

Diagnostyka nawierzchni drogowych i lotniskowych z wykorzystaniem zaawansowanych badań dynamicznych

Bartłomiej Krawczyk, Piotr Mackiewicz



dr inż. Bartłomiej Krawczyk

Politechnia Wrocławska,
Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego, Zakład Dróg i Lotnisk

b.krawczyk@pwr.wroc.pl



dr inż. Piotr Mackiewicz

Politechnia Wrocławska,
Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego, Zakład Dróg i Lotnisk

piotr.mackiewicz@pwr.edu.pl

Zadanie badawcze „Diagnostyka nawierzchni drogowych i lotniskowych z wykorzystaniem zaawansowanych badań dynamicznych” realizowane było w Katedrze Dróg i Lotnisk, w ramach tematu „Innowacyjne metody badań jako źródło wiedzy o infrastrukturze transportowej”, jako jeden ze strategicznych programów badań naukowych i prac rozwojowych unijnego Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, w latach 2010 – 2014. W niniejszym artykule autorzy pokrótce przedstawiają wybrane dokonania w ramach realizacji powyższego zadania oraz wskazują kierunki dalszych badań prowadzonych w Katedrze Dróg i Lotnisk (obecnie Zakład Dróg i Lotnisk) po zakończeniu Programu, w tematyce stosowania metod dynamicznych w diagnostyce nawierzchni drogowych i lotniskowych.

Podstawowym zadaniem konstrukcji nawierzchni drogowej jest przeniesienie określonej liczby obciążeń w założonym okresie eksploatacji, przy zachowaniu właściwego poziomu bezpieczeństwa. W wyniku oddziaływania wielu czynników na nawierzchnie, ulega ona systematycznej degradacji. Zadaniem administracji drogowych jest właściwa ocena stanu nawierzchni, stopnia degradacji, jak również prognozowanie jej dalszego zachowania podczas eksploatacji. Analizy te w znacznym stopniu opierają się na pomiarach przemieszczeń pionowych (ugięć) nawierzchni pod znanym obciążeniem. Dotychczasowa metodyka wykorzystuje statyczne podejście do pomiarów ugięć nawierzchni. Nawet, jeżeli stosowane są dynamiczne metody pomiarów ugięć, to do analiz używa się statycznych modeli nawierzchni, co prowadzi do istotnego konfliktu metodologicznego – wyniki pomiarów uzyskane w metodach dynamicznych wykorzystywane są do identyfikacji parametrów w modelach statycznych. Badania dynamiczne (Falling Weight Deflectometer), w

odróżnieniu od badań statycznych (Belka Benkelmana, VSS), są niezwykle efektywne czasowo i kosztowo, przez co stosowane są chętnie przez administrację drogową na całym świecie i stopniowo wypierają (długotrwałe i kosztowne) pomiary statyczne. Pozwalają one przy tym na dokładne symulowanie czasu i wartości oddziaływania kół pojazdów na nawierzchnie drogowe, jednak nie ma na chwilę obecną opracowanych i zweryfikowanych modeli nawierzchni, pozwalających na wyznaczenie przemieszczeń pionowych (ugięć) konstrukcji pod obciążeniem dynamicznym. Zasadniczym celem Zadania było opracowanie algorytmów i sposobów identyfikacji parametrów statycznych modeli nawierzchni drogowych, z wykorzystaniem dynamicznych metod pomiarów ugięć, które pozwoliłyby na ocenę trwałości eksploatacyjnej nawierzchni drogowych oraz jej poszczególnych warstw i podłoża gruntowego, z uwzględnieniem dynamicznego (rzeczywistego) charakteru obciążenia nawierzchni kołem pojazdu.

Podczas realizacji zadania badawczego przeprowadzono badania ugięciomierzem dynamicznym FWD na kilkudziesięciu nawierzchniach drogowych o zróżnicowanej konstrukcji. Zasadę działania ugięciomierza dynamicznego FWD autorzy przedstawili we wcześniejszych publikacjach, jak np. [11, 5]. Widok urządzenia FWD, podczas pomiarów przy realizacji Zadania, przedstawiono na rys. 1.

