

# Polska wersja ugięciomierza dynamicznego z komputerowym systemem oceny stanu technicznego nawierzchni



**ANDRZEJ POŻARYCKI**

Politechnika Poznańska  
andrzej.pozarycki@put.poznan.pl



**TOMASZ GARBOWSKI**

Politechnika Poznańska  
tomasz.garbowski@put.poznan.pl



**ANDRZEJ OSYSKO**

Pneumotechnika  
a.osysko@pneumotechnika.pl



**PRZEMYSŁAW GÓRNAŚ**

Politechnika Poznańska  
przemyslaw.gornas@put.poznan.pl



**JAKUB FENGIER**

Politechnika Poznańska  
jakub.fengier@put.poznan.pl



**PAWEŁ PIĄTEK**

Pneumotechnika  
pawel.piatek@pneumotechnika.pl

Rozwiązania teoretyczne i zaplecze sprzętowe, związane z pomiarami i analizą ugięć nawierzchni jezdni urządzeniami typu *FWD* (ang. *Falling Weight Deflectometers*)/*HWD* (ang. *Heavy Weight Deflectometers*) to wciąż elementy, które podlegają fazom rozwoju. Interpretacja wyników, które uzyskuje się przy wykorzystaniu tych technik, może być niepewna, a dalsze wykorzystanie np. rezultatów identyfikacji wstecz parametrów nawierzchni jezdni w prognozowaniu jej życia często powoduje wątpliwe sytuacje. Autor pracy [22] pisze „na chwilę obecną (2004 rok) wyzwaniem stanowi opracowanie lepszych narzędzi analitycznych do analiz wyników badań ugięć nawierzchni...”. Pomimo upływu już 10 lat od tej publikacji, prace [3, 7, 8, 14, 16, 18, 19, 24, 39, 42], utwierdzają w przekonaniu, że temat jest wciąż aktualny. Historia wyznaczania parametrów nośności nawierzchni (rozumianej tu jako zdolność do przeniesienia obciążeń od ruchu drogowego na podłoże) w początkowym okresie rozwoju technik pomiarowych związana była z wyrażaniem nośności poprzez wskaźnik stanu spękań nawierzchni, wyznaczany w oparciu o wizualną inwentaryzację. Pomysł, był głównie próbą zastąpienia długotrwałych, czasochłonnych pomiarów metodą Belki Benkelmana (*BB*). Zapoczątkowana era mobilnych ugięciomierzy dynamicznych (*FWD*) znacząco zmienia jakość oceny parametrów nośności nawierzchni różnych typów. Ten splot wydarzeń sprawił, że definicja pojęcia nośności nabrała bardziej wszechstronnego znaczenia. Poprzez nośność nawierzchni jezdni drogowej można bowiem dzięki tym pomiarom określać również ilość osi standardowych, które mogą obciążyć nawierzchnię jezdni do momentu utraty

drugiego ze stanów granicznych wyrażanych trwałością zmęczenia [37]. Konieczność jednak korzystania z zaawansowanych technik obliczeniowych, które łączą wiedzę z zakresu mechaniki komputerowej i eksperymentalnej, informatyki oraz geotechniki powoduje, że metoda oceny elementów nośności konstrukcji nawierzchni jezdni, oparta na pomiarach ugięć, nie jest w pełni wykorzystywana. Wiadomo także, że istotny i nierozwiązany dotychczas w praktycznej skali problem rozpoznania grubości warstw, również generuje w aspekcie oceny pozostałego życia nawierzchni znaczne błędy. Studiując takie prace jak np. [8] dochodzi się do wniosku, że nawet nieznaczny błąd określenia grubości warstw nawierzchni (szczególnie łącznej grubości warstw asfaltowych), skutkuje identyfikacją wstecz, z której wartości modułów sprężystości różnią się między sobą w ramach odcinka jednorodnego o 50% i więcej. Z doświadczeń na odcinku testowym opisanym w publikacji [31] wiadomo, że różnice łącznej grubości warstw asfaltowych nawierzchni jezdni, rzędu kilku centymetrów, nie są wyjątkiem, a powszechnie stosowane zasady odwiercania próbek z nawierzchni gwarantują co najwyżej informację dyskretną (powszechną praktyką jest rozpoznanie konstrukcji nawierzchni co 500 m). Autorzy artykułu zainspirowani kontekstem tylko tych wybranych znaków zapytania, wzięli udział w procesie konstruowania i budowie dostępnej już na dzień dzisiejszy polskiej wersji ugięciomierza dynamicznego. Kierując się potrzebą zrozumienia szczegółów każdego ze wspomnianych tu elementów, opracowano spójny system o charakterze pomiarowo-eksperymentalnym, który poprzez ingerencję zarówno w te typowe, jak i nietypowe metody w porównaniu do dotychczas stosowanych rozwiązań, może być krokiem w kierunku rozwoju narzędzi optymalizacji wnioskowania o parametrach konstrukcji nawierzchni jezdni. W miarę możliwości, całość tego opisu starano się uzupełniać o pozycje literatury, które dowodzą, że dostępne na świecie metody w tym obszarze badawczo-przemysłowym mają ograniczenia, które warto rozwiązać w oparciu o własne i rodzime doświadczenia.

Celem artykułu jest próba przedstawienia wybranych zagadnień z zakresu realizacji i analizy pomiarów ugięć nawierzchni jezdni drogowych. Poprzez ukazanie aspektów zbudowanego ugięciomierza dynamicznego typu *FWD* i elementów jego oprogramowania, umożliwiającego interpretację wyników badań tym urządzeniem.

## Konstrukcja polskiego ugięciomierza dynamicznego

Urządzenie pomiarowe zbudowano w oparciu o szkielet typowej konstrukcji przyczepy dwuosiowej. Ramę urządze-



Fot. 1. Widok polskiej przyczepy FWD zbudowanej w ramach konsorcjum (model ASTEC-120-2013-9G)

nia przystosowano do przenoszenia ciężarów mniejszych od 500 kg, a w świetle definicji zawartych w przepisach ruchu drogowego jest to przyczepa lekka (fot. 1).

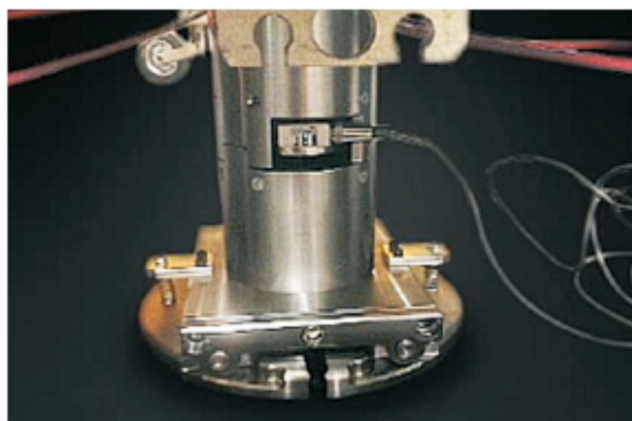
Ramę konstrukcyjną podwozia przyczepy oraz elementy odpowiedzialne za sam pomiar zaprojektowano tak, aby urządzenie miało uniwersalny charakter i mogło być na etapie produkcyjnym dostosowane zarówno do standardowych obciążeń dynamicznych wywołujących siłę równą 120 kN (typowe urządzenia *Falling Weight Deflectometer*, FWD), jak i do badań nawierzchni lotniskowych, gdzie wymagana wartość obciążenia odpowiada sile równej 350 kN (analogicznie do rozwiązań typu *Heavy Weight Deflectometer*, HWD). Adaptacja urządzenia pomiarowego z wersji standardowej, przystosowanej do generowania wartości sił do 120 kN, na wersję o zwiększonych obciążeniach, polega na wymianie siłomierza tensometrycznego umieszczonego w osi płyty obciążeniowej na przetwornik o większym zakresie pomiarowym oraz na zastosowaniu dodatkowych odważników.

Podstawowym źródłem mocy urządzenia są zespoły akumulatorów, które dostarczają napięcie do zasilacza hydraulicznego. Rozwiązanie pozwala wyeliminować drgania, które w przypadku wykorzystania agregatów prądotwórczych mocowanych bezpośrednio na ramie nośnej urządzenia, mogą być czynnikiem zakłócającym pomiar. Zastosowane akumulatory umożliwiają pracę urządzenia w trybie ciągłym, przez minimum 8 godzin.

Integralnym elementem zastosowanym do wymuszenia obciążenia nawierzchni jest układ hydrauliczny sterowany ciśnieniem roboczym równym 150 bar. Zastosowano zespoły siłowników hydraulicznych, które służą między innymi do automatycznej blokady: 1) odważników obciążenia na czas transportu, 2) siłowników pozycjonujących konstrukcję ramy z wymiennymi odważnikami, 3) siłownika centralnego, przy pomocy którego generowane jest obciążenie dynamiczne.

Moduł generujący obciążenie dynamiczne wyposażono w stalową płytę o średnicy 300 mm – podwójnie dzieloną, wahlwią, która dostosowuje się do nierówności powierzchni zapewniając pewny kontakt z nawierzchnią na całej jej powierzchni (fot. 2.).

Wymuszone obciążenie dynamiczne nawierzchni przekazywane jest za pośrednictwem gumowej przekładki, która



Fot. 2. Elementy mechaniczne układu odpowiedzialnego za generowanie obciążeń nawierzchni

jednocześnie stanowi ochronę siłomierza tensometrycznego przed uszkodzeniem mechanicznym. Dodatkowo, istnieje możliwość regulacji czasu trwania obciążenia dynamicznego (20 ÷ 30 ms) poprzez dobranie odpowiedniej sztywności gumowych odbojników oraz ich ilości (do 8 sztuk).

Innowacyjnym podejściem z punktu widzenia konstrukcji urządzenia, które w toku przeprowadzonych badań okazało się satysfakcjonujące, jest system dociskowy poszczególnych przetworników sejsmicznych (geofonów) do powierzchni nawierzchni. Powszechnie w stosowanych urządzeniach typu FWD wykorzystuje się aluminiowe systemy belkowe, które wraz z umocowanymi na nich geofonami stanowią element konstrukcyjny opuszczany podczas pomiaru na nawierzchnię. W proponowanym rozwiązaniu, dla poszczególnych geofonów zastosowano niezależny system opuszczania i docisku tych przetworników do powierzchni badanej nawierzchni, koncentrując się przede wszystkim na uzyskaniu stałej wartości siły docisku dla każdego z geofonów. Takie podejście sprawiło, że wyeliminowany został wpływ lokalnych nierówności testowanej nawierzchni na zmienność wartości siły dociskowej. W rezultacie znacząco zmniejszono efekt przenoszenia się drgań z modułu generującego obciążenie dynamiczne na ramę mocowania geofonów. Do wszystkich geofonów zastosowano siłowniki elektryczne, które w połączeniu z elementami oprogramowania układu elektronicznego pozwoliło na precyzyjną kontrolę wartości siły docisku każdego z przetworników.



