

Wojciech Grabowski, Romuald Sztukiewicz, Andrzej Pożarycki, Mieczysław Słowik, Paweł Rydzewski, Marcin Bilski, Przemysław Górnaś, Marta Mielczarek, Mikołaj Bartkowiak, Agnieszka Płatkiewicz, Jarosław Wilanowicz, Justyna Stróżyk-Weiss, Maja Pożarycka

Inżynierii Lądowej, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, Politechnika Poznańska

Fundamenty strategii kształtowania inteligentnych materiałów i nawierzchni drogowych oraz lotniskowych

Foundations of the strategy of creation of intelligent materials and road and airport pavements

Streszczenie

Pomimo że inteligencja jest definiowana głównie jako sprawność poznawcza człowieka, we współczesnym świecie jej przejawy już dawno przekroczyły tę granicę. Można powiedzieć, że naturalną konsekwencją jej posiadania jest duży stopień rozbudowanej i dobrze zorganizowanej wiedzy. W przełożeniu na język cyfrowy odpowiednio skonfigurowane zaplecze informatyczne, laboratoryjne oraz wysoka jakość pozyskiwania informacji i zarządzania ich przepływem tworzą złożone i wielowymiarowe zadania. Pracownicy Zakładu Budownictwa Drogowego w Instytucie Inżynierii Lądowej już od dłuższego czasu włączają się w nurt rozwoju tradycyjnego systemu sieci drogowej, zarówno w duchu stosowania innowacyjnych i ekologicznych materiałów do warstw nawierzchni drogowych, jak i inteligentnego przetwarzania wieloaspektowych baz danych drogowych. W artykule przedstawione są kierunki badań autorów konsekwentnie rozpowszechniane w kraju i na świecie.

Abstract

Although intelligence is defined mainly as human cognitive ability, in the modern world its effects have long exceeded this limit. The natural consequence of having it is a large degree of extensive and well-organized knowledge. Translated into digital language, properly configured IT and laboratory facilities as well as high quality of information acquisition and management of its flow create complex and multidimensional tasks. The employees of Division of Road Engineering at the Institute of Civil Engineering have been involved in the development of the traditional road network system for a long time, both in terms of the use of innovative and ecological materials for road pavement layers and intelligent processing of multi-faceted road databases. The article presents the directions of the authors' research, consistently disseminated in Poland and abroad.

1. Wprowadzenie

Pracownicy Zakładu Budownictwa Drogowego Politechniki Poznańskiej mają bogate doświadczenie w prowadzeniu badań laboratoryjnych materiałów stosowanych w nawierzchniach drogowych, zarówno metodami zgodnymi z normami PN-EN, jak i amerykańską specyfikacją Superpave, począwszy od badań lepiszczy asfaltowych zawierających dodatki polimerów [1, 2], gumy [3, 4], asfaltów naturalnych [5, 6] czy dodatków olejowych [7]. Pracownicy mają duże doświadczenie m.in. w oznaczaniu złożonych właściwości reologicznych lepiszczy asfaltowych przy zastosowaniu reometru dynamicznego ścinania DSR, oznaczaniu właściwości niskotemperaturowych lepiszczy przy zastosowaniu reometru zginanej belki BBR, a także nowoczesnego duktylometru zmodyfikowanego w celu prowadzenia badań w ujemnych temperaturach. Dodatkowo prowadzone są analizy związane z modelowaniem zjawisk zachodzących w lepiszczach asfaltowych [8, 9]. Prowadzone są również badania mastyksów asfaltowych oraz wypełniaczy wg norm PN-EN, metod Superpave [10] oraz kruszyw w kontekście adhezji lepiszcza do ich powierzchni [11, 12]. Aparatura pomiarowa Nottingham Asphalt Tester wraz z dodatkowym osprzętem umożliwia kompleksowe badania mieszanek mineralno-asfaltowych w zakresie średnich i wysokich temperatur eksploatacyjnych [13, 14]. Zdołane doświadczenie umożliwiło pracownikom Zakładu podjęcie działań w zakresie badań nad innowacyjnymi materiałami [15], które będą mogły stanowić alternatywę dla obecnie wykorzystywanych w budownictwie drogowym. Autorskie podejście do tematyki budowy i zastosowania dróg ma zostać zrealizowane przez stworzenie „inteligentnych” i „autonomicznych” nawierzchni. Proponowane rozwiązania mają stworzyć możliwość wykonania trwałych i tanich nawierzchni drogowych, które nie

