



ANDRZEJ POŻARYCKI¹⁾
 PRZEMYSŁAW GÓRNAŚ²⁾
 ROMUALD SZTUKIEWICZ³⁾

APPLICATION OF MECHANICAL AND ELECTROMAGNETIC WAVES IN AN INTEGRATED DETERMINATION OF PAVEMENT BEARING CAPACITY

ZASTOSOWANIE FAL MECHANICZNYCH I ELEKTROMAGNETYCZNYCH W ZINTEGROWANYM SYSTEMIE OZNACZANIA NOŚNOŚCI NAWIERZCHNI

STRESZCZENIE. Wykorzystanie systemów eksperckich do wyznaczania trwałości zmęczeniowej nawierzchni (takich jak np. obliczenia odwrotne) jest ograniczone silnie empirycznymi założeniami. Istotnym hamulcem rozwoju w tym obszarze badawczym jest konflikt między stopniem złożoności modelu nawierzchni, a rzeczywistymi ograniczeniami metod, które wykorzystuje się do identyfikacji jego parametrów. W artykule opisano oryginalną koncepcję budowy urządzenia, w którym łączy się zalety różnych metod badania właściwości nawierzchni potrzebnych do oceny jej trwałości zmęczeniowej. Ogólnie przedstawiono sposób analizy wyników badań generowanych w ramach zintegrowanego systemu, w którym wykorzystuje się teorię rozchodzenia się w ośrodku warstwowym zarówno fal mechanicznych, jak i fal elektromagnetycznych. Zaproponowane hybrydowe rozwiązanie jest punktem wyjścia do opracowania systemu eksperckiego opartego na semi-inwazyjnych i bez-inwazyjnych sposobach pozyskiwania wartości parametrów warstw nawierzchni. Oczekuje się mniejszej niepewności wyników uzyskiwanych przy wykorzystaniu procedury obliczeń odwrotnych nawierzchni w porównaniu do standardowego podejścia. W konsekwencji zwiększona zostanie precyzja planowania technologii wzmocnień nawierzchni.

SŁOWA KLUCZOWE: nośność nawierzchni, prześwietlenia georadarowe GPR, trwałość zmęczeniowa nawierzchni, ugięciomierz dynamiczny FWD, ugięciomierz sejsmiczny SPA.

ABSTRACT. The use of expert systems to determine pavement fatigue life (such as backcalculation) is strongly constrained by empirical assumptions. An important obstacle for the development of this research area is a conflict between the complexity of pavement model and actual limitations of methods used to identify its parameters. This article describes the original concept of device, which combines advantages of different methods of testing the pavement needed to calculate its fatigue life. Combined methods are based on the theory of propagation of both mechanical waves and electromagnetic waves in the layered pavement medium. The proposed hybrid solution is the starting point for the development of an expert system based on semi-invasive and non-invasive methods of obtaining the calculation values for parameters of pavement layers. It is believed that backcalculation results based on such identification are characterized by lower uncertainty comparing to the standard approach. As a consequence, the precision of overlay design for pavements will be increased.

KEYWORDS: falling weight deflectometer (FWD), fatigue life of pavement, GPR scanning, seismic pavement analyzer (SPA), structural capacity of pavement.

¹⁾ Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Lądowej, ul. Piotrowo 5, 61-138 Poznań; andrzej.pozarycki@put.poznan.pl

²⁾ Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Lądowej, ul. Piotrowo 5, 61-138 Poznań; przemyslaw.gornas@put.poznan.pl ✉

³⁾ Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Lądowej, ul. Piotrowo 5, 61-138 Poznań; romuald.sztukiewicz@put.poznan.pl

1. WPROWADZENIE

Zaburzenie lub zespół zaburzeń rozchodzących się w ośrodku lub przestrzeni ze skończoną prędkością i niosące ze sobą energię, nazywane jest falą. Zjawisko fali znalazło zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i inżynierii [1-5], w tym również diagnostyce nawierzchni drogowych i lotniskowych [6, 7]. Podstawową zaletą metod diagnozujących, wykorzystujących różne rodzaje fal (np. mechaniczne, elektromagnetyczne) jest ich przyporządkowanie do tzw. grupy testów nieniszczących (NDT [8]), a więc grupy pomiarów bezinwazyjnych. Obecnie do najbardziej znanych metod stosowanych do diagnozowania nawierzchni, wykorzystujących zjawiska falowe zaliczane są pomiary ugięć dynamicznych nawierzchni (np. urządzeniami typu Falling Weight Deflectometer / Heavy Weight Deflectometer (FWD / HWD) [9], Traffic Speed Deflectometer (TSD) i Rolling Wheel Deflectometer (RWD) [10]), pomiary sejsmiczne nawierzchni (np. urządzeniem typu Seismic Pavement Analyzer (SPA) [11]) oraz prześwietlenia georadarowe (urządzenia typu Ground Penetrating Radar (GPR) [12, 13]). Wnioskowanie na podstawie zarejestrowanych efektów wywołanych zjawiskami falowymi (odbicie, załamanie, dyfrakcja, interferencja, dyspersja), w układach warstwowych jakimi są nawierzchnie, pozwala między innymi na oznaczenie: a) liczby, układu, rodzaju i grubości poszczególnych warstw nawierzchni [13, 14], b) sztywności warstw [15], c) innych parametrów [16] – ułatwiających diagnozę nawierzchni, czyli określenie bieżącego stanu technicznego nawierzchni. W wielu przypadkach interpretacja zjawisk falowych w układach warstwowych, reprezentowanych przez takie ośrodki jak nawierzchnie jezdni, nawet dla doświadczonego inżyniera jest sporym wyzwaniem, a towarzysząca tym interpretacjom niepewność sprawia, że praktyczne wykorzystanie metod bezinwazyjnych i/lub semi-inwazyjnych w odniesieniu do analizy nawierzchni np. pod kątem parametru nośności jest wciąż aktualnym obszarem badawczym [17].

2. CEL PRACY

Za cel pracy przyjęto przedstawienie oryginalnej koncepcji, w której zakłada się połączenie w jednym urządzeniu pomiarowym różnych metod badania cech nawierzchni potrzebnych do oceny jej trwałości zmęczeniowej. Podstawą tej koncepcji jest wykorzystanie, między innymi analizy falowej powiązanej z interpretacją zjawisk rozchodzenia się w układach warstwowych dwóch rodzajów fal: mechanicznych i elektromagnetycznych. W następstwie przeprowadzenia badań nawierzchni takim hybrydowym urządzeniem,

1. INTRODUCTION

A wave can be described as a disturbance or a series of disturbances transferring energy when travelling through a medium or space at a finite speed. Waves are used in many areas of science and engineering [1-5] including evaluation of road and airfield pavements [6, 7]. The main advantage of evaluation methods based on using different wave types (for example mechanical and electromagnetic) is that by enabling non-invasive measurements these methods fall in the non-destructive testing category (NDT - [8]). Propagation of waves is used in a number of widely used pavement evaluation methods based on measuring the dynamic deflections with, for example, Falling Weight Deflectometer / Heavy Weight Deflectometer (FWD / HWD) [9], Traffic Speed Deflectometer (TSD) and Rolling Wheel Deflectometer (RWD) [10], seismic surface wave measurements with, for example, Seismic Pavement Analyzer ((SPA) [11]) and GPR scanning [12, 13]). The recorded effects of wave interactions (reflection, refraction, diffraction, interference, dispersion) during their travel through layered structures (pavements being such) allow for determining for example a) the number, arrangement, type and thicknesses of the layers making up the pavement structure [13, 14], b) stiffness of pavement layers [15], c) other parameters [16] relevant to evaluation of the structural condition of pavement. In many cases interpretation of wave interaction effects in multi-layer systems can be a challenging task even for an experienced engineer and the intrinsic uncertainty of such interpretations make the use of non- and/or minimally invasive measurement techniques for pavement surveys, such as bearing capacity determination still a current issue of research [17].

2. AIM OF THE INVESTIGATION

The objective of this research project is an ingenious concept of a single instrument that would combine different pavement evaluation techniques used for determining the residual fatigue life of pavement. This concept includes the use of wave analysis with the associated interpretation of wave propagation in multi-layer systems of two types of waves: mechanical and electromagnetic. Surveys of pavements with such a hybrid system combining the advantages of completely non-invasive and semi-invasive measurement techniques (based on electromagnetic and mechanical waves respectively) for determining selected pavement condition indicators will benefit from a kind of synergy enabling more accurate evaluation of residual

w którym połączone zostaną zalety obserwacji złożonych technik bezinwazyjnego (fale elektromagnetyczne) oraz semi-inwazyjnego (fale mechaniczne) rozpoznania wybranych cech stanu technicznego nawierzchni, uzyska się rodzaj synergii, której wynikiem będzie pozyskanie danych potrzebnych do bardziej precyzyjnej oceny trwałości zmęczeniowej nawierzchni, w porównaniu do metody opartej wyłącznie na ocenie wartości ugięć.

