

Dr hab. inż. Marek Pszczoła, prof. PG  
Katedra Inżynierii Drogowej i Transportowej  
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska  
Politechnika Gdańska  
ul. Narutowicza 11/12  
80-233 Gdańsk

Gdańsk, 5.08.2022 r.

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Magdaleny Złotowskiej pt.:

***„Mechanistyczno-empiryczne projektowanie konstrukcji nawierzchni  
drogowych podatnych z asfaltem wysokomodyfikowanym HiMA z  
wykorzystaniem metody podobieństwa SIM”***

Promotor pracy: prof. dr hab. inż. Roman Nagórski

Promotor pomocniczy: dr inż. Krzysztof Błażejowski

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała nr 427/2022 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Warszawskiej, która została podjęta na posiedzeniu w dniu 10 maja 2022 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Magdaleny Złotowskiej. Podstawą formalną wykonania recenzji jest ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2018 poz. 1669, z późn. zm.).

### 2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska w formie monografii pt. *„Mechanistyczno-empiryczne projektowanie konstrukcji nawierzchni drogowych podatnych z asfaltem wysokomodyfikowanym HiMA z wykorzystaniem metody podobieństwa SIM”* przygotowana przez Panią mgr inż. Magdalenę Złotowską na Politechnice Warszawskiej w ramach dyscypliny naukowej: inżynieria lądowa i transport, dziedzina nauk: nauki inżynierijno-techniczne, pod kierunkiem promotora prof. dr hab. inż. Romana Nagórskiego oraz promotora pomocniczego dr inż. Krzysztofa Błażejowskiego.

### 3. Omówienie treści rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Magdaleny Złotowskiej dotyczy zagadnienia projektowania konstrukcji nawierzchni podatnych z mieszanek mineralno-asfaltowych z zastosowaniem asfaltu wysokomodyfikowanego HiMA (ang. Highly Modified Asphalt) oraz z wykorzystaniem metod mechanistyczno-empirycznych. Recenzowana rozprawa, wydana drukiem w formie monografii, składa się z pięciu zasadniczych rozdziałów, poprzedzonych spisem treści oraz

streszczeniem w języku polskim i angielskim. Praca kończy się spisem bibliografii (łącznie 124 pozycje literatury), spisem rysunków i tablic. Praca zawiera łącznie 153 strony tekstu.

Rozdział pierwszy zatytułowany „Wprowadzenie” Autorka rozpoczęła od wprowadzenia w tematykę pracy oraz uzasadnienia zainteresowania się problemem projektowania konstrukcji nawierzchni, w której zastosowano asfalt wysokomodyfikowany. Następnie w rozdziale przedstawiono cele i zakres pracy. W rozdziale pierwszym przedstawiono także układ pracy, a także spis najważniejszych symboli i oznaczeń.

Rozdział drugi zatytułowany „Studium literatury” zawiera przegląd stanu wiedzy i pozycji literaturowych w zakresie zagadnień związanych z tematyką pracy doktorskiej: Rozdział ten został podzielony na cztery podrozdziały, spośród których pierwszy opisuje modyfikację asfaltu polimerami, drugi opisuje badania laboratoryjne mieszanek mineralno-asfaltowych, trzeci analizę mechanistyczną konstrukcji nawierzchni, natomiast czwarty metody oceny trwałości zmęczeniowej nawierzchni.

Zasadnicze dla rozprawy doktorskiej są rozdziały 3 i 4 dotyczące analiz własnych Autorki. W rozdziale trzecim sformułowano i opisano metodę SiM prognozowania trwałości nawierzchni z asfaltem wysokomodyfikowanym ze względu na spękania zmęczeniowe. Przeprowadzono także analizę wpływu parametrów materiałowych na obliczaną trwałość zmęczeniową. W rozdziale 3 pracy doktorskiej po raz pierwszy pojawiają się dwie tezy pracy.

W rozdziale czwartym przedstawiono zastosowanie metody SiM do projektowania konstrukcji nawierzchni podatnych z asfaltem wysokomodyfikowanym w zakresie kategorii ruchu KR5-KR7 oraz przy założeniu różnych układów warstw i w odniesieniu do nawierzchni referencyjnej zaprojektowanej według katalogu typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych z asfaltem drogowym.

