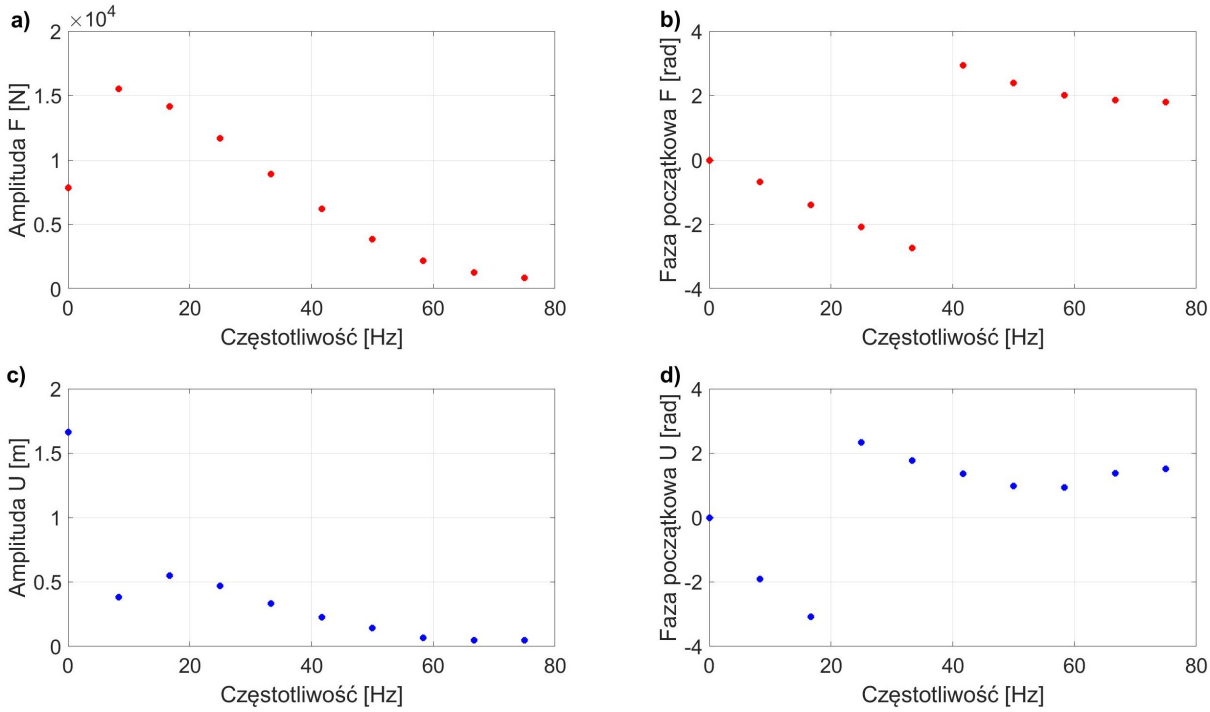


Rys. 53: Obliczone z użyciem modelu A wartości: a) $U_{amp,ref}(fre)$ i $U_{amp,fft}(fre)$ oraz b) $\varphi_{ref}(fre)$ i $\varphi_{fft}(fre)$



Rys. 54: Nieciągłość powtarzanego w nieskończoność przykładowego sygnału, która jest niepożądana dla wykonania obliczeń FFT i typowa dla wyników pomiarów metodą FWD

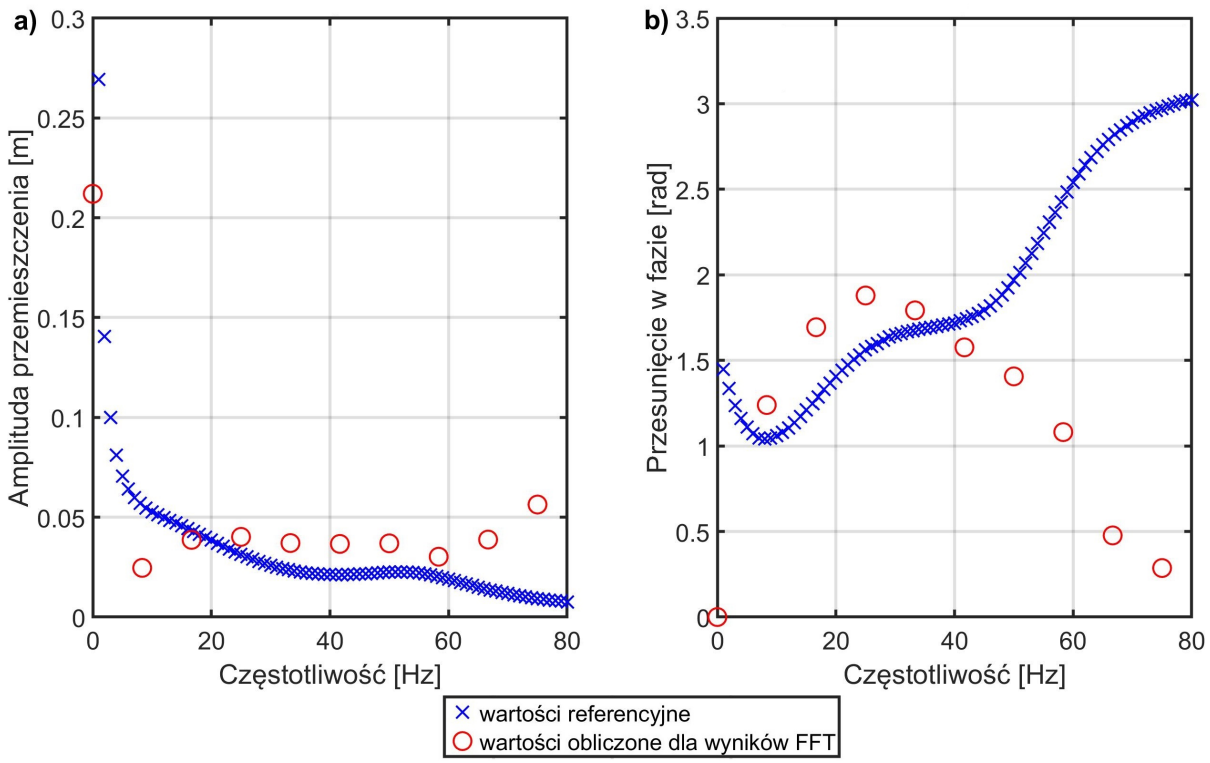
Mając na celu ocenę wpływu nieciągłości dyskretnego sygnału przemieszczenia węzła nr 3 modelu B na wyniki FFT, w pierwszym kroku przeprowadzono obliczenia bez ograniczenia efektu przecieku, a ich wyniki przedstawiono na rysunku nr 55.



Rys. 55: Ilustracja graficzna uzyskanych dla węzła nr 3 modelu B widm częstotliwościowych: a) amplitudy siły, b) faz początkowych siły, c) amplitudy przemieszczenia, d) faz początkowych przemieszczenia

Następnie wykorzystując wzory nr 36 i 37 dla uzyskanych wyników FFT obliczono wartości $U_{amp,fft}(fre)$ i $\varphi_{fft}(fre)$, które porównano z wartościami referencyjnymi $U_{amp,ref}(fre)$ i $\varphi_{ref}(fre)$. Wartości referencyjne $U_{amp,ref}(fre)$ i $\varphi_{ref}(fre)$ dla modelu B uzyskano w analogiczny sposób jak dla modelu A i zakresu przypadków funkcji harmonicznych obciążenia o częstotliwościach od 1 do 80 Hz, z krokiem co 1 Hz. Pominięto wykonanie dla modelu B analizy statycznej dla obliczenia wartości odpowiadających częstotliwości harmonicznej obciążenia równej 0 Hz, które ze względu na połączenie węzła nr 1 z węzłem nr 2 wyłącznie poprzez tłumik było niemożliwe do wykonania (brak możliwości wykonania obliczeń dla modelu B, z którego usunięto by wszystkie tłumiki). Obliczone wartości $U_{amp,fft}(fre)$ i $\varphi_{fft}(fre)$ oraz referencyjne $U_{amp,ref}(fre)$ i $\varphi_{ref}(fre)$ przedstawiono na rysunku nr 56.

Poprzez porównanie obliczonych dla modelu B wartości $U_{amp,ref}(fre)$ i $U_{amp,fft}(fre)$ oraz $\varphi_{ref}(fre)$ i $\varphi_{fft}(fre)$ potwierdzono konieczność ograniczenia wpływu efektu przecieku widmowego dla uzyskania użytecznych wyników obliczeń z wykorzystaniem FFT.



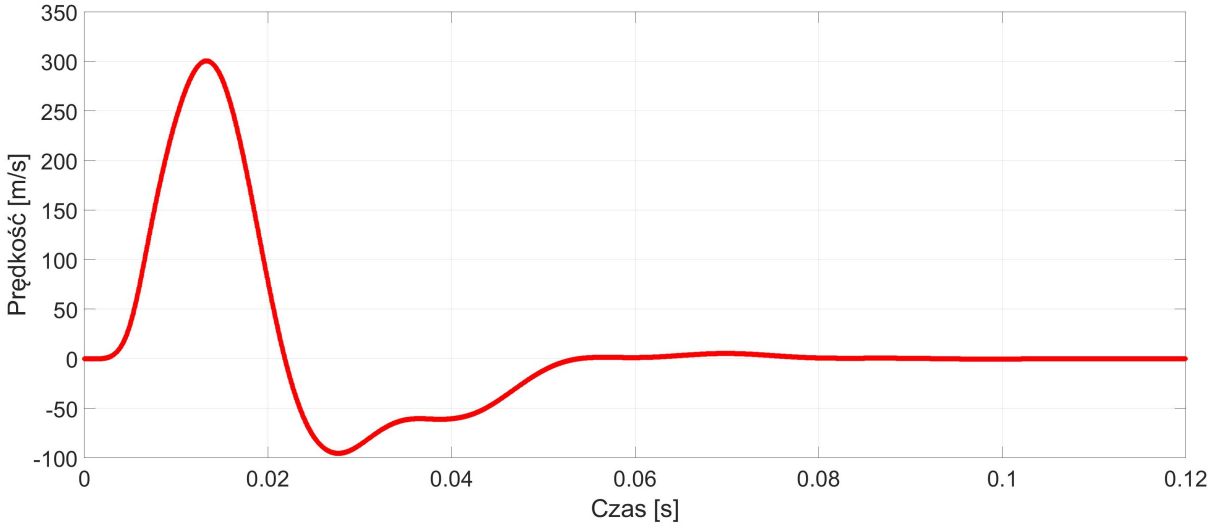
Rys. 56: Obliczone dla modelu B wartości: a) $U_{amp,ref}(fre)$ i $U_{amp,fft}(fre)$ oraz b) $\varphi_{ref}(fre)$ i $\varphi_{fft}(fre)$

Autor rozprawy dla ograniczenia wpływu przecieku widmowego na jakość obliczeń FFT opracował metodę, w której obliczeniu FFT nie jest poddawany sygnał przemieszczenia tylko prędkości, a uzyskany zbiór wyników poddaje się całkowaniu w dziedzinie częstotliwości dla uzyskania wartości amplitud przemieszczeń i ich faz początkowych. Opracowaną metodę zastosowano dla wyników obliczeń modelu B, a pierwszym etapem było obliczenie pochodnej numerycznej wartości przemieszczeń w dziedzinie czasu węzła nr 3 dla uzyskania wartości prędkości w dziedzinie czasu, które przedstawiono na rysunku nr 57.

Dla obliczonych i przedstawionych na rysunku nr 57 wartości prędkości w dziedzinie czasu istotne w obliczeniu FFT jest to, że wartości początkowa i końcowa są sobie równe, co rozwiązuje problem nieciągłości (patrz rysunek nr 54). W kolejnym kroku obliczone wartości prędkości w dziedzinie czasu poddano procedurze FFT, w której przed obliczeniem wartości amplitud i faz początkowych wykonano całkowanie numeryczne w dziedzinie częstotliwości wykorzystując wzór nr 38.

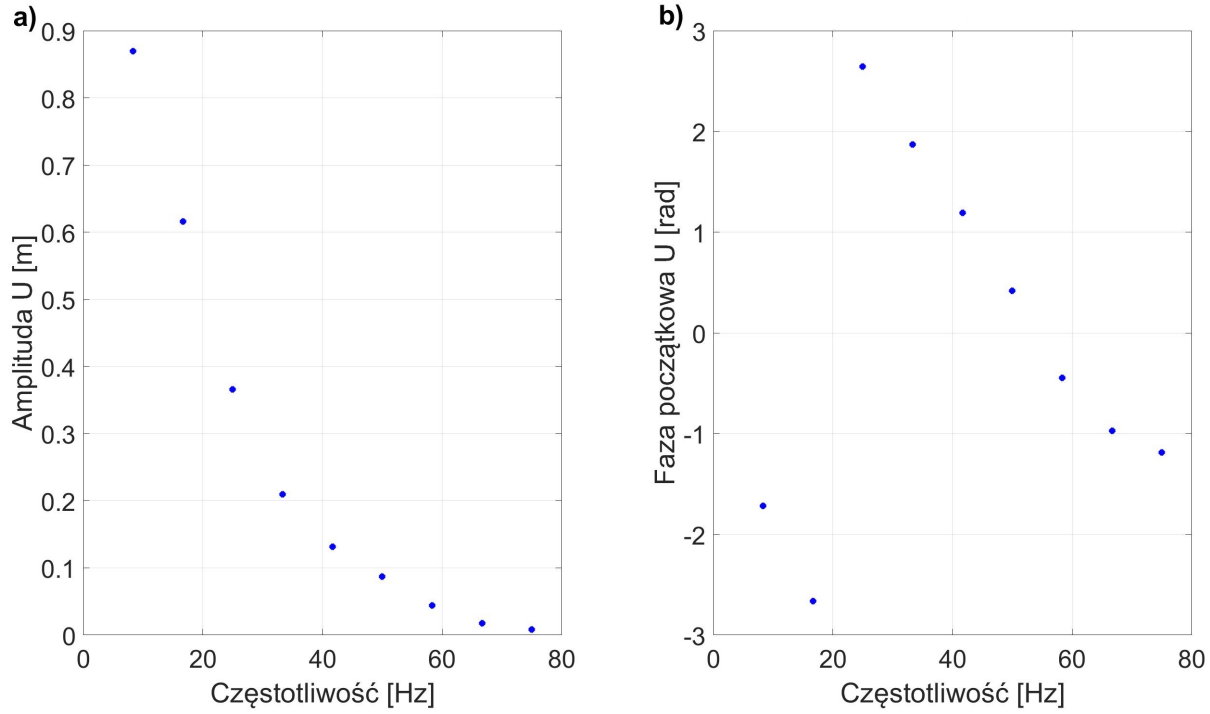
$$Z_U(fre) = \frac{Z_V(fre)}{2\pi \cdot fre} \tag{38}$$

gdzie: $Z_U(fre)$ – wartość zespolona FFT przemieszczenia odpowiadająca częstotliwości fre, $Z_V(fre)$ – wartość zespolona FFT prędkości odpowiadająca częstotliwości fre.



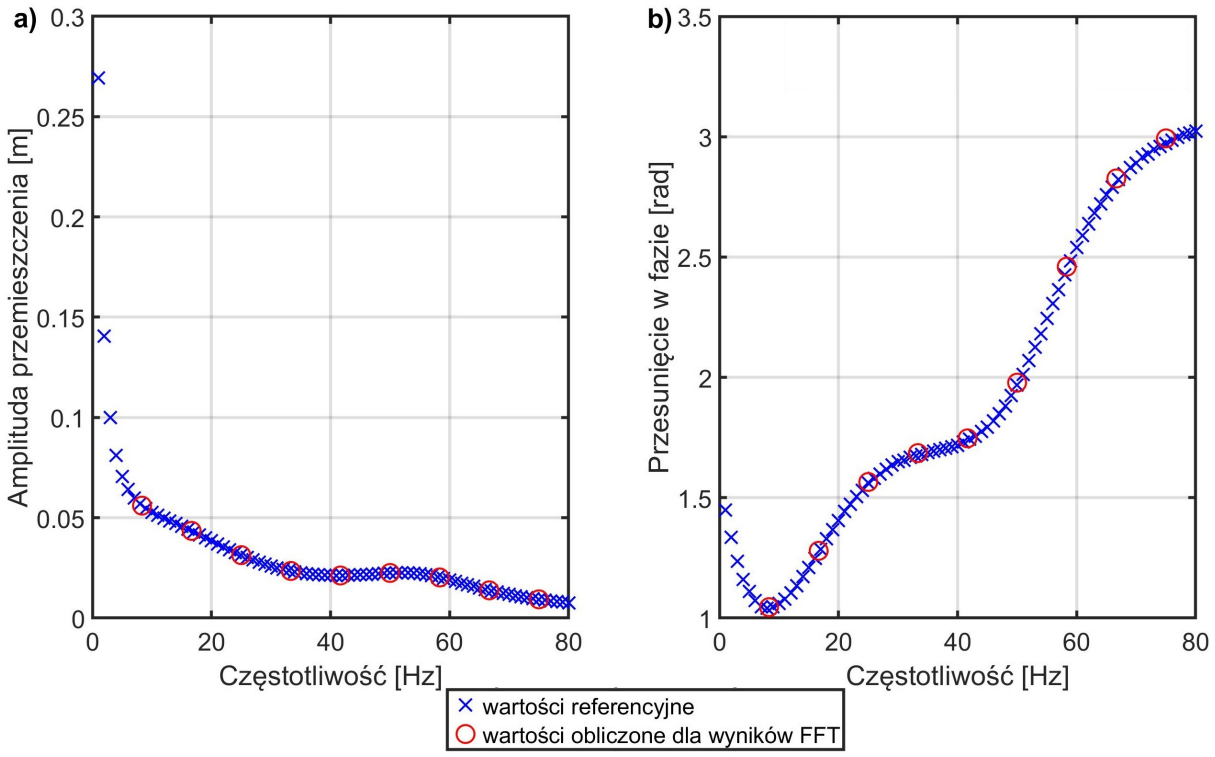
Rys. 57: Obliczone prędkości w dziedzinie czasu węzła nr 3 modelu B

Obliczone z wykorzystaniem procedury FFT z całkowaniem wartości amplitud przemieszczeń i ich faz początkowych przedstawiono na rysunku nr 58.



Rys. 58: Obliczone dla węzła nr 3 modelu B z użyciem procedury FFT z całkowaniem w dziedzinie częstotliwości wartości: a) amplitud przemieszczeń, b) faz początkowych przemieszczeń

Następnie wykorzystując obliczone wartości amplitud i faz początkowych przemieszczeń (przedstawione na rysunku nr 58), obciążenia (rysunki nr 55a i 55b) oraz wzory nr 36 i 37, obliczono wartości $U_{amp,fft}(fre)$ i $\varphi_{fft}(fre)$, które wraz z wartościami referencyjnymi przedstawiono na rysunku nr 59.

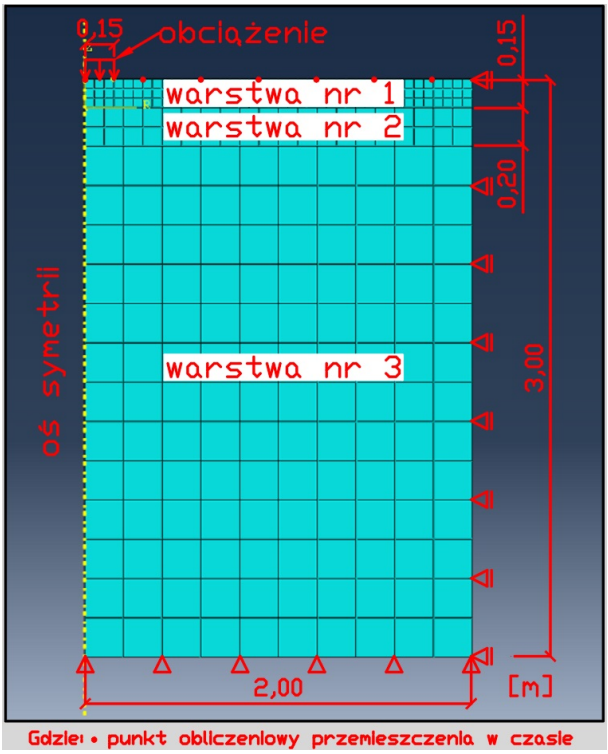


Rys. 59: Obliczone dla modelu B wartości: a) $U_{amp,ref}(fre)$ i $U_{amp,fft}(fre)$, b) $\varphi_{ref}(fre)$ i $\varphi_{fft}(fre)$, które obliczono z użyciem procedury FFT z wykonaniem całkowania w dziedzinie częstotliwości

Uzyskanymi i przedstawionymi wynikami na rysunku nr 59 potwierdzono możliwość obliczenia wartości $U_{amp}(fre)$ i $\varphi_(fre)$ również dla sygnałów niecyklicznych, dla których ograniczono przeciek widmowy poprzez wykonanie obliczenia FFT z wykonaniem całkowania w dziedzinie częstotliwości dla funkcji prędkości w dziedzinie czasu.

Potwierdzona w zakresie eksperymentu numerycznego przeprowadzonego dla modeli SDOF A i B możliwość obliczenia FFT wartości amplitudowych przemieszczeń $U_{amp}(fre)$ odpowiadających określonej częstotliwości i wartości obciążenia jest zasadniczym elementem opracowanego przez autora algorytmu realizującego obliczenia odwrotne, którego rezultatem są wartości dynamicznych parametrów materiałowych warstw modelu nawierzchni. Opracowaną procedurę obliczeniową zaprezentowano poprzez wyniki przedstawionego ostatniego w niniejszym rozdziale eksperymentu numerycznego, którego podstawę stanowią rezultaty obliczeń wykonanych numerycznym modelem nawierzchni jezdni, i które zrealizowano przy wykorzystaniu programu ABAQUS Student Edition 2020.

W opracowanym modelu nawierzchni przyjęto warunki obciążenia i brzegowe odpowiadające występującym w trakcie pomiarów urządzeniem FWD. Na rysunku nr 60 przedstawiono opracowany i wykorzystany do obliczeń model nawierzchni.



Rys. 60: Opracowany model nawierzchni, którego przyjęty układ warunków obciążenia i brzegowych odpowiada warunkom występującym w trakcie pomiarów urządzeniem FWD

Przyjęte w ramach przeprowadzonego eksperymentu numerycznego wartości parametrów trzech warstw modelu obliczeniowego nawierzchni zestawiono w tabeli nr 8.

Tab. 8: Zestawienie wartości parametrów warstw modelu obliczeniowego nawierzchni

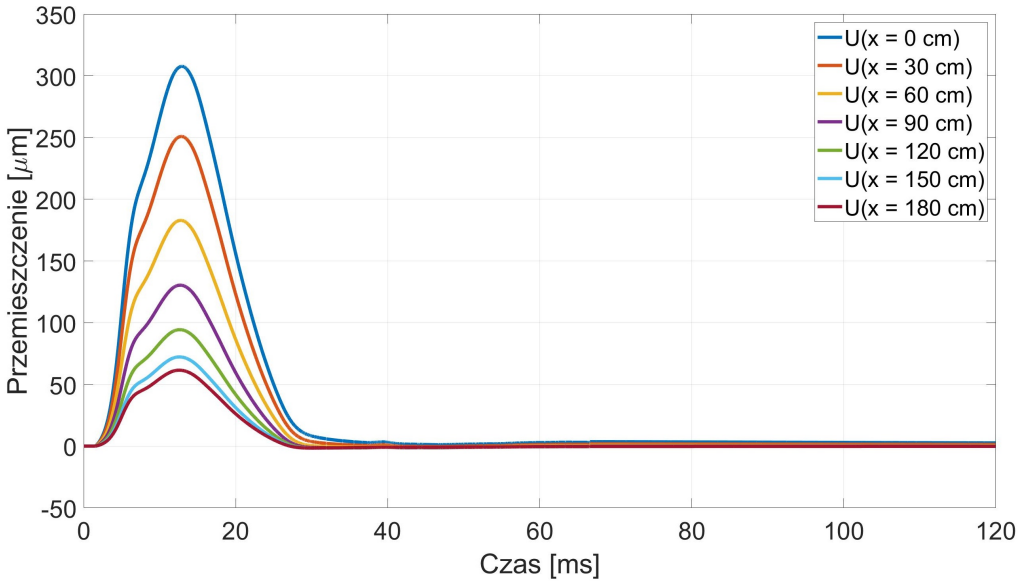
Nr	Modelowana warstwa	Grubość [m]	Model materału	Parametry materiałowe i ich wartości
1	pakiet warstw z MMA	0,15	lepkosprężysty, uogólniony model Maxwella	$E_0 = 16528\ MPa$, $e_1 = 0,3143\ [-], e_2 = 0,3283\ [-]$,** $\tau_1 = 0,6929\ [s], \tau_2 = 0,0284\ [s]$**
2	KŁSM	0,20	sprężysty	$E_2 = 400\ MPa, \nu_2 = 0,3\ [-]$
3	Podłoże	∞(2,65*)	sprężysty	$E_3 = 80\ MPa, \nu_3 = 0,3\ [-]$

*grubość warstwy ograniczona skończonym wymiarem modelu
**wartości parametrów modelu lepkosprężystego, szeregu Prony'ego, które obliczono metodą przedstawioną w pracy [275] dla zamieszczonych w pozycji [56] wyników oznaczenia modułów sztywności w temperaturze 20°C dla betonu asfaltowego do warstwy wiążącej

Obliczenia z użyciem modelu nawierzchni wykonano przy zdefiniowaniu:

- analizy obliczeniowej VISCO (analiza statyczna z uwzględnieniem zachowania materiału, którego właściwości zależą od czasu, w tym przypadku lepkosprężystości) [276],
- osiowo-symetrycznych elementów skończonych o ośmiu węzłach (typ CAX8R) [276],
- wartości obciążenia w czasie równego zarejestrowanemu w trakcie pomiarów urządzeniem FWD, które przedstawiono na rysunku nr 43a.

Wyniki uzyskane przy wykorzystaniu modelu nawierzchni FEM przedstawiono na rysunku nr 61, i które odpowiadają swoim zakresem rezultatom uzyskiwanym w trakcie pomiaru urządzeniem FWD (wartości przemieszczeń w dziedzinie czasu obliczono w 7 punktach obliczeniowych zaznaczonych na rysunku nr 60, które kolejno są zlokalizowane w odległości x = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 cm od osi obciążenia).

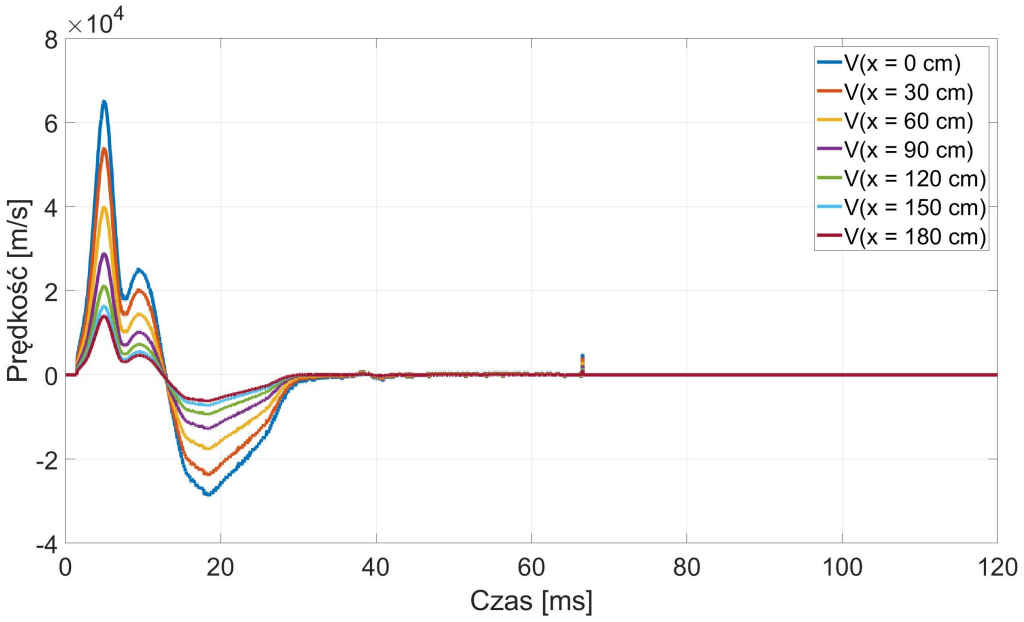


gdzie: x - odległość punktu obliczeniowego od osi obciążenia

Rys. 61: Wartości obliczonych przemieszczeń w dziedzinie czasu w 7 punktach obliczeniowych modelu nawierzchni FEM

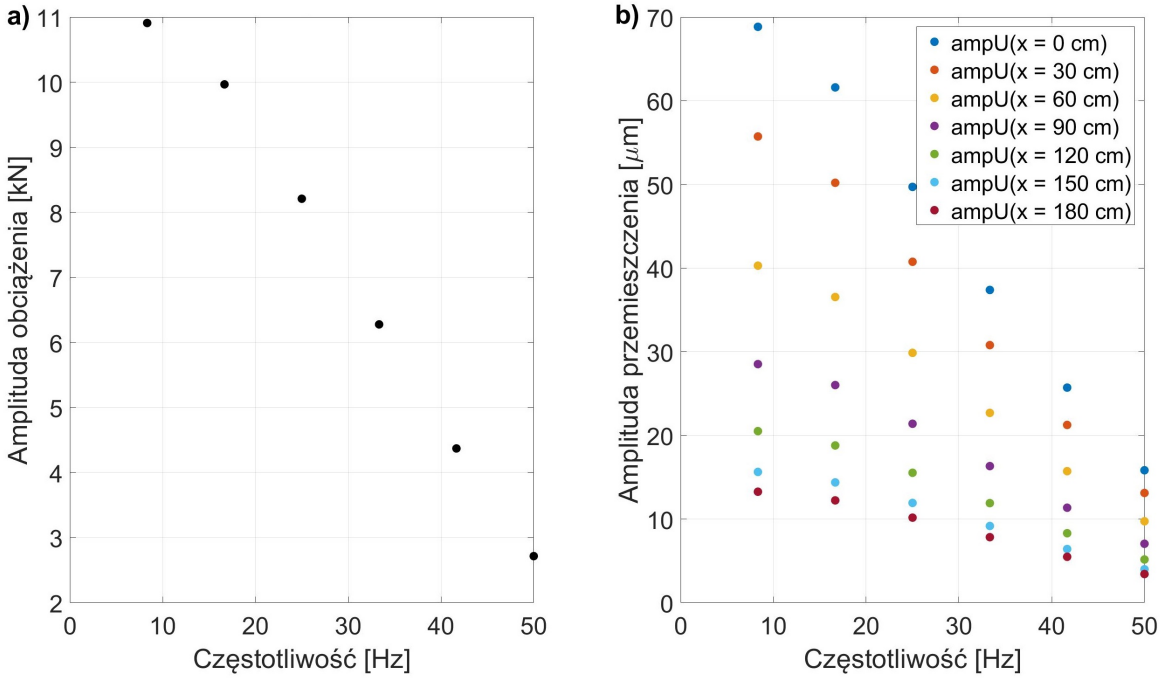
Przedstawione na rysunku nr 61 wartości przemieszczeń w dziedzinie czasu oraz na rysunku nr 43a wartości obciążenia w dziedzinie czasu były danymi wejściowymi do przeprowadzenia obliczeń opracowanym algorytmem realizującym obliczenia odwrotne. W pierwszym kroku przeliczono obliczone z użyciem modelu wartości przemieszczeń w dziedzinie czasu do wartości prędkości, które przedstawiono na rysunku nr 62.

Następnie wykonano obliczenie FFT dla wartości obciążenia modelu w dziedzinie czasu oraz FFT z całkowaniem w dziedzinie częstotliwości dla obliczonych wartości prędkości w dziedzinie czasu. Na rysunku nr 63 przedstawiono obliczone FFT wartości amplitud obciążenia i przemieszczenia.



gdzie: x - odległość punktu obliczeniowego od osi obciążenia

Rys. 62: Przeliczone wartości przemieszczeń do wartości prędkości w dziedzinie czasu



gdzie: x - odległość punktu obliczeniowego od osi obciążenia

Rys. 63: Obliczone FFT wartości amplitud: a) obciążenia, b) przemieszczenia

Mając obliczone wartości amplitud obciążenia i przemieszczeń, wykorzystując wzór nr 36, przeliczono wartości amplitud przemieszczeń do odpowiadającej wartości amplitudowej obciążenia równej $F_{amp} = 50\ kN$. Znormalizowane do 50 kN wartości amplitud przemieszczeń przedstawiono na rysunku nr 64.

W kolejnym kroku procedury obliczeniowej wykorzystano przedstawione na rysunku nr 64 wartości amplitud przemieszczeń do zbudowania linii przemieszczeń, której każda odpowiadała wartości obciążenia modelu równego 50 kN oraz kolejno częstotliwości 8,3; 16,7; 25,0; 33,3; 41,7 i 50,0 Hz. Na rysunku nr 65 przedstawiono zbudowane linie przemieszczeń, które aproksymowano funkcją sklejaną.

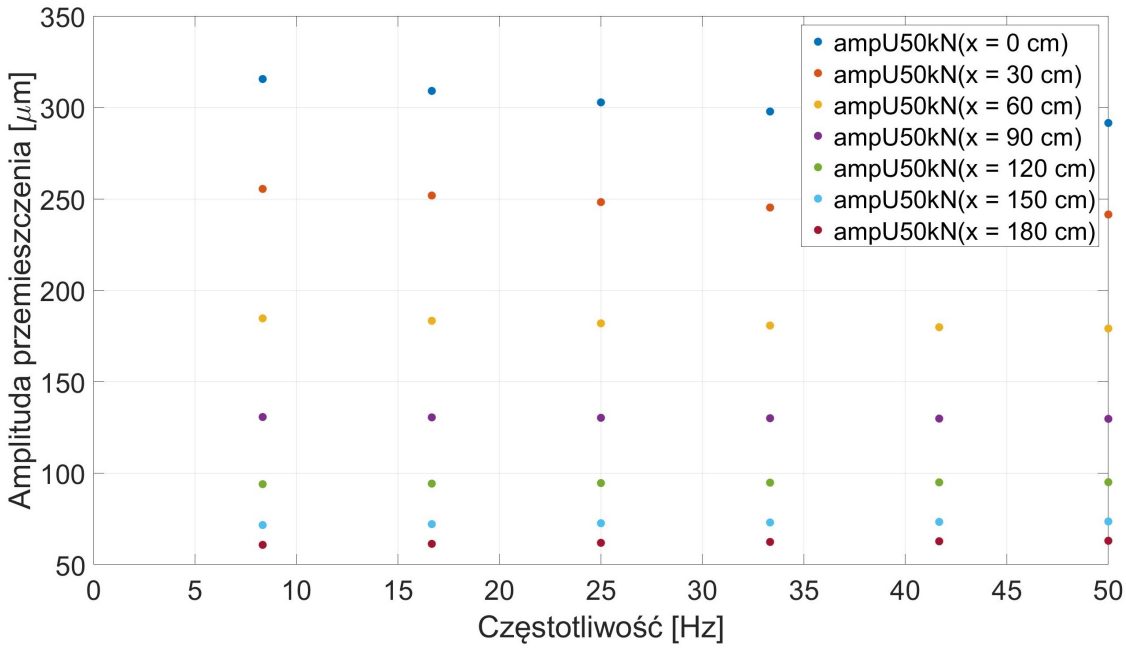
Następnie kolejno dla każdej przedstawionej na rysunku nr 65 linii przemieszczeń zastosowano algorytm realizujący obliczenia odwrotne, dla którego:

- wykorzystano model nawierzchni, którego geometria, warunki obciążenia i brzegowe były takie same jak modelu, którym obliczono wartości przemieszczeń w dziedzinie czasu,
- zdefiniowano analizę statyczną w modelu, stałą wartość obciążenia równą 50 kN oraz przyjęto modele materiałowe wszystkich trzech warstw jako sprężyste, stąd szukanymi wartościami parametrów były wartości modułów sprężystości poszczególnych warstw,
- użyto algorytm optymalizacyjny Nelder Mead [179] oraz funkcję błędu AVCF [149],
- przyjęto następujące wartości startowe modułów sprężystości $E_1 = 12\ 000$ MPa, $E_2 = 400$ MPa, $E_3 = 80$ MPa, gdzie cyfry 1, 2, 3 odpowiadają numeracji warstw modelu.

Otrzymane wyniki przeprowadzonych obliczeń odwrotnych zestawiono w tabeli nr 9.

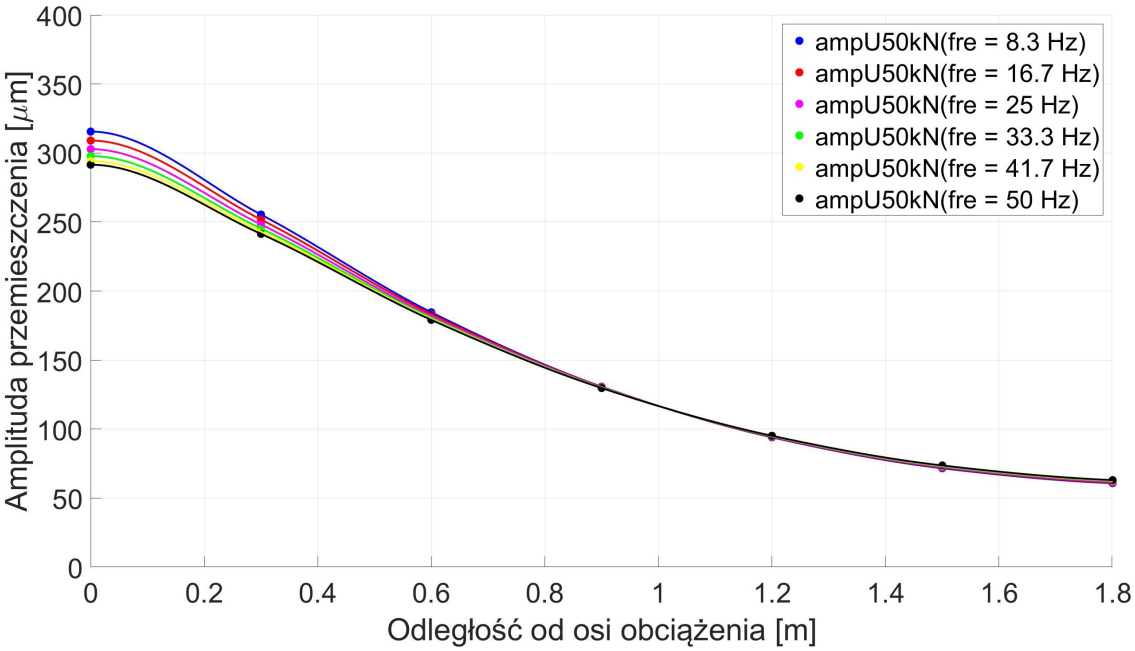
Tab. 9: Zestawienie wyników obliczeń odwrotnych

Częstotliwość [Hz]	Moduł sprężystości [MPa]			AVCF [%]
	E_1	E_2	E_3	
8,3	11440,7	401,8	79,9	0,02
16,7	12299,1	402,5	79,8	0,03
25,0	13170,0	403,5	79,8	0,03
33,3	13930,7	402,8	79,8	0,03
41,7	14549,6	397,2	80,0	0,03
50,0	14969,8	399,0	79,9	0,02



gdzie: x - odległość punktu obliczeniowego od osi obciążenia

Rys. 64: Wartości amplitud przemieszczeń znormalizowane do 50 kN



gdzie: fre - częstotliwość harmonicznej funkcji obciążenia

Rys. 65: Zbudowane linie przemieszczeń, której każda odpowiada wartości obciążenia modelu równej 50 kN oraz różnym częstotliwościom harmonicznej funkcji obciążenia

Obliczone algorytmem realizującym obliczenia odwrotne i zestawione w tabeli nr 9 wartości modułów sprężystości są wartościami parametrów wyrażającymi sztywność warstw wyjściowego modelu nawierzchni, które odpowiadają określonej częstotliwości harmonicznej funkcji obciążenia. Stąd dla oceny dokładności obliczonych wartości modułów sprężystości, porównano je z wartościami parametrów wyrażających sztywność warstw zdefiniowanych w modelu wyjściowym. W przypadku warstw nr 2 i 3 zdefiniowanych jako sprężyste w modelu wyjściowym, bezpośrednio porównano przyjęte i obliczone algorytmem realizującym obliczenia odwrotne wartości modułów sprężystości. Natomiast dla warstwy nr 1 zdefiniowanej w modelu jako materiał lepkosprężysty, podstawiając zdefiniowane wartości parametrów szeregu Prony'ego kolejno pod wzory nr 39, 40 i 41, obliczono wartości modułów sztywności $|E^*|$ dla częstotliwości: 8,3; 16,7; 25,0; 33,3; 41,7; 50,0 Hz, które porównano z obliczonymi procedurą odwrotną wartościami modułów sprężystości.

$$E' = E_0 \cdot (1 - \sum_{i=1}^{N} e_i + \sum_{i=1}^{N} \frac{e_i \cdot \tau_i^2 \cdot \omega^2}{1 + \tau_i^2 \cdot \omega^2}) \tag{39}$$

$$E'' = E_0 \cdot \frac{e_i \cdot \tau_i \cdot \omega}{1 + \tau_i^2 \cdot \omega^2} \tag{40}$$

$$|E^*| = \sqrt{E'^2 + E''^2} \tag{41}$$

gdzie: $|E^*|$ – moduł sztywności (wartość bezwzględna zespolonego modułu sztywności, zwana również dynamicznym modułem sztywności) [MPa], E' – część rzeczywista zespolonego modułu sztywności [MPa], E'' – część urojona zespolonego modułu sztywności [MPa], E_0, e_i i τ_i – parametry materiału lepkosprężystego, szeregu Prony'ego, ω – częstotliwość kątowa [rad]

Wyniki porównania wartości parametrów wyrażających sztywności warstw modelu nawierzchni zestawiono w tabeli nr 10.

Tab. 10: Zestawienie wyników porównania wartości parametrów wyrażających sztywności warstw modelu nawierzchni

Częstotliwość [Hz]	Moduły sprężystości [MPa]						Różnica względna [%]		
	zdefiniowane			obliczone					
	E_1*	E_2	E_3	E_1	E_2	E_3	dE_1	dE_2	dE_3
8,3	11430,2	400,0	80,0	11440,7	401,8	79,9	-0,09	-0,45	0,12
16,7	12320,8	400,0	80,0	12299,1	402,5	79,8	0,18	-0,63	0,25
25,0	13215,0	400,0	80,0	13170,0	403,5	79,8	0,34	-0,88	0,25
33,3	13966,8	400,0	80,0	13930,7	402,8	79,8	0,26	-0,70	0,25
41,7	14542,9	400,0	80,0	14549,6	397,2	80,0	-0,05	0,70	0,00
50,0	14970,1	400,0	80,0	14969,8	399,0	79,9	0,00	0,25	0,12

*wartości modułów sztywności obliczone z wykorzystaniem wzorów nr 39, 40 i 41

Na podstawie uzyskanych w eksperymencie numerycznym wyników porównania wartości parametrów wyrażających sztywności warstw modelu nawierzchni (maksymalna różnica

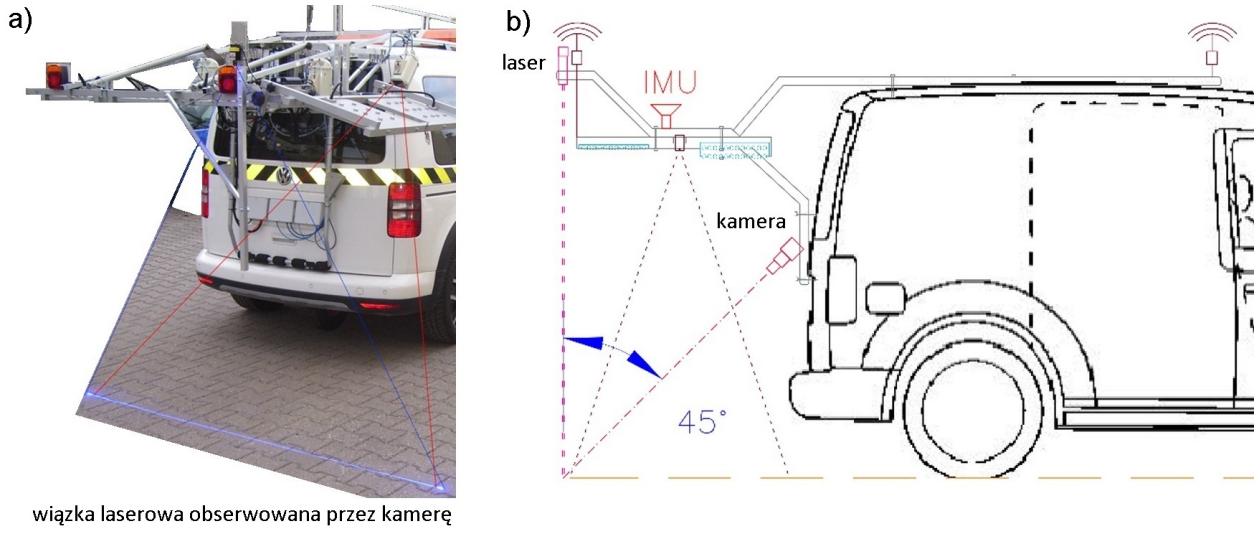
względna między wartościami modułów sprężystości/sztywności mniejsza niż 1%), potwierdzono możliwość obliczenia wartości dynamicznych parametrów materiałowych warstw modelu nawierzchni opracowanym autorskim algorytmem realizującym obliczenia odwrotne przeprowadzane dla zakresu wyników uzyskiwanych w trakcie pomiarów urządzeniem FWD.

5.3 Skanowanie profilu nawierzchni jezdni

Istotnym założeniem opracowanej w niniejszej rozprawie oryginalnej metody oceny nośności doraźnej asfaltowych nawierzchni drogowych było uwzględnienie dynamicznych obciążeń wywołanych ruchem pojazdów pokonujących nierówności nawierzchni jezdni. Stąd dla określenia nośności doraźnej nawierzchni wymagane jest wykonanie pomiarów nierówności nawierzchni, a dokładniej pomiarów wymiarów geometrycznych profilu nawierzchni jezdni, które można wykonać różnymi metodami:

- metoda łaty i klina,
- metoda geodezyjna (taśma miernicza, niwelator i łata),
- metoda pomiaru profilografem (np. aparat APL, profilograf laserowy) [38, 277],

oraz skanowania metodą triangulacji laserowej [278], którą zaadaptowano w systemie pomiarowym wybudowanym w ramach realizacji projektu PBS3/B6/36/2015 sfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju pt. "Inteligentny system monitoringu stanu technicznego nawierzchni jezdni". Projekt realizowany był między innymi przez Zespół z Zakładu Budownictwa Drogowego, Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej, w którego skład wchodził autor niniejszej rozprawy doktorskiej. Na rysunku nr 66 przedstawiono zdjęcie oraz schemat systemu pomiarowego zamontowanego na pojeździe.



Rys. 66: System pomiarowy zamontowany na pojeździe: a) zdjęcie, b) schemat [279]

Podstawą skanowania profilu nawierzchni jezdni jest wybudowany system, którego działanie opiera się na obserwacji kamerą linii laserowej, a następnie przekształcenie jej na współrzędne przestrzenne XYZ. Procedura obliczeniowa sprowadza się więc do dwóch etapów [280]:

a) detekcji linii laserowej zarejestrowanej przez kamerę,

b) przeliczenie wykrytej linii laserowej do układu współrzędnych XYZ.