## Parametry techniczne ugięciomierza

### Wymiary i waga:

Dł. × Szer. × Wys. [cm]:	450 × 182 × 205
Waga:	1350 kg
Liczba osi:	2

### Charakterystyka obciążenia:

Zakres obciążenia:	5 ÷ 120 kN
Kształt funkcji obciążenia:	połowa sinusoidy
Czas trwania obciążenia:	20 ÷ 30 ms
Dokładność pomiaru siły dynamicznej:	2% ± 0.2 kN
Płyta dociskowa:	podwójna, 300 mm, dzielona
Rozdzielczość obciążenia:	0,1 kN (1 kPa)
Dokładność pozycjonowania zrzutu:	0,1 mm

### Sensor przemieszczeń pionowych:

Typ czujnika:	Przetwornik pomiaru prędkości masy sejsmicznej
Rozdzielczość czujnika:	0,001 mm
Ilość geofonów:	9
Zakres geofonów:	3 × 4000 m oraz 6 × 2000 m
Dokładność geofonów:	± 2%
Skrajny rozstaw geofonów:	1800 mm

### Przetwornik temperatury:

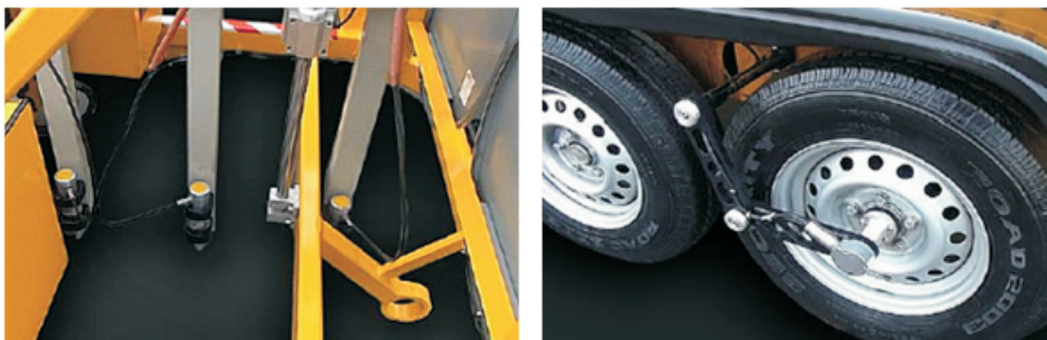
Typ przetwornika:	PT 1000 (pomiar temperatury otoczenia),
Pirometr (oznaczenie temp. powierzchni):	nawierzchni
Dokładność pomiaru temperatury:	1%
Ilość przetworników:	2
Rozdzielczość pomiaru temperatury:	0,1°C

### Czujnik pomiaru dystansu:

Dokładność:	0,1%
Przetwornik:	enkoder inkrementalny, 10.000 impulsów/obrót

### Inne dane:

Zakres temperatur (transport):	-25 ÷ +60°C
Zakres temperatur (pomiar):	+5 ÷ +30°C
Zasilanie:	24 V DC, akumulator – 720 Ah



Fot. 3. Widok schematu umocowania a) geofonów, b) enkodera

## Automatyka urządzenia

Wszystkie funkcje związane z obsługą urządzenia realizuje mikroprocesor wraz z pozostałymi komponentami automatyki przemysłowej. Układy elektroniczne zastosowane w urządzeniu są rozwiązaniami indywidualnymi. Zaprojektowano je pod kątem wyłącznie tego urządzenia i nie stanowią rozwiązań uniwersalnych ogólnodostępnych. Jednak tak postawione założenia ujawniły też słabą stronę technologii produkcyj-

nej, ponieważ odnotowano, że zbyt mała prędkość przesyłu danych wykorzystanej magistrali znacząco wydłuża czas transmisji danych z układów elektronicznych urządzenia do komputera, na którym zainstalowano oprogramowanie. Aktualnie prace związane z projektowaniem i zmianą architektury układów elektroniki polegającej na wprowadzeniu interfejsu komunikacyjnego w standardach LAN są już na ukończeniu. Ten zabieg znacząco zwiększy wydajność transferu danych, ograniczając czas przesyłu potrzebnych informacji do ułamka sekundy.

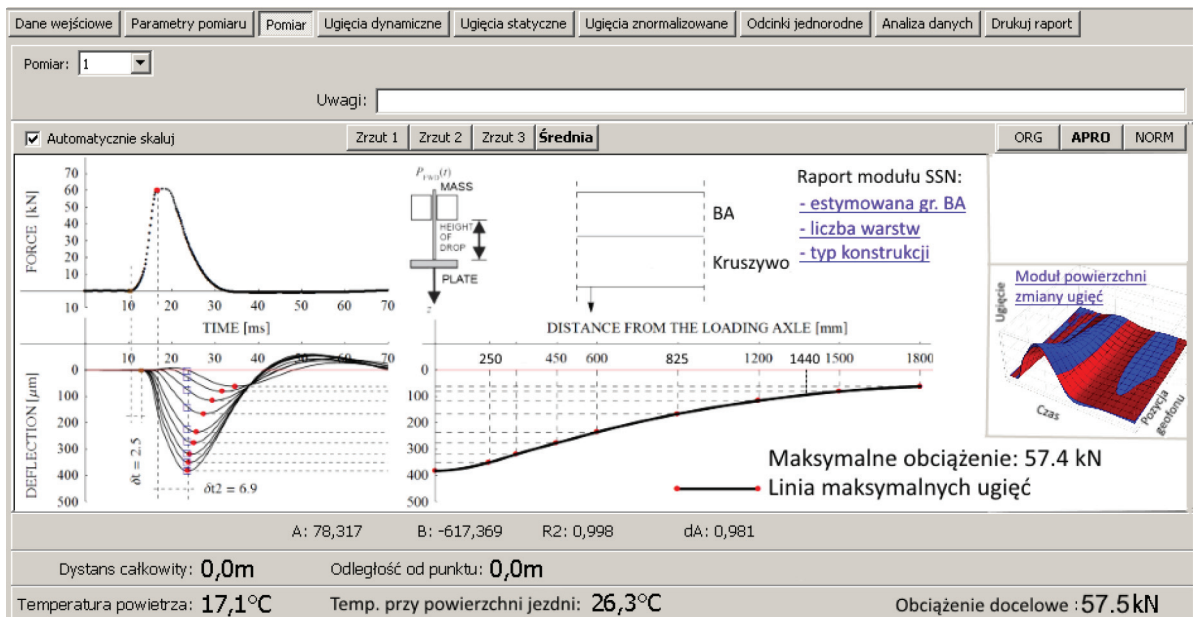
Całym urządzeniem steruje się za pomocą dedykowanego oprogramowania zainstalowanego na komputerze przenośnym, mocowanym na stoliku montażowym w kabinie samochodu. Po wybraniu właściwego trybu pomiarowego (tryb podstawowy – zapis tylko maksymalnych wartości pomierzonych ugięć w trakcie zrzutu lub tryb rozszerzony – ciągły zapis wartości ugięć rejestrowanych w trakcie zrzutu), urządzenie automatycznie realizuje pomiar, za każdym razem dostosowując wysokość zrzutu, tak aby zapewnić uzyskanie zadeklarowanej wartości siły dynamicznej. Ugięciomierz wyposażono w dwie kamery monitorujące do stałego podglądu pracy całego systemu na monitorach zainstalowanych wewnątrz pojazdu. Wbudowane elektroniczne systemy zabezpieczające mechanizmy siłowe oraz możliwość podglądu w czasie rzeczywistym przez operatora, dają gwarancję bezpiecznego i bezawaryjnego działania urządzenia.

## Przetworniki prędkości – geofony

W ogólnym przypadku technika pomiarowa z wykorzystaniem geofonów polega na zapisie zmian napięcia prądu elektrycznego. Korzystając z faktu, że zmiany te w geofonach są wprost proporcjonalne do prędkości masy sejsmicznej [4], która jest montowana wewnątrz tych przetworników, rejestruje się sygnał, który przedstawia prędkość pionowego

przemieszczenia się punktu na powierzchni jezdni, na którym ustawiony jest geofon. Precyzję działania oraz określenie zdolności do generowania stabilnych sygnałów w zależności od zmiennych czynników takich jak amplituda i częstotliwość drgań zweryfikowano w badaniach opisanych w pracy [2]. Wzorcem w badaniach były: laserowy czujnik triangulacyjny, dopplerowski dalmierz laserowy oraz akcelerometr wzorcowy.

W badaniach kalibracyjnych wykorzystano wzbudnik drgań z regulowaną charakterystyką częstotliwości i amplitudy. Po zadaniu określonej charakterystyki drgań, mierzono i porównywano uzyskane wartości z trzech wzorcowych czujników odniesienia oraz z badanego geofonu. Wszystkie geofony poddano badaniom integracyjnym zestawiając każdy z nich w jeden ośrodek wzbudzenia, po czym określono różnice i dokonano odpowiednich ustaleń korekcyjnych.



Rys. 1. Fragment okna dialogowego systemu komputerowego w trybie rozszerzonym

## Oprogramowanie – system ekspercki

Część obliczeniową systemu komputerowego oparto o zestaw połączonych ze sobą aplikacji (modułów), które z założenia mają minimalizować liczbę wymaganych do działania decyzji użytkownika (operatora). Analizy obliczeniowe bazują na wynikach pomiaru linii ugięć badanej nawierzchni. W zależności od tego w jakim trybie pracuje urządzenie (tryb podstawowy lub rozszerzony) typowe okno dialogowe przedstawia wyniki oznaczenia w sposób graficzny (rysunek 1).

W trybie podstawowym pracy urządzenia, użytkownik ma dostęp do standardowych wielkości oznaczonych podczas pomiaru, a więc do maksymalnych wartości siły i ugięcia, temperatury otoczenia i przy powierzchni jezdni. Na najważniejsze elementy wspomaganie procesem zarządzania i / lub projektowania nawierzchni, składają się kolejno następujące moduły obliczeniowe:

- identyfikacja odcinków jednorodnych,
- obliczenia numeryczne (charakterystyka mechaniki nawierzchni, obliczenia odwrotne),
- ocena cyklu życia nawierzchni (ang. Life Cycle Cost Analysis – LCCA).