Wpływ wartości i powtarzalności obciążenia na rejestrowane ugięcia konstrukcji nawierzchni

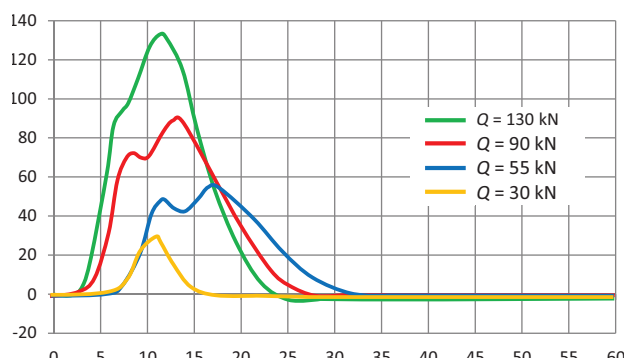
Ugięciomierz dynamiczny typu FWD wywołuje impuls siłowy o różnej wartości i czasie trwania, w zależności od wysokości zrzutu i wielkości ciężaru spadającego swobodnie na płytę naciskową. Kluczowe jest, by wywierany podczas badania impuls obciążający zbliżony był do rzeczywistego obciążenia nawierzchni kołem pojazdu/samolotu. Dobierając masę, wysokość zrzutu oraz charakterystykę układu tłumiącego można uzyskiwać impuls o wartości od 7 do nawet 300 kN, w wersjach urządzenia przeznaczonych do badania nawierzchni lotniskowych. Powszechnie stosowanym obciążeniem przy pomiarach ugięć konstrukcji nawierzchni drogowych

jest 50-57,5 kN, co odpowiada naciskowi osi 100-115 kN. Podczas trwania impulsu przemieszczenia (ugięcia) nawierzchni mierzone są przez czujniki (geofony) rozmieszczone w osi obciążenia (bezpośrednio pod płytą naciskową) oraz w dodatkowych punktach, w ustalonej odległości od płyty – zwykle na odcinku około 2 m. Zbiór takich przemieszczeń wyznaczony na danym stanowisku pomiarowym tworzy tzw. „czaszę przemieszczeń”, która następnie może być wykorzystywana jest do identyfikacji modułów warstw i podłoża. Zasadę działania geofonu wyjaśniono w [11]. Na rys. 2 przedstawiono przykładowe impulsy o różnej wartości i czasie trwania, natomiast na rys. 3 przedstawiono przebiegi czasowe (oscylogramy) przemieszczeń pionowych (ugięć) nawierzchni, zarejestrowane przy impulsie odpowiadającym obciążeniu nawierzchni kołem pojazdu ciężarowego, pod geofonem centralnym (w osi obciążenia) oraz w odległości 1,8 m od osi obciążenia (geofon skrajny).

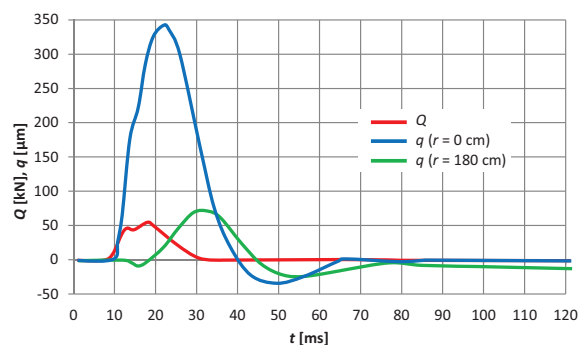
W obowiązującym modelu nawierzchni (uwarstwiona półprzestrzeń sprężysta) zakłada się liniową zależność między przyłożonym obciążeniem a przemieszczeniem (ugięciem) konstrukcji nawierzchni. Modele nawierzchni szerzej omówiono w [2, 9]. Z uwagi na specyfikę materiałów używanych do budowy, zwłaszcza materiałów sypkich i podłoża, model linowo-sprężysty jest pewnym przybliżeniem. Z każdym kolejnym obciążeniem nawierzchnia ulega również „dogęszczaniu”, a przemieszczenia pionowe konstrukcji są coraz mniejsze. Podstawą identyfikacji modułów warstw nie powinny być zatem przemieszczenia rejestrowane przy pierwszym obciążeniu ugięciomierzem dynamicznym FWD. W powszechnej praktyce pomiarowej przyjmuje się, że przy trzecim obciążeniu (tzw. zrzucie) nawierzchnia jest już dogęszczona, spełnia założenia modelu sprężystego, a pomierzone przemieszczenia pionowe są ustabilizowane. Celem przeprowadzonych pomiarów było zweryfikowanie ww. założenia oraz zbadanie zależności między wartością przyłożonego obciążenia a zarejestrowanym przemieszczeniem i w konsekwencji sprawdzenie poprawności przyjęcia modelu uwarstwionej półprzestrzeni sprężystej. Badania wpływu wartości i powtarzalności obciążenia na rejestrowane przemiesz-



