



**ANDRZEJ POŻARYCKI**

Politechnika Poznańska  
andrzej.pozarycki@put.  
poznan.pl



**PRZEMYSŁAW GÓRNAŚ**

Politechnika Poznańska  
przemyslaw.gornas@put.  
poznan.pl



**MARCIN BILSKI**

Politechnika Poznańska  
marcin.bilski@put.  
poznan.pl



**ADAM TURKOT**

Politechnika Poznańska  
adam.turkot@put.  
poznan.pl

## Parametryzacja krzywej ugięć nawierzchni podatnych

W literaturze jest wiele przykładów oceny właściwości nawierzchni na podstawie kształtu krzywych, które uzyskuje się w badaniach ugięć nawierzchni. Wiedząc, że uogólniona definicja ugięć nawierzchni w przestrzeni 3D prowadzi do pojęcia czasu ugięć, w rozważaniach dla dwuwymiarowej przestrzeni wygodnie jest analizować jej przekroje. Zakładając, że przekroje 2D są szczególnym przypadkiem trójwymiarowej bryły, nazywanie przekroju czasu ugięć krzywą ugięć nawierzchni jest naturalnym uproszczeniem i jest uzasadnione. Uzyskaną tym sposobem krzywą ugięć można parametryzować na wiele sposobów.

Zaletą jednak praktycznego zbioru parametrów, które opisują tę krzywą, jest perspektywa przypisania do każdego z nich sensu fizycznego. Co więcej, wartości tych parametrów powinny być łatwo mierzalne, a ich interpretacja musi być jednoznaczna. Zadanie to jednak okazuje się trudne, gdyż wartości parametrów oznaczane w laboratorium są obarczone błędem skali, a w badaniach nawierzchni in situ, nadmierna liczba parametrów modelu układu warstwowego, który wierne odzwierciedla warunki rzeczywiste, zmusza do szukania uproszczeń. Tego typu uproszczenia są przedmiotem badań naukowych, a wyniki tych poszukiwań w wielu przypadkach skoncentrowały się na tzw. parametrach czasu ugięć DBPs (ang. *Deflection Basin Parameters*). Jednym z bardziej kompletnych źródeł literaturowych, w którym dokonano analizy zależności proponowanych przez różnych autorów jest raport [2]. Z uwagi na dość szczególny charakter takich ocen i ich empiryczną wartość, wielkości te zestawiono również w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie najczęściej spotykanych parametrów krzywej ugięć nawierzchni [2]

| Nazwa parametru                        | Parametr   | Źródło wyników   | Autor pomysłu   |
|--|--|------------------|-----------------|
| Powierzchnia                           | $AREA = \frac{6(D_0 + 2D_{12} + 2D_{24} + D_{36})}{D_0}$   | FWD              | Hoffman 1981    |
| Powierzchnia cząstkowa                 | $AREA_2 = \frac{6(D_{12} + 2D_{18} + D_{24})}{D_0}$<br>$AREA_3 = \frac{6(D_{24} + 2D_{36} + D_{48})}{D_0}$   | FWD              |                 |
| Wskaźniki powierzchni                  | $AI_1 = \frac{D_0 + D_{12}}{2D_0}$<br>$AI_2 = \frac{D_{12} + D_{24}}{2D_0}$<br>$AI_3 = \frac{D_{24} + D_{36}}{2D_0}$<br>$AI_4 = \frac{D_{36} + D_{48}}{D_0}$ | FWD              |                 |
| Powierzchnia                           | $AUPP = \frac{5D_0 - 2D_{12} - 2D_{24} - D_{36}}{2}$   | FWD              | Hill & Thompson |
| Wskaźnik krzywizny ugięć na podbudowie | $BCI = D_{60} - D_{48}$ or<br>$BCI = D_{24} - D_{36}$  | Dynaflect<br>FWD | Peterson 1972   |
| Wskaźnik uszkodzeń podbudowy           | $BDI = D_{12} - D_{24}$  | RR & FWD         |                 |
| Wskaźnik zginania                      | $BI = D_0 / a$   | BB               | Hveem 1954      |
| Iloraz ugięć                           | $DR = D_r / D_0$   | FWD              | Classen 1976    |
| Wskaźnik wpływu obciążenia             | $LSI = (D_{48} / D_{24}) \times F$   | FWD              | Wimsatt 1995    |
| Wartość maksymalna ugięcia             | $D_0$  | BB<br>Dynaflect  | Shrivner 1968   |
| Promień krzywizny                      | $R = \frac{r^2 *}{(2D_0(D_0 / D_r - 1))}$  | CM & BB          | Dehlen 1962     |
| Promień wpływu                         | $RI = x / D_0$   | BB               | Ford 1962       |

Tabela 1. Zestawienie najczęściej spotykanych parametrów krzywej ugięć nawierzchni [2] (cd.)

