

dr hab. inż. Marta Kadela, prof. Instytutu
Instytut Techniki Budowlanej
ul. Filtrowa 1
00-611 Warszawa
e-mail: m.kadela@itb.pl

Katowice, 20 maja 2024 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Łukasza Rudzińskiego** pt.:
„Modelowanie trwałości nawierzchni drogowych z betonu cementowego”

Promotor: dr hab. inż. Mieczysław Słowik, prof. PP
Promotor pomocniczy: dr inż. Przemysław Górnaś

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzję opracowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej z dnia 26 marca 2024 r. o powołaniu recenzenta i prośbą Pana Przewodniczącego Rady Dyscypliny, Profesora dr. hab. inż. Jacka Pielechy, sformułowaną w piśmie nr RD/d/38/01/2024 z dnia 27 marca 2024 r.

2. Ocena zasadności podjęcia tematu

Ocena trwałości nawierzchni drogowych jest jednym z ważniejszych zagadnień zarówno w ocenie cyklu życia nawierzchni, jak również z uwagi na projektowanie nawierzchni i ich wzmocnień. Zagadnienie to było przedmiotem wielu rozważań, jednakże z uwagi na stały rozwój w zakresie komputeryzacji oraz metod badawczych zachodzi konieczność ciągłego doskonalenia w tym zakresie i prowadzenia dalszych prac badawczych z uwzględnieniem nowoczesnych technik obliczeniowych. W analizowanej pracy Kandydat podejmuje ważne zagadnienie modelowania trwałości nawierzchni drogowych z betonu cementowego przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych (SSN). Obecnie, z uwagi na duże możliwości, sieci neuronowe są często wykorzystywane przy rozwiązywaniu różnych problemów w różnych dziedzinach. Wykorzystanie SSN w ocenie nawierzchni drogowych z betonu cementowego to stosunkowo nowe zagadnienie. Jednakże z uwagi na coraz większe ilości danych przy analizie poszczególnych zagadnień w tym również nawierzchni betonowych powoduje, że wykorzystanie zaawansowanych technik analizy i przetwarzania danych staje się niezbędne i pozwala na nowy aspekt spojrzenia na dotychczasowe doświadczenie. W tym zakresie niniejsza praca stanowi duży krok w analizie stanu technicznego nawierzchni drogowych. Kandydat przedstawił sposób pozyskiwania danych, algorytm uczenia, testowania i walidacji sieci neuronowej, co docelowo stanowi funkcjonalny algorytm do analizy stanu technicznego nawierzchni betonowej przy użyciu SSN.

Osobną kwestię stanowi fakt, że Kandydat stosował nowoczesne metody badawcze do oceny nawierzchni sztywnych. W tym miejscu należy podkreślić, że liczba dróg publicznych o nawierzchni betonowej w ostatnim czasie systematycznie wzrasta i prognozuje się dalszy wzrost w szczególności z uwagi na zmniejszenie śladu węglowego budowy nawierzchni

drogowych. W przypadku stosowania nawierzchni sztywnych, mamy bowiem możliwość stosowania rozwiązań niskoemisyjnych w wyniku stosowania cementów niskoemisyjnych o niższym o 30% śladzie węglowym, co stanowi istotny walor w stosunku do nawierzchni asfaltowych, w przypadku których takie możliwości są stanowczo mniejsze. W tym zakresie Kandydat kompleksowo podszedł do rozwiązania zagadnienia oceny stanu takiej nawierzchni, przedstawiając od jej budowy, aż po obserwowane uszkodzenia.

Mając powyższe na uwadze należy stwierdzić, iż podjęty temat rozprawy jest zarówno ważny i cenny z naukowego punktu widzenia, jak i posiada wartość użyteczną.