3. WYBRANE FALOWE METODY DIAGNOZY NAWIERZCHNI

3.1. RÓWNANIE FALOWE

Rozróżnienie rodzaju fal, na fale mechaniczne i elektromagnetyczne jest związane z naturą zachodzących zjawisk, które można opisać uniwersalnym równaniem falowym (1):

$$\nabla^2 \xi = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{d^2 \xi}{dt^2}, \quad (1)$$

gdzie:

ξ – wielkość podlegająca ruchowi falowemu, będąca funkcją położenia v oraz czasu t , $\xi = \xi(v, t)$.

W celu uzyskania rozwiązania równania (1), podobnie jak w przypadku wszystkich równań różniczkowych, należy zdefiniować odpowiednie warunki początkowe i/lub brzegowe, biorąc pod uwagę zarówno geometrię układu warstw nawierzchni, jak i rodzaj nawierzchni (podatna, sztywna, półsztywna). Zastosowanie metod falowych w diagnostyce nawierzchni wiąże się ze specyficznymi warunkami testów wynikających z charakteru badanego ośrodka. Powstająca fala kulista w nawierzchni ulega wielu „przeobrażeniom” i uzyskuje złożone kształty pod wpływem rozprzestrzeniania się w uwarstwionym medium, w którym występują zjawiska: odbicia, załamania, dyfrakcji, interferencji, dyspersji. Wszystkie te zjawiska są efektem powstania zniekształceń, które ocenia się bazując zarówno na kształcie fal wysłanych do materii ośrodka oraz tych, które w wyniku odbicia zostały zarejestrowane na powierzchni ośrodka. Całą grupę tych zjawisk w pracy określono mianem falowych metod diagnozowania nawierzchni, a za podstawowe źródło generowania fal w nawierzchni przyjęto techniki stosowane w różnych metodach badawczych: metody udarowe (FWD/HWD), metody sejsmiczne (SPA) i prześwietlenia georadarowe (GPR).

3.2. METODY UDAROWE

Podstawą metod dynamicznych, wykorzystujących do testów najczęściej ugięciomierze dynamiczne typu FWD,

fatigue life as compared to the methods based solely on evaluation of deflections.

3. SELECTED WAVE PROPAGATION METHODS USED FOR EVALUATION OF PAVEMENTS

3.1 WAVE EQUATION

Differentiating between mechanical and electromagnetic waves is related to the nature of these phenomena which can be described with the following classical wave equation (1):

$$\nabla^2 \xi = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{d^2 \xi}{dt^2}, \quad (1)$$

where:

ξ – quantity associated with a particle set in wave motion being the function of position v and time t ,
 $\xi = \xi(v, t)$.

Equation (1) is solved, the same as any other differential equation by defining appropriate initial-value and/or boundary conditions taking account of both the arrangement of pavement courses and the type of pavement structure (flexible, rigid, semi-rigid). The application of wave propagation methods for evaluation of pavements is determined by the specific testing conditions due to the characteristics of the tested medium. The spherical wave created in the pavement undergoes a number of transformations giving it complex shapes resulting from propagation in a multi-layer medium involving reflection, refraction, diffraction, interference and dispersion effects. All these phenomena are associated with disturbances evaluated on the basis of the shapes of the waves sent to the matter medium and the waves reflected and recorded on the surface of the medium. The whole group of these phenomena are comprised under the term “wave propagation methods for evaluation of pavements” in which waves are generated primarily with the methods used in impact tests (FWD/HWD), seismic tests (SPA) and GPR scanning methods.

3.2 IMPACT TESTS

The dynamic test methods, FWD test being the most popular of them, are based on dropping a specified weight onto the tested pavement from a specified height and measuring the resulting deflection. The load pulse is to simulate the effect of passage of a typical heavy goods vehicle travelling on the pavement by selecting the weight

jest pomiar ugięcia nawierzchni pod wpływem punktowego obciążenia wywołanego zrzutem określonej masy z ustalonej wysokości. Wartość samego impulsu siły ma odwzorowywać obciążenie wywołane przejazdem typowego pojazdu ciężarowego poprzez zrzut ciężaru o masie równej od 50 do 350 kg z wysokości od 50 do 390 mm [18]. Zakres możliwych wartości obciążeń waha się więc od 7 do 300 kN, przy czym górne wartości przedziału wykorzystywane są do pomiarów nawierzchni lotniskowych, dla których stosowany jest ciężki typ aparatu (zwany HWD). Dla typowych konstrukcji nawierzchni drogowych stosuje się obciążenie 50/57,5 kN, którego wartość odpowiada naciskowi osi rzeczywistego pojazdu i wynosi odpowiednio 100/115 kN. Ważny jest również kształt i czas trwania impulsu obciążenia. Obecnie urządzenia umożliwiają generowanie obciążeń w kształcie zbliżonym do funkcji pół-sinusoidalnej, wywołując w nawierzchni impuls o czasie trwania od 20 do 60 ms, co ma odwzorowywać obciążenie od pojazdu ciężarowego jadącego z prędkością od 35 do 40 km/h. Dotychczasowe prace potwierdzają relatywnie dobre odwzorowanie warunków badania w porównaniu z warunkami rzeczywistego obciążenia ruchem [19, 20]. Pomiary ugięć nawierzchni wykonywane są przy wykorzystaniu przetworników przemieszczeń w postaci zestawu geofonów, w ilości najczęściej od 7 do 9 sztuk, które są zamontowane na jednej belce, a rozstaw między nimi jest równy 30 cm. Typowa odległość lokalizacji geofonów w odniesieniu do osi przyłożenia obciążenia wynosi: 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 cm [9, 18]. Przykładowe wyniki pomiarów ugięciemierzem dynamicznym typu FWD nawierzchni podatnej odcinka testowego przedstawiono na Rys. 1.

Powszechnie do analizy wyników pomiaru ugięć nawierzchni stosuje się tzw. procedurę obliczeń odwrotnych [21-23], a więc procedurę numeryczną, stosowaną do oznaczania parametrów warstw nawierzchni przy wykorzystaniu aproksymacji znanych wartości przemieszczeń pionowych analizowanego ośrodka, wartościami obliczonymi dla modelu. Wyniki obliczeń odwrotnych obarczone są szeregiem uproszczeń stosowanych w modelach obliczeniowych nawierzchni (np. modele statyczne LET (ang. *Layers Elastic Theory model*) [24]) albo są efektem stosowania modeli wiernie odwzorowujących rzeczywiste warunki panujące w nawierzchni (np. modele termo-dynamiczne [21]). W procedurze, kluczowym zabiegiem jest przygotowanie danych wejściowych w postaci tzw. linii przemieszczeń, które w standardowej formie budowane są przy zastosowaniu maksymalnych wartości przemieszczeń (oznaczonych czerwonymi kropkami na Rys. 1), wywołanych maksymalną wartością funkcji obciążenia.

from the range of 50-350 kg and the dropping height from the range of 50-390 mm [18]. Hence the range of loads varies between 7 kN and 300 kN with the values closer to the upper limit used for testing airfield pavements with a heavy type of apparatus called Heavy Weight Deflectometer or HWD in short. The load used for typical road pavements is 50/57.5 kN corresponding to the load imposed by a vehicle with 100/115 kN axle load. Also relevant is the shape and duration of the load pulse. The currently used equipment creates waves close to half-sine in shape with 20-60 ms load pulse duration to simulate the effect of a heavy goods vehicle traveling at a speed of 35-40 km/h. The research projects carried out so far have confirmed that the tests provide a relatively accurate representation of the real traffic loading conditions [19, 20]. The pavement deflections are measured with deflection sensors (geophones), seven to nine in most cases, mounted on one beam at 30 cm intervals. The deflection sensors are typically spaced away from the loading axis by 0, 30, 60, 90, 120, 150 and 180 cm respectively [9, 18]. Example FWD results from testing a flexible pavement trial section are presented in Fig. 1.

Backcalculation procedure is used most often to analyse the measured pavement deflections [21-23] whereby the parameters of the pavement courses are determined numerically through approximation of known vertical deflections of the analysed medium by using the values calculated for the pavement model. Unless models truly representing the actual conditions occurring in pavements are used (such as thermo-dynamical models [21]) the accuracy of backcalculated values is affected by a number of simplifications used in different pavement design models (such as Layered Elastic Theory model) [24]. The key step of the procedure is preparation of input data in the form of the so-called deflection line, generally based on the maximum deflections (marked with red dots in Fig. 1) caused by the maximum value of the loading function.