### Identyfikacja odcinków jednorodnych

Stopień dokładności segmentacji nawierzchni jezdni na sekcje jednorodne, stanowi element, który w sposób istotny wpływa na wyniki analiz odwrotnych i wykorzystania ich w technikach obliczeniowych [8], [15], [32]. Z tego powodu, system komputerowy testowanego tu urządzenia, został wyposażony w oddzielny moduł do ich identyfikacji (*odcinki jednorodne*). W pierwszej wersji oprogramowania wykorzystano metody sum skumulowanych i różnic skumulowanych (odpowiednio *CUMSUM* – *Cumulative Sum* oraz *CDA* – *Cumulative Difference Approach*). Obie te metody opierają się na podobnej filozofii, a w literaturze można znaleźć różne ich odmiany [17]. W przypadku metody *CDA* możliwe do zastosowania są wzory (1) i / lub (2).

$$z_k = \sum_{i=1}^k y_i - k \cdot \bar{y}_i$$

dla wszystkich  $k = 1, 2, \dots, n$ , gdzie  $\bar{y}_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i$  (1)

$$z_x = \sum_{i=1}^k \left( \frac{y_{i-1} + y_i}{2} \right) \cdot x_i - \left( \frac{\sum_{i=1}^k x_i}{L} \right) \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{y_{i-1} + y_i}{2} \right) \cdot x_i$$
 (2)

w których:

$z_k$  – ciąg liczb (ciąg),

$y_i$  – wartość  $i$ -tego składnika ciągu,

$\bar{y}_i$  – wartość średnia  $i$  składników ciągu,

$k$  – kolejne numery składników ciągu,

$n$  – ilość wszystkich składników w ciągu,

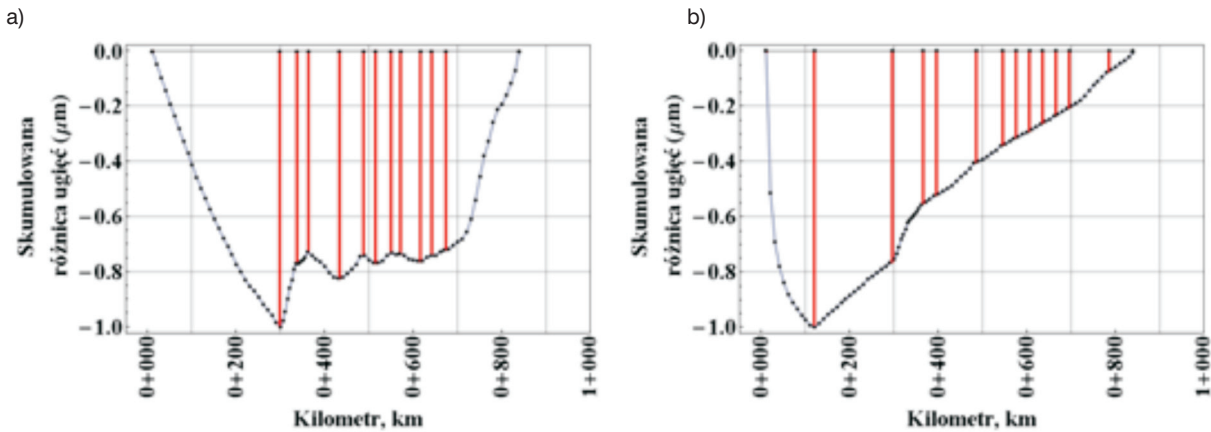
$x_i$  – odległość między pierwszym oraz  $i$ -tym składnikiem ciągu,

$L$  – suma odległości między wszystkimi składnikami ciągu (długość odcinka pomiarowego).

W pierwszej kolejności w metodzie różnic skumulowanych warto zwrócić uwagę na skrajne wartości ciągów  $z_k$  lub  $z_x$ . Jeżeli zauważy się, że dla  $k = n$  zachodzi warunek (3):

$$z_{k=n} = \sum_{i=1}^n y_i - n \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n y_i = 0$$
 (3)

to każdy z tych ciągów zaczyna się od wartości równej zero  $z_{k=1} = z_0 = 0$  i na niej kończy  $z_{k=n} = z_n = 0$ . To właściwość, która przydaje się do kontroli obliczeń przy podziale nawierzchni jezdni na sekcje jednorodne. Kolejna cecha metody *CDA* nasuwa się w trakcie analizy postaci samych wzorów (1) i (2). Pomimo że dotyczą tej samej metody, inaczej się w nich traktuje czynnik odległości między punktami pomiarowymi. W podejściu opisanym przez wzór (1), człon odpowiedzialny za odległość pomija się otrzymując ciąg pomiarowy w postaci  $z_k = y_1, y_2, \dots, y_n$ , a w przypadku wzoru nr (2) odległość ta jest integralnym składnikiem ciągu pomiarowego, czyli  $z_k = (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ . Podstawą podziału odcinka nawierzchni jezdni na sekcje jednorodne w metodzie *CDA* jest ustalenie punktów załomu krzywej zbudowanej w oparciu



Rys. 2. Ilustracja skutków wykorzystania dwóch różnych postaci wzorów w metodzie CDA, a) wzoru nr (1), b) wzoru nr (2)

o ciagi  $z_k$  lub  $z_x$  (w pracy nazywanej krzywą CDA). Analiza wyników podziału na sekcje jednorodne w oparciu o krzywe CDA (rysunek 5) wskazuje, że podział ten zależy zarówno od postaci wykorzystanego wzoru (1) lub (2), jak i metodyki wyszukiwania tych punktów. Analiza wykazała, że jedną z bardziej skutecznych metod automatyzacji tego procesu jest rachunek pochodnych. W module (*odcinki jednorodne*) zastosowano pochodne drugiego rzędu, a dla porównania rezultaty wyszukiwania punktów załomu zilustrowano na rysunku 5. Czerwone pionowe linie stanowią granice przedziałów, w których osiąga się żądany poziom ufności.

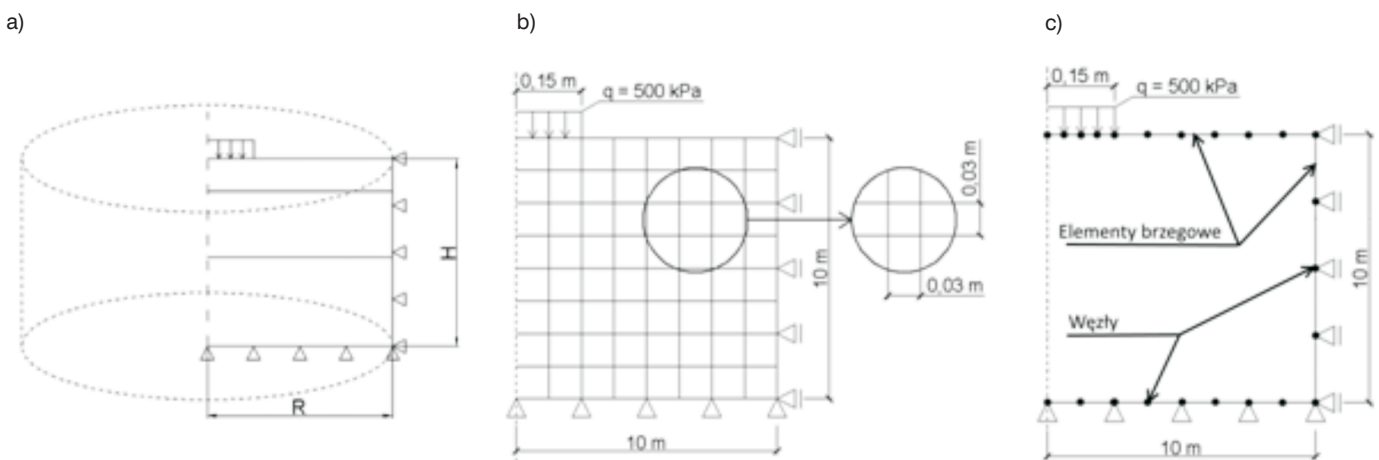
Praktyczną realizację podziału nawierzchni jezdni na sekcje jednorodne z elementami oceny statystycznej przedstawiono w dalszej części pracy przy omawianiu wyników badań porównawczych na nawierzchni odcinka testowego.

### Obliczenia numeryczne dla modeli nawierzchni

Konstrukcja nawierzchni jezdni to wielowarstwowy ośrodek spoczywający na podłożu. Zazwyczaj w modelu konstrukcji nawierzchni zakłada się, że jest to układ warstw o skończonej grubości, spoczywający na warstwie, której grubość (w zależności od przyjętej strategii) umownie uznaje się za

skończoną lub nieskończoną (tzw. półprzestrzeń). Przykładowe schematy, które wykorzystano w pracy do zamodelowania nawierzchni w zależności od metody opisu ośrodka ciągłego przedstawiono na rysunku 3.

W systemie wzięto pod uwagę ugruntowane metody mechaniki nawierzchni jezdni, a mianowicie MET (metodę równoważnych grubości), LET (metodę warstw sprężystych), MES (metodę elementów skończonych), MEB (metodę elementów brzegowych), SEM (metodę elementów spektralnych), oraz metody oparte na analizie zjawisk falowych [16]. W metodzie **MET** [41] stosuje się wzory Bousinesqa, które zostały wyprowadzone dla modelu półprzestrzeni jednowarstwowej. Zaletą jest bardzo krótki czas obliczeń w porównaniu do metody LET czy MES, jednak rozwiązanie ma liczne ograniczenia: 1) rozwiązanie kalibruje się względem metody LET współczynnikiem empirycznym  $f = 0.8-0.9$ , 2) model nawierzchni musi spełnić warunek, zgodnie z którym wartości modułów warstw wraz z głębokością maleją, 3) rozwiązanie jest bardzo wrażliwe na stosunek wartości modułów warstw sąsiadujących z sobą, 4) nie można uwzględnić zmiany powiązań między warstwami modelu nawierzchni, 5) brakuje ścisłych założeń do obliczenia wartości ugięć w punktach usytuowanych poza osią obciążenia. Jeżeli potrzeby oblicze-



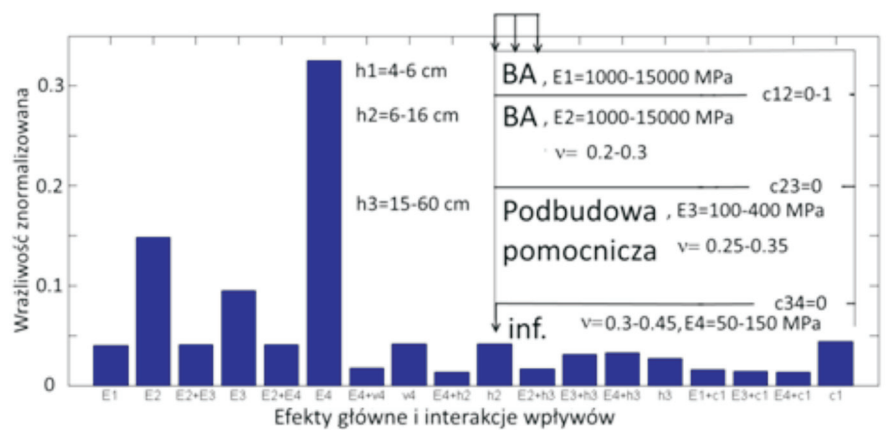
Rys. 3. Schematy idealizacji nawierzchni i podłoża w metodach a) opartych na idei równań równowagi dla modelu osiowo-symetrycznego, b) dyskretyzacja MES (półprzestrzeń), c) dyskretyzacja MEB (półprzestrzeń)



niowe sprowadzają się wyłącznie do osi obciążenia i granic warstw, podkreśla się mimo wszystko dużą zgodność wyników obliczeń z wynikami pomiarów in-situ [41], [39]. Dla wielowarstwowego układu potrzebna jest homogenizacja. Najczęściej wykorzystuje się przekształcenie Odemarka [41], jednak taka transformacja ma charakter czysto inżynierski. W pracy [16] koncepcję metody rozszerzono do rozwiązania modelu dynamicznego. **LET** to metoda, dla której Burmister przedstawił rozwiązanie już klasycznego układu równań równowagi modelu wielowarstwowego posadowionego na warstwie o nieskończonej grubości. Za sprawą odpowiedniego doboru warunków brzegowych, rozwiązanie uwzględnia również szczepność międzywarstwową. Do rozwiązania układu równań stosowane są na świecie dwa podejścia. Pierwsze zakłada stosowanie funkcji naprężeń [43], [39] a w drugim wykorzystuje się transformacje Hankela [27]. Z uwagi na swój półściśły charakter, metoda często traktowana jest jako rozwiązanie referencyjne. Dostępne są również rozwiązania wykorzystujące teorie propagacji fal [16]. **MES** – rozwiązanie równań równowagi statycznej opiera się na podziale modelu nawierzchni na elementy (dyskretyzacja domeny). Wyprowadzenie równań MES opiera się najczęściej na sformułowaniu słabym równania prac wirtualnych [44]. Metoda bardzo skuteczna i umożliwia implementację modeli nieliniowych. Jednak czas obliczeń w przypadku stosowania nieliniowych modeli materiałowych często wyklucza zastosowanie metody w praktyce inżynierskiej, szczególnie w zadaniach analizy odwrotnej. **MEB** [5], [9], [20] – metoda stanowi modyfikację filozofii opartej na metodzie MES w sensie zasad budowy siatki modelu. Podział na elementy ograniczony jest jednak wyłącznie do brzegów modelu nawierzchni jezdni. Z formalnego punktu widzenia metoda jest lepiej dostosowana do wymagań i założeń modeli numerycznych nawierzchni jezdni, jednak z uwagi na osobliwości całek, które pojawiają się w rozwiązaniu jest rzadziej stosowana. **SEM** – koncepcję budowy modelu nawierzchni jezdni opisano w pracy [3]. Zgodnie z tą pracą model oparty o metodę elementów spektralnych jest rozwinięciem metody elementów skończonych, w której stosuje się wielowęzłowe elementy. W rezultacie, takie rozwiązanie umożliwia zmniejszenie liczby elementów, a więc skrócony zostaje czas obliczeń przy jednoczesnym zapewnieniu wymaganej dokładności.