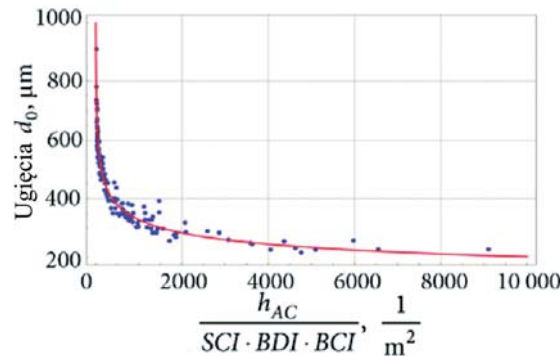
| Nazwa parametru                                       | Parametr  | Źródło wyników        | Autor pomysłu |
|---|---|-----------------------|---------------|
| Współczynniki kształtu                                | $F_1 = (D_0 - D_{24}) / D_{12}$<br>$F_2 = (D_{12} - D_{36}) / D_{24}$ | FWD                   | Hoffman 1981  |
| Współczynnik kształtu                                 | $F_3 = (D_{24} - D_{48}) / D_{36}$                                    | FWD                   |               |
| Wskaźnik nachylenia                                   | $SD = \tan^{-1} [(D_0 - D_r) / r]$                                    | BB                    | Kung 1967     |
| Wskaźnik wpływu                                       | $S = \frac{25(D_0 + D_{12} + D_{24} + D_{36})}{D_0}$                  | Dynalect<br>RR FWD    | Vaswani 1971  |
| Wskaźnik wytrzymałości                                | $SSI = A_x / (X_{\min} x E_{\min})$                                   | FWD                   | Jung 1992     |
| Wskaźnik spójności                                    | $SII = A_x / (X_s x E_m)$   | FWD                   | Jung 1992     |
| Wskaźnik krzywizny linii ugięć na powierzchni warstwy | $SCI = D_0 - D_{12}$  | BB RR Dynalect<br>FWD | Shrivner 1968 |
| Nachylenie stycznej                                   | $TS = (D_0 - d_x) / x$  | FWD                   | Stock 1984    |

Legenda:

- Dr – wartość ugięcia oznaczona na powierzchni warstwy;
- r – dystans między miejscami oznaczenia wartości ugięcia nawierzchni, a osią obciążenia;
- a – ¼ długości krzywej ugięć nazywanej „czaszą”;
- x – odległość od miejsca, w którym wartość ugięcia jest największa do punktu styczności;
- d – wartość ugięcia w punkcie styczności;
- F – minimalna wartość z D12/D0, D24/D12, ..., lub D72/D60;
- Ax – powierzchnia pod krzywą opisującą funkcję tzw. „modułu powierzchniowego”;
- Em – szacowana wartość modułu podbudowy;
- Xs – długość promienia dla układu osiowo-symetrycznego;
- BB – analiza na podstawie wyników z pomiarów belka Benkelmana;
- RR – analiza na podstawie wyników z pomiarów urządzeniem ang. *Road Rater*;
- FWD – analiza na podstawie wyników z pomiarów urządzeniem typu FWD;
- CM – analiza na podstawie wyników z pomiarów krzywiznomierzem;
- \* – r = 127 mm.

Potwierdzenie praktycznych aspektów parametryzacji wykazano między innymi w pracach [1] czy [4]. We wnioskach pracy [1] stwierdzono, że istnieje silna korelacja statystyczna pomiędzy parametrami SCI oraz BDI, a wartościami równoważnego modułu sztywności ( $E_{eq}$ ) obliczonego dla modelu jednowarstwowego nawierzchni metodą obliczeń odwrotnych. Z kolei w pracy [4] próbuje się powiązać parametry krzywej ugięć z maksymalną wartością odkształceń występujących na powierzchni podłoża nawierzchni.

$$d_0 = a \frac{1}{\left( \frac{h_{AC}}{SCI \cdot BDI \cdot BCI} \right)^{0.1}}$$



Rys. 1. Opis zależności funkcyjnej  $d_0 = f(a, h_{AC}, SCI, BDI, BCI)$  jaką wyznaczono podczas analizy badań ugięć odcinka nawierzchni [3] o długości 30 km, w której: a – parametr regresji,  $d_0$  – wartości ugięć nawierzchni oznaczone w osi obciążenia,  $h_{AC}$  – łączna grubość wszystkich warstw asfaltowych; SCI, BDI, oraz BCI są wyjaśnione w dalszej części artykułu

W pracy [3] opisano też relatywnie prosty przypadek zależności, jaka zachodzi między parametrami krzywej ugięć, a wartością maksymalnych ugięć nawierzchni podatnej uzyskanych w pomiarach ugięciomierzem dynamicznym typu FWD [3]. Populacja wyników opisanych tam badań pochodzi z badań nawierzchni na jednej z dróg w Polsce. Temperatura nawierzchni podczas badań wynosiła od 15 do 30 st. C, a wiercenia geotechniczne wykonano na obu pasach ruchu w odległościach między sobą co 50 m. Ilustrację zależności, w przypadku której uzyskano wartość współczynnika determinacji  $> = 0.95$  przedstawiono na rysunku 1.

W raporcie [2] autorzy przedstawili analizę prowadzoną przy założeniach, że przekrój po-

przecznym nawierzchni ma trzy charakterystyczne strefy: 1) „górną”, 2) „środkową”, 3) „dolną”. Ze strefą „górną” utożsamia się warstwa o największej sztywności, a więc warstwa wykonane w technologiach MMA i BC. Strefa „środkowa” to warstwa podbudowy pomocniczej (KŁSM, KNSM i stabilizowane cementem). Strefa „dolna” to strefa o najmniejszej sztywności, a więc podłoże nawierzchni. W dalszej kolejności do każdej strefy przypisano znaczenie fizyczne parametrów SCI (ang. *surface curvature index*; „wskaźnik krzywizny powierzchni”), BDI (ang. *base damage index*; „wskaźnik uszkodzenia podbudowy”) oraz BCI (ang. *base curvature index*; „wskaźnik krzywizny podbudowy”).