Praca doktorska została podsumowana w rozdziale piątym zawierającym wnioski końcowe oraz rozważania dotyczące możliwych kierunków dalszych prac badawczych. Po tym rozdziale w pracy zawarto spis bibliografii oraz spis rysunków i tablic.

#### **4. Dobór tematu, zakres, cele i tezy rozprawy doktorskiej**

Recenzowana praca doktorska dotyczy aktualnego i ważnego zagadnienia związanego z potrzebą uwzględnienia zastosowania asfaltu wysokomodyfikowanego HiMA do mieszanek mineralno-asfaltowych w projektowaniu konstrukcji nawierzchni podatnej. Asfalt HiMA jest coraz częściej stosowany na świecie, a także w Polsce. Dzięki zwiększonej do 7,5% zawartości elastomeru SBS w stosunku do tradycyjnego asfaltu modyfikowanego (zawartość SBS od 2,5 do 5%) uzyskuje się lepsze asfaltowe o ciągłej fazie polimerowej, w którym tak naprawdę to polimer nadaje kluczowe cechy lepkości a nie asfalt bazowy. Powoduje to istotną poprawę właściwości funkcjonalnych mieszanek mineralno-asfaltowych, w których zastosowano asfalt wysokomodyfikowany w zakresie między innymi odporności na koleinowanie, spękania niskotemperaturowe oraz spękania zmęczeniowe. Szczególnie poprawa właściwości zmęczeniowych jest bardzo istotna w kontekście wymiarowania konstrukcji nawierzchni drogowych, w którym jednym z dwóch decydujących kryteriów zmęczeniowych jest kryterium spękań zmęczeniowych inicjowanych na spodzie projektowanego pakietu warstw asfaltowych.

Jako podstawowy cel przygotowanej rozprawy doktorskiej, który został przedstawiony na stronie 14 pracy podano opracowanie narzędzia pozwalającego na prognozę trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni podatnej, w której co najmniej w jednej warstwie asfaltowej zastosowano mieszankę mineralno-asfaltową z asfaltem wysokomodyfikowanym (HiMA) oraz pokazanie możliwości zastosowania tego narzędzia do indywidualnego

projektowania nawierzchni. Dodatkowym celem pracy była ocena wpływu modeli materiałów zastosowanych do poszczególnych warstw nawierzchni oraz ich parametrów na analizowany stan naprężeń, odkształceń i przemieszczeń i w konsekwencji na trwałość zmęczeniową nawierzchni. W ocenie recenzenta zastosowane w opisie celu pracy określenie „opracowanie narzędzia” nie jest poprawny. Autorka wykorzystuje tak naprawdę dostępne narzędzia w zakresie laboratoryjnych badań zmęczeniowych, programów komputerowych (np. VEROAD), klasyczną formułę obliczeniową trwałości zmęczeniowej według koncepcji Wöhlera proponując metodę SiM (Similarity Method) bazującą na wybranym, klasycznym kryterium zmęczeniowym poprzez zastosowanie zmodyfikowanych współczynników krzywej zmęczenia z badań laboratoryjnych. Zaproponowano trzy warianty metody SiM:

- SiM 1 (scale) – skalowanie współczynników krzywej zmęczeniowej nawierzchni referencyjnej,
- SiM 2 (move) – obrót i translacja krzywej zmęczenia nawierzchni referencyjnej,
- SiM 3 (direct) – zastosowanie współczynnika korygującego (zwiększającego) trwałość nawierzchni referencyjnej obliczonego dla danego poziomu odkształceń.

Autorka rozprawy doktorskiej w rozdziale 3 str. 48 oraz 67 sformułowała następujące dwie tezy naukowe:

1. „Możliwe jest zastosowanie metody SiM do projektowania konstrukcji nawierzchni drogowych podatnych z asfaltem wysokomodyfikowanym”.
2. „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”.

W odniesieniu do Tezy 1 należy stwierdzić, że przedstawiona w pracy autorska metoda SiM do projektowania konstrukcji nawierzchni drogowych z asfaltem wysokomodyfikowanym posiada potencjał naukowy pozwalający na uwzględnienie zalet wynikających ze stosowania lepszego asfaltowego z dużą zawartością polimeru. Natomiast Teza 2 pracy posiada duży walor aplikacyjny, który stwarza możliwość szerszego stosowania metody SiM w projektowaniu indywidualnym konstrukcji nawierzchni w Polsce przy wykorzystaniu nowych i innowacyjnych materiałów drogowych o właściwościach istotnie różniących się od właściwości materiałów stosowanych standardowo.