## Obliczenia odwrotne

Do identyfikacji parametrów materiałowych warstw konstrukcji nawierzchni na odcinkach jednorodnych wykorzystuje się obliczenia odwrotne (z ang. *backcalculation*, *inverse analysis*). W ogólnym ujęciu jest to proces identyfikacji parametrów modeli, realizowany za pośrednictwem aproksymacji znanych odpowiedzi analizowanego ośrodka wielkościami obliczonymi dla modelu. W Polsce zagadnienia identyfikacji odwrotnej parametrów modeli nawierzchni najbardziej do-

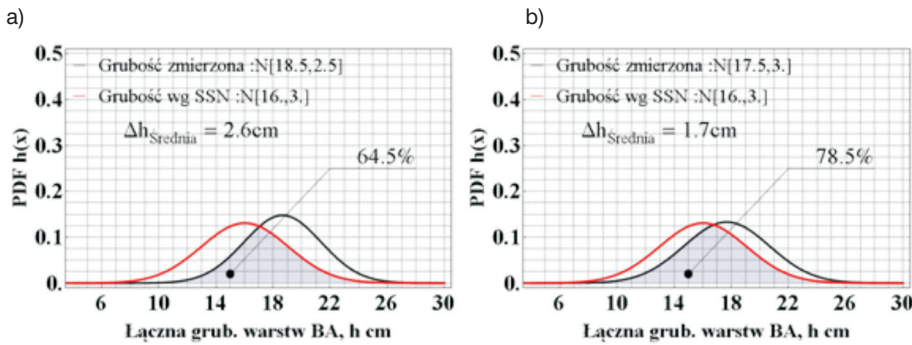


Rys. 4. Wykres wrażliwości obliczenia linii ugięć czterowarstwowego modelu sprężystego na zmianę danego parametru (efekt główny) lub ich kombinacji (interakcja wpływów), na schemacie konstrukcji pokazano też zakres wartości, który wypełniał przestrzeń poszczególnych parametrów:  $E$  – moduły sprężystości,  $\nu$  – współczynniki Poissona,  $c_{ik}$  – stopień powiązania między  $i$ -tą oraz  $k$ -tą warstwą

kładnie opisane są w pracach [16], [39]. W omawianym przypadku modelem jest nawierzchnia (jezdni, pasa startowego, płyty lotniskowej, terminala przeładunkowego itp.), a porównywanymi odpowiedziami wywołanymi obciążeniem są wartości ugięć zmierzone na powierzchni warstwy ścieralnej. Istotną wadą obliczeń odwrotnych jest wrażliwość tego typu analizy na niewielką zmianę wartości parametrów modeli nawierzchni jezdni, co zostało opisane w pracach [8], [14], [15], [35]. Częściowym podsumowaniem poruszanych tam zagadnień jest wykres wrażliwości pokazany na rysunku 4.

Z uwagi na to, że wyniki obliczeń odwrotnych są etapem pośrednim do oceny trwałości zmęczeniowej nawierzchni, system ekspercki wyposażono w moduły obliczeniowe, które znacznie niwelują błędy klasycznego podejścia. Zastosowano między innymi: 1) etap preselekcji zmierzonych linii ugięć na podstawie uproszczonej oceny modelu konstrukcji, opisanej między innymi w pracy [10], 2) zaimplementowano zweryfikowany na bazie własnych doświadczeń model ze sztucznie wprowadzoną warstwą sztywną w podłożu [21], [22], [34], [40], [41], [42], 3) w modelach uwzględniono możliwość analizy przy wykorzystaniu własności modułów sprężystości warstw uzależnionych od wartości naprężenia (z ang. *stress – sensitive approach*) [1], [6], [36], 4) bardzo obiecujące wyniki analizy odwrotnej otrzymano za sprawą wykorzystania technik probabilistycznych [19] i sztucznych sieci neuronowych. Szczególnie w tym drugim przypadku interesujący okazuje się eksperyment, który wykazał, że w sposób istotny można zwiększyć skuteczność identyfikacji łącząc poszczególne techniki [7], [12], [23], [25], [28], [31], [32] (rysunek 5).

W odniesieniu do analizy rezultatów testu urządzeniami typu FWD, często wyniki pomiaru pod obciążeniem dynamicznym wprowadza się bezpośrednio do modelu nawierzchni o charakterze statycznym. System ekspercki wyposażono w moduł przeliczeniowy, który służy do przeliczenia wartości ugięć zmierzonych pod obciążeniem dynamicznym do wartości odpowiadających obciążeniom statycznym. Do tego celu wykorzystano zalety analizy widmowej funkcji przejścia (ang. *Frequency Response Function /FRF/*) [18]. Rozwiązanie to wykorzystano w systemie jako alternaty-

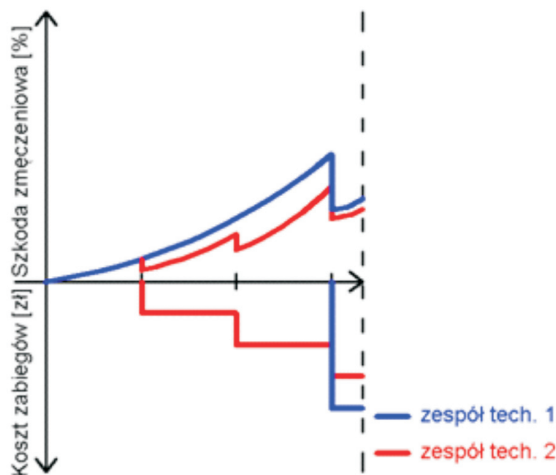


Rys. 5. Wyniki identyfikacji łącznej grubości warstw asfaltowych nawierzchni jezdni metodą sztucznych sieci neuronowych a) wytrenowanych o dane z wierceń, b) wytrenowanych na podstawie danych z prześwietleń georadarem

wę do stosowania empirycznych współczynników przeliczeniowych [26], [37]. Kluczową rolę w systemie przypisano również interpretacji wartości identyfikowanych modułów sprężystości podłoża. Na drodze doświadczeń opisanych w pracach [11], [30], [33] są one przeliczane do wartości wtórnego modułu odkształcenia i w konsekwencji stanowią wsparcie do decyzji w module LCCA, opisanym w dalszej części artykułu.

### Ocena cyklu życia nawierzchni

Wyniki działania systemu eksperckiego są widoczne po zastosowaniu modułu opracowanego na potrzeby oceny cyklu życia nawierzchni (z ang. *Life Cycle Cost Analysis /LCCA/* [24]). W ogólnym ujęciu, LCCA jest to procedura umożliwiająca dobór optymalnego z punktu widzenia kosztów rozłożonych w czasie, zbioru zabiegów utrzymaniowych. Zabiegi te mają na celu zachowanie parametrów technicznych nawierzchni w pożądanym stanie w założonym okresie czasu. Procedura, którą opracowano w systemie, sprowadza się do grupy rozwiązań analitycznych, które dostarczają kompletu informacji o wyborze między wieloma alternatywnymi technologiami wzmocnienia nawierzchni dowolnego typu (podatna, sztywna, półsztywna). Okres analizy powinien wykazać łączne różnice kosztów między możliwościami (rysunek 6).



Rys. 6. Schematyczna ilustracja idei LCCA

Najbardziej znanym przykładem podejścia optymalizacyjnego do zagadnienia szacowania cyklu życia nawierzchni jest system zalecany przez Bank Światowy pn. HDM [29]. W proponowanym podejściu wykorzystano jednak analizę mechaniczną opartą o zalecane w Polsce kryteria. Sam proces analizy składa się z kroków, które kolejno są budowane na podstawie poprzednich:

- ustalenie alternatywnych zbiorów technologii wzmocnienia,
- określenie czasu życia,
- oszacowanie kosztu cyklu życia.

Po wykonaniu obliczeń dla grup alternatywnych rozwiązań przeprowadza się

analizę wyników, która jednoznacznie wyznacza optymalny zbiór zabiegów utrzymaniowych.

### Ustalenie alternatywnych zbiorów technologii wzmocnienia

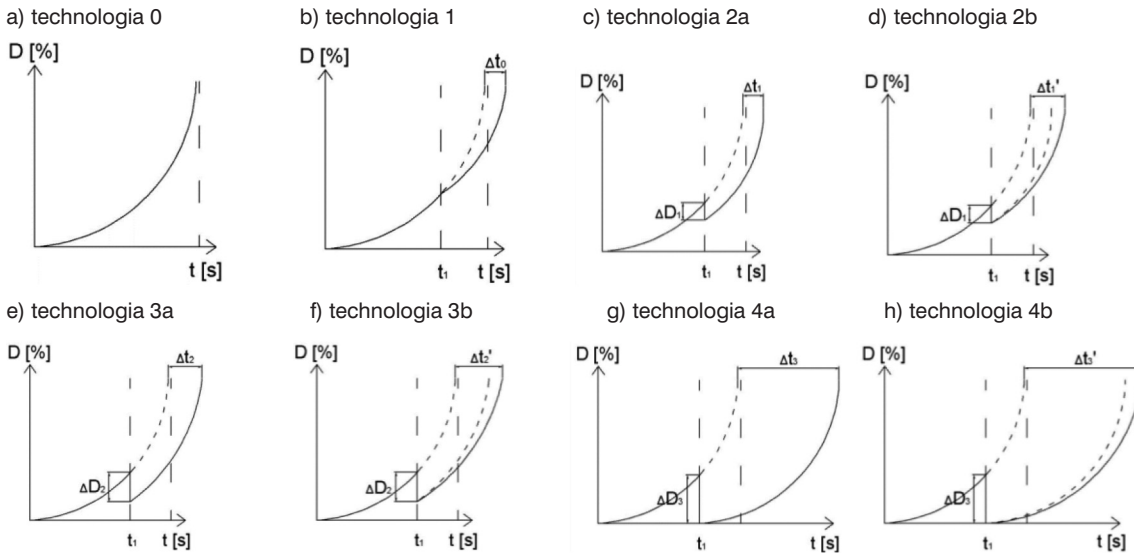
Ze względu na liczoną w milionach ilość możliwych wariantów zbiorów technologii wzmocnień w założonym czasie, zdecydowano się na wykorzystanie probabilistycznej metody doboru alternatywnych rozwiązań. W programie wprowadzono umowny podział na pięć grup technologii, poprzez zdefiniowanie parametrów, którymi użytkownik może sterować, uzyskując tym samym dostęp do wykorzystania dowolnego, powszechnie wykonywanego w Polsce zabiegu. Podział na grupy jest następujący:

- a) tech0 – brak jakiegokolwiek zabiegu,
- b) tech1 – zabiegi powierzchniowe, między innymi wypełnienie szczelin i uszczelnienie warstw,
- c) tech2 – ułożenie nowej warstwy i/lub frezowanie pierwszej warstwy,
- d) tech3 – pełne frezowanie pierwszej warstwy, pełne lub częściowe frezowanie drugiej warstwy oraz ułożenie nowych warstw,
- e) tech4 – frezowanie całej pierwszej i drugiej warstwy, ułożenie dwóch warstw wraz ze wzmocnieniem podłoża.