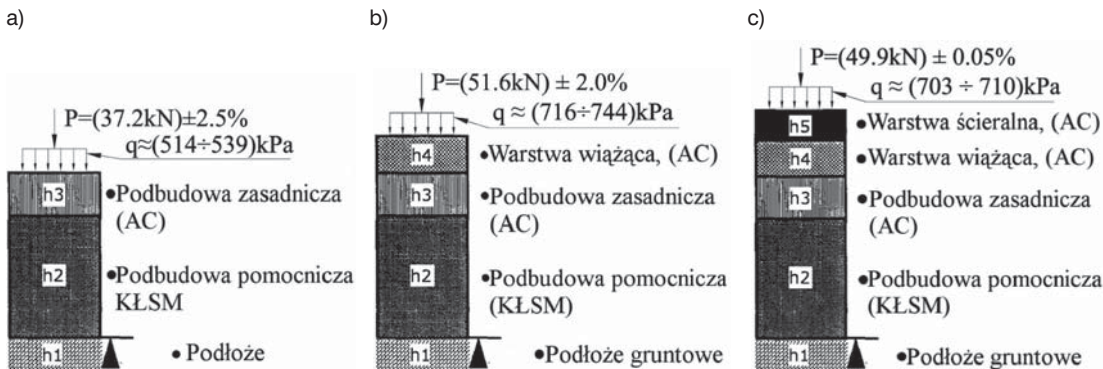
Ostatecznie stawia się hipotezę, że wskaźniki SCI, BDI oraz BCI niosą w sobie ładunek informacji o stanie technicznym odpowiednio „górną”, „środkowej” oraz „dolnej” strefy nawierzchni. Najbardziej subiektywnym zadaniem w takim podejściu jest ostateczne sformułowanie kryteriów. Bardzo obszerną analizę tego procesu oparto na bazie danych systemu utrzymania nawierzchni, której opis czytelnik znajdzie również w pracy [2].

## Cel i metody

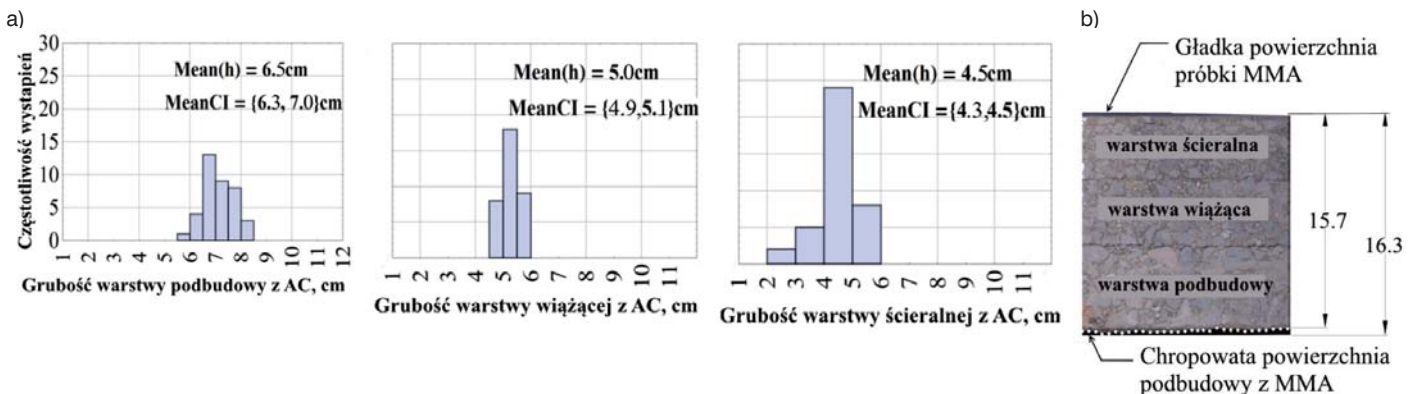
W artykule omówiono wybrane aspekty praktycznej weryfikacji założeń w nawiązaniu do roli jaką przypisuje się parametryzacji krzywej ugięć nawierzchni. Pod uwagę wzięto trzy znane w tym obszarze badawczym parametry SCI, BDI, BCI oraz cztery inne parametry, które zdefiniowane zostały za sprawą kształtu funkcji aproksymacyjnej, zaproponowanej przez autorów do opisu wyników badań ugięć nawierzchni podatnych. Do weryfikacji wykorzystano wyniki badań, które uzyskano dla nawierzchni odcinka testowego, wykonanego w ściśle kontrolowanych warunkach [5].

## Odcinek badawczy

Do analizy wzięto pod uwagę wyniki badań ugięć nawierzchni, które odpowiadają typowemu układowi warstw nawierzchni asfaltowych w Polsce dla kategorii ruchu KR3. Zbiór wyników zbudowano na podstawie badania ugięć nawierzchni na powierzchni każdej warstwy asfaltowej wchodzącej w skład przekroju poprzecznego (rysunek 2). Warstwy asfaltowe ułożone zostały na podbudowie pomocniczej o grubości 20 cm. Podbudowę wykonano z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie (KŁSM) o uziarnieniu 0/31,5 mm, a w podłożu stwierdzono grunty spoiste w stanie twaroplastycznym.



Rys. 2. Schematy konstrukcji nawierzchni poddanych badaniom ugięć, a) przekrój numer 1, b) przekrój nr 2, c) przekrój numer 3



Rys. 3. a) Histogramy grubości warstw asfaltowych na podstawie próbek walcowych wyciętych z odcinka testowego w odstępach co 1 m (ang. Mean (h) oznacza średnią grubość oznaczoną na podstawie 6 próbek, ang. MeanCI oznacza średnią szerokość przedziału ufności 95%), b) zdjęcie ortogonalne przekroju próbki wyciętej z warstw asfaltowych nawierzchni odcinka testowego obrazujące przypadek grubości minimalnych i maksymalnych, które wynikają z oznaczania grubości na chropowatych powierzchniach warstw asfaltowych ułożonych na warstwie z KŁSM

Długość odcinka do badań wynosiła 30 m, przy czym, w celu uniknięcia negatywnego wpływu warunków brzegowych związanych z technologią wykonywania nawierzchni podatnych, za odcinek miarodajny uznano odcinek nawierzchni od 10,5 do 19,5 m. W konsekwencji na odcinku testowym o długości 9 m wykonano pomiary, których opis zilustrowano na rysunkach 3 i 4.

