

Gliwice, 30 listopada 2022 r.

prof. dr hab. inż. Marek Salamak
Katedra Mechaniki i Mostów
Wydział Budownictwa
Politechnika Śląska
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice

OPINIA

o pracy doktorskiej mgr inż. Łukasza Jarno pt.:

Interface model influence on simulated behaviour of concrete-concrete composite pre-stressed girder with insight into time effects and cracking

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzja wykonana została na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej (pismo z dnia 26.09.2022). Pan prof. dr hab. inż. Andrzej Szarata, w imieniu Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, zwrócił się z prośbą o przygotowanie recenzji pracy doktorskiej mgr inż. Łukasza Jarno. Praca ta zatytułowana jest *Interface model influence on simulated behaviour of concrete-concrete composite pre-stressed girder with insight into time effects and cracking* (Wpływ modelu interfejsu na symulowane zachowanie się zespolonego dźwigara sprężonego typu beton-beton z uwzględnieniem efektów reologicznych i zarysowania).

2. Uwagi ogólne

Poszukiwanie rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych, które pozwalają na redukcję kosztów budowy przęseł mostowych przy jednoczesnym skróceniu czasu montażu oraz ograniczeniu uciążliwości dla otaczającej infrastruktury, w niemal naturalny sposób prowadzi do coraz częstszego wykorzystania konstrukcji zespolonych. Dotyczy to zarówno zespolenia różnych materiałów (stali lub polimerowego kompozytu z betonem), ale również dwóch różniących się wiekiem elementów betonowych. Wynika to z korzyści, jakie płyną z możliwości szybkiego montażu sprefabrykowanych wcześniej dźwigarów (stalowych, betonowych lub kompozytowych), na których układana jest żelbetowa, ale już monolityczna płyta pomostowa. Takie rozwiązanie, mimo częściowej prefabrykacji, zapewnia wystarczający poziom monolityczności przy jednocześnie satysfakcjonującej sztywności podłoża nawierzchni jezdni, która później jest układana na pomoście. I co ważne, dotyczy to zarówno nawierzchni drogowej jak i kolejowej.

Dlatego też zespolone konstrukcje przęseł mostowych stały się rozwiązaniami, które w ostatnich dekadach są wyjątkowo często stosowane. Początkowo dotyczyło to raczej zespolenia stalowych dźwigarów z żelbetową płytą pomostową (zespolenie typu stal-beton). Jednak obserwowany ostatnio wzrost kosztów stali konstrukcyjnej jeszcze bardziej uwydatnił zalety stosowania sprężonych prefabrykatów i zespolenia typu beton-beton. A w takim

przypadku, dzięki zastosowaniu betonów wysokiej wytrzymałości, można oczekiwać dodatkowych korzyści, który wynikają z większej efektywności sprężenia i z redukcji ciężaru własnego dźwigarów.

Stąd pozytywnie oceniam trafność wyboru tematyki rozprawy. Zespolone konstrukcje przęseł mostowych są obecnie tak często wybierane przez projektantów, że potrzebne są bardziej efektywne metody modelowania tych złożonych konstrukcji. Chodzi o metody i modele, które potwierdzą słuszność przyjmowanych założeń projektowych. Szczególnie przy próbach uwzględnienia przez projektanta fazowania robót czy też zagadnień reologicznych lub nieliniowych.

3. Treść i zakres rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska napisana została w języku angielskim. Obejmuje ona 169 stron maszynopisu. Składa się ze spisu treści, dziewięciu zasadniczych rozdziałów oraz wstępu i podsumowania. Oprócz tego, zawiera bibliografię oraz cztery załączniki z omówieniem użytych w pracy modeli, funkcji i algorytmów. Warto zaznaczyć, że bibliografia obejmuje 138 pozycji, w tym aż 108 jest obcojęzycznych. Praca zilustrowana została rozmieszczonymi w tekście licznymi rysunkami, wykresami i zdjęciami (163 pozycje) oraz tabelami (13 pozycji).