3. Krótka charakterystyka i zakres pracy

Przedstawiona do recenzji praca ma charakter pracy badawczej. Rozprawa została przedstawiona na 220 stronach maszynopisu formatu A4, które obejmują część zasadniczą (184 strony), składającą się z 7 rozdziałów, w tym wniosków i kierunków dalszych prac badawczych. Poza tym w pracy zamieszczono listę akronimów (2 strony), spis literatury (7 stron) oraz streszczenia w języku polskim i angielskim (2 strony), jak również 2 załączniki (28 stron), zawierające zestawienia graficzne: uszkodzeń (załącznik nr 1) oraz danych temperaturowych (załącznik nr 2). W rozprawie zawarto 142 rysunki i 43 tablice.

Rozdział 1 (*Wprowadzenie*) stanowi bardzo zwięzłe wprowadzenie w tematykę przedmiotu rozprawy i zasadność jego podjęcia.

W rozdziale 2 (*Studium literatury na temat trwałości i utrzymania nawierzchni betonowych*) omówiona została charakterystyka nawierzchni sztywnych, w szczególności z wyszczególnieniem ich zalet oraz trwałość nawierzchni wraz z omówieniem uszkodzeń takich nawierzchni. Ponadto w rozdziale tym szeroko został omówiony sposób utrzymania nawierzchni betonowych, wskazując tutaj na diagnozę, genezę oraz prognozę oceny stanu nawierzchni, jak również przedstawiono przykłady systemów oceny stosowanych w Polsce oraz poza nią (w USA i Niemczech).

W rozdziale 3 określono *tezę, cel i zakres pracy*, wskazując jako cel pracy weryfikację możliwości wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do prognozowania zmian stanu technicznego nawierzchni betonowej.

Rozdział 4 (*Charakterystyka analizowanych odcinków o nawierzchni z betonu cementowego*) stanowi opis badanego odcinka autostrady A2 od km 3+375 do km 107+900 o łącznej długości 104,5 km, z podziałem na odcinki jednorodne (oznaczone A-E). W dalszej części rozdziału przedstawiono w sposób bardzo szczegółowy wykonanie nawierzchni betonowej, przedstawiając począwszy od założeń projektowych, analizy ruchu na etapie projektowania, założonego przekroju poprzecznego i projektowania konstrukcji nawierzchni, poprzez podanie składu mieszanek betonowych do dolnych i górnych warstw nawierzchni betonowej oraz właściwości mieszanek, jakie muszą spełniać, aż do technologii wykonania. Podpunkt ten stanowi ciekawe kompendium wiedzy w zakresie wykonawstwa nawierzchni sztywnej wzbogacone o bogatą dokumentację fotograficzną.

W rozdziale 5 (*Modyfikacja wizualnej metody oceny stanu technicznego nawierzchni betonowych*) przedstawiono przesłankę i realizację badań, wykonanych przez Autora przez sześć kolejnych lat. W rozdziale tym Autor przedstawił sposób realizacji prac, wykonanie badań za pomocą systemu pomiarowego SPDE (ang. System for Pavement Distress

Evaluation), jak również przetwarzanie i kalibrację zdjęć z uwagi na brak możliwości wykonania zdjęć w jednym przejeździe pojazdu pomiarowego. Ponadto w rozdziale tym przedstawiono opis identyfikacji uszkodzeń, gdzie pod pojęciem uszkodzenia rozumie się efekty powodujące pogorszenie parametrów technicznych, a docelowo stanu technicznego nawierzchni betonowej.

Rozdział 6 (Prognozowanie trwałości nawierzchni betonowej z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej (SSN)) stanowi główną część pracy badawczej (113 stron!). W pierwszej części zostały opisane sztuczne sieci neuronowe, następnie budowa bazy danych (obciążenie ruchem, dane klimatyczne i dane w zakresie uszkodzeń) oraz prezentacja i sposób pozyskania tych danych. W dalszej części tego rozdziału Kandydat szczegółowo przedstawił sposób uczenia sieci neuronowych oraz przedstawił i omówił uzyskane wyniki w zakresie % płyt i % powierzchni. Rozdział został zakończony zwięźle przedstawioną dyskusją, w której podano także w sposób tabelaryczny i omówiono zestawienie otrzymanych wyników badań.