Na jakość detekcji linii laserowej mają wpływ przede wszystkim zastosowane podzespoły systemu pomiarowego, w tym ich parametry oraz wzajemna lokalizacja, do których między innymi można zaliczyć:

- rozdzielczość obrazu rejestrowanego kamerą,

- zestaw filtrów zastosowanych na obiektywie kamery,

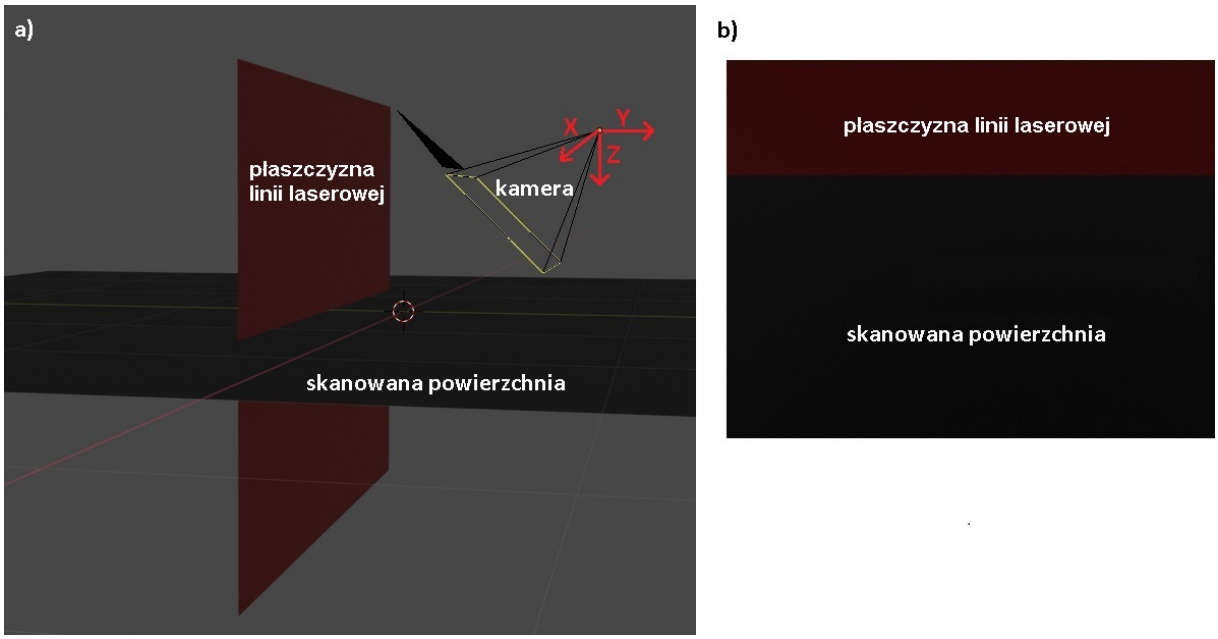
- grubość i kolor linii laserowej,

- kąt obserwacji linii laserowej podczas rejestracji przy pomocy kamery,

oraz na etapie obliczeń, zastosowane cyfrowe filtry zakłóceń i algorytmy eliminacji zniekształceń rejestrowanego obrazu [279, 281].

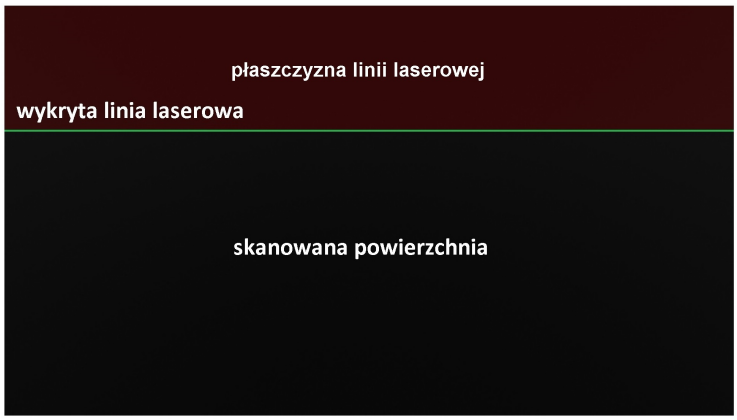
Drugi etap analizy dotyczy przeliczenia wykrytych linii laserowych do układu współrzędnych XYZ i wiąże się z przeprowadzeniem obliczeń, których wynikiem jest trójwymiarowy model będący geometryczną reprezentacją skanowanego obiektu. Procedura obliczeniowa dla wyników uzyskanych z użyciem opracowanego systemu pomiarowego oprócz przeliczenia współrzędnych pikseli do układu współrzędnych XYZ, wymaga jeszcze wprowadzenia korekt wynikających z drgań i obrotów układu kamera - linia laserowa względem skanowanej powierzchni, których źródłem są pokonywane przez pojazd nierówności nawierzchni. W dalszej części niniejszego podpunktu poprzez przedstawienie serii eksperymentów numerycznych, autor rozprawy zaprezentował procedurę jaką opracował do obliczania wymiarów geometrycznych elementów profilu nawierzchni jezdni uzyskanych przy wykorzystaniu urządzenia realizującego pomiary metodą triangulacji laserowej.

Podstawą przeprowadzonych eksperymentów numerycznych były trójwymiarowe modele odwzorowujące warunki pomiaru metodą triangulacji laserowej, które zostały wykonane przy wykorzystaniu programu Blender do tworzenia trójwymiarowych animacji [282]. Przykładowo opracowany model z opisem jego poszczególnych elementów oraz renderowany przy jego wykorzystaniu obraz, odpowiadający perspektywie kamery rejestrującej linię laserową, przedstawiono na rysunku nr 67.



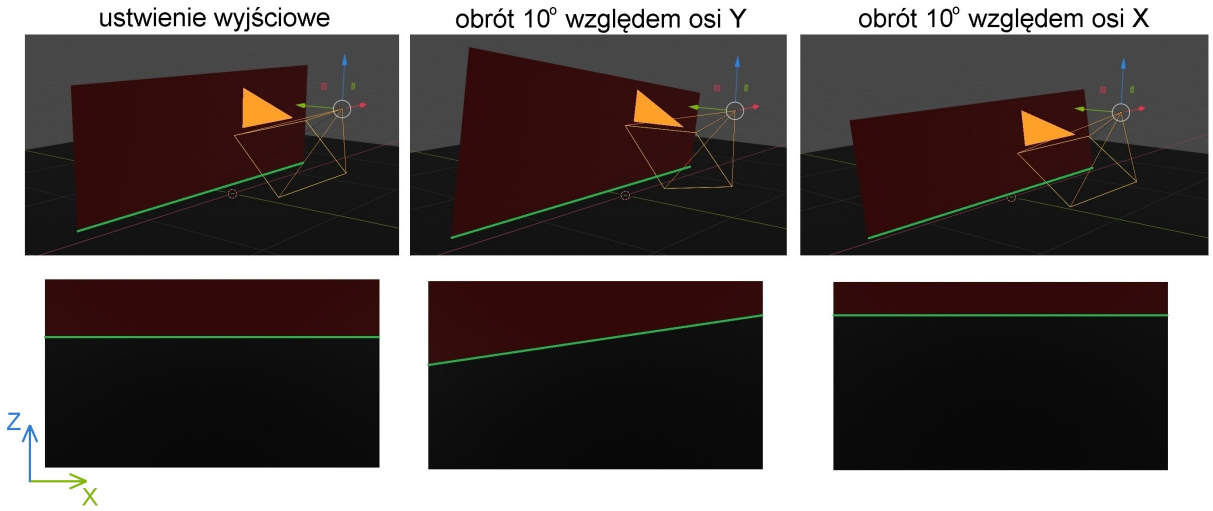
Rys. 67: Trójwymiarowy model odwzorowujący warunki pomiaru metodą triangulacji laserowej: a) widok modelu z opisem jego poszczególnych elementów, b) renderowany obraz widziany z perspektywy kamery

Podstawową różnicą między obrazem rejestrowanym z użyciem systemu pomiarowego (rysunek nr 66) i obrazem renderowanym przy użyciu modelu (rysunek nr 67b) jest zakres wymaganych obliczeń do detekcji linii laserowej. Zważywszy na to, że podjęte w rozprawie rozważania nie dotyczyły detekcji linii laserowej, ten etap obliczeń dla obrazu uzyskiwanego przy użyciu modelu maksymalnie uproszczono. W przeprowadzonych eksperymentach numerycznych detekcję linii laserowej sprowadzono wyłącznie do wyznaczenia linii pikseli zmiany koloru z czerwonego na czarny, którą zaznaczono zielonym kolorem na rysunku nr 68.



Rys. 68: Wynik detekcji linii laserowej dla przykładowego obrazu renderowanego przy użyciu modelu

Spełnienie warunku sztywnego zamocowania kamery i lasera względem siebie na ramie systemu pomiarowego uzyskano w modelu poprzez zdefiniowanie względnego powiązania lasera z kamerą, które zapewnia, że wraz ze zmianą pozycji kamery, zmienia się pozycja lasera. Dla obrazu renderowanego przy użyciu modelu możliwe jest więc uzyskanie efektu zmian rejestrowanej linii laserowej pod wpływem drgań i obrotów jakie występują w trakcie pokonywania przez pojazd diagnostyczny nierówności nawierzchni podczas pomiarów. Na rysunku nr 69 przedstawiono trzy przykładowe konfiguracje kamery i lasera względem skanowanej powierzchni wraz z odpowiadającymi im renderowanymi obrazami.



Rys. 69: Trzy przykładowe konfiguracje lasera i kamery względem skanowanej powierzchni wraz z odpowiadającymi im renderowanymi obrazami (oś X zielona, Y czerwona, Z niebieska)

Autor rozprawy wytypował trzy zmiany pozycji kamery i obserwowanej linii laserowej, które mają wpływ na wyniki skanowania podczas ruchu pojazdu po nierównej nawierzchni:

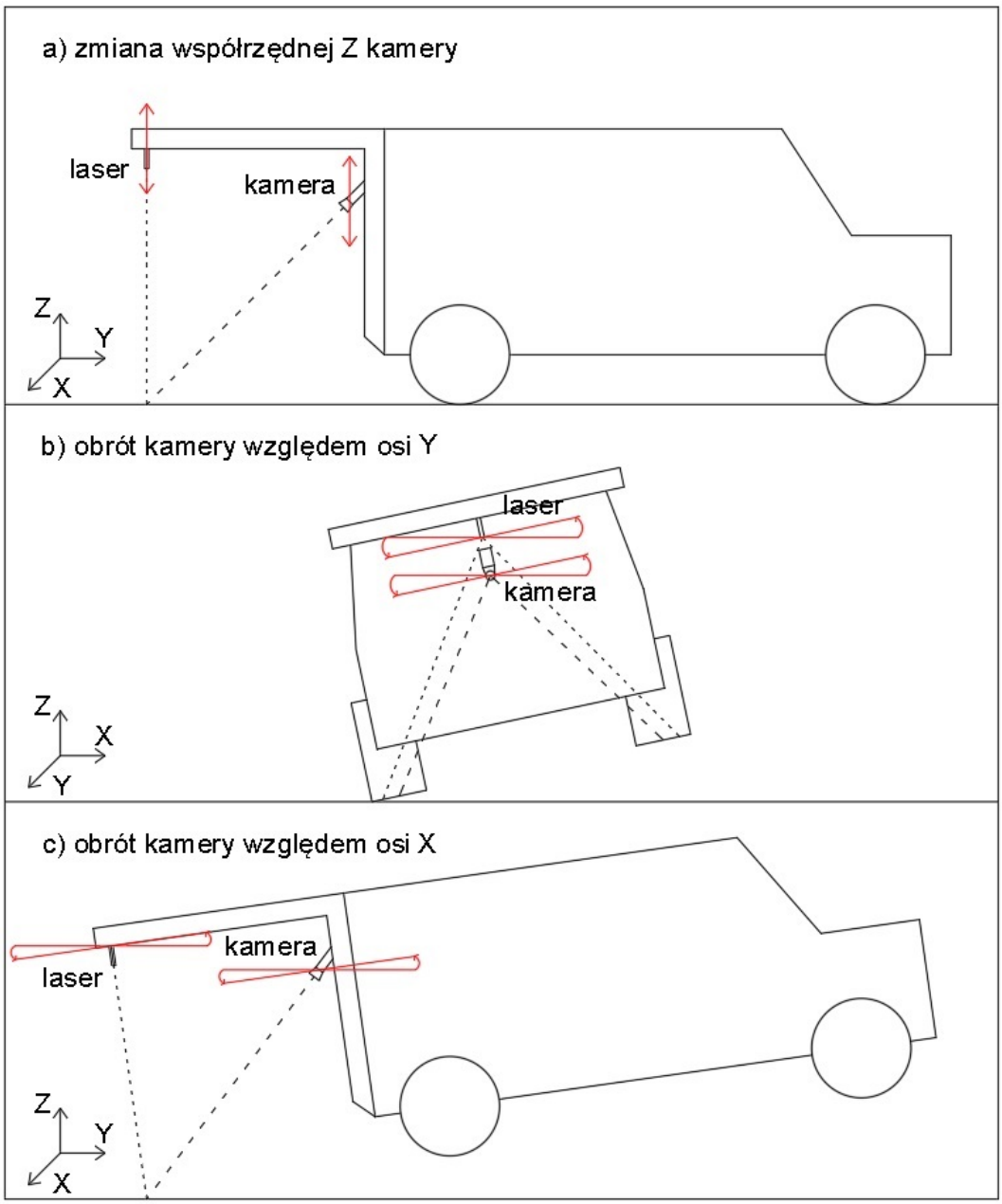
a) przemieszczenie pionowe kamery (w modelu zmiana współrzędnej Z),

b) obrót kamery wzdłuż osi długości pojazdu (w modelu obrót względem osi Y),

c) obrót kamery wzdłuż osi szerokości pojazdu (w modelu obrót względem osi X),

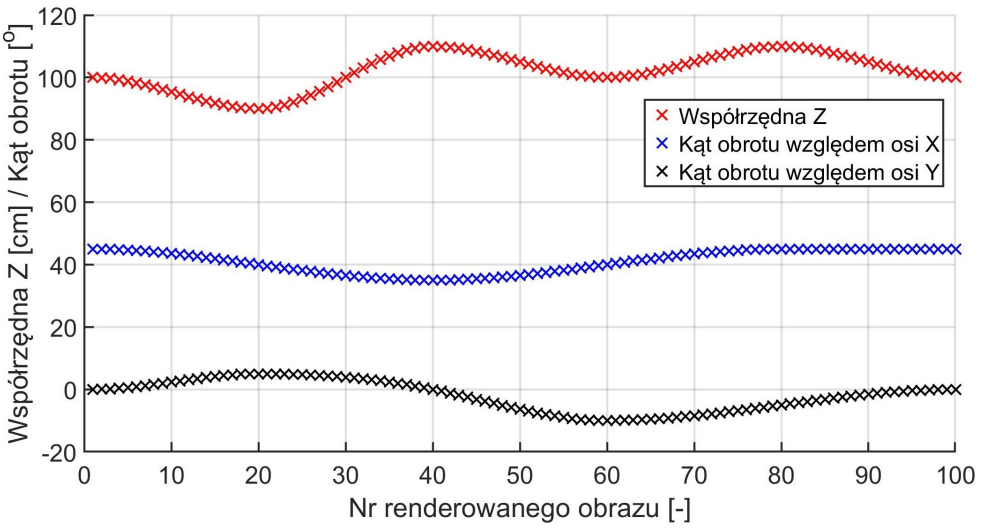
które schematycznie przedstawiono na rysunku nr 70.

Mając na celu przedstawienie i ocenę wpływu ustalonych przemieszczeń i obrotów kamery oraz lasera na uzyskiwane wyniki skanowania metodą triangulacji laserowej, wygenerowano przy użyciu modelu bazę 100 renderowanych obrazów odpowiadających skanowaniu idealnie płaskiej powierzchni. Wartości współrzędnej Z, kąta obrotu osi X oraz Y kamery i lasera względem skanowanej powierzchni, które odpowiadają kolejno wyrenderowanym obrazom, przedstawiono na rysunku nr 71.

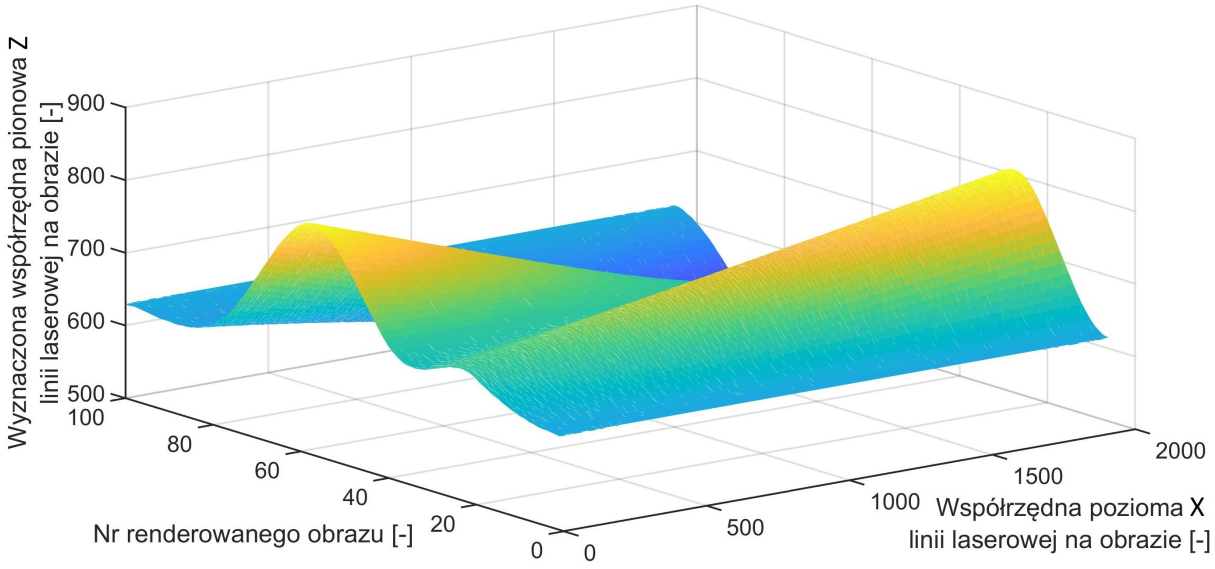


Rys. 70: Wytypowane trzy zmiany pozycji kamery i obserwowanej linii laserowej, które mają wpływ na wyniki skanowania podczas ruchu pojazdu po nierównej nawierzchni

Wygenerowaną bazę obrazów poddano detekcji linii laserowej, co sprowadzało się do wyznaczenia dla każdego z obrazów o wymiarach 1920 na 1080 pikseli, współrzędnych pikseli odpowiadających lokalizacji linii laserowej (patrz rysunek nr 68). Na rysunku nr 72 przedstawiono uzyskane wyniki detekcji linii laserowej w postaci trójwymiarowej powierzchni będącej graficznym przedstawieniem wyznaczonych współrzędnych pionowych Z pikseli.



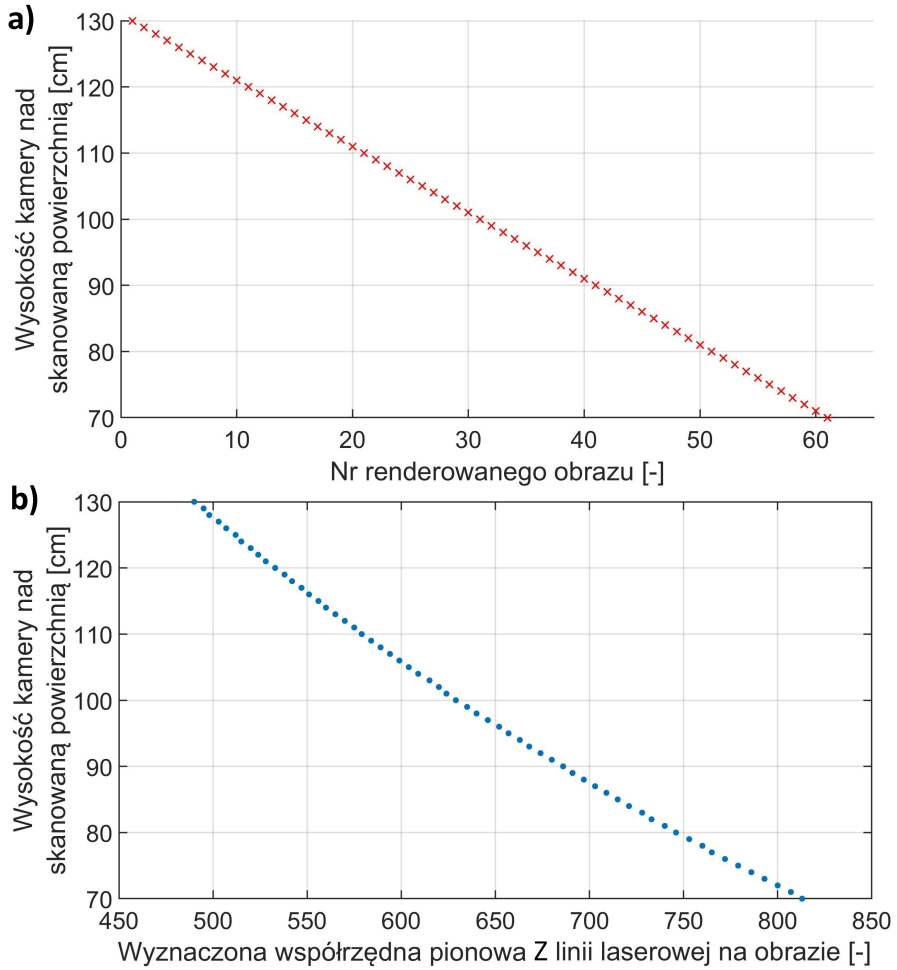
Rys. 71: Wykresy wartości współrzędnej Z oraz kątów obrotu osi X i osi Y kamery względem skanowanej powierzchni, które odpowiadają numerom obrazów wyrenderowanych w bazie danych



Rys. 72: Wyniki detekcji linii laserowej w postaci trójwymiarowej powierzchni będącej graficzną ilustracją wyznaczonych współrzędnych pionowych Z linii laserowej na obrazie

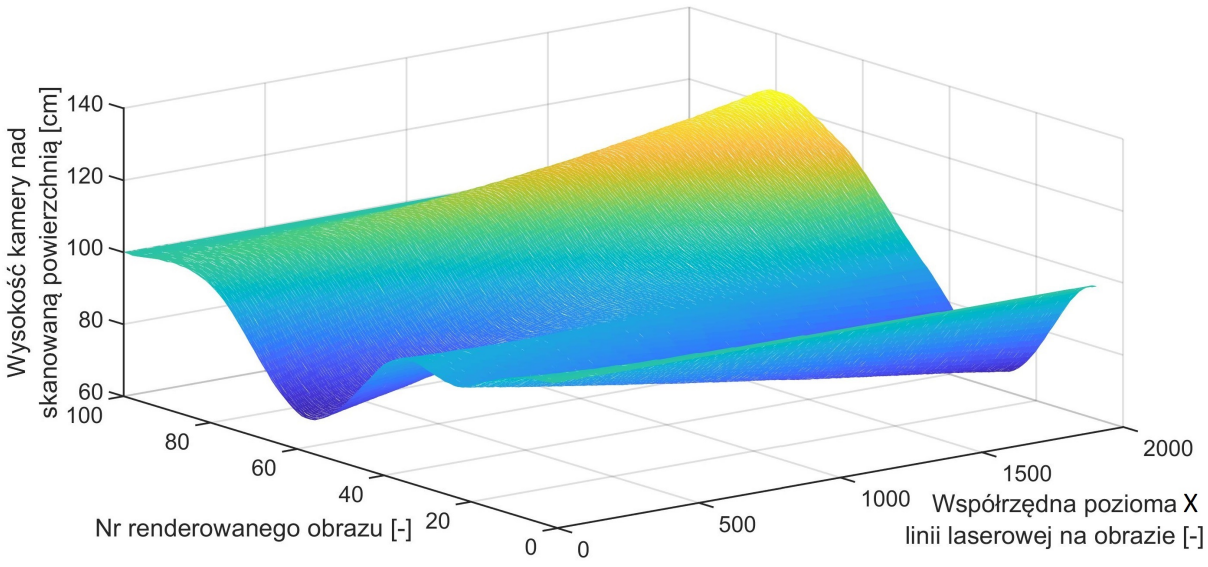
Następnie, mając na celu ocenę wpływu wymuszonych zmian pozycji kamery i lasera na rezultaty skanowania, wyznaczone współrzędne lasera umieszczone w bazie przeliczono do wyrażonych w centymetrach wysokości kamery nad powierzchnią. Wykonanie przeliczeń wymagało ustalenia związku między wyznaczonymi współrzędnymi pionowymi linii laserowej widocznej na wyrenderowanym obrazie, a wysokością kamery nad skanowaną

powierzchnią. Bazę obrazów, w której każdy obraz odpowiadał innej wysokości kamery nad skanowaną idealnie płaską powierzchnią (wykres na rysunku nr 73a), poddano detekcji linii laserowej oraz ustalono związek między współrzędną pionową, a wysokością kamery nad powierzchnią (wykres na rysunku nr 73b).



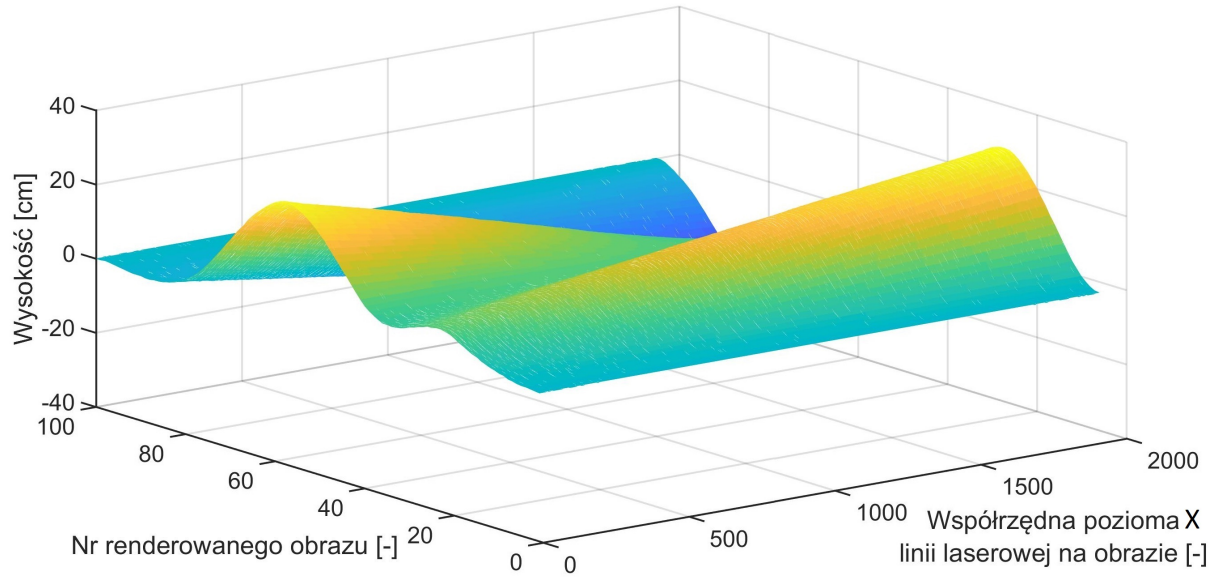
Rys. 73: Wyniki przeprowadzonych obliczeń: a) wysokości kamery nad skanowaną powierzchnią odpowiadające numerom obrazów wyrenderowanych w bazie, b) ustalony związek między wyznaczonymi współrzędnymi pionowymi linii laserowej widocznej na wyrenderowanym obrazie, a wysokością kamery nad skanowaną powierzchnią

Ustalony związek przedstawiony na rysunku nr 73b wykorzystano do obliczenia wysokości kamery nad skanowaną powierzchnią na podstawie wyznaczonych pionowych współrzędnych linii laserowej przedstawionych na rysunku nr 72. Uzyskaną tym sposobem postać trójwymiarowej powierzchni przedstawiono na rysunku nr 74.



Rys. 74: Trójwymiarowa powierzchnia przedstawiająca wyznaczone wysokości kamery nad skanowaną powierzchnią

W kolejnym kroku obliczono wartości wysokości względem obrazu pierwszego, co wykonano poprzez odjęcie od bazy wartości wysokości kamery nad skanowaną powierzchnią wartości wysokości z pierwszego renderowanego obrazu. Wyniki w postaci trójwymiarowej powierzchni uzyskanej w ramach eksperymentu numerycznego skanowania idealnie płaskiej powierzchni przedstawiono na rysunku nr 75.

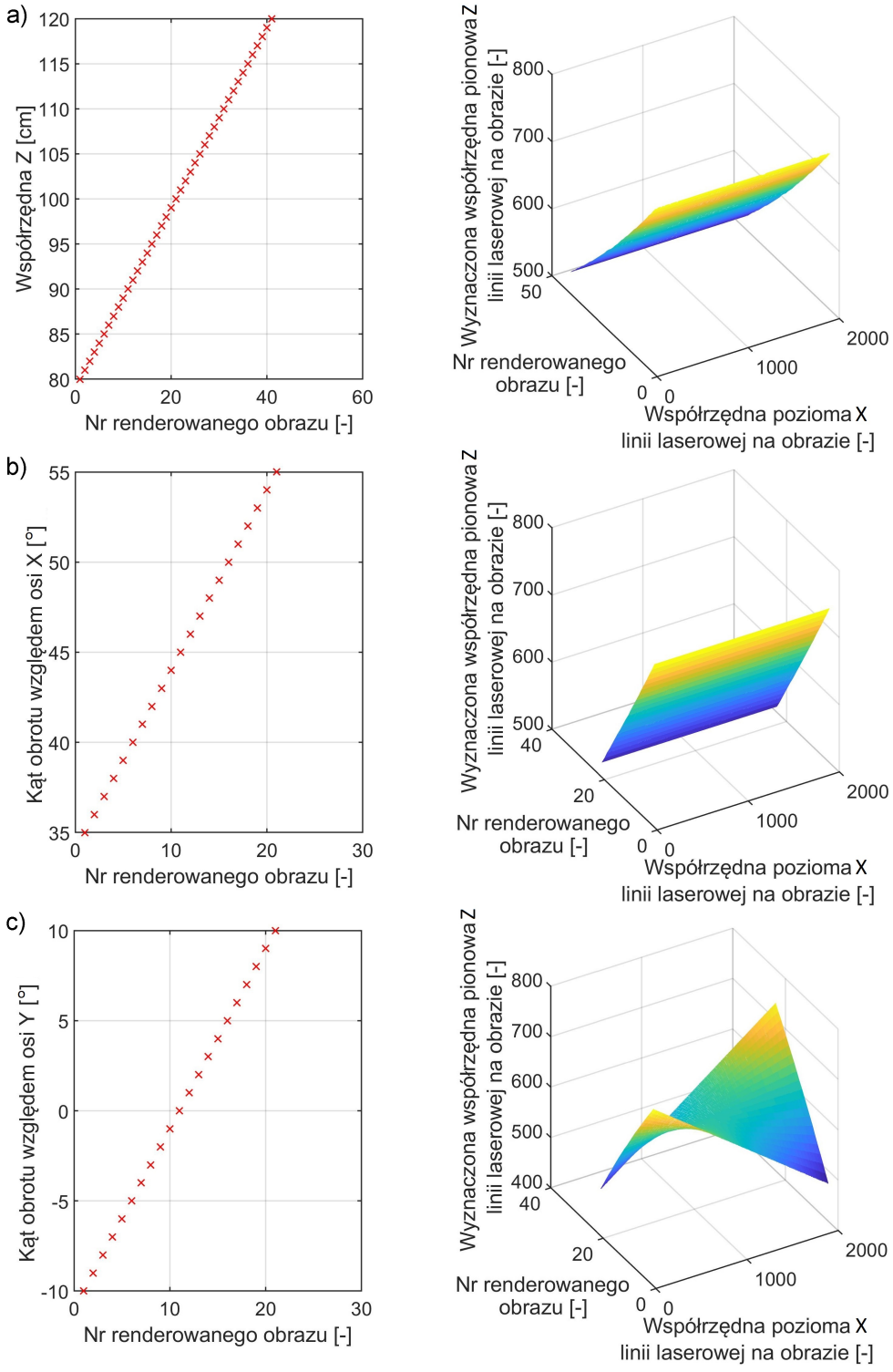


Rys. 75: Trójwymiarowa powierzchnia uzyskana w ramach eksperymentu numerycznego skanowania idealnie płaskiej powierzchni metodą triangulacji laserowej

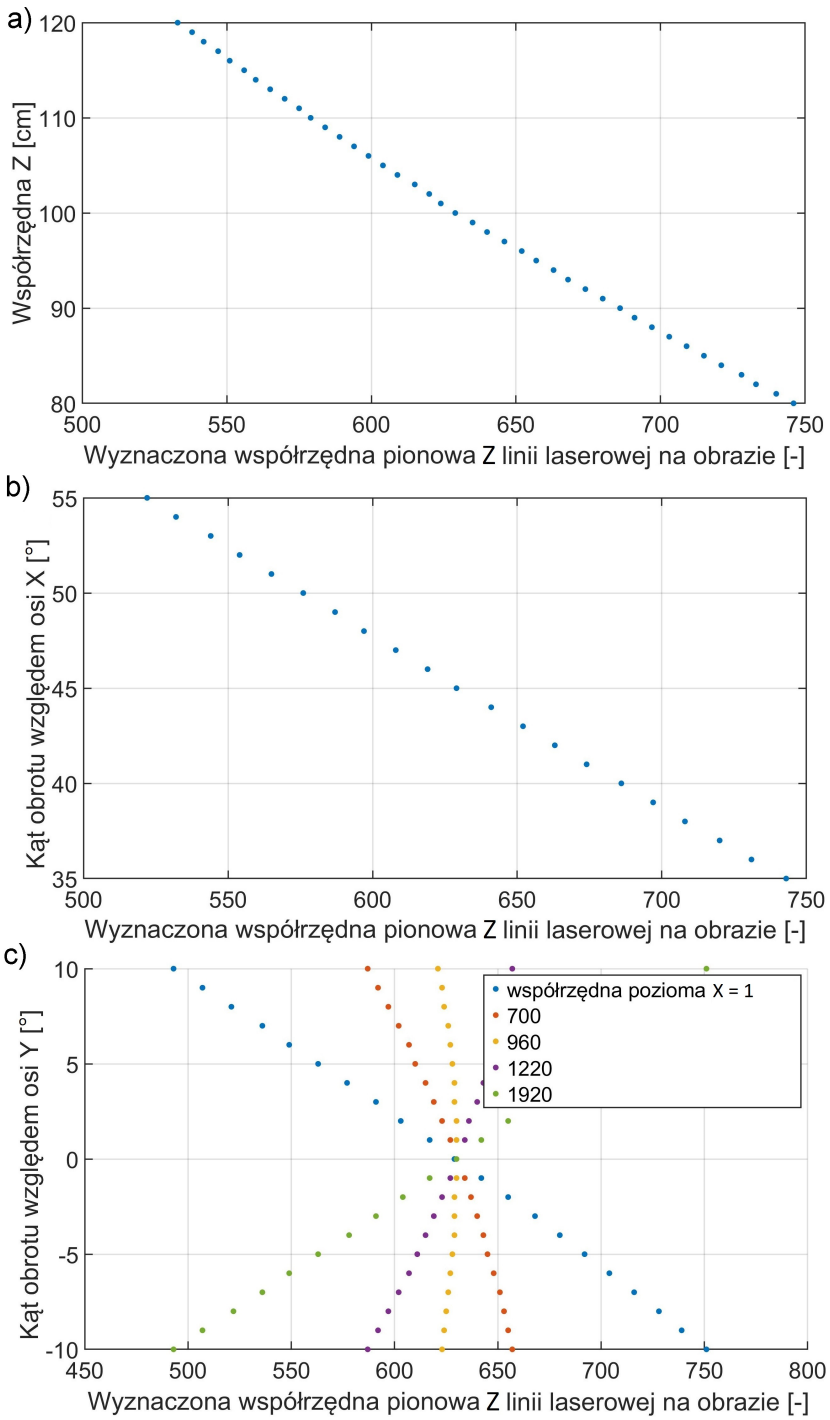
Zważywszy na to, że w eksperymencie numerycznym skanowaniu poddano idealnie płaską powierzchnię, to wartości wysokości różne od 0 są wynikiem wprowadzenia wymuszonych zmian pozycji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni. Z bezwzględnych wartości wysokości obliczono wartość średnią 10,4 cm i maksymalną 31,3 cm, które można uznać za miary oceny wpływu na uzyskane wyniki wprowadzenia zmian pozycji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni. Dla rzeczywistych pomiarów źródłem wprowadzonych w eksperymencie numerycznym zmian pozycji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni, mogłyby być drgania pojazdu diagnostycznego, który pokonuje nierówności nawierzchni. Na podstawie uzyskanych wyników potwierdzono konieczność wprowadzenia korekt dla uzyskania użytecznych rezultatów (odniesienie obliczonej wartości 10,4 cm do wymaganej dokładności pomiaru 0,1 cm równości nawierzchni oznaczanych np. referencyjną metodą łaty i klina).

Przy wprowadzaniu korekt zmian pozycji kamery i lasera względem powierzchni poddanej skanowaniu istotne jest wyznaczenie związków geometrycznych, na które składają się wszystkie trzy składowe: zmiana współrzędnej Z oraz zmiany kątów obrotu względem osi X i Y. Mając możliwość wykorzystania modelu skanowania idealnie płaskiej powierzchni, dla każdej składowej wygenerowano bazę obrazów, z których każdy odpowiadał różnym wartościom jednej określonej pozycji kamery i lasera. Na rysunku nr 76 przedstawiono wykresy funkcji zmiany pozycji kamery i lasera względem skanowanej idealnie płaskiej powierzchni oraz rezultaty detekcji linii laserowej w postaci trójwymiarowych powierzchni, które kolejno odpowiadają bazie wyników różniących się wyłącznie wartościami: a) współrzędnej Z, b) kąta obrotu względem osi X, c) kąta obrotu względem osi Y pozycji kamery i lasera względem skanowanej idealnie płaskiej powierzchni.

Na podstawie uzyskanych wyników przedstawionych na rysunku nr 76, wyznaczono związki zmiany wartości kolejno trzech pozycji kamery i lasera względem skanowanej idealnie płaskiej powierzchni, a wyznaczoną współrzędną pionową linii laserowej na obrazie, co przedstawiono na rysunku nr 77.

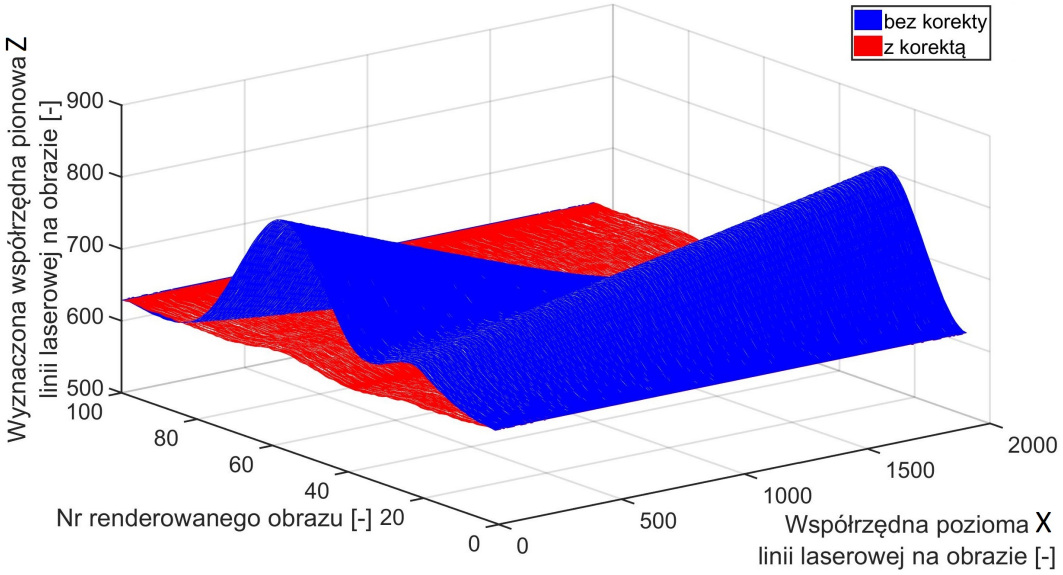


Rys. 76: Wykresy funkcji zmiany pozycji kamery i lasera względem skanowanej idealnie płaskiej powierzchni oraz rezultaty detekcji linii laserowej, odpowiadające bazie wyników różniących się wyłącznie wartościami: a) współrzędnej Z, b) kąta obrotu względem osi X, c) kąta obrotu względem osi Y



Rys. 77: Wyznaczone związki między współrzędną pionową linii laserowej na obrazie, a odpowiednio zmianą wartości: a) współrzędnej Z, b) kąta obrotu względem osi X, c) kąta obrotu względem osi Y

Dla związków przedstawionych na rysunku nr 77, istotne jest to, że dla przypadków zmian wartości współrzędnej Z i kąta obrotu względem osi X, dla wyników pojedynczego skanowania należy zastosować tę samą wartość korekty dla wszystkich wyznaczonych pionowych współrzędnych linii laserowej na obrazie. Natomiast wartość korekty wynikającej ze zmiany kąta obrotu względem osi Y będzie inna dla każdej współrzędnej pionowej Z linii laserowej pojedynczego skanowania i będzie zależała od jego współrzędnej poziomej X. Dysponując ustalonymi związkami (rysunek nr 77), dla wyników detekcji linii laserowej (rysunek nr 72) wprowadzono kolejno korekty związane z wymuszonymi zmianami pozycji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni. Wprowadzenie korekt sprowadzono do przeliczenia wyznaczonych pionowych współrzędnych linii laserowej na obrazie do pozycji pierwszego renderowanego obrazu: współrzędnej Z = 100 cm, kąta obrotu względem osi X = 45° i osi Y = 0°. Współrzędne pionowe linii laserowej przed i po korektach wymuszanych zmian pozycji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni, przedstawiono na rysunku nr 78.



Rys. 78: Trójwymiarowe powierzchnie przedstawiające wyznaczone współrzędne linii laserowej na obrazie przed i po wprowadzeniu korekt

Następnie w analogiczny jak wcześniej sposób, najpierw poddane korekcie wyznaczone współrzędne linii laserowej przeliczono do wysokości kamery nad skanowaną powierzchnią, a potem do wysokości, które przedstawiono na rysunku nr 79.

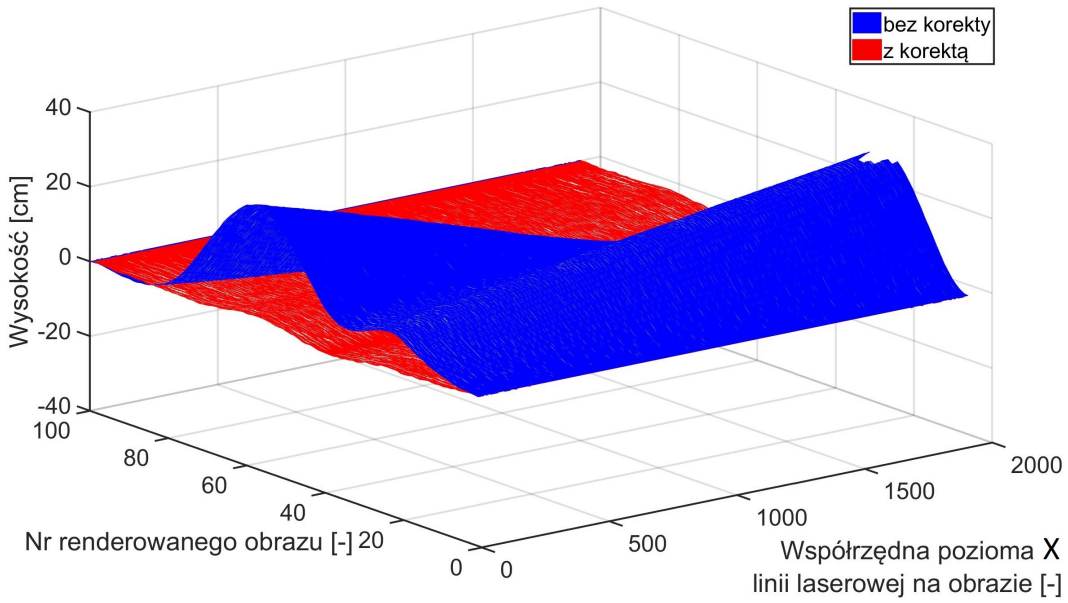
W ostatnim kroku, z bezwzględnych wartości wysokości obliczono wartość średnią 0,7 cm i maksymalną 3,1 cm dla bazy wyników po wprowadzeniu korekt. Uzyskane wartości porównano z wartościami obliczonymi bez wprowadzenia korekt (wartość średnia 10,4 cm i maksymalna 31,3 cm), czym potwierdzono skuteczność zastosowania korekt dla ograniczenia wpływu na uzyskane wyniki zmian pozycji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni (zmniejszenie średniej wysokości prawie 15-krotnie i maksymalnej

ponad 10-krotnie po wprowadzeniu korekt), których źródłem w trakcie rzeczywistych pomiarów mogą być wymuszone drgania pojazdu pokonującego nierówności nawierzchni.

Odnosząc uzyskane wyniki przeprowadzonego eksperymentu numerycznego do wymagań dotyczących dokładności pomiaru równości podłużnej nawierzchni równej 0,1 cm, deklarowanej w referencyjnej metodzie łaty i klina, w jednoznaczny sposób stwierdzono, że przyjęta metoda i jej parametry w eksperymencie numerycznym nie spełniają oczekiwań. Mając na uwadze dalsze ograniczenie wpływu wymuszonych zmian pozycji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni, wykonano kolejny eksperyment numeryczny, w którym:

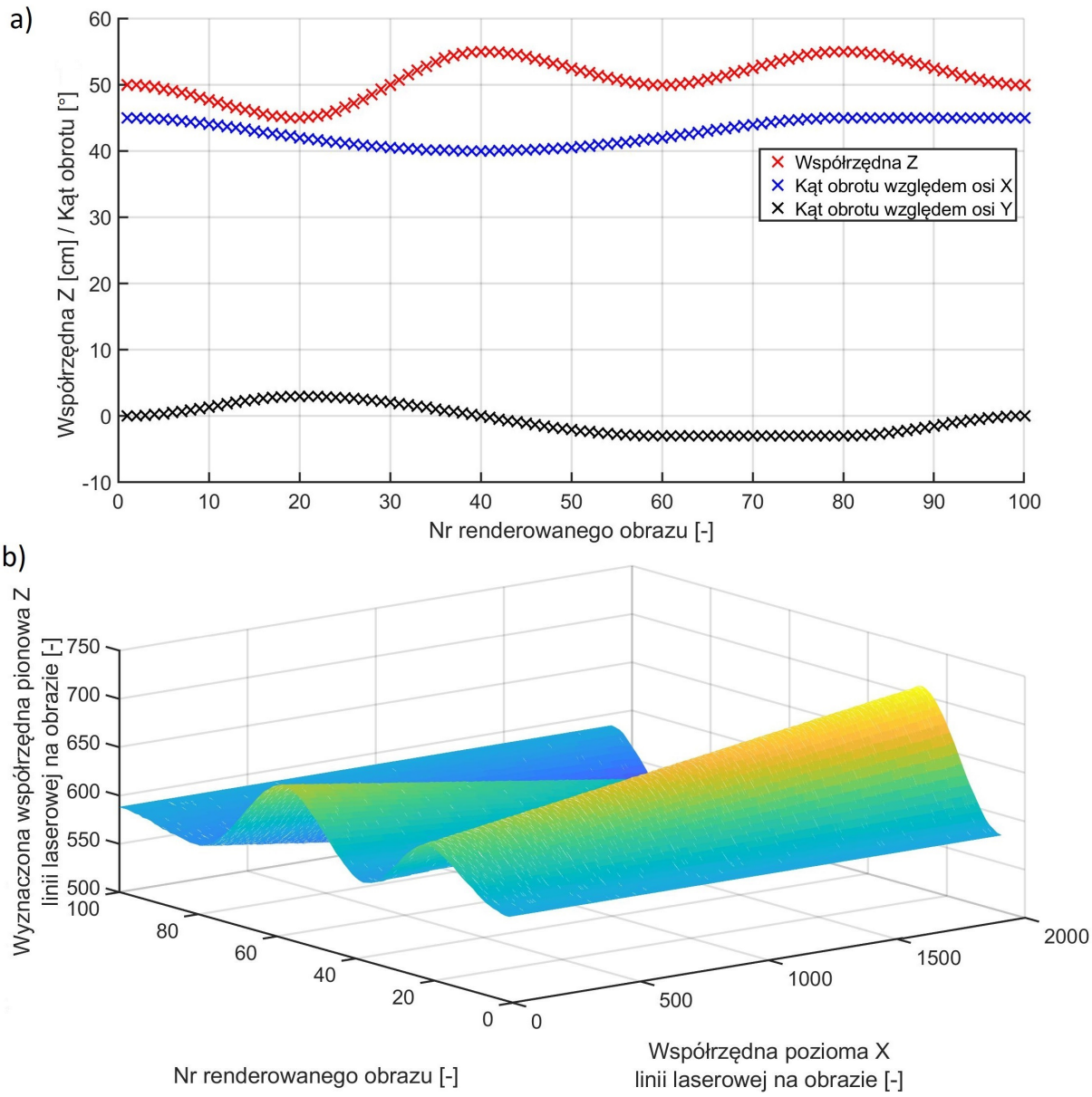
1) zmniejszono wartości zmian pozycji kamery i lasera względem skanowanej idealnie płaskiej powierzchni, które w trakcie rzeczywistego pomiaru można by ograniczyć poprzez zmniejszenie prędkości przejazdu,

2) zmniejszono wyjściową wysokość lokalizacji kamery względem skanowanej powierzchni z 1,0 m do 0,5 m, czego następstwem było zwiększenie rozdzielczości (przyjmując, że 1 piksel ≈ 0,1 mm w miejsce poprzedniego założenia, że 1 piksel ≈ 0,2 mm), przy jednoczesnym zmniejszeniu szerokości skanowania.