When combining the FWD results with the values obtained with static models in a single backcalculation procedure it is important to generate the deflection basin with methods eliminating the dynamic effects of loading (for example the method based on the signal theory described in [25]). The recorded load and displacement functions are treated as waves referred to a standard frequency to enable converting the values affected by dynamic effects of loading to values corresponding to 0 Hz frequency. This yields a pseudo-static deflection basin that can be used for backcalculation with the use of static loading models. The method to obtain such quasi-static deflection basin for

W przypadku, gdy użytkownik łączy w obliczeniach odwrotnych wyniki badań nawierzchni ugięciomierzem dynamicznym z modelami o charakterze statycznym, musi pamiętać o budowie linii przemieszczeń przy wykorzystaniu metod eliminujących wpływ obciążenia dynamicznego nawierzchni (np. metodę, w której wykorzystuje się teorię sygnałów opisaną w pracy [25]). Zarejestrowane funkcje obciążenia i przemieszczeń traktuje się jako fale, które poddaje się normalizacji częstotliwościowej umożliwiającej przeliczenie wartości obciążonych wpływem dynamicznego obciążenia do wartości odpowiadających częstotliwości równej 0 Hz. Tym samym, uzyskuje się pseudo-statyczną linię przemieszczeń, którą można wykorzystać do obliczeń odwrotnych z modelami o obciążeniu statycznym. Propozycję pozyskania takiej quasi-statycznej linii przemieszczeń dla 2 i 3-warstwowych modeli nawierzchni opisano również w pracy [26]. Autorzy dokonali transformacji przestrzeni wyników badań nawierzchni, uzyskanych w testach dynamicznych, do potencjalnej przestrzeni wyników, jakie można byłoby otrzymać w warunkach obciążenia statycznego. Wskazano na relatywnie małe błędy identyfikacji wartości modułów sprężystości uzyskanych z badań nawierzchni metodami FWD i belką Benkelmana.

two and three-layer pavement models is proposed also in [26]. The authors performed a transformation of the dynamic testing data space to a data space that could have been obtained in static loading test. Attention was drawn to relatively small errors in identification of elastic moduli obtained in FWD and Benkelman beam tests.

The limitation of using a static model of pavement in backcalculating the pavement parameters is that it does not allow for simultaneous and definite determination of the elastic moduli and thicknesses of the pavement courses [27]. The workaround to this limitation is the backcalculation procedure, used primarily to estimate the stiffness of the pavement courses whose thicknesses are determined independently of the FWD test results (for example by coring and/or with GPR scanning technique). A number of innovative methods have been proposed to determine the thicknesses of pavement courses on the basis of FWD results without backcalculating [14, 28, 29]. However, with errors in the order of 20% [14] the application of such methods is limited to preliminary examination of the pavement structure. Note that 10% error in determined thickness would produce error of backcalculated modulus of up to 50% [30, 31].

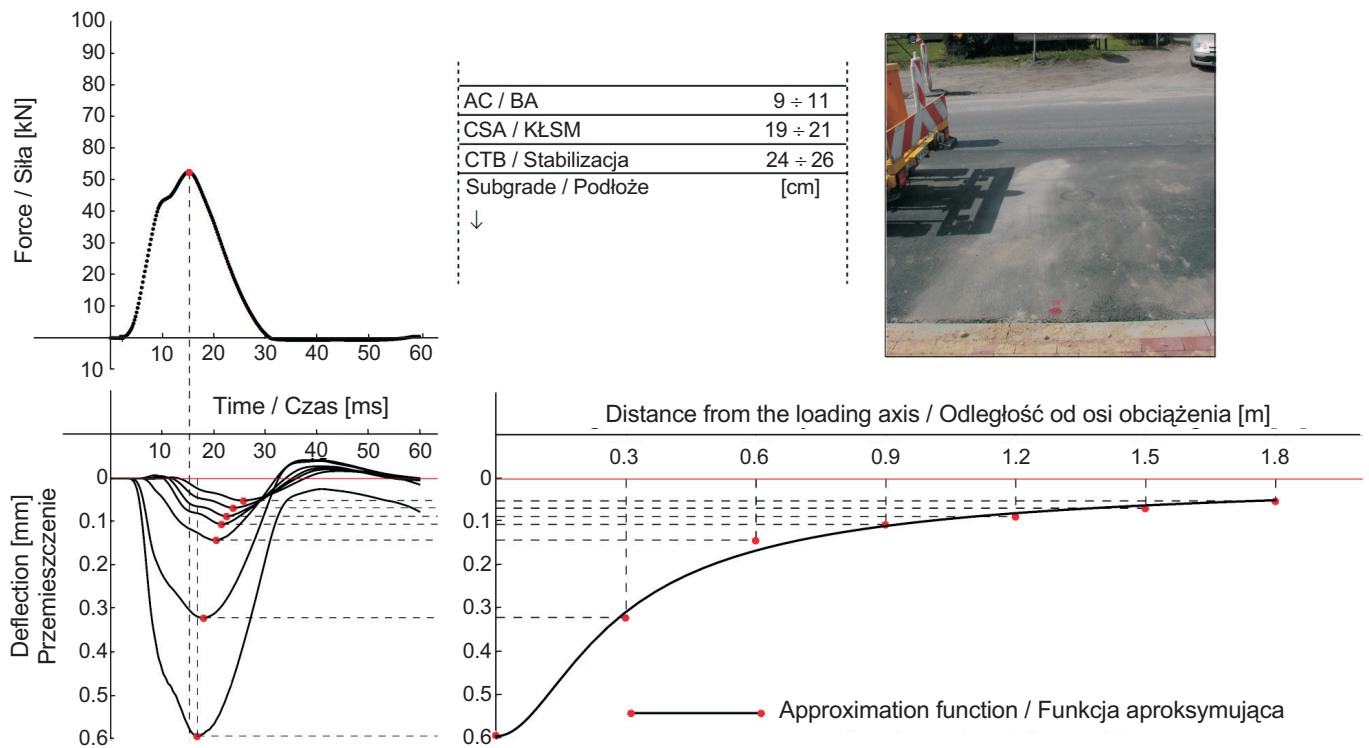


Fig. 1. Deflection results which can be obtained in one measurement place on the basis of testing a flexible pavement with a standard FWD apparatus

Rys. 1. Zestawienie wyników badań ugięć możliwych do uzyskania w jednym miejscu pomiarowym na przykładzie nawierzchni podatnej poddanej testom typowym urządzeniem FWD

Wykorzystanie statycznego modelu nawierzchni w obliczeniach odwrotnych przy oznaczaniu parametrów warstw nawierzchni jezdni posiada ograniczenie, które sprowadza się do tego, że nie można jednocześnie ustalić w sposób jednoznaczny wartości modułów sprężystości i grubości poszczególnych warstw [27]. Konsekwencją tego ograniczenia jest stosowanie obliczeń odwrotnych, głównie do oszacowania sztywności warstw nawierzchni, gdzie grubości warstw są oznaczane w sposób niezależny (np. wiercenia i/lub prześwietlenia georadarem) od wyników badań ugięciomierzem dynamicznym typu FWD. W wielu pracach [14, 28, 29] można znaleźć próby zastosowania innowacyjnych i alternatywnych metod względem procedury obliczeń odwrotnych dla określenia grubości warstw nawierzchni jezdni na podstawie pomiarów urządzeniami typu FWD. Uzyskane błędy oznaczenia grubości warstw na poziomie 20% [14] ograniczają zastosowanie metod tylko do wstępnego rozpoznania właściwości konstrukcji nawierzchni. Wynika to z faktu, że oznaczając grubość warstwy nawierzchni z błędem równym 10%, błąd oznaczenia sztywności tej warstwy metodą obliczeń odwrotnych osiąga wartość równą nawet 50% [30, 31].

3.3. METODY SEJSMICZNE

Metody sejsmiczne, bazują na ocenie efektów działania fali mechanicznej wywołanej dynamicznym obciążeniem przyłożonym na powierzchni nawierzchni. Istotną różnicą w porównaniu z metodami udarowymi jest zakres analizowanych zjawisk występujących w układzie warstwowym, w którym propaguje fala mechaniczna. W metodzie udarowej wyniki pomiarów traktowane są jako sygnały będące tylko pewną sumą funkcji harmonicznich (spektrum wartości obciążenia i ugięć nawierzchni dla różnych częstotliwości [25]). Natomiast w metodach sejsmicznych istotną rolę odgrywa rozróżnienie na fale: podłużne i poprzeczne (wewnętrzne), Rayleigh'a i Love'a (powierzchniowe) oraz związane z propagacją fal mechanicznych w układzie warstwowym, wspomniane już wcześniej zjawiska falowe (odbicie, załamanie, dyfrakcja, interferencja, dyspersja) [32]. Ze względu na zależne od badanej nawierzchni (między innymi układ, rodzaj i grubości poszczególnych warstw) określone warunki, w których mogą wystąpić wymienione zjawiska falowe, w urządzeniach pomiarowych SPA (Seismic Pavement Analyzer) stosuje się inne parametry i systemy pomiarowe niż w FWD / HWD. Podstawową różnicą jest system obciążający, który najczęściej składa się z dwóch źródeł emisji fal mechanicznych, nisko i wysokoczęstotliwościowych, o czasie obciążenia odpowiednio równym około 2 ms i 0,2 ms [33]. Wygenerowanie tak krótkich czasów obciążeń nawierzchni, wiąże się z zastosowaniem