W ramach tych grup technologicznych, uwzględniono też możliwość stosowania warstw przeciwspekaniowych typu SAMI. Na podstawie doświadczeń krajowych, w sposób szacunkowy uwzględniony został też ich wpływ na cykl życia nawierzchni (rysunek 7).

### Określenie czasu życia

Analizę czasu życia nawierzchni danego typu realizuje się na podstawie kryteriów zmęczeniowych przedstawionych w pracy [37]. To przede wszystkim pozwala „uczyc” system opierając się na bazie naszych rodzimych doświadczeń. Rezultatem obliczeń jest wartość pozostałej trwałości zmęczeniowej nawierzchni oraz szkoda zmęczeniowa, której definicję wykorzystano bezpośrednio jako model degradacji nośności nawierzchni i miarę powstawania uszkodzeń od obciążenia ruchem drogowym. W kolejnych latach analizy, do obliczenia szkód zmęczeniowych wykorzystano postać wzoru 4.



Rys. 7. Wykres przyrostu szkody zmęczeniowej w czasie dla poszczególnych grupy technologii zabiegu (przy symbolach: a – bez warstwy przeciwpękaniowej, b – z warstwą przeciwpękaniową)

$$D = \frac{N_r}{N} \cdot 100 \cdot P [\%] \quad (4)$$

w którym:

$D$  – szkoda zmęczeniowa,  
 $N_r$  – sumaryczny ruch drogowy w analizowanym roku,  
 $N$  – trwałość zmęczeniowa analizowanej nawierzchni,  
 $P$  – szacunkowa wartość parametru, która hamuje przyrost szkody zmęczeniowej po zastosowaniu warstwy SAMI.

Na podstawie wartości szkody zmęczeniowej do obliczenia nowych wartości modułów warstw modelu nawierzchni wykorzystano postać wzoru 5.

$$E = E' - E' \cdot \left(\frac{D}{200}\right) \quad (5)$$

w którym:

$E$  – wartość modułu warstwy po uwzględnieniu obliczonej szkody zmęczeniowej,  
 $E'$  – wejściowa wartość modułu dla kroku analizy. Spadek wartości modułu warstwy ( $E$ ) o połowę, następuje w przypadku wystąpienia szkody zmęczeniowej równej 100%. Zgodnie z tymi założeniami, na rysunku 14 przedstawiono schematy przyrostu szkód zmęczeniowych dla wszystkich pięciu możliwych scenariuszy, które mogą wystąpić w zależności od zastosowanej technologii zabiegu.

### Parametr decyzyjny

W ogólnym przypadku można wyobrazić sobie sytuację, w której pod wpływem ruchu pojazdów warstwy z betonu asfaltowego utraciły większą część swojej trwałości zmęczeniowej, a poprzez np. zjawisko tworzenia się soczewek lodowych, podłoże gruntowe utraciło swoją nośność. Model nawierzchni, który może odzwierciedlać ten scenariusz przedstawiony jest na rysunku 8.

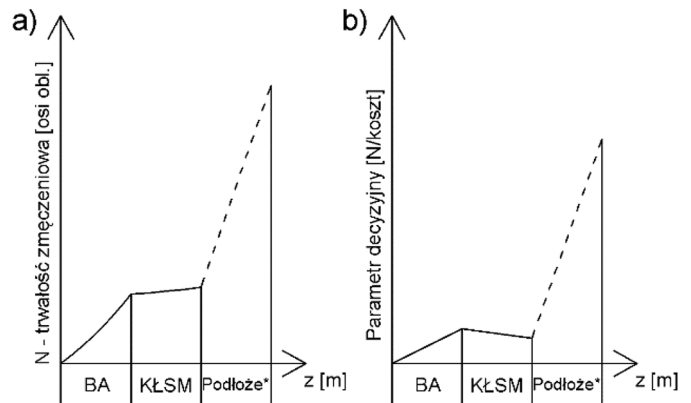
Dla takiego przypadku, rozważając różne grupy możliwych zabiegów technologii (parametry materiałowe nowych warstw zebrano w tabeli na rysunku 9), obejmujących częściową lub pełną wymianę warstw konstrukcji z lub bez wzmocnienia



Rys. 8. Schemat przekroju konstrukcji nawierzchni jezdni i jego model obliczeniowy

podłoża gruntowego, uzyskane wyniki analizy modułu LCCA zilustrowano na rysunku 9.

Parametry nowych warstw [MPa]	
$E_1$	8000
$E_2$	400
$E_3$	120



\* zabieg technologiczny wzmocnienia podłoża

Rys. 9. Wyniki analizy modułu LCCA



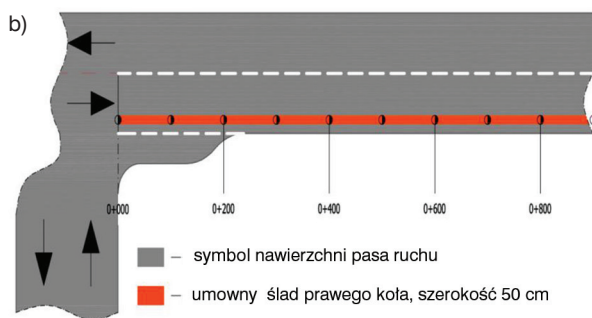
W odniesieniu do uzyskanych wyników obliczeń (rys. 9a), można zaobserwować zmiany trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni w zależności od miejsca, w którym zastosuje się określony zabieg (przykład dotyczy analizy LCCA w zakresie częściowej bądź pełnej wymiany warstw). Uwzględniając w analizie kryterium kosztów (tzw. parametr decyzyjny równy stosunkowi pomiędzy trwałością zmęczeniową, a całkowitym kosztem wykonania zabiegów technologicznych) okazuje się, że w zależności od wymaganej dla założonego okresu eksploatacji trwałości zmęczeniowej, optymalne pod względem kosztów będą dwa rozwiązania (rys. 9b). W przypadku, gdy użytkownik zdecyduje się zaakceptować relatywnie mały przyrost trwałości zmęczeniowej (wyrażony w latach), moduł wskazuje na wzmocnienie częściowej lub pełnej wymiany warstwy z BA. Natomiast w sytuacji, gdy w odniesieniu do trwałości zmęczeniowej konstrukcji stawia się ostrzejsze wymagania, moduł LCCA wyklucza pośrednie rozwiązania wskazując jednoznacznie konieczność naprawy każdej warstwy nawierzchni i podłoża.

### Badania porównawcze ugięciomierzy

Badania porównawcze przeprowadzono na odcinku nawierzchni jezdni o długości 900 m. Ocenie podlegał jeden pas ruchu o szerokości 3,5 m.

### Charakterystyka odcinka nawierzchni jezdni i podłoża

Pomiary testowe ugięć nawierzchni wykonano wzdłuż umownego śladu prawego koła (rysunek 10), przyjmując oś jego symetrii w odległości 95 cm od krawędzi pasa ruchu. Pomiary zostały zrealizowane przy założeniu, że dopuszczalna szerokość tego śladu, w którym dany pomiar wzięto do analizy statystycznej, jest równa 50 cm. W badaniach wykorzystano trzy urządzenia typu FWD, a z uwagi na to, że dopuszczalne wartości ugięć nawierzchni jezdni w Polsce deklarowane są dla metody *Belki Benkelmana (BB)*, w zakresie przeprowadzonych testów uwzględniono również i tę metodę. Przed przystąpieniem do realizacji badań porównawczych przyjęto również założenie, że w każdym punkcie pomiarowym zostaną wykonane trzy pomiary (będą generowane trzy takie same obciążenia dynamiczne o maksymalnej wartości docelowej równej 50 kN).

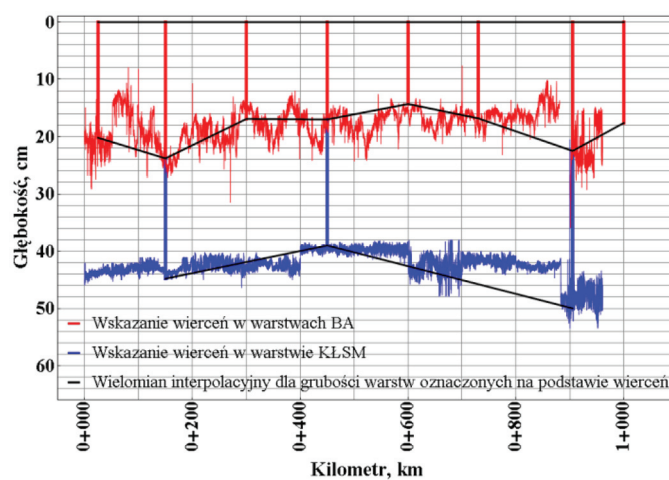


Rys. 10. Widok odcinka porównawczego a) ciąg urządzeń pomiarowych w czasie badań, b) schemat badanego odcinka

Na rysunku 10a przedstawiony jest ciąg urządzeń pomiarowych w kolejności:

- FWD<sub>1</sub> (typowe urządzenie Dynatest funkcjonujące na rynku)
- FWD<sub>2</sub> (polskie urządzenie – konsorcjum Politechnika Poznańska – Firma Pneumotechnika)
- FWD<sub>3</sub> (urządzenie Dynatest z uzyskaną akredytacją PCA)
- Stanowisko do badania metodą Belki Benkelmana BB (zgodnie z pomiarem masy samochodu ciężarowego wykorzystanego do badań, nacisk na oś z kołami bliźniaczymi wynosi 95,4 kN).

Grubości warstw nawierzchni odcinka porównawczego oznaczono przy wykorzystaniu pomiarów georadarowych (GPR) z serią otworów geotechnicznych do kalibracji wyników z urządzenia GPR (rysunek 11).



Rys. 11. Schematyczny obraz konstrukcji nawierzchni z urządzeniami GPR wzdłuż umownego śladu prawego koła i rozmieszczeniem otworów kalibracyjnych

W podłożu nawierzchni występuje mieszanka piasków: drobnego, pylistego i gliniastego (Pd + P<sub>π</sub> + P<sub>g</sub>). W otworach wiertniczych na głębokość 2,5 m poniżej powierzchni warstwy ścieralnej nie nawiercono zwierciadła wody gruntowej.