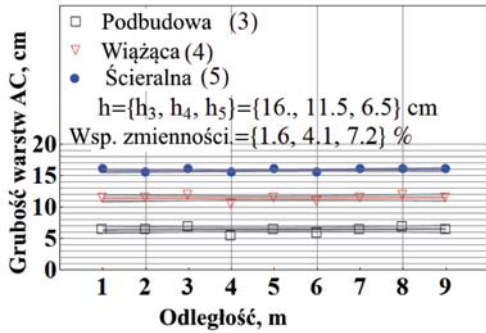
W przypadku pomiarów belką Benkelmana wartość w 6 metrze odcinka uznano za pomiar odstający. Jednak z uwagi na specyfikę materiału do budowy warstw z kruszywa podjęto decyzję, że w analizie uwzględnione zostaną wszystkie wartości. Do badań sztywności próbek wyciętych ze wszystkich trzech warstw asfaltowych wykorzystano procedurę testu zginania belki pryzmatycznej (4PBB). Próbki belkowe badano w temperaturze 15 st. C. Temperatura warstw asfaltowych, podczas pomiarów urządzeniem FWD, wahała się w granicach od 16 do 18 st. C. Na podstawie pulsu obciążenia, generowanego przez ugięciomierz dynamiczny ustalono, że średnia częstotliwość przyłożonego obciążenia w tym teście jest równa 18 Hz (w ogólnym przypadku należy pamiętać, że wartości te nie są stałe [6]).

## Klasyczna parametryzacja krzywej ugięć nawierzchni

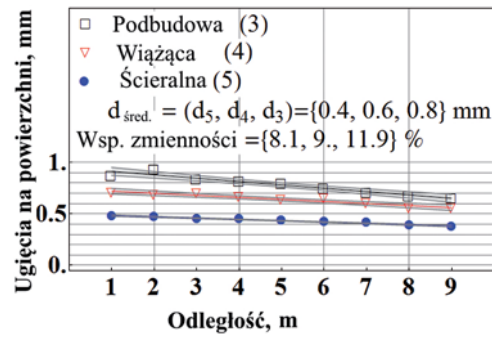
W standardowej analizie DBP, do wyrażenia postaci i wartości parametrów SCI, BDI i BCI wykorzystuje się wartości dyskretne, zaznaczone czerwonym kolorem na wykresach z rysunku 5.



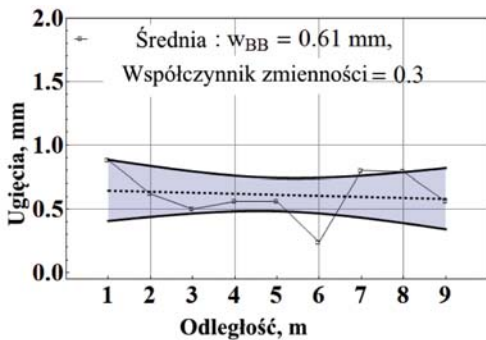
a) Grubości warstw asfaltowych nawierzchni odcinka testowego



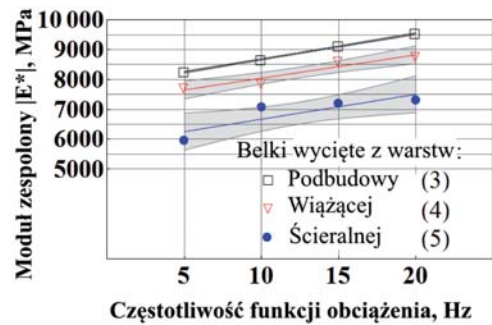
b) Maksymalne wartości ugięć nawierzchni (metoda FWD)



c) Wartości ugięć zmierzone na powierzchni warstwy KŁSM



d) Wartości zespolonych modułów sztywności oznaczonych metodą 4PBB w temperaturze 15 st. C w funkcji częstotliwości siły obciążenia



Rys. 4. Wyniki badań wybranych elementów nawierzchni odcinka testowego o długości 9 m

### Parametryzacja krzywej ugięć nawierzchni zbudowanej na jądrze funkcji opisującej rozkład t-Studenta

Warto zauważyć, że do zagadnienia parametryzacji można podejść też inaczej. Jeżeli zauważy się, że za podstawą matematycznego opisu kształtu krzywej zbudowanej na podstawie zmierzonych wartości ugięć nawierzchni jest jądro funkcji rozkładu t-Studenta, to do opisu krzywej ugięć nawierzchni można wykorzystać funkcję ciągłą. Do aproksymacji można wykorzystać dowolny algorytm optymalizacyjny. W artykule wykorzystano algorytm Nelder-Mead szerzej opisany w [7].

Tym samym zamiast korzystać z dyskretnych postaci wzorów (1) można skorzystać z postaci funkcji opisanych wzorami (2) (3) (4):

