

Dr hab. inż. Piotr Mackiewicz, prof. uczelni
Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Katedra Dróg, Mostów Kolei i Lotnisk

Wrocław 08.09.2023

DZIEKAN
Wydziału Inżynierii Lądowej

prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz

WPLYNEŁO

Dnia 18.09.2023
L. cz. IL. PW / 506 / 2023

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Tutki
pt. „Ocena wpływu wybranych efektów dynamicznych na kluczowe charakterystyki mechaniczne
nawierzchni drogowej podatnej i półsztywnej”**

1. Podstawa formalna

Recenzja została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej w związku z pismem z dnia 14.04.2023r. Podstawę opracowania recenzji stanowi rozprawa doktorska wydana przez Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, 2023 r. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Roman Nagórski.

2. Charakterystyka i zakres rozprawy

Rozprawa dotyczy oryginalnego i niełatwego zagadnienia dotyczącego modelowania nawierzchni drogowych z uwzględnieniem oddziaływań dynamicznych. Autor w rozprawie podjął się zatem trudnego zadania polegającego na zbadaniu wpływu sił bezwładności na wyniki opracowanego modelu obliczeniowego. Dodatkowo przeprowadził wnikliwe analizy projektowania konstrukcji nawierzchni drogowej z uwzględnieniem nierówności podłużnej drogi.

Na szczególną uwagę zasługuje dodatkowe uwzględnienie lepkosprężystych właściwości warstw asfaltowych. Dzięki temu autor mógł uzależnić uzyskany wyniki od prędkości oddziaływania obciążenia.

W celu zrealizowania założeń rozprawy przeprowadzono szereg obliczeń numerycznych i dyskusji teoretycznych z zakresu reologii, i mechaniki ciała stałego. Pozyskaną wiedzę wykorzystano do symulacji numerycznej wykorzystującej metodę elementów skończonych. Obliczenia wykonano w programie ABAQUS (w tym z zastosowaniem elementów specjalnych o nieskończonym wymiarze), a także programie VEROAD. W celach porównawczych i weryfikacyjnych uwzględniono rozwiązanie Burmistera oraz samodzielnie zaimplementowane rozwiązania znanych w literaturze zadań, jednakże uwzględniających siły bezwładności przy zastosowaniu transformacji całkowych. Pozwoliło to Autorowi przeanalizować procesy dynamiczne zachodzące podczas obciążenia nawierzchni z uwzględnieniem efektów lepkosprężystych i mogące wyjaśnić problemy odkształcalności i trwałości nawierzchni drogowych warunkach obciążenia zmiennego.

Na recenzowaną rozprawę o łącznej objętości 285 stron składa się 7 rozdziałów merytorycznych, spis bibliografii obejmujący 133 pozycje, streszczenie w języku polskim i angielskim wraz ze słowami kluczowymi.

Dokument rozprawy zawiera łącznie 255 wzorów matematycznych, 86 tablic oraz 182 rysunki zawierających wykresy oraz schematy. W rozprawie autor starał się językiem przyjaznym opisać różne skomplikowane zagadnienia z dziedziny mechaniki nawierzchni oraz matematyki.

W rozdziale pierwszym autor przedstawia założenia, zakres oraz uzasadnia motywację opracowania rozprawy.

Drugi rozdział rozprawy wprowadza czytelnika w tematykę zagadnienia oraz problematykę nawierzchni drogowych. Autor cytuje literaturę i odnosi się do aktualnego stanu wiedzy.

Mimo wyodrębnionego rozdziału „przegląd literatury” Autor często w różnych rozdziałach dodatkowo komentuje różne informacje prezentując publikacje naukowe. Pozwala to oczywiście zrozumieć prezentowaną tematykę, jednak wydaje się, że lepiej mogłoby to być zebrane w jednym początkowym rozdziale, a dalsza część pracy mogłaby wykazywać wyłącznie samodzielne osiągnięcia.