Dysertacja poświęcona jest zagadnieniom związanym z analizą numeryczną studium przypadku pewnego dźwigara mostowego. Dźwigar ten składa się ze strunobetonowej prefabrykowanej belki wykonanej z betonu wysokiej wytrzymałości oraz zespolonej z nią żelbetowej płyty, ale wykonanej już ze zwykłego betonu. Szczególny nacisk w tej analizie został położony na badanie strefy styku tych dwóch betonów z uwzględnieniem etapów budowy takiego dźwigara oraz towarzyszących im wpływów reologicznych, a dokładniej zjawiska pełzania. Doktorant wykorzystał przy tym wyniki badań eksperymentalnych, które wykonane były wcześniej na Uniwersytecie Stanowym Karoliny Północnej (NC State University), a które opisane zostały w opublikowanej w 2006 roku rozprawie doktorskiej autorstwa Wonchang Choi.

Rozdział pierwszy stanowi opisanie celu i zakresu rozprawy. Dowiadujemy się w nim o inspiracjach, które wpłynęły na wybór tematyki przez Autora. Postawione tam zostały trzy zasadnicze tezy pracy. Przy czym należy już teraz zaznaczyć, że pierwsza z nich nie jest zbyt odkrywcza i zdaniem recenzenta, można było ją pominąć.

Drugi rozdział jest opisem eksperymentu, który zainspirował Autora przy wyborze tematyki rozprawy. Zaczyna się od wprowadzenia do specyfiki konstrukcji zespolonych i wynikających z tego zalet, ale też towarzyszących im problemów technologicznych i badawczych. Dalszy ciąg, to szczegółowy opis badań przeprowadzonych przez Wonchang Choi. Omówione zostały zastosowane wówczas modele laboratoryjne, użyty beton i sprężenie oraz infrastruktura pomiarowa i metodyka badań. Działania te zostały przez Autora podsumowane i krótko skomentowane.

W trzecim rozdziale opisane zostały zjawiska fizyczne, jakie występują w strefie kontaktowej między dwoma elementami konstrukcyjnymi zespolonego dźwigara. Ograniczono się przy tym do kilku modeli takiej współpracy. Były to podejścia, które Autor zamierzał zastosować w swoich badaniach numerycznych, a w szczególności: zjawisko przyczepności, tarcie kulombowskie, klinowanie się kruszywa oraz łączniki z prętów zbrojeniowych. Modele te zilustrowano rekomendacjami zaczerpniętymi z trzech często stosowanych normatywów: Eurocode 2, Model Code 2010 oraz ACI Committee.

W rozdziale czwartym przedstawiono elementy skończone stosowane do modelowania konstrukcji zespolonych w strefie kontaktowej (tzw. elementy interfejsowe). Pokazane zostały różne warianty tych modeli (punktowe, liniowe, powierzchniowe) wraz z charakteryzującymi je właściwościami. Do potrzeb wyboru odpowiedniej reprezentacji strefy kontaktowej, Autor utworzył i przeanalizował prosty model obliczeniowy składający się z dwóch elementów brytowych, pomiędzy którymi znajdują się płaskie elementy interfejsowe. Przeprowadzone w ten sposób testy benchmarkowe z różnymi typami konstytutywnych modeli interfejsu opisane zostały w rozdziale piątym. W nieliniowej analizie statycznej wykorzystano kolejno: model tarcia Coulomba, dwufazowy model Walravena symulujący blokowanie się kruszywa oraz model z łącznikami stalowymi w postaci zbrojenia zszywającego.

Wpływ efektów reologicznych wynikających z różnego wieku łączonych betonów uwzględniony został w analizach opisanych w rozdziale szóstym. W tym przypadku, Autor zastosował uogólniony model Maxwella z zasadą superpozycji do symulacji zachowania się lepko-sprężystego betonu pod ciągłym obciążeniem. Zostało to odpowiednio zaprogramowane w wykorzystywanym do potrzeb rozprawy pakiecie oprogramowania Midas FEA. Model ten był później testowany w przestrzeni najpierw jedno, a potem trójwymiarowej.

W rozdziale siódmym zaprezentowane zostały rozważania dotyczące oceny zarysowania strunobetonowej belki głównej. Autor wykorzystał w nich model zwany Total Strain Crack, który jest dostępny w tym samym pakiecie Midas FEA. Wyniki tej symulacji, która uwzględniała ciągną sprężające i zbrojenie belki, zostały dodatkowo porównane z wynikami eksperymentów laboratoryjnych, jakie przeprowadził wzmiankowany wcześniej Wonchang Choi.