3.3. SEISMIC METHODS

Seismic methods are based on analysing the effects of a mechanical wave created by dynamic loading of the pavement surface. What makes them different from the impact methods is the range of analysed phenomena occurring in the multi-layer system through which the mechanical wave propagates. In the impact method the measurement results are treated as signals being only a certain sum of harmonic functions (spectrum of load and deflection values at different frequencies [25]). Conversely, an important part of seismic methods is differentiation between longitudinal and transverse body waves and Rayleigh and Love surface waves and considering the above-mentioned phenomena associated with propagation of mechanical waves through a layered medium (reflection, refraction, diffraction, interference, dispersion) [32]. Since these phenomena depend on various conditions specific to a given pavement (including the spatial arrangement, types and thicknesses of the pavement courses) the Seismic Pavement Analyzers (SPA) use different parameters and measurement systems than FWD / HWD apparatus. The main difference is a different loading system, which in SPA comprises two sources of mechanical waves of low and high frequency with pulse durations of ca. 2 ms and 0.2 ms respectively [33]. Such short durations require weight dropping height in the range of 1-3 m [34] or a pneumatic system can be used for driving the weight onto pavement [33]. The load pulse generated by one of the above-mentioned methods produces on the surface high frequency waves with the frequency reaching up to a few thousand Hz [35] which can be recorded with high-frequency displacement sensors (accelerometers capable of recording rapidly changing vibration of the pavement surface). The deployment of sensors is determined by the character of waves attenuation in the semi-space of pavement and is related to the frequency dependent length of waves [36]. Due to a relatively high frequency of waves (as compared to waves generated by FWD apparatus) the sensors are positioned close to the impact point, i.e. within 0 to 1.2 m distance [34] (as compared to 0-30 range used in geological testing applications [37]).

The results obtained with SPA apparatus are interpreted through spectral analysis with the application of Fourier transform. Using the two-dimensional transform for the recorded deflections over time, whose locations correspond to different distances from the impact centre the time domain is transformed to the frequency domain with the distances expressed by wave numbers (Rys. 2a). These transformations enable calculating the phase velocity for the

w potencjalnym urządzeniu, wysokości zrzutu masy przyjmowanej od 1 do 3 m [34] lub z użyciem układu pneumatycznego do wystrzeliwania masy obciążającej [33]. W efekcie wywołania jedną z powyższych metod impulsu obciążenia, na powierzchni nawierzchni powstają drgania o wysokich częstotliwościach, nawet kilka tysięcy herców [35], których rejestracja jest możliwa przy wykorzystaniu wysokoczęstotliwościowych przetworników przemieszczeń (akcelerometrów, które umożliwiają zapis szybkozmiennych drgań powierzchni nawierzchni). Lokalizacja przetworników jest zdeterminowana poprzez naturę tłumienia się fal mechanicznych w półprzestrzeni nawierzchni i jest związana z długością fal zależną od częstotliwości [36]. Ze względu na relatywnie duże częstotliwości fal (w porównaniu do częstotliwości fal wywoływanych w badaniach nawierzchni urządzeniami typu FWD), w badaniach nawierzchni przetworniki lokalizowane są w bliskiej odległości od źródła obciążenia, a mianowicie od 0 do 1,2 m [34] (dla porównania, w przypadku zastosowań geologicznych odległości te zawierają się w przedziale od 0 do 30 m [37]).

Podstawę interpretacji wyników pomiarów przy wykorzystaniu urządzeń typu SPA, stanowi analiza spektralna, dla której zastosowanie ma transformata Fouriera. Stosując dwuwymiarową transformatę w odniesieniu do zarejestrowanych wartości przemieszczeń w funkcji czasu, których lokalizacje odpowiadają różnym odległościom od osi obciążenia (Rys. 2a), dziedzina czasu ulega transformacji do dziedziny częstotliwości, a odległości wyraża się liczbami falowymi. W konsekwencji przekształceń możliwe jest obliczenie prędkości fazowej dla spektrum częstotliwości, którą przedstawia się graficznie w postaci mapy dyspersji fali powierzchniowej Rayleigh'a (Rys. 2b).

Właściwym zjawiskiem do interpretacji rezultatów pomiaru fali sejsmicznej jest ocena wystąpienia efektu dyspersji, a więc w tym przypadku zmiany prędkości fazowej składowej harmonicznej fali mechanicznej rozchodzącej się w ośrodku warstwowym. Zjawisko dyspersji wystąpi dla tej harmonicznej fali sejsmicznej, dla której głębokość penetracji związana z jej długością (częstotliwością), będzie równa głębokości posadowienia spodu danej warstwy w analizowanej nawierzchni (Rys. 3). Istotna dla rozpoznania różnych grubości warstw nawierzchni jest więc możliwość generowania fal mechanicznych o szerokim spektrum częstotliwości, które wymuszą wystąpienie i zarazem możliwość zarejestrowania efektu dyspersji. Wyniki takich pomiarów poddaje się analizie spektralnej, uzyskując mapę dyspersji (Rys. 2b), która jest unikatowa dla nawierzchni i pozwala (przynajmniej w teorii) rozpoznać układ, rodzaj oraz sztywności i grubości poszczególnych warstw. Dla tak sformułowanego

frequency spectrum graphically represented as dispersion image of Rayleigh-type surface wave (Fig. 2b).

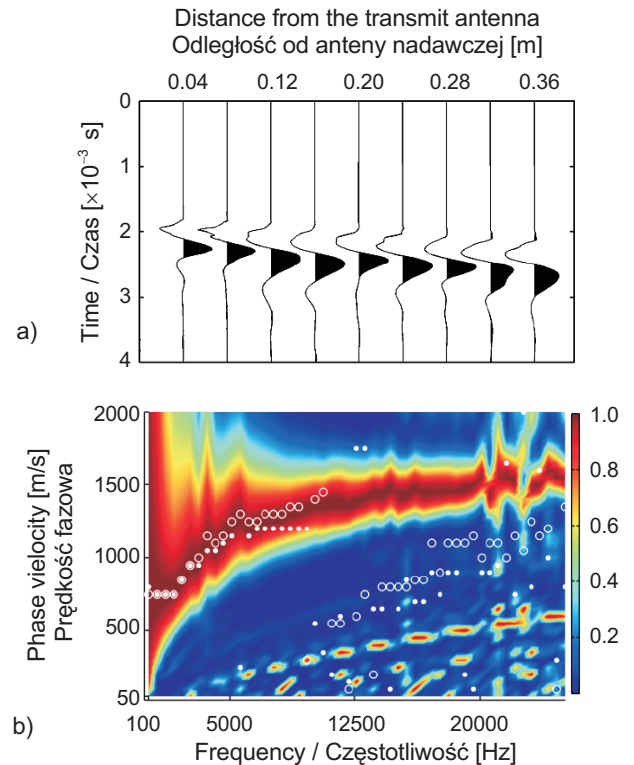


Fig. 2. Visual representation of: a) example results obtained with SPA apparatus, b) dispersion map of a Rayleigh-type surface wave [37]

Rys. 2. Graficzne przedstawienie: a) przykładowych wyników pomiarów urządzeniem typu SPA, b) mapy dyspersji fali powierzchniowej Rayleigh'a [37]

The results of seismic wave measurements can be appropriately interpreted by assessing the effect of dispersion and in this case by variation of the phase velocity of the harmonic component of the mechanical wave travelling through a multi-layered medium. Dispersion will occur for that seismic wave harmonic for which the depth of penetration related to the wave length (frequency) equals the depth of the lower surface of a given course of pavement (Fig. 3). Thus, being able to use a wide frequency spectrum of mechanical waves to induce and enable recording of the dispersion effect is very important for proper identification of various thicknesses of pavement courses. The results are subjected to spectral analysis the output of which is a dispersion image (Fig. 2b) unique for the pavement under analysis. This map enables (at least in theory) to identify the spatial arrangement, types, moduli and thicknesses of the pavement courses. Then a backcalculation procedure is carried out to define a model

zadania przeprowadza się procedurę obliczeń odwrotnych, w celu znalezienia modelu nawierzchni o takich wartościach parametrów, dla których postać mapy dyspersji będzie najbardziej zbliżona do mapy utworzonej na podstawie pomiarów. W obliczeniach odwrotnych, zbiór danych do analizy najczęściej ogranicza się do tzw. krzywej dyspersji, która jest linią łączącą maksymalne wartości przemieszczeń z badanego w analizie przedziału częstotliwości i prędkości fazowych (Rys. 4).