Rozdział trzeci zawiera implementację najważniejszych równań, metod i narzędzi użytych w dalszych częściach pracy do zbadania wpływu efektów dynamicznych na projektowanie i diagnostykę nawierzchni. Tutaj Autor wykazał się wiedzą z mechaniki ośrodków ciągłych, zaimplementował w rozwiązaniach siły bezwładności, zdefiniował podstawowe związki lepkosprężyste opisujące warstwy asfaltowe. Swoją uwagę skupił na modelu Burgersa oraz modelu w postaci szeregu Prony’ego. Ten rozdział zawiera także metody identyfikacji parametrów na podstawie badań doświadczalnych oraz interesujący przegląd rozwiązań zagadnienia półprzestrzeni warstwowej, co wykorzystał w dalszych etapach w swojej pracy.

Autor zwrócił uwagę (w sumie słusznie) na rozwiązania numeryczne MES, które jako jedyne dają skuteczną możliwość pełnego uwzględnienia zagadnień dynamiki dla dowolnego sposobu przyłożenia siły oraz przyjęcia modelu materiału lepkosprężystego.

Niewątpliwie swoją wiedzą Autor wykazał się w rozdziale czwartym analizując konstrukcję dla różnych prędkości obciążenia pojazdu. Uwzględnił 4 modele (różne oddziaływania sił bezwładności oraz modele materiałowe). W tym rozdziale zaprezentowano związki funkcyjne między ujęciami, odkształceniami i przede wszystkim trwałościami nawierzchni w odniesieniu do prędkości. Są to bardzo cenne informacje stanowiące ważne i cenne dla rozprawy osiągnięcie.

W rozdziale szóstym Autor modelując oddziaływanie badania FWD przedstawił wrażliwość obliczeń odwrotnych na zmianę otrzymany parametrów materiału.

Podsumowanie z przeprowadzonych analiz oraz właściwie sformułowane wnioski zawarto w końcowym rozdziale siódmym.

Pod koniec rozprawy zestawiono bibliografię oraz spis rysunków i tablic.

3. Uwagi ogólne (w tym krytyczne) dotyczące rozprawy

Recenzowana rozprawa mgr inż. Pawła Tutki dotyczy ważnego i nierozwiązanego do końca problemu występującego nie tylko w drogownictwie, ale także w innych dziedzinach budownictwa. Mimo, iż tematyka była i jest rozpoznawana przez wielu badaczy, Autor rozprawy podjął się trudnego i ambitnego zadania, którego efektem było zastosowanie do modelowania nawierzchni opisów z uwzględnieniem efektów dynamicznych w tym uwzględnienie sił bezwładności. Dodatkowo Autor

przenalizował modelowanie materiałowe lepkosprężyste oraz wpływ prędkości na uzyskiwane wyniki, a w szczególności na trwałość nawierzchni drogowej.

Rozprawa ma ważne znaczenie dla rozwoju mechanicznych metod projektowania nawierzchni drogowych. Docenić należy podejście kompleksowe z uwzględnieniem praktycznie wszystkich aspektów pracy nawierzchni drogowej co Autor weryfikował różnymi modelami i ich kombinacjami.