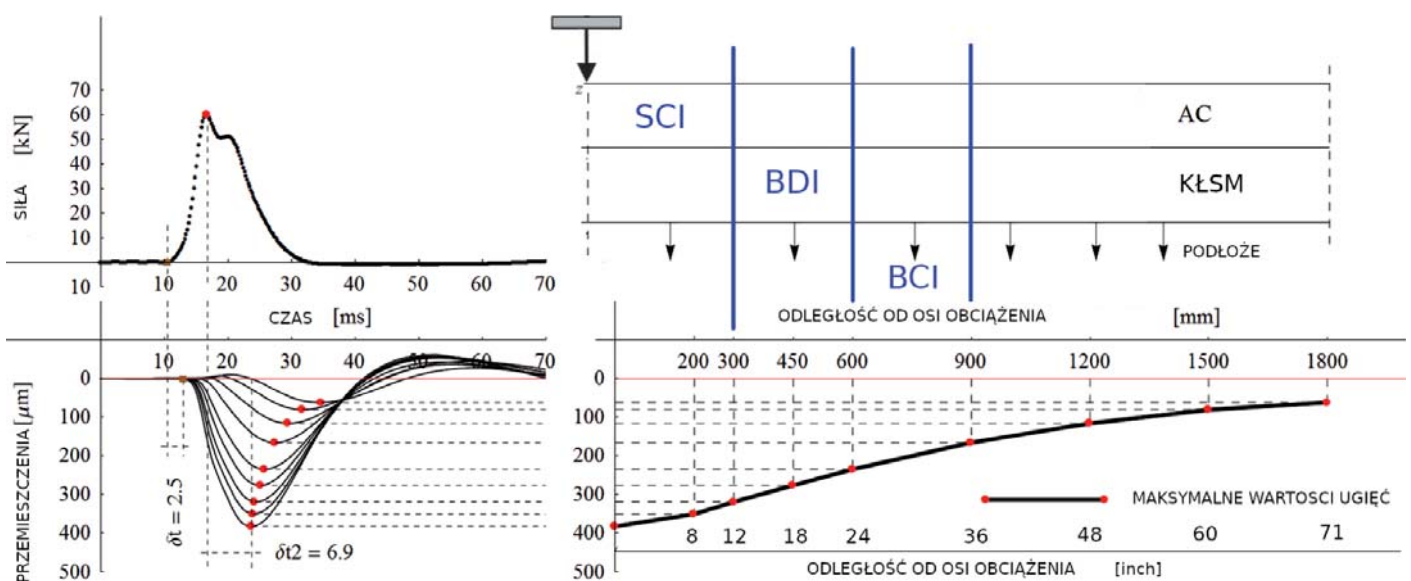
Biorąc pod uwagę kształt krzywej ugięć nawierzchni, do obliczenia wartości przedmiotowych wskaźników w układzie SI przedstawiają wzory (1)

$$\begin{aligned} \text{SCI} &= D_0 - D_{300} \text{ [m]} & \text{BDI} &= D_{300} - D_{600} \text{ [m]} \\ \text{BCI} &= D_{600} - D_{900} \text{ [m]} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{SCI} = w[x_{0,30}] = w(x = 0) - w(x = 300) \text{ [m]} \quad (2)$$

$$\text{BDI} = w[x_{30,60}] = w(x = 300) - w(x = 600) \text{ [m]} \quad (3)$$

$$\text{BCI} = w[x_{60,90}] = w(x = 600) - w(x = 900) \text{ [m]} \quad (4)$$



Rys. 5. Schemat tworzenia klasycznego kształtu krzywej ugięć nawierzchni (rysunek należy przeglądać rozpoczynając od lewego górnego wykresu i potem przeciwnie do ruchu wskazówek zegara)

Rys. 6. Postać funkcji do aproksymacji wartości ugięć nawierzchni oznaczanych urządzeniami typu FWD (przy założeniu, że do pomiarów użyto przynajmniej 7 geofonów). Punkty oznaczone niebieską gwiazdką o wartościach współrzędnych mniejszych od zera są symetryczne względem osi rzędnych. Wprowadzono je w celu ułatwienia procesu obliczeniowego w trakcie dopasowania sparametryzowanej funkcji do rzeczywistych wyników badań

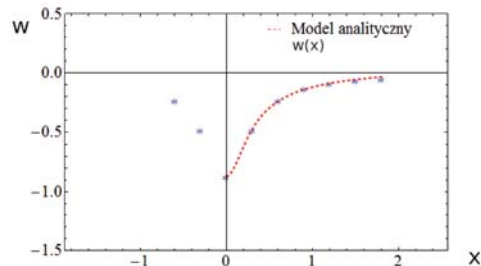
a) Postać funkcji aproksymacji krzywej ugięć

$$w([\alpha, 1, \gamma], x, [a, b]) = a - \frac{b \left( \frac{\gamma}{\gamma + (x - \alpha)^2} \right)^{\frac{1+\gamma}{2}}}{\sqrt{\gamma} \text{Beta} \left( \frac{\gamma}{2}, \frac{1}{2} \right)}$$

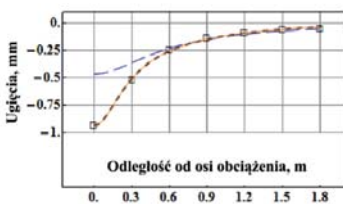
Gdzie:

- $\alpha$  i  $\gamma$ : parametry funkcji  $w(x)$
- $a, b$ : parametry skali
- Beta: funkcja Beta Eulera.

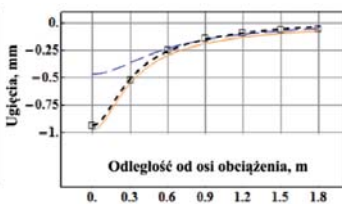
b) Graficzna ilustracja funkcji  $w(x)$



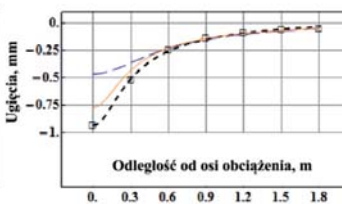
a)  $p = [a, b, a, \gamma]$



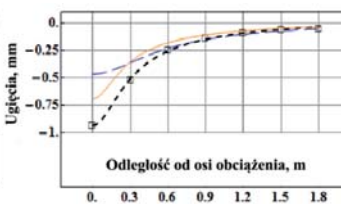
b)  $p = [0,5a, b, a, \gamma]$



c)  $p = [0,5a, 0,8b, a, \gamma]$



d)  $p = [0,5a, 0,8b, a, 0,8\gamma]$



Rys. 7. Przykłady zmian kształtu krzywej ugięć na zmianę wartości parametrów funkcji aproksymacyjnej