### Wyniki analizy badań porównawczych

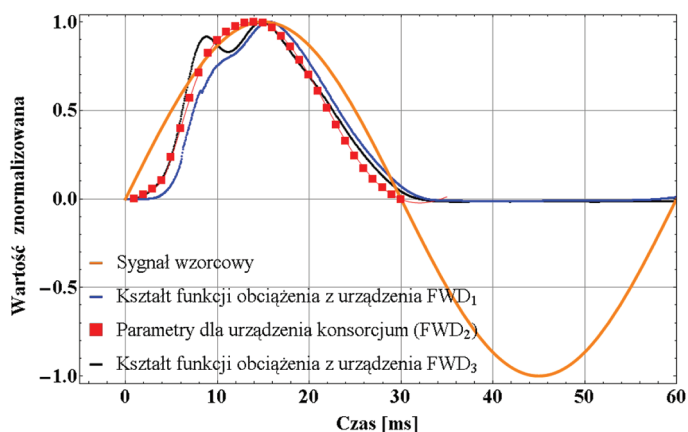
W testach porównawczych przyjęto założenie, że badania ugięć nawierzchni jezdni zostaną wykonane przy obciążeniu siłą o wartości 50 kN. To założenie, w świetle charakterystyki obciążenia dynamicznego jest z praktycznego punktu widzenia konstrukcji urządzenia typu FWD bardzo wymagające. Wynika to z faktu, że z jednej strony badaniom podlegają nawierzchnie, w których warstwy charakteryzują się występowaniem przesunięcia fazowego, a z drugiej strony na kształt

funkcji generowanego w urządzeniu obciążenia mają wpływ: czas trwania, sposób narastania obciążenia w jednostce czasu, maksymalna wartość siły dynamicznej generowanej poprzez swobodnie spadającą masę zainstalowanych w systemie odważników oraz bezwładność systemu mechaniczno-hydraulicznego.

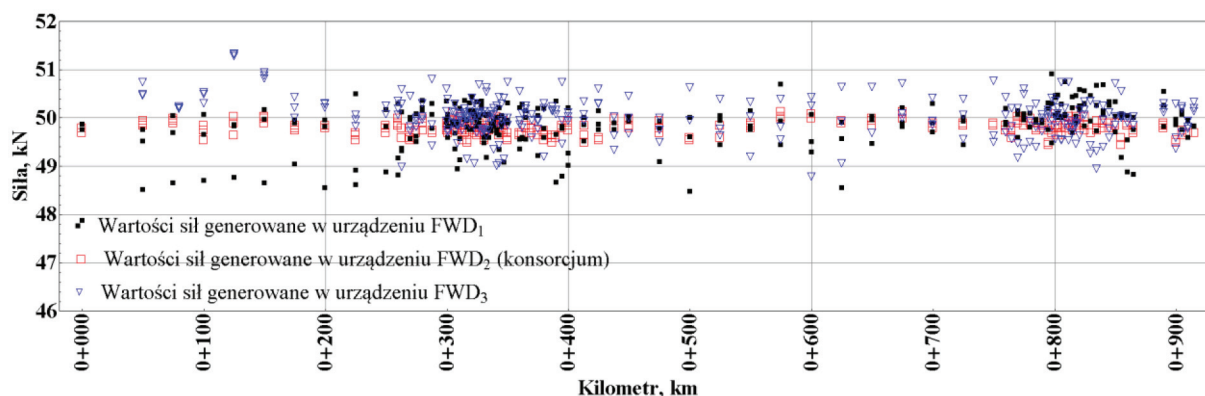
### Porównanie kształtu funkcji obciążenia

Wobec dynamicznego charakteru obciążenia w urządzeniach typu FWD, w porównaniach między różnymi typami FWD nie można ograniczyć się wyłącznie do oceny wartości bezwzględnej generowanej siły. Konfrontację wielkości mierzonych w pierwszej kolejności należy sprowadzić do weryfikacji kształtu funkcji obciążenia. Za punkt odniesienia przyjęto sygnał wzorcowy dany funkcją sinus w przedziale od 0 do  $2\pi$  (rysunek 12). Biorąc pod uwagę typowy zakres czasu trwania obciążenia w badaniach konstrukcji nawierzchni urządzeniem FWD, równy około  $t = 30$  ms, zestawienie rzeczywistych funkcji obciążenia nawierzchni podatnej, przedstawiono na tle funkcji  $F(t) = \sin(2\pi \cdot 1/(2 \cdot t))$ , a więc funkcji o częstotliwości  $f \approx 16.67$  Hz.

Użyteczny sygnał rzeczywistych obciążeń (rysunek 12) jest bardzo zbliżony do połowy sinusoidy (sygnału wzorcowego),



Rys. 12. Ilustracja typowych kształtów funkcji obciążenia uzyskanych podczas realizacji badań porównawczych urządzeniami typu FWD na tle funkcji sygnału wzorcowego



Rys. 13. Zestawienie uzyskanych wartości docelowych obciążenia udarowego (zakładana wartość siły  $F = 50$  kN)

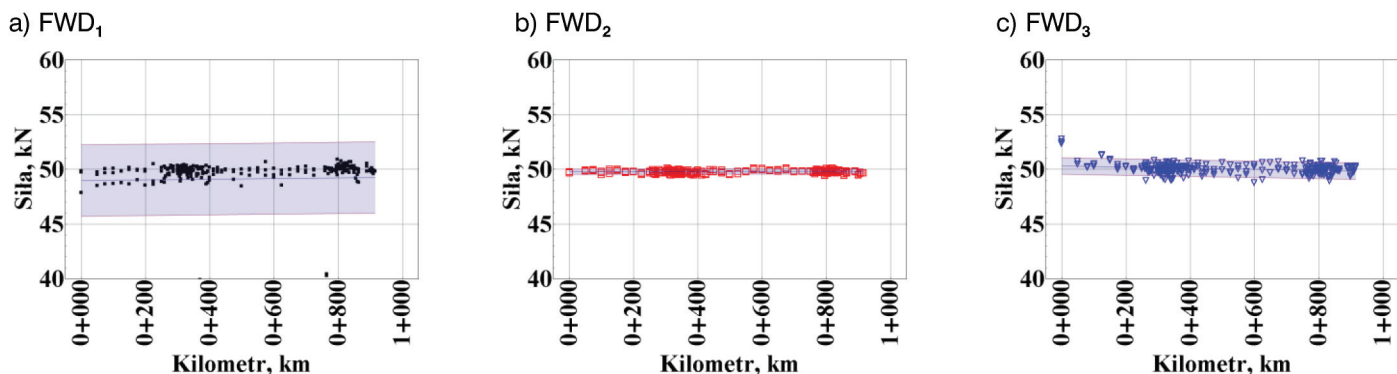
a częstotliwość obciążenia generowana przez wszystkie trzy urządzenia oscyluje wokół wartości  $f = 1/t \approx 33.3(3)$  Hz. Pełna analiza typowych funkcji uzyskanych podczas badań ugięć nawierzchni odcinka testowego (na rysunku 12 pokazano przykład dotyczący pojedynczego punktu pomiarowego) ostatecznie dowodzi, że wszystkie porównywane tu urządzenia generują sygnał obciążenia o zbliżonym charakterze. To daje podstawę do wiarygodnego porównania wartości ugięć uzyskanych z badań różnymi urządzeniami FWD wykorzystanymi w opisywanych tu testach.

### Wyniki analizy maksymalnych obciążeń

W urządzeniach typu FWD wartość docelowa generowanej siły jest w istocie efektem precyzji przeliczenia wysokości zrzutu na nawierzchnię odważników. Wymuszona tym sposobem siła przekłada się bezpośrednio na zdolność urządzenia do generowania zadanej, docelowej wartości obciążenia. Na zestawieniu pokazanym na rysunku 13 można prześledzić wartości sił, które uzyskano podczas badań nawierzchni odcinka na całej długości odcinka testowego, poszczególnymi urządzeniami FWD.

Statystyczną ocenę rozproszenia wartości sił względem zakładanych 50 kN (rysunek 13) przedstawiono na rysunku 14. Wykresy opisują niepewność związaną z prognozowaniem średniej wartości siły w oparciu o testy statystyczne dla pojedynczych obserwacji.

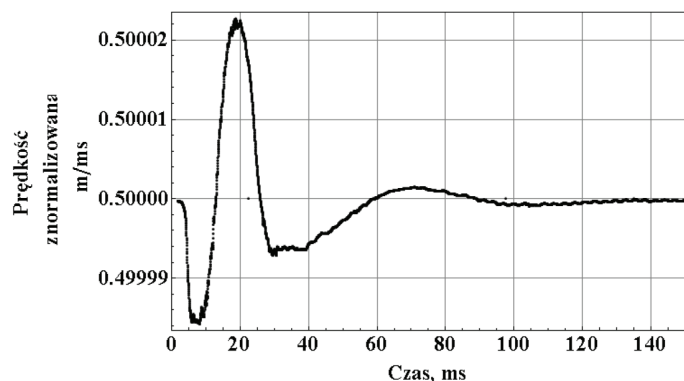
Biorąc pod uwagę wszystkie punkty pomiarowe zlokalizowane w umownym śladzie badań, dochodzi się do wniosku, że największą precyzją generowania maksymalnej wartości siły docelowej charakteryzuje się urządzenie nr 2 ( $50 \pm 0.5$  kN). W przypadku urządzeń FWD<sub>3</sub> przedział niepewności obejmuje zakres wartości równy  $50 \pm 1$  kN, a FWD<sub>1</sub>  $50 \pm 2$  kN. Warto zauważyć, że w kontekście potrzeb związanych z naturą obliczeń odwrotnych opisanych np. w pracy [15], wyniki dla urządzenia FWD<sub>2</sub> oprócz tego, że uzasadniają poprawność przyjętych rozwiązań w układzie odpowiedzialnym za tę część funkcjonalną maszyny, gwarantują bardzo dużą dokładność danych na wejściu, zarówno na potrzeby identyfikacji wstecz, jak i oceny wartości maksymalnych ugięć sprężystych.



Rys. 14. Przedziały ufności dla wnioskowania o wartości średniej obciążenia docelowego w wykorzystanych urządzeniach FWD ( $\alpha = 0.10$ )

## Maksymalne wartości ugięć nawierzchni

W pierwszej kolejności przedstawiono analizę związaną z porównaniem wskazań z pierwszego geofonu. Jest to przykład przetwornika sejsmicznego, który z uwagi na lokalizację w osi obciążenia jest narażony na większe rozrzuty pomiarowe w porównaniu do geofonów oddalonych od osi obciążenia o pewien dystans [38]. Przykładowy kształt takiego impulsu, przygotowanego na potrzeby obliczenia wartości ugięcia na drodze całkowania przedstawiono na rysunku 15.