Następne trzy rozdziały – ósmy, dziewiąty i dziesiąty, to seria kolejnych symulacji, które służyły ocenie wpływu etapowania robót przy budowie zespolonego przęsła mostu. Przy czym modele te były sukcesywnie rozwijane i coraz bardziej komplikowane. Najpierw symulowano w nich wpływ pełzania betonu, pokazując długoterminowe zachowanie się modelu, a następnie dokonano oceny wpływu różnych typów modelowania strefy kontaktowej.

Rozdział jedenasty zawiera podsumowanie całej pracy, wnioski końcowe oraz propozycje dalszych prac w przyszłości.

4. Ocena rozprawy

4.1. Ocena merytoryczna

Podjęta przez Autora tematyka modelowania konstrukcji zespolonych dźwigarów jest bardzo aktualna i ważna. Szczególnie w odniesieniu do obiektów mostowych, gdyż przęsła zespolone są obecnie coraz częściej budowane. I to nie tylko w naszym kraju. Głównie chodzi o połączenia typu beton-beton, gdy prefabrykowana belka strunobetonowa łączona jest z żelbetową płytą pomostu. Wynika to z wielu zalet tych rozwiązań i korzyści, które przejawiają się choćby w krótszym czasie montażu czy też niższych kosztach wykonania. Oczywiście w porównaniu do technologii monolitycznych z tradycyjnymi rusztowaniami i deskowaniami.

Mimo tak częstego stosowania tych konstrukcji w praktyce inżynierskiej, wciąż brakuje efektywnych metod ich modelowania, które mogłyby skutecznie symulować zjawiska nieliniowe, reologiczne i tak charakterystyczne w tym przypadku etapowanie robót. Dlatego z satysfakcją przyjąłem gotowość Doktoranta do zgłębienia tych zagadnień. Szkoda tylko, że nie zdecydował się on pokazać przy tym swoich umiejętności w planowaniu i realizacji

eksperymentów badawczych. Posiłkowanie się wynikami prac doświadczalnych innych badaczy jest akceptowalne, ale w ten sposób można ocenić jedynie warsztat numeryczny Doktoranta i jego wiedzę z zakresu modelowania. Natomiast niewiele można powiedzieć o Jego doświadczeniu badawczym w laboratorium czy też w eksperymentach in-situ.

Oczywiście zrozumiał jest powód wykorzystania zrealizowanych wcześniej badań przez innego naukowca. Zwłaszcza, że były one przez Wonchang Choi dobrze przygotowane, sumiennie przeprowadzone i rzetelnie opisane. Udało się w ten sposób Doktorantowi oszczędzić czas i nakłady potrzebne na podobne badania w kraju. Zrozumiałe jest też bezpośrednie cytowanie wyników z tych badań w postaci tabel i wykresów. Niestety przytaczając te wyniki, Autor pozostał przy wartościach wyrażonych w jednostkach imperialnych. Zdaniem recenzenta, własne eksperymenty numeryczne należało zacząć najpierw od przeliczenia wyników na jednostki SI, które w Europie są przecież powszechnie stosowane. Szczególnie, że w niektórych fragmentach tekstu stosował on już takie przeliczone wartości, a ten brak konsekwencji utrudnia czytelnikowi interpretację wyników.

Zwrócić należy uwagę na dużą swobodę i doświadczenie Doktoranta w posługiwaniu się współczesnymi zaawansowanymi narzędziami do modelowania konstrukcji. Tworzone przez Niego modele MES zostały wykonane w programie Midas FEA. Możliwości tego narzędzia są znacznie większe niż standardowy arsenał narzędziowy inżynierów projektujących na co dzień obiekty mostowe. Widać to wyraźnie na przykładzie pokazanych przez Doktoranta modeli, jakie utworzył na potrzeby rozprawy. Wykorzystują one różne elementy interfejsowe, pewne zakresy nieliniowości oraz trójwymiarowość komponentów. Uwzględniają zjawiska reologiczne i fazowanie robót, co jest tak charakterystyczne przy budowie zespolonych dźwigarów.

Po zapoznaniu się z tymi wszystkimi modelami i prowadzonymi na nich analizami można stwierdzić, że niewątpliwie cechuje je wysoki stopień złożoności i wyrafinowania. Świadczy to pozytywnie o posiadanych przez Doktoranta umiejętnościach modelowania konstrukcji wraz z ich nietypowymi obciążeniami i zjawiskami. Pewnym mankamentem jest sposób prezentacji tych modeli w rozprawie. Niestety jakość użytej do tego grafiki budzi często niedosyt, a niektóre wykresy zdają się zbyteczne. Zwłaszcza te pokazujące wyniki w postaci wielobarwnych map. W wielu przypadkach są one do siebie tak podobne, że wyglądają na niemal identyczne. Nie przekreśla to jednak poprawności i znaczenia samych modeli.