## **5. Ocena rozprawy doktorskiej**

Ocena rozprawy doktorskiej została przedstawiona w dwóch częściach. Część pierwsza stanowi ocenę merytoryczną, w której wyszczególniono negatywne i pozytywne, zdaniem recenzenta, aspekty pracy z podziałem na uwagi ogólne oraz uwagi szczegółowe. Z kolei w części drugiej przedstawiono uwagi redakcyjne, stylistyczne oraz formalne.

### **5.1. Ogólna ocena merytoryczna**

Zakres recenzowanej rozprawy doktorskiej bardzo dobrze adresuje aktualne potrzeby w dziedzinie budownictwa drogowego, jakie obecnie rozpatrywane są w Polsce i na świecie. Wpisują się one w potrzeby społeczne zmierzające do projektowania oraz budowy dróg o

trwałych i bezpiecznych nawierzchniach drogowych w całym okresie projektowym. Zachodzący postęp technologiczny, istotnie wzrastający ruch drogowy oraz zmiany klimatyczne stwarzają konieczność stosowania nowych materiałów drogowych, a co za tym idzie także konieczność opracowywania nowych metod analizy i projektowania nawierzchni, w których te materiały są stosowane. Możliwości technologiczne produkcji w rafineriach asfaltów o istotnie zwiększonej zawartości polimeru i pojawienie się nowego materiału, jakim jest asfalt wysokomodyfikowany HiMA stały się szansą, ale również wyzwaniem wynikającym z potrzeby odpowiedniego uwzględnienia tego materiału zarówno podczas wymiarowania (czyli projektowania grubości) nawierzchni, jak i podczas prac utrzymaniowych. Autorka pracy, Pani mgr inż. Magdalena Złotowska, podjęła się zadania naukowego, którego celem jest opracowanie metody projektowania nawierzchni uwzględniającej nowy materiał, co należy ocenić bardzo pozytywnie. Recenzowana praca zawiera typowe elementy pracy naukowej, tj. przegląd literatury, część analityczną oraz część aplikacyjną, pokazującą rozwiązania wynikające z zastosowanej metody SiM.

Pierwszą uwagą krytyczną do pracy jest to, że Autorka nie prowadziła własnych badań laboratoryjnych, które stanowią istotny element pracy doktorskiej wpływający mocno na wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych. Jak podano na str. 15 pracy „Dane do obliczeń oparto na wynikach badań laboratoryjnych 6 mieszanek mineralno-asfaltowych, 3 z asfaltem drogowym i 3 z asfaltem wysokomodyfikowanym, opublikowanych przez firmę Orlen Asphalt. Sam fakt skorzystania z wykonanych wcześniej badań zmęczeniowych nie jest niczym złym. Takie podejście może wynikać z czasochłonności badań zmęczeniowych w laboratorium i bywa stosowane w pracach naukowo-badawczych. Z drugiej jednak strony Autorka pracy nie miała żadnego wpływu na odpowiednie zaplanowanie eksperymentu w laboratorium pod kątem prowadzenia przyszłych analiz obliczeniowych. Jest w tym pewna niespójność i konieczność dostosowywania metody obliczeniowej do uzyskanych krzywych zmęczeniowych z wcześniejszych badań laboratoryjnych. Czy Autorka uważała za zasadne przeprowadzenie własnych badań laboratoryjnych zmęczenia?

Druga uwaga krytyczna dotyczy przeprowadzonej analizy konstrukcji nawierzchni i przyjętych przez Autorkę założeń obliczeniowych. Zgodnie z tym, co podano w rozdziale 3.3 str. 54, jako nawierzchnię wyjściową (i podstawową) przyjęto typową konstrukcję nawierzchni podatnej przeznaczoną do ruchu kategorii KR5 wg pozycji literatury [107], czyli zgodnie z Katalogiem Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. Nawierzchnię tą oznaczono, jako referencyjną (RS). Analizie poddano również nawierzchnie z zastosowaniem mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem wysokomodyfikowanym:

- typ HB – z asfaltem wysokomodyfikowanym tylko w warstwie podbudowy asfaltowej,
- typ FH – z asfaltem wysokomodyfikowanym zastosowanym do wszystkich warstw asfaltowych (ścieralnej, wiążącej i podbudowy).