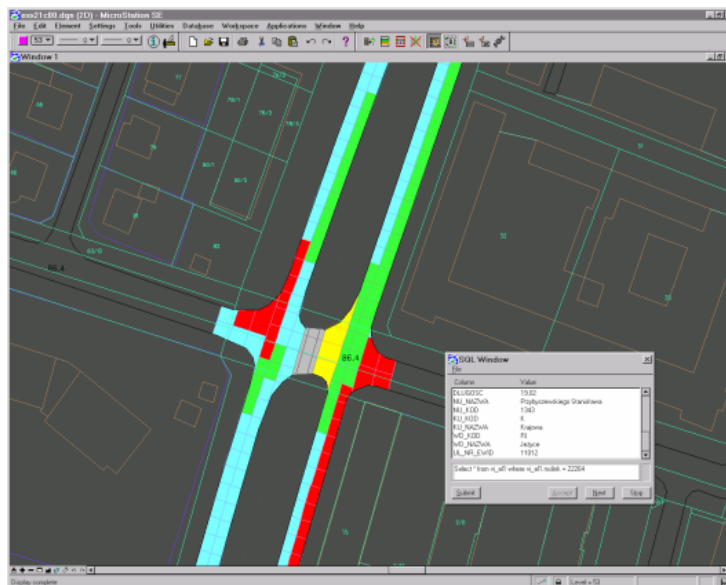
będą miały wyłącznie funkcji służącej przemieszczaniu się jej użytkowników, ale również funkcje sterowania ruchem czy minimalizowania niekorzystnego wpływu ruchu drogowego na środowisko naturalne.

2. System diagnostyki i zarządzania siecią dróg

Zakład Budownictwa Drogowego kontynuuje realizację autorskiego programu dotyczącego komputerowego wspomaganie zarządzania siecią ulic miasta Poznania, zapoczątkowanego w 1995 r. przez twórców „Systemu wspomaganie zarządzania siecią ulic miasta Poznania”, profesora Romualda Sztukiewicza oraz doktora Pawła Rydzewskiego [16, 17, 18]. Prace obejmują realizację zarówno funkcji ewidencyjnych, jak i inwentaryzacyjnych, co skutkuje coroczną aktualizacją oceny stanu nawierzchni jezdni dla dróg publicznych oraz zagadnień optymalizacji polityki utrzymaniowej beneficjentów programu. Przykład syntetycznej ilustracji wyników oceny stanu technicznego nawierzchni dróg układu podstawowego miasta Poznania w latach 1999-2020 przedstawiono na rysunku 1.

Rys. 1. Syntetyczna ocena stanu technicznego nawierzchni jezdni układu podstawowego sieci dróg miasta Poznania w latach 1999-2020 [19]

W wyniku prowadzonych prac pomiarowych uzyskuje się wskaźniki poszczególnych parametrów stanu elementów jezdni. Wskaźniki te porównuje się z kryteriami, w rezultacie czego jednorodnym elementom nawierzchni zostają przypisane klasy stanu. W celu wizualizacji wyników oceny stanu nawierzchni poszczególnym klasom przydzielane są następujące kolory: klasa A (stan dobry) – niebieski, klasa B (stan zadowalający) – zielony, klasa C (stan niezadowalający) – żółty, klasa D (stan zły) – czerwony. Przykładowe wyniki wizualizacji wskaźnika globalnego dla nawierzchni jednej z dróg układu podstawowego pokazano na rysunku 2.