Wszystko to sprawia, że pod względem merytorycznym recenzowaną pracę doktorską oceniam ogólnie pozytywnie. Mimo, że została ona zrealizowana głównie w sposób teoretyczny, bo nie zastosowano ani modeli laboratoryjnych ani eksperymentów in-situ. O jej wartości merytorycznej decydują poniższe elementy.

- Właściwie dobrana tematyka rozprawy, która jest ciekawa z poznawczego punktu widzenia i wymagała kompleksowego podejścia. Natomiast podjęte zagadnienie naukowe powiązane jest z potrzebami praktyki inżynierskiej.
- Dobrze rozeznanie stanu wiedzy w obszarze stanowiącym przedmiot rozprawy. Autor wykazał przy tym dużą kreatywność w planowaniu i przeprowadzaniu eksperymentów numerycznych oraz biegłość w modelowaniu konstrukcji zespolonych.
- Wszystkie sformułowane przez niego cele pracy zostały osiągnięte, a przeprowadzone analizy i badania wystarczająco podsumowane.

4.2. Uwagi krytyczne i wymagające wyjaśnienia

Uwagi krytyczne należy zacząć od tez badawczych, które Doktorant sformułował w początkowym rozdziale pracy. Jak już wspomniano powyżej (patrz omawianie treści rozprawy), pierwsza zapisana tam teza nie należy do specjalnie odkrywczych. O tym, że uwzględnienie w analizach MES etapów budowy ma istotny wpływ na wyniki obliczeń zespolonych dźwigarów powinien wiedzieć każdy inżynier mostowy. Wszyscy projektanci mostów z zespolonymi konstrukcjami typu stal-beton lub beton-beton po prostu muszą ten aspekt uwzględniać w swoich obliczeniach. I robią to, choć niestety zdarzają się przypadki braku wystarczającej wiedzy i doświadczenia wśród młodszej kadry inżynierskiej, które potem skutkują rażącymi błędami projektowymi.

Dopiero dwie kolejne tezy Doktoranta stanowią o pewnej wartości dodanej tej pracy. Sposób kształtowania strefy styku obu zespalanych części ma rzeczywiście decydujący wpływ na nośność takiego połączenia i z pewnością warto go badać. Niewątpliwie jest to też najtrudniejszy element do modelowania i dlatego cenne jest poszukiwanie nowych i lepszych modeli. Nawet jeśli nie zawsze będą one przydatne w rutynowej pracy projektanta, który przecież często w modelowaniu musi posilkować się pewnym zakresem uproszczeń.

Skoro Autor sugeruje, że badane przedmiotowe dźwigary zespolone mają zastosowanie głównie przy budowie obiektów mostowych, to zdaniem recenzenta, brakuje w tej rozprawie odniesienia się Doktoranta do realnych konstrukcji takich zespolonych przęseł. Różnicowanie to na pewno powinno znaleźć się we wprowadzeniu, gdzie można byłoby opisać różne typy mostów zespolonych i stosowane w praktyce elementy łącznikowe. Zwłaszcza, że w tym obszarze prowadzonych jest wiele badań, a doświadczenia polskich naukowców i firm wykonawczych należą do wiodących. Chodzi na przykład o współczesne osiągnięcia ośrodka wrocławskiego, gdzie badane są innowacyjne łączniki styku stal-beton lub rzeszowskiego, który zajmuje się połączeniami betonu z dźwigarami kompozytowymi.

Z takiego przeglądu stanu wiedzy i praktyki okazałoby się też zapewne, że badane w rozprawie dźwigary o rozpiętości zaledwie 12,5 m mają bardzo wąski zakres stosowania. Strunobetonowe belki o przekroju dwuteowym lub teowym sprawdzają się ekonomicznie dopiero przy rozpiętościach od 20 do 40 m. Wy tłumaczeniem takiego ograniczenia mogą oczywiście być możliwości laboratoryjne i konieczność redukcji kosztów badań, które zrealizował Wonchang Choi. Brakuje jednak próby uogólnienia wniosków z tych badań (również numerycznych) na bardziej realne wielkości i typy prefabrykowanych belek mostowych.

