

WPEŁNIŁO

07.07. 2022

426 / 2022

Dr hab. inż. Mirosław Graczyk, prof. IBDiM

Instytut Badawczy Dróg i Mostów

Ul. Instytutowa 1

03-302 Warszawa

Warszawa, 30.06.2022 r.

*Przyjęto do wglądu*  
*12/07/2022 r.*

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Złotowskiej

pt.

DZIEKAN  
Wydziału Inżynierii Lądowej

prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz

# MECHANISTYCZNO-EMPIRYCZNE PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI DROGOWYCH PODATNYCH Z ASFALTEM WYSOKOMODYFIKOWANYM HiMA z WYKORZYSTANIEM METODY PODOBIENSTWA SiM

## 1. PODSTAWA WYKONANIA RECENZJI

Podstawą recenzji jest zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Warszawskiej: dr hab. inż. Konrada Lewczuka, profesora uczelni (pismo WTBD.521.DR.98.2022 z dnia 17.05.2022 r.).

## 2. PODSTAWA MERYTORYCZNA RECENZJI

Recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej pt. „Mechanistyczno-empiryczne projektowanie konstrukcji nawierzchni drogowych podatnych z asfaltem wysokomodyfikowanym HiMA z wykorzystaniem metody podobieństwa SiM”, wydanej w 2022 roku na Politechnice Warszawskiej.

Promotorem rozprawy jest: prof. dr hab. inż. Roman Nagórski, a promotorem pomocniczym dr inż. Krzysztof Błażejowski

## 3. CHARAKTERYSTYKA OGÓLNA ROZPRAWY

Rozprawa doktorska mgr inż. Magdaleny Złotowskiej dotyczy projektowania konstrukcji nawierzchni podatnych z mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem wysokomodyfikowanym HiMA metodą mechanistyczno-empiryczną

Podstawowym, głównym celem pracy było opracowanie prostego narzędzia pozwalającego na prognozę trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni drogowej podatnej, w której co

najmniej w jednej warstwie asfaltowej zastosowano mieszankę mineralno-asfaltową z asfaltem wysokomodyfikowanym (HiMA) oraz demonstracja możliwości zastosowania tego narzędzia do indywidualnego projektowania konstrukcji nawierzchni z asfaltem wysokomodyfikowanym z przykładami rezultatów jego zastosowania. Dodatkowym celem pracy była ocena wpływu zastosowanych modeli materiałów warstw konstrukcyjnych nawierzchni i ich parametrów w analizie mechanicznej konstrukcji, służącej wyznaczeniu stanu przemieszczenia, odkształcenia i naprężenia w nawierzchni pod obciążeniem na prognozę trwałości obliczeniowej.

Do przedstawionych celów dysertacji Autorka sformułowała dwie tezy badawcze:

- Teza I. Możliwe jest zastosowanie metody SiM do projektowania konstrukcji nawierzchni drogowych podatnych z asfaltem wysokomodyfikowanym (podrozdział 3.1 str. 48).
- Teza II. Stosując metodę SiM w projektowaniu indywidualnym nawierzchni drogowych możliwe jest zaprojektowanie konstrukcji z asfaltem wysokomodyfikowanym o istotnie większej trwałości zmęczeniowej niż konstrukcje standardowe bez zmiany grubości warstw asfaltowych lub konstrukcji z asfaltem wysokomodyfikowanym o mniejszych grubościach warstw asfaltowych przy zachowaniu trwałości zmęczeniowej w stosunku do konstrukcji standardowych (podrozdział 3.4 str. 67).

Rozprawa zawiera 5 rozdziałów i można ją podzielić na cztery części tj.: wstęp, przegląd stanu wiedzy, merytoryczna z przykładami zastosowań i podsumowanie.

Część pierwsza obejmuje streszczenia i wprowadzenie. Część druga to opisy stanu wiedzy. Część trzecia, główna, merytoryczna, dysertacyjna przedstawiona została w rozdziałach 3 i 4, w niej przedstawiono realizację celu i dowodów tej pracy. Czwartą, ostatnią część pracy, stanowi podsumowanie całości dysertacji, tj. rozdział 5, spis literatury oraz wykaz rysunków i tablic.