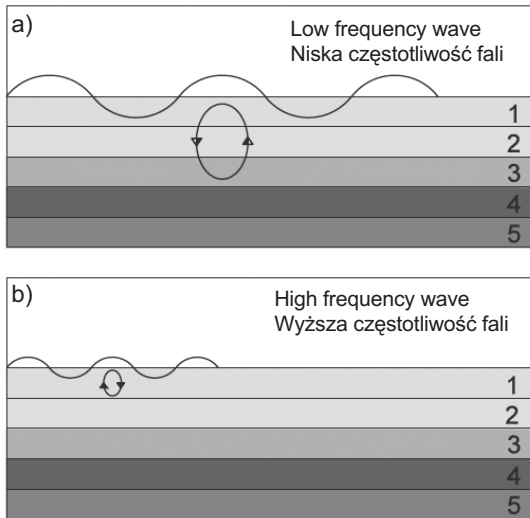


Fig. 3. Penetration depth of Rayleigh-type wave depending on the wave frequency: a) lower frequency, b) higher frequency [38]

Rys. 3. Głębokość penetracji fali Rayleigh'a w zależności od jej częstotliwości: a) mniejsza częstotliwość, b) większa częstotliwość [38]

Wykorzystując algorytm obliczeń odwrotnych i model nawierzchni ze sprężystym opisem materiałów warstw, na podstawie krzywej dyspersji uzyskanej z wyników pomiarów, możliwe jest oznaczenie zarówno modułów Younga, jak i grubości poszczególnych warstw. Należy zwrócić uwagę na fakt, że wartości oznaczone modułów odpowiadają warunkom obciążenia dla bardzo dużych częstotliwości fal (od kilkuset do kilku tysięcy herców), które nie występują pod wpływem obciążenia ruchem drogowym [11]. Zastosowanie urządzeń typu SPA w praktyce może się zatem głównie ograniczyć do bezinwazyjnego rozpoznania grubości warstw nawierzchni.

3.4. PRZEŚWIETLENIA URZĄDZENIAMI GPR

Istotą rozpoznania półprzestrzeni ograniczonej warstwą ścierną, przy wykorzystaniu urządzeń typu GPR, stanowi wysłana w głąb nawierzchni fala elektromagnetyczna (radiowa), która ulega częściowemu odbiciu na granicy dwóch

of pavement whose parameters yield the dispersion image that will be closest to the map obtained from measurements. In the backcalculation process the set of input data is generally limited to the so-called dispersion curve – a line plotted through the maximum deflections for the frequency and phase velocity ranges used in the analysis (Fig. 4).

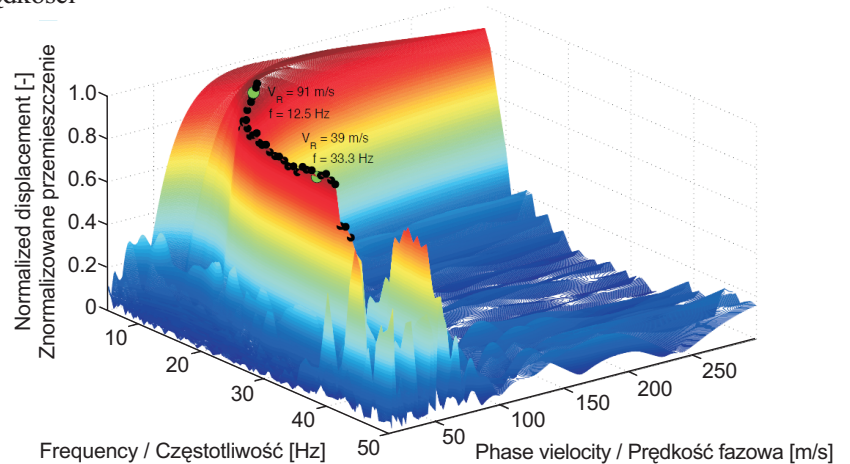


Fig. 4. Pattern of dispersion curve which is the line connecting the maximum displacement values (standardised) for the analysed frequency and phase velocity ranges marked with black markers [38]

Rys. 4. Schemat budowy krzywej dyspersji będącej linią łączącą maksymalne wartości przemieszczeń (wartości znormalizowane) dla analizowanego przedziału częstotliwości i prędkości fazowych, którą zaznaczono czarnymi znacznikami [38]

With the dispersion curve obtained from measured data it is now possible, by using the backcalculation procedure and model of pavement with elastically described materials of the respective pavement courses, to determine both their elastic moduli and thicknesses. Note that the moduli determined in this way correspond to loading conditions featuring very high wave frequencies (from a few hundred to a few thousand Hz) and such frequencies will not occur during normal traffic loading [11]. Hence, the application of SPA tests would be generally limited to non-invasive identification of the course thicknesses.

3.4 GPR SCANNING

Investigation of the half-space bounded by the wearing course with GPR apparatus is based on launching an electromagnetic (radio frequency) wave into the pavement which is then partly reflected at the interfaces between two different media (two layers made of different materials) with different electric permittivity (so-called dielectric constants). As a result of such reflection, the reflected

ośrodków (dwóch warstw wykonanych z różnych materiałów), charakteryzujących się różnymi wartościami przenikalności elektrycznej (tzw. stałymi dielektrycznymi). W następstwie, fragmenty odbitej fali wracają na powierzchnię nawierzchni i mogą być przechwycone przez antenę odbiorczą. Tym samym, znając czas od momentu wysłania sygnału do chwili jego odebrania, grubości poszczególnych warstw nawierzchni, można obliczyć wykorzystując wzór (2):

$$d_i = \frac{c \cdot t_i}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_{r,i}}}, \quad (2)$$

gdzie:

d_i – grubość i -tej warstwy nawierzchni,

c – prędkość światła w próżni, $c \approx 10^8$ m/s,

t_i – czas propagacji fali przez i -tą warstwę (w dwóch kierunkach, to znaczy: od górnej do dolnej granicy warstwy i z powrotem),

$\varepsilon_{r,i}$ – stała dielektryczna i -tej warstwy [13].

Najczęściej prześwietlenia urządzeniami typu GPR realizowane są metodą profilowania refleksyjnego, w trakcie którego wykorzystuje się dwie anteny (nadawczą i odbiorczą) lub jedną antenę nadawczo-odbiorczą. Dla tej procedury wykorzystanie wzoru (2) i obliczenie grubości poszczególnych warstw nawierzchni jest możliwe jedynie poprzez ustalenie wartości stałych dielektrycznych, do czego potrzebne są inwazyjne wiercenia w nawierzchni, a następnie czasochłonna procedura analizy wyników prześwietlenia. Przykładową interpretację wyników badania nawierzchni urządzeniem typu GPR, na podstawie tzw. echogramu przedstawiono na Rys. 5. Atrakcyjną alternatywą metody refleksyjnej jest metoda profilowania wielokanałowego. Poprzez zastosowanie do pomiarów nawierzchni jednej anteny nadawczej i kilku anten odbiorczych (oznaczonych odpowiednio Tx i Rx na Rys. 6a), możliwe jest określenie grubości poszczególnych warstw nawierzchni, tylko w oparciu o wyniki prześwietlenia urządzeniem GPR (Rys. 6b) [12, 39, 40, 41].

fragments of the wave return to the surface of pavement and are received by the receiving antenna. Thus, knowing the time that lapsed between the moments of sending and receiving the signal the thicknesses of the pavement courses can be calculated with equation (2):

$$d_i = \frac{c \cdot t_i}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_{r,i}}}, \quad (2)$$

where:

d_i – thickness of the i^{th} layer of pavement,

c – speed of light in vacuum, approx. $c = 10^8$ m/sec.,

t_i – time of wave propagation through the i^{th} layer (both ways i.e., from the upper to the lower surface and back),

$\varepsilon_{r,i}$ – dielectric constant of the i^{th} layer [13].

The GPR systems are most often used in reflection profiling mode using one (transceiver) or two antennas (transmitter and receiver). In this procedure the equation (2) can be used to calculate the thicknesses of the pavement courses only through determining the dielectric constants which, in turn, requires coring through the pavement structure followed by time-consuming analysis of the scanning results. An example interpretation of the GPR image obtained from GPR scanning of pavement is presented in Fig. 5. An attractive alternative to the above-described reflection mode is scanning with a multiple-channel GPR system. In such systems one transmitter antenna is coupled with several receiver antennas (in Fig. 6a designated Tx and Rx respectively) and the thicknesses of pavement courses can be determined on the basis of the GPR image without further processing (Fig. 6b) [12, 39, 40, 41].