Podstawowym założeniem przyjętym w Katalogu TKNPiP jest podział konstrukcji nawierzchni na warstwy górne i warstwy dolne nawierzchni (patrz Rys. 4.1 str. 17 w Katalogu). Podział ten nie jest przypadkowy i determinuje metodykę prowadzenia analiz nawierzchni. Przyjęta w Katalogu filozofia projektowania konstrukcji nawierzchni stosowana jest także w innych krajach w Europie i na świecie. Dolne warstwy nawierzchni wraz z ulepszonym podłożem stanowią tzw. fundament, który powinien charakteryzować się odpowiednią nośnością (najczęściej wyrażoną modułem odkształcenia) w celu zapewnienia właściwej pracy górnych warstw nawierzchni w całym okresie eksploatacji nawierzchni. W przypadku wymagań niemieckich minimalna wartość wtórnego modułu odkształcenia wynosi  $E_2 \geq 120$  MPa (kategorie ruchu SV-

IV) i  $E_2 \geq 100$  MPa (pozostałe kategorie ruchu V-VI). Podobne założenie występuje w wymaganiach brytyjskich (dolne warstwy, ang. Foundation składają się z podbudowy pomocniczej (ang. Sub-base), warstwy mrozoochronnej/ulepszego podłoża (ang. Capping layer). Aby właściwie zaprojektować górne warstwy nawierzchni należy wcześniej odpowiednio zaprojektować warstwy dolne nawierzchni, tak aby na ich powierzchni uzyskać wymaganą nośność. Tak samo jest w katalogach takich krajów jak Francja, Hiszpania czy też Austria. Autorka pracy doktorskiej zastosowała odmienne podejście traktując obliczeniowo dolne i górne warstwy w sposób łączny. Oczywiście naukowo miała Pani do tego prawo, jednak absolutnie nie wolno w takim wypadku porównywać wyników analiz konstrukcji nawierzchni dla grubości „katalogowych” i dla grubości z zastosowaniem mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem wysokomodyfikowanym. Aspekt ten jest o tyle bardzo ważny, że w przypadku zastosowania asfaltu wysokomodyfikowanego już do warstwy podbudowy (typ nawierzchni HB) ze względu na obniżoną wartość modułu sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej, w której zastosowano asfalt wysokomodyfikowany decydującym kryterium zmęczeniowym w przypadku wyższych kategoriach ruchu, w tym również dla analizowanej kategorii ruchu KR5, jest kryterium deformacji strukturalnych podłoża gruntowego. Standardowo, zgodnie z założeniami Katalogu TKNPiP, jako miejsce krytyczne do wyznaczenia odkształceń pionowych przyjmuje się górę dolnych warstw nawierzchni (czyli górę opisanego wcześniej tzw. fundamentu nawierzchni). Jeśli przyjmiemy natomiast, jako miejsce krytyczne do obliczeń odkształcenia pionowego górę podłoża gruntowego pod dolnymi warstwami nawierzchni wtedy uzyskamy znacznie niższą wartość obliczeniowego odkształcenia pionowego. W konsekwencji pojawia się nam pewien zapas trwałości zmęczeniowej, który przekłada się na możliwą redukcję grubości warstw asfaltowych. W żadnym miejscu recenzowanej pracy doktorskiej ten fakt nie został poruszony ani skomentowany. Podsumowując, istotna część uzyskanych redukcji grubości warstw asfaltowych nie wynika z zastosowania asfaltu wysokomodyfikowanego do analizowanych warstw nawierzchni, czy też zastosowanej metody SiM, tylko z przyjętego sposobu analizy konstrukcji nawierzchni, innego niż został zastosowany w typowych rozwiązaniach w Polsce. W opinii recenzenta takie odmienne podejście jest szczególnie widoczne w proponowanych rozwiązaniach w Rozdziale 4. Proponowane przez Autorkę wzmocnienie dolnych warstw nawierzchni, polegające na: a) zwiększeniu modułu sprężystości materiału podbudowy pomocniczej do 600 MPa lub b) zastosowaniu dodatkowej warstwy ulepszego podłoża z gruntu stabilizowanego spoiwem hydraulicznym  $C_{1,5/2}$  gr. 20 cm, to nic innego, jak próba wpływu na kryterium deformacji strukturalnych podłoża poprzez: a) większą wartość modułu lub b) dalsze obniżenie (o kolejne 20 cm) miejsca krytycznego do obliczeń odkształcenia pionowego. Stąd też wynika tak duża możliwość redukcji grubości warstw asfaltowych dla rozwiązań przedstawionych w rozdziale 4.6, tzw. „optymalnych” i pokazanych w tablicach 4.19 - 4.21. (redukcja 10-12 cm dla najwyższej kategorii ruchu KR7). Czy Autorka mogłaby skomentować przyjęte założenia obliczeniowe? Tym bardziej, że niejako wiąże się to bezpośrednio z przyjętą tezą II pracy doktorskiej.