Praca została zakończona wnioskami, podanymi w **Rozdziale 7**. Kandydat w sposób zwięźły przedstawił wnioski z przeprowadzonego programu badawczego oraz określił dalsze prace badawcze.

W pracy powołano się na 129 pozycji literaturowych, z których większość to prace opublikowane w ciągu ostatnich 20 lat. Wśród podanych pozycji Kandydat jest autorem i/lub współautorem trzech publikacji.

Na zakończenie rozprawy zamieszczono załączniki zawierające zestawienie graficzne danych przyjętych w prognozowaniu trwałości nawierzchni sztywnej przy użyciu SSN.

4. Ocena formalna (Ocena programu, zakresu pracy i problemu naukowego)

Przedstawiona do recenzji praca ma charakter badawczy i obejmuje ważne zagadnienia naukowe z zakresu oceny stanu technicznego nawierzchni sztywnej. Kandydat zweryfikował możliwość wykorzystania sztucznych sieci neuronowych (SSN) do oceny stanu technicznego nawierzchni betonowej, co stanowi oryginalność rozwiązania w ww. zakresie oceny stanu technicznego nawierzchni drogowej. Celem oryginalnego rozwiązania postawionego problemu naukowego przyjęty został obszerny program badawczy, który obejmował sześcioletnie pomiary stanu technicznego nawierzchni autostrady A2. W ramach swojej pracy Kandydat przeprowadził badania terenowe nawierzchni, a następnie wyniki wykorzystał do uczenia, testu i walidacji sieci neuronowej. Każdy etap został wnikliwie przeanalizowany i opisany w pracy, a wyniki zostały udokumentowane licznymi fotografiami oraz analizą danych przedstawioną w formie graficznej. Przeprowadzony w odpowiednich krokach program badawczy wskazuje na duży potencjał Kandydata. W tym miejscu należy także podkreślić, że przy takim podejściu Pan Łukasz Rudziński dokładnie mógł weryfikować każdy uzyskany wynik i analizować zachodzące w czasie uszkodzenia. Analizy te zostały przygotowane odpowiednim warsztatem pracy w zakresie analizy literatury dotyczącej oceny stanu technicznego dróg o nawierzchni sztywnej, znajomością budowy dróg betonowych oraz wiedzą w zakresie oceny stanu technicznego nawierzchni drogowych, co potwierdza dokumentacja z budowy nawierzchni autostrady A2 i prowadzone pomiary. Prowadzone pomiary zostały odpowiednio poprzedzone analizą w zakresie podziału na odcinki jednorodne, analizą możliwości przetwarzania zdjęć itp. Każde z tych zagadnień wymagało odpowiedniej pracy, przygotowania i analizy.

Mając powyższe na uwadze uznaje się zarówno program prac badawczych za właściwy i kompleksowy, zawierający podejście badawcze, a zarazem inżynierskie.

Zakres pracy obejmuje szerokie spectrum od projektowania nawierzchni betonowych, poprzez ich budowę, ocenę stanu technicznego aż po znajomość sztucznych sieci neuronowych. Poza tym Kandydat wykracza poza zakres Polski i przedstawia podejście w zakresie oceny stanu technicznego nawierzchni nie tylko w kraju, ale również w USA i w kraju sąsiadującym – Niemczech. Równocześnie informacje przedstawione są w sposób zwięzły, konkretny, tak, że pomimo, iż zakres pracy jest obszerny, praca w całości mieści się w odpowiednich zwyczajowo przyjętych ramach objętościowych adekwatnych dla pracy doktorskiej. W tym miejscu należy jednak zaznaczyć, że pomimo, iż zakres jest w moim przekonaniu odpowiednio ułożony, a poszczególne tematy/rozdziały, bezpośrednio z siebie wynikają, to ujęcie całego zagadnienia sieci neuronowych w jednym rozdziale (rozdział 6) stanowi największy minus przedstawionej do recenzji pracy i zostało to szczegółowo opisane przeze mnie w punkcie 6. Uwagi krytyczne i pytania recenzentki do pracy.