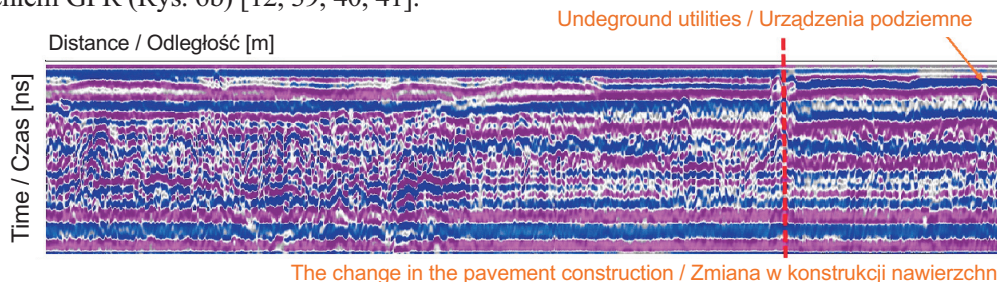


Fig. 5. Example GPR image obtained from GPR scanning of a typical flexible pavement
Rys. 5. Przykładowa postać echogramu uzyskanego z prześwietleń nawierzchni georadarem jednej z typowych nawierzchni podatnych

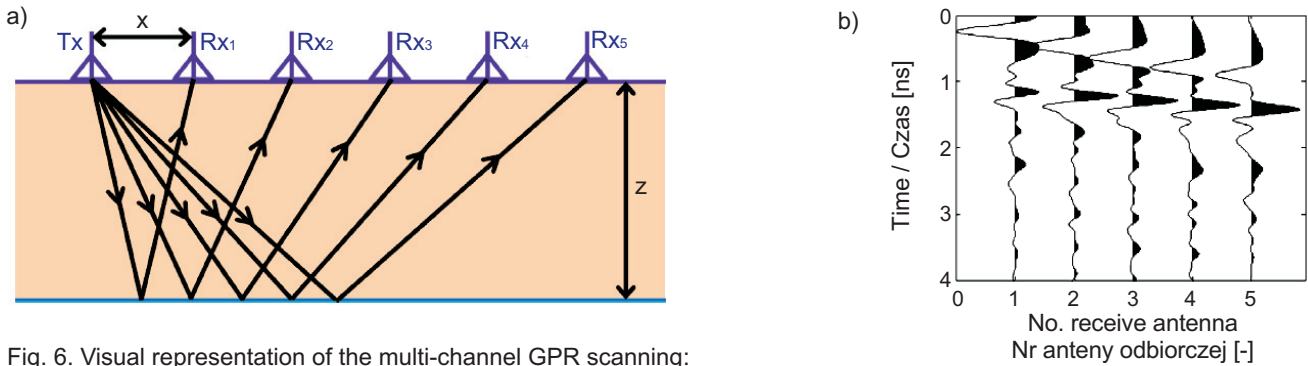


Fig. 6. Visual representation of the multi-channel GPR scanning: a) measurement set-up, b) signals recorded by the system of Tx and Rx antennas [41]
 Rys. 6. Ilustracja graficzna metody profilowania wielokanałowego: a) schemat idei pomiaru, b) sygnały zarejestrowane przez układ anten Tx i Rx [41]

Do wyznaczenia grubości warstw nawierzchni w oparciu o wyniki pomiarów profilowania wielokanałowego, wykorzystywane są różne metody obliczeniowe, między innymi oparte na zależnościach geometrycznych (Rys. 7a) [40] czy analizie spektralnej (Rys. 7b) [41]. Dla metody opartej na zależnościach geometrycznych bezpośrednio oblicza się wartości stałych dielektrycznych (np. $\epsilon_{r,1}$ na Rys. 7a), natomiast w przypadku wykorzystania analizy spektralnej (zastosowanie dwuwymiarowej transformaty Fouriera, patrz punkt 3.2) wartości stałych dielektrycznych wyznacza się poprzez obliczenia odwrotne, których wynikiem jest prędkość propagacji fali elektromagnetycznej w poszczególnych warstwach nawierzchni [41, 42].

The thicknesses can be determined in different ways, for example by assessing geometric relationships (Fig. 7a) [40] or through spectral analysis (Fig. 7b) [41]. In the method based on assessing the geometric relationships the dielectric constants (for example $\epsilon_{r,1}$ in Fig. 7a) are calculated directly while in the spectral analysis (using two-dimensional Fourier transform – see 3.2 above) their values are obtained in the backcalculation process giving the speeds of travel of electromagnetic wave across the respective courses of pavement [41, 42].

The accuracy of GPR images used for determining the thicknesses of pavement courses depends, to a large extent, on the selection of instruments including the types and parameters of antennas [43] as well as on the chosen method of calculation [40, 41]. Accuracy of thickness determination with the identification error below 10% can be achieved which is an acceptable level when set against the accuracy of backcalculated FWD data [43].

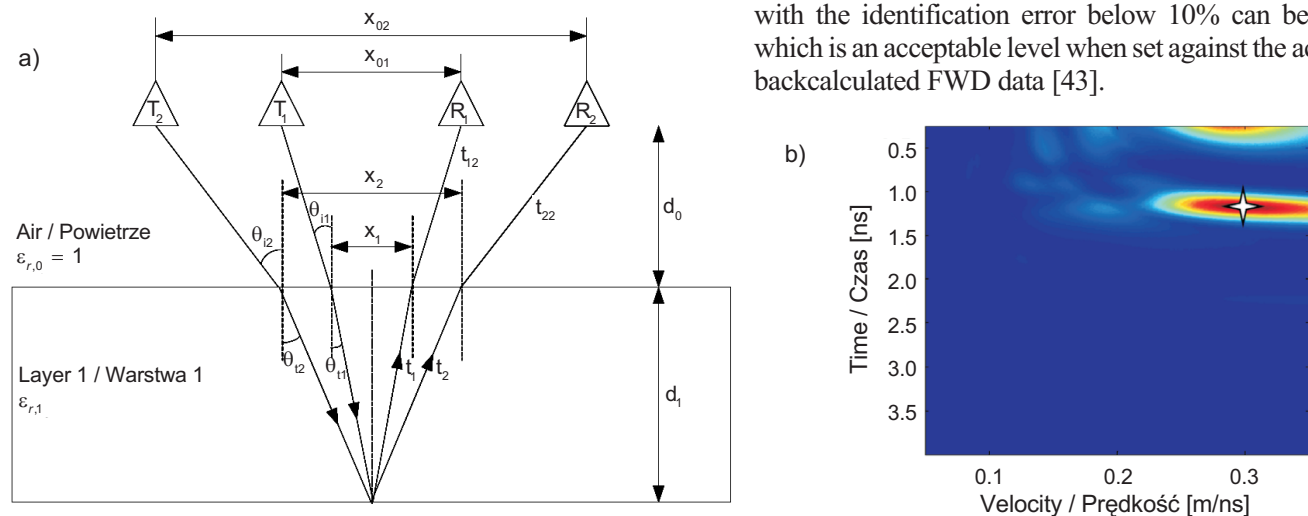


Fig. 7. Concepts of calculation methods based on multi-channel GPR scanning: a) geometric relationships for electromagnetic wave reflection [40], b) results of spectral analysis for determination of the speed of propagation of electromagnetic wave [41]
 Rys. 7. Koncepty metod obliczeniowych opartych na metodzie profilowania wielokanałowego: a) zależności geometryczne dla zjawiska odbicia fali elektromagnetycznej [40], b) wyniki analizy spektralnej dla prędkości propagacji fali elektromagnetycznej [41]

Uzyskiwane dokładności prześwietleń nawierzchni georadarem, wykonywanych na potrzeby rozpoznania grubości warstw nawierzchni, zależą w dużej mierze od elementów systemu pomiarowego, tzn. typu i parametrów anten [43] oraz wykorzystanej metody obliczeniowej [40, 41]. Oznaczenie grubości warstw jest możliwe przy uzyskaniu błędu identyfikacji mniejszego niż 10%, co z punktu widzenia procedury obliczeń odwrotnych opartych na wynikach pomiarów urządzeniem typu FWD jest do zaakceptowania [43].

4. TECHNOLOGIA ZiSPON

4.1. INTEGRACJA TRZECH SYSTEMÓW POMIAROWYCH - OBJAŚNIENIE SKRÓTU ZiSPON

Mając na celu rozpoznanie stanu granicznego nośności nawierzchni jezdni, w zestawie badań in situ (koniecznych z punktu widzenia tej wielkości), znajdują się między innymi: oznaczenie liczby, układu, rodzaju i grubości warstw nawierzchni wraz z wyznaczeniem ich sztywności. Zakłada się, że połączenie zalet trzech niezależnych rozwiązań (FWD / HWD, SPA i GPR) umożliwi rejestrację zjawisk związanych z propagacją w ośrodku warstwowym zarówno fal mechanicznych jak i elektromagnetycznych. W rezultacie poprzez wykorzystanie technik obliczeniowych opartych na sieciach neuronowych i analizie wyników badań nawierzchni platformą integrującą system FWD, metody MASW (oparte na wielokanałowej analizie fal powierzchniowych i technologii systemu SPA) oraz metody profilowania wielokanałowego, w których wykorzystano urządzenie typu GPR, możliwa jest budowa urządzenia do zintegrowanej oceny nośności nawierzchni (nazywanego dalej urządzeniem ZiSPON, jako akronim pełnej nazwy: Zintegrowany System Precyzyjnej Oceny Nawierzchni).