Takie spojrzenie pozwala na szersze studium wrażliwości krzywej ugięć na reakcję poszczególnych stref nawierzchni w porównaniu do formuły dyskretnej (np. studiując inne wartości argumentów 'x' w porównaniu do tych, które wynikają z podstawowych zależności SCI, BDI oraz BCI, ale wykracza to poza ramy tego artykułu). Funkcja  $w(x)$  okazuje się dobrym przybliżeniem kształtu krzywej ugięć nawierzchni, które uzyskano w przypadku wyników badań empirycznych na odcinku testowym. Na rysunku 7 pokazano jak zmienia się kształt tej funkcji w odniesieniu do zmian wartości jej parametrów. Krzywe zaznaczone kolorami niebieskim i czarnym pokazane są na wykresach w celach porównawczych, przy czym krzywa zaznaczona kolorem niebieskim pochodzi ze zbioru wyników uzyskanych w pomiarach na nawierzchni, której schemat przekroju poprzecznego pokazano na rysunku 2c, a krzywa oznaczona kolorem czarnym z pomiarów na nawierzchni o przekroju pokazanym na rysunku 2a.

## Wyniki badań i ich charakterystyka

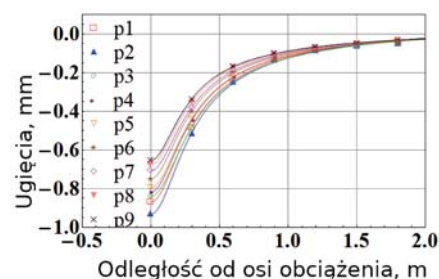
Wykresy funkcji aproksymacyjnych wykonanych dla oznaczonych ugięć nawierzchni uzyskanych na podstawie pomiarów odcinka testowego pokazano na rysunku 8.

Parametry wykorzystanej funkcji aproksymacyjnej, w powiązaniu z wynikami badań analizowanych układów konstrukcyjnych nawierzchni zaprezentowanych na rysunkach 2 a, b oraz c, opisują obraz zmian, które towarzyszą budowie klasycznego przekroju poprzecznego nawierzchni z trzema warstwami asfaltowymi. W pierwszej kolejności na rysunku 9 pokazano histogramy wartości parametrów 'a, b, alfa, gamma'.

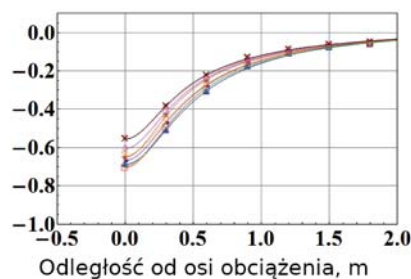
Rozkłady empiryczne (rysunek 9) wartości parametrów funkcji  $w(x)$ , stanowią miarę wielkości "statycznych" i nie mówią nic na temat dynamiki ich zmian wzdłuż odcinka testowego. Obraz wartości parametrów w kontekście dynamiki ich zmian w funkcji zmiany miejsca pomiaru ugięć nawierzchni przedstawiono na rysunku 10.

Pomiary ugięć nawierzchni odcinka testowego na warstwach:

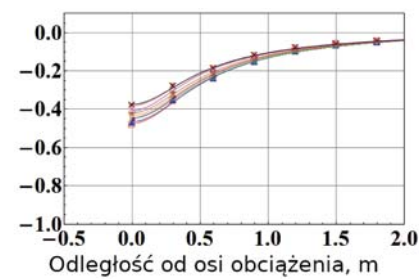
a) AC, podbudowa



b) AC, warstwa wiążąca

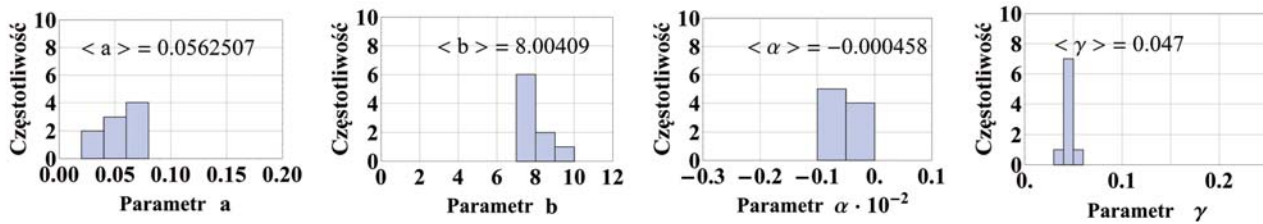


c) AC, warstwa ścieralna

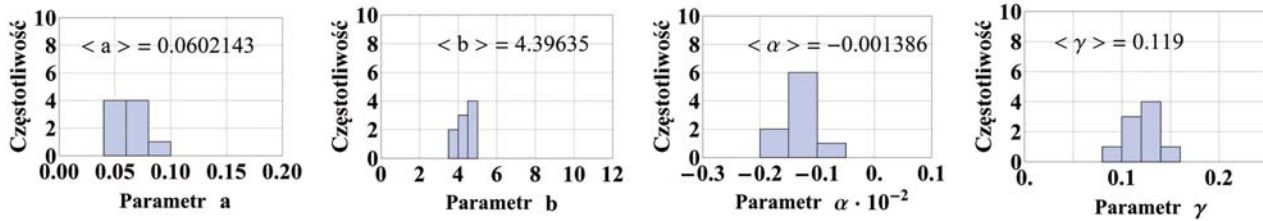


Rys. 8. Graficzne zestawienie wyników pomiaru ugięć nawierzchni odcinka testowego (symbole pokazane na rysunku od p1 do p9) oznaczają miejsca, w których wykonany został pomiar urządzeniem typu FWD, a opis osi rzędnych dla każdego z wykresów jest identyczny w każdym przypadku)