Jeśli jesteśmy przy omawianiu przeprowadzonych przez Wonchang Choi eksperymentów, to trzeba wspomnieć o próbie ich podsumowania, która znalazła się w rozdziale drugim. To właśnie tam Doktorant przeniósł wnioski wypracowane przez tego badacza. Nie ma jednak pewności, że są tam wszystkie istotne dla tej rozprawy konkluzje, bo tekst w tym punkcie ma zaledwie kilkanaście wierszy. Brakuje też w nim osobistego komentarza Autora i wyciągnięcia własnych wniosków, które zapewne miały wpływ na planowanie eksperymentów numerycznych i przyjęte później podejście do modelowania.

Czytając rozprawę łatwo zauważyć, że w kilku kluczowych rozdziałach brakuje lokalnych podsumowań albo też wypracowane wnioski są niewystarczająco jasno sformułowane. Na przykład po rozdziale piątym powinno znaleźć się porównanie wyników z analizy różnych typów połączeń oraz wnioski dotyczące ich benchmarku. Natomiast rozdział siódmy ma właściwie jednozdaniowe podsumowanie próby wykorzystania modelu Total Strain Crack.

Taki sam niedosyt budzi końcowe podsumowanie całej rozprawy. Zwłaszcza, że newralgiczna dla całości i jedyna w tym rozdziale tabela 11.1 zawiera intrygujące porównanie ugięć belki, które uzyskano w poszczególnych modelach po analizie każdego etapu pracy zespolonej konstrukcji. W ostatniej kolumnie tej tabeli, która prezentuje wyniki po uwzględnieniu elementów kontaktowych, znaleźć można wartość 43,8 mm. Wartość ta jest dużo większa od innych w sąsiadujących z nią komórkach. A do tego jest ona niewiarygodnie duża, jak na ugięcie betonowego dźwigara o rozpiętości zaledwie 12,5 m. Zatem w jaki sposób powinniśmy ją interpretować?

4.3. Uwagi szczegółowe i edycyjne

Praca napisana jest w zasadzie poprawnie. Tytuł rozprawy oddaje jej treść, a układ jest logiczny. Zasadnicza struktura podziału treści i zakresy są prawidłowe.

Wątpliwości może budzić niezbyt szczęśliwy podział na rozdziały. Głównie chodzi o części z numerami 8, 9 i 10, które są wyjątkowo krótkie. Właściwie, to po usunięciu znajdujących się tam dużych rysunków, treść tych rozdziałów zmieści się na zaledwie kilku stronach. Brakuje tam też lokalnych podsumowań. Zdaniem recenzenta, lepszym rozwiązaniem byłoby umieszczenie tych treści w jednym rozdziale pokazującym kolejne etapy analizy i modyfikacji modelu. Zauważalna jest też duża oszczędność Autora przy pisaniu wprowadzenia do pracy jak i podsumowaniu całej rozprawy. Wspomniano już o tym we wcześniejszych uwagach krytycznych.

Tabele prezentujące wyniki z wykorzystywanych przez Doktoranta badań przeprowadzonych przez Wonchang Choi w USA mają mizerną jakość graficzną, a wartości tam podawane wyrażone są w jednostkach imperialnych (patrz tabele nr 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6). Utrudnia to czytelnikowi ich interpretację oraz wszelkie próby porównania z innymi wielkościami referencyjnymi lub wynikami analiz.

Niezbyt sensowne jest zamieszczanie w pracy bardzo szczegółowych wyników badań z innych cytowanych raportów (patrz tabele nr 3.4 i 3.5). Szczególnie, że nie są one poddane krytycznej analizie i wyrażone są w trudnych do interpretacji przez czytelnika jednostkach. Nic nie wiadomo na temat geometrii wykorzystywanych tam próbek ani typów czy konfiguracji zastosowanych trzpieni łączników. A dodatkowo tabele te przeniesione zostały w bardzo słabej jakości graficznej, co nie ułatwia czytania i analizy sporej porcji wyników.