Pierwsza część zawiera „Streszczenie” pracy w dwóch językach - polskim i angielskim (str. 7-10), spis treści, rozdział 1 pt „Wprowadzenie” ( str. 13-18), w którym podano cel i zakres oraz układ pracy, a także wykaz użytych symboli oraz rozdział 2 „Studium literatury” (str. 19-46), gdzie przedstawiono przegląd literatury w zakresie elementów projektowania konstrukcji metodą mechaniczno-empiryczną. Rozdział ten zawiera po kolei opis: asfaltów modyfikowanych, wymagania dla warstw konstrukcyjnych nawierzchni oraz podstawowych badań mieszanek mineralno-asfaltowych. Dalej krótko przedstawiono analizę mechaniczną

konstrukcji pod działaniem obciążenia, w tym: modelowanie materiałów i wyznaczenie stanu deformacji, odkształcenia i naprężenia w konstrukcji. Po czym scharakteryzowano kryteria zmęczeniowe i dokonano przeglądu stosowanych metod projektowania. Rozdział kończy studium prac badawczych o mieszankach mineralno-asfaltowych z asfaltem wysokomodyfikowanym HiMA z podaniem kryteriów zmęczeniowych.

Część główna dysertacyjna pracy to obszernie rozdziały 3 i 4. W pierwszym z nich pt. „Metoda SiM prognozowania trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni podatnej z asfaltem wysokomodyfikowanym” (str. 47-104), Doktorantka przedstawia dwie tezy pracy, pierwszą w podrozdziale 3.1. a później drugą w podrozdziale 3.5. Następnie zaprezentowana została autorska metoda prognozowania trwałości obliczeniowej przy kryterium spękań zmęczeniowych konstrukcji zawierających mieszanki z asfaltem wysokomodyfikowanym, nazwaną metodą podobieństwa (SiM). Przeprowadzono obliczenia trwałości zmęczeniowej konstrukcji bazujących na typowej konstrukcji nawierzchni podatnej drogi o kategorii ruchu KR5, w której zastosowano warstwy o zróżnicowanych grubościach z asfaltem wysokomodyfikowanym. W tym rozdziale oceniono wrażliwość metody SiM na odchyłki wyników badań laboratoryjnych odporności na zmęczenie mieszanek mineralno-asfaltowych. Dokonano też weryfikacji metody SiM, porównując konstrukcję z asfaltem wysokomodyfikowanym z typową konstrukcją dla kategorii ruchu KR5.

W kolejnym 4 rozdziale pracy pt. „Zastowanie metody SiM do projektowania konstrukcji nawierzchni podatnych” (str. 105-132), Autorka zaprezentowała liczne przykłady zastosowania metody SiM, demonstrując, poza standardowym, inne układy warstw konstrukcji dla dróg o kategoriach ruchu KR5, KR6 i KR7 z zastosowaniem lepiszcza HiMA w jednej lub kilku warstwach asfaltowych.

Rozdział 5 pt. „Podsumowanie” (str. 133-134) stanowi zakończenie pracy, w którym przedstawione zostały wnioski wynikające z rozwiązań, obliczeń i analiz dla zademonstrowanej autorskiej metody SiM. Kończąc Doktorantka przedstawiła dalsze kierunki badań pozwalające na kontynuację podjętej problematyki.

Pracę kończy zestawienie bibliograficzne z 124 pozycjami literaturowymi, spis rysunków i wykaz tabel.

W pracy zamieszczono 35 rysunków i 56 tablic.

Podsumowując:

Tytuł pracy doktorskiej odpowiada treści rozprawy.

Układ pracy jest właściwy i dobrze przedstawia rozwiązanie problemu naukowego.

Praca edytorsko przygotowana właściwie, układ tekstu jest przejrzysty, a rysunki i tablice wykonane poprawnie.