Trzecia uwaga wiąże się bezpośrednio z uwagą drugą i dotyczy aspektu technologicznego oraz wykonawczego przyjętych założeń obliczeniowych. W pracy doktorskiej założono, że we wszystkich analizowanych przypadkach (nawierzchnie RS, HB, FH) w podłożu gruntowym występuje grunt charakteryzujący się grupą nośności podłoża gruntowego G1 i nośnością wyrażoną wtórnym modułem odkształcenia  $E=80$  MPa. Jest to założenie bardzo teoretyczne ponieważ w przypadku większości budowanych odcinków dróg w Polsce po wykonaniu korytowania stwierdza się występowanie gruntów o grupie nośności podłoża gruntowego od G2 do G4. W konsekwencji podłoża to wymaga wzmocnienia.



Zaproponowane w pracy rozwiązania polegające np. na wykonaniu pod warstwą podbudowy pomocniczej warstwy ulepszonego podłoża z gruntu stabilizowanego spoiwem hydraulicznym C1,5/2 gr. 20 cm na gruncie rodzimym G1 są w pewnej sprzeczności. Bo skoro jest grunt G1, który nie wymaga wzmocnienia, to dlaczego stosuje Pani warstwę wzmacniającą to podłoże gruntowe i to o gr. 20 cm? Jeśli celem tej warstwy jest redukcja grubości warstw asfaltowych, w których zastosowano asfalt wysokomodyfikowany, to pojawia się pytanie jak wzmacniać takie podłoże jeśli musimy wybudować konstrukcję nawierzchni na podłożu G2-G4? Co w przypadku występowania wysokiego poziomu zwierciadła wody gruntowej i konieczności zastosowania warstwy odsączającej? Co z koniecznością zastosowania warstwy mrozoochronnej z uwagi na wymagany warunek odporności na powstanie wysadzin drogowych?

Czwarta uwaga dotyczy wniosku przedstawionego na str. 83 pracy, cytuję: „Wszystkie 3 warianty metody SiM wykazują bardzo dużą wrażliwość na odchyłki wyników laboratoryjnych.” Zgodnie z normą PN-EN 12697-24 badanie odporności na zmęczenie metodą czteropunktowego zginania belki należy przeprowadzić przy nie mniej niż 3 poziomach odkształcenia i przy minimum 6 próbkach na każdym poziomie. W pracy przyjęto 2-4 pomiarów dla każdego poziomu odkształcenia. Jaka według Autorki powinna być minimalna liczba oznaczeń zmęczenia dla każdego poziomu odkształcenia w celu zapewnienia wiarygodności stosowanej metody SiM?