Zakres merytoryczny, cel, zakres, wnioski ujęte w rozprawie

1. W rozdziale „1.1 Wprowadzenie i cel pracy” cel nie jest bezpośrednio zacytowany (np. z uwzględnieniem celu ogólnego i częściowego jak to ma miejsce w tak rozległych pod względem tematyki pracach). Autor rozpisuje się na temat wielu zagadnień, oczywiście związanych z nawierzchniami drogowymi, jednak mogło być to lepiej ujęte w podsumowaniu stanu wiedzy. Dopiero pod koniec kolejnego rozdziału „1.2 Zakres pracy” Autor definiuje klarowny cel: „celem pracy było zbadanie wpływu uwzględnienia sił bezwładności na wyniki modelu obliczeniowego w przypadku projektowania konstrukcji nawierzchni drogowej (zarówno z oraz bez uwzględniania nierówności podłużnej drogi) oraz w przypadku badań nieniszczących FWD.”
2. Autor szczegółowo analizuje wybraną konstrukcję dla kategorii ruchu KR5. Z opisów i podsumowań końcowych Autora nie wiadomo, jednak, dla jakiego zakresu pracy nawierzchni powinny obowiązywać proponowane przez niego modele uwzględniające obciążenia dynamiczne.
3. Autor wykorzystuje do swoich modeli wyniki badań z innych prac (których jest współautorem) czasem jednak z kontekstu pracy nie wiadomo czy zostały one opracowane bezpośrednio przez Autora na potrzeby rozprawy czy są wykorzystane z wcześniejszych prac.
4. Autor według recenzenta niepotrzebnie ponownie przed każdym rozdziałem opisuje jego zakres skoro było to zaprezentowane na początku rozprawy. Przydatne jednak są częściowe podsumowania po niektórych rozdziałach, które pozwalają zrozumieć cel przeprowadzonych analiz i obliczeń. W niektórych rozdziałach/podrozdziałach niestety brakuje takich podsumowań (np. r. trzeci).
5. Podczas pierwszego czytania rozprawy, nie za bardzo zrozumiałe było modelowanie badania FWD oraz identyfikacja parametrów na podstawie czasów ugięć. Dopiero po przeczytaniu kilkukrotnego oraz dalszego zakresu pracy można było zrozumieć sens i idę prezentowanego zagadnienia.
6. Końcowe wnioski ujęte w rozprawie są właściwie posegregowane i wyartykułowane. Opisano osiągnięcia i konkretne dokonania Autora, występują drobne błędy stylistyczne. Autor stosuje czasem popularne, nienaukowe słownictwo, niejasne i skomplikowane sformułowania, pewne neologizmy. W rozdziale 7 – podsumowanie niepotrzebnie Autor opisuje co zrobił w rozdziałach - to jest zakres pracy. Lepiej można było zaakcentować wymagania dalszych prac naukowych. Było to prezentowane w innej części pracy, pod koniec niektórych rozdziałów.

Przegląd literatury

1. Przegląd stanu wiedzy (Autor nazywa to przeglądem literatury) został podzielony na kilka części: „2.1 Prace dotyczące budowy modelu mechanicznego nawierzchni drogowej”, 2.2

Prace dotyczące obliczeń trwałości nawierzchni drogowej, ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk dynamicznych, 2.3 Prace dotyczące wpływu nierówności na nawierzchnię drogową, 2.4 Prace dotyczące wpływu zjawisk dynamicznych na wyniki badań FWD, to niejako dobrze koresponduje z dalszymi tematami-rozdziałami rozprawy.

2. Mimo iż tematyka ujęta jest rozlegle to jednak cytowanie pojedynczych, wybranych publikacji wydaje się być nieco skromne. Przegląd stanu wiedzy oczywiście zawiera dużo kluczowych publikacji oraz informacji (także znanych, ale także unikalnych). Niestety nie zostały one odpowiednio skomentowane, „co wynika z tego przeglądu”, „jakie są osiągnięcia naukowców”, „jakie są ewentualne błędy gdy nie uwzględniamy "dynamiki" w modelowaniu" i „co jest niezbędne ze strony Autora do opracowania”.
3. Według recenzenta brakuje niektórych starszych, pionierskich publikacji oraz krajowych publikacji zaznanych naukowców. Warto promować krajowy stan wiedzy: wykonane już doktoraty i prace habilitacyjne. Np. Judycki opracował także „ładny” przegląd modeli nawierzchni drogowych. W przeglądzie brakuje też opisu publikacji na temat modelowanie, koła, pojazdu, opony i wpływu na obliczenia. W przeglądzie nie uwzględniono publikacji Krawczyka (doktorat) oraz publikacji Szydło (monografia habilitacyjna) - dotyczących identyfikacji parametrów z badań statycznych i dynamicznych FWD. Także Wardęga (doktorat) analizował także oddziaływanie dynamiczne pojazdu i wskaźnik IRI. Można było też zacytować publikacje z zakresu mechaniki materiału (Fung, Malver, Skrzypek, Jakowluk).
4. Dla wielu publikacji brakuje szczegółowych opisów, np. wydawcy i innych danych pozwalających zidentyfikować dostępny materiał.
5. Są pozycje, które występują w spisie, a nie zostały skomentowane w tekście rozprawy.
6. Czasem są podawane jakieś informacje w tekście, dla których z kolei nie podano odniesienia.