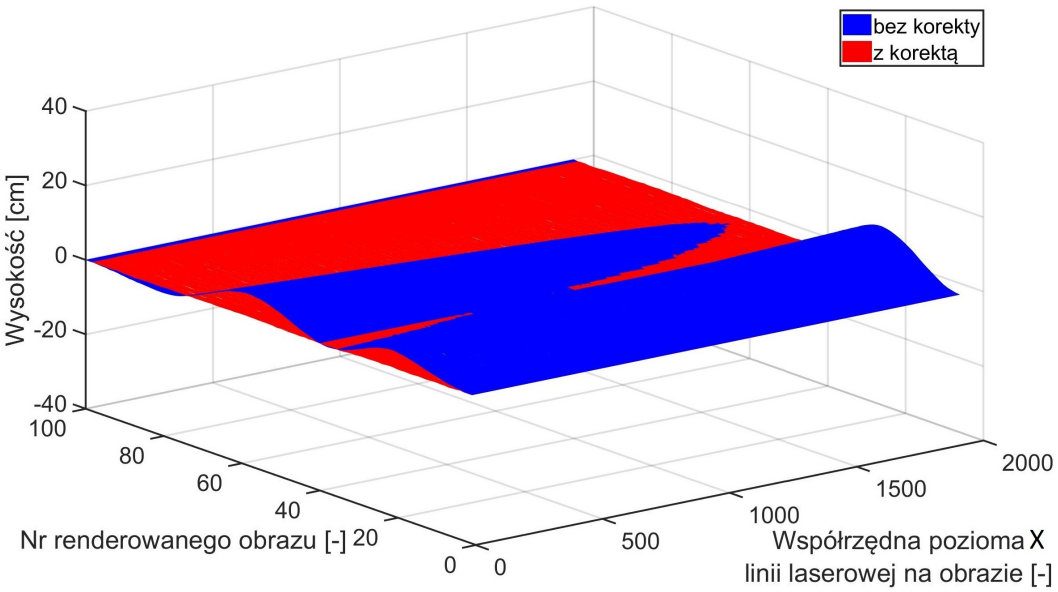
Rys. 79: Trójwymiarowe powierzchnie przedstawiające wysokości obliczone przed i po wprowadzeniu korekt

Na rysunku nr 80 przedstawiono wykres zmian pozycji kamery i lasera względem skanowanej idealnie płaskiej powierzchni wygenerowanej bazy obrazów oraz wyniki przeprowadzonej detekcji linii laserowej.



Rys. 80: Wyniki przeprowadzonych obliczeń: a) wykres zmian pozycji kamery i lasera względem skanowanej idealnie płaskiej powierzchni wygenerowanej bazy obrazów, b) wyniki przeprowadzonej dla bazy obrazów detekcji linii laserowej

Następnie dla uzyskanej bazy wyników wyznaczonych współrzędnych pionowych linii laserowej na obrazie przeprowadzono taki sam zakres obliczeń jak w przypadku pierwszego eksperymentu numerycznego. Uzyskane w drugim eksperymencie numerycznym końcowe wyniki obliczeń w postaci trójwymiarowych powierzchni przedstawiających wysokości obliczone przed i po wprowadzeniu korekt związanych z ruchem kamery i lasera względem skanowania idealnie płaskiej powierzchni, przedstawiono na rysunku nr 81.

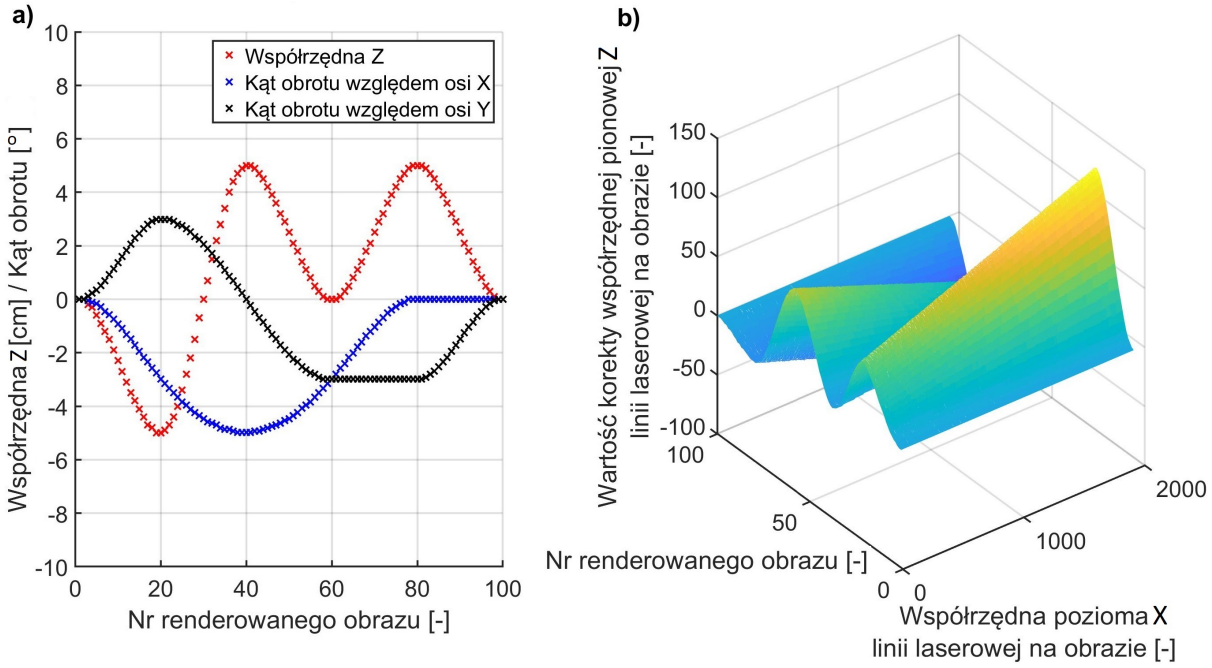


Rys. 81: Trójwymiarowe powierzchnie przedstawiające wysokości obliczone przed i po wprowadzeniu korekt związanych z ruchem kamery i lasera względem skanowania idealnie płaskiej powierzchni, które uzyskano w ramach drugiego eksperymentu numerycznego

Dla wyników drugiego eksperymentu numerycznego obliczono z bezwzględnych wartości wysokości wartości średnie 2,9 cm (bez korekty zmian pozycji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni) i 0,1 cm (z korektami) oraz maksymalne 11,0 cm (bez korekt) i 0,7 cm (z korektami). Uzyskane wyniki eksperymentu numerycznego potwierdziły możliwość ograniczenia wpływu zmian pozycji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni poprzez wprowadzenie korekt z doborem odpowiednich parametrów pomiaru, między innymi rozdzielczości skanowania i prędkości pojazdu w trakcie pomiarów (ograniczenie zmian pozycji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni).

Wprowadzenie do wyników skanowania przedstawioną metodą korekt zmian pozycji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni wiąże się z ustaleniem kolejno związków wartości współrzędnej Z, kąta obrotu względem osi X i Y, a wyznaczoną współrzędną pionową linii laserowej na obrazie, które przedstawiono na rysunku nr 77. W przypadku pomiarów urządzeniem, w przeciwieństwie do modelu numerycznego, uzyskanie baz wyników odpowiadających kolejno zmianom tylko jednej z trzech ustalonych pozycji kamery i lasera względem skanowanej idealnie płaskiej powierzchni jest ograniczone. W związku z czym, podstawowym problemem do rozwiązania przy wprowadzeniu korekt jest ustalenie związków między wartościami korekt, a wartościami współrzędnych pozycji kamery i lasera. Do rozwiązania tak postawionego problemu autor rozprawy opracował algorytm obliczeniowy wykorzystujący jednowarstwową sztuczną sieć neuronową [283], a dokładniej możliwość aproksymacji zbioru danych przy pomocy sztucznej sieci neuronowej. Aproksymację wykonano wykorzystując bibliotekę programu MATLAB o nazwie "neural network toolbox". Danymi wejściowymi do uczenia sieci neuronowych był opis zmian pozycji kamery i lasera względem skanowanej idealnie płaskiej powierzchni,

a danymi wzorcowymi obliczone wartości korekt, które należałoby wprowadzić dla uzyskania właściwych wyników skanowania. Na podstawie bazy wyników zaprezentowanej na rysunku nr 80, zakładając pierwszy renderowany obraz za wyjściowy (współrzędna Z = 0,5 m, kąt obrotu względem osi X = 45°, osi Y = 0°, współrzędna pionowa Z linii laserowej = 588), obliczono wartości do nauki sieci neuronowej, dane wejściowe i wzorcowe, które przedstawiono na rysunku 82.



Rys. 82: Zbiór danych do nauki sieci neuronowej: a) wejściowy, b) wzorcowy

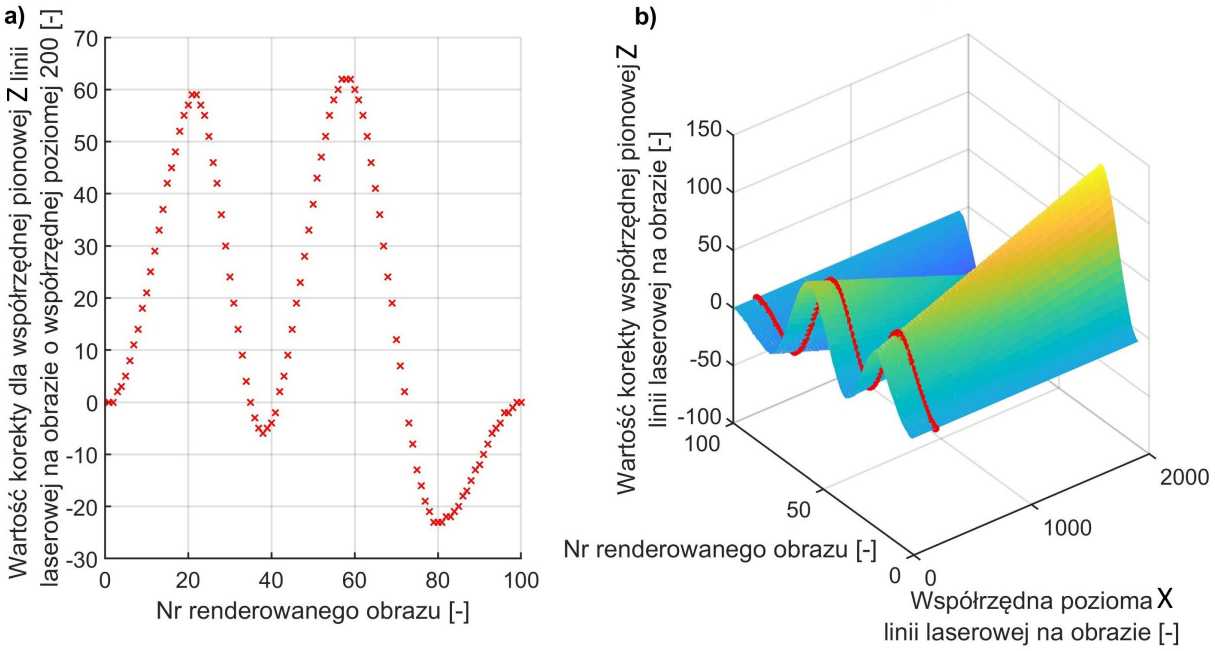
Zważywszy na to, że dla każdej współrzędnej poziomej X linii laserowej na obrazie istnieje inny związek między wartością kąta obrotu względem osi Y, a wartością korekty współrzędnej, osobno wyuczono 1920 sieci neuronowych (liczba równa liczbie pikseli na szerokości obrazu). Każdą sieć neuronową wyuczono w oparciu o zbiory danych wejściowych oraz wzorcowych. Na rysunku nr 83a przedstawiono wykres zbioru danych wzorcowych do nauki sieci neuronowej odpowiadającej współrzędnej poziomej X linii laserowej równej 200, którą również zaznaczono czerwonym kolorem na rysunku nr 83b.

Z dostępnych opcji wykorzystanej biblioteki programu MATLAB, poprzez szereg przeprowadzonych obliczeń ustalono, że najlepsze wyniki aproksymacji zbioru danych uzyskano po zastosowaniu jednowarstwowej sieci neuronowej, dla której zdefiniowano trzy neurony i wykorzystano do uczenia algorytm Levenberg-Marquardt. Następnie przy użyciu 1920 wyuczonych modeli neuronowych obliczono wartości korekt dla dwóch zbiorów danych wejściowych. Pierwszy zbiór obejmował zmiany wartości wyłącznie współrzędnej Z (wartości kąta obrotu względem osi X i Y równe zero), a drugi dotyczył zmian wartości kąta obrotu względem osi X (wartości współrzędnej Z oraz kąta obrotu względem osi Y równe zero). Zakresy zmian wartości współrzędnej Z (pierwszy zbiór, wartości od -5 cm do 5 cm)

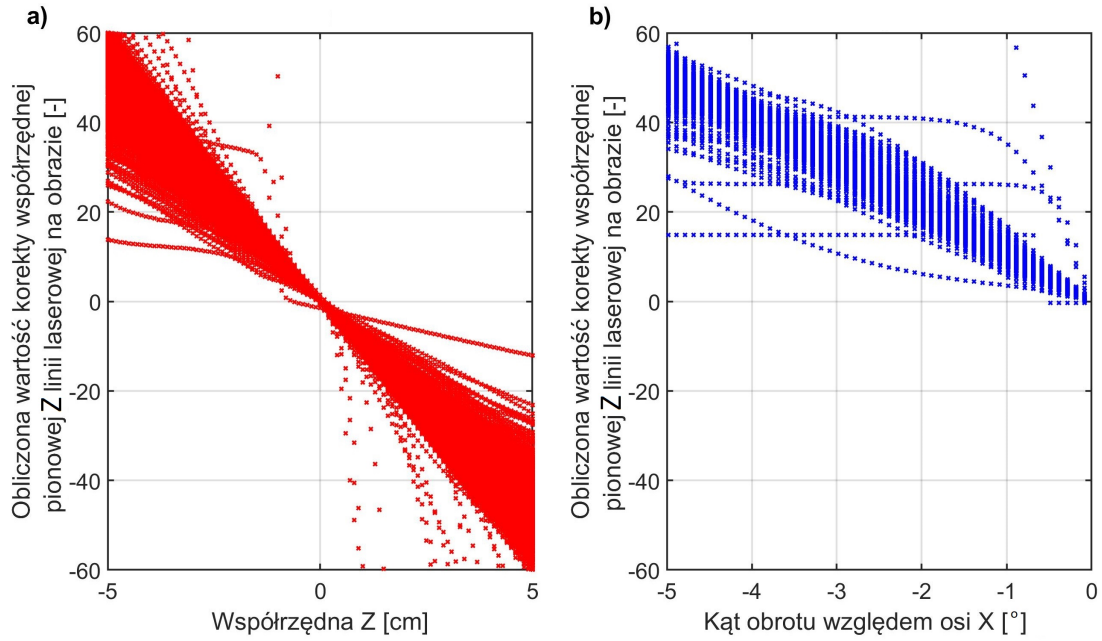
oraz kąta obrotu względem osi Y (drugi zbiór, wartości -5° do 0°) odpowiadały minimalnym i maksymalnym wartościom ze zbioru danych wejściowych, który wykorzystano do nauki sieci neuronowych (patrz rysunek nr 82a). Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku nr 84.

Zważywszy na to, że związki między wartościami korekt współrzędnych pionowych linii laserowej od wartości współrzędnej Z oraz kąta obrotu względem osi X są jednakowe na całej szerokości obrazu (niezależne od współrzędnej poziomej X linii laserowej na obrazie, co ustalono na podstawie uzyskanych wyników eksperymentu numerycznego, które przedstawiono na rysunku nr 77), dla dwóch baz wyników (zmian wartości współrzędnej Z i kąta obrotu względem osi X) obliczono wartości median, które przedstawiono na rysunku nr 85.

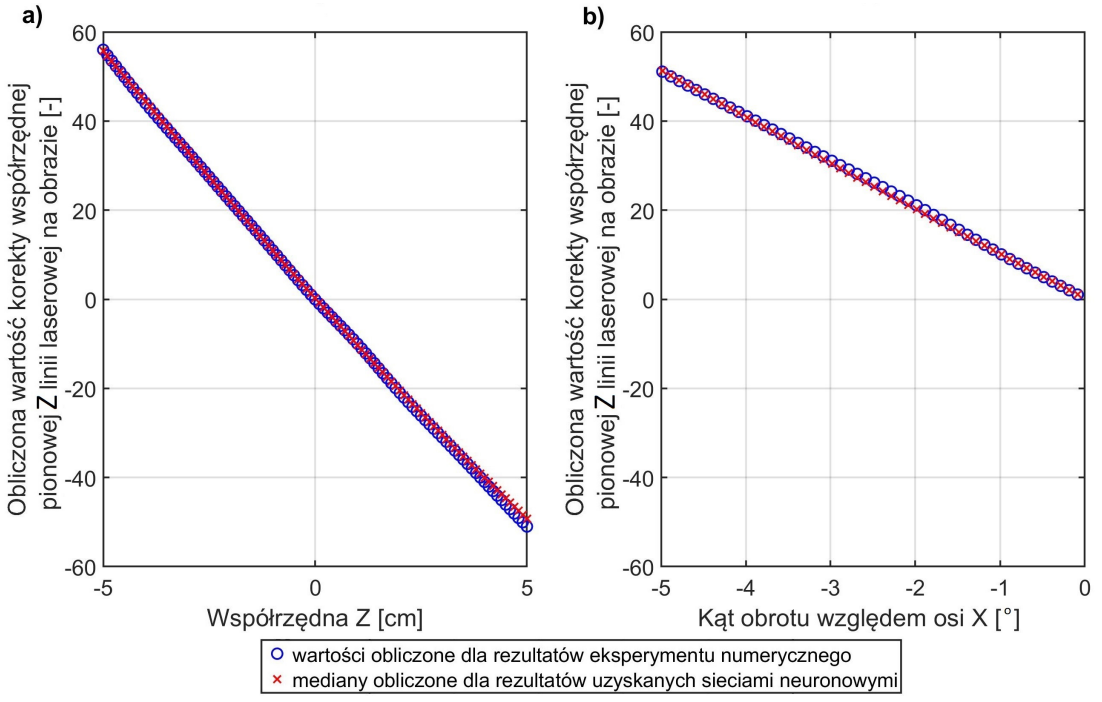
Na rysunku nr 85 oprócz wartości median przedstawiono wartości obliczone dla rezultatów wcześniej przeprowadzonego eksperymentu numerycznego (patrz rysunek nr 77), które przyjęto jako referencyjne. Mając na celu wstępną ocenę wyznaczonych z użyciem sieci neuronowych wartości korekt w zależności od współrzędnej Z i kąta obrotu względem osi X, obliczono ich różnice w odniesieniu do wartości referencyjnych, które odpowiednio przedstawiono na rysunku nr 86.



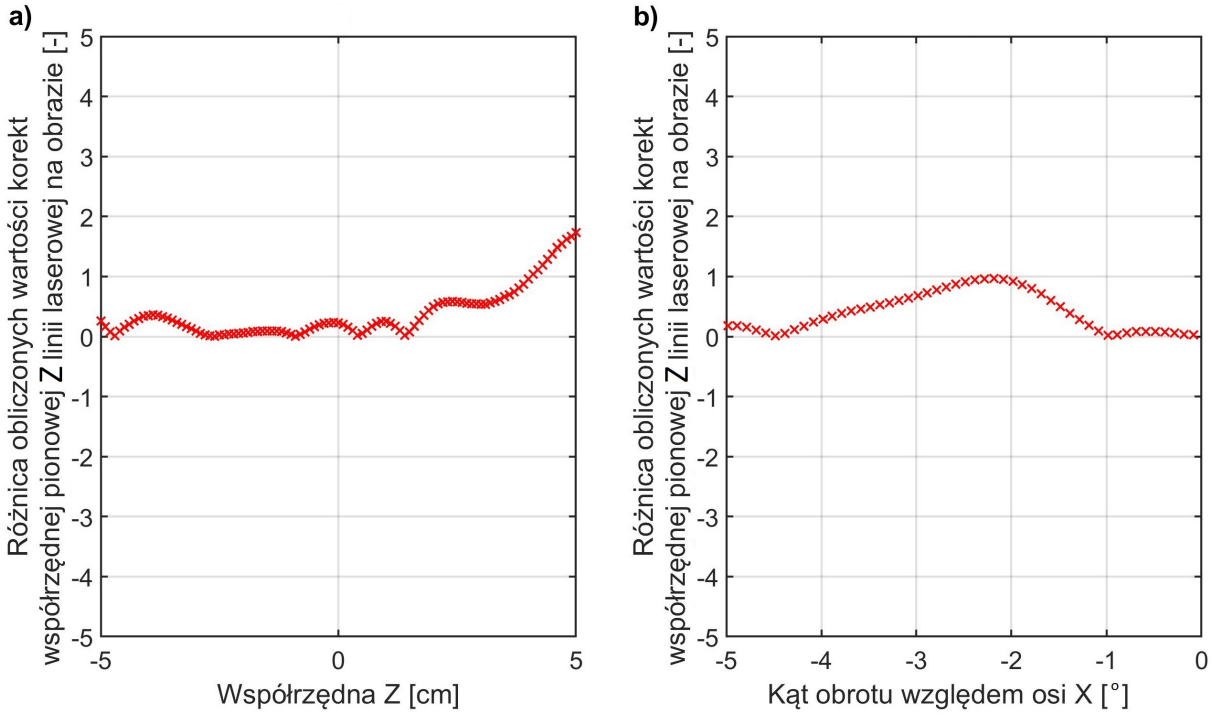
Rys. 83: Wyniki przeprowadzonych obliczeń: a) wykres zbioru danych wzorcowych do nauki sieci neuronowej odpowiadający współrzędnej poziomej X linii laserowej równej 200, b) trójwymiarowa powierzchnia będąca graficznym przedstawieniem zbioru danych wzorcowych w bazie (czerwonym kolorem zaznaczono zbiór odpowiadający współrzędnej poziomej X linii laserowej równej 200)



Rys. 84: Ilustracja wyników obliczeń (przy użyciu 1920 wyuczonych modeli neuronowych) wartości korekt współrzędnych pionowych linii laserowej na obrazie dla zbioru: a) pierwszego, zmian współrzędnej Z, b) drugiego, zmian kąta obrotu względem osi X



Rys. 85: Obliczone wartości korekt współrzędnych pionowych linii laserowej na obrazie dla zbioru: a) pierwszego, zmian współrzędnej Z, b) drugiego, zmian kąta obrotu wzgl. osi X

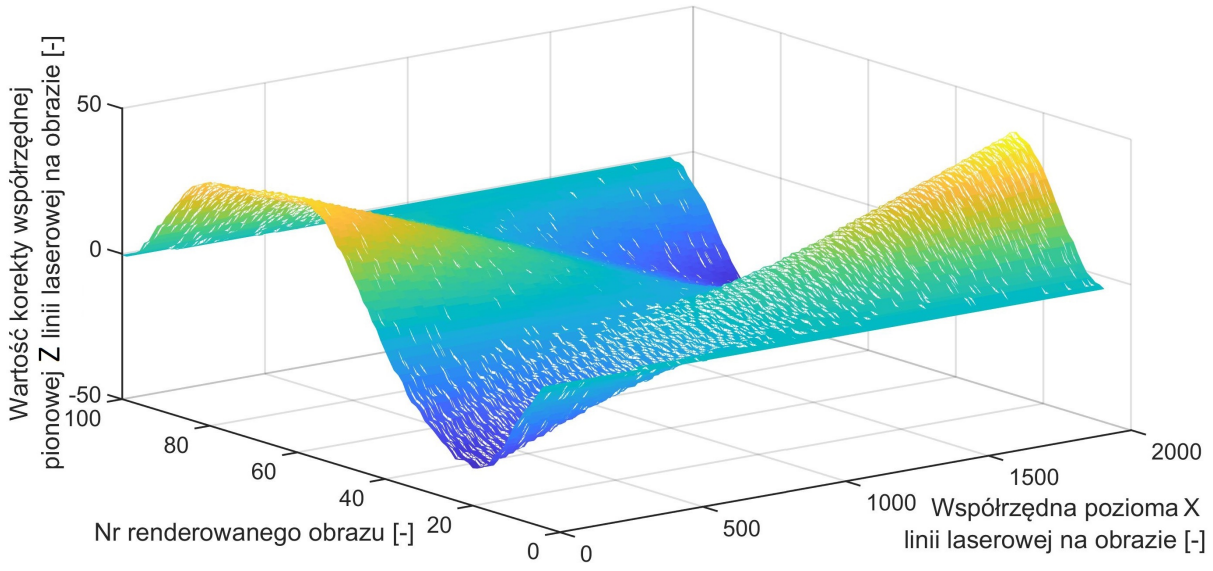


Rys. 86: Ilustracje różnic wartości referencyjnych i obliczonych przy użyciu wyuczonych modeli neuronowych korekt współrzędnych pionowych linii laserowej na obrazie dla zbioru: a) pierwszego, zmian współrzędnej Z, b) drugiego, zmian kąta obrotu względem osi X

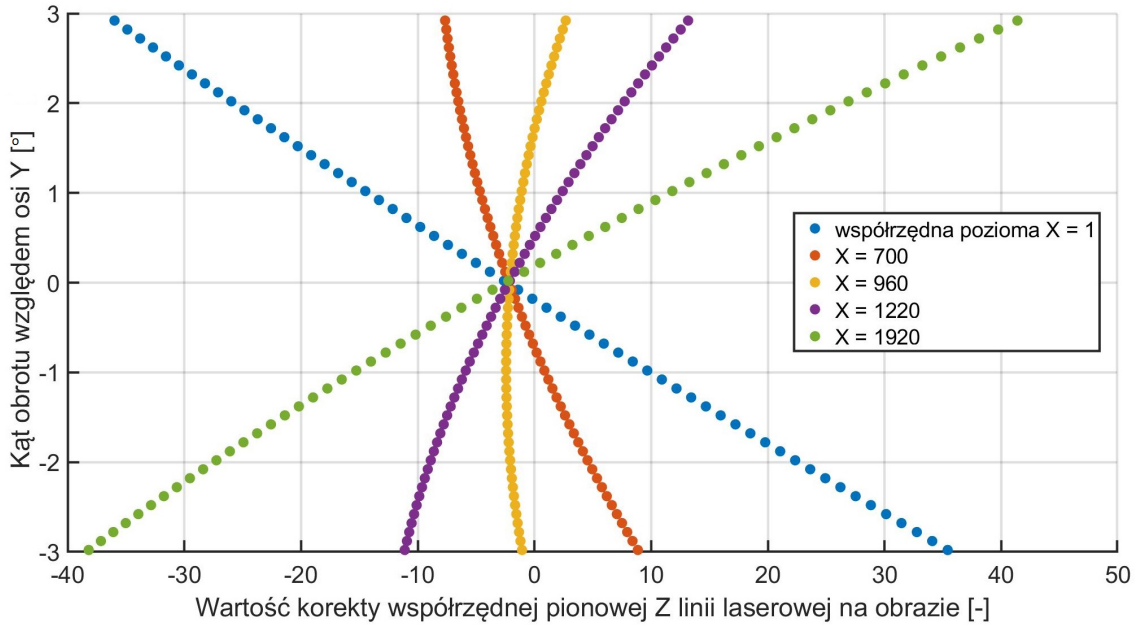
Obliczone wartości wyznaczonych korekt odpowiednio nie przekroczyły wartości 2 dla różnic związku współrzędnej Z (rysunek nr 86a) i wartości 1 dla różnicy związku kąta obrotu względem osi X (rysunek nr 86b), czym wstępnie potwierdzono możliwości obliczeniowe wykorzystanych sztucznych sieci neuronowych.

Dla uzyskania kompletnej bazy korekt współrzędnych pionowych linii laserowej na obrazie pozostały do ustalenia wartości korekt dotyczących związku zmiany kąta obrotu względem osi Y, których wartości zależą od współrzędnej poziomej X. Mając na tym etapie ustalone związki korekt dla zmiany współrzędnej Z i kąta obrotu względem osi X, odjęto odpowiednio wyznaczone wartości korekt od wejściowej bazy wartości korekt przedstawionej na rysunku nr 82b. W efekcie uzyskano nową bazę wartości korekt, które zależą od zmian wartości kąta obrotu względem osi Y, i którą przedstawiono na rysunku nr 87.

Mając do dyspozycji bazę wartości korekt współrzędnych pionowych przedstawioną na rysunku nr 87, wyznaczono związki wartości korekt od zmian wartości kąta obrotu względem osi Y dla wszystkich 1920 współrzędnych poziomych. Przykładowo wybrane wartości odpowiadające pięciu wybranym współrzędnym poziomym linii laserowej na obrazie przedstawiono na rysunku nr 88.

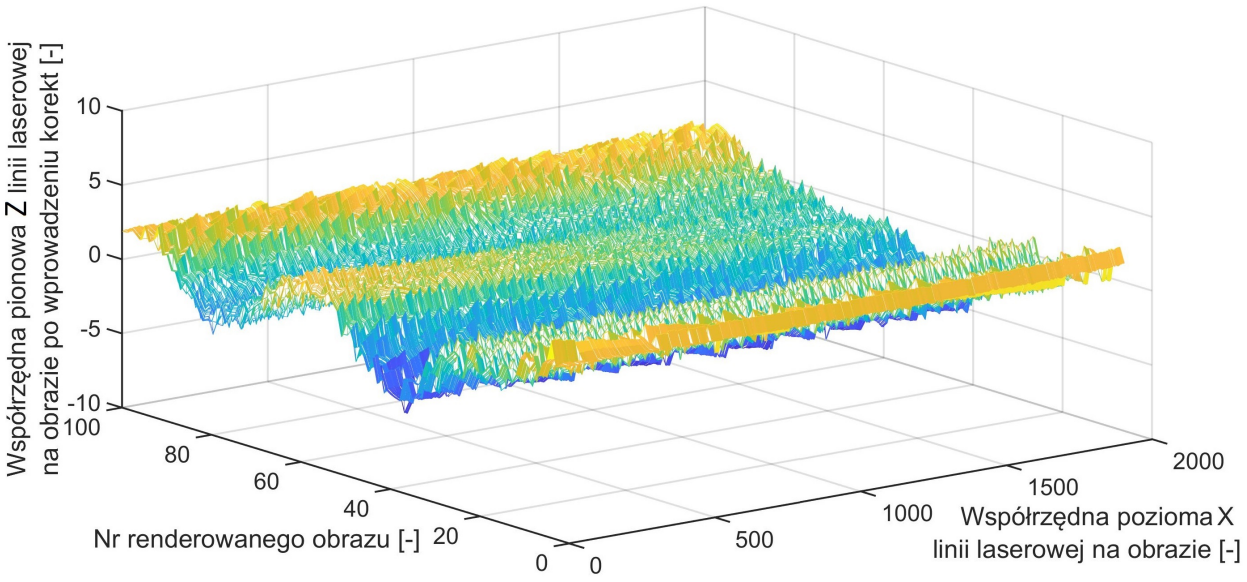


Rys. 87: Trójwymiarowa powierzchnia przedstawiająca bazę wartości korekt współrzędnych pionowych zależnych od zmian wartości kąta obrotu względem osi Y



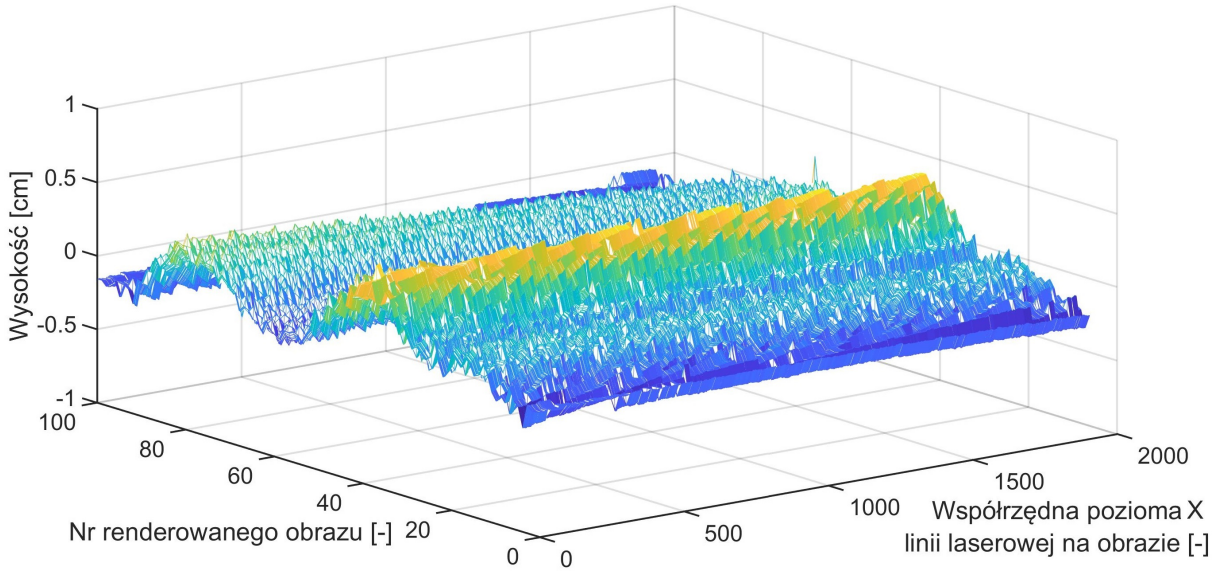
Rys. 88: Wybrane wartości korekt współrzędnych pionowych linii laserowej na obrazie zależnych od zmiany kąta obrotu względem osi Y

Po wyznaczeniu kompletnej bazy wartości korekt przyjętą metodą wykorzystującą sztuczne sieci neuronowe, podjęto się wprowadzenia obliczonych wartości korekt do wyjściowej bazy wyników przedstawionej na rysunku nr 80. Wartości współrzędnych pionowych linii laserowej na obrazie po wprowadzeniu korekt, przedstawiono na rysunku nr 89.



Rys. 89: Wartości współrzędnych pionowych linii laserowej na obrazie po wprowadzeniu korekt przedstawione w postaci trójwymiarowej powierzchni

Następnie wykorzystując wyznaczone wartości korekt współrzędnych pionowych linii laserowej na obrazie względem wartości współrzędnych pionowych Z (rysunek nr 85a), obliczono wartości wysokości, które przedstawiono na rysunku nr 90.

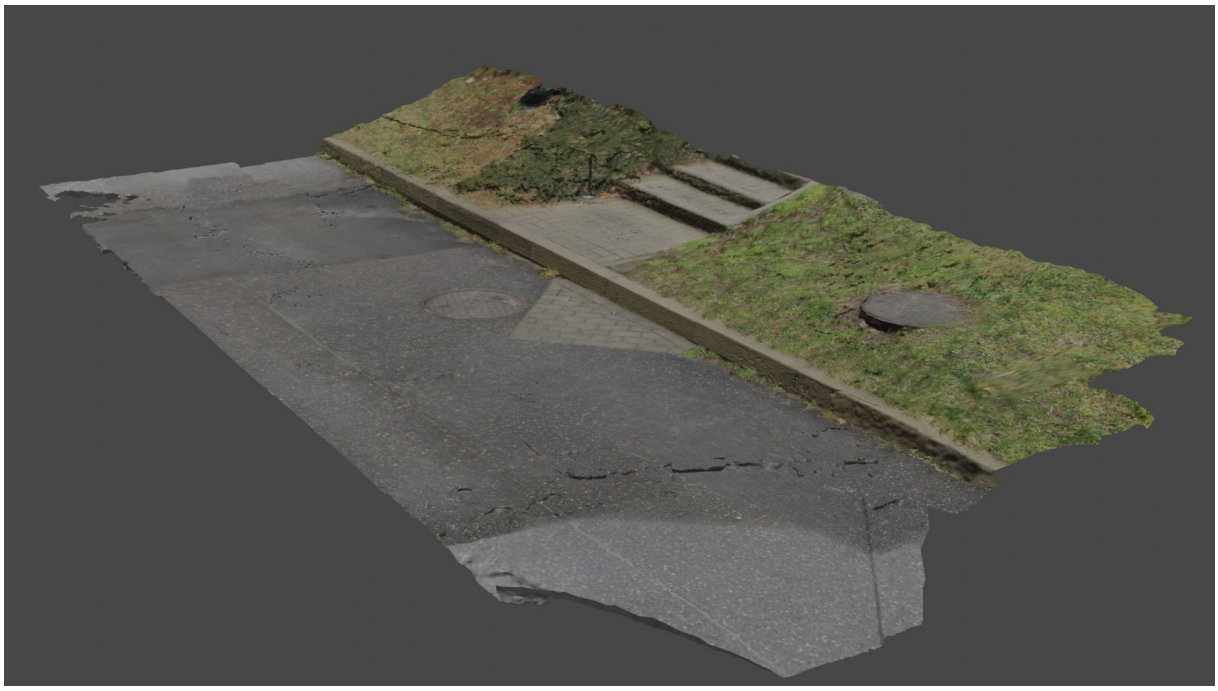


Rys. 90: Trójwymiarowa powierzchnia przedstawiająca wysokości, które obliczono z użyciem opracowanej procedury wykorzystującej sztuczne sieci neuronowe

Biorąc pod uwagę, że obliczone wartości wysokości dotyczą eksperymentu numerycznego skanowania idealnie płaskiej powierzchni, wartości wysokości różniące się od 0 cm przyjęto

jako miarę błędu opracowanej procedury korekty wyników skanowania. Dla wyników przedstawionych na rysunku nr 90 obliczono wartości średnią 0,1 cm i maksymalną 0,5 cm z bezwzględnych wysokości, na których podstawie potwierdzono skuteczność opracowanej procedury obliczeniowej wykorzystującej sztuczne sieci neuronowe.

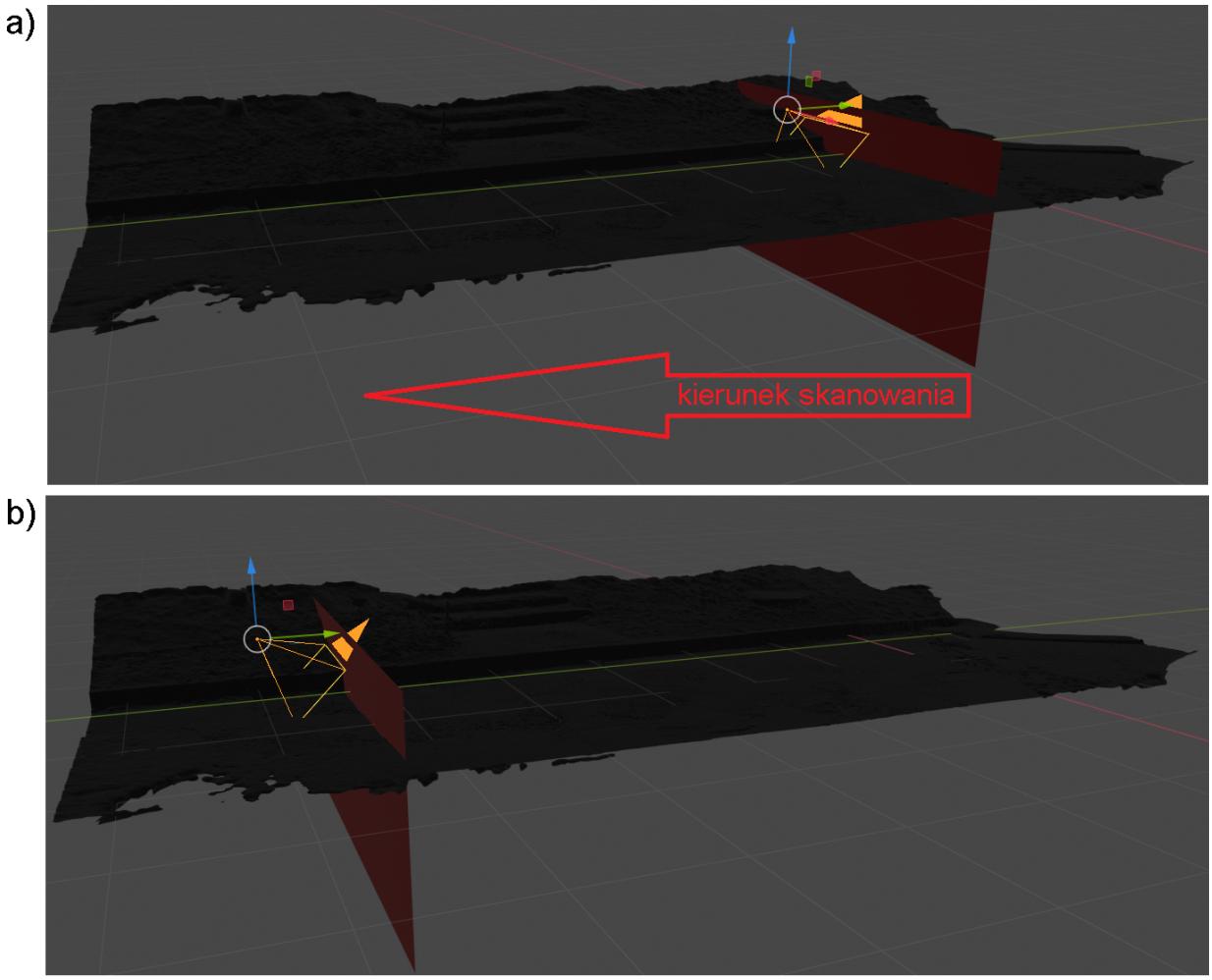
Ostateczną weryfikację numeryczną opracowanej procedury wprowadzenia korekt współrzędnych pionowych wyników skanowania metodą triangulacji laserowej przeprowadzono poprzez wykonany eksperyment numeryczny, którego podstawę stanowił trójwymiarowy model uzyskany metodą fotogrametrycznego przetwarzania obrazów cyfrowych, który przedstawiono na rysunku nr 91.



Rys. 91: Trójwymiarowy model uzyskany metodą fotogrametrycznego przetwarzania obrazów cyfrowych

W przeprowadzonym eksperymencie numerycznym część trójwymiarowego modelu przedstawionego na rysunku nr 91 poddano modelowanemu skanowaniu. Na rysunku nr 92 przedstawiono pierwszą i ostatnią lokalizację kamery i lasera względem skanowanej powierzchni, pomiędzy którymi w równych odstępach co 0,1 cm na długości 500 cm renderowano obrazy uzyskując bazę 5000 przypadków.

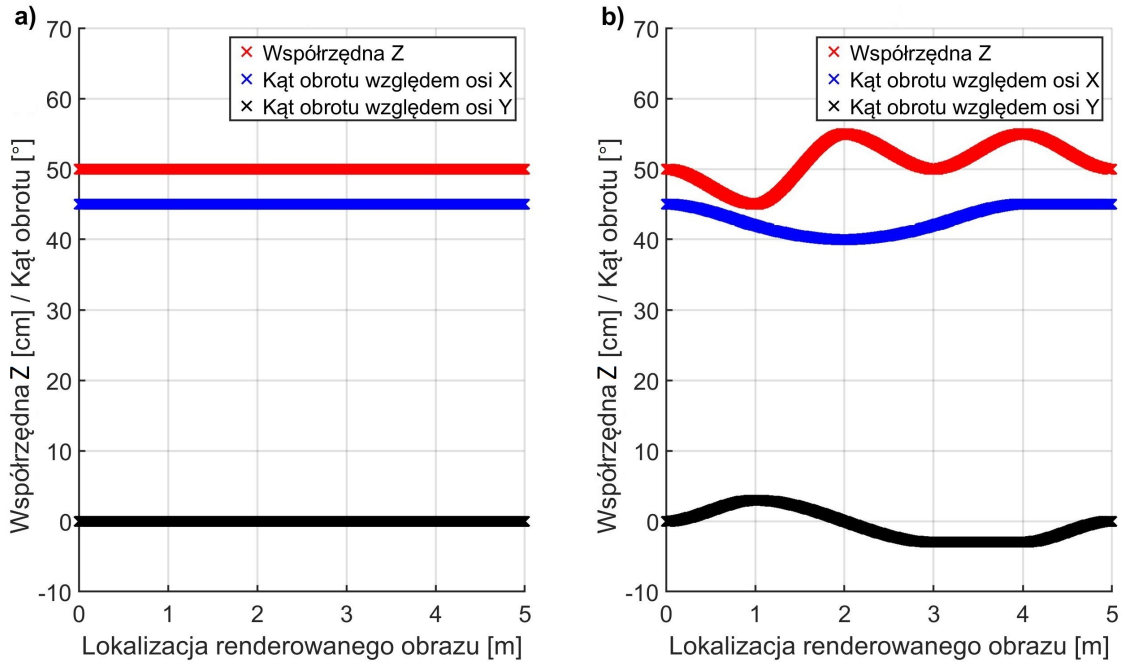
Renderowanie obrazów pomiędzy pierwszą i ostatnią lokalizacją (rysunek nr 92) wykonano na dwa sposoby, przed i po wprowadzaniu zmian wartości współrzędnej Z, kąta obrotu względem osi X oraz Y kamery i lasera względem skanowanej na długości powierzchni, których wartości przedstawiono na rysunku nr 93.