Niezależnie od przedstawionych powyżej uwag krytycznych recenzowana praca doktorska zawiera pierwiastki oryginalności. Autorka bardzo wyraźnie wychodzi poza ustalone standardy i demonstrowa bardzo dobry poziom wiedzy teoretycznej, jak i w zakresie warsztatu numerycznego. Rozprawa zawiera kilka aspektów merytorycznych, które zasługują na wyróżnienie. Według recenzenta, spośród takich elementów należy wymienić:

- Do opisu właściwości materiałów warstw asfaltowych nawierzchni zastosowano model lepkosprężysty Hueta-Sayegha, który lepiej modeluje właściwości lepkosprężyste warstw asfaltowych, w których zastosowano asfalt wysokomodyfikowany. W konsekwencji zastosowanie programu VEROAD w miejsce programu wykorzystującego model sprężysty istotnie podnosi walory pracy.
- Autorka wykazała się bardzo dobrą znajomością formuł zmęczeniowych i opracowała autorską metodę SiM wykorzystującą klasyczne kryteria zmęczeniowe warstw asfaltowych (np. kryterium AASHTO 2004) oraz krzywe zmęczenia mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltami drogowymi oraz wysokomodyfikowanymi w celu wyznaczenia współczynników i zastosowania ich w praktyce. Pomysł jest bardzo ciekawy, choć wymaga wykonania pracochłonnych i czasochłonnych badań zmęczeniowych w laboratorium.
- Bardzo ciekawą analizę przedstawiono w rozdziale 3.8 dotyczącym wpływu rodzaju modelu i wartości temperatury ekwiwalentnej na wyniki analizy trwałości zmęczeniowej. Analiza ta wiąże się bezpośrednio ze zmianami klimatycznymi zachodzącymi na świecie oraz w Polsce. Wzrost wartości temperatury ekwiwalentnej wynikający ze wzrostu zwłaszcza temperatur w okresie letnim będzie wiązał się z koniecznością zwiększenia grubości warstw asfaltowych nawierzchni lub z możliwością większego uzasadnienia dla zastosowania asfaltów wysokomodyfikowanych.

Na zakończenie ogólnej oceny merytorycznej Recenzent pragnie zaznaczyć, że prezentowane w rozprawie doktorskiej wyniki badań mają duży potencjał publikacyjny. Biorąc pod uwagę dotychczasowy dorobek Doktorantki (dane na dzień 3.08.2022 r.: 5 dokumentów w bazie Scopus, 9 cytowań, H-indeks 2, sumaryczny IF=5,944) konieczna jest intensyfikacja

wysiłku publikacyjnego. Przedstawione w pracy zagadnienia mają bardzo dużą szansę na opublikowanie w najlepszych czasopismach recenzowanych.