1. Widok ugięciomierza dynamicznego FWD



2. Przykładowe impulsy obciążające o różnych wartości



3. Przebiegi czasowe przemieszczeń pionowych (ugięć) konstrukcji nawierzchni w różnych odległościach od osi obciążenia

czenia pionowe przeprowadzono przy pięciu poziomach obciążenia na czterech zróżnicowanych konstrukcjach. Badania wpływu powtarzalności obciążeń przeprowadzono po przez poddawanie badanych nawierzchni 10-krotnemu impulsowi obciążającemu o wartości 57,5 kN. Na rys. 4 przedstawiono przykładowe zależności między wywieranym obciążeniem, a rejestrowanym przemieszczeniem pionowym konstrukcji nawierzchni. Podobne zależności zaobserwowano w pozostałych punktach pomiarowych. Szczegółowe wyniki badań znaleźć można w [1]. Zarówno dla przemieszczeń pomierzonych bezpośrednio pod płytą naciskową (w osi obciążenia), jak i pod kolejnymi geofonami, w dalszych odległościach od osi obciążenia uzyskano bardzo dobre dopasowanie przyjętej liniowej funkcji regresji.

Na rys. 5 przedstawiono przykładowy wpływ liczby cykli (powtarzalności) obciążeń na rejestrowane przemieszczenia pionowe. Jest on najbardziej widoczny w przypadku geofonu centralnego, ale podobne zależności zaobserwowano w przypadku przemieszczeń rejestrowanych w pozostałych odległościach od osi obciążenia.

Względne różnice między trzecim a drugim zrzutem są około dwukrotnie większe, niż między zrzutami dalszymi – poczynając od zrzutu siódmego. Przy zrzutach dziewiątym-dziesiątym rejestrowane przemieszczenia uznaje się za ustabilizowane. Przyjmując, że przemieszczenia stabilizują się przy 10 zrzucie, wprowadzić można by drobną korektę do stosowanej procedury identyfikacji modułów warstw, jednak, jak wykazały badania autorów, błędy między przemieszczeniami zarejestrowanymi przy zrzucie trzecim i zrzucie dziesiątym zbliżone są do błędów oszacowania modułów w

późniejszych obliczeniach odwrotnych (1-2 %) i jako takie nie wpływają w istotny sposób na wartości identyfikowanych modułów.

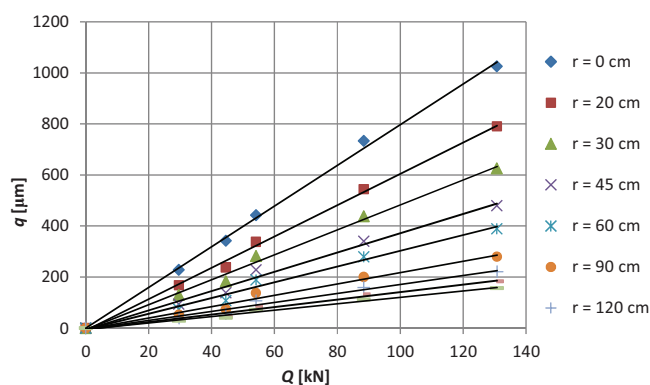
Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzić można, że niezależnie od typu użytych materiałów, nawierzchnie w przypadku pomiarów dynamicznych zachowują się do tego stopnia sprężyste w całym zakresie stosowanych obciążeń, że przyjęcie modelu uwarstwionej półprzestrzeni sprężystej jest jak najbardziej zasadne. Stwierdzono również, że przemieszczenia rejestrowane przy trzecim zrzucie w badaniu FWD mogą być podstawą identyfikacji modułów warstw konstrukcji nawierzchni. Głównym atutem badania ugięciomierzem dynamicznym FWD jest czas pojedynczego pomiaru, wynoszący około 1 minuty. Pozwala to na niemal ciągłe badanie długich odcinków nawierzchni, w krótkim okresie czasu, w jednakowych warunkach temperaturowych. Wykonywanie każdorazowo 8-10 zrzutów, zamiast powszechnie przyjętych 3, wydłużyłoby pomiary 3-krotnie i w konsekwencji pozbawiłoby badania ugięciomierzem FWD efektywności. Wykonywanie trzech zrzutów jest zatem zasadne, tym bardziej, że błędy między przemieszczeniami zarejestrowanymi przy zrzucie trzecim i zrzucie dziesiątym zbliżone są do błędów oszacowania modułów w późniejszych obliczeniach odwrotnych.