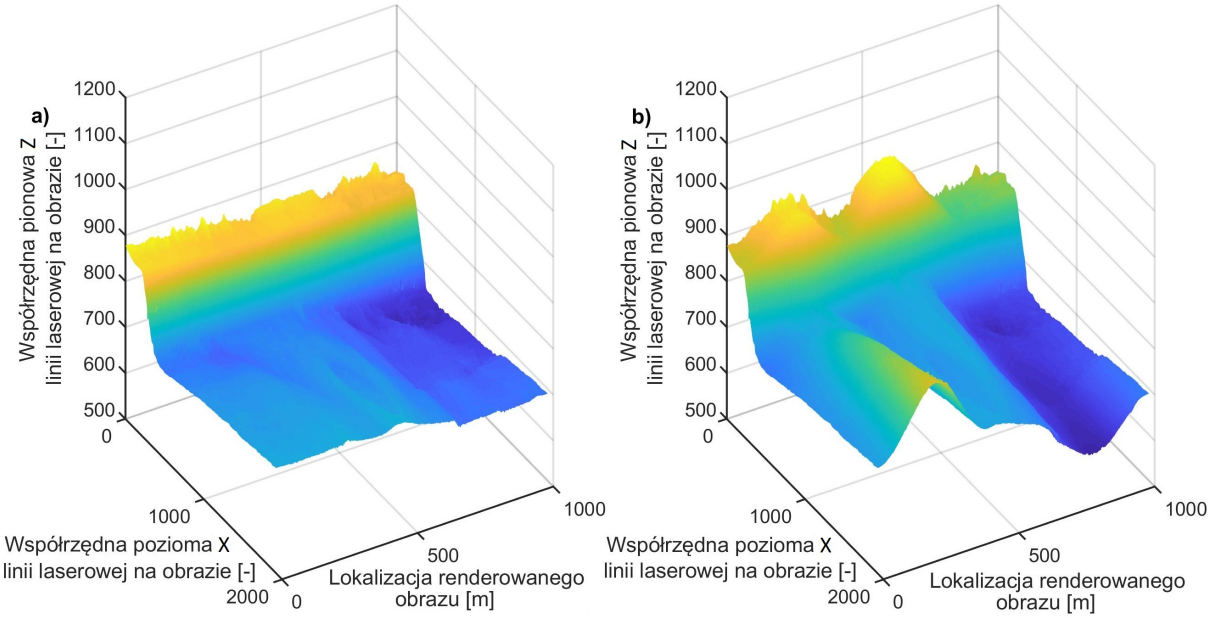
Rys. 92: Lokalizacje kamery i lasera względem skanowanej powierzchni, pomiędzy którymi uzyskano bazę 5000 renderowanych obrazów: a) pierwsza, b) ostatnia

W efekcie uzyskano dwie bazy po 5000 obrazów, na których przeprowadzono detekcję linii laserowej (w analogiczny sposób jak w poprzednich eksperymentach numerycznych), której wyniki przedstawiono na rysunku nr 94.

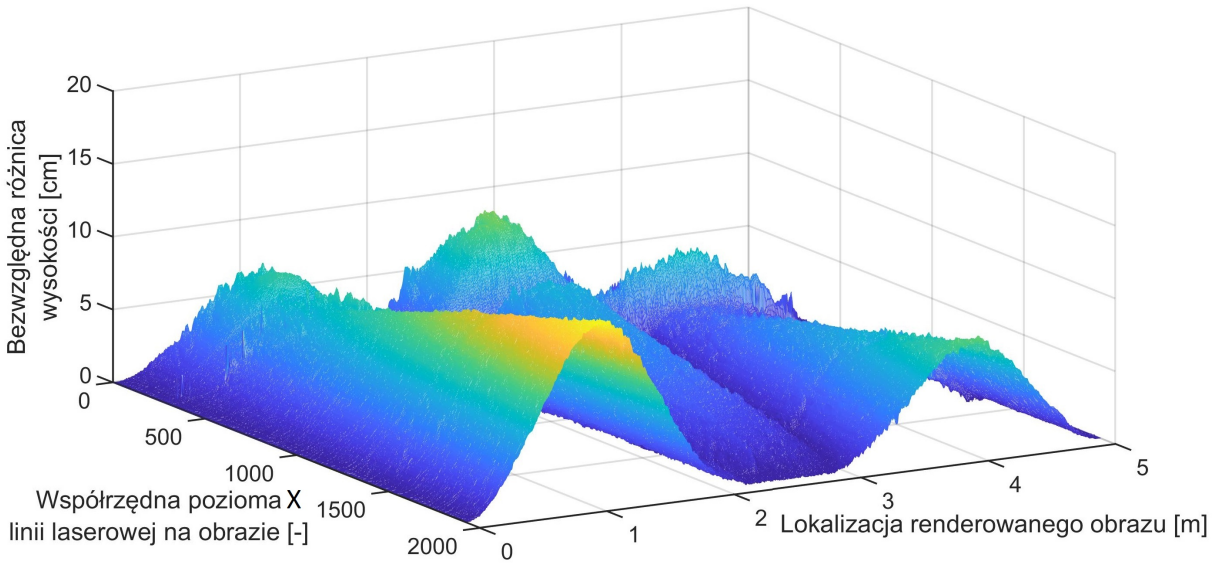
W pierwszym kroku analizy uzyskanych wyników detekcji linii laserowej, przeliczono wartości wyznaczonych współrzędnych pionowych linii laserowej na obrazie do wysokości. Następnie obliczono różnice wysokości bazy bez zmian i bazy ze zmiennymi wartościami współrzędnej Z, kąta obrotu względem osi X oraz Y kamery i lasera względem skanowanej na długości powierzchni dla oceny ich wpływu na uzyskane rezultaty. Obliczone wartości bezwzględne różnic wysokości przedstawiono na rysunku nr 95.



Rys. 93: Baza renderowanych obrazów: a) bez zmian, b) ze zmiennymi wartościami współrzędnej Z, kąta obrotu względem osi X oraz Y kamery i lasera względem skanowanej na długości powierzchni



Rys. 94: Wyniki przeprowadzonej detekcji linii laserowej odpowiednio dla bazy: a) bez zmian i b) ze zmiennymi wartościami współrzędnej Z, kąta obrotu względem osi X oraz Y kamery i lasera względem skanowanej na długości powierzchni

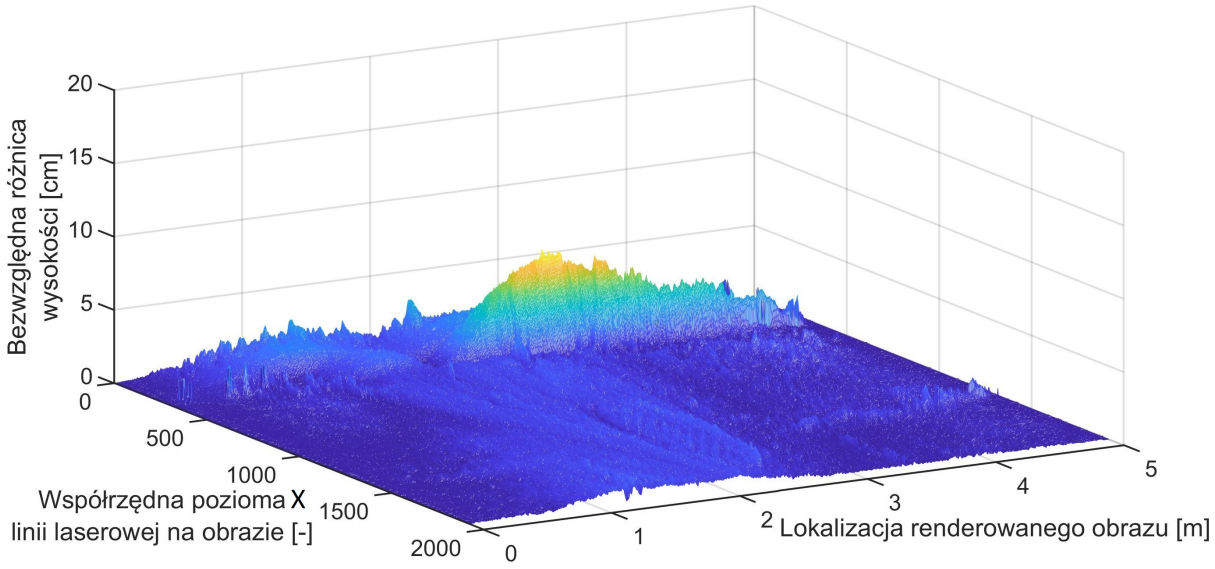


Rys. 95: Trójwymiarowa powierzchnia przedstawiająca obliczone wartości bezwzględne różnic wysokości bazy bez zmian i bazy ze zmianami pozycji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni

Dla przedstawionych na rysunku nr 95 wartości bezwzględnych różnic wysokości obliczono wartości średnią 3,1 cm i maksymalną 12,8 cm, czym potwierdzono istotny wpływ wprowadzonych zmian pozycji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni na uzyskiwane rezultaty eksperymentu numerycznego.

W kolejnym kroku, do wyników detekcji linii laserowej dla warunków zmiennych pozycji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni, wprowadzono korekty wykorzystując ustalone związki wyznaczone metodą opartą o zastosowanie sztucznych sieci neuronowych (rysunek nr 85 i 88). Następnie przeliczono poddane korekcie wartości do wysokości, które odjęto od wysokości uzyskanych dla wyników bez wprowadzenia zmian (zmiany wartości współrzędnej Z, kąta obrotu względem osi X oraz Y) pozycji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni. Na rysunku nr 96 przedstawiono obliczone wartości bezwzględnych różnic wysokości.

Dla przedstawionych na rysunku nr 96 wartości bezwzględnych różnic wysokości obliczono wartości średnią 0,5 cm i maksymalną 7,3 cm, czym potwierdzono możliwość ograniczenia na wyniki skanowania wpływu zmian pozycji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni poprzez zastosowanie korekt dotyczących współrzędnych pionowych linii laserowej na obrazie (zmniejszono wartość średniej różnicy o ponad 80 % i maksymalnej o ponad 40 %).

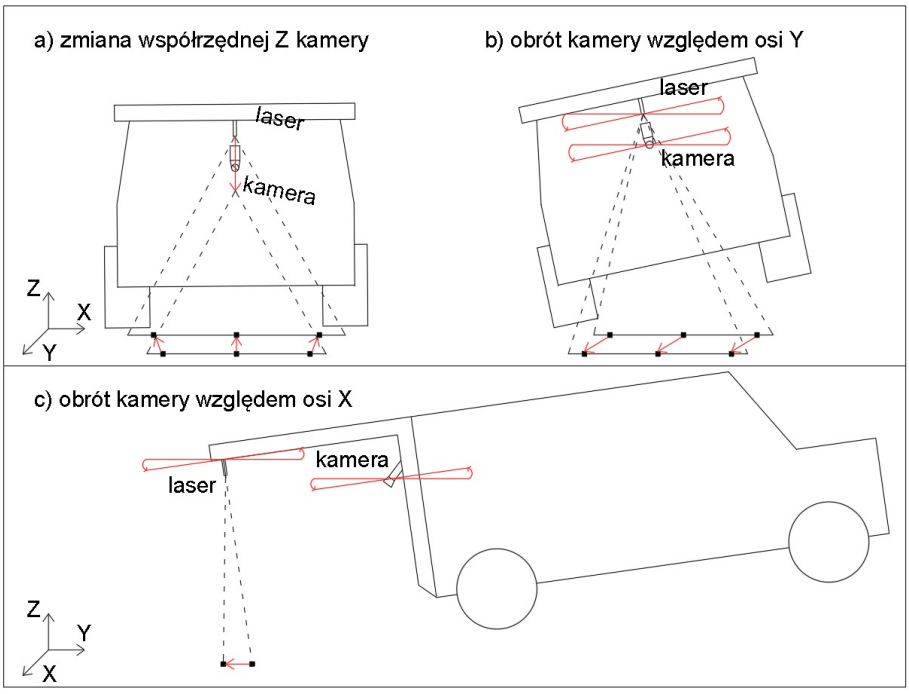


Rys. 96: Trójwymiarowa powierzchnia przedstawiająca obliczone wartości bezwzględne różnic wysokości bazy bez zmian i bazy ze zmianami pozycji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni, dla której wprowadzono korekty

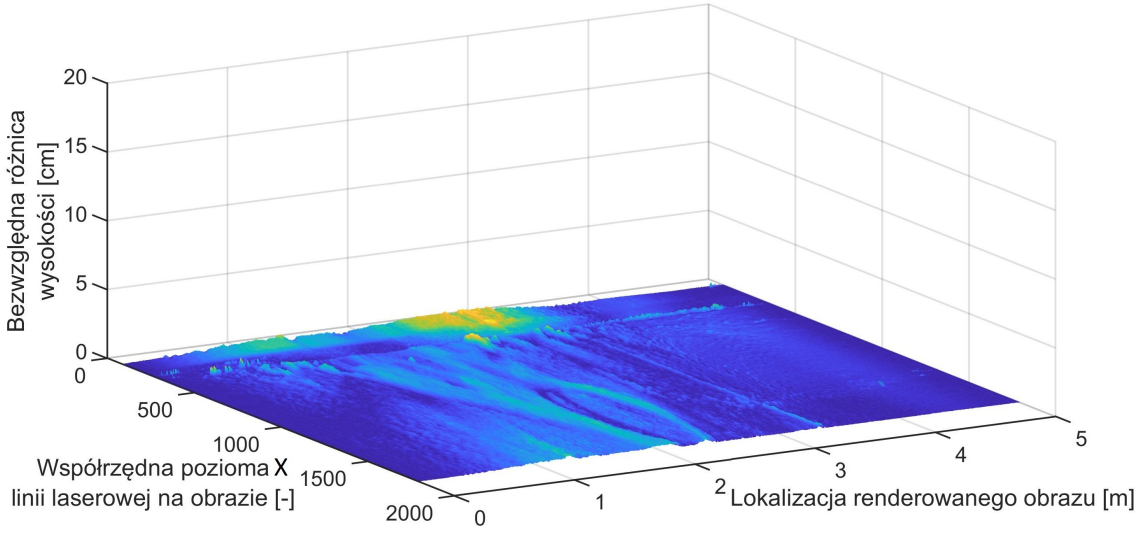
W przeprowadzonym eksperymencie numerycznym, potwierdzono potrzebę wprowadzenia korekt nie tylko dla współrzędnych pionowych linii laserowej na obrazie, ale również korekt ich lokalizacji w przestrzeni XYZ. Na rysunku nr 97 przedstawiono schematycznie ideę wprowadzenia korekt lokalizacji linii laserowej w przestrzeni XYZ związanych ze zmiennymi wartościami współrzędnej Z, kąta obrotu względem osi X oraz Y kamery i lasera względem skanowanej na długości powierzchni.

Wykorzystując opracowany w projekcie PBS3/B6/36/2015 "Inteligentny system monitoringu stanu technicznego nawierzchni jezdni" algorytm obliczeniowy, w bazach wyników wysokości wprowadzono korekty lokalizacji linii laserowej w przestrzeni XYZ. W efekcie wprowadzonych korekt współrzędnych XYZ uzyskano dwa zbiory z wysokościami, które różnią się współrzędnymi XYZ skanowania trójwymiarowego modelu przedstawionego na rysunku nr 91. Dla obliczenia bezwzględnych różnic wysokości między zbiorami wyników skanowania (przed i po wprowadzeniu zmian lokalizacji kamery i lasera względem skanowanej na długości powierzchni) zastosowano interpolację liniową, z użyciem której dla obu zbiorów obliczono wysokości do wspólnego w przekroju poprzecznym zakresu skanowania powierzchni, to jest: od współrzędnej poziomej X równej 84 do 1792 (wspólny zakres po wprowadzeniu korekt współrzędnych poziomych linii laserowej).

Dla przedstawionych na rysunku nr 98 wartości bezwzględnych różnic wysokości obliczono wartości średnią i maksymalną odpowiednio równe 0,1 i 0,8 cm. Tym samym, analiza wyników eksperymentu numerycznego dowodzi, że zaproponowana metoda niwelacji błędów zaburzenia danych z akwizycji metodą triangulacji laserowej realizowanej w warunkach pomiarów w ruchu, jest skuteczna i zadowalająca.



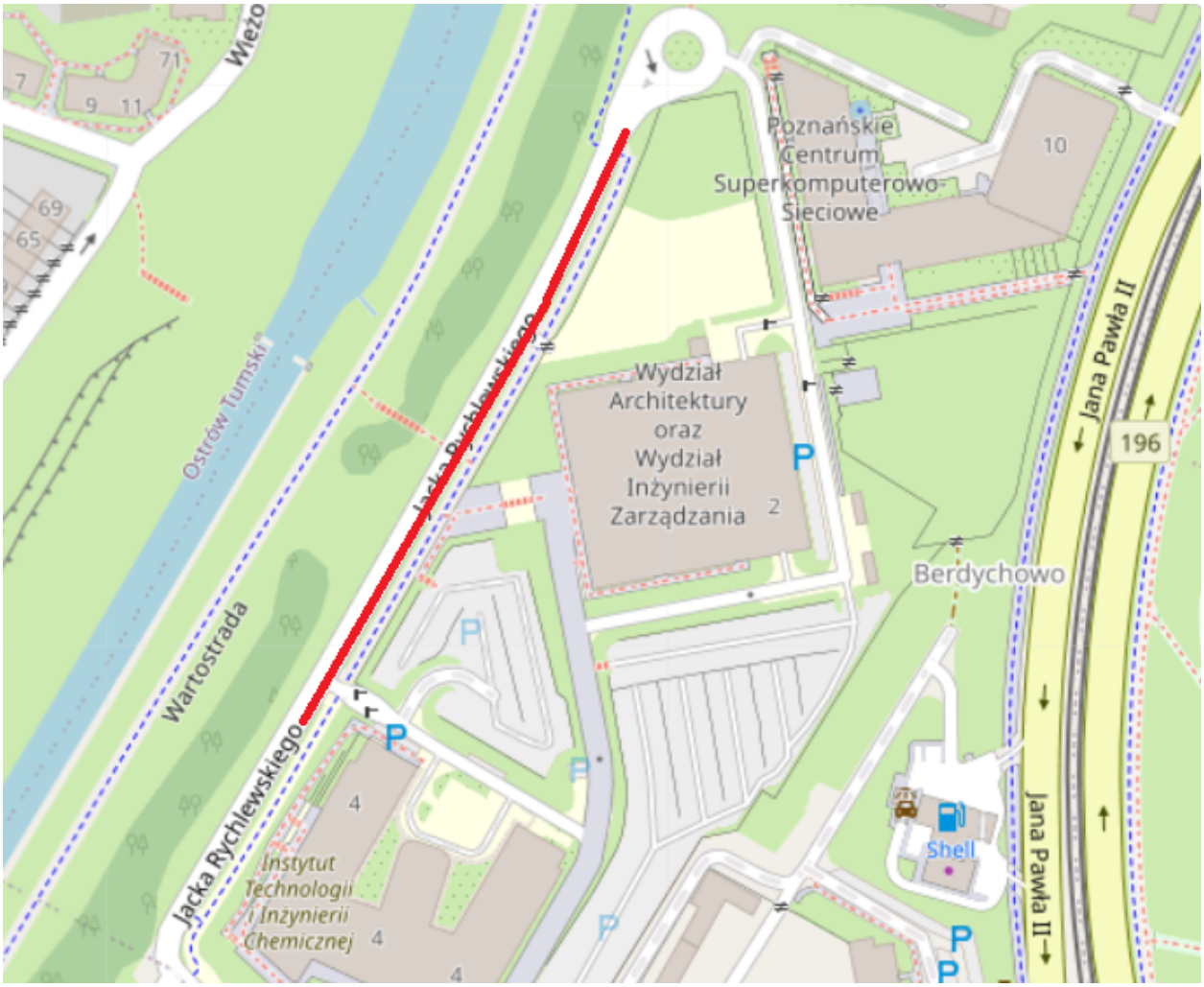
Rys. 97: Schematy przedstawiające ideę wprowadzenia korekt lokalizacji linii laserowej w przestrzeni XYZ związanych ze zmianą wartości odpowiednio: a) współrzędnej Z, b) kąta obrotu względem osi Y, c) kąta obrotu względem osi X kamery i lasera względem skanowanej na długości powierzchni



Rys. 98: Trójwymiarowa powierzchnia przedstawiająca obliczone wartości bezwzględne różnic wysokości bazy bez zmian i bazy ze zmianami pozycji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni, dla których wprowadzono korekty współrzędnych pionowych linii laserowej na obrazie oraz korekty lokalizacji w przestrzeni XYZ

6 Weryfikacja doświadczalna metod wyznaczania wartości parametrów modeli nawierzchni asfaltowych

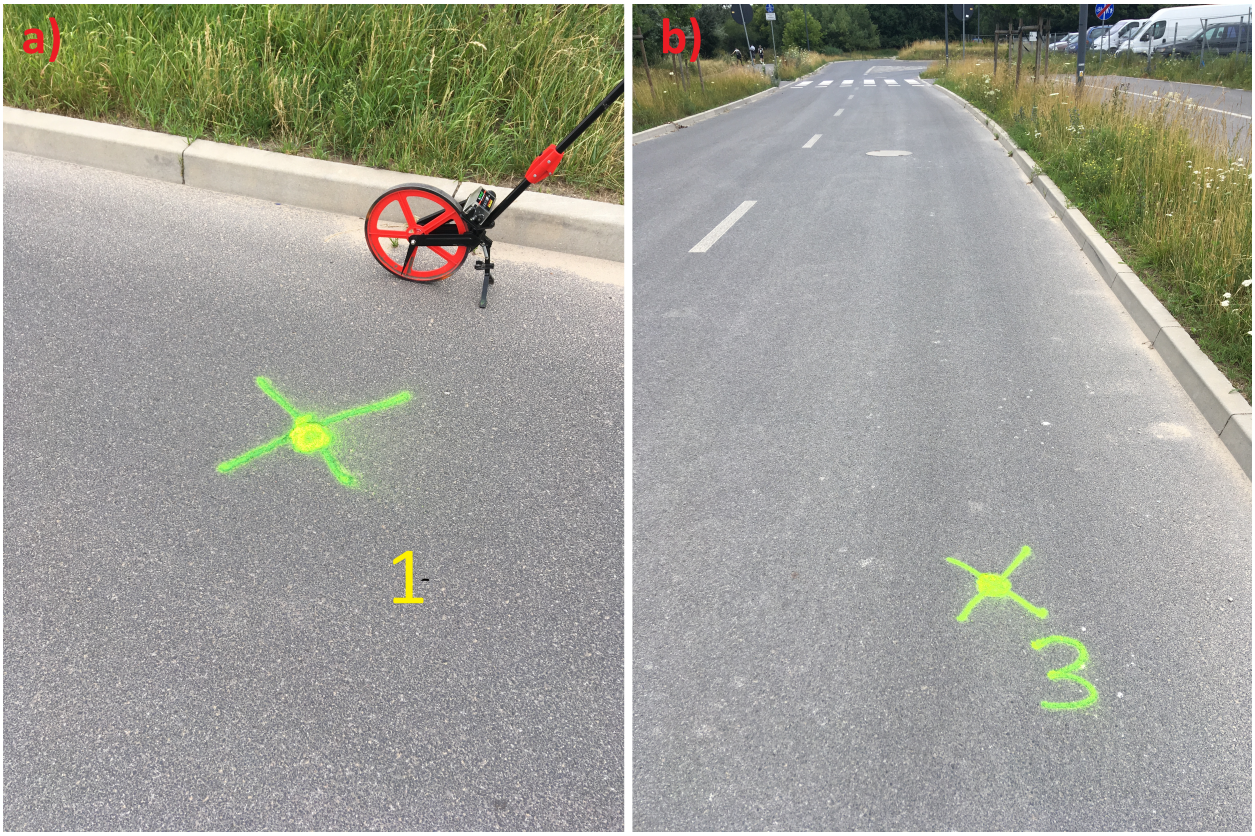
Weryfikację doświadczalną metod wyznaczania wartości parametrów modeli nawierzchni asfaltowych oparto o wyniki badań nawierzchni odcinka testowego będącego fragmentem ulicy Jacka Rychlewskiego w Poznaniu. Na rysunku nr 99 przedstawiono na mapie zaznaczony czerwoną linią lokalizację odcinka testowego.



Rys. 99: Zaznaczony czerwoną linią odcinek testowy na mapie [284]

Natomiast na rysunku nr 100 przedstawiono fotografie odcinka testowego.

W oparciu o wyniki badań przeprowadzonych na odcinku testowym, w kolejnych podpunktach niniejszego rozdziału weryfikacji poddano przyjęte metody wyznaczania wartości parametrów modeli nawierzchni asfaltowych.

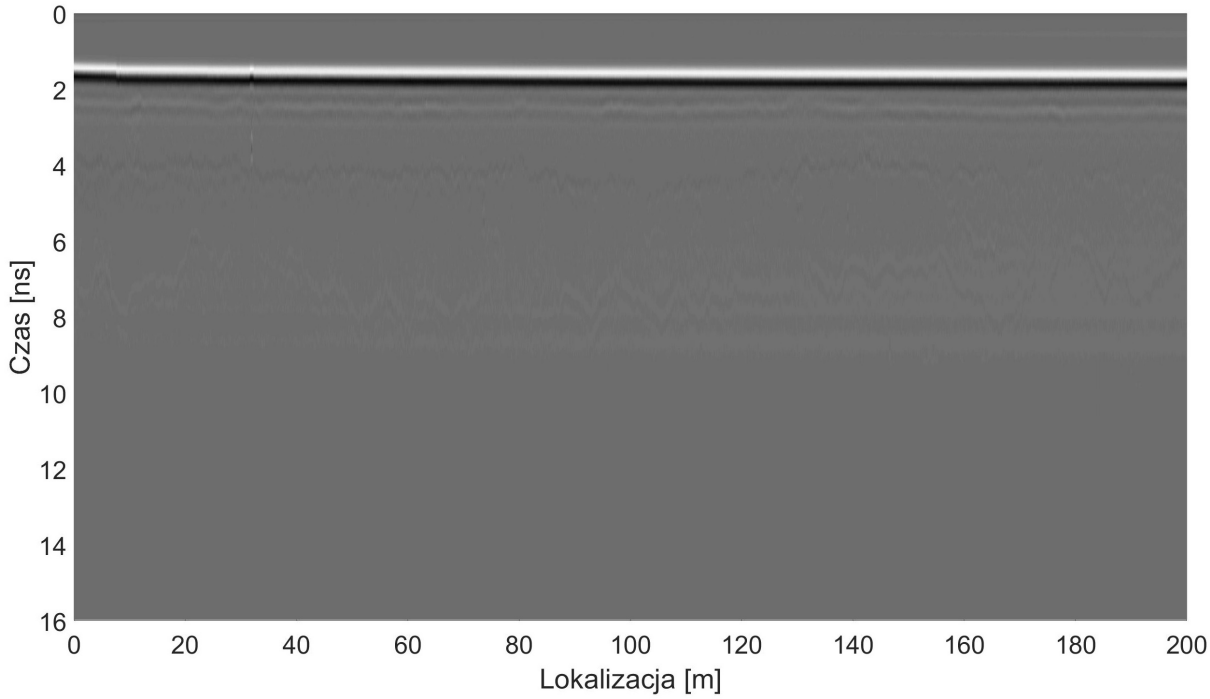


Rys. 100: Fotografie odcinka testowego z zaznaczonymi lokalizacjami wierceń w nawierzchni: a) początek, b) koniec odcinka testowego

6.1 Weryfikacja metody wyznaczania grubości warstw nawierzchni

Podstawą weryfikacji przyjętej metody wyznaczania grubości warstw nawierzchni były wyniki przeprowadzonych na odcinku testowym pomiarów wykonanych urządzeniem GPR typu air-coupled 2 GHz (antena umieszczona nad powierzchnią badanej nawierzchni, generująca impuls o częstotliwości 2 GHz). Wyniki pomiarów przeprowadzonych metodą GPR przedstawiono w postaci echogramu na rysunku nr 101.

Przedstawiony na rysunku nr 101 echogram dotyczy wyników pomiarów wykonanych co 0,002 m wzdłuż testowanego odcinka o długości 200 m i w możliwie jednakowej odległości 1 m od krawężnika. Uzupełnieniem pomiarów metodą GPR dla ciągłego oznaczenia grubości warstw nawierzchni na odcinku testowym były wykonane przewierty w nawierzchni, na podstawie których ustalono konstrukcję składającą się z pakietu warstw asfaltowych leżących na nasypie budowlanym spoczywającym na podłożu rodzimym (do obliczeń przyjęto układ w postaci pakietu warstw z MMA spoczywających na podłożu ulepszonym). W tabeli nr 11 zestawiono wyniki wykonanych przewiertów w nawierzchni odcinka testowego.



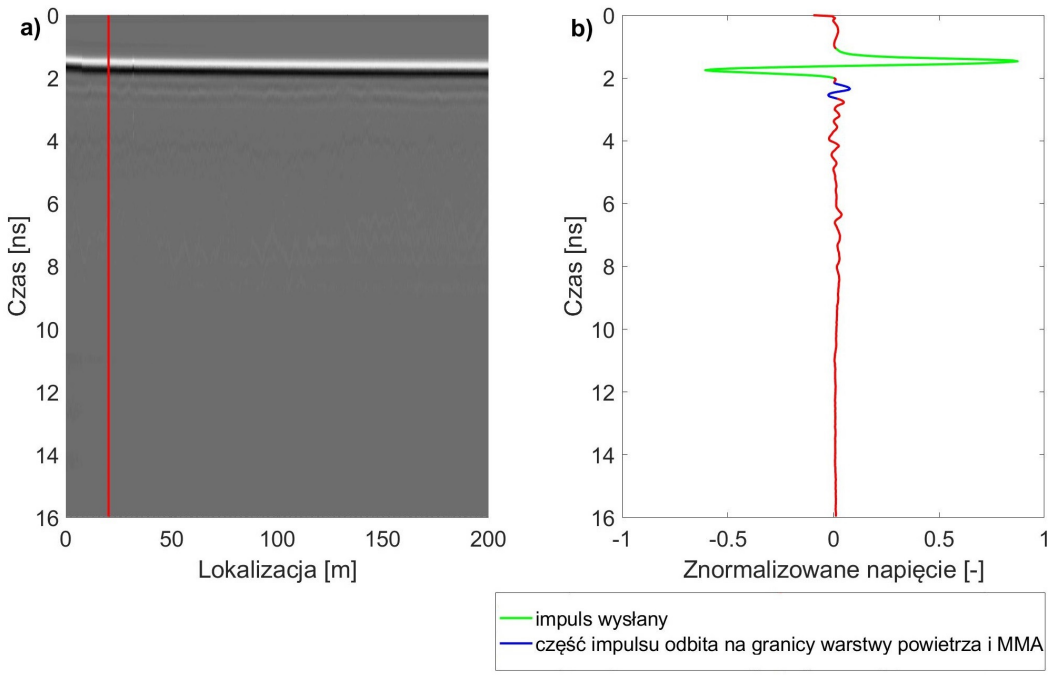
Rys. 101: Przedstawione w postaci echogramu wyniki pomiarów wykonanych urządzeniem GPR, które przeprowadzono na odcinku testowym

Tab. 11: Zestawienie wyników przewiertów wykonanych w nawierzchni odcinka testowego

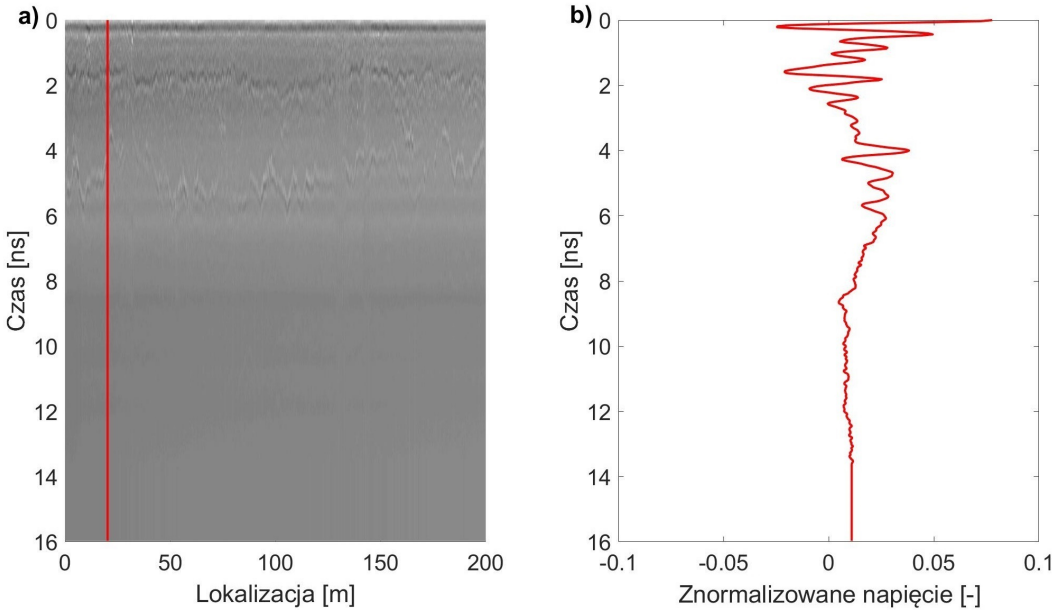
Lp.	Lokalizacja [m]		Grubość pakietu warstw z MMA [m]
	X	Y	
1.	0	1 m od krawężnika	0,145
2.	100	1 m od krawężnika	0,186
3.	200	1 m od krawężnika	0,166

Analizę wyników pomiarów wykonanych urządzeniem GPR metodą obliczeniową przedstawioną w punkcie 5.1 rozpoczęto od "usunięcia" warstwy powietrza. Na rysunku nr 102b przedstawiono losowo wybrany wynik pojedynczego pomiaru urządzeniem GPR, którego lokalizację zaznaczono czerwoną linią na echogramie zaprezentowanym rysunku nr 102a.

Natomiast na rysunku nr 103b przedstawiono losowo wybrany wynik pojedynczego pomiaru wykonanego urządzeniem GPR po "usunięciu" warstwy powietrza, którego lokalizację zaznaczono na echogramie rysunku nr 103a.

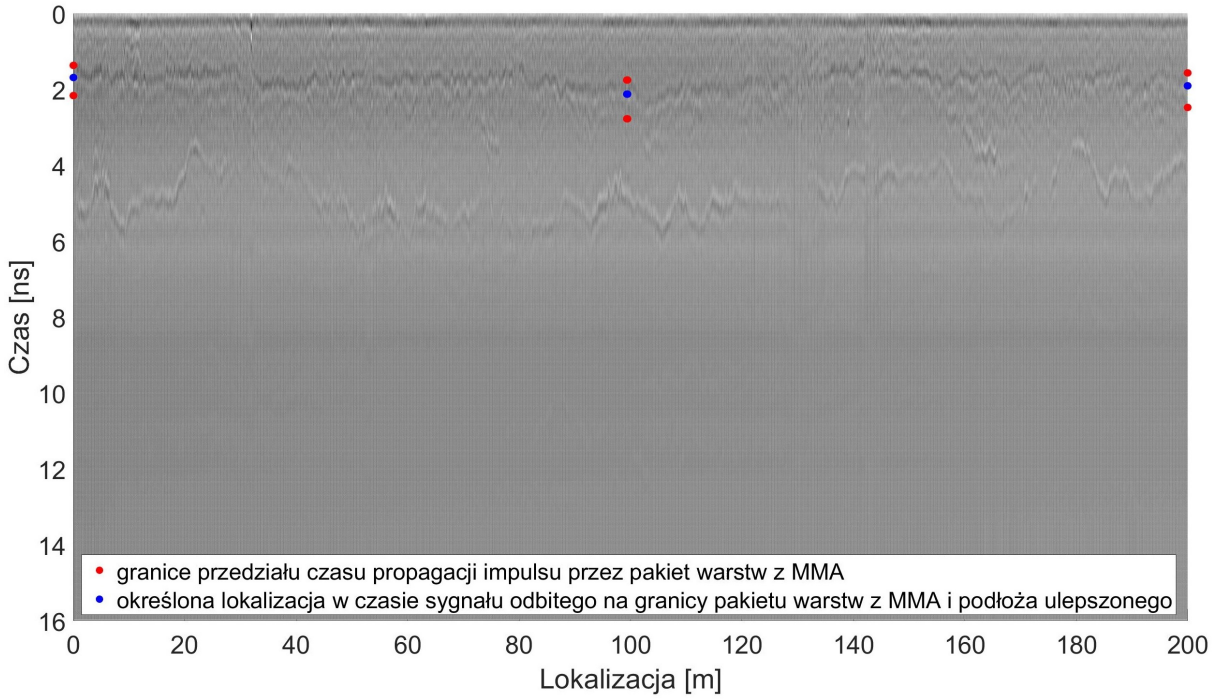


Rys. 102: Wyniki pomiarów wykonanych urządzeniem GPR: a) echogram z zaznaczoną lokalizacją losowo wybranego pojedynczego pomiaru, b) pojedynczy pomiar z zaznaczonymi zarejestrowanymi impulsami, wysłanym oraz jego częścią odbitą na granicy warstwy powietrza i MMA



Rys. 103: Wyniki pomiarów wykonanych urządzeniem GPR po "usunięciu" warstwy powietrza: a) echogram, b) losowo wybrany pojedynczy pomiar

Następnie wykorzystując wzór nr 13, kolejno podstawiając grubości pakietu warstw z MMA zebrane w tabeli nr 11 oraz przyjmując graniczne wartości stałych dielektrycznych $\varepsilon_{r,MMA\,min} = 2$ i $\varepsilon_{r,MMA\,max} = 5$ (na potrzeby kontroli parametrów algorytmu, opisywanego już wcześniej w punkcie 5.1), obliczono graniczne czasy propagacji fal przez pakiet warstw z MMA w lokalizacjach wykonanych przewiertów. Na rysunku nr 104 przedstawiono echogram z zaznaczonymi granicznymi czasami propagacji impulsu przez pakiet warstw z MMA w lokalizacjach wykonanych przewiertów.



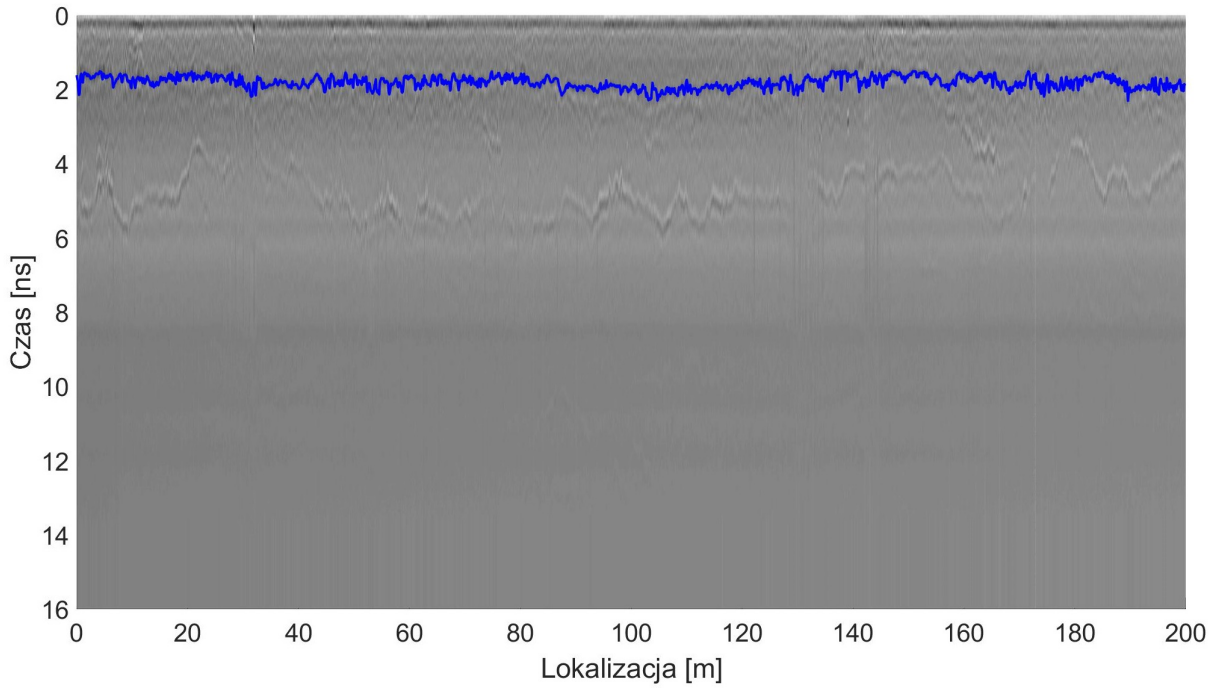
Rys. 104: Echogram przedstawiający wyniki pomiarów wykonanych urządzeniem GPR z zaznaczonymi granicznymi czasami propagacji impulsu przez pakiet warstw z MMA wraz z ustaloną lokalizacją w czasie impulsu odbitego na granicy pakietu warstw z MMA i podłoża ulepszonego

Mając określone lokalizacje w czasie impulsów odbitych na granicy pakietu warstw z MMA i podłoża ulepszonego (rysunek nr 104), wykorzystując wzór nr 12 obliczono wartości względnych stałych dielektrycznych pakietu warstw z MMA w lokalizacjach wykonanych przewiertów w nawierzchni. Wyniki wykonanych obliczeń zestawiono w tabeli nr 12.

Po obliczeniu wartości względnych stałych dielektrycznych pakietu warstw z MMA w lokalizacjach wykonanych przewiertów, wyznaczono na całej długości echogramu lokalizacje w czasie odbitych impulsów na granicy pakietu warstw z MMA i podłoża ulepszonego, które przedstawiono na rysunku nr 105.

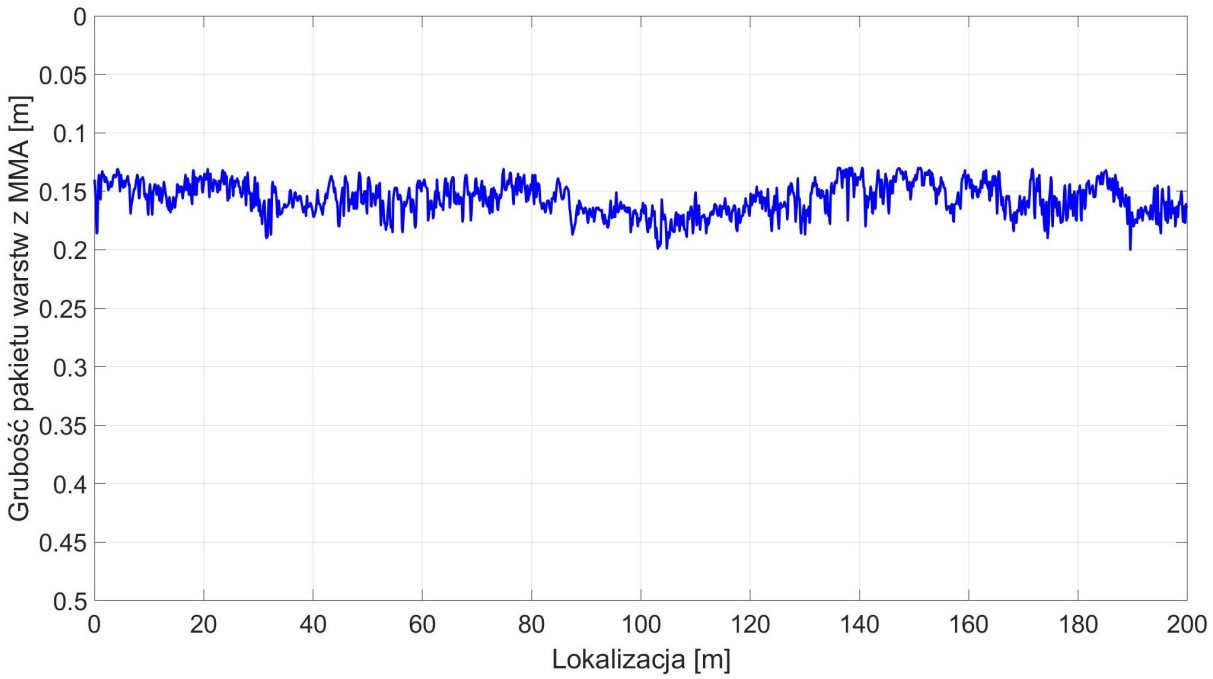
Tab. 12: Zestawienie wyników obliczeń wartości względnych stałych dielektrycznych pakietu warstw z MMA w lokalizacjach przewiertów wykonanych w nawierzchni

Lp.	Lokalizacja [m]	Grubość [m]	Czas propagacji impulsu [ns]	Wartość względnej stałej dielektrycznej [-]
1.	0	0,145	1,688	3,043
2.	100	0,186	2,125	2,933
3.	200	0,166	1,906	2,963



Rys. 105: Echogram z zaznaczonymi na całej długości impulsami odbitymi na granicy pakietu warstw z MMA i podłoża ulepszonego

Ostatnim wykonanym krokiem obliczeniowym dla wyznaczenia grubości pakietu warstw z MMA nawierzchni odcinka testowego było wykorzystanie wzoru nr 11. Do obliczeń podstawiono $\varepsilon_r = 2,979$ (wartość równa średniej z trzech wartości względnych stałych dielektrycznych zebranych w tabeli nr 12) oraz kolejno wyznaczone i zaznaczone na rysunku nr 105 impulsy odbite na granicy pakietu warstw z MMA i podłoża ulepszonego, których lokalizacje w czasie są równe czasowi propagacji fali przenikającej przez pakiet warstw z MMA. Ustalone na podstawie obliczeń dla wyników pomiarów wykonanych urządzeniem GPR grubości pakietu warstw z MMA na całej długości odcinka testowego przedstawiono na rysunku nr 106.



Rys. 106: Ustalone na podstawie pomiarów wykonanych urządzeniem GPR grubości pakietu warstw z MMA na całej długości odcinka testowego

Mając na celu ocenę zgodności między obliczonymi grubościami warstw, a wartościami ustalonymi na podstawie przewiertów, odczytano wartości obliczonych grubości w lokalizacjach wykonanych przewiertów, które porównano z grubościami zebranymi w tabeli nr 11. Wyniki porównania zestawiono w tabeli nr 13.

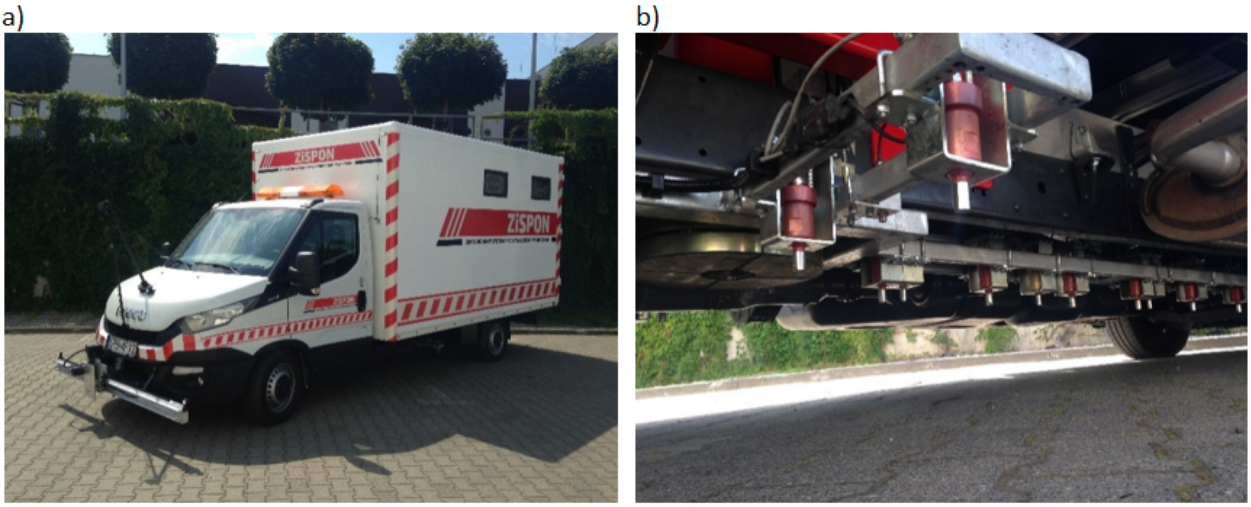
Tab. 13: Zestawienie wyników porównania grubości pakietu warstw z MMA ustalonymi na podstawie wykonanych przewiertów w nawierzchni z grubościami obliczonymi z wykorzystaniem wyników pomiarów wykonanych urządzeniem GPR

Lp.	Lokalizacja	Grubość pakietu warstw z MMA [m]		Bezwzględna różnica
	[m]	z przewiertów	z obliczeń dla wyników GPR	[m]
1.	0	0,145	0,143	0,002
2.	100	0,186	0,178	0,008
3.	200	0,166	0,164	0,002

Z porównania grubości uzyskano maksymalną różnicę mniejszą niż 1 cm, czym w ramach eksperymentu doświadczalnego potwierdzono możliwości obliczeniowe przyjętej metody oznaczania grubości warstw nawierzchni na podstawie wyników pomiarów wykonanych urządzeniem GPR, a autorski algorytm z dopuszczalnymi wartościami granicznymi przedziałów stałych dielektrycznych, może być elementem automatyzacji metod oznaczania grubości.