Przedstawiony przez Kandydata w dysertacji problem naukowy dotyczący możliwości wykonania prognozy trwałości nawierzchni betonowych z wykorzystaniem zastosowania sztucznych sieci neuronowych (SSN) do oceny stanu technicznego nawierzchni betonowej został moim zdaniem w sposób oryginalny rozwiązany. Pan Łukasz Rudziński, bazując na własnych wynikach pomiarów terenowych dotyczących stanu nawierzchni, realizowanych przez 6 lat, uzyskał bardzo dużą dokładność wyuczenia, testowania i walidacji sieci neuronowych w odniesieniu do zgodności wyników poddanych walidacji, co stanowi oryginalne osiągnięcie Doktoranta. Należy także podkreślić kompleksowe podejście Kandydata do realizowanego tematu w zakresie wykonanych badań terenowych, analizy wyników badań oraz prac modelowych z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych. Kandydat wykazał się przygotowaniem do prowadzenia prac badawczych, analizy wyników i zastosowania zaawansowanych technik przetwarzania danych z zastosowaniem SSN. Ponadto przedstawiony w pracy doktorskiej program badawczy, celem osiągnięcia założonego celu pracy oraz określenie dalszych badań naukowych w tym zakresie świadczą o gotowości Kandydata do uzyskania stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych.

5. Ocena w zakresie redakcji naukowej

Praca jest napisana poprawnym językiem. Kandydat przedstawia sformułowany problem badawczy w jasny sposób i przystępny językowo, stosując poprawną terminologię. Oczywiście Pan Łukasz Rudziński nie ustrzegł się drobnych błędów językowych i stylistycznych, które jednakże nie umniejszają wartości pracy. Dokumentacja fotograficzna z badań oraz przedstawione wyniki w formie graficznej w dużej liczbie ułatwiają odbiór przez czytelnika i podnoszą wartość merytoryczną rozprawy doktorskiej.

Minusem pracy jest zróżnicowanie w zakresie objętości poszczególnych rozdziałów oraz części pracy (teoretycznej i badawczej).

Przeprowadzone studium literaturowe zostało przedstawione na 29 stronach, a wynikający z niego cel, teza i zakres pracy na 1 stronie. Następnie charakterystyka badanego odcinka została przedstawiona na 18 stronach, opis metod badawczych (bez SSN) na 10 stronach. Kolejną część (rozdział 6) stanowi opis sztucznych sieci neuronowych (SSN),

przedstawienie wyników badań terenowych i modelowania trwałości przy użyciu SSN. Część ta jest zakończona zwięzłą dyskusją, przedstawioną na 5 stronach z czego dużą część zajmują tabele i rysunki. Łącznie rozdział ten liczy 113 stron, chociaż opis sieci neuronowych mógłby stanowić część studium literatury, w wyniku czego objętość poszczególnych części byłaby bardziej wyrównana. Ostatni rozdział zawierający wnioski z pracy i dalsze plany badawcze został zaprezentowany na 2 stronach. Zaletą takiego rozwiązania jest widoczny warsztat naukowy, na którym w znaczącej części skupia się Kandydat, a mianowicie najobszerniejszy rozdział przedstawia badania własne Autora, ich wyniki, ich analizę oraz interpretację. Jako wadę rozpatruję jednak brak podziału na wyniki z badań terenowych, stanowiące dane wejściowe do analizy przy użyciu sztucznych sieci neuronowych (SSN), oraz prac związanych z modelowaniem trwałości przy użyciu SSN.

6. Uwagi krytyczne i pytania recenzentki do pracy

W tym miejscu chcę zaznaczyć, że przedstawioną do recenzji pracę uważam za wartościową i potrzebną w zakresie oceny stanu technicznego nawierzchni betonowej. Pojawiają się jednak pytania i uwagi, wymagające dyskusji lub uzupełnienia.