Transformacja przemieszczeń dynamicznych na przemieszczenie statyczne

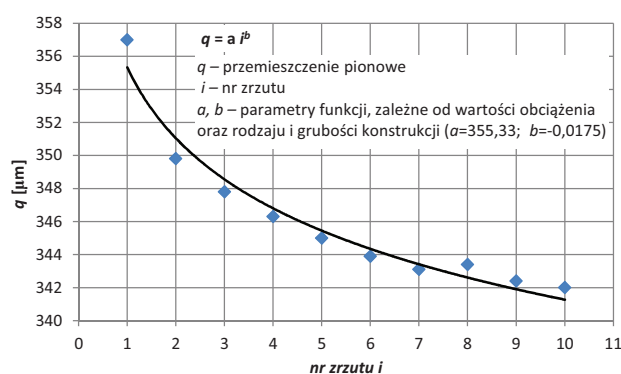
Wyniki pomiarów ugięć pomierzone za pomocą FWD służą do identyfikacji modułów warstw i podłoża konstrukcji nawierzchni. Wykorzystując z kolei otrzymane wartości modułów można obliczyć stan naprężeń i od-

kształceń w konstrukcji i na tej podstawie dopuszczalną liczbę obciążeń pojazdów, jak również wskaźnik PCN w przypadku nawierzchni lotniskowych. Do identyfikacji przyjmuje się model obliczeniowy uwarstwionej półprzestrzeni sprężystej. Modele nawierzchni szerzej omówiono w [2]. Poszczególne warstwy modelują układ konstrukcji nawierzchni. Istota identyfikacji polega na iteracyjnym dopasowaniu pomierzonej czaszy przemieszczeń do czaszy wyznaczonej dla założonych parametrów modelu. W tym celu stosowane są metody optymalizacyjne, szerzej wyjaśnione w [9, 11].

Rozwiązanie modelu uwarstwionej półprzestrzeni sprężystej pod obciążeniem statycznym, choć dosyć skomplikowane, jest znane. Ogólne rozwiązanie przedstawił Sapian w [7] oraz [8], natomiast szczegółowe rozwiązanie powyższego zagadnienia w przypadku pełnej szczepności między warstwami lub całkowitego jej braku przedstawił Szydło w [9]. Nie jest natomiast znane rozwiązanie modelu uwarstwionej półprzestrzeni sprężystej pod obciążeniem dynamicznym, a co więcej wielokrotnie udowodniono empirycznie, że przy takim samym obciążeniu Q i takim samym promieniu obciążenia a uzyskuje się inne przemieszczenia pionowe w zależności od sposobu obciążenia – dynamiczne/statyczne [2]. Zachodzi wobec powyższego zachodzi konieczność opracowania metody pozwalającej na ocenę wpływu dynamicznego charakteru obciążenia na rejestrowane przemieszczenia pionowe w modelu statycznym. Wpływ ten wyrażony został po przez współczynnik korekcyjny $f(1)$ rozumiany jako: liczba przez którą pomnożyć należy wartość przemieszczenia uzyskanego w teście dynamicznym q_{max} , aby otrzymać hipotetyczne przemieszczenie



4. Zakres „sprężystości” przykładowej konstrukcji

5. Aproksymacja potęgowa zmienności rejestrowanych przemieszczeń pionowych konstrukcji w funkcji kolejnych obciążeń bezpośrednio pod płytą naciskową ($r=0\text{ cm}$)

w teście statycznym q_{stat} pod obciążeniem równym co do wartości maksymalnemu obciążeniu dynamicznemu Q_{max} . Graficzną interpretację powyższych wielkości, rejestrowanych w badaniu FWD, przedstawiono na rys. 6. Teoretyczne podstawy wyprowadzenia zależności (1) przedstawiono w [3] oraz [6].