Zastosowane piśmiennictwo odpowiada zakresowi merytorycznemu rozprawy doktorskiej.

#### **4. OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY**

Recenzowana rozprawa dotyczy ważnego problemu związanego z projektowaniem nawierzchni podatnych w zakresie zastosowania mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem wysokomodyfikowanym HiMA.

Tematyka praca doktorskiej wpisuje się w oczekiwania, które związane są z projektowaniem nawierzchni o dużej trwałości typu „long-life pavement” czy „perpetual pavement”.

Temat pracy został dobrany trafnie i jest zgodny z dyscypliną Inżynieria Lądowa i Transport

Z doświadczeń międzynarodowych i krajowych, a także moich osobistych w zakresie tematu dysertacji wynika konieczność prowadzenia prac ukierunkowanych na nawierzchnie o dużej trwałości. Na przykład w pracach ELLPAG (European Long-Life Pavement Group), w których miałem możliwość uczestniczyć, zaobserwowano w Europie i USA, że niestrukturalne formy pogorszenia stanu podatnych nawierzchni były najbardziej znaczącymi procesami destrukcyjnymi w konstrukcjach o grubych pakietach asfaltowych w sytuacjach dużego natężenia ruchu. We wnioskach z prac ELLPAG w zakresie nawierzchni podatnych była przedstawiona konieczność opracowania metodologii projektowania konstrukcji nawierzchni podatnych o długiej żywotności przy użyciu ulepszonych materiałów i nowych metod projektowych, w tym opracowanie ulepszonych metod szacowania żywotności nawierzchni. Takie działania są podejmowane w wielu krajach, na przykład przy użyciu asfaltu o wysokim module sprężystości ze spoiwem modyfikowanym polimerem w celu poprawy sztywności i odporności zmęczeniowej. Badania nad nowymi materiałami do nawierzchni nabierają obecnie nowej dynamiki, w tym także nad mieszankami mineralno-asfaltowymi z asfaltem wysokomodyfikowanym HiMA.

Niniejsza praca doktorska bardzo dobrze wpisuje się w te oczekiwania.

Rozpoczynając pracę Doktorantka czytelnie i zwięźle określiła cele oraz zakres i strukturę całości rozprawy. Następnie przedstawiono dogłębny i kompleksowy przegląd stanu wiedzy w zakresie: projektowania konstrukcji metodą mechanistyczno-empiryczną, asfaltów modyfikowanych, mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem wysokomodyfikowanym

HiMA, wymagań dla warstw konstrukcyjnych nawierzchni, podstawowych badań mieszanek mineralno-asfaltowych. Scharakteryzowano kryteria zmęczeniowe i przeanalizowano stosowane metody projektowania. Z przeprowadzonego studium literatury Autorka poprawnie wykazuje konieczność opracowania nowych metod projektowania w układach konstrukcyjnych z warstwą lub warstwami z mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem wysokomodyfikowanym HiMA. Doktorantka trafnie konstatuje, że metody takie powinny pozwalać na adekwatną ocenę trwałości konstrukcji nawierzchni podatnej, w aspekcie kryterium spękań zmęczeniowych „z dołu do góry”, czyli generowanych przez odkształcenia rozciągające na spodzie pakietu asfaltowego konstrukcji nawierzchni podatnej.

Następnie obszernie przedstawiona została autorska metoda SIM (Similarity Method) do określania trwałości zmęczeniowej pakietu warstw asfaltowych nawierzchni podatnej z asfaltem wysokomodyfikowanym przy klasycznym kryterium spękań zmęczeniowych generowanych z dołu do góry. Istota metody polega na wyznaczeniu współczynników równania trwałości zmęczeniowej dla nawierzchni referencyjnej z asfaltem drogowym na podstawie kryterium spękań zmęczeniowych, które ma postać równania Wöhlera (w pracy podano kryterium AASHTO 2004). Następnie wprowadzane są korekty tych współczynników zgodnie z zaproponowanymi zależnościami wynikającymi z charakterystyk zmęczeniowych mieszanek mineralno-asfaltowych zastosowanych w dolnej warstwie pakietu asfaltowego (z asfaltem wysokomodyfikowanym i z warstwą referencyjną).