Strona techniczna, ogólne uwagi redakcyjne

1. Autor zredagował rozprawę zgodnie przyjętymi i powszechnie stosowanymi wymaganiami.
2. Występuje znikoma liczba błędów merytorycznych.
3. Znaczne uwagi można mieć do stylistyki i budowania zdań. Autor często stosuje skróty myślowe, stosuje popularne nienaukowe słownictwo. Np. „**Jasne jest**, że nawierzchnia jest obciążona w sposób dynamiczny...”, „Rozdział trzeci **służy** przedstawieniu...”, „...tak aby moduły dynamiczne sztywności były jak **najbliższe** modułom dla modelu Burgersa”. „Wyniki dla MS2 i MD2 są **zbieżne, w dużym stopniu się pokrywają**”. „Celem pracy było...W tym **celu** skupiono się na..”
4. Kluczowe wnioski i informacje, jakie „odkrywa” autor w ramach swojej rozprawy, często w sposób przypadkowy są wyartykułowane w dowolnych „środkowych” częściach rozdziału. Autor także często z jednego rozdziału odnosi czytelnika do kolejnego, oraz powtarza „myśli”, co utrudnia zrozumienie i trzymanie się konkretnego wątku danego zagadnienia.
5. Stwierdzono przypadki braku w konsekwencji nazywania i oznaczania zmiennych lub różnych wielkości. Np.: obliczenia pólodwrotne, obliczenia wsteczne. W większości publikacji stosuje się obliczenia odwrotne-backcalculation. Powinno być to wyjaśnione, co autor przez to rozumie: „Pół”; „ugięcia” – „przemieszczenia”, „grunt naturalny” – „podłoże gruntowe”- „grunt rodzimy”.
6. Forma graficzna rysunków-wykresów jest czytelna i w miarę jednolita pod względem stylów i jakości. Jednak szczególnie w rozdziale czwartym Autor prezentując wyniki obliczeń, powtarza informacje na różnych wykresach i dodatkowo zbiera je w podobny sposób pod koniec rozważań.
7. Inne komentarze i uwagi (w liczbie kilkuset) zawarto w trybie komentarzy w pliku pdf. Nie zestawiano ich do niniejszej recenzji w formie wydruku. Nie wszystkie wymagają

bezpośrednich odpowiedzi, celem podania ich do wiadomości Autora jest polepszenie przez niego przyszłej formy prezentacji swoich osiągnięć.

4. Zagadnienia nie wyjaśnione lub nie rozwinięte w rozprawie

1. Brakuje w zagadnieniach opisanego modelowania, koła, pojazdu, opony i wpływu na obliczenia.
2. Mimo promowania bardzo wielu rozbudowanych modeli z uwzględnieniem efektów dynamicznych nie zwrócono uwagi na problem identyfikacji parametrów materiałowych w terenie (głównie chodzi o badania FWD). W większości autor korzysta z wykonanych innych opracowań badań.
3. Brakuje szerszej dyskusji i dowodów dotyczących zakresu stosowania modelu Burgersa, który był „promowany” przez wielu autorów, np. Judyckiego.
4. W temacie pracy są nawierzchnie podatne i półsztywne. Autor nie zwrócił wyraźnej uwagi na te dwa typy nawierzchni w aspekcie ich analiz i obliczeń. Jakie „są różnice”, czy obciążenie dynamiczne wywołuje inne odpowiedzi w tych konstrukcjach, „jakie modele są lepsze do ich opisywania”.
5. Słabsza strona pracy to wspomniana stylistyka, prezentacja niektórych informacji, częściowo przegląd stanu wiedzy, a także brak precyzyjnie opisanych niektórych autorskich zagadnień-osiągnięć. Dopiero po przeczytaniu całej pracy wiadomo jakie były konkretne wnioski Autora.