### Szczegółowe uwagi i pytania merytoryczne:

- 1) str. 15: „przegląd badań laboratoryjnych wykonywanych dla mieszanek mineralno-asfaltowych”, czy w zakresie pracy jest przegląd wszystkich badań laboratoryjnych mma? Przecież tak nie jest.
- 2) str. 19: w drugim akapicie rozdziału 2.1 „Asfalty modyfikowane polimerami” występuje następujące stwierdzenie: „Jako dodatki modyfikujące stosuje się [77, 85]: gумы z rozdrobnionych opon samochodowych, siarkę, odpady z tworzyw sztucznych, włókna (poliesterowe, polipropylenowe), asfalt naturalny Trynidad lub Gilsonit, wypełniacze, związki organometaliczne (sole manganu na nośniku węglowodorowym), a ostatnio także nanocząsteczki. Najczęściej stosowanymi modyfikatorami są jednak polimery.” Czy można na równi potraktować dodatek np. włókien polipropylenowych, wypełniaczy czy polimerów, jako modyfikatorów? Proces technologiczny zastosowania wymienionych dodatków jest przecież różny. Część z nich dodaje się do mieszanek mineralno-asfaltowych podczas ich produkcji w Wytwórnich Mieszanek, część natomiast, w tym również polimery, dodaje się już na etapie produkcji asfaltu w rafineriach.
- 3) str. 20, wers 15: „Dowodzą tego badania mieszanek asfaltowych metodami zmęczenia 4PB-PR, TSRST, SCB [3, 7, 8]. Badania takie jak TSRST (ang. Thermal Stress Restrained Specimen Test) czy też SCB (ang. Semi-Circular Bending Test) nie są badaniami zmęczeniowymi. W badaniu TSRST bada się naprężenie i temperaturę pęknięcia próbki chłodzonej z prędkością 10°C/h, natomiast w badaniu SCB bada się mechanikę pęknięcia (energię pęknięcia).
- 4) str. 22, wers 5: „Właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych kształtuje się na etapie projektowania i zależą w dużej mierze od wzajemnych proporcji faz kompozytu: fazy stałej (mieszanka mineralno-asfaltowa), ciekłej (lepiszcze) oraz gazowej (wolna przestrzeń)...”. Przedstawione twierdzenie jest nieprecyzyjne. Faza, w jakiej występuje lepiszcze asfaltowe zależy od temperatury. Dużym uproszczeniem jest stwierdzenie, że lepiszcze asfaltowe występuje w fazie ciekłej.
- 5) str. 22, wers 14: „Do wstępnej oceny odporności na spękania zmęczeniowe i koleinowanie może służyć badanie Marshalla opisane w normie PN-EN 12697-34 [118]”. To zdanie jest nieprawdziwe. Badanie Marshalla polega na wyznaczeniu stabilności i przemieszczenia (płyćnięcia) w temperaturze +60°C i nie ma ono nic wspólnego z badaniem zmęczenia. Badanie to nie jest także bezpośrednią miarą koleinowania, nawet jako ocena wstępna. Badane cechy pośrednio mogą świadczyć o podatności mma na koleinowanie ale nie na zmęczenie.
- 6) str. 46: brak podsumowania studiów literatury w kontekście analiz obliczeniowych prowadzonych w kolejnych rozdziałach.
- 7) str. 48, wers 10: „kryterium deformacji trwałych metody Instytutu Asfaltowego”, powinno być: „kryterium deformacji strukturalnych”.
- 8) str. 48, wers 5 od dołu: modyfikowanym czy wysokomodyfikowanym?
- 9) str. 58: podano, że wartości modułu sprężystości Younga E materiałów w warstwach nie asfaltowych i wartości współczynników Poissona  $\nu$  materiałów wszystkich warstw nawierzchni przyjęto zgodnie z rekomendacjami w Katalogu TKNPiP [107] i zamieszczono w tablicy 3.5. Dlaczego w takim razie w analizach konstrukcji nawierzchni dla ruchu KR5 do warstwy podbudowy pomocniczej przyjęto mieszankę związaną spoiwem

hydraulicznym C<sub>3/4</sub> zamiast rekomendowanej przez wspomniany Katalog mieszanki C<sub>5/6</sub> (Tablica 11.4, str. 66 w Katalogu)? Przyjęcie innego materiału, niż rekomendowany w Katalogu skutkuje inną wartością modułu sprężystości. W pracy przyjęto wartość modułu sprężystości E=400 MPa, natomiast dla warstwy podbudowy pomocniczej w Katalogu występuje E=500 MPa.

- 10) str. 60, rozdział 3.5: w którym miejscu analizowanej konstrukcji nawierzchni w przykładzie obliczeniowym przyjęto punkt krytyczny do pomiaru odkształcenia pionowego ściskającego  $\epsilon_{zz}$ ?
- 11) str. 68: rozdział 3.6 zatytułowano: „Analiza konstrukcji podstawowej”. Można się trochę pogubić, ponieważ wcześniej była konstrukcja referencyjna, teraz podstawowa. Warto byłoby to lepiej wytłumaczyć.
- 12) str. 129-131: Niewątpliwie przedstawione redukcje grubości nawierzchni projektowanej byłyby bardzo atrakcyjne dla firm wykonawczych. Jednak w pracy stosunkowo niewiele miejsca poświęcono względem technologicznym budowy nawierzchni i potencjalnym trudnościom wynikającym np. z niedostępności materiałów. Stosunkowo trudno jest także sprawdzić na budowie jaki rzeczywiście asfalt jest wbudowywany. Należy także pamiętać, że analizowane kryteria zmęczeniowe dotyczą tylko jednego mechanizmu uszkodzeń nawierzchni, a mianowicie spękań zmęczeniowych „z dołu do góry”. W przypadku zastosowania asfaltu wysokomodyfikowanego tylko w warstwie podbudowy asfaltowej, a w warstwie ścieralnej zastosowania asfaltu z typową zawartością polimeru około 3% czy przy takich proponowanych przez Panią redukcjach warstw grubości warstw asfaltowych nie obawia się Pani spękań typu „top-down” czyli z góry do dołu?
- 13) str. 133, rozdział 5, Podsumowanie: odnośnie wniosku nr 2 konieczne jest preredagowanie tego wniosku, ponieważ sposób obliczeń przyjęty w Katalogu TKNPiP jest inny niż sposób obliczeń przedstawiony w niniejszej pracy. Zatem nie wolno porównywać ze sobą uzyskanych grubości.
- 14) str. 134, wniosek 7: Ten wniosek powinien być skomentowany w kontekście przyjętego sposobu obliczeń konstrukcji nawierzchni bez podziału na warstwy górne i dolne (istotne obniżenie punktu krytycznego do obliczeń odkształcenia pionowego i trwałości zmęczeniowej z kryterium deformacji strukturalnych).