Na tym etapie pracy sformułowane zostały dwie tezy pracy: I. Możliwe jest zastosowanie metody SiM do projektowania konstrukcji nawierzchni drogowych podatnych z asfaltem wysokomodyfikowanym, II. Stosując metodę SiM w projektowaniu indywidualnym nawierzchni drogowych możliwe jest zaprojektowanie konstrukcji z asfaltem wysokomodyfikowanym o istotnie większej trwałości zmęczeniowej niż konstrukcje standardowe bez zmiany grubości warstw asfaltowych lub konstrukcji z asfaltem wysokomodyfikowanym o mniejszych grubościach warstw asfaltowych przy zachowaniu trwałości zmęczeniowej w stosunku do konstrukcji standardowych.

Doktorantka przedstawiła trzy warianty metody SiM: I SiM - scale – skalowane są proporcjonalnie współczynniki prostej zmęczenia konstrukcji referencyjnej, II SiM - move – obrót i translacja prostej zmęczenia konstrukcji referencyjnej i, III SiM - direct – zastosowanie współczynnika korygującego trwałość konstrukcji.

Doktorantka wykazała, bazując na obszernych obliczeniach i analizach, że stosując metodę SiM można prognozować trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni drogowych z asfaltem HiMA, tym samym udowodniając pierwszą tezę rozprawy.

Trwałość konstrukcji nawierzchni określono stosując kryteria: spękań zmęczeniowych (wg metody SiM) i deformacji strukturalnych (wg metody Instytutu Asfaltowego). Z analiz i obliczeń uzyskano wielokrotnie wyższe wartości trwałości ze względu na spękania zmęczeniowe w przypadku konstrukcji z asfaltem wysokomodyfikowanym w porównaniu do konstrukcji standardowych. Natomiast w analizie z kryterium deformacji strukturalnych otrzymano niższe wartości trwałości w stosunku do konstrukcji standardowych, przy czym różnica była tym większa im większej miąższości był pakiet z asfaltem wysokomodyfikowanym. Z rozważań wynika, że w nawierzchniach z asfaltem wysokomodyfikowanym trwałość zmęczeniowa konstrukcji ograniczona jest przez kryterium deformacji strukturalnych występujących na poziomie podbudowy z mieszanki niezwiązanej.

Doktorantka, wykazała się właściwą intuicją naukową, ponieważ nie tylko, że wykazała dużą wrażliwość metody SiM na odchyłki wyników badań laboratoryjnych odporności na zmęczenie mieszanek mineralno-asfaltowych, ale także, że określiła wpływ zastosowanego w analizie mechanistycznej modelu materiału opisującego mieszanki mineralno-asfaltowe oraz wartości temperatury ekwiwalentnej.

Udowodniając I tezę pracy Autorka konsekwentnie przechodzi do możliwości aplikacyjnych zademonstrowanej metody i formułuje drugą tezę naukową rozprawy o przydatności metody SiM do projektowania konstrukcji nawierzchni z wykorzystaniem asfaltu wysokomodyfikowanego HiMA.

Następnie Doktorantka w celu udowodnienia II tezy umiejętnie i z dużym wyczuciem badawczym przedstawia przykłady zastosowania metody SiM do układów warstw konstrukcji dla dróg obciążonych dużym ruchem z zastosowaniem mieszanek HiMA w jednej lub kilku warstwach, które zwymiarowano przy zastosowaniu metody SiM. Autorka zaproponowała i przeprowadziła ocenę wymiarowania konstrukcji stosując pragmatyczne i optymalizacyjne podejście zrównania trwałości obliczeniowej według dwóch przyjętych kryteriów.

Na zakończenie Autorka przedstawia słuszny wniosek, że metoda SiM jest przydatna i właściwa do projektowania mechanistyczno-empirycznego konstrukcji nawierzchni drogowych z asfaltem wysokomodyfikowanym.