5. Elementy zasługujące na uznanie

1. Opisano mało znane i stosowane zagadnienie dynamiczne w nawierzchni drogowej. Skutecznie zbadano efekty dynamiczne w czasie eksploatacji oraz w czasie badań nośności nawierzchni (badanie FWD). Opisany algorytm jest przydatny przy projektowaniu nowych i wzmocnionych konstrukcji.
2. Wykazano, istotny wpływ właściwości lepkosprężystych warstw asfaltowych, na pracę nawierzchni w zależności od prędkości obciążenia.
3. Formułując wnioski wskazano kiedy należy stosować modele dynamiczne przy projektowaniu nawierzchni; zwrócono uwagę na zakres stosowania modelu liniowo sprężystego oraz lepkosprężystego w zakresie zmiennych częstotliwości obciążenia.
4. Wykazano istotny wpływ prędkości pojazdów ciężkich na trwałość nawierzchni w aspekcie spękań zmęczeniowych oraz deformacji strukturalnych podłoża gruntowego.
5. Istotne osiągnięcie stanowi analiza wpływu nierówności nawierzchni na siłę oddziaływującą na nawierzchnię a w konsekwencji na trwałość nawierzchni.
6. Autor umiejętnie porusza się po tematyce modelowania i projektowania nawierzchni co świadczy o jego dużej wiedzy i doświadczeniu. W pracy zawarto bardzo dużo zarówno szczegółowych jak i ogólnych tematów wymagających znacznego zaangażowania i nakładu pracy.
7. Warto wyróżnić umiejętność zastosowania algorytmów numerycznych w systemie ABAQUS.
8. Warto docenić skrupulatny przegląd relacji konstytutywnych materiałów, opis modeli mechaniczne nawierzchni (rozdział 3).
9. Praca ma charakter teoretyczny i doskonałym jej zamknięciem byłaby weryfikacja w badaniach terenowych, co niewątpliwie wskazuje dalszą ścieżkę kariery naukowej.
10. Autor zdaje sobie sprawę z problemów badawczych związanych z identyfikacją parametrów materiałów drogowych oraz ich weryfikacją w odpowiednich modelach co najprawdopodobniej uwzględni w swoich przyszłych pracach naukowych.

6. Ocena rozprawy i wnioszek końcowy

Oceniana rozprawa ma głównie charakter teoretyczny jednak zastosowano w niej istotne wyniki i analizy możliwe do wykorzystania praktycznego.

W rozprawie zawarto oryginalne podejście w modelowaniu materiałów i zjawisk zachodzących w nawierzchni drogowej. Mimo, iż brakuje pewnych drobnych wyjaśnień, należy uznać niniejszą rozprawę za oryginalne i aktualne opracowanie przydatne w przyszłym mechanistycznym projektowaniu konstrukcji drogowych.

Wysoka jakość merytoryczna pracy świadczy o dużej wiedzy Autora i umiejętności poruszania się tematyce mechaniki ciała stałego, reologii oraz w zakresie zawansowanych obliczeń numerycznych.

Mimo iż rozprawa dotyczy opisywanych w wielu książkach i podręcznikach zagadnień modelowania nawierzchni, to jednak, Autor potrafił zwrócić uwagę na nierozpoznane dotychczas problemy, potrafił je zebrać i przeanalizować. Wykazał się przy tym skutecznym warsztatem badawczym i dużą wiedzą naukową w zakresie prezentowanej dziedziny.

Przytoczone niektóre krytyczne uwagi ogólne i szczegółowe, nie obniżają wartości wysoko ocenianej przeze mnie rozprawy oraz nie podważają oryginalnego podejścia, pomysłowości i samodzielnego nakładu pracy Autora.

Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia prac i rozwiązywania problemów naukowych. Zaprezentowane klarowne dyskusje (co prawda rozproszone po pracy), opracowane modele oraz obliczenia numeryczne stanowią niezaprzeczalnie oryginalne osiągnięcie Doktoranta. Całokształt rozprawy wskazuje na umiejętność rozwiązywania przez Autora problemów naukowych i badawczych.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Tutki pt. „Ocena wpływu wybranych efektów dynamicznych na kluczowe charakterystyki mechaniczne nawierzchni drogowej podatnej i półsztywnej” spełnia moim zdaniem wymagania nałożone Ustawą „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z 14 marca 2003 roku wraz z późniejszymi zmianami w zakresie dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport.

W związku z powyższym stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej pt. „Ocena wpływu wybranych efektów dynamicznych na kluczowe charakterystyki mechaniczne nawierzchni drogowej podatnej i półsztywnej” i wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. inż. Pawła Tutkę do publicznej obrony.

Wrocław, 08.09.2023

Piotr Maciejewicz