

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Rudzińskiego

pt.: „Modelowanie trwałości nawierzchni drogowych z betonu cementowego”

1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania recenzji stanowiło pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej prof. dr. hab. inż. Jacka Pielechy nr RD/d/38/01/2024 z dnia 27 marca 2024 r. Recenzję przygotowano uwzględniając zapisy Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. z 2023 r., poz. 742 z późn. zm.).

2. Ogólna charakterystyka i ocena układu pracy

Recenzowana praca doktorska została przygotowana pod kierunkiem promotora dr. hab. inż. Mieczysława Słowika, prof. Politechniki Poznańskiej oraz promotora pomocniczego dr. inż. Przemysława Górnasia. Rozprawa została przedstawiona na 220 stronach i podzielona na 7 rozdziałów poprzedzonych streszczeniem w języku polskim i angielskim, spisem treści, listą akronimów, a zakończona wykazem dwóch zamieszczonych załączników oraz literaturą liczącą 129 pozycji.

W rozdziale 1 (*Wprowadzenie*) Doktorant zwrócił uwagę, że w nadchodzącym czasie instytucje drogowe w Polsce będą zwiększać swoją koncentrację na procesy utrzymania i ochrony dróg wybudowanych w technologii betonu cementowego. Podkreślił, że wybór odpowiedniej strategii utrzymania jest zadaniem złożonym, na które składają się m.in. nowoczesna i skuteczna ocena stanu technicznego nawierzchni, klasyfikacja drogi, czy też natężenie ruchu. Autor dysertacji stwierdził, że punktem wyjścia do opracowania funkcjonalnego algorytmu do analizy stanu technicznego betonowych nawierzchni drogowych powinny być obiektywne, precyzyjne i aktualne informacje o stanie nawierzchni, które stanowią niezbędną podstawę systematycznego utrzymania dróg. Ponadto zauważył, że dotychczasowe, klasyczne doświadczenia w utrzymaniu dróg są niewystarczające, a do zarządzania nawierzchniami są wprowadzane nowe metody zbierania i przetwarzania danych. Dzięki dynamicznemu rozwojowi technologii informatycznych i sztucznej inteligencji otwierają się nowe, nieograniczone możliwości ich implementacji w drogownictwie.

W rozdziale 2 (*Studium literatury na temat trwałości i utrzymania nawierzchni betonowych*) Doktorant dokonał przeglądu aktualnych doświadczeń i rozwiązań z dziedziny

projektowania, wykonania oraz problematyki związanej z procesem utrzymania nawierzchni drogowych z betonu cementowego. Omówił zagadnienia dotyczące trwałości oraz utrzymania nawierzchni betonowych z wykorzystaniem systemów zarządzania nawierzchniami (PMS – Pavement Management System), które odgrywają istotną rolę w efektywnym procesie zarządzania stanem technicznym sieci dróg w oparciu o ekonomiczne strategie utrzymania stanu nawierzchni na akceptowalnym poziomie w danym czasie, tak aby nawierzchnia mogła spełniać wymagania ruchu drogowego i środowiska przez cały okres jej użytkowania. Autor dysertacji podkreślił, że jednym z istotniejszych osiągnięć poprawnej strategii utrzymaniowej jest możliwość prognozowania zmiany stanu technicznego nawierzchni drogowej w czasie. W procesie zarządzania siecią drogową do prognozowania najczęściej wykorzystywane są deterministyczne modele wydajności, probabilistyczne modele wydajności, modele wydajności oparte na ekspertach oraz modele Bayesowskie wydajności. Ponadto zaznaczył, że dotychczas sztuczne sieci neuronowe (SSN) zostały wykorzystane w zakresie oceny stanu technicznego nawierzchni podatnych na podstawie wskaźnika spękań, równości poprzecznej i oceny wizualnej oraz, że są w stanie dokładnie dokonać oceny stanu technicznego nawierzchni w sposób systematyczny i obiektywny. Doktorant przedstawił i omówił również przykłady systemów oceny stanu technicznego nawierzchni stosowanych w Polsce (SOSN i DSN), USA oraz w Niemczech.