Podsumowując, Doktorantka podjęła się trudnego i ambitnego zadania badawczego, którego efekty mają ważne znaczenie naukowe i aplikacyjne w projektowaniu i budowie podatnych nawierzchni asfaltowych. W celu udowodnienia postawionych tez Autorka wykonała obszerne analizy obliczeniowe. Doktorantka w sposób metodyczny i systematyczny dążyła do osiągnięcia nakreślonych celów pracy i udowadniała postawione tezy badawcze. W realizacji pracy Autorka wykorzystwała właściwe metody obliczeniowe oraz przeprowadziła odpowiednie analizy, wnosząc własne istotne elementy badawcze.

Wnioski wynikające z pracy w pełni wynikają z analiz wykonanych w trakcie realizacji dysertacji.

Reasumując:

- Cele i tezy pracy są oryginalne, poprawnie sformułowane i adekwatne do podjętej tematyki.
- Zastosowano odpowiednie metody badawcze, prezentując autorską metodę do projektowania mechanistyczno-empirycznego konstrukcji nawierzchni drogowych z asfaltem wysokomodyfikowanym.
- Cele pracy zostały zrealizowane, a tezy udowodnione.
- Godne podkreślenia jest oryginalność i aktualność przedstawionych przez Doktorantkę metod badawczych.

## **5. DYSKUSYJNE UWAGI DO ROZPRAWY**

Analiza rozprawy wskazuje też na pewne pytania i uwagi dyskusyjne, takie jak:

1. Przy badaniu materiałów drogowych, czy to doświadczalnym czy teoretycznym, kluczowe jest adekwatne odwzorowanie zachowania badanego materiału w rzeczywistej konstrukcji nawierzchni. Czy zaproponowane w pracy metody i zakres badań laboratoryjnych są wystarczające do oceny charakterystyk zmęczeniowych mieszanki z asfaltem HiMA w kontekście bardzo dużej wrażliwości metody SiM na odchyłki z wyników z badań?
2. Jakie mechanizmy powodują tak wysoką wytrzymałość na pękanie materiału przy odkształceniach rozciągających, czy tylko własności sprężysto plastyczne i reologiczne materiału mają wpływ na takie zachowanie?

3. Ze względu na uzyskiwanie w metodzie SiM bardzo wysokich trwałości widać, że dominujące będzie podjęte w analizie drugie kryterium, czyli kryterium odkształceń trwałych w warstwie podbudowy z kruszywa. Wydaje się jednak, że należy także rozpatrzyć inne kryteria np. odkształceń trwałych, czy pęknięcia z góry do dołu lub charakterystyk powierzchniowych nawierzchni, które mogą być decydujące w określaniu trwałości konstrukcji nawierzchni z warstwami z asfaltem HiMA.

Reasumując uważam, że przedstawiona rozprawa doktorska jest oryginalnym osiągnięciem badawczym Autorki, a przedstawione pytania i uwagi nie wpływają na bardzo pozytywną ocenę dysertacji.

## 6. WNIOSEK KOŃCOWY

Stwierdzam, że Doktorantka zrealizowała postawione cele w pracy, a opiniowana dysertacja stanowi rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje na dobry poziom wiedzy Autorki z zakresu dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport. Doktorantka wykazała się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Bardzo ważnym i godnym podkreślenia walorem dysertacji jest jej potencjał aplikacyjny w projektowaniu konstrukcji nawierzchni podatnych. Oceniana przez mnie rozprawa doktorska mgr inż. Magdaleny Złotowskiej pt. „Mechanistyczno-empiryczne projektowanie konstrukcji nawierzchni drogowych podatnych z asfaltem wysokomodyfikowanym HiMA z wykorzystaniem metody podobieństwa SiM” spełnia warunki stawiane pracom doktorskim określone w art. 187 ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z 20 lipca 2018 roku (Dz. U z 2021 r. poz. 478 z późniejszymi zmianami)..

Wnoszę o przyjęcie rozprawy i o dopuszczenie Doktorantki do jej publicznej obrony.

  
(Mirosław Graczyk)