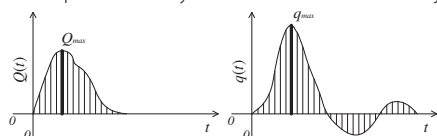
$$f_i = \frac{q'_{i stat}}{q_{i max}} = \frac{\int q_i(t) dt \cdot Q_{max}}{\int Q(t) dt \cdot q_{i max}} \quad (1)$$

Przykładową transformację „dynamicznej” czaszy przemieszczeń, na jej quasi-statyczny odpowiednik i wpływ transformacji na szacowaną nośność konstrukcji przedstawiono w [11]. Badania przeprowadzone na kilkudziesięciu zróżnicowanych konstrukcjach wykazały dużą zmienność współczynników korekcyjnych (przeliczeniowych), w zależności od typu i grubości konstrukcji, wartości impulsu obciążającego oraz odległości od osi obciążenia punktu (geofonu), w którym współczynnik jest wyznaczany. Szczegółowe wyniki badań przedstawiono w [1]. Na rys. 7 przedstawiono współczynniki korekcyjne (przeliczeniowe) czaszy przemieszczeń, opracowane dla typowych konstrukcji podatnych, obciążonych impulsem odpowiadającym naciskowi koła pojazdu ciężarowego (57,5 kN), w zależności od grubości pakietu warstw asfaltowych.

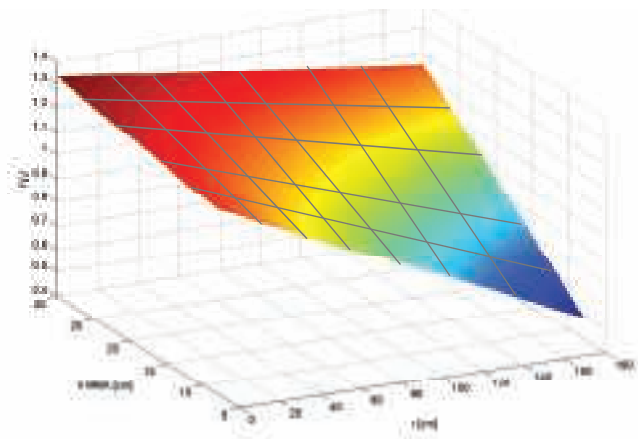
Identyfikacja jednorodnych odcinków konstrukcji nawierzchni

W ramach Zadania Badawczego rozwiązano również niezwykle istotny problem jednoznacznej identyfikacji jednorodnych odcinków konstrukcji nawierzchni. Podczas pomiarów FWD, zwłaszcza w trakcie badania długich odcinków nawierzchni, bardzo często dochodzi do sytuacji, w której pomierzone przemieszczenia pionowe różnią się od siebie w sposób znaczący. Wynika to bądź z różnego stanu technicznego nawierzchni na badanym odcinku, bądź z niejednorodnej grubości warstw konstrukcyjnych, bądź wreszcie ze zmiany konstrukcji w obrębie tej samej badanej nawierzchni. Odbiegające od siebie pomierzone przemieszczenia pionowe (będące podstawą późniejszej identyfikacji modułów sprężystości warstw) nie mogą być wprost uśredniane, gdyż dawałyby to fałszywy obraz badanego odcinka. Przed przystąpieniem do identyfikacji modułów kluczowe zatem jest dokonanie podziału badanego odcinka nawierzchni na tzw. odcinki jednorodne – o zbliżonym stanie technicznym, wyrażonym przez zbliżone moduły sprężystości warstw.

W ramach Zadania przeanalizowano algorytmy identyfikacji jednorodnych odcinków nawierzchni na podstawie pomierzonych przemieszczeń pionowych. Wykazano błędy w powszechnie stosowanych metodach i opracowano własną. Ustalono kryteria, oparte na podstawowych właściwościach funkcji



6. Graficzne przedstawienie rejestrowanych w badaniu FWD wielkości: $Q(t)$, $q(t)$, Q_{max} , q_{max}



7. Współczynniki przeliczeniowe czaszy przemieszczeń (f) przy obciążeniu 57 kN, w zależności od grubości pakietu warstw asfaltowych i odległości od osi obciążenia (r)

wykładniczej, pozwalające na jednoznaczną identyfikację jednorodnych odcinków konstrukcji nawierzchni z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody sum skumulowanych. Skuteczność opracowanej metody zweryfikowano na rzeczywistym odcinku nawierzchni o czterech zróżnicowanych konstrukcjach. Opracowaną metodę, wraz z przykładami, szerzej omówiono w [10].