4.2. SCENARIUSZ ZINTEGROWANEJ OCENY NAWIERZCHNI JEZDNI

Laborant rozpoczyna badania nawierzchni in situ zatrzymując się na początku odcinka pomiarowego i uruchamia ZiSPON. System wskazuje na lokalizację geoprzestrzenną pomiaru i prosi o potwierdzenie. Z chwilą potwierdzenia tych informacji system uruchamia procedurę wielopoziomowych obciążeń FWD / HWD [16] w połączeniu ze SPA i systemem profilowania wielokanałowego, w kierunku poprzecznym do osi jezdni. Po zakończeniu procedury, system profilowania wielokanałowego przełącza się w tryb pomiaru „wzdłuż”, a oprogramowanie komputerowe rozpoczyna realizację procedury ustalenia liczby warstw nawierzchni

4. ZiSPON TECHNOLOGY

4.1. INTEGRATION OF THREE MEASUREMENT TECHNIQUES INTO ONE SYSTEM - ZiSPON

For ultimate limit state determination it is necessary to perform a number of field (in situ) tests to determine the number, spatial arrangement, types and thicknesses as well as moduli of the pavement courses. It is assumed that combining the advantages of the three independent techniques (FWD / HWD, SPA and GPR) will enable recording of the effects associated with propagation of both mechanical and electromagnetic waves through a multi-layer medium. By combining neural network computation techniques with an analytical platform integrating the FWD and MASW methods (based on multi-channel analysis of surface waves and SPA technology) and multi-channel GPR technique it has become possible to devise an integrated highly accurate pavement evaluation system further referred to by the acronym ZiSPON.

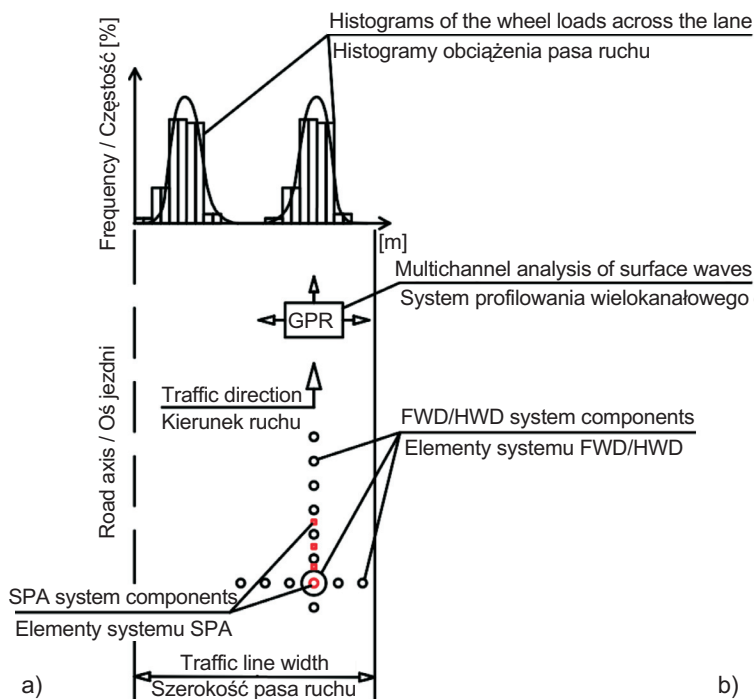
4.2. INTEGRATED PAVEMENT EVALUATION TESTING SCENARIO

The procedure starts with stopping at the beginning of the test section at which point ZiSPON system is turned on by the technician performing the test. The system gives the location data of the measurement asking for confirmation. As soon as such confirmation is given, the system starts the procedure based on multi-load level FWD / HWD deflections method [16] in combination with SPA and multi-channel GPR techniques in the direction transverse to the road centreline. On completion of this procedure the multi-channel GPR system switches to lengthwise measurement mode and the computer program starts determining the number of courses on the test section and asks the operator/technician to proceed to a new location to perform the next measurement. The procedure is iterated until completing measurements on the tested section of pavement and all the on-line/off-line implementation procedures are presented in Fig. 8.

Each time when the computer program notifies an increased probability of pavement structure variation (changes in the arrangement of courses, moduli, number of layers) the intelligent modules of ZiSPON command additional measurements with the SPA system. As a result the user is provided with two key parameters, i.e. the values of the elastic modulus and dielectric constants

odcinka testowego i prosi operatora/laboranta o zmianę miejsca i wykonanie kolejnego pomiaru. Procedura jest iterowana, aż do zakończenia pomiarów na danym odcinku nawierzchni, a nazwy procedur wykonawczych przewidzianych do realizacji on-line/off-line przedstawione są na Rys. 8.

Za każdym razem, gdy oprogramowanie komputerowe zgłosi zwiększone prawdopodobieństwo zmiany konstrukcji nawierzchni (zmiany układu warstw, sztywności, liczby warstw), inteligentne moduły ZiSPON zdecydują o wykonaniu dodatkowych pomiarów systemem SPA. W efekcie, użytkownik pozna wartości dwóch kluczowych wielkości, mianowicie: moduły sprężystości i stałe dielektryczne (wyrażające prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych), które będzie można wykorzystać do szacunkowych rozważań na temat rodzaju i stanu materiału warstwy testowanej nawierzchni (np. sucha, zawilgocona, spękana, niespękana, zagęszczona, rozgęszczona) [12, 44].



(defining the velocity of electromagnetic waves propagation) which can be used for preliminary assessment of the type and condition of the course material (for example: dry, damp, cracked, not cracked, consolidated, loosened) [12, 44].

- line of action along the road centre line / linie wpływu wzdłuż osi jezdni:
 - identification of the longitudinal stiffness of pavement / identyfikacja sztywności wzdłużnej nawierzchni,
- line of action perpendicular to the road centre line / linia wpływu w poprzek osi jezdni:
 - identification of the transverse stiffness of pavement / identyfikacja sztywności poprzecznej nawierzchni,
 - evaluation of variations in the transverse profile of pavement / ocena zmian w przekroju poprzecznym nawierzchni,
- on-line division of the pavement into uniform sections / podział nawierzchni na odcinki jednorodne on-line:
 - engineering science basis for formulating the criteria / naukowo-inżynierskie podstawy formułowania kryteriów,
 - using the author's Uniform Stiffness Method based approach in place of the Cumulative Sum and Cumulative Difference Approach methods / zastąpienie metod "Cumulative Sum" i "Cumulative Difference Approach" autorskim podejściem, w którym wykorzystano własną koncepcję nazywaną „Metodą Jednolitej Sztywności”,
 - identification of variation of the pavement structure along the road centreline / wykrywanie zmian konstrukcji nawierzchni wzdłuż osi jezdni,
- use of GPS for integrating GPR-FWD/HWD-SPA systems / lokalizacja GPS, integrująca systemy GPR-FWD/HWD-SPA,
 - database engines / silniki obliczeniowe baz danych,
 - interpretation of the mechanical parameters of pavements / interpretacja parametrów mechaniki nawierzchni,
 - gradual implementation of artificial intelligence in supervised learning mode / stopniowe wdrażanie sztucznej inteligencji w trybie „z nauczycielem”.

Fig. 8. Features of ZiSPON technology: a) chosen elements configured to a potential measurement site, b) descriptive part of programming tasks in on-line/off-line modes

Rys. 8. Cechy technologii ZiSPON: a) wybrane elementy w konfiguracji z potencjalnym miejscem pomiaru, b) część opisowa zadań oprogramowania w trybie on-line/off-line

5. WNIOSKI

W odniesieniu do aktualnie realizowanego zakresu wymaganych badań nawierzchni in situ, który jest integralną częścią obliczeń mechanistycznych, w wielu przypadkach można stwierdzić, że rozpoznanie nawierzchni jest niewystarczające i nie wykracza poza ramy tzw. poziomu utrzymania. Całość rozwiązania technicznego powiązanego z realizowaną i przedstawioną w artykule koncepcją budowy urządzenia ZISPON, metodą pomiarową oraz oprogramowaniem komputerowym będzie się składać na system ekspercki, który z założenia ma realizować ściśle określone procedury, wymagane podczas oceny stanu granicznego nośności nawierzchni na poziomie projektu. Zakłada się, że zintegrowany system badań, w którym łączy się zalety metod wykorzystujących zarówno fale mechaniczne, fale elektromagnetyczne jak i lokalizację geoprzestrzenną, w obszarze metod badawczych stosowanych w drogownictwie, będzie inspirował do rozwijania badań nawierzchni in situ na poziomie projektu.