6.2 Weryfikacja metody wyznaczania wartości parametrów materiałowych warstw modeli nawierzchni

Weryfikację doświadczalną opracowanej metody wyznaczania wartości parametrów materiałowych warstw modeli nawierzchni przeprowadzono dla bazy wyników pomiarów ugięć uzyskanych urządzeniem FWD. Do pomiarów ugięć nawierzchni jezdni wykorzystano urządzenie pomiarowe ZiSPON (Zintegrowany System Precyzyjnej Oceny Nawierzchni), które wybudowano w ramach projektu programu badań stosowanych PBS3/B6/38/2015, zrealizowanego dla Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, przez konsorcjum firmy HAX Dariusz Warias i Politechniki Poznańskiej. Projekt zrealizowany został między innymi przez Zespół z Zakładu Budownictwa Drogowego, Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej, w którego skład wchodził autor niniejszej rozprawy doktorskiej. Na rysunku nr 107 przedstawiono fotografie urządzenia ZiSPON.



Rys. 107: Fotografie urządzenia ZiSPON: a) widok ogólny, b) widok ramy pomiarowej

Pomiary ugięć nawierzchni wykonano na odcinku testowym, na którym przeprowadzono prześwietlenia urządzeniem GPR (patrz punkt 5.1). Na rysunku nr 108 przedstawiono na schemacie odcinka testowego lokalizacje wykonanych przewiertów w nawierzchni oraz pomiarów wykonanych urządzeniami typu FWD i GPR.

Pomiary ugięć wykonane urządzeniem FWD:

- dotyczą nawierzchni na odcinku testowym, której obciążenie ruchem drogowym jest sporadyczne (« KR1),
- zrealizowano w okresie jednego roku kalendarzowego w czterech różnych terminach, w których temperatura pakietu warstw asfaltowych zmierzona w połowie sumy ich grubości wynosiła odpowiednio: 9,5^{o}C; 20,3^{o}C; 26,5^{o}C; 32,3^{o}C,

- przeprowadzono w lokalizacji wszystkich punktów pomiarowych FWD w każdym z czterech terminów i za każdym razem w sekwencji minimum 3 obciążeń nawierzchni (3 pomiary ugięć FWD) przy zdefiniowanej w urządzeniu wartości obciążenia równego 50 kN.

Obliczenia dotyczące bazy wyników pomiarów ugięć wykonanych FWD wykonano zgodnie z opracowaną i przedstawioną w punkcie 5.2 procedurą wyznaczania parametrów materiałowych warstw modeli nawierzchni:

1) zarejestrowane w trakcie pomiarów urządzeniem FWD wartości przemieszczeń w czasie dynamicznego obciążenia nawierzchni przeliczono do wartości prędkości,

2) przeprowadzono obliczenie FFT dla bazy zarejestrowanych w trakcie pomiarów urządzeniem FWD wartości obciążeń w czasie oraz obliczenie FFT z całkowaniem w dziedzinie częstotliwości dla wartości prędkości w dziedzinie czasu,

3) mając obliczone FFT wartości amplitud obciążeń i przemieszczeń w zależności od częstotliwości, wykorzystując wzór nr 36, przeliczono wartości amplitud przemieszczeń do wartości amplitudy obciążenia równej $F_{amp} = 50\,kN$,

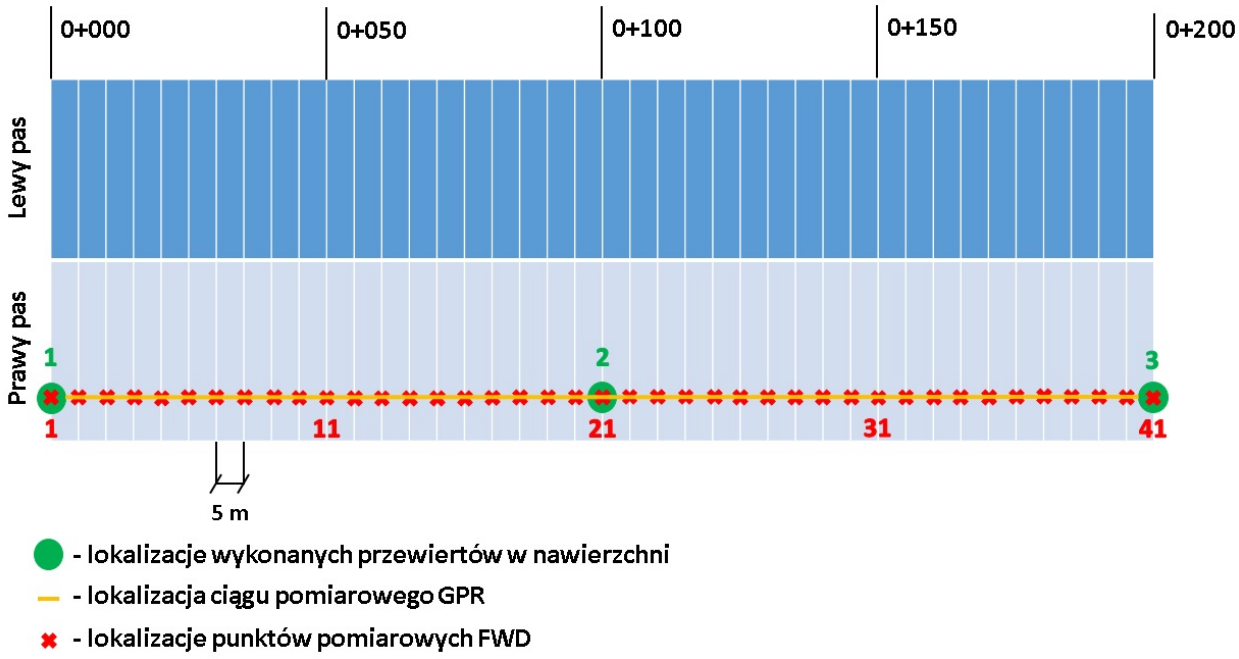
4) na podstawie obliczonych wartości amplitud przemieszczeń opracowano bazę linii przemieszczeń odpowiadających zakresowi częstotliwości od 0 do 50 Hz,

5) dla opracowanej bazy linii przemieszczeń przeprowadzono obliczenia odwrotne, przy realizacji której wykorzystano:

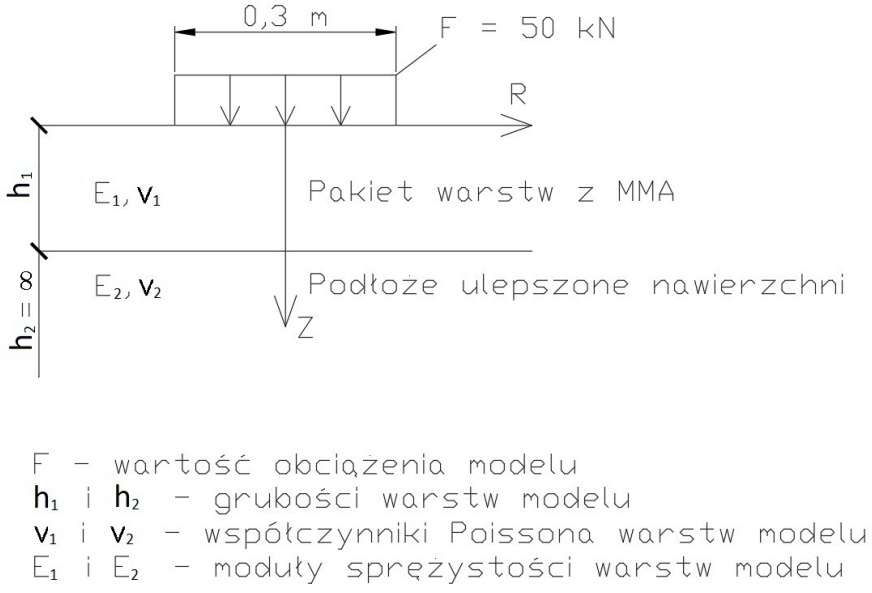
   - dwuwarstowy model nawierzchni LET (w załączniku nr 4 zamieszczono opracowany przez autora rozprawy na podstawie pozycji [97] kod skryptu programu MATLAB realizujący obliczenie wartości ugięć nawierzchni, które odpowiadają warunkom pomiaru FWD), w którym zdefiniowano grubości poszczególnych warstw zgodnie z wyznaczonymi na długości odcinka testowego grubościami warstw nawierzchni (patrz punkt 5.1),
   - algorytm optymalizacyjny Nelder Mead [179],
   - funkcję błędu AVCF [149, 188].

Na rysunku nr 109 przedstawiono schemat dwuwarstwowego modelu nawierzchni odcinka testowego, który wykorzystano w przeprowadzeniu obliczeń odwrotnych.

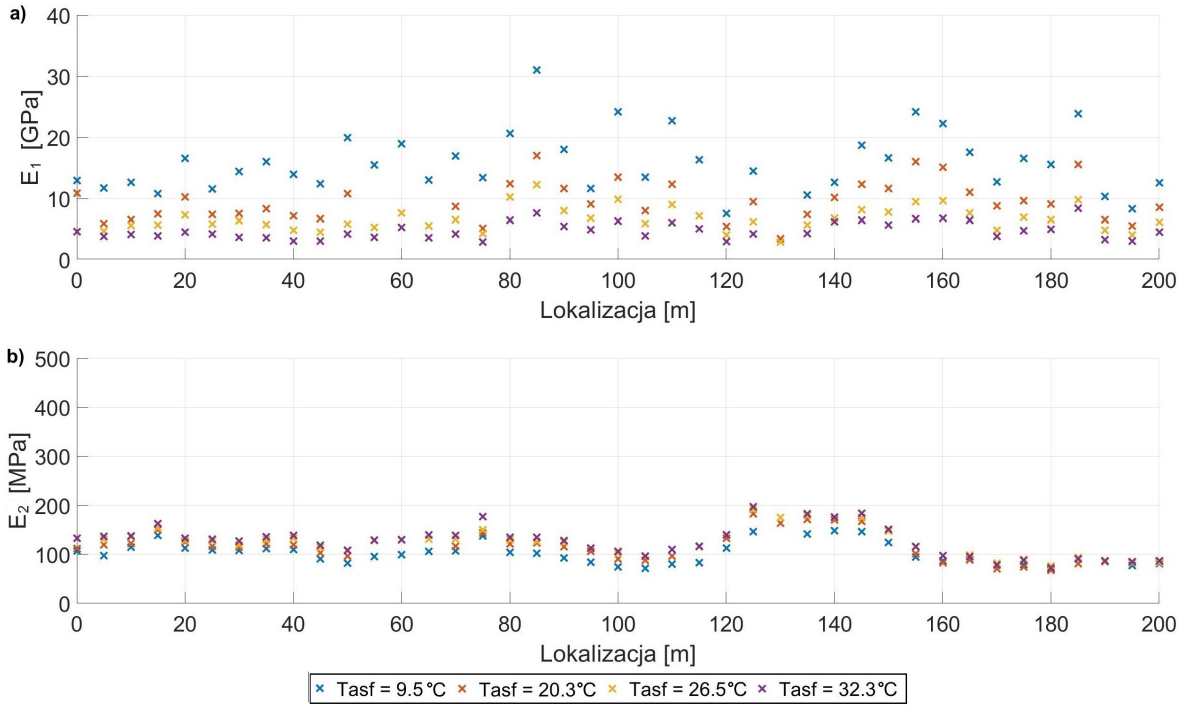
Procedurą odwrotną obliczono bazę wartości modułów sprężystości E_1 i E_2 warstw modelu nawierzchni, w którym przyjęto wartości współczynników Poissona równe $\nu_1 = 0{,}3$ i $\nu_2 = 0{,}35$. Na rysunkach nr 110, 111, 112, 113, 114 i 115, na których symbolem Tasf oznaczono temperaturę pakietu warstw asfaltowych zmierzoną na głębokości równej połowie sumy ich grubości, przedstawiono ostatecznie zebraną bazę obliczonych wartości E_1 i E_2, które obejmują przypadki wyników przeprowadzonych obliczeń odwrotnych, dla których uzyskano wartości błędu dopasowania AVCF ≤ 3 % i modułu sprężystości $E_1 \leq 40$ GPa.



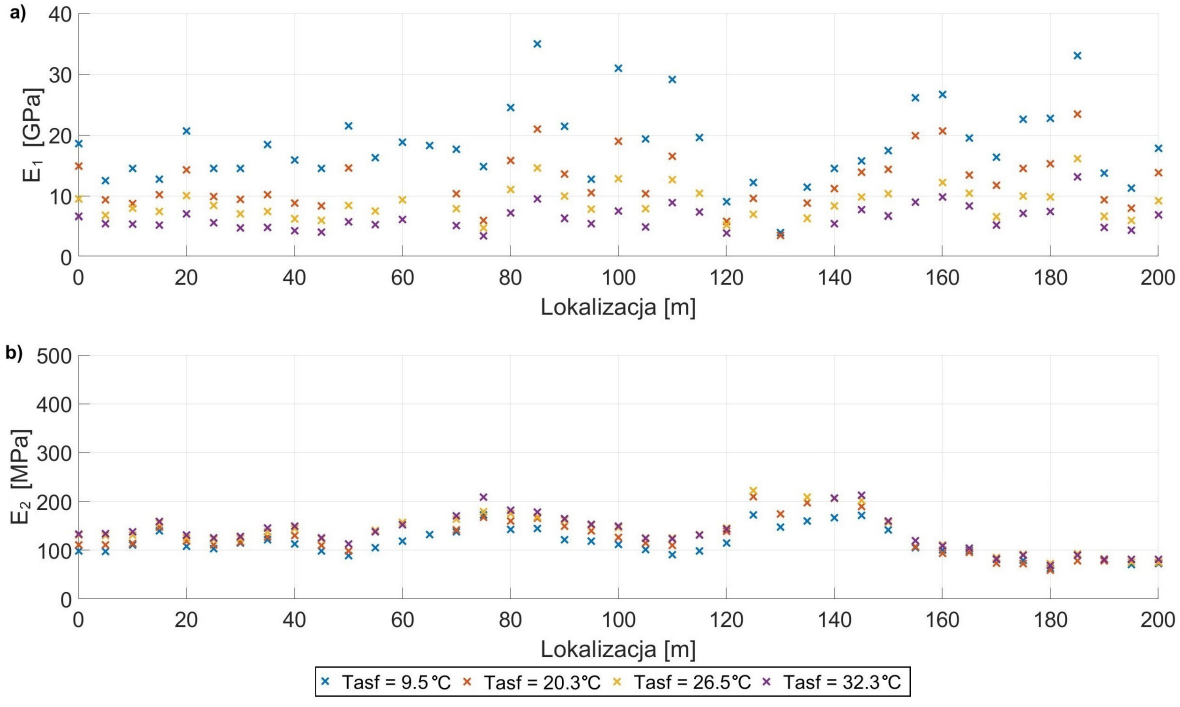
Rys. 108: Schemat odcinka testowego z zaznaczonymi lokalizacjami wykonanych przewiertów w nawierzchni oraz pomiarów wykonanych urządzeniami typu FWD i GPR



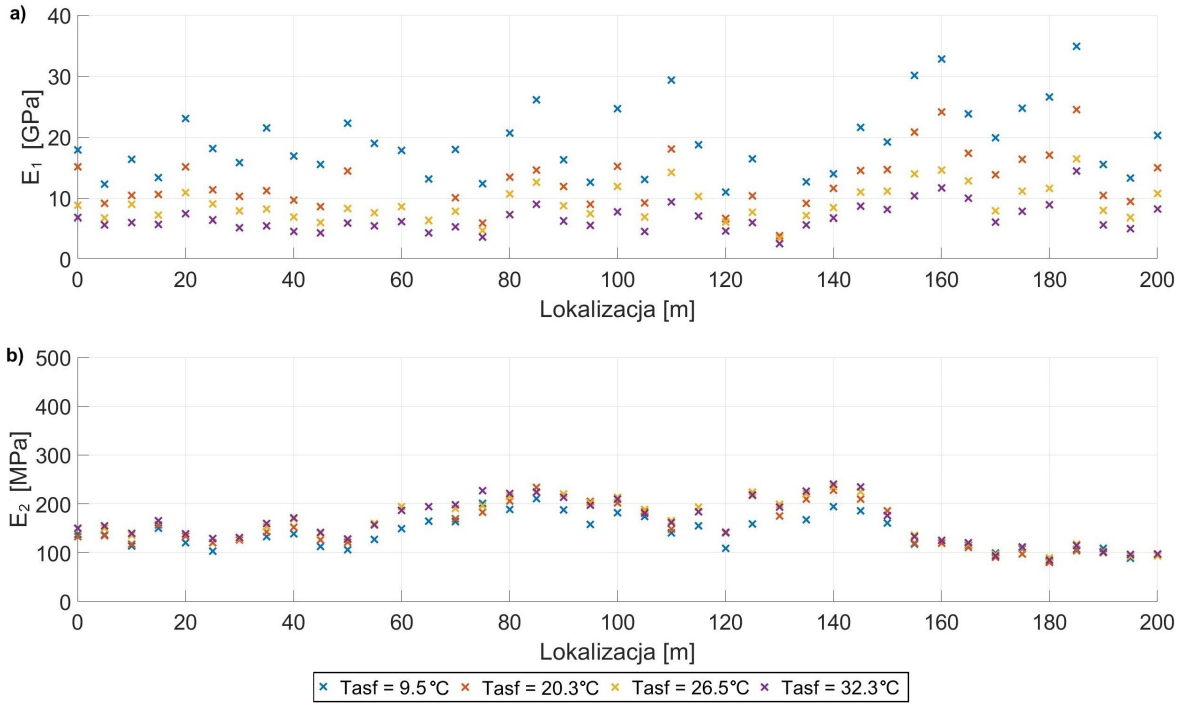
Rys. 109: Schemat dwuwarstwowego modelu nawierzchni odcinka testowego wykorzystany w przeprowadzeniu obliczeń odwrotnych



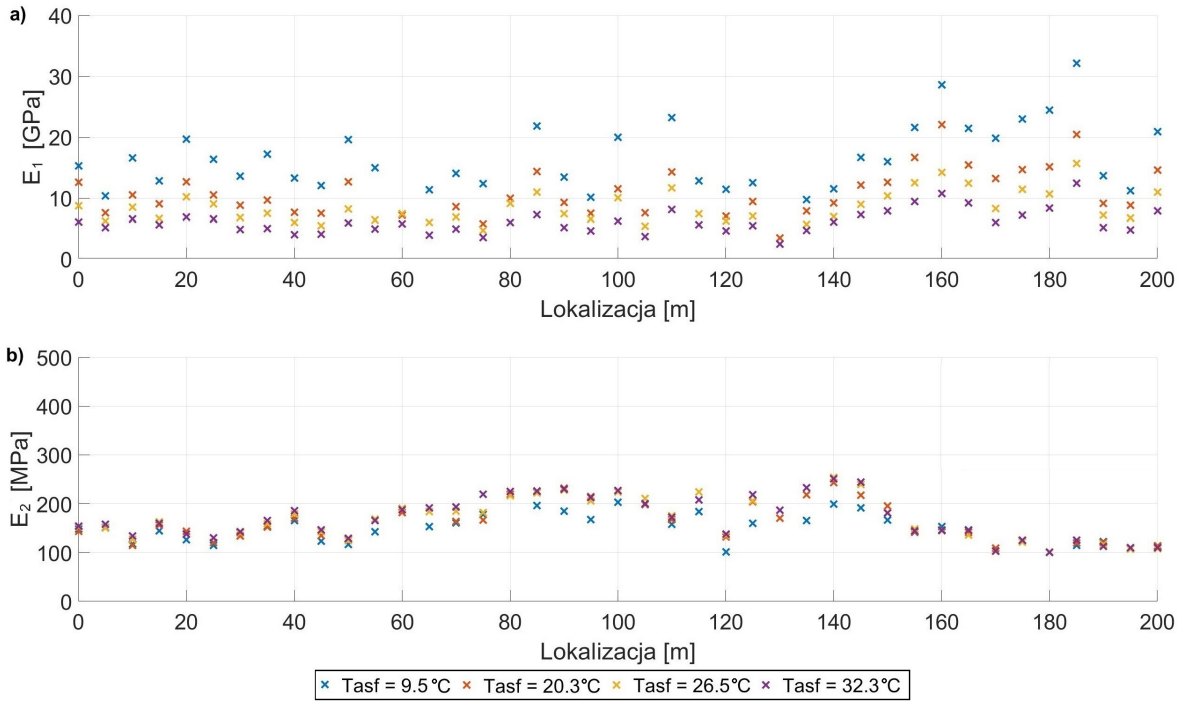
Rys. 110: Wartości modułów sprężystości E_1 i E_2 obliczone dla częstotliwości 8,3 Hz



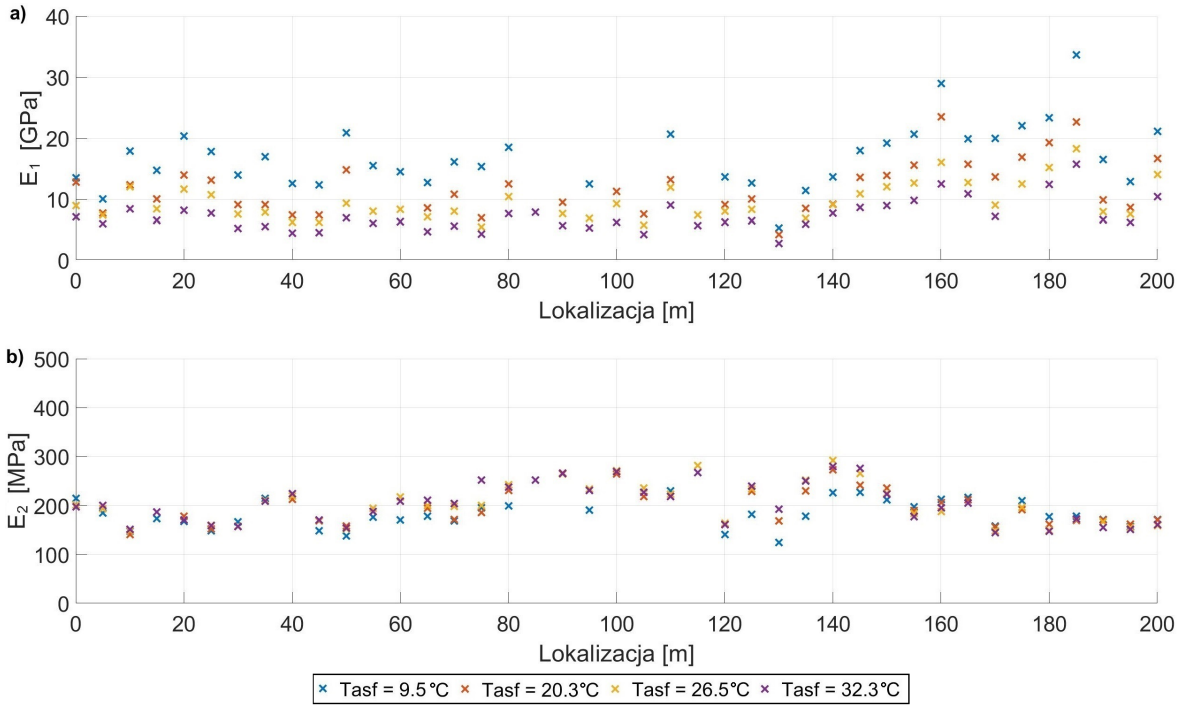
Rys. 111: Wartości modułów sprężystości E_1 i E_2 obliczone dla częstotliwości 16,7 Hz



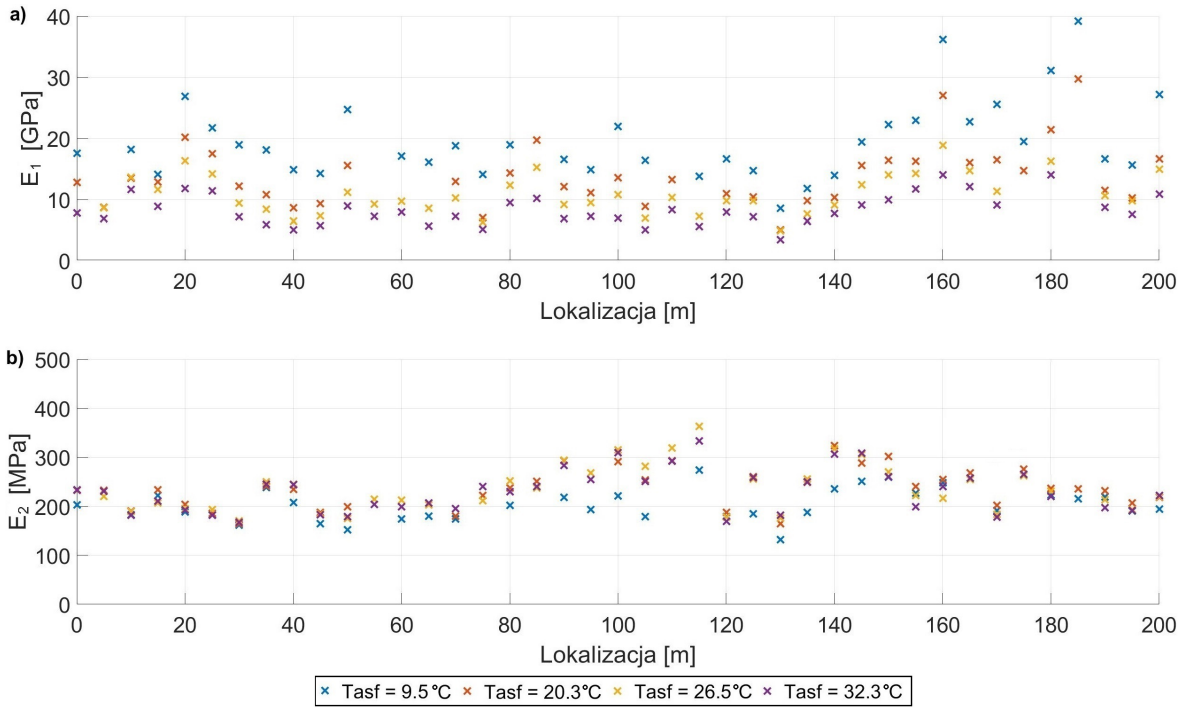
Rys. 112: Wartości modułów sprężystości E_1 i E_2 obliczone dla częstotliwości 25,0 Hz



Rys. 113: Wartości modułów sprężystości E_1 i E_2 obliczone dla częstotliwości 33,3 Hz



Rys. 114: Wartości modułów sprężystości E_1 i E_2 obliczone dla częstotliwości 41,7 Hz



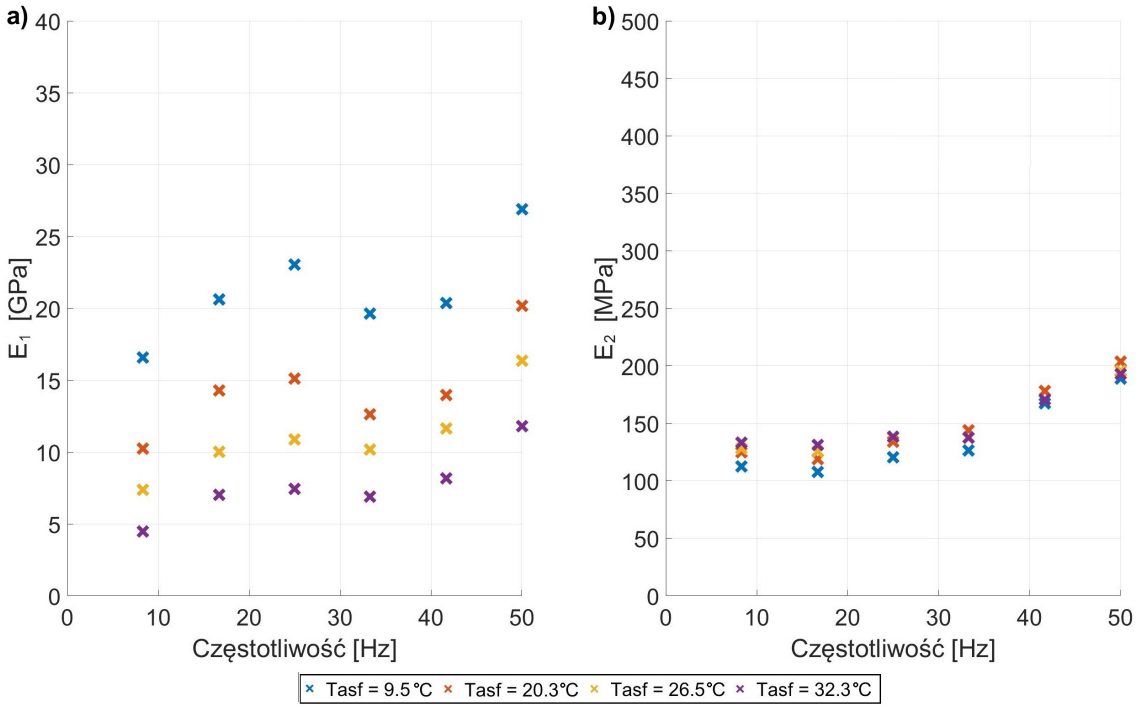
Rys. 115: Wartości modułów sprężystości E_1 i E_2 obliczone dla częstotliwości 50,0 Hz

Przedstawioną na rysunkach nr 110, 111, 112, 113, 114 i 115, bazę wartości modułów sprężystości warstw modelu nawierzchni E_1 i E_2 poddano weryfikacji, którą sprowadzono do oceny obliczonych wartości w zależności od:

1) temperatury pakietu warstw asfaltowych zmierzonej na głębokości równej połowie sumy ich grubości,

2) częstotliwości.

Podstawę weryfikacji wymienionych zależności stanowiły opracowane wykresy wartości modułu sprężystości warstwy w zależności od częstotliwości, które wykonano osobno dla każdej lokalizacji na długości odcinka testowego. Na rysunku nr 116 zaprezentowano przykładowe wykresy z wartościami E_1 i E_2 w zależności od częstotliwości, które odpowiadają lokalizacji w kilometrze 0+020 odcinka testowego.



Rys. 116: Wykresy zależności E_1 i E_2 od częstotliwości w kilometrze 0+020 odcinka testowego

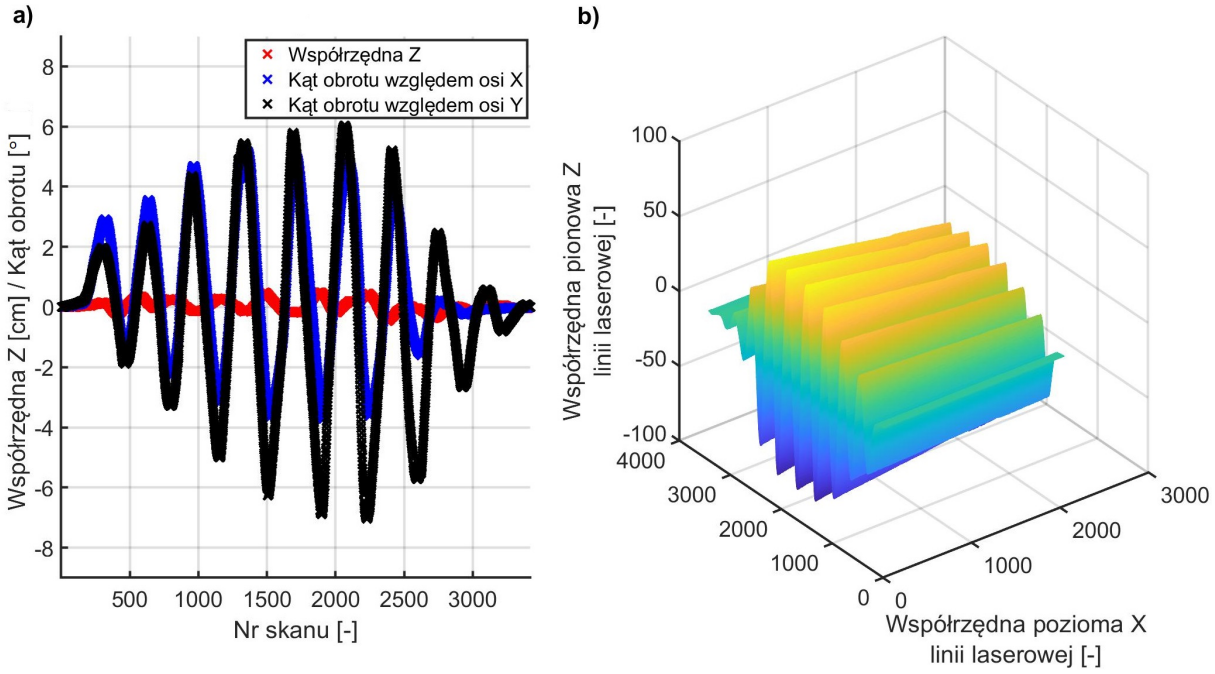
W rezultacie wykonanej weryfikacji ustalono, że:

1) wartości modułu sprężystości E_1 (warstwy modelu odpowiadającej pakietowi warstw asfaltowych nawierzchni) maleją wraz ze wzrostem temperatury pakietu warstw asfaltowych w całym zakresie analizowanych częstotliwości, co nie dotyczy wartości E_2 (warstwy modelu odpowiadającej ulepszonemu podłożu nawierzchni),

2) wartości modułu sprężystości E_2 (warstwy modelu odpowiadającej ulepszonemu podłożu nawierzchni) rosną wraz ze wzrostem częstotliwości, co nie jest regułą dla wartości E_1 (warstwy modelu odpowiadającej pakietowi warstw asfaltowych nawierzchni).

6.3 Weryfikacja metody skanowania profilu nawierzchni jezdni

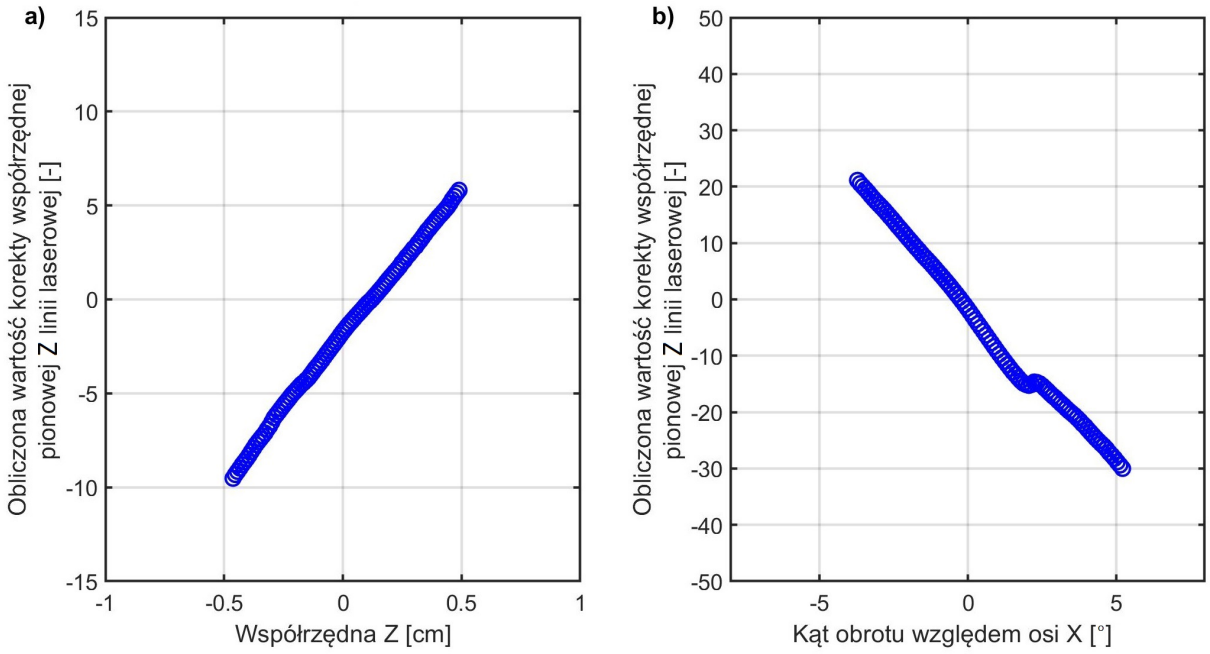
W ramach weryfikacji doświadczalnej metody skanowania profilu nawierzchni jezdni odtworzono zakres eksperymentu numerycznego przedstawionego w punkcie 5.3, w którym zaprezentowano metodę wykorzystującą sztuczne sieci neuronowe do ustalenia zależności wprowadzenia korekt dla wyników skanowania profilu nawierzchni jezdni związanych ze zmianą lokalizacji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni. Pracę rozpoczęto od wykonania skanowania posadzki hali o równej powierzchni urządzeniem, które w trakcie pomiaru wprowadzono w drgania. Uzyskaną bazę wyników skanowania przedstawiono na rysunku nr 117.



Rys. 117: Wyniki skanowania posadzki hali, które uzyskano urządzeniem wprowadzonym w drgania w trakcie pomiaru

Następnie zgodnie z procedurą obliczeniową przedstawioną w punkcie 5.3, wyuczono 2048 sieci neuronowych bazą wyników pomiarów zaprezentowaną na rysunku nr 117.

W kolejnym kroku obliczeniowym wykorzystano wyuczone sieci neuronowe do wyznaczenia związku wartości korekt współrzędnej pionowej Z linii laserowej ze zmianą lokalizacji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni w zakresie wartości współrzędnej Z oraz wartości kąta obrotu względem osi X. Ustalone na podstawie przeprowadzonych obliczeń związki wartości korekt współrzędnej pionowej Z linii laserowej przedstawiono na rysunku nr 118.

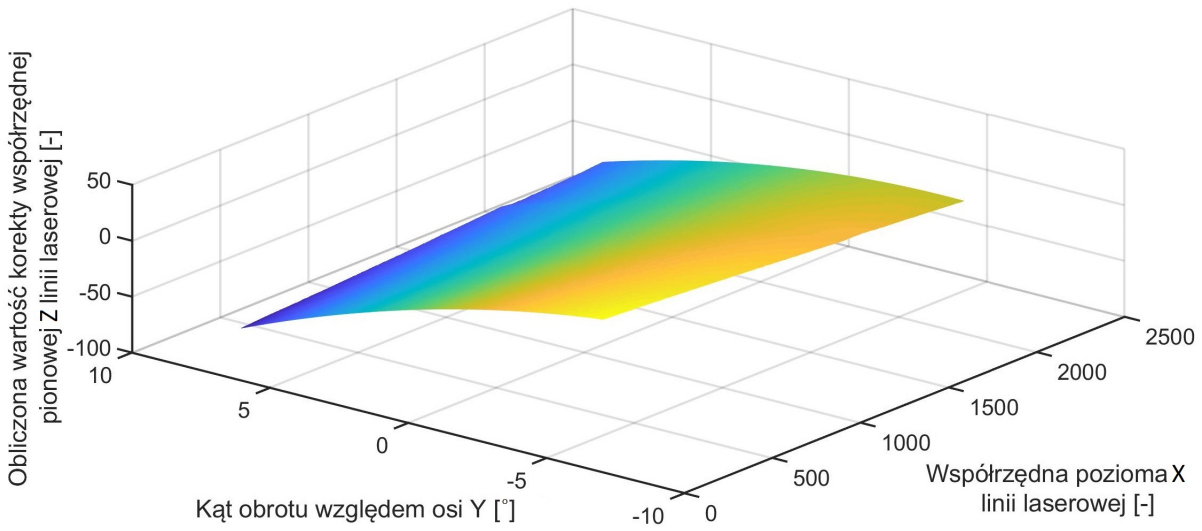


Rys. 118: Związek wartości korekty współrzędnej pionowej Z linii laserowej z wartością: a) współrzędnej Z, b) kąta obrotu względem osi X

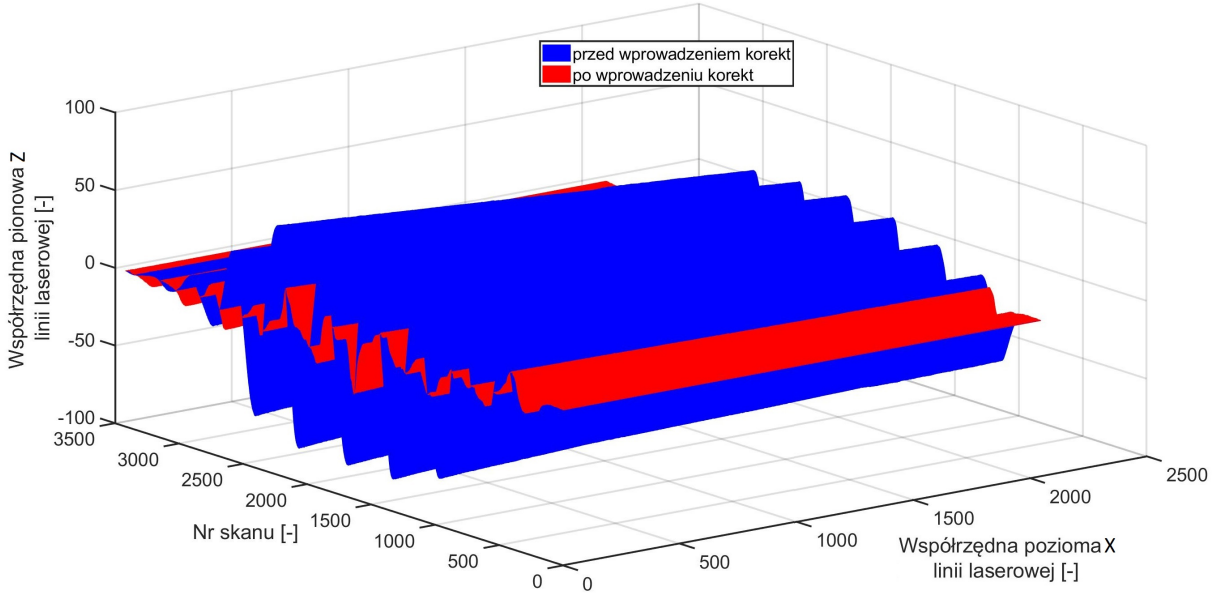
Przedstawione na rysunku nr 118 wyznaczone związki wykorzystano do obliczenia wartości korekt współrzędnych pionowych linii laserowej wyjściowej bazy wyników skanowania, którą przedstawiono na rysunku nr 117b. Po wprowadzeniu do bazy obliczonych wartości korekt uzyskano nową bazę wartości, którą wykorzystano do ustalenia związku wartości korekt współrzędnej pionowej Z linii laserowej od wartości kąta obrotu względem osi Y (obliczenia wykonano zgodnie z procedurą przedstawioną w podrozdziale 6.3). Ustalone związki wartości korekty współrzędnej pionowej Z linii laserowej od wartości kąta obrotu względem osi Y przedstawiono na rysunku nr 119.

Mając wyznaczony komplet związków dla wprowadzenia korekt zmiany lokalizacji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni, dla bazy wyników skanowania posadzki hali wprowadzono korekty. Na rysunku nr 120 przedstawiono wyniki skanowania przed i po wprowadzeniu korekt.

Następnie dla wyników skanowania przeliczono współrzędne pionowe linii laserowych do wysokości wykorzystując ustalony związek, który przedstawiono na rysunku nr 118a. Na rysunku nr 121 przedstawiono trójwymiarowe powierzchnie przedstawiające wysokości obliczone przed i po wprowadzeniu korekt związanych z ruchem kamery i lasera względem skanowanej posadzki hali.



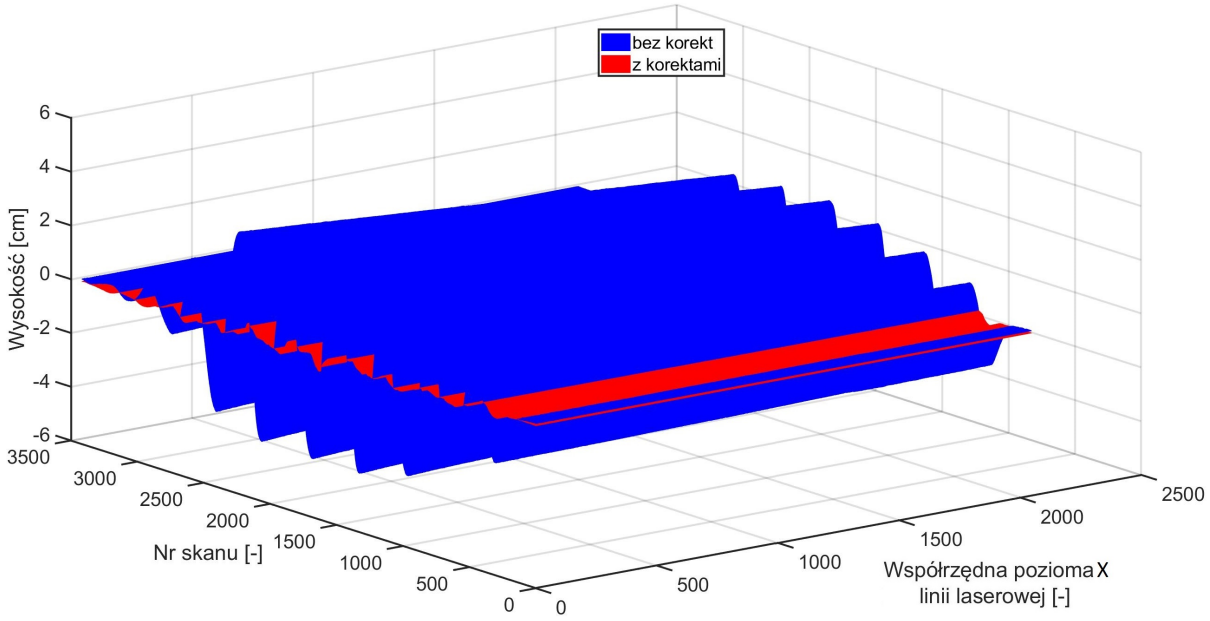
Rys. 119: Wyznaczone związki wartości korekty współrzędnej pionowej Z linii laserowej z wartością kąta obrotu względem osi Y przedstawione w postaci trójwymiarowej powierzchni



Rys. 120: Wyniki skanowania posadzki hali przed i po wprowadzeniu korekt związanych ze zmianą lokalizacji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni

W ostatnim kroku dla wyników eksperymentu obliczono z bezwzględnych wartości wysokości wartości średnie 1,3 cm (bez korekty zmian pozycji kamery i lasera względem skanowanej powierzchni) i 0,1 cm (z korektami) oraz wartości maksymalne 3,9 cm (bez korekt) i 0,5 cm (z korektami). Uzyskane wyniki eksperymentu doświadczalnego potwierdziły możliwość ograniczenia wpływu zmian pozycji kamery i lasera względem

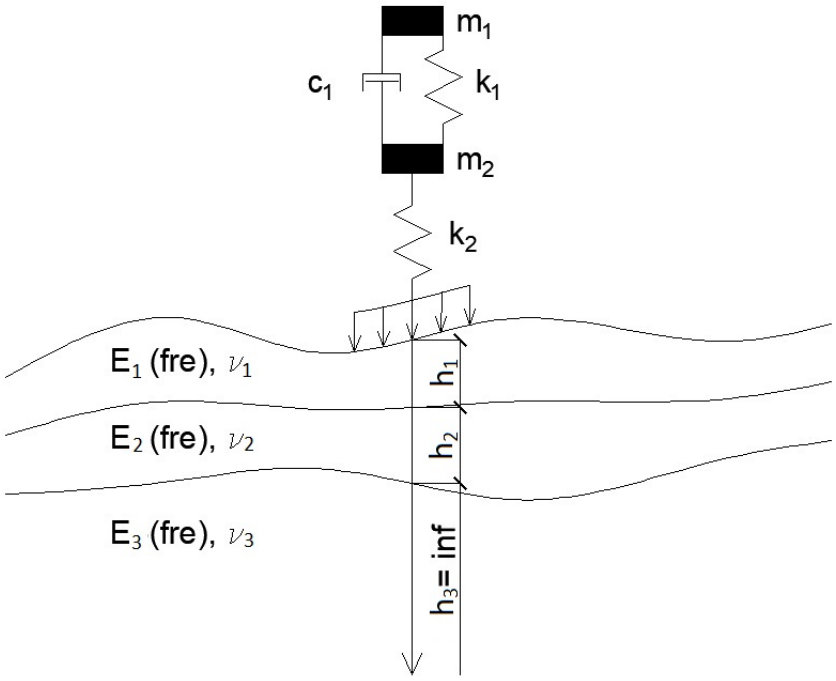
skanowanej powierzchni poprzez wprowadzenie korekt uzyskanych dzięki opracowanej procedurze, w której zastosowano sztuczne sieci neuronowe.