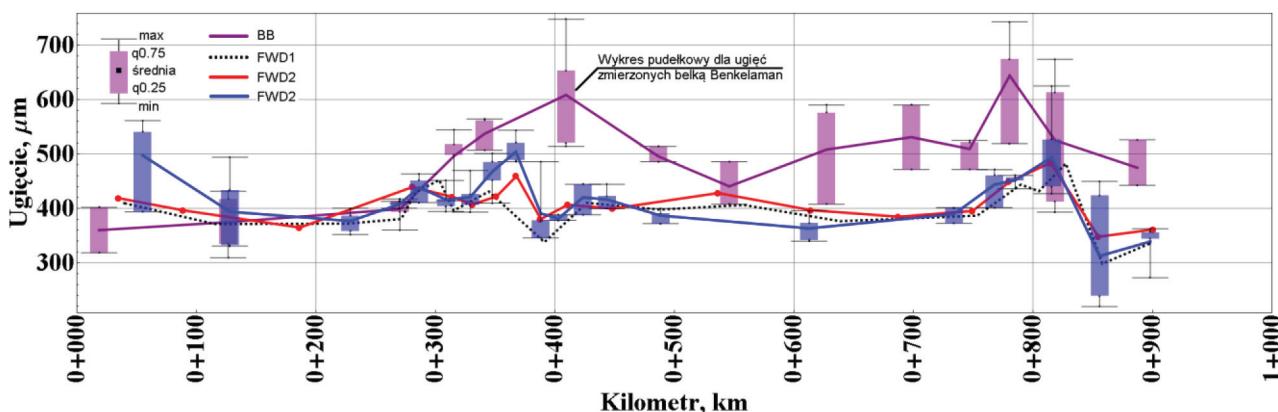


Rys. 15. Typowy zapis prędkości masy sejsmicznej uzyskany przy wykorzystaniu geofonu umieszczonego w osi obciążenia (urządzenie FWD<sub>2</sub>)

Zestawienie uzyskanych wyników z pomiarów ugięć nawierzchni urządzeniami typu FWD przedstawione zostały na rysunku 16. Wartości tych ugięć są zestawione na tle wykresów pudełkowych opracowanych w oparciu o wyniki badań metodą Belki Benkelmana.

Jako wyniki referencyjne przyjęto również rezultaty pomiaru ugięć urządzeniem akredytowanym przez PCA (Polskie Centrum Akredytacji), oznaczonym w pracy jako FWD<sub>3</sub>. Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej przedstawionych wyników można sformułować wniosek, z którego wynika, że wartości ugięć nawierzchni z pomiarów wszystkimi trzema urządzeniami można zaliczyć do tych samych rozkładów gęstości prawdopodobieństwa (rozkłady normalne – rysunek 17).

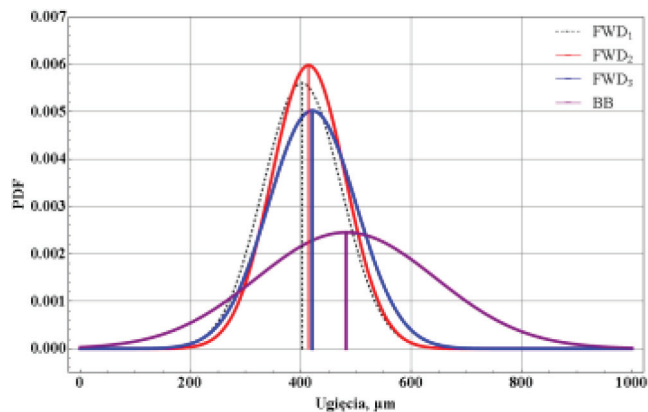
Wartości statystyk – p, w testach zgodności Chi-kwadrat potwierdzają zgodność wszystkich funkcji PDF, wyznaczonych na podstawie badań FWD, na poziomie prawdopodobieństwa równym 95%. W drugiej kolejności przedstawione zostało zestawienie wartości odchyłeń standardowych wszystkich geofonów (rysunek 18). Na podstawie analizy zgromadzonych danych zaobserwowano, iż największy rozrzut w wartościach ugięć tego samego punktu pomiarowego (trzy rzuty), występuje na geofonach znajdujących się bliżej osi obciążenia. Tym samym najmniejszą powtarzalność ugięcia występuje na geofonie centralnym (w osi płyty obciążeniowej), co pozostaje w zgodności z wnioskami zawartymi w pracy [38].



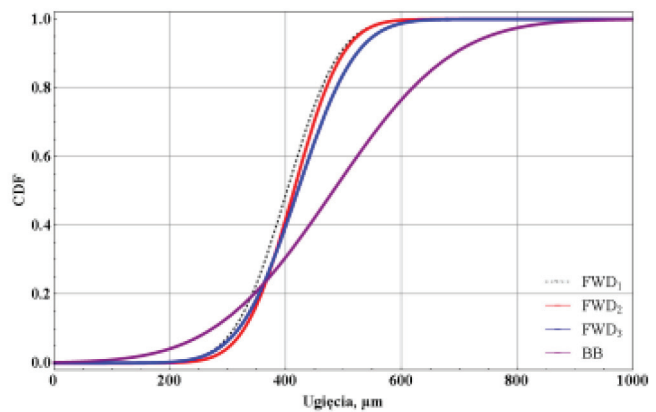
Rys. 16. Zbiorcze zestawienia zmierzonych wartości ugięć nawierzchni odcinka testowego



a) PDF

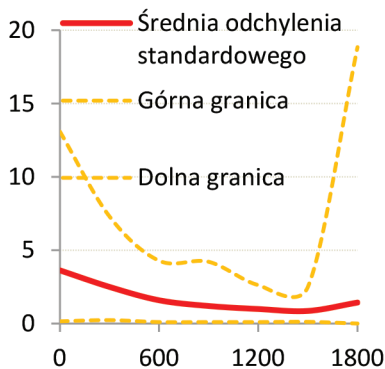


b) CDF

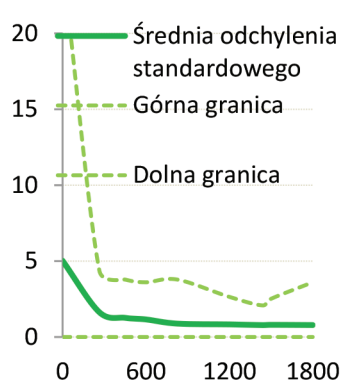


Rys. 17. Wartości maksymalnych ugięć nawierzchni jezdni odcinka testowego z pomiarów różnymi urządzeniami FWD i metodą BB: a) funkcje gęstości prawdopodobieństwa ugięć, b) dystrybuanty ugięć

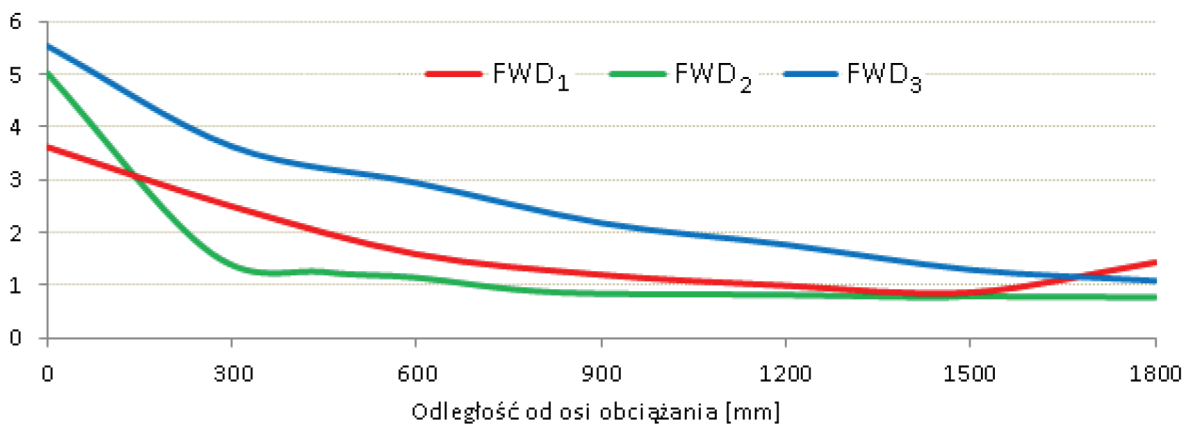
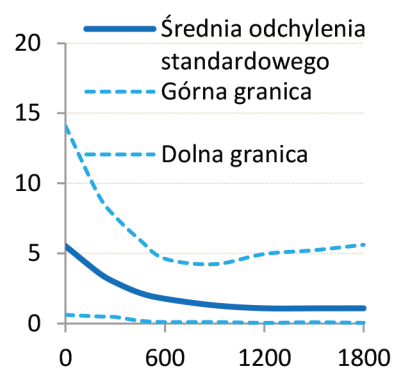
a) FWD1



b) FWD2 (polskie)



c) FWD3



Rys. 18. Zbiornicze zestawienie wartości odchylenia standardowego na poszczególnych geofonach dla trzech różnych urządzeń pomiarowych w zależności od odległości przyłożenia geofonu do powierzchni nawierzchni

Na wykresach (rysunek 18) pokazano średnią wartość odchylenia standardowego z serii trzech zrzutów w tym samym punkcie pomiarowym obejmując całą grupę badań, tj. 98 punktów pomiarowych wykonanych na odcinku drogi o długości około 900 m.

## Podsumowanie i wnioski

Złożony proces analizy danych uzyskanych w badaniach ugięć rzeczywistych konstrukcji jezdni powoduje, że rozwój technik analizy wielkości gromadzonych w pomiarach jest procesem relatywnie powolnym. W artykule zaprezentowano szereg elementów, które poprzez udaną próbę konstrukcji i budowy urządzenia typu FWD oraz włączenia do analizy zin-

tegowanego systemu komputerowego, pozwoliły udostępnić polską platformę do optymalnej oceny stanu technicznego nawierzchni pod kątem jej ugięć mierzonych na powierzchni warstwy ścieralnej. W pierwszej fazie analizy oprogramowanie urządzenia, po zadeklarowaniu danych wejściowych, wymusza w układzie hydraulicznym tzw. zrzut kalibracyjny, celem którego jest obliczenie właściwej (skorygowanej) wysokości zrzutu zainstalowanych w urządzeniu obciążników dla uzyskania zakładanego obciążenia badanej nawierzchni. Następnie realizowane są właściwe zrzuty, podczas których dokonywane są przeliczenia z przetworników prędkości (geofonów) na wartości przemieszczeń punktów nawierzchni, w których ustawione są geofony. Całość przesyłana jest do systemu eksperckiego, w którym szczegółowość analizy uzależniono od wyboru trybu (podstawowy i rozszerzony).