Pan Łukasz Rudziński przedstawił wyniki badań terenowych, które nie zostały jednak odpowiednio omówione. W rozdziale 6 Kandydat przedstawił bowiem dla poszczególnych odcinków jednorodnych (A-E) wyniki obliczeń w postaci skumulowanej liczby osi standardowych (rysunek 49) oraz liczbę uszkodzeń (rysunki 59-72) dla poszczególnych pasów ruchu. Na pasie pierwszym (szybki), na którym liczba osi była mniejsza niż pasie dwa (wolny), najczęściej zaobserwowano mniejsze uszkodzenia, wyjątek stanowią np. uszkodzenia naroży na odcinkach A i C (rysunek 60), gdzie dla pierwszego liczba uszkodzeń jest porównywalna dla obydwu pasów, jednakże w przypadku odcinka C stanowczo więcej uszkodzeń obserwuje się dla pasa o mniejszej liczbie osi. Podobną sytuację obserwuje się przykładowo również dla pęknięć przy krawędzi na odcinkach C i E (rysunek 61), pęknięć podłużnych na odcinkach A-C (rysunek 62) czy pęknięć poprzecznych na odcinku C (rysunek 63). Ponadto występuje duże zróżnicowanie obserwowanych uszkodzeń dla poszczególnych odcinków jednorodnych. Jak Autor to tłumaczy?

Na podstawie otrzymanych wyników badań terenowych można również zauważyć, że większą liczbę oraz powierzchnię uszkodzeń obserwuje się dla każdego z odcinków jednorodnych dla pasa awaryjnego, na którym wystąpiła najmniejsza skumulowana liczby osi standardowych. Jak Autor to tłumaczy i czy zdaniem Autora wprowadzenie selekcji wyników badań w zależności od pasa ruchu wpłynie na dane, dla których uzyskano najlepsze parametry w odniesieniu do prognozowania informacji o ilości i powierzchni uszkodzonych płyt?

Celem pracy jest prognozowanie zmian stanu technicznego nawierzchni betonowej przy wykorzystaniu SSN. W związku z powyższym czy Kandydat bazując na opracowanym algorytmie, może teoretycznie określić po ilu latach będzie konieczna przebudowa badanej w pracy nawierzchni autostrady A2 (przy założeniu oczywiście podobnych warunków bazowych) lub wskazać schemat postępowania modelowania, celem uzyskania takich danych?

Komentarza wymagają także przytoczone w pracy dane klimatyczne, w zakresie po pierwsze źródła pozyskania tych danych. Po drugie natomiast, Kandydat przytoczył w pracy i uwzględnił w analizie ekstremalne temperatury powietrza. Czy Autor analizował wpływ

liczby przejść przez 0°C w danym roku lub sumaryczny okres nasłonecznienia w danym roku i co stanowiło przesłankę do nie uwzględnienia takich danych?

Bardzo proszę o uzupełnienie tych informacji w trakcie publicznej obrony.

7. Ocena końcowa

Zgodnie z (wg mnie na to nie można się powoływać, bo obowiązuje stan prawny z dnia wszczęcia przewodu doktorskiego, czyli 29.03.2019 r. (tzw. „stary tryb”), czyli Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2017 poz. 1789), a także Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz.U. 2018 poz. 261) Ustawą z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669 z późn. zm.) rozprawa doktorska powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych, prezentować ogólną wiedzę teoretyczną kandydata, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Stwierdzam, że warunki te w odniesieniu do rozprawy **mgr. inż. Łukasza Rudzińskiego** pt.: „*Modelowanie trwałości nawierzchni drogowych z betonu cementowego*” zostały spełnione. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Łukasza Rudzińskiego** do publicznej obrony. Ponadto z uwagi na osiągnięcie naukowe o znacznym potencjale aplikacyjnym w zakresie wykorzystania sztucznych sieci neuronowych (SSN) do prognozowania zmian stanu technicznego nawierzchni z betonu cementowego oraz wykazany warsztat Kandydata w zakresie stosowania zaawansowanych nowoczesnych systemów obliczeniowych (sztucznych sieci neuronowych) wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Samodzielne Stanowisko
ds. Projektów Badawczych


dr hab. inż. Marta Kadela, prof. ITB