Rys. 121: Trójwymiarowe powierzchnie przedstawiające wysokości obliczone przed i po wprowadzeniu korekt związanych z ruchem kamery i lasera względem skanowanej posadzki hali

7 Opracowanie modelu nawierzchni

Punktem wyjścia do opracowania modelu nawierzchni był zakres parametrów nawierzchni, których źródłem są obliczenia i analizy wyników badań przeprowadzonych w warunkach in situ (wykorzystane w niniejszej rozprawie doktorskiej procedury obliczeniowe przedstawiono w rozdziale 5, które zweryfikowano doświadczalnie w rozdziale 6). Na przykładzie modelu trójwarstwowego przedstawionego na rysunku nr 122 zaprezentowano schemat opracowanego modelu obliczeniowego nawierzchni.



*gdzie: m_1, m_2, k_1, k_2, c_1 - parametry modułu (modelu) obciążenia, E_1(fre), E_2(fre), E_3(fre), ν_1, ν_2, ν_3, h_1, h_2 - parametry warstw modułu (modelu) nawierzchni, fre - częstotliwość [Hz]

Rys. 122: Schemat opracowanego modelu obliczeniowego nawierzchni na przykładzie modelu trójwarstwowego

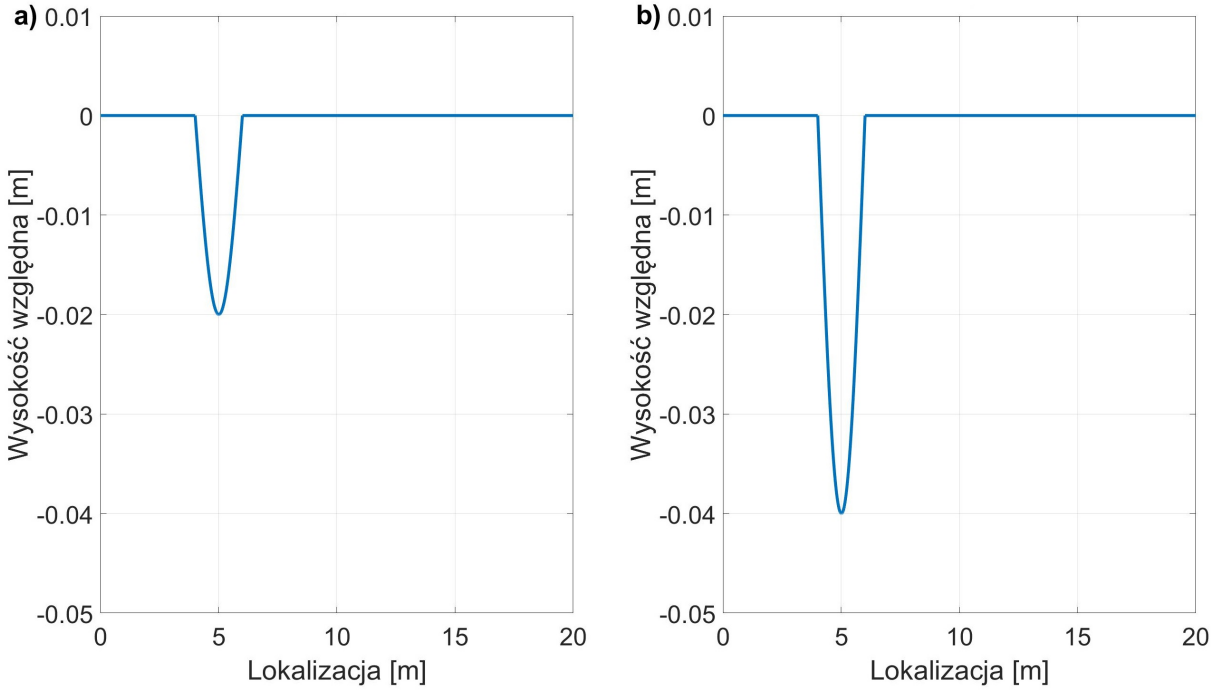
Na opracowany i przedstawiony na rysunku nr 122 model, składają się dwa moduły obliczeniowe:

- obciążenia, przy wykorzystaniu którego obliczane są wartości dynamicznych oddziaływań na nawierzchnię na podstawie zdefiniowanych parametrów dyskretnego modelu pojazdu (w postaci układu sprężyn, tłumików i mas), jego prędkości przejazdu oraz profilu podłużnego nawierzchni jezdni,

- nawierzchni, przy wykorzystaniu którego obliczane są wartości stanu odkształcenia i naprężenia w poszczególnych warstwach nawierzchni i jej podłożu na podstawie zdefiniowanych wartości parametrów obciążenia i warstw modelu.

Opracowane moduły obliczeniowe modelu nawierzchni, a przede wszystkim zakres obliczeń wykonywanych przy ich wykorzystaniu, przedstawiono poprzez zaprezentowane wyniki eksperymentu numerycznego, dla którego realizacji przyjęto następujące dane wejściowe:

- wygenerowane dwa warianty profilu podłużnego nawierzchni jedni, które przedstawiono na rysunku nr 123,
- parametry dynamicznego dyskretnego modelu pojazdu (wartości parametrów sprężyn, tłumików i mas), których wartości zestawiono w tabeli nr 14,
- grubości i wartości parametrów materiałowych poszczególnych warstw modelu nawierzchni, które zestawiono w tabeli nr 15.



Rys. 123: Wygenerowane profile podłużne nawierzchni jezdni: a) wariant A, b) wariant B

Tab. 14: Zestawienie wartości parametrów dyskretnego modelu pojazdu

Parametr	Wartość*
m_1	$1350\ kg$
m_2	$335\ kg$
k_1	$270\ kN/m$
k_2	$760\ kN/m$
c_1	$16,8\ kN \cdot s/m$

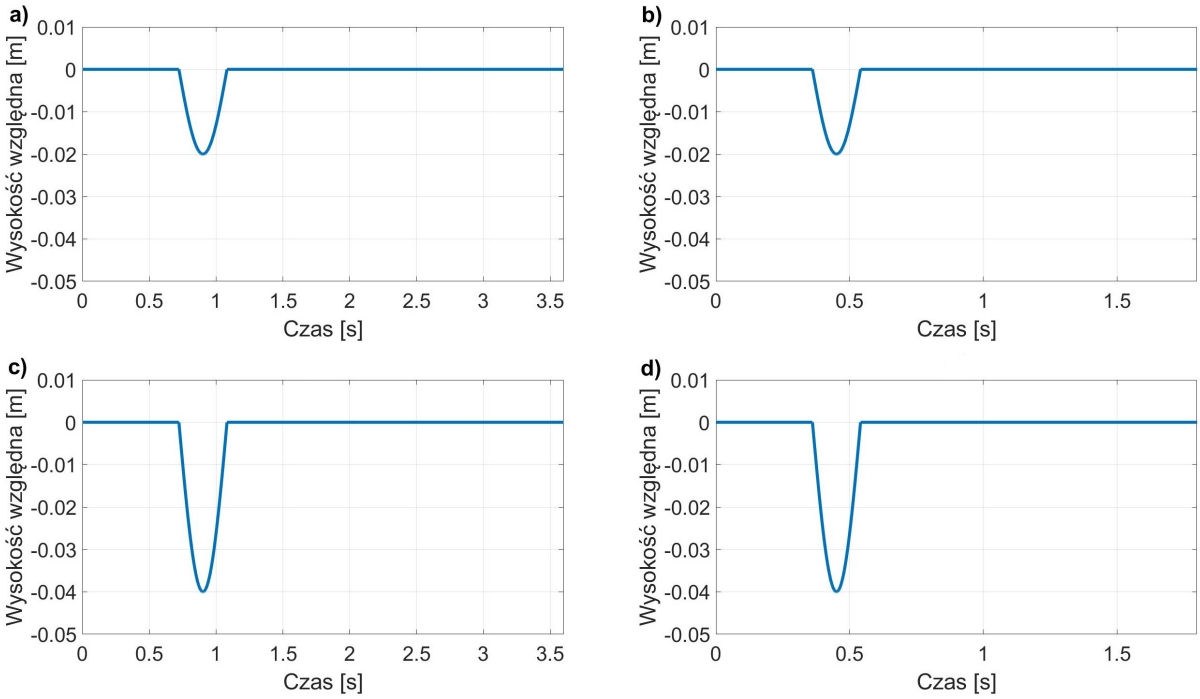
*przyjęte na podstawie wartości podanych w pracy [285]

Tab. 15: Zestawienie wartości parametrów warstw modelu nawierzchni

Nr	Modelowana warstwa	Grubość [m]	Współczynnik Poissona [-]	Moduły sprężystości [MPa]					
				8,3 Hz	16,7 Hz	25,0 Hz	33,3 Hz	41,7 Hz	50,0 Hz
1	pakiet warstw z MMA	0,15	0,3	11440,7	12299,1	13170,0	13930,7	14549,6	14969,8
2	KŁSM	0,20	0,3	401,8	402,5	403,5	402,8	397,2	399,0
3	Podłoże	∞	0,3	79,9	79,8	79,8	79,8	80,0	79,9

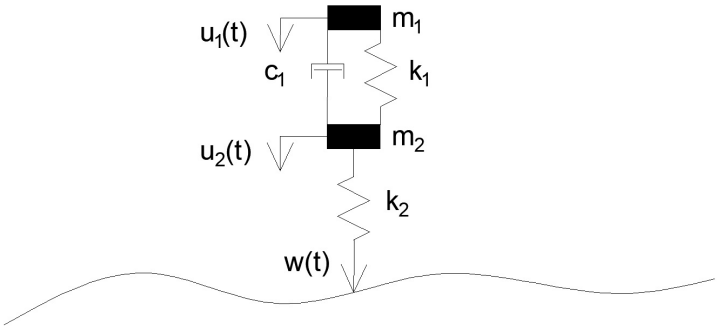
*przyjęte na podstawie wartości przyjętych/obliczonych w ramach przedstawionego eksperymentu numerycznego w punkcie 5.2

W pierwszym etapie realizacji eksperymentu numerycznego wykonano obliczenia z wykorzystaniem modułu obciążenia, który opracowano w postaci skryptu programu MATLAB na podstawie prac [225, 272, 285, 222] (kod zamieszczono w załączniku nr 5). Do wykonania obliczeń wykorzystano opracowany moduł obciążenia, ponieważ potrzebna była transformacja argumentów funkcji pokazanych na rysunku nr 123 z dziedziny dystansu do dziedziny czasu, co wykonano przyjmując dla wariantów profili A i B prędkości przejazdu dyskretnego modelu pojazdu 20 i 40 km/h. Na rysunku nr 124 przedstawiono uzyskane warunki przejazdów dla dwóch wariantów profilu podłużnego nawierzchni jezdni.



Rys. 124: Wartości wysokości względnej w zależności od czasu dla: a) wariantu profilu A i prędkości przejazdu 20 km/h, b) wariantu profilu A i prędkości przejazdu 40 km/h, c) wariantu profilu B i prędkości przejazdu 20 km/h oraz d) wariantu profilu B i prędkości przejazdu 40 km/h

Następnie dla wykonania obliczeń zdefiniowano parametry dyskretnego modelu pojazdu (wartości zestawiono w tabeli nr 14) oraz kolejno każdy z czterech wariantów profili (przedstawiono na rysunku nr 124). Zakres obliczeń dla pojedynczego wariantu, sprowadzał się do obciążenia zdefiniowanego układu mechanicznego sprężyn, tłumików i mas, wymuszanym w dziedzinie czasu przemieszczeniem w kształcie funkcji opisującej względną wysokość masy modelu w jednostce czasu. Na rysunku nr 125 przedstawiono schemat tego obciążenia.

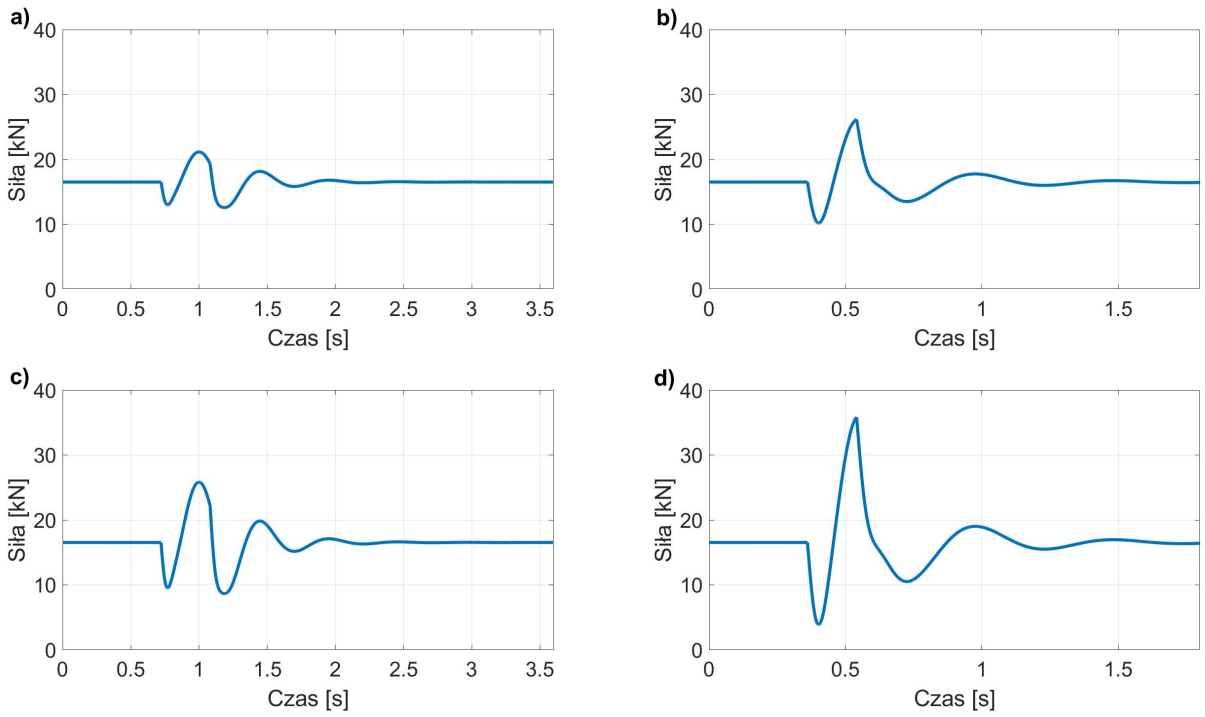


*gdzie: m_1, m_2, k_1, k_2, c_1 - parametry sprężyn, tłumików i mas układu mechanicznego,
u_1(t), u_2(t) - przemieszczenie w dziedzinie czasu odpowiednio węzła nr 1 i 2,
w(t) - wysokość względna w funkcji czasu

Rys. 125: Obciążenie układu mechanicznego sprężyn, tłumików i mas wymuszanym przemieszczeniem w dziedzinie czasu

Rezultatem obliczeń jest różnica wartości siły statycznej (wartość równa sile grawitacji, $F_g = (m1 + m2) \cdot 9,81$) i wartości siły dynamicznej generowanej w warunkach symulacji przejazdu po nierównej nawierzchni jezdni przez dyskretny model pojazdu (wartość równa sile generowanej w sprężynie nr 2, $F_d(t) = (u2(t) - w(t)) \cdot k2)$). Obliczona różnica $F(t) = F_g - F_d(t)$ jest równa wartości siły oddziaływania dyskretnego modelu pojazdu na nawierzchnię. Na rysunku nr 126 przedstawiono otrzymane wyniki obliczeń, które odpowiadają kolejno zdefiniowanym czterem wariantom wartości wysokości względnych w funkcji czasu.

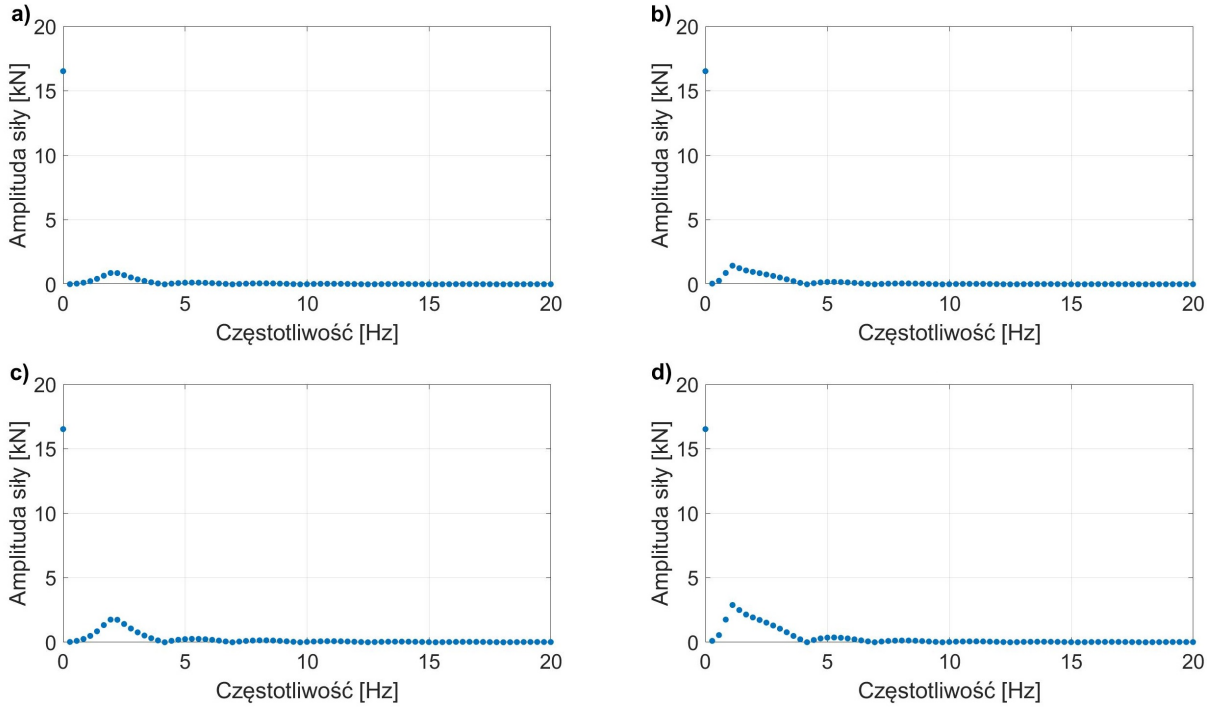
Po obliczeniu wartości siły oddziaływania dyskretnego modelu pojazdu na nawierzchnię, wykonano kolejny krok obliczeniowy z wykorzystaniem modułu obliczeniowego nawierzchni (wykorzystano program komputerowy EVERSTRESS [190], w którym zaimplementowano statyczny model nawierzchni LET, a więc ten sam, który wykorzystano w przeprowadzonych obliczeniach odwrotnych do wyznaczenia wartości dynamicznych parametrów materiałowych warstw modelu nawierzchni na podstawie wyników pomiarów FWD, patrz punkt 6.2), do obliczenia wartości stanu odkształcenia i naprężenia w poszczególnych warstwach modelu nawierzchni. Dla wykonania obliczeń statycznym modelem nawierzchni LET, wartości siły w funkcji czasu przedstawione na rysunku nr 126, przeliczono z wykorzystaniem FFT do dziedziny częstotliwości. Uzyskane bazy wartości amplitud siły oddziaływania dyskretnego modelu pojazdu na nawierzchnię przedstawiono na rysunku nr 127.



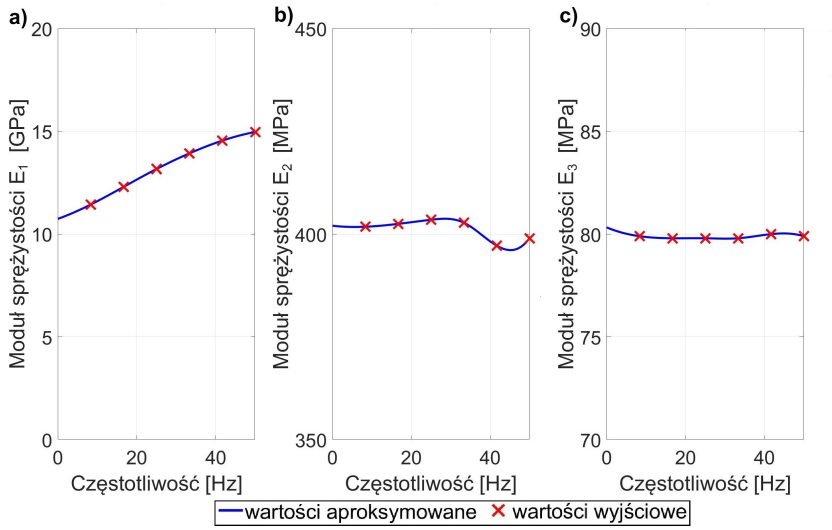
Rys. 126: Obliczone wartości siły oddziaływania dyskretnego modelu pojazdu na nawierzchnię dla: a) wariantu profilu A i prędkości pojazdu 20 km/h, b) wariantu profilu A i prędkości pojazdu 40 km/h, c) wariantu profilu B i prędkości pojazdu 20 km/h oraz d) wariantu profilu B i prędkości pojazdu 40 km/h

Dalsze obliczenia wykonano wykorzystując moduł obliczeniowy nawierzchni, statyczny model nawierzchni LET, dla którego zdefiniowano:

- wartość obciążenia modelu równą wartości (z bazy) amplitudy siły oddziaływania dyskretnego modelu pojazdu na nawierzchnię, która odpowiada określonej częstotliwości,
- promień obciążenia równomiernie rozłożonego na powierzchni kołowej równy 15 cm,
- liczbę i grubości poszczególnych warstw modelu nawierzchni zgodnie z wartościami podanymi w tabeli nr 15,
- wartości modułów sprężystości poszczególnych warstw modelu nawierzchni, które odpowiadają określonej częstotliwości zdefiniowanej wartości amplitud siły, i które obliczono poprzez wykonanie funkcją sklejaną aproksymacji/ekstrapolacji kolejno dla zbiorów wartości modułów sprężystości warstw zebranych w tabeli nr 15 (na rysunku nr 128 przedstawiono wyniki aproksymacji modułów sprężystości poszczególnych warstw modelu nawierzchni).



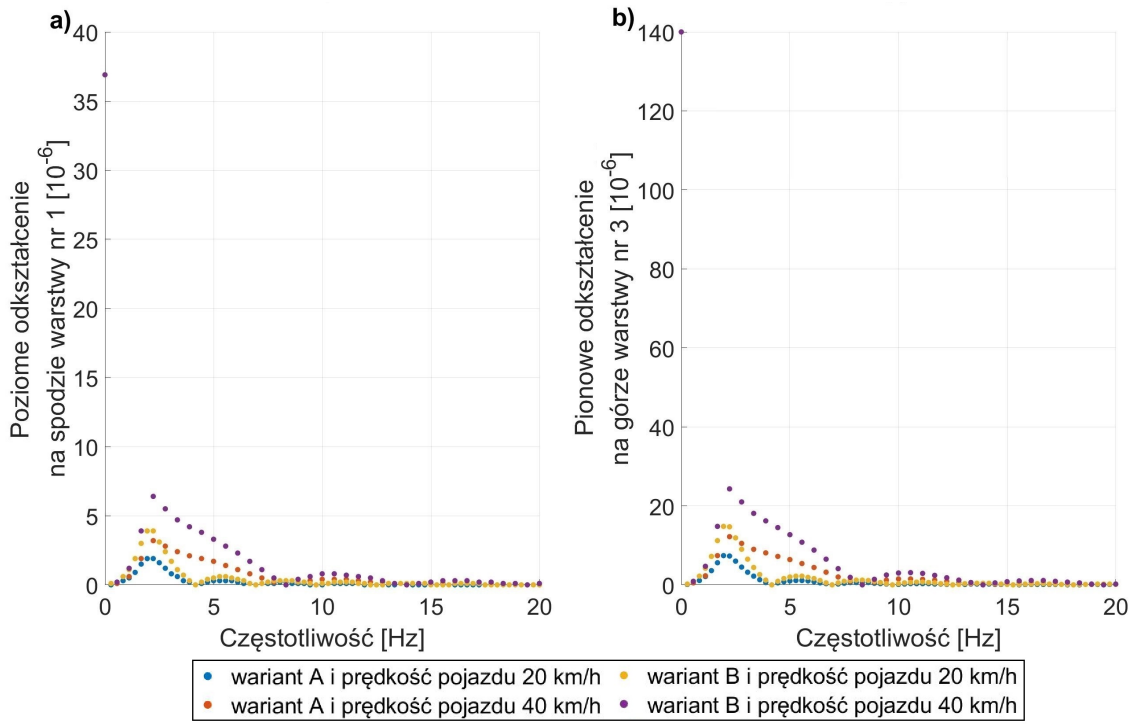
Rys. 127: Obliczone wartości amplitud siły oddziaływania dyskretnego modelu pojazdu na nawierzchnię dla: a) wariantu profilu A i prędkości pojazdu 20 km/h, b) wariantu profilu A i prędkości pojazdu 40 km/h, c) wariantu profilu B i prędkości pojazdu 20 km/h oraz d) wariantu profilu B i prędkości pojazdu 40 km/h



*gdzie: E_1, E_2 i E_3 - kolejno zgodnie z numeracją moduły sprężystości warstw modelu nawierzchni

Rys. 128: Wyniki aproksymacji/ekstrapolacji wartości modułów sprężystości poszczególnych warstw modelu nawierzchni

Obliczenia dotyczące modelu nawierzchni wykonano kolejno dla wszystkich wartości amplitudy siły oddziaływania dyskretnego modelu pojazdu na nawierzchnię z baz wartości przedstawionych na rysunku nr 127. Uzyskane wyniki, obliczone odkształcenia w dziedzinie częstotliwości, przedstawiono na rysunku nr 129.



Rys. 129: Obliczone w zależności od częstotliwości wartości: a) poziomych odkształceń wywołanych rozciąganiem na spodzie warstwy nr 1 (modelowany pakiet warstw z MMA), b) pionowych odkształceń wywołanych ściskaniem na górze warstwy nr 3 (modelowane ulepszone podłoże nawierzchni)

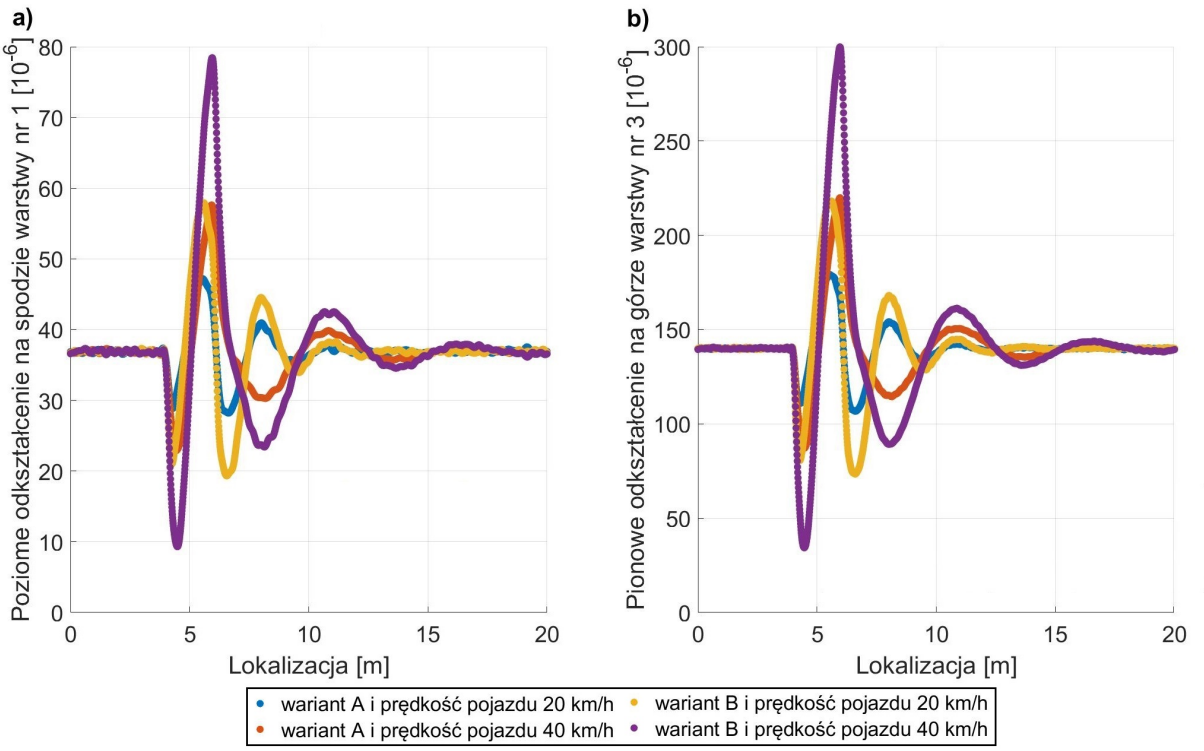
Aby wykorzystać obliczone wartości odkształceń przedstawione na rysunku nr 129, do oceny nośności nawierzchni na jej długości, wykonano przeliczenie iFFT dla uzyskania wartości odkształceń w zależności od czasu, które następnie znając prędkości przejazdu dyskretnego modelu pojazdu przeliczono do zależności od lokalizacji. Na rysunku nr 130 przedstawiono wartości odkształceń obliczone w punktach obliczeniowych modelu nawierzchni w zależności od lokalizacji.

Zgodnie z oczekiwaniami, dla obliczonych z użyciem opracowanego modelu nawierzchni (moduł obciążenia i nawierzchni) wartości odkształceń w przyjętych punktach obliczeniowych (wyniki przedstawione na rysunku nr 130) uzyskano:

- większe wartości odkształceń w przypadku prędkości przejazdu równej 40 km/h niż dla prędkości mniejszej, równej 20 km/h, co dotyczy zarówno wariantu A, jak i B zdefiniowanych wysokości względnych,

- większe wartości odkształceń w przypadku większych wartości wysokości względnych (wariant B) niż dla przypadku mniejszych wartości wysokości względnych (wariant A), co dotyczy obydwu przypadków zdefiniowania prędkości pojazdu równej tj. 20 i 40 km/h,

czym potwierdzono w ramach przeprowadzonego eksperymentu numerycznego poprawność obliczeń wykonanych z użyciem opracowanego algorytmu.



Rys. 130: Obliczone w zależności od lokalizacji wartości: a) poziomych odkształceń wywołanych rozciąganiem na spodzie warstwy nr 1 (modelowany pakiet warstw z MMA), b) pionowych odkształceń wywołanych ściskaniem na górze warstwy nr 3 (modelowane podłoże nawierzchni)

8 Implementacja empirycznych zależności do obliczenia nośności doraźnej nawierzchni asfaltowych

Zważywszy, że obliczane z użyciem opracowanego modelu nawierzchni wartości odkształceń i naprężeń w poszczególnych warstwach nawierzchni dotyczą amplitudowych wartości obciążenia (maksymalne wartości harmonicznych funkcji obciążenia), to do obliczenia nośności doraźnej nawierzchni wyrażanej ilościowo pozostałą trwałością zmęczeniową, możliwe było zaadaptowanie powszechnie wykorzystywanych w Polsce kryteriów zmęczeniowych [32]:

a) kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych

$$N_f^{asf} = 18,4 \cdot C \cdot (6,167 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon_t^{-3,291} \cdot |E|^{-0,854}) \tag{42}$$

$$C = 10^M \tag{43}$$

$$M = 4,84 \cdot (\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0,69) \tag{44}$$

gdzie:
N_f^{asf} - liczba obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych na 20% nawierzchni jezdni [osi standardowych],
ε_t - maksymalna wartość odkształcenia w warstwie z MMA wywołanego naprężeniem rozciągającym [-],
$|E|$ - moduł sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej [MPa],
V_a - zawartość objętościowa asfaltu [V/V,%],
V_b - zawartość objętościowa wolnej przestrzeni [V/V,%].

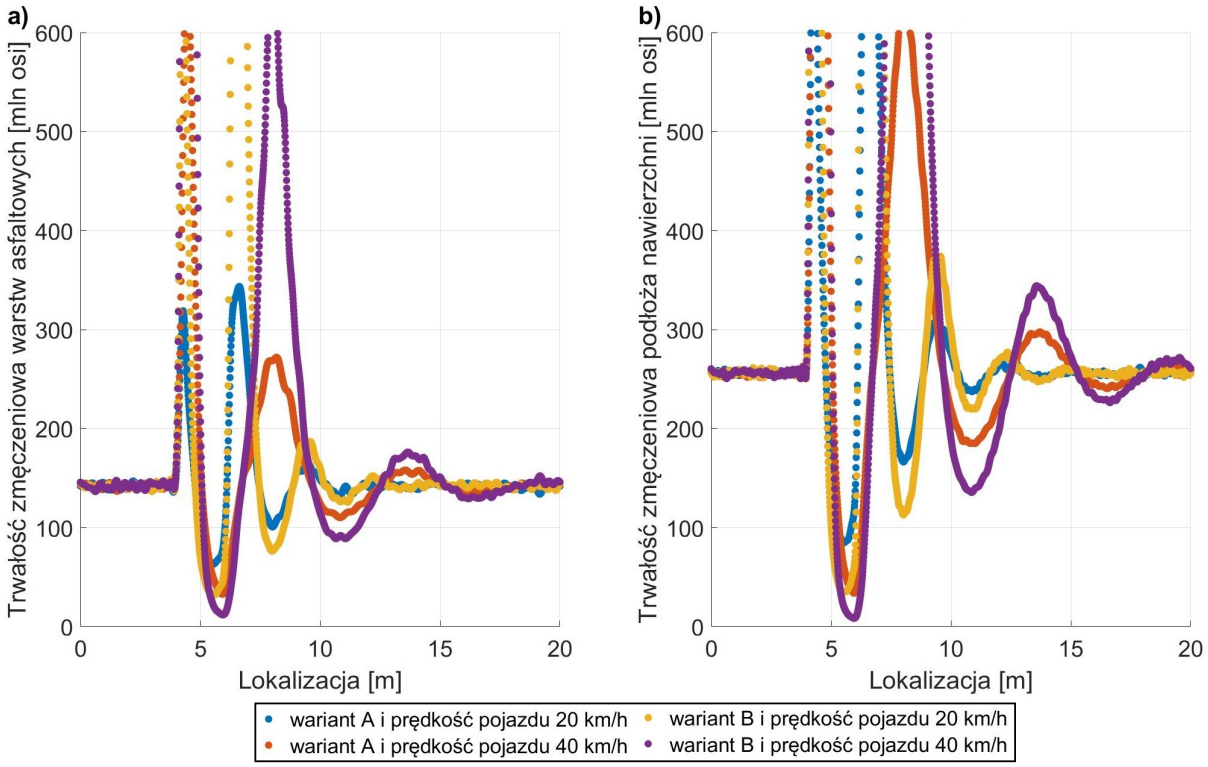
b) kryterium deformacji strukturalnych nawierzchni (podłoża gruntowego)

$$N_f^{gr} = (\frac{k}{\varepsilon_p})^{\frac{1}{m}} \tag{45}$$

gdzie:
N_f^{gr} - liczba dopuszczalnych obciążeń do wystąpienia krytycznej deformacji strukturalnej w konstrukcji nawierzchni [osi standardowych],
k, m - współczynniki doświadczalne, równe odpowiednio: $k = 1,05 \cdot 10^{-2}$, $m = 0,223$

Mając na celu weryfikację możliwości obliczenia nośności doraźnej nawierzchni z wykorzystaniem przyjętych postaci kryteriów zmęczeniowych, wykonano obliczenia trwałości zmęczeniowej dla uzyskanych z wykorzystaniem opracowanego modelu nawierzchni rezultatów eksperymentu numerycznego (wartości odkształceń w punktach obliczeniowych warstw modelu nawierzchni w zależności od lokalizacji, które przedstawiono

na rysunku nr 130). Do obliczenia trwałości zmęczeniowej przyjęto odpowiednio $V_a = 5,7\,\%$ i $V_b = 12,1\,\%$, a otrzymane wyniki przedstawiono na rysunku nr 131.



Rys. 131: Obliczone w zależności od lokalizacji, z wykorzystaniem przyjętych kryteriów zmęczeniowych, wartości: a) trwałości zmęczeniowej warstw asfaltowych, b) trwałości zmęczeniowej podłoża nawierzchni

Dla zdefiniowanych parametrów eksperymentu numerycznego, uzyskano oczekiwane rezultaty:

- większe minimalne wartości trwałości zmęczeniowej dla przypadku mniejszej prędkości przejazdu równej 20 km/h niż dla prędkości 40 km/h, co dotyczy zarówno wariantu A, jak i B zdefiniowanych wysokości względnych,
- większe minimalne wartości trwałości zmęczeniowej dla przypadku mniejszych wartości wysokości względnych (wariant B) niż dla przypadku większych wartości wysokości względnych (wariant A), co dotyczy zarówno przypadku zdefiniowania prędkości pojazdu równej 20 i 40 km/h,

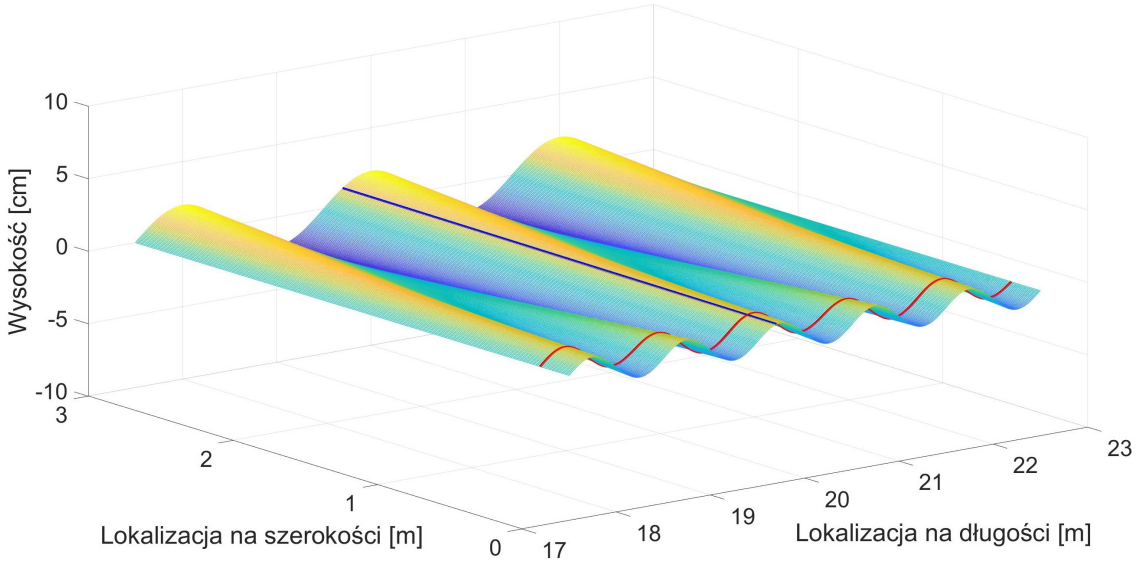
czym potwierdzono użyteczność zaadaptowanych empirycznych zależności do obliczenia nośności doraźnej nawierzchni.

9 Analiza wyników obliczeń nośności doraźnej nawierzchni na odcinku testowym

Danymi wejściowymi do obliczenia nośności doraźnej nawierzchni na odcinku testowym były:

- grubości warstw nawierzchni, które wyznaczono w punkcie 6.1,
- wartości parametrów materiałowych warstw nawierzchni, które wyznaczono w punkcie 6.2,
- rezultaty skanowania profilu nawierzchni jezdni na odcinku testowym.

Zważywszy, że głównym celem wykonanych w niniejszym rozdziale obliczeń była weryfikacja opracowanej przez autora rozprawy metody oceny nośności doraźnej nawierzchni asfaltowych, zdecydowano się przeprowadzić obliczenia dla numerycznie wygenerowanego profilu nawierzchni jezdni przedstawionego na rysunku nr 132, którego analiza wyników miała być jednoznaczna w zakresie związku nierówności i nośności nawierzchni (zrezygnowano z wykorzystania w obliczeniach rezultatów skanowania nawierzchni jezdni odcinka testowego, których nie poddano weryfikacji w zakresie porównania z wynikami uzyskanymi inną metodą pomiarową np. metodą niwelacji geodezyjnej).



Rys. 132: Numerycznie wygenerowany profil nawierzchni jezdni, który wykorzystano do weryfikacji metody oceny nośności nawierzchni odcinka testowego

Z przedstawionego na rysunku nr 132 numerycznie wygenerowanego profilu nawierzchni jezdni można wyodrębnić:

- 501 przekrojów poprzecznych na długości 5 m (przyjęto jednakową odległość między przekrojami równą 1 cm, a przykładowy przekrój zaznaczono niebieską linią na rysunku nr 132), którym przypisano lokalizacje na długości odcinka testowego w zakresie od 17,5 m do 22,5 m,

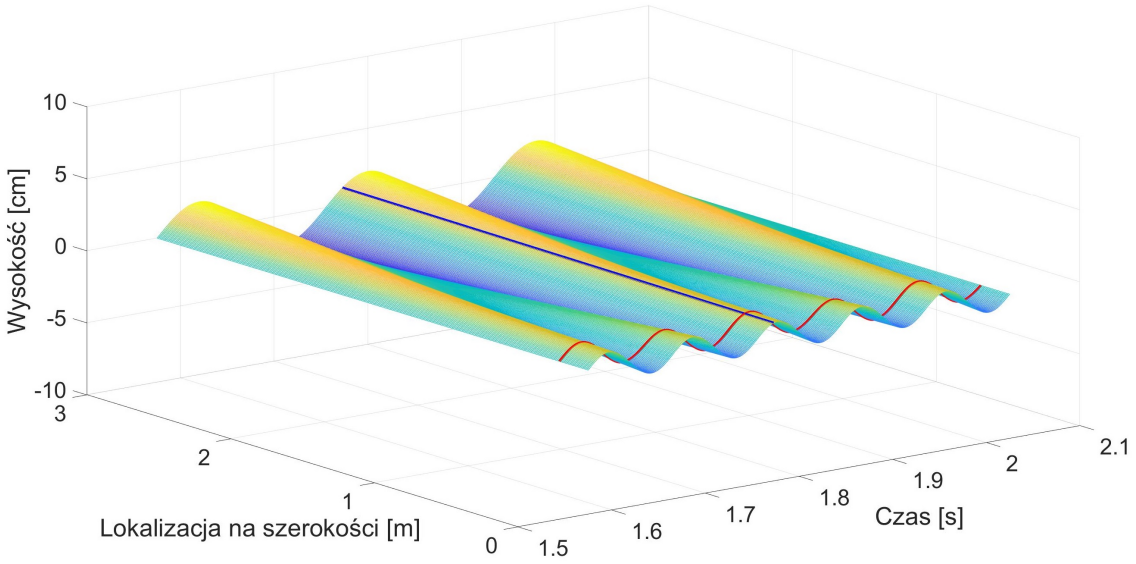
- 301 przekrojów podłużnych na szerokości 3 m (przyjęto jednakową odległość między przekrojami równą 1 cm, a przykładowy przekrój zaznaczono czerwoną linią na rysunku nr 132), która odpowiada szerokości pasa ruchu odcinka testowego.

Poprzez przyjęcie zakresu obliczeń obejmujących wyłącznie fragment odcinka testowego o długości 5 m, ograniczono wykorzystany w dalszej części zbiór wyznaczonych:

- grubości warstw nawierzchni do zakresu lokalizacji od 17,5 m do 22,5 m (patrz wykres na rysunku nr 106),

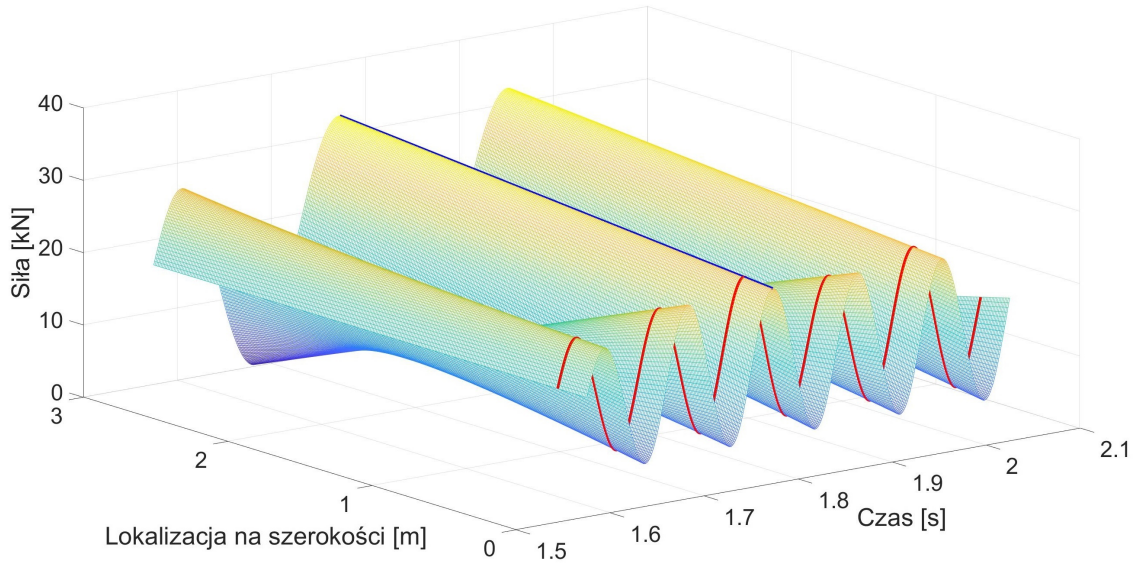
- wartości parametrów materiałowych warstw nawierzchni, do wartości odpowiadających lokalizacji 0+020 m na długości odcinka testowego (patrz wykres na rysunku nr 116).

Zgodnie z opracowaną procedurą obliczeniową, w pierwszej kolejności przeliczono argumenty przekrojów podłużnych z lokalizacji na długości do jednostki czasu przy założeniu przyjęcia wartości prędkości przejazdu równej 40 km/h. Na rysunku nr 133 przedstawiono w postaci trójwymiarowej przekroje podłużne nawierzchni jezdni w funkcji czasu.