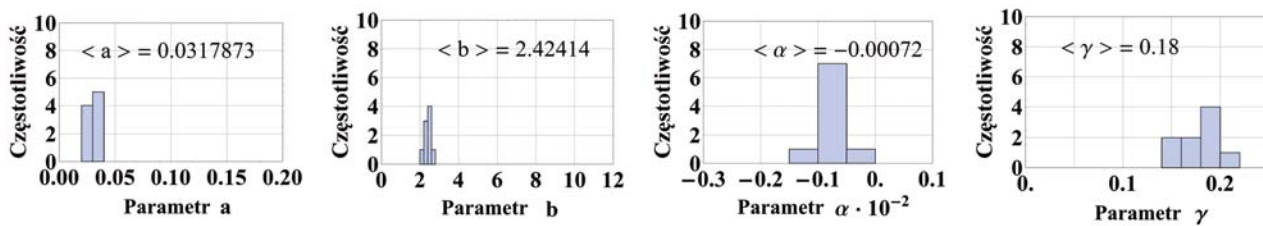
a) AC, warstwa podbudowy



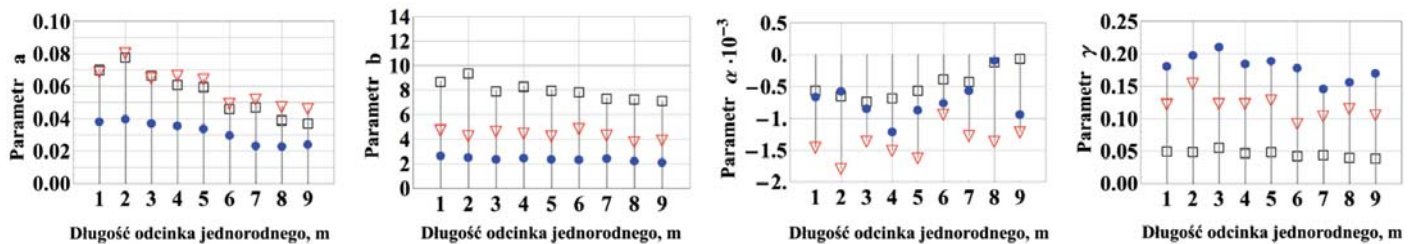
b) AC, warstwa wiążąca



c) AC, warstwa ścieralna



Rys. 9. Charakterystyka rozkładów empirycznych wartości parametrów funkcji  $w(x)$  w zależności od układu konstrukcyjnego nawierzchni



Rys. 10. Dynamika zmian wartości parametrów funkcji aproksymującej wartości ugięć nawierzchni w zależności od tego, na której warstwie asfaltowej nawierzchni wykonano pomiary ugięć

## Dyskusja wyników

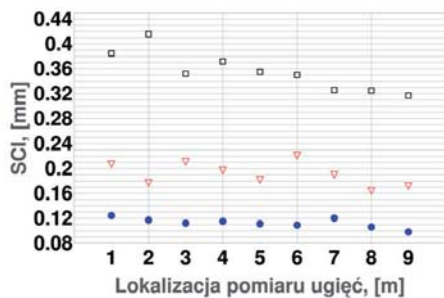
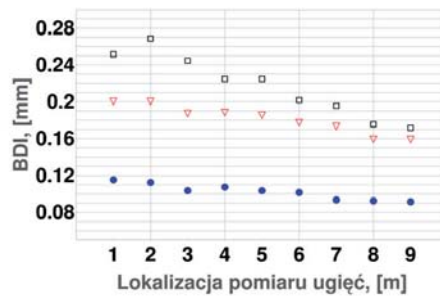
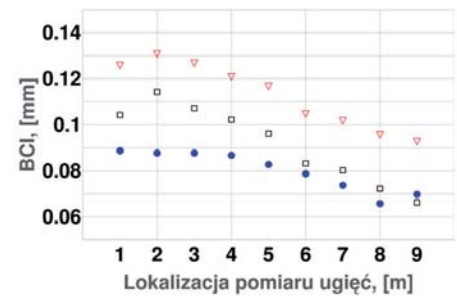
U podstaw sformułowanej tezy są wyniki pomiaru ugięć nawierzchni odcinka testowego, pokazane na rysunkach 2b oraz 2c. Wiedząc, że:

- grubości warstw asfaltowych we wszystkich 9 miejscach pomiaru ugięć nawierzchni odcinka testowego są do siebie zbliżone, a wartość współczynnika zmienności, który jest miarą rozrzutu statystycznego, jest mniejsza niż 7,2%;
- długość odcinka testowego wynosi 9 metrów, a więc można założyć, że mieszanka mineralno-asfaltowa ułożona na całej długości tego odcinka pochodzi z jednej dostawy;
- grubość warstwy z KŁSM jest stała, a jej średnia wartość wynosi 20 cm;
- wartości sił przy obciążeniach podczas pomiarów urządzeniem typu FWD można uznać za wartości stałe (po-

ziom statystycznego rozproszenia wyników jest zadowalająca, rysunki 2a, b oraz c);

- wartości ugięć są znormalizowane do temperatury równej 20 st. C i wartości siły równej 50 kN;
- przyczyną, dla której wartości ugięć nawierzchni maleją (patrząc w kierunku od punktu oznaczonego symbolem 'p1' [początek odcinka] do punktu 'p2' [koniec odcinka]), może być tylko zmiana stanu technicznego jej podłoża. Uwaga ta dotyczy wszystkich przypadków pomiaru ugięć nawierzchni, tzn. zarówno na warstwie KŁSM (pomiar metodą belki Benkelmana), jak i na warstwach asfaltowych, na których pomiary wykonano urządzeniem typu FWD. Jeżeli hipoteza o zmianie warunków w podłożu jest prawdziwa, to uzyskuje się możliwość praktycznej weryfikacji założeń odnośnie roli wskaźnika BCI w ocenie bezinwazyjnej podłoża nawierzchni. Spośród wykresów pokazanych na rysunku 11, zmiany wartości wskaźnika BCI są oznaczone literą 'c'.