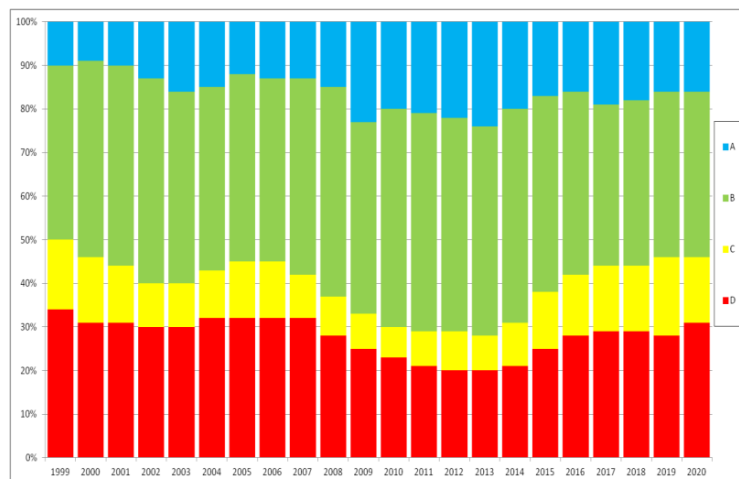
Rys. 2. Przykładowe wyniki wizualizacji wskaźnika globalnego dla nawierzchni jezdni

3. Technologia akwizycji i obsługi danych

W Zakładzie prowadzone są intensywne badania nad opracowaniem inteligentnych technologii diagnozowania nawierzchni drogowych i lotniskowych. Tworzone są systemy rozwiązań internetowych do obsługi systemów akwizycji i przetwarzania danych, które pochodzą z pomiarów nawierzchni jezdni w warunkach in situ. W skrócie system nazywany jest technologią OSAD (Obsługa Systemów Akwizycji Danych) i tworzony na potrzeby eksploracji wiedzy metodami sztucznej inteligencji. Idea eksploracji danych polega na wyszukiwaniu ukrytych dla człowieka prawidłowości w danych zgromadzonych w dużych zbiorach. Techniki eksploracji danych wywodzą się z ugruntowanych dziedzin nauki, takich jak statystyka (statystyczna analiza wielowymiarowa) i uczenie maszynowe. Technologia OSAD w założeniach służy do budowy inteligentnego Systemu Utrzymania Nawierzchni. System jest rozwijany przy użyciu:

- metod statystycznych opartych na otwartych środowiskach informatycznych, takich jak Gnuplot, R czy C++,
- logiki rozmytej,
- metod ewolucyjnych,
- metod uczenia maszynowego,
- konwolucyjnych sieci neuronowych.

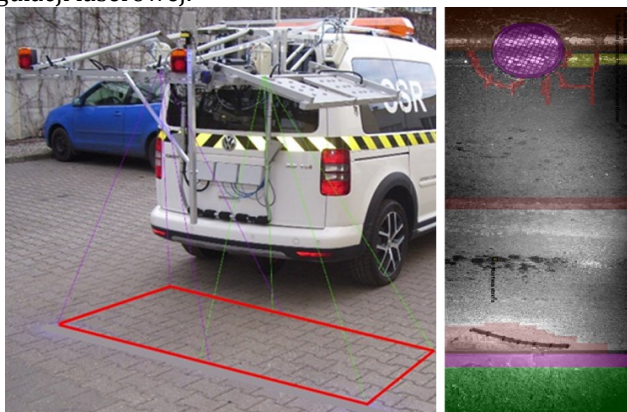
Podstawą technologii OSAD są urządzenia mechaniczne do pomiarów drogowych. Algorytmy w tych urządzeniach bazują na koncepcji sztucznej inteligencji, w której kluczowym ogniwem są projekty połączeń neuronowych. Buduje się zbiory danych oparte na wynikach pomiarów kluczowych cech nawierzchni, wytworzone urządzenia noszą miano „inteligentnych”, bo cechują się zdolnością uczenia się. Typowym przedstawicielem tej grupy jest Zintegrowany System Precyzyjnej Oceny Nawierzchni (ZiSPON), który powstał w ramach współpracy z partnerem przemysłowym (fot. 1).





Fot. 1. Urządzenie ZiSPON

Rodzinę tych rozwiązań uzupełniają urządzenia do półautomatycznej oceny cech powierzchniowych nawierzchni jezdni asfaltowych (fot. 2). Zawierają one moduły do akwizycji i oceny równości podłużnej i poprzecznej nawierzchni pasów ruchu. Moduły te zostały zbudowane na podstawie systemu triangulacji laserowej.