INFORMACJE DODATKOWE

Praca została wykonana w ramach realizacji grantu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju o numerze PBS3/B6/38/2015 „Precyzyjny system identyfikacji parametrów nośności konstrukcji jezdni w prognozowaniu czasu życia nawierzchni drogowych”.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Miłowska K., Grabowska K., Gabryelak T.*: Zastosowanie promieniowania elektromagnetycznego w medycynie. *Postępy Higieny i Medycyny Doświadczalnej*, **68**, 2014, 473-482
- [2] *Venkateswarlu B., Tewari V.Ch.*; Geotechnical Applications of Ground Penetrating Radar (GPR). *Journal Indian Geological Congress*, **6**, 1, 2014, 35-46
- [3] *Hebsur A.V., Muniappan N., Rao E.P., Venkatachalam G.*: Application of ground penetrating radar for locating buried impediments to geotechnical exploration and piling. *International Journal of Geotechnical Engineering*, **7**, 4, 2013, 374-387
- [4] *Kołodziejczyk P.*: Propagacja fal radiowych w kopalniach podziemnych - przegląd literatury. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, **51**, 11, 2013, 10-17
- [5] *Katulski R.J.*: Propagacja fal radiowych w telekomunikacji bezprzewodowej. *Wydawnictwa Komunikacji i Łączności*, 2014
- [6] *Black K., Kopac P.*: The application of Ground-Penetrating Radar in highway engineering. *Public Roads*, **56**, 3, 1992, 96-103

5. CONCLUSIONS

In the current practice the field testing of pavement performed as an integral part of the mechanical design approach appears to be in many cases insufficient and does not exceed the scope of level of maintenance testing. All the technical features related to construction of the ZiSPON system as described in this paper, the measurement technique and the computer program will together comprise an expert system designed to implement very precisely defined procedures for determining the ultimate limit state of pavement at the project level. The proposed integrated system combining the advantages of mechanical and electromagnetic waves analysis with geolocation information and the techniques currently used in road engineering is expected to promote field testing of pavement at the project level.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was carried out as part of the project entitled “Precise identification system of load-bearing capacity parameters of the pavement structure in predicting the lifetime of road surfaces” under NCBR’s grant No. PBS3/B6/38/2015.

- [7] *Sztukiewicz R.*: Wykorzystanie badań ultradźwiękowych do diagnozy nawierzchni asfaltowej. 42 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Przegląd Spawalnictwa, Szczecin, 12, 2013, 162-166
- [8] *Sztukiewicz R.*: Przegląd metod nieniszczących stosowanych w drogownictwie. 38 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Poznań-Licheń, Zeszyty Problemowe, Badania nieniszczące, **15**, 14, Poznań, 2009, 29
- [9] *Požarycki A., Garbowski T., Osysko A., Górnaś P., Fengier J., Piątek P.*: Polski ugięciomierz dynamiczny z komputerowym systemem oceny stanu nawierzchni. *Drogownictwo*, **LXIX**, 12, 2014, 403-416
- [10] *Sudyka J., Mechowski T.*: Pilotażowe badania porównawcze ugięciomierzy TSD i FWD. *Drogownictwo*, **LXVII**, 6, 2012, 207-209
- [11] *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
- [12] *Karczewski J.*: Zarys metody georadarowej. AGH, Kraków, 2007
- [13] *AL-Qadi I.L., Lahouar S.*: Measuring layer thicknesses with GPR - Theory to practice. *Construction and Building Materials*, **19**, 10, 2005, 763-772

- [14] *Pożarycki A.*: Identyfikacja liczby i grubości warstw modelu nowej nawierzchni odcinka próbnego metodami sztucznej inteligencji. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **11**, 2, 2012, 123-149
- [15] *Pożarycki A., Górnaś P., Zalewski P.*: Wpływ spekań na zmianę modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych oznaczanych w warunkach in situ. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **14**, 4, 2015, 257-270
- [16] *Pożarycki A., Górnaś P.*: Zagadnienia liniowej normalizacji wartości ugięć nawierzchni jezdni poddanej obciążeniom ponadnormatywnym. *Drogownictwo*, **LXIX**, 11, 2014, 353-361
- [17] *Firlej S.*: Wyznaczanie parametrów modelu nawierzchni drogowej z dynamicznych badań FWD. Monografie, Politechnika Lubelska, Lublin, 2015
- [18] *Krawczyk B.*: Identyfikacja parametrów modeli nawierzchni drogowych na podstawie impulsowych testów dynamicznych. Politechnika Wroclawska, Wrocław, 2012
- [19] *Brown S.F., Brodrick B.V.*: 25 years' experience with the Pilot-Scale Nottingham Pavement Test Facility. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Nevada, 1999
- [20] *Timm D., West R., Priest A., Powell B., Selvaraj I., Zhang J., Brown R.*: Phase II NCAT Test Track Results. NCAT Report 06-05, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, 2006
- [21] *Graczyk M.*: Nośność konstrukcji nawierzchni wielowarstwowych w krajowych warunkach klimatycznych. *Studia i Materiały, Zeszyt 63*, IBDiM, Warszawa 2010
- [22] *Górnaś P., Pożarycki A.*: Wybrane cechy numerycznych modeli MES w analizie odwrotnej konstrukcji nawierzchni. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **13**, 3, 2014, 203-222
- [23] *Hilmi Lav A., Burak Goktepe A., Aysen Lav M.*: Backcalculation of flexible pavements using soft computing. *Intelligent and Soft Computing in Infrastructure Systems Engineering*, **259**, 2009, 67-106
- [24] *Firlej S.*: *Mechanika nawierzchni drogowej*. Petit, Lublin, 2007
- [25] *Guzina B.B., Osburn H.R.*: Effective tool for enhancing elastostatic pavement diagnosis, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1806**, 2002, 30-37
- [26] *Ruta P., Krawczyk B., Szydło A.*: Identification of pavement elastic moduli by means of impact test. *Engineering Structures*, **100**, 2015, 201-211
- [27] *Szydło A.*: Statyczna identyfikacja parametrów modeli nawierzchni lotniskowych. *Prace naukowe Instytutu Inżynierii Politechniki Wroclawskiej*, 45, Wrocław, 1995
- [28] *Meier R.W., Rix G.J.*: Backcalculation of flexible pavement moduli using artificial neural networks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1448**, 1994, 75-82
- [29] *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*, **119**, 2016, 288-295
- [30] *Górnaś P.*: *Analizy numeryczne zagadnień odwrotnych w drogownictwie*. Praca magisterska, Politechnika Poznańska, 2013
- [31] *Maina J.W., Yokota H., Matsui K.*: Effect of errors in layer thickness on backcalculated layer moduli. *Journal of JSCE (Japan Society of Civil Engineering)*, 3, 1998, 49-56
- [32] *Wrana B.*: *Dynamika gruntów. Modele obliczeniowe*. Politechnika Krakowska, Kraków, 2012
- [33] *Gucunski N., Maher A.*: *Evaluation of Seismic Pavement Analyzer for Pavement Condition Monitoring*. New Jersey Department of Transportation, Rutgers, The State University Piscataway, 2002
- [34] *Kumar J., Rakaraddi P.G.*: On the height of fall of dropping mass in SASW measurements for asphaltic road pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, **13**, 6, 2012, 485-493
- [35] *Seismic pavement analyzer device: Construction and testing of preprototype*, Strategic Highway Research Program, Washington, 1992
- [36] *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*, 2008
- [37] *Lin S.*: Advancements in active surface wave methods: modeling, testing and inversion. *Digital Repository Iowa State University, Graduate Theses and Dissertations, Paper 13761*, 2014
- [38] *Ólafsdóttir E.Á.*: *Multichannel Analysis of Surface Waves Methods for Dispersion Analysis of Surface Wave Data*, 2014 [http://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/Files/fjolematidnigreining/\\$file/Fj%C3%B6lnemat%C3%AD%C3%B0nigreining%20%C3%A1%20yfirbor%C3%B0sbylgjum%20enskur%20texti.pdf](http://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/Files/fjolematidnigreining/$file/Fj%C3%B6lnemat%C3%AD%C3%B0nigreining%20%C3%A1%20yfirbor%C3%B0sbylgjum%20enskur%20texti.pdf), 02.02.2017
- [39] *Annan A.P.*: *Ground Penetrating Radar Workshop Notes*. Sensors & Software Inc., Ontario, Canada, 2001
- [40] *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&E International*, **66**, 2014, 90-98
- [41] *Liu H., Sato M.*: In-situ measurement of pavement thickness and dielectric permittivity by GPR using an antenna array. *NDT & E International*, **64**, 2014, 65-71
- [42] *Yilmaz O.*: *Seismic data analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data*. Tulsa Society of Exploration Geophysicists, 2001
- [43] *Edwards L., Bell H.P.*: Comparative evaluation of nondestructive devices for measuring pavement thickness in the field. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **9**, 2, 2016, 102-111
- [44] *Saarenketo T.*: Using Ground-Penetrating Radar and Dielectric Probe Measurements in Pavement Density Quality Control. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1575**, 1, 1997, 34-41