Opisane w artykule wyniki badań oraz zamieszczony opis systemu eksperckiego pozwalają sformułować następujące wnioski dotyczące m.in. wyników pomiarów uzyskiwanych przez 3 różne urządzenia FWD (w tym zbudowane w Polsce):

- urządzenia wykorzystane w badaniach porównawczych charakteryzuje różny stopień zdolności generowania siły dynamicznej (rozwiązania zastosowane w polskim urządzeniu, wykazało się precyzją generowania wartości zakładanej siły  $\pm 0.5$  kN);
- wpływ na wysoką zdolność do generowania zakładanych parametrów siły dynamicznej, uwarunkowany jest poprzez: skuteczny algorytm przeliczania wartości wysokości podnoszenia ciężaru uwzględniający tłumienie badanego ośrodka półprzestrzeni w każdym punkcie pomiarowym, zastosowanie linału elektromagnetycznego o wysokiej rozdzielczości pozycjonowania, odpowiednio wysoką częstotliwość próbkowania przetwornika tensometrycznego oraz zastosowanie wysokoczęstotliwościowego wzmacniacza sygnałowego do pomiaru wartości siły;
- częstotliwość obciążenia dla każdego z urządzeń jest zbliżona i wynosi około 33 Hz;
- w każdym urządzeniu wartości sygnałów z geofonu umieszczonego w osi obciążenia obarczone są największą niepewnością. Za główną przyczynę uznano zarówno bezpośrednie sąsiedztwo systemu mocowania tego geofonu z płytą przekazującą na nawierzchnię obciążenie, jak i przenoszenie drgań z elementów konstrukcyjnych samego układu obciążającego. W polskim urządzeniu za sprawą takich modułów jak SSN, większy nacisk położony będzie na oznaczanie maksymalnych wartości ugięć, wykorzystując geofony usytuowane tuż poza płytą dociskową i fakt, że konstrukcja ramy i systemu opuszczania geofonów jest mechanicznie odseparowana od modułu generującego obciążenie, co nie jest standardem w dostępnych urządzeniach innych producentów;
- z analizy wyników badań na odcinku porównawczym wartości maksymalne ugięć dla poszczególnych urządzeń są takie same przy zachowaniu prawdopodobieństwa równego 95%;
- zastosowane rozwiązanie w polskim urządzeniu do przeliczania wartości ugięć nawierzchni obciążonej w sposób dynamiczny na wartości odpowiadające ugięciom statycznym, przy wykorzystaniu widmowej funkcji przejścia (metody FRF) wykazało, że zgodność wyników obliczeń z me-

todami empirycznymi stosowanymi w Polsce, można uznać za prawdziwą przy prawdopodobieństwie równym 95%;

- na podstawie analizy błędów wskazań z poszczególnych geofonów dla trzech urządzeń, charakterystyczny jest rozkład błędów sygnałów z geofonów względem odległości od osi obciążenia. Dla urządzenia polskiego (FWD2) wartości gradientu błędu gwałtownie maleją w odległości około 30 cm od osi obciążenia i dla wszystkich pozostałych geofonów wartość ta utrzymuje się na relatywnie stałym poziomie. To uwidacznia korzystniejszy wpływ mechanicznego odseparowania systemu mocowania geofonów od modułu generowania siły dynamicznej w porównaniu do rozwiązania zastosowanego w dwóch pozostałych urządzeniach;
- podczas prac nad systemem zauważono również, że wartość błędu sygnału z geofonu w osi obciążenia maleje wraz ze zwiększaniem ilości ciężarów zainstalowanych w urządzeniu i jednoczesnym obniżeniem wysokości zrzutu tych ciężarów (analogiczne spostrzeżenie dotyczy również sytuacji odwrotnej).

W zintegrowanym polskim systemie integralną częścią trybu rozszerzonego jest moduł szacowania cyklu życia nawierzchni (LCCA). Analiza mechanistyczna stanowi dobre jądro obliczeniowe do tego celu, oparte przede wszystkim na kryteriach zmęczenia i zasadach projektowania nawierzchni obowiązujących w Polsce. Z uwagi na ogromną ilość przypadków, które rozważa się w ramach poszczególnych iteracji analizy cyklu życia nawierzchni, do algorytmów należy wprowadzić zasady probabilistycznego doboru zabiegów wzmocnienia. Aproksymacyjne modele oparte na sztucznych sieciach neuronowych znacznie przyspieszają analizę w obliczeniach modułu LCCA.

## Bibliografia

- [1] A. Adu-Osei, D.N. Little, R.L. Lytton, Structural Characteristics of Unbound Aggregate Bases to Meet AASHTO 2002 Design Requirements: Interim Report. 2001, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, 2001
- [2] AGH, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, *Pomiary porównawcze – validacja czujnika prędkości*, Kraków, 2014
- [3] R. Al-Khoury, A. Scarpas, C. Kasbergen, J. Blaauwendraad, *Spectral element technique for efficient parameter identification of layered media. Part I: Forward calculation*, International Journal of Solids and Structures, 2001
- [4] A. Barzilai, T. VanZandt, T. Kenny, *Technique for measurement of the noise of a sensor in the presence of large background signals*, Review of scientific instruments, 69(7), 1998
- [5] Becker A., *The Boundary element method in engineering. A complete course*, McGraw-Hill, 1992
- [6] S.F. Brown, 36<sup>th</sup> Rankin Lecture: *Soil mechanics in pavement engineering*. Géotechnique, 46(3), s. 383-426, 1996
- [7] V. Buljak, T. Garbowski, *Efficient methods for optimal space filling in model reduction techniques*, In *Recent Advances in Computational Mechanics*, CRC Press, 285-292, 2014
- [8] A. Collop, *The effect of asphalt layer thickness variations on pavement evaluation using the FWD*, Int. Journal of Pavement Eng., 2007
- [9] J. Drewniak, *Wprowadzenie do metody elementów brzegowych*, Wydaw. Politechniki Łódzkiej Filii w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała, 2000
- [10] J. Fengier, A. Pożarycki, *Możliwości diagnozowania podłoża nawierzchni jezdni na podstawie uproszczonego modelu ośrodków wielowarstwowych*, Drogownictwo, 5, s. 170-177, 2014
- [11] J. Fengier, A. Pożarycki, T. Garbowski, *Stiff-Plate Bearing Test Simulation Based on FWD Results*, Procedia Engineering, 57, s. 270-277, 2013

- [12] J. Fengier, praca magisterska pod kierunkiem: A. Pożarycki, *Metoda sztucznych sieci neuronowych do identyfikacji wybranych parametrów modelu nawierzchni drogowej*, Politechnika Poznańska, 2012
- [13] J. Fengier, *Probabilistyczna analiza odwrotna danych z badań nawierzchni ugięciomierzem FWD*, Budmika 2014, Ogólnopolska studencka konferencja budowlana, 2014
- [14] T. Garbowski, *Stochastic model reduction applied to inverse analysis. Proceedings of the VI International Conference on Adaptive Modeling and Simulation ADMOS 2013*, Eds. J.P. Moitinho de Almeida, P. Díez, C. Tiago, N. Parés, CIMNE Barcelona, 2013
- [15] T. Garbowski, A. Pożarycki, *Study on sensitivity of enhanced FWD testing data to pavement model parameters*, 11<sup>th</sup>. World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), Barcelona, 2014
- [16] M. Graczyk, *Nośność konstrukcji nawierzchni wielowarstwowych w krajowych warunkach klimatycznych*, IBDiM, Warszawa, 2010
- [17] Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, Washington, DC), pp III-19–III-24 and Appendix J), 1993
- [18] B. Guzina, R. Osburn, *Effective Tool for Enhancing Elastostatic Pavement Diagnosis*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2002
- [19] R. Hadidi, N. Gucunski, *Probabilistic Inversion: A New Approach to Inversion Problems in Pavement and Geomechanical Engineering Intel. & Soft Comp. in Infra. Sys. Eng.*, SCI, 259, s. 21-45, 2009
- [20] W.S. Hall, G. Oliveto, *Boundary element method for soil structure interaction*, Springer, 2003
- [21] Y.H. Huang, *Pavement Analysis and Design*, 2nd edition, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458, 2004
- [22] L. Irwin, *Backcalculation: Basics and Beyond*, FWD Users Group, 2004
- [23] A. Janowski, S. Szpinek, D. Brzeziński, *Wykonanie serii badań na Długoterminowych Odcinkach Testowych*, GDDKiA, Warszawa, 1992-2011
- [24] S. Khushminder, P. Ullidtz, J.T. Harvey, V. Mandapaka, I. Basheer, N. Sivanesarwan, *Mechanistic-empirical and life-cycle cost analysis for optimizing flexible pavement maintenance and rehabilitation. Journal of transportation engineering*, (DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000367): 625-633, 2012
- [25] S. Kim, K. Gopalakrishnan, H. Ceylan, *Neural Networks Application in Pavement Infrastructure Materials*, In *Intelligent and Soft Computing in Infrastructure Systems Engineering*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, s. 47–66, 2009
- [26] B. Krawczyk, *Identyfikacja parametrów modeli nawierzchni drogowych na podstawie impulsowych testów dynamicznych*, Rozprawa doktorska, Wrocław, 2012
- [27] J. Maina, K. Matsui, *Elastic Multi-layered Analysis Using DE-Integration*, Publ. RIMS, Kyoto Univ., 41, s. 853–867, 2005
- [28] M. Mooney, G. Miller, S. Teh, W. Bong, *Importance of Invasive Measures in Assessment of Existing Pavements*, J. Perform. Constr. Facil., 14 (4), s. 149–154, 2000
- [29] G. Morosiuk, M. Riley, J. Odoki, *HDM4, Highway Development & Management, Modelling road deterioration and works effects*, The World Bank, version 2 edition, 2004
- [30] A. Pożarycki, *Condition assessment of lower roadway layers for pavement management systems*, Journal of Civil Engineering and Management, (doi:10.3846/13923730.2014.897987), 2014
- [31] A. Pożarycki, *Identyfikacja liczby i grubości warstw modelu nowej nawierzchni odcinka próbnego metodami sztucznej inteligencji*, Drogi i Mosty, nr 2, 2012
- [32] A. Pożarycki, T. Garbowski, *Soft computing in mechanical characterization of pavement structures*, 39th Solid Mechanics Conference, 1-5 September, Zakopane 2014
- [33] A. Pożarycki, T. Garbowski, *Identyfikacja wartości wtórnego modułu odkształcenia na podstawie impulsowych testów dynamicznych w modelu nawierzchni drogowej*, Drogownictwo, 2, s. 46-51, 2014
- [34] G. Rohde, T. Scullion *MODULUS 4.0: Expansion and Validation of the MODULUS Backcalculation System*, Techreport, Texas Transportation Institute, 1990
- [35] A. Saltelli; M. Ratto; T. Andres; F. Campolongo; J. Cariboni; D. Gatelli; M. Saisana & S. Tarantola, *Global Sensitivity Analysis. The Primer* John Wiley & Sons, Ltd, 2008
- [36] W. Sas, A. Głuchowski, *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, nr 57, s. 171–181, 2012
- [37] Praca pod kierunkiem: D. Sybilski, *Katalog Wzmocnień i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych*, IBDiM, 2001
- [38] A. Szydło, B. Krawczyk, I. Ruttmar, *Rozrzuty wyników pomiarów przemieszczeń nawierzchni rejestrowanych za pomocą ugięciomierza dynamicznego FWD*, Międzynarodowa Konferencja Nowoczesne Technologie w Budownictwie Drogowym, Poznań, 2009
- [39] A. Szydło, *Statyczna identyfikacja parametrów modeli nawierzchni lotniskowych*, Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1995
- [40] Talvik Ott and Aavik Andrus. *Use of fwd delection basin parameters (sci, bdi, bci) for pavement condition assessment*. The Baltic Journal Of Road And Bridge Engineering, 4, s. 196–202, 2009
- [41] P. Ullidtz, *Analytical tools for design of flexible pavements*. In Proceedings of the 9th International Conference on Asphalt Pavements, International Society for Asphalt Pavements, 2002
- [42] P. Ullidtz, N.F. Coetzee, *Analytical procedures in NDT Pavement evaluation*, TRB Session on Structural Modelling Application in Pavement Analysis and Design, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1995
- [43] F. Van Cauwelaert, *Pavement design and evaluation the required mathematics and its applications*, Brussels, Federation of the Belgian Cement Industry, 2003
- [44] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, *The Finite Element Method*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000