Fot. 2. Urządzenie do oceny nawierzchni jezdni

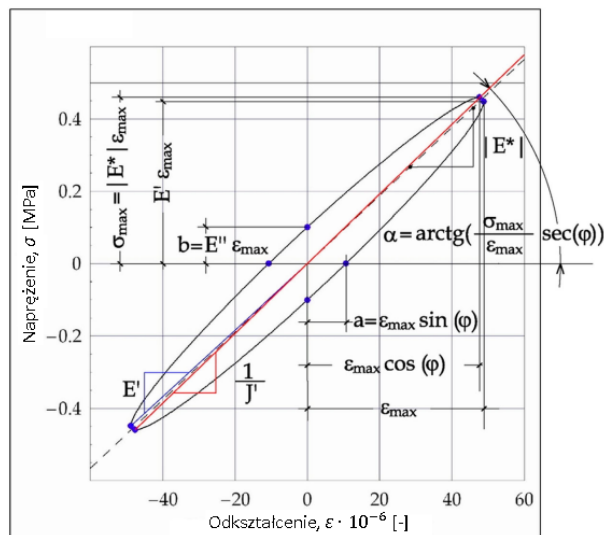
W Zakładzie Budownictwa Drogowego na potrzeby zarządców infrastruktury lotniskowej zaprojektowano i wybudowano również urządzenie do oznaczania właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni w sposób ciągły (fot. 3).



Od 2017 r. wybudowane urządzenia są wykorzystywane w pracach rozwojowych „Systemu wspomagania zarządzania siecią ulic miasta Poznania”.

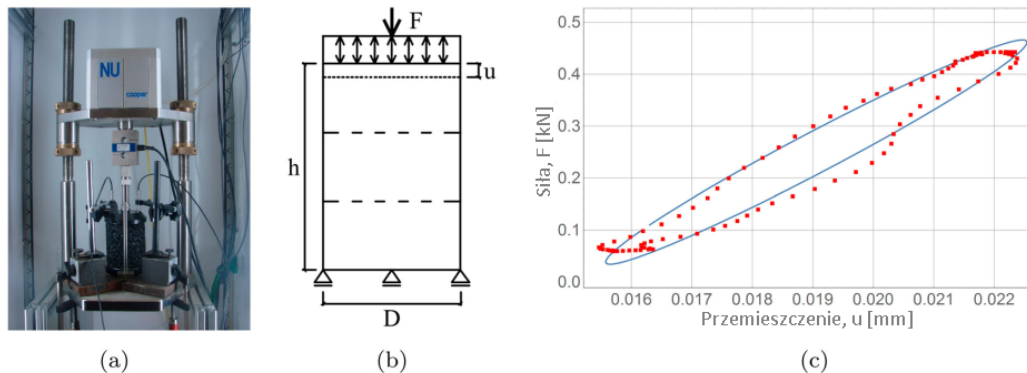
4. Zaplecze laboratoryjne innowacyjnych materiałów i technik badawczych w drogownictwie

Ważnym zapleczem działalności Zakładu Budownictwa Drogowego jest Laboratorium Drogowe o charakterze badawczo-dydaktycznym. Działalność Laboratorium można podzielić na następujące obszary: naukowy (badania prowadzone przez pracowników Zakładu, doktorantów oraz prace dyplomowe realizowane przez studentów), praktyczny (wykonywanie prac badawczo-usługowych, rozwiązywanie problemów technicznych koncernów drogowych i zarządców dróg) oraz dydaktyczny (prowadzenie ćwiczeń laboratoryjnych dla studentów). Laboratorium dysponuje zarówno podstawowym, jak i zaawansowanym sprzętem laboratoryjnym wykorzystywanym do oznaczania właściwości materiałów stosowanych w budownictwie drogowym, tzn. do badań lepiszczy asfaltowych, kruszyw oraz mieszanek mineralno-asfaltowych. Nowoczesne reometry dynamicznego ścinania (DSR) i zginanej belki (BBR) umożliwiają prowadzenie zaawansowanych badań lepiszczy asfaltowych. Rozwijane są procedury zaawansowanej identyfikacji wartości parametrów, zasila się tym samym bazę danych do rozwijania matematycznych modeli opartych na nieliniowych funkcjach wielu zmiennych i sztucznej inteligencji. Dobrym opisem tej ścieżki rozwoju są prace, które zmierzają do oceny energii gromadzonej i rozpraszanej w zjawiskach zmęczenia, które są podstawą metod wymiarowania nawierzchni jezdni. Przykładowy opis właściwości materiałów w takim podejściu pokazany jest na rysunku 3.