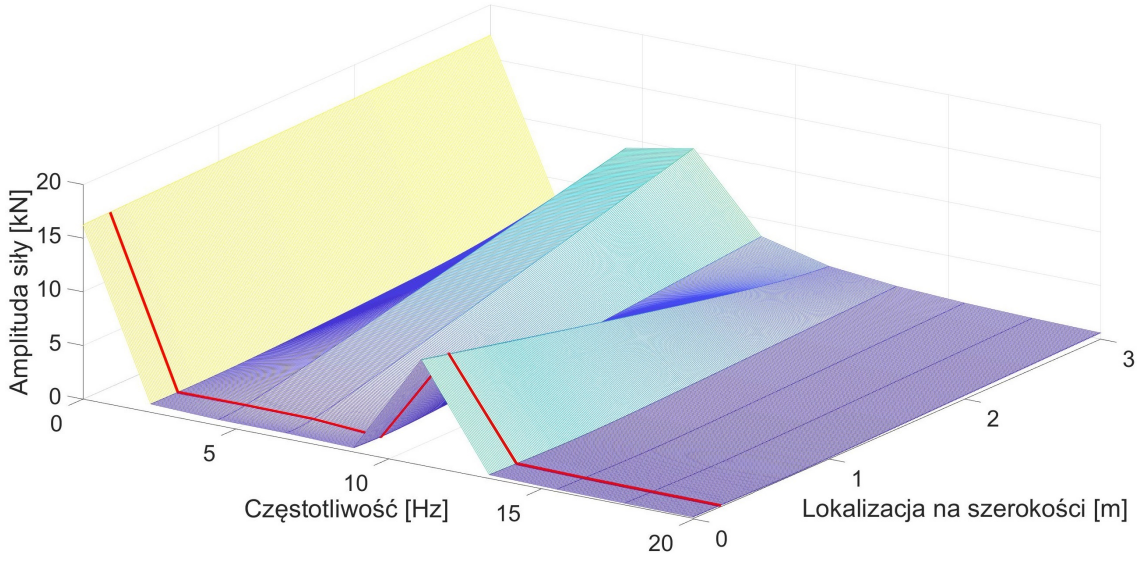
Rys. 133: Przekroje podłużne nawierzchni jezdni w funkcji czasu przedstawione w postaci trójwymiarowej

Następnie wykonano kolejno dla każdego z 301 profili podłużnych obliczenia z wykorzystaniem opracowanego modułu obciążenia (patrz rozdział nr 8), dla którego przyjęto wartości parametrów dyskretnego modelu pojazdu równe tym zebranym w tabeli nr 14. Uzyskane rezultaty, obliczone wartości siły oddziaływania dyskretnego modelu pojazdu na nawierzchnię, przedstawiono w postaci trójwymiarowej powierzchni na rysunku nr 134.



Rys. 134: Obliczone wartości siły oddziaływania dyskretnego modelu pojazdu na nawierzchnię, które przedstawiono w postaci trójwymiarowej powierzchni

Wykorzystując FFT, w kolejnym wykonanym kroku obliczeniowym przeliczono bazę wartości sił oddziaływania dyskretnego modelu pojazdu na nawierzchnię do bazy wartości amplitud, którą przedstawiono na rysunku nr 135.



Rys. 135: Obliczona z wykorzystaniem FFT baza wartości amplitud siły oddziaływania dyskretnego modelu pojazdu na nawierzchnię przedstawiona w postaci trójwymiarowej powierzchni

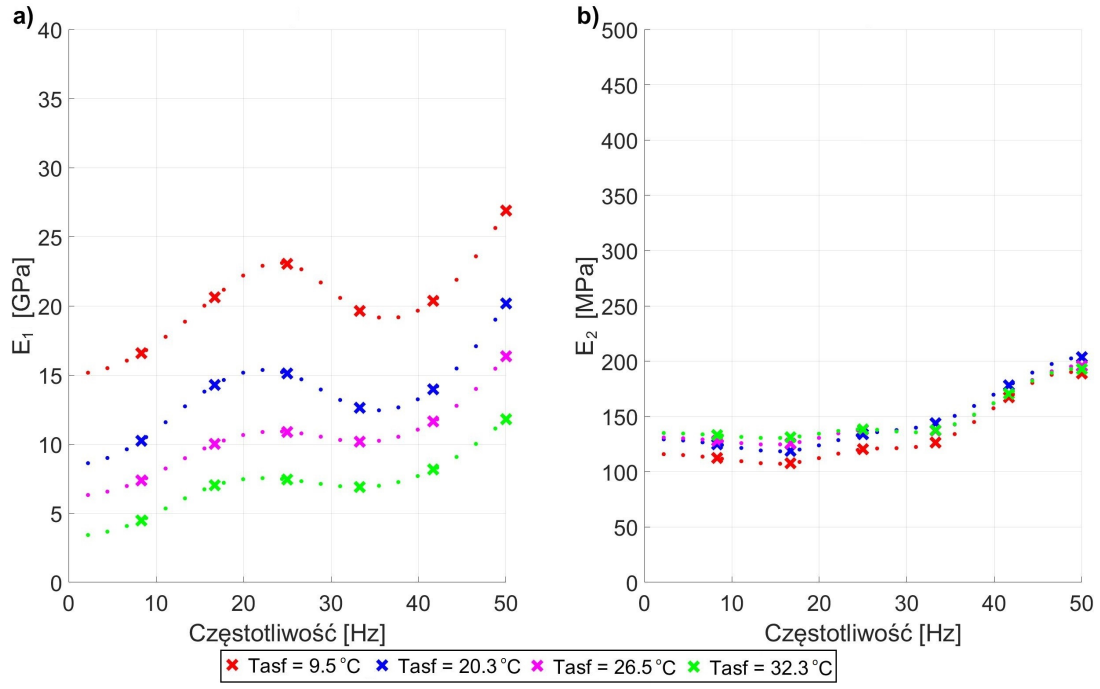
Po obliczeniu bazy wartości amplitud siły oddziaływania dyskretnego modelu pojazdu na nawierzchnię, w następnym kroku przeprowadzonej procedury wykorzystano przedstawiony w rozdziale nr 8 moduł obliczeniowy nawierzchni (statyczny model nawierzchni LET), dla którego zdefiniowano:

- wartość obciążenia modelu równą wartości pobranej z bazy amplitud siły oddziaływania dyskretnego modelu pojazdu na nawierzchnię, która odpowiadała określonej lokalizacji na szerokości i częstotliwości (rysunek nr 135),
- promień obciążenia równomiernie rozłożonego na powierzchni kołowej równy 15 cm,
- dwie warstwy zgodnie z wynikami rozpoznania konstrukcji nawierzchni odcinka testowego (punkt 6.1),
- grubość modelowanej warstwy (nr 1) pakietu warstw z MMA równą 0,143 m (obliczona średnia grubość pakietu warstw z MMA dla zakresu lokalizacji od 17,5 do 22,5 m wyników przedstawionych na rysunku nr 106) oraz grubość modelowanej warstwy (nr 2) ulepszonego podłożą równą nieskończoności,
- wartości współczynników Poissona odpowiednio równe $\nu_1 = 0{,}3$ dla modelowanej warstwy pakietu warstw MMA i $\nu_2 = 0{,}35$ dla modelowanego ulepszonego podłoża nawierzchni,
- odpowiadające określonej częstotliwości zdefiniowanej wartości amplitud siły wartości modułów sprężystości poszczególnych warstw modelu nawierzchni, które obliczono poprzez wykonanie z użyciem funkcji sklejanej aproksymacji/ekstrapolacji dla wyznaczonych w punkcie 6.2 wartości modułów sprężystości dla lokalizacji 0+020,00 m (wyniki przeprowadzonej aproksymacji/ekstrapolacji przedstawiono na rysunku nr 136).

Obliczenia dotyczące modelu nawierzchni wykonano kolejno dla wszystkich pobranych z bazy wartości amplitud siły oddziaływania dyskretnego modelu pojazdu na nawierzchnię (patrz rysunek nr 135) oraz kolejno czterech zbiorów wartości modułów sprężystości poszczególnych warstw modelu nawierzchni, z których każdy odpowiadał innej temperaturze pakietu warstw asfaltowych (patrz rysunek nr 136). Na rysunku nr 137 przedstawiono cztery zbiory obliczonych wartości odkształceń modelu nawierzchni.

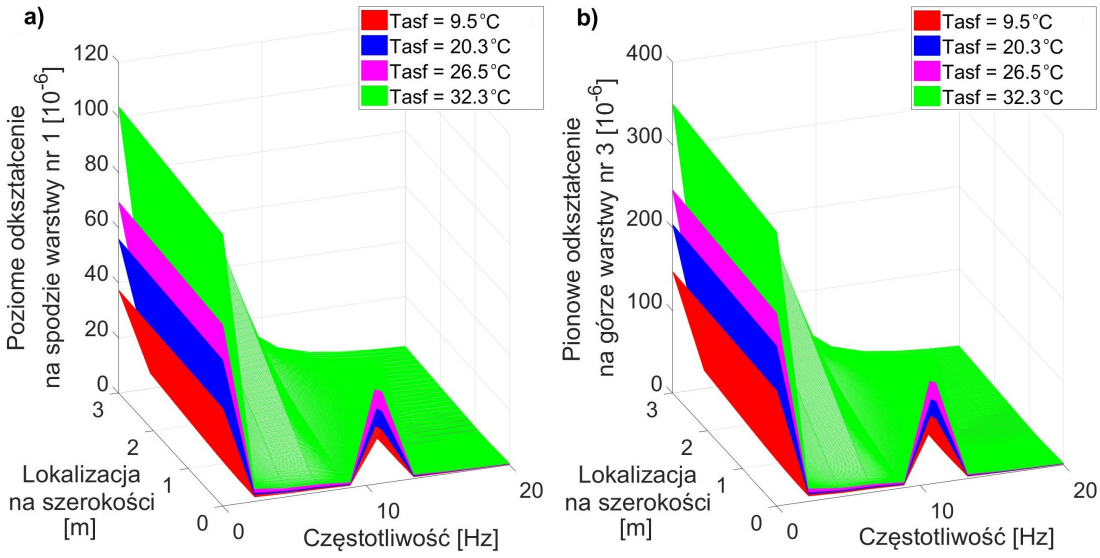
W kolejnym kroku obliczone bazy wartości odkształceń przeliczono wykorzystując iFFT z zależności ich wartości od częstotliwości do zależności od czasu, które następnie, znając przyjętą prędkość dyskretnego modelu pojazdu, przeliczono do wartości w zależności od lokalizacji na długości. Uzyskane wyniki przeprowadzonych na tym etapie obliczeń przedstawiono na rysunku nr 138.

Następnie bazy wartości odkształceń przedstawione na rysunku nr 138 wykorzystano do obliczenia wartości trwałości zmęczeniowej, do czego wykorzystano zaimplementowane kryteria zmęczeniowe (patrz rozdział 9). Do obliczeń przyjęto odpowiednio wartości $V_a = 5,7\,\%$ i $V_b = 12,1\,\%$, a otrzymane wyniki przedstawiono na rysunku nr 139.

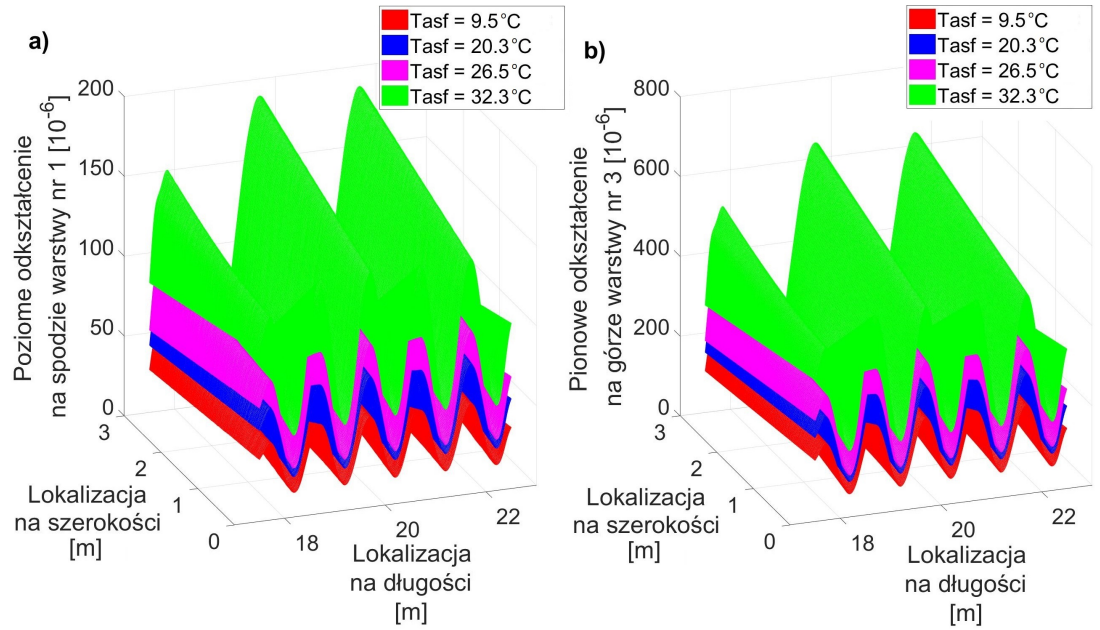


gdzie: E_1 - moduł sprężystości modelowanej warstwy pakietu warstw MMA, E_2 - moduł sprężystości modelowanego ulepszonego podłoża nawierzchni

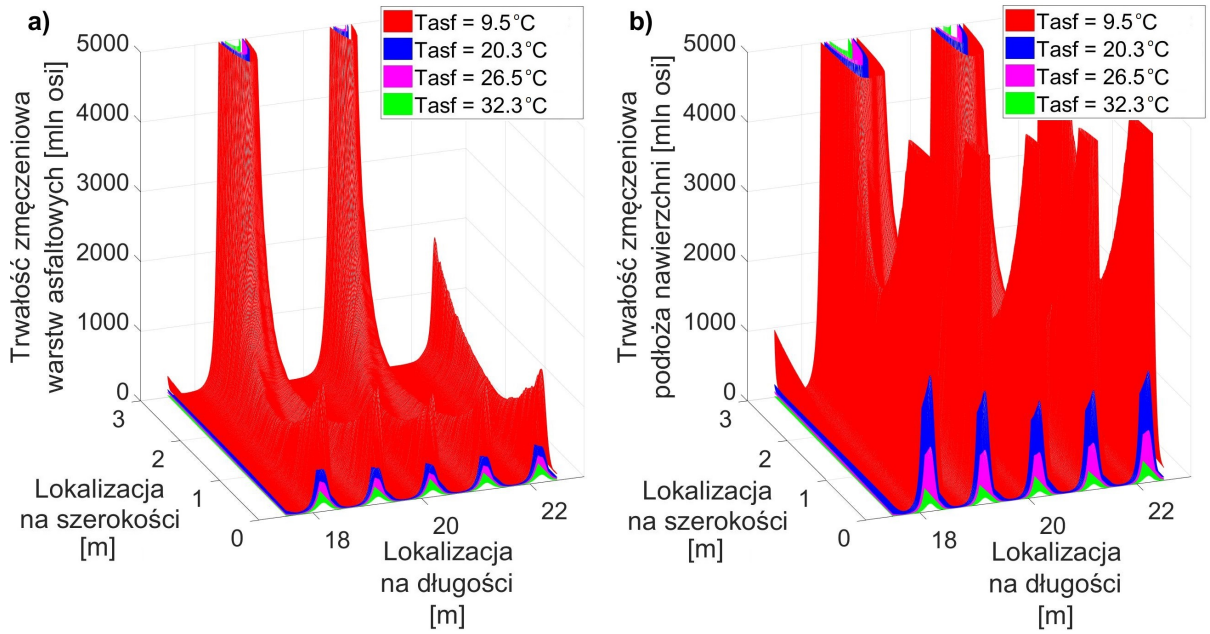
Rys. 136: Wyniki przeprowadzonej aproksymacji/ekstrapolacji wartości modułów sprężystości poszczególnych warstw modelu nawierzchni



Rys. 137: Obliczone z użyciem modelu nawierzchni wartości: a) poziomych odkształceń wywołanych rozciąganiem na spodzie warstwy nr 1, b) pionowych odkształceń wywołanych ściskaniem na górze warstwy nr 2

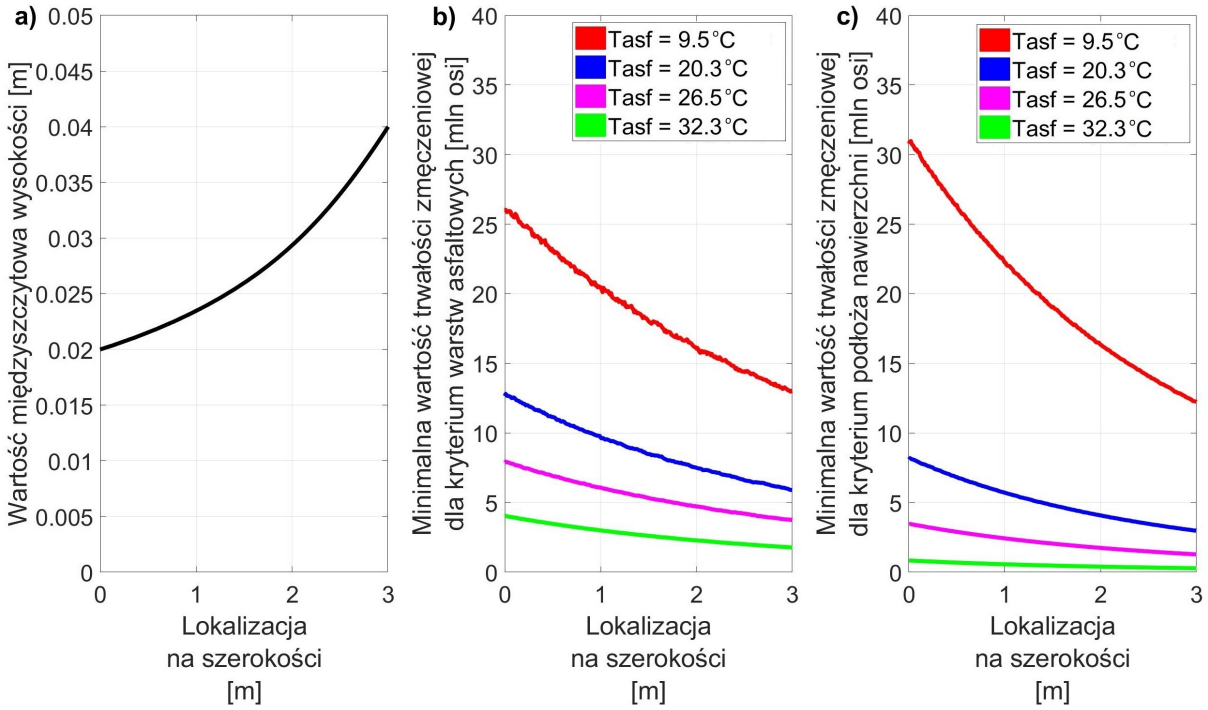


Rys. 138: Obliczone wartości w zależności od lokalizacji na długości: a) poziomych odkształceń wywołanych rozciąganiem na spodzie warstwy nr 1, b) pionowych odkształceń wywołanych ściskaniem na górze warstwy nr 2



Rys. 139: Obliczone z użyciem odpowiedniego kryterium wartości trwałości zmęczeniowej: a) pakietu warstw asfaltowych, b) podłoża nawierzchni

Mając na celu ocenę uzyskanych wyników obliczeń nośności doraźnej nawierzchni (przedstawione na rysunku nr 139, na rysunku nr 140) przedstawiono odpowiednio wykonane zestawienia: a) wartości międzyszczytowych wysokości (wyrażenie nierówności podłużnych nawierzchni na jej szerokości), odczytane kolejno dla wszystkich lokalizacji na szerokości minimalne obliczone wartości trwałości zmęczeniowej kolejno dla b) kryterium warstw asfaltowych, c) kryterium podłoża nawierzchni.



Rys. 140: Wykonane zestawienia: a) obliczone wartości międzyszczytowe wysokości nawierzchni jezdni, odczytane kolejno dla wszystkich lokalizacji na szerokości minimalne obliczone wartości trwałości zmęczeniowej: b) warstw asfaltowych, c) podłoża nawierzchni

Zgodnie z oczekiwaniami otrzymano:

1) dla większych wartości międzyszczytowych wysokości (wyrażających nierówności podłużne nawierzchni) mniejszą wartość trwałości zmęczeniowej zarówno dla kryterium warstw asfaltowych jak i kryterium podłoża nawierzchni,

2) że im niższa temperatura warstw asfaltowych (większa ich sztywność), tym nośność wyrażona trwałością zmęczeniową jest większa, co dotyczy zarówno wartości obliczonych kryterium warstw asfaltowych, jak i kryterium podłoża nawierzchni.

10 Wnioski

Na podstawie przedstawionych w niniejszej rozprawie prac badawczych oraz analitycznych sformułowano następujące wnioski końcowe:

1) Potwierdzono postawioną w rozprawie hipotezę o zapewnieniu zgodności między warunkami brzegowymi statycznego modelu nawierzchni, a dynamicznymi warunkami pomiaru urządzeniem typu FWD. Rezultaty wyrażone są jako sygnały, które przetwarza się w dziedzinie częstotliwości, a uzyskanym wynikiem jest zbiór wartości parametrów materiałowych warstw modeli nawierzchni z uwzględnieniem efektów dynamicznych.

2) Opracowana autorska metoda oceny nośności doraźnej asfaltowej nawierzchni drogowej umożliwia uwzględnienie dynamicznych obciążeń wywołanych ruchem pojazdów po nawierzchniach, na których występują nierówności podłużne. Stanowi to oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego oceny nośności nawierzchni jezdni.

3) Wykazano, że iteracyjna formuła obliczania granicznych wartości czasów propagacji fal elektromagnetycznych stanowi efektywne narzędzie numeryczne. Zastosowanie tego algorytmu do przetwarzania zaszumionych sygnałów generowanych w urządzeniu GPR prowadzi do uzyskania jednoznacznych rezultatów wyznaczania grubości warstw nawierzchni jezdni.

4) Wyznaczenie zależności wartości korekt związanych ze zmianą lokalizacji kamery i lasera względem skanowanej nawierzchni jezdni metodą triangulacji laserowej jest efektywne już przy wykorzystaniu najprostszej architektury sztucznej sieci neuronowej.

11 Kierunki dalszych prac badawczych

Bazując na doświadczeniach zdobytych w trakcie realizacji niniejszej rozprawy oraz sformułowanych wnioskach końcowych wskazano następujące kierunki dalszych prac:

1) Zaprezentowana iteracyjna formuła obliczania granicznych wartości czasów propagacji fal elektromagnetycznych przez warstwę nawierzchni dla wyników pomiarów urządzeniem GPR jest inspirującym podejściem do opracowania półautomatycznego lub automatycznego algorytmu wyznaczania grubości poszczególnych warstw nawierzchni.

2) Opracowanie bazy zawierającej wartości parametrów materiałowych warstw modeli nawierzchni użytecznych przy projektowaniu nowych nawierzchni i ich wzmocnień.

3) Opracowanie metody prognozowania zmian nośności doraźnej nawierzchni asfaltowej w czasie eksploatacji poprzez zastosowanie autorskiej procedury obliczeniowej dla bazy danych wyników badań wykonywanych w ramach długotrwałych obserwacji nawierzchni.

4) Rozszerzenie zakresu wyznaczanych parametrów materiałowych warstw modeli nawierzchni (np. o parametry związane z koleinowaniem) przy użyciu procedury wykorzystującej FFT dla wyników pomiarów dynamicznych ugięć nawierzchni.

Bibliografia

[1] Serwis internetowy Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad (dostęp 26.01.2022 r. pod adresem: www.gddkia.gov.pl)

[2] Słownik języka polskiego PWN, Wydawnictwo Naukowe PWN S.A., 2004

[3] Cepowski T., Wskazówki projektowe do obliczania nośności i maksymalnego zanurzenia statku rybackiego na wstępnym etapie projektowania, Logistyka, nr 3, s. 651-659, 2015

[4] Kania L., Śpiewak S., Wpływ luzu łożyskowego na nośność statyczną łożysk tocznych wieńcowych podwójnych w odniesieniu do oporów toczenia, Pomiary Automatyka Kontrola, nr 1, s. 119-122, 2012

[5] Garbowski T., Czelusta I., Graczyk Ł., Komputerowo wspomagane wyznaczanie nośności opakowań z tektury falistej. Cz. 1. Wpływ zgniecenia tektury falistej na jej podstawowe parametry, Przegląd Papierniczy, nr 6, s. 381-388, 2018

[6] Bodzak P., Nośność płyt kanałowych na ścinanie w konstrukcjach typu Slim Floor, Przegląd Budowlany, nr 7-8, s. 34-39, 2018

[7] Nowak R., Orłowicz, R., Nośność stref podporowych wybranych sklepień ceglanych, Przegląd Budowlany, nr 11, s. 38-40, 2018

[8] Madaj, A., Mossor, K., Nośność graniczna statycznie niewyznaczalnych belek sprężonych zgodnie z założeniami normy PN-EN 1992, Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej, nr 18, s. 73-91, 2014

[9] Mossor K., Propozycja oceny nośności drogowych mostów sprężonych, Mosty, nr 6, s. 50-53, 2016

[10] Skrzyński E., Dąbrowski A., Sztywność i nośność torowiska po modernizacji nawierzchni, Przegląd Komunikacyjny, nr 7-8, s. 56-57, 2010

[11] Sybilski D., Nawierzchnia kolejowa z warstwami asfaltowymi, Problemy Kolejnictwa, Z. 156, s. 68-78, 2012

[12] Wesołowski M., Blacha K., Ocena nośności konstrukcji nawierzchni lotniskowych metodą ACN-PCN, prace naukowe ITWL, zeszyt 35, s. 5-21, 2014

[13] Wesołowski M., Blacha K., Wpływ właściwości mechanicznych konstrukcji betonowej nawierzchni lotniskowej na stan jej nośności, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, nr 12, s. 495-502, 2016

[14] Szymańska P., Nośność nawierzchni - pomiary i ocena, Magazyn Autostrady, nr 4, s. 49-52, 2014

[15] Sudyka J., Tabor Z., Poteraj-Oleksiak A., Brzezińska P., Mechowski T., Ocena nośności sieci drogowych z wykorzystaniem ugięciomierza laserowego TSD, Magazyn Autostrady, nr 4, s. 48-52, 2017

[16] Jaskuła P., Jaczewski M., Ryś D., Pszczoła M., Ocena terenowa spękań niskotemperaturowych i nośności nawierzchni wybranych odcinków dróg w Polsce Północno-Wschodniej, Przegląd Komunikacyjny, nr 11(73), s. 55-59, 2018

[17] Plewa A., Ocena wpływu nośności podłoża gruntowego na trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni drogowej w aspekcie kryterium deformacji strukturalnej podłoża gruntowego, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, nr 4(4), s. 295-300, 2013

[18] Alenowicz J., Dołżycki B., Jaskuła P., Nośność podłoża gruntowego w projektowaniu konstrukcji nawierzchni. Grupy nośności podłoża, Magazyn Autostrady, nr 11-12, s. 32-36, 2017

[19] Jurczak R., Majer S., Budziński B., Projektowanie i ocena nośności dolnych warstw konstrukcji i ulepszonego podłoża, Drogownictwo, nr 10, s. 311-315, 2018

[20] GDDKiA, Wytyczne SOSN – aktualizacja związana z wykorzystaniem wyników pomiarów ugięć nawierzchni, Warszawa, 2010

[21] Judycki J., Jaskuła P., Pszczoła M., Alenowicz J., Dołżycki B., Jaczewski M., Ryś D., Stienss M., Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych, GDDKiA, 2014

[22] Diagnostyka Stanu Nawierzchni, Załącznik A. Zasady realizacji pomiarów w ramach diagnostyki nawierzchni, GDDKiA, Warszawa, 2015

[23] Ryś D., Obciążenie dróg przez pojazdy ciężkie i ich wpływ na trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych, Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2015

[24] Praca zbiorowa pod redakcją Jemioło S., Termosprężystość i przepływ ciepła w materiałach anizotropowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2015

[25] Judycki J., Podstawy określania współczynników równoważności obciążenia osi do projektowania nawierzchni drogowych, Drogi i Mosty, nr 2, s. 55-92, 2006

[26] Firlej S., Wyznaczanie parametrów modelu nawierzchni drogowej z dynamicznych badań FWD, Monografie – Politechnika Lubelska, Lublin, 2015

[27] Mieczkowski P., Budziński B., Utrata nośności nawierzchni w aspekcie niewłaściwego odwodnienia korpusu drogowego, Magazyn Autostrady, nr 1-2, s. 32-41, 2019

[28] Radziszewski P., Zmiany właściwości lepkosprężystych lepiszczy modyfikowanych i mieszanek mineralno-asfaltowych w wyniku procesu starzenia, Rozprawy nr 142, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok, 2007

[29] Judycki J., Jaskuła P., Wpływ starzenia i oddziaływania wody i mrozu na zmianę właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych, VIII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, s. 221-233, Krynica, 2002

[30] Parkasiewicz B., Kadela M., Effect of assumed boundary conditions in numerical model of road pavement-mining subsoil system on criterial values used in design using mechanistic methods, IOP Conference Series Materials Science and Engineering, nr 3(1203), 2021

[31] GDDKiA, Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych, Warszawa, 2001

[32] GDDKiA, Katalog przebudów i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych, Warszawa, projekt, 2013

[33] System Oceny Stanu Nawierzchni SOSN, Wytyczne stosowania – Załącznik A, Zasady ciągłego obmiaru uszkodzeń i oceny stanu nawierzchni bitumicznych metodą oceny wizualnej w systemie oceny stanu nawierzchni SOSN, GDDP, Warszawa, 2002

[34] System Oceny Stanu Nawierzchni SOSN, Wytyczne stosowania – Załącznik E, Katalog typowych uszkodzeń nawierzchni bitumicznych dla potrzeb ciągłego obmiaru uszkodzeń metodą oceny wizualnej w systemie oceny stanu nawierzchni SOSN, GDDP, Warszawa, 2002

[35] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (tekst jednolity Dz. U. z 2016 r. poz. 124)

[36] GDDKiA, Diagnostyka stanu nawierzchni i jej elementów - wytyczne stosowania, 2015

[37] Pierce L. M., McGovern G., Zimmerman K. A., Practical guide for quality management of pavement condition data collection, raport nr FHWA-HIF-14-006, Federal Highway Administration, Washington, 2013

[38] Godlewski D., Godlewski W., Nawierzchnie drogowe, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2011

[39] Amhaz R., Chambon S., Idier J., Baltazart V., Automatic crack detection on two-dimensional pavement images: An algorithm based on minimal path selection, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, nr 10(17), s. 2718–2729, 2016

[40] Cubero-Fernandez A., Rodriguez-Lozano F. J., Villatoro R., Olivares J., Palomares J. M., Efficient pavement crack detection and classification, EURASIP Journal on Image and Video, nr 39, s. 1-11, 2017

[41] Staniek M., Detection of cracks in asphalt pavement during road inspection processes, Scientific Journal of Silesian University of Technology - Series Transport, nr 96, s. 175-184, 2017

[42] Ai D., Jiang G., Kei L. S., Li Ch., Automatic pixel-level pavement crack detection using information of multi-scale neighborhoods, IEEE Access, nr 6, s. 24452-24463, 2018

[43] Pozarycki A., Garbowski T., Automatyzacja inwentaryzacji uszkodzeń nawierzchni jezdni z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych, Drogownictwo, nr 12, s. 374-379, 2013

[44] Wyczałek I., Stróżyk-Weiss J., Wyczałek M., Rozwiązania fotogrametryczne zastosowane w nowym systemie diagnozowania nawierzchni drogowych, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, nr 28, s. 169-180, 2016

[45] Zhang L., Yang F., Zhang Y. D., Zhu Y. J., Road crack detection using deep convolutional neural network, IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Phoenix, s. 3708–3712, 2016

[46] Maeda H., Sekimoto Y., Seto T., Kashiyama T., Omata H., Road damage detection and classification using deep neural networks with smartphone images, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, nr 33(12), s. 1127-1141, 2018

[47] Iwański M., Awarie i diagnostyka asfaltowych nawierzchni drogowych, Budownictwo komunikacyjne, nr 5(21), s. 112-115, 2017

[48] Judycki J., Modele spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych nawierzchni drogowych w mechanistyczno-empirycznej metodzie AASHTO 2004, Drogownictwo, nr 11, s. 343-347, 2011

[49] Ahmad N., Wistuba M., Lorenzl H., GPR as a crack detection tool for asphalt pavements: Possibilities and limitations, 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), s. 551-555, Shanghai, 2012

[50] Krysiński L., Sudyka J., GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks, Journal of Applied Geophysics, nr 97, s. 27-36, 2013

[51] Iodice M., Muggleton J., Rustighi E., The detection of vertical cracks in asphalt using seismic surface wave methods, Journal of Physics: Conference Series, nr 744(1), s. 1-14, 2016

[52] Sztukiewicz R., Ultradźwiękowy opis i analiza stanu warstwy wierzchniej nawierzchni drogowej z betonu asfaltowego, Rozprawy nr 270, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1992

[53] Franesquia M. A., Yepes J., García-González C., Ultrasound data for laboratory calibration of an analytical model to calculate crack depth on asphalt pavements, Data in Brief, nr 13, s. 723-730, 2017

[54] Krawczyk B., Identyfikacja parametrów modeli nawierzchni drogowych na podstawie impulsowych testów dynamicznych, Praca Doktorska Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, 2012

[55] Sudyka J., Mechowski T., Pilotażowe badania porównawcze ugięciomierzy TSD i FWD, Drogownictwo, nr 6, s. 207-209, 2012

[56] Jaczewski M., Mejłun Ł., Wyznaczanie parametrów lepkosprężystego modelu Burgersa mieszanek mineralno-asfaltowych na podstawie badania pod obciążeniem dynamicznym, Drogownictwo, nr 11, s. 344-348, 2013

[57] Smith K. D., Bruinsma J. E., Wade M. J., Chatti K., Vandenbossche J. M., Yu H. T., Using falling weight deflectometer data with mechanistic-empirical design and analysis, Volume I: Final Report, Raport FHWA-HRT-16-009, 2017

[58] Szydło A., Analiza wyników pomiarów ugięć konstrukcji nawierzchni oznaczonych za pomocą belki Benkelmana i ugięciomierza FWD, VI Konferencja Trwałość i bezpieczne nawierzchnie drogowe, Kielce, 2000

[59] Hveem F.N., Pavement deflections and fatigue failures, Highway Research Board Bulletin, nr 114, s. 43-87, 1955

[60] Mohamed O.H., The effect of cracking on the deflection basin of flexible pavements, 1996

[61] Fengier J., Pożarycki A., Możliwości diagnozowania podłoża nawierzchni jezdni na podstawie uproszczonego modelu ośrodków wielowarstwowych, Drogownictwo, nr 5, s. 170-177, 2014

[62] Kim Y.R., Hibbs B.O., Lee Y.C., Temperature correction of deflections and back-calculated asphalt concrete moduli, Transportation Research Record 1473, s. 55–62, 1995

[63] Zheng Y., Zhang P., Liu H., Correlation between pavement temperature and deflection basin form factors of asphalt pavement, International Journal of Pavement Engineering, nr 20, s. 874-883, 2019

[64] Wiłun Z., Zarys geotechniki, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, Warszawa, 2013

[65] Yoder E.J., Flexible pavement deflections methods of analysis and interpretation, Joint Highway Research Project, nr 4, 1962

[66] American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO), Guide for Design of Pavement Structures, 1993

[67] Janowski A., Sarbiewska J., Klatka-Gigiel M., Opracowanie metodyki sieciowej oceny nośności nawierzchni na podstawie pomiaru ugięć pod obciążeniem dynamicznym, Dro-Konsult, Warszawa, 2008

[68] GDDKiA, Diagnostyka Stanu Nawierzchni Załącznik A. Zasady realizacji pomiarów w ramach diagnostyki nawierzchni, 2015

[69] Mechowski T., Harasim P., Analiza wpływu stanu podbudowy na ocenę nośności nawierzchni o konstrukcji półsztywnej, IBDiM, Warszawa, 2007

[70] Bohn, A. O., The History of the Falling Weight Deflectometer, SWECO, Danmark, 1989

[71] Pożarycki A., Garbowski T., Osysko A., Górnaś P., Fengier J., Piątek P., Polski ugięciomierz dynamiczny z komputerowym systemem oceny nawierzchni, Drogownictwo, nr 12, s. 403-416, 2014

[72] Sebaaly P.E, Tabatabaee N., Scullion T., Comparison of backcalculated moduli from FWD and truck loading, Transportation Research Board, nr 1377, s. 88-98, 1992

[73] Akra T., Scullion T., Smith R.E., Comparing pavement responses under FWD and truck loads, Texas Transportation Institute, raport nr 1184-2(1), 1993

[74] Wang H., Li M., Comparative study of asphalt pavement responses under FWD and moving vehicular loading, Journal of Transportation Engineering, nr 142(12), 2016

[75] Mechowski T., Harasim P., Kowalski A., Kusiak J., Borucki R., Opracowanie metody oceny jakości połączenia warstw konstrukcji nawierzchni za pomocą ugięciomierza dynamicznego FWD, Sprawozdanie z realizacji pracy TD-75, Warszawa, IBDiM, 2006

[76] Qiu X., Yang Q., Wang F., Diagnostic analysis of dynamic deflection for cracked asphalt pavements under FWD impulsive loading, Journal of Vibroengineering, nr 16(5), s. 2426-2437, 2014

[77] Horak E., Aspects of deflection basin parameters used in a mechanistic rehabilitation design procedure for flexible pavements in South Africa, Rozprawa doktorska, Universytet Pretoria, 1987

[78] Kim Y.R., Ranjithan S.R., Troxler J. D., Xu B., Assessing pavement layer condition using deflection data, NCHRP 10-48 Final Report, 2000

[79] Talvik A., Use of FWD deflection basin parameters SCI, BDI, BCI for pavement condition assessment, Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, nr 4(4), s. 196-202, 2009

[80] Pożarycki A., Górnaś P., Bilski M., Turkot A., Parametryzacja krzywej ugięć nawierzchni podatnych, Drogownictwo, nr 3, s. 67-73, 2019

[81] Chang C., Saenz D., Nazarian S., Abdallah I.N., Wimsatt A., Freeman T., Fernando E.G., TxDOT guidelines to assign PMIS treatment levels, Texas Department of Transportation, raport nr FHWA/TX-14/0-6673-P1, 2014

[82] Horak E., Emery S., Maina J., Review of falling weight deflectometer deflection benchmark analysis on roads and airfields, Conference on asphalt pavement for South Africa (CAPSA-2015), Sun City, South Africa, 2015

[83] Park H. M., Use of falling weight deflectometer multi-load level data for pavement strength estimation, North Carolina State University Department of Civil Engineering, Rozprawa doktorska, 2001

[84] Kim Y.R., Park H., Use of falling weight deflectometer multi-load data for pavement strength estimation, Raleigh, North Carolina State University, raport nr FHWA/NC/2002-006, 2002

[85] Losa M., Bacci R., Leandri P., A statistical model for prediction of critical strains in pavements from deflection measurements, Road Materials and Pavement Design, nr 9, s. 373-396, 2008

[86] Paine D., The incorporation of structural data in a pavement management system, Fourth International Conference on Managing Pavements, Durban, May 1998

[87] Leiva-Villacorta F., Vargas-Nordcbeck A., Aguiar-Moya J.P., Permanent deformation and deflection relationship from pavement condition assessment, International Journal of Pavement Research and Technology, nr 10, s. 352-359, 2017

[88] Molenaar A., Structural evaluation and strengthening of flexible pavements using deflection measurements and visual condition surveys, Delft, Delft University of Technology, 2009

[89] Park H.M., Kim Y.R., Prediction of remaining life of asphalt pavement with Falling-Weight Deflectometer multiload-level deflections, Transportation Research Board of the National Academies, nr 1860, 2003

[90] Huang Y.H., Pavement analysis and design, PEARSON, Prentice Hall, Kentucky, 2004

[91] Praca zbiorowa, red. Judycki J., Analizy i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2014

[92] Nagórski R. i in.., Mechanika nawierzchni drogowych w zarysie. Redakcja naukowa - R. Nagórski, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2014

[93] Nagórski R., The classification of mechanical models of road pavements, Archives of civil engineering, nr LXIV(4), s. 155-170, 2018

[94] Ullidtz P., Pavement analysis, Development in Civil Engineering, nr 19, 1987

[95] El-Badawy S. M., Kamel M. A., Assessment and improvement of the accuracy of the Odemark Transformation Method, International journal of advanced engineering sciences and technologies, nr 5(2), s. 105-110, 2011

[96] Burmister D.M., General theory of stress and displacements in layered soil systems, Journal of Applied Physics, nr 16(89), 1945

[97] Firlej S., Mechanika nawierzchni drogowej, Petit s.c., Lublin, 2007

[98] Duncan J.M., Monismith C.L., Wilson E.L., Finite element analyses of pavements, Highway Research Board, nr 228, s. 18–33, 1968

[99] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., The finite element method for solid and structural mechanics, 2005

[100] Birgisson B., Crouch S. L., Newcomb D. E., Static and dynamic boundary element methods for layered pavement systems, raport nr 1091, 1997

[101] Wang J., Birgisson B., A time domain boundary element method for modeling the quasi-static viscoelastic behavior of asphalt pavements, Engineering Analysis with Boundary Elements, nr 31(3), s. 226-240, 2007

[102] You L., Yan K., Hu Y., Zollinger D. G., Spectral element solution for transversely isotropic elastic multi-layered structures subjected to axisymmetric loading, Computers and Geotechnics, nr 72, s. 67-73, 2015

[103] You L., Yan K., Hu Y., Liu J., Ge D., Spectral element method for dynamic response of transversely isotropic asphalt pavement under impact load, Road Materials and Pavement Design, nr 19(1), s. 223-238, 2016

[104] Nasser H., Chabot A., A half-analytical elastic solution for 2D analysis of cracked pavements, Advances in Engineering Software, nr 117, s. 107-122, 2018

[105] Kim M., Three-dimensional finite element analysis of flexible pavements considering nonlinear pavement foundation behavior, Rozprawa doktorska, 2007

[106] Wang D., Roesler J. R., Guo D., Innovative algorithm to solve axisymmetric displacement and stress fields in multilayered pavement systems, Journal of Transportation Engineering, nr 137(4), s. 287-295, 2011

[107] Nagórska M., Nagórski R., Analiza statyczna konstrukcji nawierzchni drogowej za pomocą MES i programu ABAQUS, Logistyka, nr 3, s. 1977-1986, 2011

[108] Rong-xia X., Jin-hui L., Jie H., Deng-feng S., Effect analysis of vehicle system parameters on dynamic response of pavement, Mathematical Problems in Engineering, nr 2015(561478), s. 1-8, 2015

[109] Graczyk M., Nośność konstrukcji nawierzchni wielowarstwowych w krajowych warunkach klimatycznych, Studia i Materiały, Zeszyt 63, IBDiM, Warszawa 2010

[110] Graczyk M., Rafa J., Zofka, A., Pavement modelling using mechanical and thermal homogenization of layered systems, Roads and Bridges - Drogi i Mosty, nr 17(2), s. 141-157, 2018

[111] Ghadimi B., Hamid Nikraz H., A comparison of implementation of linear and nonlinear constitutive models in numerical analysis of layered flexible pavement, Road Materials and Pavement Design, nr 18(3), s. 550-572, 2017

[112] Jaskuła P., Sczepność warstw asfaltowych w wielowarstwowych układach nawierzchni drogowych, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2018

[113] Wang H., Analysis of tire-pavement interaction and pavement responses using a decoupled modeling approach, Rozprawa doktorska, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2011

[114] Nagórska M., On a certain method of selection of domain for finite element modelling of the layered elastic half-space in the static analysis of flexible pavement, Archives of Civil Engineering, nr 58(4), s. 477-501, 2012

[115] Górnaś P., Pożarycki A., Wybrane cechy numerycznych modeli MES w analizie odwrotnej konstrukcji nawierzchni, Roads and Bridges - Drogi i Mosty, nr 13(3), s. 203-222, 2014

[116] Kadela M., Model of multiple-layer pavement structure-subsoil system, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, nr 4(64), s. 751-762, 2016

[117] Nagórski R., Tutka P., Złotowska M., Dobór obszaru i warunków brzegowych modelu nawierzchni drogowej podatnej w analizie metodą elementów skończonych, Roads and Bridges - Drogi i Mosty, nr 16, s. 265-277, 2017

[118] Tutka P., Nagórski R., Walidacja modeli numerycznych nawierzchni drogowej podatnej z użyciem elementów nieskończonych, Eksploatacja i testy, nr 12, s. 1400-1404, 2017

[119] Michalczyk R., Zbiciak A., Wyznaczanie stanów naprężeń i odkształceń w mechanistycznym projektowaniu nawierzchni podatnych, Polish-Ukrainian-Lithuanian Transactions Theoretical Foundations of Civil Engineering, nr 19, s. 173-178, 2011

[120] Pożarycki A., Górnaś P., Zalewski P., Wpływ spękań na zmianę modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych oznaczanych w warunkach in situ, Roads and Bridges – Drogi i Mosty, nr 14(4), s. 257-270, 2015

[121] Shayesteh A., Ghasemisalehabadi E., Khordehbinan M.W., Rostami T., Finite element method in statistical analysis of flexible pavement, Journal of Marine Science and Technology, nr 25(2), s. 142-152, 2017

[122] Ghadimi B., Numerical modelling for flexible pavement materials applying advanced finite element approach to develop Mechanistic-Empirical design procedure, Rozprawa doktorska, Curtin University, 2015

[123] Wrana B., Dynamika gruntów, modele obliczeniowe, Politechnika Krakowska, 2012

[124] Whiffin A.C., Lister, N.W., The application of elastic theory to flexible pavements, International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor, s. 499-552, 1962

[125] Han H.Ch., Application of layered system analysis to the design of flexible, Lehigh University, 1973

[126] Khazanovich L., Wang Q., MnLayer high-performance layered elastic analysis program, nr 2037(1), s. 63-75, 2007

[127] Tutka P., Nagórski R., Dynamika nawierzchni drogowej podatnej o skokowo zmiennej sztywności warstw asfaltowych – analiza numeryczna zagadnienia, Eksploatacja i testy, nr 12, s. 1395-1399, 2016

[128] Złotowska M., Nagórski R., Wpływ rozmiaru powierzchni braku sczepności w nawierzchni drogowej podatnej na zachowanie nawierzchni – zagadnienie obrotowo symetryczne, Eksploatacja i testy, nr 12, s. 1450-1453, 2017

[129] Singh A.K., Sahoo J.P., Analysis and design of two layered flexible pavement systems A new mechanistic approach, Computers and Geotechnics, nr 117, 2020

[130] Gajewski M., Mirski K., Bańkowski W., Badania wpływu naprężeń normalnych na zachowanie połączenia międzywarstwowego przy ścinaniu próbek asfaltowych zbrojonych siatkami, Drogownictwo, nr 4-8, s. 253-259, 2012

[131] Górszczyk J., Malicki K., Trwałość zmęczeniowa połączeń warstw asfaltowych w badaniach laboratoryjnych, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Zeszyt 59, nr 3/IV, s. 199-206, 2012

[132] Malicki K., Analiza połączeń międzywarstwowych mieszanek mineralno-asfaltowych w warunkach obciążeń statycznych i zmęczeniowych, Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków, 2012

[133] Judycki J., Jaskuła P., Grądzka A., Modelowanie teoretyczne wpływu sczepności międzywarstwowej na zachowanie się nawierzchni asfaltowych, etap I, Gdańsk, 2011