Podsumowanie

Prezentowany w artykule zakres badań i analiz stanowi ogólny zarys prac zrealizowanych w ramach Zadania Badawczego „Diagnostyka nawierzchni drogowych i lotniskowych z wykorzystaniem zaawansowanych badań dynamicznych” [1]. Całość zadania istotnie wzbogaciła stan obecnej wiedzy w temacie pomiarów dynamicznych i modeli nawierzchni drogowych i lotniskowych. Za najważniejsze osiągnięcie realizowanego projektu uznać można opracowanie współczynników korygujących, dla typowych konstrukcji nawierzchni, pozwalających na stosowanie pomiarów dynamicznych do identyfikacji parametrów statycznych modeli konstrukcji nawierzchni (po przez transformację ugięć nawierzchni uzyskanych w pomiarach dynamicznych na ich quasi-statyczny odpowiednik). Wykazano również, że w przypadku stosowania pomiarów dynamicznych, przyjęcie modeli uwarstwionych półprzestrzeni sprężystych jest jak najbardziej zasadne, z uwagi na krótki impuls obciążenia – występuje liniowa zależność między przemieszczeniem i obciążeniem, a zjawiska lepko-plastyczne (trwałe odkształcenia), inaczej niż w przypadku pomiarów statycznych, praktycznie nie występują. Istotnym osiągnięciem jest również opracowanie jednoznacznej metody identyfikacji jednorodnych odcinków konstrukcji nawierzchni, z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody sum skumulowanych. Kontynuacją badań prowadzonych w ramach Zadania i pośrednio ich rezultatem, była publikacja w czasopiśmie Engineering Structures [5], gdzie szczegółowo przedstawiono ogólną metodę transformacji przemieszczeń dynamicznych i pozytywnie zweryfikowano ją w porównawczych badaniach terenowych z bezpośrednią metodą statyczną (Belka Benkelmana). ◀

Materiały źródłowe

- [1] Innowacyjne metody badań jako źródło wiedzy o infrastrukturze transportowej : raport końcowy. Raporty Inst. Inż. Ląd. PWroc. 2014, Ser. SPR nr 10
- [2] Krawczyk B. Identyfikacja parametrów modeli nawierzchni drogowych na podstawie impulsowych testów dynamicznych. Praca Doktorska Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, 2012
- [3] Langer J., Ruta P. Dynamic identification of model's parameters of road and airfield pavements. Archives of Civil Engineering, XLI, 2, 1995, 115-136
- [4] Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS -1), Ninth edition, The Asphalt Institute, Research Report No. 82 -2, RR - 82 - 2, 1982
- [5] Ruta P., Krawczyk B., Szydło A. Identification of pavement elastic moduli by means of impact test. Engineering Structures. 2015, vol. 100, s. 201-211
- [6] Ruta P., Szydło A. Drop-weight test based identification of elastic half-space model parameters. Journal of Sound and Vibration 282, 2005, 411-427.
- [7] Sapien Cz. Płyta kolistą na wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej. Praca doktorska, Politechnika Wrocławska, 1963
- [8] Sapien Cz. Warstwa sprężysta obciążona stemplem. XVI Konf. Nauk. Komitetu Inż. Ląd. PAN i Kom. Nauki PZITB, Krynica 1970, 457-465
- [9] Szydło A. Statyczna identyfikacja parametrów modeli nawierzchni lotniskowych. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1995
- [10] Szydło A., Krawczyk B. Identification of homogeneous pavement sections. Roads and Bridges - Drogi i Mosty. 2013, vol. 12, nr 3, s. 269-281
- [11] Szydło A., Krawczyk B. Ocena nośności nawierzchni lotniskowych na podstawie impulsowych testów dynamicznych. Przegląd Komunikacyjny. 2013, R. 68, nr 7, s. 34-37