Rys. 3. Model zależności między odkształceniem a naprężeniem wywołanym obciążeniem cyklicznym wykorzystany do innowacyjnej metody identyfikacji właściwości warstw asfaltowych z zastosowaniem próbek wyciętych z nawierzchni

W przypadku badań mieszanek mineralno-asfaltowych Laboratorium jest wyposażone w urządzenie Nottingham Asphalt Tester (NAT) wraz z wieloma dodatkowymi modułami umożliwiającymi prowadzenie badań, zarówno wg europejskich i amerykańskich norm, jak również z wykorzystaniem stale rozwijanych metod autorskich (rys. 4).



Rys. 4. Przykład realizacji badania próbek asfaltowych w testach z obciążeniem cyklicznym

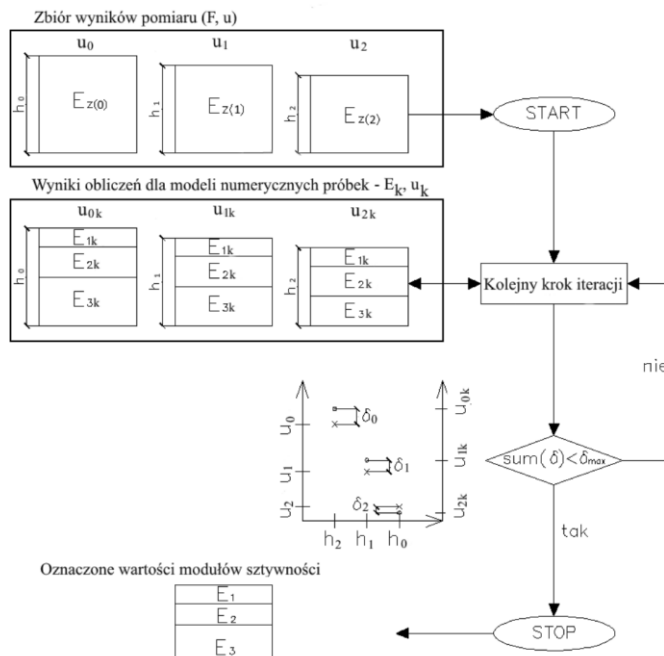
Zespół badaczy podjął również wysiłek opracowania rozwiązań przyjaznych dla środowiska. Nawierzchnie jezdni są narażone na oddziaływanie promieni słonecznych. Nie odbijają promieni słonecznych, ale najpierw je pochłaniają, a dopiero później emitują z powrotem do atmosfery. Ma to niekorzystne skutki dla samej nawierzchni, jak i środowiska, zwiększa się stężenie ozonu oraz pojawia się efekt wysp ciepła szczególnie dokuczliwych w miastach i na lotniskach. Budując odpowiedni system, można energię cieplną gromadzić i wykorzystywać do innych celów, np. przechwytywania ciepła z warstw asfaltowych.

Prowadzone są również prace nad opracowaniem kompozytu cementowego wypełnionego nanorurkami węglowymi, który wykazuje reakcję na powtarzające się obciążenia ściskające i impulsowe, co można wykorzystać do obserwacji reakcji nawierzchni na obciążenia wywołane ruchem pojazdów. Zespół autorów zmierza do udowodnienia tezy, że istnieje taki kompozyt cementowy, który za sprawą dodatków w postaci nanorurek węglowych ma duży potencjał zastosowań w obszarach badań diagnostycznych, który zmienia charakter postrzegania nawierzchni z pasywnej na interaktywną (inteligentną). Właściwości elektryczne elementów warstw nawierzchni umożliwią monitorowanie natężenia ruchu, pomiar nacisku kół pojazdów w ruchu i detekcji prędkości pojazdów w sposób bezpośredni, wykorzystując je jako przewodniki.