[134] Shell Bitumen Business Group, BISAR 3.0 User Manual, 1998

[135] Wardęga R., Wpływ struktury ruchu na nośność nawierzchni drogowych, Rozprawa doktorska, Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2006

[136] Park D.W., Papagiannakis A.T., Kim I.T., Analysis of dynamic vehicle loads using vehicle pavement interaction model, KSCE Journal of Civil Engineering, nr 18(7), s. 2085-2092, 2014

[137] Wang G., Roque R., Three-dimensional finite element modeling of static tire–pavement interaction, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, nr 2155(1), s. 158-169, 2010

[138] Cao P. Zhou Ch., Feng D., Zhao Y., Huang B., A 3D direct vehicle-pavement coupling dynamic model and its application on analysis of asphalt pavement dynamic response, Mathematical Problems in Engineering, nr 12, s. 1-8, 2013

[139] Shi X.M., Cai C.S., Simulation of dynamic effects of vehicles on pavement using a 3D interaction model, Journal of Transportation Engineering, nr 135(10), s. 736-744, 2009

[140] Karczewski J., Zarys metody georadarowej, AGH, Kraków, 2007

[141] Meshkani A., Abdallah I., Nazarian S., Determination of nonlinear parameters of flexible pavement layers from nondestructive testing, The center for transportation infrastructure systems, The University of Texas at El Paso, 2004

[142] Fileccia S.G., Turetta T., Celauro C., Backcalculation of airport pavement moduli and thickness using the Lévy Ant Colony Optimization Algorithm, Construction and Building Materials, nr 119, s. 288-295, 2016

[143] Pożarycki A., Górnaś P., Sztukiewicz R., Zastosowanie fal mechanicznych i elektromagnetycznych w zintegrowanym systemie oznaczania nośności nawierzchni, Roads and Bridges - Drogi i Mosty, nr 16(2), s. 101-114, 2017

[144] AL-Qadi I.L., Lahouar S., Measuring layer thicknesses with GPR - Theory to practice, Construction and Building Materials, nr 19(10), s. 763-772, 2005

[145] Leng Z., AL-Qadi I.L., An innovative method for measuring pavement dielectric constant using the extended CMP method with two air-coupled GPR systems, NDT and E International, nr 66, s. 90-98, 2014

[146] Liu. H., Sato M., In-situ measurement of pavement thickness and dielectric permittivity by GPR using an antenna array, NDT and E International, nr 64, s. 65-71 2014

[147] Nazarian S., Stokoe II K. H., Briggs R.C., Rogers R., Determination of pavement layer thicknesses and moduli by SASW method, Transportation Research Board, nr 1196, s. 133-150, 1988

[148] Lin S., Advancements in active surface wave methods: modeling, testing and inversion, Digital Repository Iowa State University, Graduate Theses and Dissertations, nr 13761, 2014

[149] Sangghaleh A., Pan E., Green R., Wang R., Liu X., Cai Y., Backcalculation of pavement layer elastic modulus and thickness with measurement errors, International Journal of Pavement Engineering, nr 15(6), s. 521-531, 2014

[150] Meier R.W., Rix G.J., Backcalculation of flexible pavement moduli using artificial neural networks, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, nr 1448, s. 75-82, 1994

[151] Pożarycki A., Identyfikacja liczby i grubości warstw modelu nowej nawierzchni odcinka próbnego metodami sztucznej inteligencji, Drogi i Mosty, nr 2, s. 123-149, 2012

[152] Nasimifar M., Thyagarajan S., Sivaneswaran N., Backcalculation of flexible pavement layer moduli from Traffic Speed Deflectometer data, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, nr 2641, s. 66–74, 2017

[153] Goel A., Das A., A brief review on different surface wave methods and their applicability for non-destructive evaluation of pavements, Nondestructive Testing and Evaluation, s. 337-350, 2008

[154] Zhang W., Arfan Akber M. A., Hou S., Bian J., Zhang D., Le Q., Detection of dynamic modulus and crack properties of asphalt pavement using a non-destructive ultrasonic wave method, Applied Sciences, nr 9(2946), s. 1-12, 2019

[155] PN-EN 12697-26 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 26: Sztywność

[156] PN-EN 12697-22 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 22: Koleinowanie

[157] PN-EN 12697-1 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 1: Zawartość lepiszcza rozpuszczalnego

[158] PN-EN 12697-2 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 2: Oznaczanie składu ziarnowego

[159] PN-EN 12697-5 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 5: Oznaczanie gęstości

[160] PN-EN 12697-6 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 6: Oznaczanie gęstości objętościowej metodą hydrostatyczną

[161] PN-EN 12697-8 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 8: Oznaczanie zawartości wolnej przestrzeni

[162] PN-EN 13286-43: Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym - Część 43: Metoda oznaczania modułu sprężystości mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym

[163] PN-EN 1997-2 Eurokod 7 - Projektowanie geotechniczne - Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego

[164] PN-EN 13286-47 – Mieszanki mineralne niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym Część 47: Metody badań dla określenia nośności, kalifornijski wskaźnik nośności CBR, natychmiastowy wskaźnik nośności i pęcznienia liniowego

[165] Judycki J., Jaskuła P., Badania i ocena wpływu sczepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni asfaltowej, Raport dla GDDKiA, 2005

[166] GDDKiA, Instrukcja laboratoryjnego badania sczepności międzywarstwowej wg metody Leutnera próbek odwierconych z nawierzchni i wymagania techniczne sczepności, 2013

[167] Szydło A., Statyczna identyfikacja parametrów modeli nawierzchni lotniskowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1995

[168] Huang Y.H., Pavement analysis and design, Prentice-Hall, New Jersey, 1993

[169] Mahoney J.P., Winters B.C., Jackson N.C., Pierce L.M., Some observations about backcalculation and use of a stiff layer condition, Transportation Research Board, nr 1384, s. 8-14, 1993

[170] Kang Y., Multifrequency backcalculation of pavement-layer moduli, Journal of Transportation Engineering, nr 124(1), s. 73-81, 1998

[171] Guzina B.B., Osburn H.R., Effective tool for enhancing elastostatic pavement diagnosis, Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, nr 1806(1), s. 30-37, 2002

[172] Park H.M., Kim Y.R., Park S.W., Assessment of pavement layer condition with use of multiload-level falling weight deflectometer deflections, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, nr 1905(1), s. 107-116, 2005

[173] Salour F., Erlingsson S., The influence of groundwater level on the structural behaviour of a pavement structure using FWD, In BCRRA, The Ninth International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, 25–27 June, Trondheim, Norway, s. 485–494, 2013

[174] Matsui K., Hachiya Y., Maina J. W., Kikuta Y., Nagae T., Influence of seed layer moduli on finite element method – based modulus, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, nr 1951(1), s. 122-136, 2006

[175] Choi J.W., Wu R., Pestana J.M., Harvey J., New layer-moduli back-calculation method based on the constrained extended Kalman filter, Journal of Transportation Engineering, nr 136(1), s. 20-30, 2010

[176] Saltan M., Terzi S., Kucuksille E. U., Backcalculation of pavement layer moduli and Poisson's ratio using data mining, Expert Systems with Applications, nr 38(3), s. 2600-2608, 2011

[177] Garbowski T., Pożarycki A., Multi-level backcalculation algorithm for robust determination of pavement layers parameters, Inverse Problems in Science and Engineering, nr 25(5), s. 1-20, 2016

[178] Harichandran R.S., Mahmood T., Raab A.R., Baladi G.Y., Modified Newton algorithm for backcalculation of pavement layer properties, Transportation Research Board, nr 1384, s. 15–22, 1993

[179] Yi J.H., Mun S., Backcalculating pavement structural properties using a Nelder-Mead simplex search, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, nr 33(11), s. 1389-1406, 2009

[180] Fwa T.F., Tan C.Y., Chan W.T., Backcalculation analysis of pavement-layer moduli using genetic algorithms, Transportation Research Record, nr 1570(1), s. 134–142, 1997

[181] Li X., Li X., Zhong Y., Wang F., Modulus back analysis of pavement structure based on PSO, Applied Mechanics and Materials, nr 178-181, s. 1222-1225, 2012

[182] Gopalakrishnan K., Neural Network–Swarm intelligence hybrid nonlinear optimization algorithm for pavement moduli back-calculation, Journal of Transportation Engineering, nr 136(6), 2010

[183] Li M., Wang H., Development of ANN-GA program for backcalculation of pavement moduli under FWD testing with viscoelastic and nonlinear parameters, International Journal of Pavement Engineering, nr 20(4), s. 490-498 , 2017

[184] Meier R.W., Alexander D. R., Freeman R.B., Using artificial neural networks as a forward approach to backcalculation, Transportation Research Record, nr 1570(1), 1997

[185] Aubdulnibe F. F., Jassim K. A., An application of artificial neural networks (ANNs) to the backcalculation of flexible pavement moduli, International Conference on Physics and Photonics Processes in Nano, Journal of Physics: Conference Series, nr 1362, 20–22 June, Eluru, India, 2019

[186] Hadidi R., Gucunski N., Probabilistic inversion: A new approach to inversion problems in pavement and geomechanical engineering, Intelligent and Soft Computing in Infrastructure Systems Engineering, Studies in Computational Intelligence, nr 259, 2009

[187] Fengier J., Analiza odwrotna rezultatów uzyskanych przy zastosowaniu urządzenia FWD z wykorzystaniem metody probabilistycznej, Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, Politechnika Poznańska, nr 27, s. 75-84, 2018

[188] Pan E., Sangghaleh A., Molavi A., Zhao Y., Yi P.L., An efficient and accurate genetic algorithm for backcalculation of flexible pavement layer moduli, raport nr FHWA/OH-2012/18, 2012

[189] Górnaś P., Pożarycki A., Funkcje celu w procedurze analizy odwrotnej opartej na wynikach pomiaru ugięć nawierzchni jezdni, Drogownictwo, nr 3, s. 67-72, 2020

[190] Everseries user's guide Pavement Analysis Computer Software and Case Studies, Department of Transportation, Washington, 2005

[191] Szydło A., Krawczyk B., Ruttmar I., Rozrzuty wyników pomiarów przemieszczeń nawierzchni rejestrowanych za pomocą ugięciomierza dynamicznego FWD, Międzynarodowa Konferencja Nowoczesne Technologie w Budownictwie Drogowym, Poznań, 2009

[192] Sybilski D., Mechowski T., Harasim P., Ocena połączenia międzywarstwowego nawierzchni ugięciomierzem FWD, Drogi i Mosty, nr 2, s. 41-83, 2007

[193] Gajewski M., Jemioło S., Analiza możliwości wykrywania braku zespojenia warstw asfaltowych w badaniu FWD, TTS Technika Transportu Szynowego, nr 18(9), s. 2423–2432, 2012

[194] Sudyka J., Krysiński L., Harasim P., Jaskuła P., Analiza możliwości wykorzystania techniki radarowej w ocenie stanu połączeń, Sprawozdanie częściowe. Etap I - zadania 1 i 2, IBDiM, Warszawa, 2008

[195] Spławińska M., Ocena szacowania średniego dobowego ruchu (SDR) wykorzystującego wskaźniki przeliczeniowe, Drogownictwo, nr 7-8, s. 267-272, 2010

[196] Burnos P., Ważenie pojazdów samochodowych w ruchu. Cz. 2: Rodzaje i charakterystyka systemów Weigh In Motion, Drogownictwo, nr 7-8, s. 240-245, 2014

[197] Burnos P., Ważenie pojazdów samochodowych w ruchu. Cz. 4: Ocena dokładności systemów Weigh in Motion (WIM), Drogownictwo, nr 12, s. 388-395, 2014

[198] Praca zbiorowa, Wytyczne obliczania prognozy ruchu samochodowego na drogach zamiejskich metodą wskaźników wzrostu ruchu, CBPBDiM, Warszawa 1983

[199] Kukiełka J., Kukiełka J., Ziemiński P., Dotychczasowe i przyszłe możliwości prognozowania ruchu na drogach krajowych Lubelszczyzny, Drogownictwo, nr 11, s. 377-381, 2012

[200] Kukiełka J., Prognozowanie ruchu na drogach krajowych, Budownictwo i Architektura, nr 10, s. 131-144, 2012

[201] https://www.gddkia.gov.pl/pl/992/zalozenia-do-prognoz-ruchu (dostęp 14.07.2019 r.)

[202] http://www.siskom.waw.pl/nauka/zasady-prognozowania-ruchu-drogowego.pdf (dostęp 14.07.2019 r.)

[203] Dyrektywa Komisji 2001/116/WE z dnia 20 grudnia 2001 r. Dostosowująca do postępu technicznego dyrektywę Rady 70/156/EWG w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do homologacji typu pojazdów silnikowych i ich przyczep

[204] Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Final Report, NCHRP 1-37A. AASHTO, ARA Inc. and ERES Consultants Division, 2004

[205] PN-89/S-02006 Pojazdy samochodowe, Przyczepy i naczepy. Kategorie, symbole i określenia

[206] Maśkiewicz J., Synteza Generalnego Pomiaru Ruchu 2015 na drogach krajowych i wojewódzkich, Drogownictwo, nr 11, s. 364-370, 2016

[207] COST 323, Weight in Motion of Road Wehicles. Final Report, Appendix 1 – European WIM Specification", 1999

[208] Deacon J. A., Load equivalency in flexible pavements, AAPT, nr 38, s. 465-494, 1969

[209] Scala A. J., W. J. Cogill, A. McNeil., Comparison of the response of pavements to single and tandem axle loads, Proceedings of the 5th ARRB Conference (5A), s. 231-252, Sydney, Australia, 1970

[210] Huhtala M., Pihlajama J., New concepts on load equivalency measurements, Proceedings of the 7th International Conference on Asphalt Pavements, s. 194-208, Nottingham, England, 1992

[211] AASHO interim guides for design of pavement structures, AASHO, 1973

[212] Judycki J., Determiantion of axle load equivalency factors on the basis of fatigue criteria for flexible and semi-rigid pavements, Road Materials and Pavement Design, nr 1(11), s. 187-202, 2010

[213] Ioannides A.M., Khazanovich L., Load equivalency concepts: a mechanistic reappraisal, nr 1338, s. 42-51, 1993

[214] Gillmann R., Axle spacing and load equivalency factors, nr 1655, s. 227-232, 1999

[215] Judycki J., Grajewska A., Wróbel M., Opracowanie zaleceń do obliczania współczynników równoważności obciążenia osi do projektowania nawierzchni podatnych i półsztywnych, Etap II. Politechnika Gdańska, GDDKiA, Gdańsk, 2006

[216] Haider S. W., Harichandran R. S., Dwaikat, M. B., Impact of systematic axle load measurement error on pavement design using mechanistic-empirical pavement design guide, Journal of Transportation Engineering, nr 138, s. 381–386, 2012

[217] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflachen RSTO 01. FGSV, Kolonia, Niemcy, 2001

[218] RVS 03.08.63 Oberbaubemessung. FSV, Austria, 2008

[219] Gillespie T.D., Karamihas S.M., Sayers M., Nasim M. A., Hansen W., Ehsan, N., Cebon D., Effects of heavy vehicles characteristic on pavement response and performance, Final Report, The University of Michigen, NCHRP, 1992

[220] Misaghi S., Nazarian S., Carrasco C. J., Impact of truck suspension and road roughness on loads exerted to pavements, The University of Texas, El Paso, 2010

[221] Ryś D., Judycki J., Jaskuła P., Wpływ równości nawierzchni i dynamicznego oddziaływania pojazdów ciężkich na trwałość zmęczeniową nawierzchni podatnych, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, z. 63, nr 1/II, s. 291-298, 2016

[222] Tutka P., Nagórski R., Wpływ nierówności podłużnych nawierzchni na trwałość nawierzchni drogowej podatnej, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, nr 18(12), s. 1371-1374, 2017

[223] Blab R., Litzka J., Measurements of the lateral distribution of heavy vehiclesand its effects on the design of road pavements, Road transport technology – 4, Procedings of the Fourth International Symposium on Heavy Vehicles Weight and Dimentions, s. 389-395, Ann Arbor, USA, 1995

[224] Gillespie et al., Effect of heavy vehicle characteristics on pavement response and performance, Transportation Research Board NCHRP, report nr 353, 1993

[225] Buhari R., Rohani M. M., Abdullah M. E., Dynamic load coefficient of tyre forces from truck axles, Applied Mechanics and Materials, nr 405-408, s. 1900-1911, 2013

[226] Ryś D., Judycki J., Jaskuła P., Effect of pavement roughness and vehicle dynamic loads on decrease of fatigue life of flexible pavements, Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018, April 16-19, Vienna, Austria, 2018

[227] Zofka A., Urbaniak A., Maliszewski M., Bańkowski W., Sybilski D., Site specific traffic inputs for mechanistic-empirical pavement design guide in Poland, Transportation Research Board, Annual Meeting, Waszyngton, 2014

[228] Ryś D., Jaskuła P., Jaczewski M., Pszczoła M., Wdrożenie i ocena metody M-EPDG do analizy trwałości polskich typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i sztywnych, Roads and Bridges - Drogi i Mosty, nr 18, s. 283 – 302, 2019

[229] Romanoschi S. A., Metcalf J. B., Rasoulian M., Assessment of pavement life at first full-scale accelerated pavement test in Louisiana, Transportation Research Record, nr 1655, s. 219-226, 1999

[230] Smith K. D., Zimmerman K. A., Finn F. N., The AASHO road test, Living Legacy for Highway Pavements. TR News, nr 232, s. 14-24, 2004

[231] Kowalski K.J., Porównanie drogowych torów badawczych do przyspieszonej oceny nawierzchni, Drogi i Mosty, nr 2, s. 17-30, 2007

[232] Ruttmar I., Szydło A., Wykorzystanie symulatora ciężkich pojazdów do weryfikacji konstrukcji nawierzchni płatnej autostrady A2, Drogownictwo, nr 3, s. 75-78, 2004

[233] Bańkowski W., Gajewski M., Badania przyspieszone w skali rzeczywistej innowacyjnych nawierzchni drogowych, Drogi i Mosty, nr 2, s. 89-121, 2012

[234] Pożarycki A., Analiza trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych, Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań, 2009

[235] Bodin D., Roche Ch., Pijaudier-Cabot G., Size effect regarding fatigue evaluation of asphalt mixtures: Laboratory cantilever bending tests, Road Materials and Pavement Design, nr 7, s. 181-201, 2006

[236] Jacobs M. M. J., Bondt A. H., Hopman P. C., Khedoe R., Determination of crack growth parameters of asphalt mixtures, 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, s. 941–952, 2012

[237] Hasheminejad N., Vuye C., Margaritis A., Ribbens B., Jacobs G., Blom J., Vanlanduit S., Investigation of crack propagation and healing of asphalt concrete using digital image correlation, Applied Sciences, nr 9(12), s. 1-12, 2019

[238] Sybilski D., Bańkowski W., Zastosowanie wyników badania zmęczenia mieszanek mineralno-asfaltowych w mechanistycznym projektowaniu konstrukcji nawierzchni, Drogownictwo, nr 5, s. 138-145, 2001

[239] Mackiewicz P., Trwałość zmęczeniowa mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych w nawierzchniach drogowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2016

[240] Pożarycki A., Garbowski T., Laboratory testing of fatigue crack growth in geosynthetically reinforced large scale asphalt pavement samples, Procedia Engineering, nr 57, s. 922-928, 2013

[241] AASHTO T 321-07, Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending, 2011

[242] PN-EN 12697-24 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 24: Odporność na zmęczenie, 2012

[243] Judycki J., Budowa i kalibracja modeli spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych nawierzchni drogowych w mechanistyczno-empirycznej metodzie AASHTO 2004, Drogi i Mosty, nr 4, s. 31-53, 2011

[244] Judycki J., Jaskuła P., Pszczoła M., Ryś D., Jaczewski M., Alenowicz J., Weryfikacja i aktualizacja katalogu typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych z 1997 roku, raport z etapu trzeciego, Gdańsk, 2011

[245] Collop A. C., Cebon, D., A theoretical analysis of fatigue cracking in flexible pavements, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, nr 209(5), s. 345–361, 1995

[246] Kim J., Roque R., Byron T., Viscoelastic analysis of flexible pavements and its effects on top-down cracking, Journal of Materials in Civil Engineering, nr 21(7), s. 324–332, 2009

[247] Luo H., Zhu H., Miao Y., Chen, C., Simulation of top-down crack propagation in asphalt pavements, Journal of Zhejiang University SCIENCE A, nr 11(3), s. 223–230, 2010

[248] Im S., Characterization of viscoelastic and fracture properties of asphaltic materials in multiple length scales, Lincoln, Nebraska, 2012

[249] Liu P., Chen J., Lu G., Wang D., Oeser M., Leischner S., Numerical simulation of crack propagation in flexible asphalt pavements based on cohesive zone model developed from asphalt mixtures, Materials, nr 12(1278), s. 1-13, 2019

[250] Sztukiewicz R., Rydzewski P., System wspomagania zarządzania siecią ulic miasta Poznania, Przegląd Komunalny, nr 8, s. 42-46, 2001

[251] Sztukiewicz R., Rydzewski P., Diagnoza nawierzchni w systemie wspomagania zarządzania siecią ulic miasta Poznania, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Budownictwo Lądowe, nr 60, s. 283-289, 2006

[252] Heller S., Systemy zarządzania stanem nawierzchni drogowej (PMS), Magazyn Autostrady, nr 4, s. 62-66, 2013

[253] Santos J., Ferreira A., Life-cycle cost analysis system for pavement management, Procedia - Social and Behavioral Sciences, nr 48, s. 331-340, 2012

[254] Ognjenovica S., Ishkovb A., Cvetkovicc D., Pericd D., Romanovich M., Analyses of costs and benefits in the pavement management systems, Procedia Engineering, nr 165, s. 954-959, 2016

[255] Babashamsi P., Yusof N.I.M., Ceylan H., Nor G.M.N., Jenatabadi H.S., Evaluation of pavement life cycle cost analysis: Review and analysis, International Journal of Pavement Research and Technology, nr 9, s. 241-254, 2016

[256] Pszczoła M., Equivalent temperature for design of asphalt pavements in Poland, MATEC Web of Conferences, nr 262, s.1-6, 2019

[257] Lahouar S., Al-Qadi I. L., Automatic detection of multiple pavement layers from GPR data, NDT and E International, nr 41, s. 69–81, 2008

[258] Chen Z., Olatubosun O.O., Zhang H., Sun R., Automatic detection of asphalt layer thickness based on Ground Penetrating Radar, 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications, s. 2850-2854, 2016

[259] Liu H., Birken R., Wang M.L., Automatic pavement layer identification with multichannel ground penetrating radar at traffic speed, Journal of Applied Remote Sensing, nr 10(4), s. 1-18, 2016

[260] Sukhobok Y. A., Verkhovtsev L. R., Ponomarchuk Y. V., Automatic evaluation of pavement thickness in GPR data with Artificial Neural Networks, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, nr 272(2), s. 1-6, 2019

[261] Gołębiowski T., Wprowadzenie do metodyki interpretacji badań georadarowych przy użyciu procedury modelowania numerycznego, Przegląd Geologiczny, nr 52(7), s. 563–568, 2004

[262] Glisson A., Elsherbeni A., An interactive 1D Matlab FDTD code for education, Computer Applications in Engineering Education, nr 9(2), s. 136-147, 2001

[263] Loui H., 1D-FDTD using MATLAB, Numerical methods in photonics project-1, 2004

[264] Evans R., Frost M., Stonecliffe-Jones M., Dixon, N., Assessment of in situ dielectric constant of pavement materials, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, nr 2037(1), s. 128–135, 2007

[265] Łyskowski M., Mazurek E., Analiza konsekwencji doboru nieodpowiedniej prędkości propagacji fali elektromagnetycznej w trakcie interpretacji inżynierskich pomiarów metodą georadarową, Logistyka, nr 4, s. 330-336, 2013

[266] Oppenheim A.V., Schafer R.W., Cyfrowe przetwarzanie sygnałów, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1979

[267] Izydorczyk J., Płonka G., Tyma G., Teoria sygnałów, Helion, 2006

[268] Zieliński T., Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2007

[269] Pożarycki A., Górnaś P., Filtration of dynamic effects in pavement during measurement with FWD deflectometer, Drogownictwo, nr 1, s. 13-21, 2017

[270] Pożarycki A., Górnaś P., Wanatowski D., The influence of frequency normalisation of FWD pavement measurements on backcalculated values of stiffness moduli, Road Materials and Pavement Design, nr 20(1), s. 1-19, 2019

[271] Górnaś P., Pożarycki A., Słowik M., Turkot A., The impact of dynamic effects filtration on the results of the comparative analysis performed with falling weight deflectometers, International Journal of Pavement Engineering, in press, s. 1-7, 2020

[272] Rakowski G., Kacprzyk Z., Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016

[273] Westover T., Guzina B., Engineering framework for the self-consistent analysis of FWD data, Transportation Research Record, nr 1, s. 55–63, 2007

[274] Pożarycki A., Fengier J., Górnaś P., Wanatowski D., Backcalculation of pavements incorporating Grouted Macadam technology, Road Materials and Pavement Design, nr 19(6), s. 1372 - 1388, 2018

[275] Pożarycki A., Górnaś P., Numeryczny model właściwości lepkosprężystych warstw nawierzchni jezdni z betonu asfaltowego, Budownictwo i Architektura, nr 13(4), s. 101-107, 2014

[276] Abaqus analysis user's manual, Version 6.11, Dassault SysteMES, 2011

[277] Stróżyk-Weiss J., Pożarycki A., Wyczałek I., Wyczałek M., Łuczak, R., Charakterystyka statycznych i inercyjnych metod pomiarowych stosowanych do oznaczania równości podłużnej nawierzchni jezdni, Drogownictwo, nr 3, s. 89-98, 2016

[278] Chen W., Ni Z., Hu X., Lu X., Research on pavement roughness based on the laser triangulation, Photonic sensors, nr 6(2), s. 177–180, 2016

[279] Pożarycki A., Raport cząstkowy z realizacji projektu naukowego pbs3/b6/36/2015 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju część inżyniersko - badawcza, zadanie nr 5, część A Tytuł projektu: Inteligentny system monitoringu stanu technicznego nawierzchni jezdni, 2016

[280] Mikulski S., Metody triangulacji laserowej w skanerach trójwymiarowych, Poznan University of Technology Academic Journals Electrical Engineering, nr 75, s. 239-245, 2013

[281] Reiner J., Stankiewicz M., Eliminacja zniekształceń geometrycznych obrazu w metodzie triangulacji laserowej, Pomiary Automatyka Kontrola, nr 1(56), s. 54-57, 2010

[282] Bociek B., Blender. Podstawy modelowania, Helion, 2007

[283] Tadeusiewicz R., Wprowadzenie do sieci neuronowych, StatSoft Polska, Kraków, 2001

[284] Open Street Map (dostęp 30.01.2022 r. pod adresem: https://www.openstreetmap.org)

[285] Mascio P.D., Loprencipe G., Moretti L., Puzzo L., Zoccali P., Bridge expansion joint in road transition curve effects assessment on heavy vehicles, Applied Science, nr 7(599), s. 1-21, 2017

Załącznik 1. Kod programu MATLAB jednowymiarowy model pomiaru metodą GPR

```
%%%
```

```
    G = data.amp * -2 / pi^0.25 / 3^0.5 * (x.^2 - 1) .* exp(- x.^2 / 2);

    % inicjacja macierzy pola elektrycznego i magnetycznego
    E = zeros(N(end),length(T));
    H = zeros(N(end)-1,length(T));

    % petla obliczeniowa
    for i = 2:length(T)

        % pierwszy wezel
        if i > n
            % warunek brzegowy wygaszenia
            E(1,i) = E(2,i-1) + (v(1)*dt-data.dh)/(v(1)*dt+data.dh)*E(2,i);
        else
            % wyslanie impulsu "Mexican hat"
            E(1,i-1) = G(i-1);
        end

        % ostatni wezel - warunek brzegowy wygaszenia
        E(end,i) = E(end-1,i-1) + (v(end)*dt-data.dh)/(v(end)*dt+data.dh)*E(end-1,i);

        % petla obliczeniowa pola magnetycznego
        k = 1;
        for j1 = 1:N(end)-1
            if j1 > N(k)
                k = k + 1;
            end

            Chzh = (data.mur(k)-Ch*data.sigmm(k)) / (data.mur(k)+Ch*data.sigmm(k));
            Chze = (2*Ch) / (data.mur(k)+Ch*data.sigmm(k));
            H(j1,i) = Chzh*H(j1,i-1) + Chze/data.dh*(E(j1+1,i-1)-E(j1,i-1));
        end

        % petla obliczeniowa pola elektrycznego
        k = 1;
        for j2 = 2:N(end)-1
            if j2 > N(k)
                k = k + 1;
            end

            Ceye = (data.epsr(k)-Ce*data.sigme(k)) / (data.epsr(k)+Ce*data.sigme(k));
            Ceyh = (2*Ce) / (data.epsr(k)+Ce*data.sigme(k));
            E(j2,i) = Ceye*E(j2,i-1) + Ceyh/data.dh*((H(j2,i)-H(j2-1,i)));
        end

    end

    % zapis wynikow
    data.T = T;
    data.GPR = E(1,:);

end
```

Załącznik 2. Kody programu MATLAB obliczenie FFT i iFFT

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% obliczenie FFT - szybkiej transformaty Fouriera
%
% Autor: g@ral
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% dane wejsciowe:
%   X - wektor czasu [s]
%   Y - wektor wartosci funkcji Y(X) [-]

% dane wynikowe:
%   F - wektor czestotliwosci [Hz]
%   A - wektor amplitud A(F) [-]
%   P - wektor faz poczatkowych P(F) [rad]

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [F,A,P] = solver_FFT(X,Y)

    % liczba elementow wektora X [-]
    N = length(X);

    % czestotliwosc probkowania funkcji Y(X) [Hz]
    Fs = 1 / (X(2) -X(1));

    % wektor czestotliwosci [Hz]
    if mod(N,2) == 0
        F = (0:N/2-1) * Fs/N;
    else
        F = (0:N/2) * Fs/N;
    end

    % obliczenie FFT, wektoru liczb zespolonych
    Z = fft(Y,N);
    Z = Z(1:ceil(N/2));

    % wektor amplitud A(F) [-]
    A = abs(Z) / N*2;
    A(1) = A(1) / 2;

    % wektor faz poczatkowych P(F) [rad]
    P = imag(log(Z));

end
```

```
%%%
```

Załącznik 3. Kody programu MATLAB modele systemów mechanicznych

```
%%%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% dynamiczny model numeryczny systemu mechanicznego ukladu mas, sprezyn i tlumikow
%
% Autor: g@ral
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% dane wejsciowe:
%       model.n - liczba wezlow modelu [-]
%       model.m - wektor mas wezlow modelu [kg]
%       model.ki - macierz konfiguracji sprezyn laczacych wezel nr i z utwierdzeniem [i,N/m]
%
model.ci - macierz konfiguracji tlumikow laczacych wezel nr i z utwierdzeniem [i,N*s/m]
%       model.kij - macierz konfiguracji sprezyn laczacych wezly nr i z j [i,j,N/m]
%       model.cij - macierz konfiguracji tlumikow laczacych wezly nr i z j [i,j,N*s/m]
%       model.T - wektor czasu [s]
%       model.F - macierz sil wezlowych w czasie [N]
%       model.solver - metoda calkowania rownania ruchu: CDM lub Newmark [-]

% dane wyjsciowe:
%       model.U - macierz wartosci przemieszczen wezlow w czasie [m(i,s)]
%       model.V - macierz wartosci predkosci wezlow w czasie [m/s(i,s)]
%       model.A - macierz wartosci przyspieszen wezlow w czasie [m/s^2(i,s)]

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function model = model_SDOF_dynamic(model)

    % utworzenie macierzy sprezystosci, tlumienia i mas
    model = matrix(model);

    % calkowanie rownania ruchu metoda Central Difference Method (explicit)
    if strcmp('CDM',model.solver) model = cdm(model);
    % calkowanie rownania ruchu metoda Newmark
    elseif strcmp('Newmark',model.solver) model = newmark(model); end

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% utworzenie macierzy sprezystosci, tlumienia i mas
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function model = matrix(model)

    % inicjacja macierzy sprezystosci, tlumienia i mas
    model.K = zeros(model.n,model.n);
    model.C = zeros(model.n,model.n);
    model.M = zeros(model.n,model.n);

    % uzupelnienie macierzy sprezystosci o polaczenia wezel - warunek brzegowy
    if ~isempty(model.ki)
        for i = 1:length(model.ki(:,1))

            n = model.ki(i,1);
            k = model.ki(i,2);

            model.K(n,n) = model.K(n,n) + k;

        end
    end

    % uzupelnienie macierzy sprezystosci o polaczenia wezel - wezel
    if ~isempty(model.kij)
        for i = 1:length(model.kij(:,1))

            n1 = model.kij(i,1);
            n2 = model.kij(i,2);
            k = model.kij(i,3);

            model.K(n1,n1) = model.K(n1,n1) + k;
            model.K(n2,n2) = model.K(n2,n2) + k;
            model.K(n1,n2) = model.K(n1,n2) - k;
```

```
            model.K(n2,n1) = model.K(n2,n1) - k;

        end
    end

    % uzupelnienie macierzy tlumienia o polaczenia wezel - warunek brzegowy
    if ~isempty(model.ci)
        for i = 1:length(model.ci(:,1))

            n = model.ci(i,1);
            c = model.ci(i,2);

            model.C(n,n) = model.C(n,n) + c;

        end
    end

    % uzupelnienie macierzy tlumienia o polaczenia wezel - wezel
    if ~isempty(model.cij)
        for i = 1:length(model.cij(:,1))

            n1 = model.cij(i,1);
            n2 = model.cij(i,2);
            c = model.cij(i,3);

            model.C(n1,n1) = model.C(n1,n1) + c;
            model.C(n2,n2) = model.C(n2,n2) + c;
            model.C(n1,n2) = model.C(n1,n2) - c;
            model.C(n2,n1) = model.C(n2,n1) - c;

        end
    end

    % uzupelnienie macierzy mas
    model.M(1:model.n+1:model.n*model.n) = model.m;

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% calkowanie rownania ruchu metoda Central Difference Method (explicit)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function model = cdm(model)

    % liczba krokow obliczeniowych
    N = length(model.T);

    % czas kroku obliczeniowego
    dT = model.T(2) - model.T(1);

    % wczytanie macierzy sil, sprezystosci, tlumienia i mas
    F = model.F;
    K = model.K;
    C = model.C;
    M = model.M;

    % inicjacja macierzy przemieszczen, predkosci i przyspieszen wezlow
    U = zeros(model.n,N+1);
    V = zeros(model.n,N+1);
    A = zeros(model.n,N+1);

    % stale calkowania
    a0 = 1/(dT^2);
    a1 = 1/(2*dT);
    a2 = 2*a0;

    % efektywna macierz mas
    fM = a0*M + a1*C;
```

```
    % odwrotna efektywna macierz mas
    invfM = pinv(fM);

    % obliczenie przemieszczen dla zerowej i pierwszej inkrementacji
    U(:,2) = U(:,1) + dT*V(:,1) + dT^2*A(:,1);
    fF = - (K - a2*M) * U(:,2) - (a0*M - a1*C) * U(:,1);
    U(:,3) = invfM * fF;
    V(:,3) = (U(:,3) - U(:,1)) * a1;
    A(:,3) = (U(:,1) - 2*U(:,2) + U(:,3)) * a0;

    % petla obliczeniowa
    for i = 3:N

        % efektywana macierz obciazenia
        fF = F(:,i-1) - (K - a2*M) * U(:,i) - (a0*M - a1*C) * U(:,i-1);

        % przemieszczenia wezlow + dt
        U(:,i+1) = invfM * fF;

        % predkosci wezlow + dt
        V(:,i+1) = (U(:,i+1) - U(:,i-1)) * a1;

        % przyspieszenia wezlow + dt
        A(:,i+1) = (U(:,i-1) - 2*U(:,i) + U(:,i+1)) * a0;

    end

    % zapis U,V i A do model
    model.U = U(:,2:end);
    model.V = V(:,2:end);
    model.A = A(:,2:end);

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% calkowanie rownania ruchu metoda Newmark (implicit)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function model = newmark(model)

    % liczba krokow obliczeniowych
    N = length(model.T);

    % czas kroku obliczeniowego
    dT = model.T(2) - model.T(1);

    % wczytanie macierzy sil, sprezystosci, tlumienia i mas
    F = model.F;
    K = model.K;
    C = model.C;
    M = model.M;

    % wczytanie parametrow metody Newmark
    alfa = model.alfa;
    beta = model.beta;

    % inicjacja macierzy przemieszczen, predkosci i przyspieszen wezlow
    U = zeros(model.n,N+1);
    V = zeros(model.n,N+1);
    A = zeros(model.n,N+1);

    % stale calkowania
    a0 = 1 / (alfa*dT^2);
    a1 = beta / (alfa*dT);
    a2 = 1 / (alfa*dT);
    a3 = 1 / (2*alfa) - 1;
    a4 = beta / alfa - 1;
    a5 = dT * (beta / (2*alfa) - 1);
    a6 = (1 - beta/alfa);
```

```
    % efektywna macierz sztywnsci
    fS = K + a0 * M + a1 * C;

    % odwrotnosc efektywnej macierzy sztywnsci
    invfS = inv(fS);

    % petla obliczeniowa
    for i = 1:N

        % efektywana macierz obciazenia
        fF = F(:,i) + ...
             M * (a0*U(:,i) + a2*V(:,i) + a3*A(:,i)) + ...
             C * (a1*U(:,i) + a4*V(:,i) + a5*A(:,i));

        % przemieszczenia wezlow
        U(:,i+1) = invfS * fF;

        % przyspieszenia wezlow
        A(:,i+1) = a0*(U(:,i+1) - U(:,i)) - a2*V(:,i) - a3*A(:,i);

        % predkosci wezlow
        V(:,i+1) = a1*(U(:,i+1) - U(:,i)) + a6*V(:,i) - a5*A(:,i);

    end

    % zapis wynikow (macierze U,V i A) do struktury model
    model.U = U(:,2:end);
    model.V = V(:,2:end);
    model.A = A(:,2:end);

end
```

Załącznik 4. Kod programu MATLAB model mechaniczny nawierzchni LET

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% model mechaniczny nawierzchni LET (Layered Elastic Theory)
%
% Autor: g@ral
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% dane wejsciowe:
%   model.LW - liczba warstw [-]
%   model.E - wektor modulow sprezystosci warstw [Pa]
%   model.v - wektor wspolczynnikow Poisson warstw [-]
%   model.h - wektor grubosci warstw [m]
%   model.F - wartosc sily [kN]
%   model.Qr - promien obciazenia [m]
%   model.R - wektor odleglosci punktow obliczeniowych od osi obciazenia [m]

% dane wyjsciowe:
%   model.U - wektor obliczonych wartosci ugiec nawierzchni
%             w okreslonych odleglosciach od osi obciazenia [m*10^-6]

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function model = model_LET_U(model)

    % wczytanie parametrow
    LW = model.LW;
    E = model.E;
    v = model.v;
    h = model.h;
    F = model.F;
    Qr = model.Qr;
    R = model.R;

    % liczba punktow obliczeniowych
    N = length(R);

    % obliczenie wartosci modulow Kirchoffa [Pa]
    G = E(1:LW)./(2*(1+v(1:LW))) * 10^6;

    % obliczenie wartosci obciazenia [Pa]
    Q = F*1000 / (3.1415926535*Qr^2);

    % stale macierzy wspolczynnikow ABCD - warunki brzegowe
    nAB = (LW-1)*4+2;
    B = zeros(nAB,1);
    b1 = -Qr*Q/G(1);

    % inicjacja wektora wynikowego
    model.U = zeros(1,length(LG));

    % parametry calkowania
    dAB = 100;
    eAB = 0.1;

    % petla po punktach obliczeniowych
    for i1 = 1:N

        % calkowanie numeryczne
        U = 0;
        r = R(i1);

        % petla po podprzedzialach calkowania
        for i2 = 1:100

            % podprzedzial calkowania
            a = dAB*(i2-1);
            b = dAB*(i2);
```

```
            % calkowanie przedzialu <a,b>
            u = quadgk(@calcU,a,b,'RelTol',eAB);

            % sumowanie
            U = U + u;

            % warunek przerwania petli
            if abs(u) < 10^-8
                break;
            end

        end

        % zapis wartosci wynikowych [m*10^-6]
        model.U(i1) = -round(U*10^7)/10;

    end

%%%
```

```
%%%
```

```
            cosH(i+1)+k*h(i+1)*sinH(i+1);...

            % warunek c6 (rownosc naprezen poziomych)
            0,-G(i),(-G(i)*2*v(i)),0,...
            G(i+1)*sinH(i+1),G(i+1)*cosH(i+1),...
            G(i+1)*(2*v(i+1)*cosH(i+1)+k*h(i+1)*sinH(i+1)),...
            G(i+1)*(2*v(i+1)*sinH(i+1)+k*h(i+1)*cosH(i+1))];

            % modyfikacja zmiennych roboczych
            x = x + 4;
            y = y + 4;

        end

        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        % warunki brzegowe dla dwoch najnizszych warstw:
            % warstwy o skonczonej grubosci i polprzestrzeni

            % warunek c7 (rownosc przemieszczen pionowych)
            A(y:y+3,x:x+5) = [0,1,...
            (-(2-4*v(LW-1))),0,...
            -1,(2-4*v(LW));...

            % warunek c8 (rownosc naprezen pionowych)
            G(LW-1),0,...
            0,-G(LW-1)*(1-2*v(LW-1)),...
            -G(LW),G(LW)*(1-2*v(LW));...

            % warunek c9 (rownosc przemieszczen poziomych)
            -1,0,0,-1,...
            1,1;...

            % warunek c10 (rownosc naprezen poziomych)
            0,-G(LW-1),-G(LW-1)*2*v(LW-1),0,...
            G(LW),G(LW)*2*v(LW)];

    end

    % rozwiazanie ukladu rownan
    abcd = A \ B;

    % sprawdzenie czy sa wartosci NaN
    if max(isnan(abcd)) == 1
        abcd = abcd * 0;
        T = 1;
    else
        T = 0;
    end

end
```

Załącznik 5. Kod programu MATLAB moduł obciążenia modelu nawierzchni

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% model nawierzchni - modul obciazenia
%
% Autor: g@ral
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% dane wejsciowe:
%     model.n - liczba wezlow modelu [-]
%     model.m1 - mas wezla nr 1 modelu [kg]
%     model.m2 - mas wezla nr 2 modelu [kg]
%     model.k1 - parametr sprezyny nr 1 [N/m]
%     model.k2 - parametr sprezyny nr 2 [N/m]
%     model.c1 - parametr tlumika nr 1 [N*s/m]
%     model.T - wektor czasu [s]
%     model.Z - wektor wysokosci wzglednych profilu nawierzchni [m]
%     model.solver - metoda calkowania rownania ruchu: CDM lub Newmark [-]

% dane wyjsciowe:
%     model.Q - wektor obliczonych wartosci obciazenia [N]

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function model = model_modul_load(model)

    % macierz sprezystosci, tlumienia i mas
    model.K = [model.k1, -model.k1; -model.k1, model.k1+model.k2];
    model.C = [model.c1, -model.c1; -model.c1, model.c1];
    model.M = [model.m1, 0; 0, model.m2];

    % calkowanie rownania ruchu metoda Central Difference Method (explicit)
    if strcmp('CDM',model.solver)
        model = cdm(model);
    % calkowanie rownania ruchu metoda Newmark
    elseif strcmp('Newmark',model.solver)
        model = newmark(model);
    end

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% calkowanie rownania ruchu metoda Central Difference Method (explicit)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function model = cdm(model)

    % liczba krokow obliczeniowych
    N = length(model.T);

    % czas kroku obliczeniowego
    dT = model.T(2) - model.T(1);

    % wczytanie profilu, macierzy sprezystosci, tlumienia i mas
    Z = model.Z;
    K = model.K;
    C = model.C;
    M = model.M;

    % inicjacja macierzy przemieszczen, predkosci i przyspieszen wezlow
    U = zeros(model.n,N+1);
    V = zeros(model.n,N+1);
    A = zeros(model.n,N+1);

    % stale calkowania
    a0 = 1/(dT^2);
    a1 = 1/(2*dT);
    a2 = 2*a0;
```

```
    % efektywna macierz mas
    fM = a0*M + a1*C;

    % odwrotna efektywna macierz mas
    invfM = pinv(fM);

    % obliczenie przemieszczen dla zerowej i pierwszej inkrementacji
    U(:,2) = U(:,1) + dT*V(:,1) + dT^2*A(:,1);
    fF = - (K - a2*M) * U(:,2) - (a0*M - a1*C) * U(:,1);
    U(:,3) = invfM * fF;
    V(:,3) = (U(:,3) - U(:,1)) * a1;
    A(:,3) = (U(:,1) - 2*U(:,2) + U(:,3)) * a0;

    % petla obliczeniowa
    for i = 3:N

        % efektywana macierz obciazenia
        fF = [0;Z(i-1)*model.k2] - (K - a2*M) * U(:,i) - (a0*M - a1*C) * U(:,i-1);

        % przemieszczenia wezlow + dt
        U(:,i+1) = invfM * fF;

        % predkosci wezlow + dt
        V(:,i+1) = (U(:,i+1) - U(:,i-1)) * a1;

        % przyspieszenia wezlow + dt
        A(:,i+1) = (U(:,i-1) - 2*U(:,i) + U(:,i+1)) * a0;

    end

    % obliczenie wartosci wektora obciazenia [N]
    model.Q = ( (model.m1 + model.m2) * 9.81 ) - ( (U(2,2:end) - Z) * model.k2 );

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% calkowanie rownania ruchu metoda Newmark (implicit)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function model = newmark(model)

    % liczba krokow obliczeniowych
    N = length(model.T);

    % czas kroku obliczeniowego
    dT = model.T(2) - model.T(1);

    % wczytanie profilu, macierzy sprezystosci, tlumienia i mas
    Z = model.Z;
    K = model.K;
    C = model.C;
    M = model.M;

    % wartosci parametrow metody Newmark
    alfa = 1/6;
    beta = 1/2;

    % inicjacja macierzy przemieszczen, predkosci i przyspieszen wezlow
    U = zeros(model.n,N+1);
    V = zeros(model.n,N+1);
    A = zeros(model.n,N+1);

    % stale calkowania
    a0 = 1 / (alfa*dT^2);
    a1 = beta / (alfa*dT);
    a2 = 1 / (alfa*dT);
    a3 = 1 / (2*alfa) - 1;
    a4 = beta / alfa - 1;
    a5 = dT * (beta / (2*alfa) - 1);
```

```
    a6 = (1 - beta/alfa);

    % efektywna macierz sztywnsci
    fS = K + a0 * M + a1 * C;

    % odwrotnosc efektywnej macierzy sztywnsci
    invfS = inv(fS);

    % petla obliczeniowa
    for i = 1:N

        % efektywana macierz obciazenia
        fF = [0;Z(i)*model.k2] + ...
             M * (a0*U(:,i) + a2*V(:,i) + a3*A(:,i)) + ...
             C * (a1*U(:,i) + a4*V(:,i) + a5*A(:,i));

        % przemieszczenia wezlow
        U(:,i+1) = invfS * fF;

        % przyspieszenia wezlow
        A(:,i+1) = a0*(U(:,i+1) - U(:,i)) - a2*V(:,i) - a3*A(:,i);

        % predkosci wezlow
        V(:,i+1) = a1*(U(:,i+1) - U(:,i)) + a6*V(:,i) - a5*A(:,i);

    end

    % obliczenie wartosci wektora obciazenia [N]
    model.Q = ( (model.m1 + model.m2) * 9.81 ) - ( (U(2,2:end) - Z) * model.k2 );

end
```