Podobnie jest z pokazywaniem obok siebie wykresów, które przy tak słabej jakości grafiki niewiele się już od siebie różnią. Chodzi na przykład o pary wykresów w dziesiątym rozdziale na kolejnych rysunkach o numerach 2 i 3, 5 i 6, 8 i 9, 18 i 19, 33 i 34 oraz 37 i 38. Wyglądają one niemal identycznie, a różnice przypuszczalnie dotyczą pokazywanych na nich wielkości fizycznych. Skutkowało to zapewne innym opisem osi, jednostek i wartości. Ale tego można się już tylko domyślać, bo nie jest to wystarczająco wyraźnie widoczne.

Wiele rysunków, które służą do pokazania szczegółów konstrukcyjnych modelowanej belki (czy to w zakresie geometrii czy układu zbrojenia albo sprężenia), zostało przygotowanych w sposób, który daleki jest od praktyki inżynierskiej w tym względzie. Najczęściej są to bowiem kopie obrazu wyświetlanego na ekranie aplikacji do modelowania MES lub skany z innych publikacji. Tak jest na przykład z rysunkami nr 7.5, 7.6 i 7.7. Są one niskiej jakości i są nieczytelne. Trudno jest ocenić jak ostatecznie wygląda konfiguracja zbrojenia i cięgien sprężających,

a jednostki pokazujące długości znów są imperialne. Niestety źle to świadczy o praktycznym doświadczeniu inżynierskim Doktoranta.

Pomijając drobne mankamenty praca jest wystarczająco poprawnie zredagowana. Jest zilustrowana rysunkami, zdjęciami i tabelami, choć można mieć zastrzeżenia co do ich jakości. Zasadniczo terminologia pracy jest poprawna, a sprawność językowa może być uznana za dobrą. Recenzent musi jednak przyznać się do swoich ograniczeń w zakresie oceny stylu i poprawności gramatycznej treści pisanych w języku angielskim. Te aspekty nie były więc tutaj szczegółowo oceniane. Zwrócić można jedynie uwagę, że pomiędzy liczebnikiem a symbolem jednostki zwykle umieszcza się spację. Również w języku angielskim. Natomiast skróty, które nie są powszechnie rozumiane należy objaśnić w momencie ich pierwszego użycia. Tak jest na przykład ze skrótem CFL na stronie 18 oraz PI na stronie 20.

Oczywiste jest jednak, że te drobne usterki są bez większego znaczenia dla ogólnej, merytorycznej oceny całości rozprawy. Zostały one przekazane Autorowi w postaci elektronicznego dokumentu, a ogólna opinia recenzenta na temat pracy jest oczywiście pozytywna.

5. Wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi podsumowanie przemyśleń i badań Autora w zakresie modelowania zespolonych dźwigarów w postaci prefabrykowanej belki strunobetonowej z żelbetową płytą pomostową. Rozwiązanie takie jest bardzo często stosowane przez projektantów mostowych. Wynika to z tego, że cechuje się ono wieloma zaletami, które pozwalają między innymi na redukcję kosztów budowy i skrócenie czasu montażu. Wciąż jednak potrzebne są badania nad sposobem efektywnego łączenia tych dwóch elementów konstrukcyjnych (połączenie belka-płyta). Brakuje nam też bardziej zaawansowanych metod modelowania tych złożonych układów, które dodatkowo pozwolą na symulację wpływu zjawisk reologicznych, nieliniowości czy etapowania robót.

Doktorant sformułował w pracy jasno określone cele naukowe i zrealizował je w pełni. Za bardzo cenne uważam przeprowadzenie przez Doktoranta interesujących badań numerycznych na modelu belki, która wcześniej była zbadana w warunkach laboratoryjnych przez innego badacza z USA. Mimo tego ograniczenia udało się uzyskać zadowalającą zgodność wyników, co potwierdza przyjęte na wstępie pracy założenia.

Twórczy wkład Doktoranta do rozwiązywania ciekawego i złożonego problemu naukowego jest zatem interesujący i zawiera wiele elementów nowości oraz oryginalności. Chciałbym podkreślić, że propozycje przedstawione w pracy otwierają nowe pola badań i dają możliwość kontynuowania rozważań.

Biorąc pod uwagę ocenę rozprawy doktorskiej uważam, że stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie naukowej jaką jest inżynieria lądowa i transport. Potwierdza też umiejętność prowadzenia pracy naukowej i tym samym wyczerpuje wymagania Art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (z późniejszymi zmianami) i wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

prof. dr hab. inż. Marek Salamak