5. Rozwiązania algorytmiczne

Równolegle z rozwojem technik komputerowych zespół autorów zaangażowany jest również w rozwój algorytmów obliczeniowych. Inspiracją do takiego podejścia jest wypracowanie metod identyfikacji wartości parametrów do modeli obliczeniowych nawierzchni jezdni na podstawie zoptymalizowanych procedur badawczych. Dla przykładu algorytm przedstawiony na rysunku 5 został opracowany jako oryginalna procedura obliczeniowa określona mianem metody skokowej redukcji wysokości próbki [20].

Rys. 5. Schemat oryginalnej procedury oznaczania modułu sztywności poszczególnych warstw próbki złożonej z



Bazując na wynikach symulacji badań laboratoryjnych z wykorzystaniem numerycznych modeli próbek z mieszanek mineralno-asfaltowych, przez wymuszoną zmianę wysokości próbki, użytkownik uzyskuje możliwość obliczenia wartości modułów sztywności poszczególnych warstw próbki, które charakteryzują się różną sztywnością. Zgodnie z założeniami metody jej wykorzystanie umożliwi oznaczenie modułu sztywności poszczególnych warstw próbki nawierzchni, a nie tylko wartości modułu zastępczego.

6. Podsumowanie

Pracownicy Zakładu Budownictwa Drogowego od wielu lat wykazują się bardzo dużą aktywnością badawczą, prowadzą liczne eksperymenty laboratoryjne, terenowe oraz symulacje numeryczne. Rezultaty wykonanych badań systematycznie publikują w renomowanych czasopismach naukowych, czasopismach naukowo-technicznych upowszechniających wiedzę praktyczną przydatną inżynierom budownictwa drogowego, a także prezentują je na uznanych w środowisku międzynarodowych konferencjach naukowych.