a) SCI  $\rightarrow w[x_{0,30}]$ b) BDI  $\rightarrow w[x_{30,60}]$ c) BCI  $\rightarrow w[x_{60,90}]$ 

Rys. 11. Wartości parametrów krzywej ugięć dla wszystkich 9 miejsc pomiarowych (oznaczonych na osi poziomej) zlokalizowanych na nawierzchni odcinka testowego (czarne kwadraty oznaczają wyniki uzyskane na podstawie pomiaru ugięć na warstwie podbudowy, czerwone trójkąty na warstwie wiążącej, a niebieskie punkty ilustrują wyniki obliczeń opartych na pomiarach ugięć na warstwie ścieralnej)

## Podsumowanie i wnioski

W artykule analizie poddano odcinek testowy nawierzchni o długości równej 9 metrom. W ściśle kontrolowanych warunkach wykonana została nawierzchnia podatna typowa dla kategorii ruchu KR3. Podłoże spoiste nawierzchni zostało tylko zagęszczone walcami w sposób 'statyczny'. W dalszej kolejności ułożone zostały warstwa z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie oraz trzy warstwy z betonu asfaltowego. W momencie, gdy poszczególne etapy budowy nawierzchni były zakończone, do zbioru wyników badań dołączano konsekwentnie wyniki badania ugięć nawierzchni oraz wyniki badań próbek pobranych z miejsca budowy. Do analizy wzięto pod uwagę trzy znane w tym obszarze badawczym parametry SCI, BDI, BCI oraz cztery inne parametry, które zdefiniowane zostały na podstawie dopasowania kształtu funkcji aproksymacyjnej zaproponowanej przez autorów do opisu wyników badań ugięć nawierzchni podatnych. Na tej podstawie sformułowano następujące wnioski:

1) Stwierdza się, że weryfikacja interpretacji roli parametru BCI jako wskaźnika, który ma w sobie potencjał do wnioskowania o stanie technicznym podłoża nawierzchni jest zgodna z oczekiwaniami. Bez względu na łączną grubość warstw asfaltowych (w przedziale od 6,5 do 15,5 cm) wartości parametru BCI wskazują, że stan techniczny podłoża na długości odcinka testowego nawierzchni się zmienia.

2) Zgodnie z interpretacją wartości parametrów SCI, wartości parametrów SCI zgodnie z oczekiwaniami są relatywnie stałe na całej długości odcinka testowego. Dotyczy to jednak wyłącznie pomiarów ugięć nawierzchni wykonanych na warstwach asfaltowych o łącznej grubości 10 cm i więcej. Biorąc pod uwagę analizę wyników badań laboratoryjnych modułów sztywności dla próbek wyciętych z warstw asfaltowych, z całą pewnością można stwierdzić, że uzyskane wartości są typowe dla warstw 'nowych'. To oznacza, że wnioskowanie o stanie technicznym warstw nawierzchni usytuowanych w „górnjej” strefie na podstawie wartości parametru SCI, jest najbardziej wiarygodne w przypadku gdy badania ugięć nawierzchni zostały zrealizowane na nawierzchni, w której łączna grubość warstw asfaltowych wynosi 10 cm lub więcej.

3) Wartości parametrów BDI są relatywnie stałe tylko przy pomiarach ugięć nawierzchni na warstwach asfaltowych o grubości powyżej 15 cm.

4) Parametr 'a' funkcji aproksymacyjnej zaproponowanej do opisu dyskretnych wartości ugięć nawierzchni z pomiarów urządzeniem typu FWD prowadzi do identycznych wniosków co analiza wartości parametru BCI.

W podsumowaniu należy podkreślić, że uwagi sformułowane w artykule dotyczą nawierzchni jednego odcinka testowego. Mimo że odcinek wykonany został w kontrolowanych warunkach i autorzy dołożyli wszelkich starań aby zadbać o obiektywizm tych rozważań, wnioski należy traktować jako podstawę do wytyczenia dalszych kierunków badań, które jednoznacznie muszą być skoncentrowane na poszukiwaniu kryteriów oceny dla opisanych tu parametrów.

## Bibliografia

- [1] Use of FWD deflection basin parameters (SCI, BDI, BCI) for pavement condition assessment, Ott Talvik1, Andrus Aavik2, The Baltic Journal Of Road And Bridge Engineering 2009 4(4): 196–202
- [2] Kim, Y. R., S. R. Ranjithan, J. D. Troxler, and Bing Xu. Assessing Pavement Layer Condition Using Deflection Data. NCHRP 10-48 Final Report, 2000
- [3] Pożarycki A., Improving the pavement diagnostic accuracy by asphalt layers thickness and fatigue life assessment with controlled application of artificial neural network. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2014 (accepted for printing)
- [4] Bilodeau, J.-P., Doré, G., 2014. Direct Estimation of Vertical Strain at the Top of the Subgrade Soil from Interpretation of Falling Weight Deflectometer Deflection Basins, Canadian Journal of Civil Engineering 41(5): 403–408. <http://dx.doi.org/10.1139/cjce-2013-0128>
- [5] Pożarycki A., Analiza trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych, Rozprawa doktorska, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, strony 1-176, Poznań 2009 r.
- [6] Pożarycki A., Górnaś P., Wanatowski D., The influence of frequency normalisation of FWD pavement measurements on backcalculated values of stiffness moduli, Road Materials and Pavement Design, 2017, [doi.org/10.1080/14680629.2017.1374991](https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1374991)
- [7] Gao F., Han L., Implementing the Nelder–Mead simplex algorithm with adaptive parameters. Computational Optimization and Applications, 51(1), 259–277, (2012)