## 5.2. Ocena redakcyjna i formalna

Recenzowana rozprawa doktorska została napisana w sposób poprawny. Praca jest czytelna, zwięzła oraz zrozumiała. Pewną trudność stwarza przyjęty układ pracy, w którym dopiero w rozdziale 3 podano główne tezy rozprawy doktorskiej. Styl i język techniczny pracy jest poprawny. Występują nieliczne błędy składni i stylu.

Szczegółowe ważniejsze uwagi redakcyjne i formalne przedstawiono poniżej.

### Szczegółowe uwagi redakcyjne i formalne:

- 1) str. 8: W podsumowaniu streszczenia użyto niebył fortunnie określenia „...rysując kilka dalszych tematów badawczych wartych pojęcia.” Może lepiej: „Zaproponowano możliwe kierunki dalszych prac badawczych”?
- 2) str. 9: Abstract w języku angielskim i Streszczenie w języku polskim nie są ze sobą tożsame.



- 3) str. 13: tytuł rozdziału 1.1. „Tematyka i motywacja”. W opinii recenzenta tytuł rozdziału nie jest precyzyjny. Zawartość rozdziału wprowadza w tematykę poruszoną w pracy doktorskiej, zatem może lepiej byłoby zatytułować rozdział: „Tematyka pracy”?
- 4) str. 14: tytuł rozdziału 1.2. „Cele i zakres rozważań”. Lepiej: „Cele i zakres pracy”.
- 5) str. 22, wers 2: przywołana pozycja WTW opracowane przez ZDW w Katowicach, brak odwołania w spisie literatury.
- 6) Często w pracy pojawia się określenie „konstrukcja”. Powinno być „konstrukcja nawierzchni” lub „nawierzchnia”.
- 7) Zastosowano pojęcie ‘prosta zmęczenia’. Poprawne określenie to „krzywa zmęczeniowa”. Prosta jest szczególnym przypadkiem krzywej.
- 8) str. 67, wers 7: „...co zmniejsza trwałość deformacyjną...”. Recenzent nie spotkał się wcześniej z takim określeniem „trwałość deformacyjna”.
- 9) W rozdziale 5, Podsumowaniu brak jest wyraźnego wydzielenia części przedstawiającej kierunki dalszych prac Autorki. Obecnie nie jest to czytelne.

## 6. Podsumowanie oceny pracy

Pomimo przedstawionych w niniejszej recenzji uwag krytycznych, czy też niejasności wymienionych powyżej, dobrze oceniam zakres oraz wykonanie rozprawy doktorskiej. Ponadto stwierdzam, że uzyskane przez Doktorantkę oryginalne wyniki analiz teoretycznych potwierdzające udowodnienie postawionych tez badawczych oraz oryginalne rozwiązanie problemu naukowego można uznać za wymierny wkład do stanu wiedzy w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport.

## 7. Wniosek końcowy

Recenzent stwierdza, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Magdaleny Złotowskiej pt. „Mechanistyczno-empiryczne projektowanie konstrukcji nawierzchni drogowych podatnych z asfaltem wysokomodyfikowanym HiMA z wykorzystaniem metody podobieństwa SiM” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. *Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. poz. 1669) oraz na podstawie Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.). Doktorantka posiada odpowiednią wiedzę teoretyczną oraz umiejętności prowadzenia samodzielnej pracy naukowej.

Wobec powyższego wnoszę o przyjęcie recenzowanej rozprawy naukowej, jako podstawy do nadania mgr inż. Magdalenie Złotowskiej stopnia doktora w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie naukowej inżynieria lądowa i transport i dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony przed Komisją powołaną przez Radę Naukową Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Warszawskiej.