Literatura

- [1] Mielczarek M., Słowik M., Andrzejczak K., The assessment of influence of styrene-butadiene-styrene elastomer's content on the functional properties of asphalt binders, „Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability” 2020, 22(1), pp. 148-153, DOI: 10.17531/ein.2020.1.17.
- [2] Słowik M., Mielczarek M., Bilski M., Wiśniewski D., Wpływu zawartości elastomeru SBS na wartości parametrów charakteryzujących odporność na odkształcenia trwałe asfaltów modyfikowanych, „Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury / Journal of Civil Engineering, Environment And Architecture Jceea” 2016, t. 23, z. 63 (1/II/16), s. 307-314, DOI: 10.7862/rb.2016.89.
- [3] Słowik M., Wiśniewski D., Bilski M., Mielczarek M., Assessment of temperature susceptibility for rubber granulate modified road asphalt binders considering impact of aging. MATEC Web Conference: 3rd International Workshop on Flexibility in Sustainable Construction (ORSDC 2018), vol. 222, DOI: 10.1051/mateconf/201822201016.
- [4] Wiśniewski D., Selke M., Smolińska A., Słowik M., Badanie wpływu dodatku granulatu gumowego na odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na działanie wody i mrozu, „Budownictwo i Architektura” 2018, 17, nr 4, s. 171-179, DOI: 10.24358/Bud-Arch_18_174_14.
- [5] Bilski M., Słowik M., Impact of aging on Gilsonite and Trinidad Epuré modified binders resistance to cracking, „Bituminous Mixtures and Pavements” 2019, VII, pp. 65-70, ISBN: 978-1-351-06326-5, DOI: 10.1201/9781351063265.
- [6] Słowik M., Bilski M., An Experimental Study of the Impact of Aging on Gilsonite and Trinidad Epuré Modified Asphalt Binders Properties, „The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering” 2017, vol. 12(2), pp. 71-81, DOI: 10.3846/bjrbe.2017.09.
- [7] Babiak M., Bilski M., Ratajczak M., Kosno J., Wpływ modyfikatorów z przetworzonych tłuszczów na właściwości lepko-sprężyste asfaltów, „Materiały Budowlane” 2017, nr 8, s. 49-51, DOI: 10.15199/33.2017.08.15.
- [8] Słowik M., Bilski M., Modeling of creep and recovery of Gilsonite and Trinidad Epuré modified asphalt binders, „Bituminous Mixtures and Pavements” 2019, VII, pp. 75-80, ISBN: 978-1-351-06326-5, DOI: 10.1201/9781351063265.
- [9] Lewandowski R., Słowik M., Przychodzki M., Parameters identification of fractional models of viscoelastic dampers and fluids, „Structural Engineering and Mechanics” 2017, 63(2), pp. 181-193, DOI: 10.12989/sem.2017.63.2.181.
- [10] Grabowski W., Wilanowicz J., Andrzejczak M., Bilski M., Warunki zastosowania popiołu lotnego jako wypełniacza do mieszanek mineralno-asfaltowych, „Budownictwo i Architektura” 2014, 13(1), s. 181-190, ISSN: 1899-0665.
- [11] Bilski M., Machowiak K., Wilmański A., Wpływ właściwości fizykochemicznych kruszyw mineralnych na adhezję lepniejszą asfaltowego do ich powierzchni. W: Przyrodnicze i geotechniczne aspekty budownictwa, red. A. Duda, M. Flieger-Szymańska, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2020, s. 33-46. ISBN: 978-83-7775-598-3.
- [12] Pawłowska W., Słowik M., Nowak A., Krzemień A., Wilmański A., Ocena przyczepności asfaltu do kruszyw mineralnych z wykorzystaniem metody fotogrametrycznej, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej” 2018, 27, s. 127-146, DOI: 10.21008/j.1897-4007.2018.27.10.
- [13] Słowik M., Bartkowiak M., Przegląd analityczno-empirycznych metod wyznaczania modułu sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych, „Roads and Bridges – Drogi i Mosty” 2018, 17, nr 1, s. 5-22, DOI: 10.7409/rabd.018.001.
- [14] Słowik M., Bartkowiak M., Elementy statystycznej analizy wyników pomiarów na przykładzie badań wybranych cech mieszanek mineralno-asfaltowych, „Drogownictwo” 2016, nr 7-8, s. 247-253.
- [15] Romej A., Przybyła B., Bilski M., Górnaś P., Preludium do oceny poprawy eksploatacyjnych właściwości termicznych modyfikowanych betonów cementowych dla nawierzchni drogowych. Konferencja Budmika 2018.

- [16] Sztukiewicz R., Rydzewski P., Założenia do wyboru zabiegów utrzymaniowych nawierzchni w systemie wspomaganie zarządzania siecią dróg miejskich. I Międzynarodowa Konferencja Nauk-Techn. „Nowoczesne technologie w budownictwie drogowym”, Poznań 1998, s. 246-256.
- [17] Sztukiewicz R., Rydzewski P., System wspomaganie zarządzania siecią ulic miasta Poznania, „Polskie Drogi” 2002, nr 6, s. 34-38.
- [18] Sztukiewicz R., Rydzewski P., Diagnostyka nawierzchni w systemie wspomaganie zarządzania siecią ulic, „Czasopismo: Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej” 2006, nr 60, s. 283-289.
- [19] Rydzewski P., Płatkiewicz A., Pożarycki A., Stróżyk-Weiss J., Pożarycka M., Raport nr 3 z realizacji pracy „System wspomaganie zarządzania siecią ulic miasta Poznania”, Zakład Budownictwa Drogowego, Politechnika Poznańska, Poznań 2020.
- [20] Pożarycki A., Górnaś P., Rydzewski P., Wanatowski D., Back analysis of the multilayer cylindrical HMA samples – height reduction method, „International Journal of Pavement Engineering” 2018, DOI: 10.1080/10298436.2018.1475668.
- [21] Wróblewska A., Krocze P., Pożarycki A., Innowacyjne zastosowanie nanorurek węglowych hydrofobowych w budownictwie drogowym, „Drogownictwo” 2019, nr 7-8, s. 203-209.