W rozdziale 3 (*Teza, cel i zakres rozprawy*) Autor dysertacji sformułował: cel pracy badawczej, którym była weryfikacja możliwości wykorzystania SSN do prognozowania zmian stanu technicznego nawierzchni betonowej, tezę pracy oraz zakres rozprawy doktorskiej. Szczególną uwagę zwrócił na analizę metody rozpoznawania zachodzących procesów degradacji nawierzchni poprzez określenie typu uszkodzeń, ich zakresu oraz zmian w analizowanym okresie, przy zastosowaniu zmodyfikowanej metody inwentaryzacji uszkodzeń oraz sposobu gromadzenia i weryfikacji danych. Prognozy zmian stanu technicznego nawierzchni wykonał przy założeniu wykorzystania klasycznego modelu tendencji rozwojowej z zastosowaniem jednokierunkowych sztucznych sieci neuronowych. Dla wybranych odcinków autostrady utworzył szeregi czasowe obejmujące wyniki zmodyfikowanej, wizualnej metody oceny stanu technicznego nawierzchni betonowej.

W rozdziale 4 (*Charakterystyka analizowanych odcinków drogi o nawierzchni z betonu cementowego*) Doktorant szczegółowo przedstawił informacje na temat odcinków testowych, które były przedmiotem badań. W ramach przeprowadzonych testów analizie poddano odcinek autostrady A2 o łącznej długości 104,5 km (od km 3+375 do km 107+900), który stanowi część sieci dróg transeuropejskich i jest zarazem jednym z najważniejszych połączeń pomiędzy Europą Zachodnią a Środkowowschodnią. Autor dysertacji wyodrębnił 5 odcinków jednorodnych nawierzchni z betonu cementowego, tj.: A, B, C, D i E (o różnej długości) w postaci fragmentów drogi o jednolitej konstrukcji nawierzchni, wykonanej z takich samych materiałów i o takich samych parametrach technicznych, w tym grubość warstw na całej swojej długości i szerokości. Doktorant podkreślił, że jest to bardzo istotne, gdyż jednorodne odcinki drogi pozwoliły na zagregowanie danych ze względu na ich zmienność pod względem typu i ilości uszkodzeń powierzchniowych, ruchu pojazdów, czy też warunków klimatycznych. Ponadto, kompleksowo omówił cały proces wykonania nawierzchni, tj. od przyjętych założeń projektowych i przeprowadzonej analizy ruchu, poprzez obliczenie trwałości i zaprojektowanie konstrukcji nawierzchni betonowej, kończąc na szczegółowym przedstawieniu technologii jej wybudowania.

W rozdziale 5 (*Modyfikacja wizualnej metody oceny stanu technicznego nawierzchni betonowych*) Autor dysertacji skomentował stwierdzone wady stosowanej metody automatycznej oceny uszkodzeń powierzchniowych według DSN, które dotyczyły analizy uszkodzeń w zakresie zdjęć, tj. ich obszar obejmował powierzchnię o długości 10 m

i szerokości 4 m, co przy płytach o wymiarach 4x5 m i 3x5 m zaprojektowanych i wykonanych na analizowanych odcinkach uniemożliwiało uzyskanie pełnego obrazu pojedynczej płyty. W przypadku nawierzchni z betonu cementowego proces identyfikacji uszkodzeń jest bardzo trudny ze względu na różne typy tekstury górnej powierzchni płyty. Mając powyższe na uwadze, Doktorant zaprezentował sposób realizacji badań polegających na modyfikacji metody oceny identyfikacji cech powierzchniowych nawierzchni z betonu cementowego na 5 odcinkach autostrady A2, które były prowadzone 6 lat z rzędu. Projekt identyfikacji uszkodzeń nawierzchni betonowej o łącznej długości 606 km pasów ruchu oraz pasów awaryjnych wykonano w okresie od roku 2016 do roku 2021, który rozszerza zakres identyfikacji uszkodzeń dotychczas stosowanych wytycznych SOSN-B, jak i wytycznych DSN obowiązujących od roku 2015. Zaproponowana przez Autor dysertacji modyfikacja umożliwia analizę każdej pojedynczej płyty betonowej jako niezależnego obiektu oraz identyfikację wszystkich możliwych uszkodzeń występujących na jej powierzchni, a także dokonanych napraw, co ma istotne znaczenie dla prowadzenia skutecznego procesu eksploatacji nawierzchni w całym okresie cyklu jej życia.

W najobszerniejszym rozdziale 6 (*Prognozowanie trwałości nawierzchni betonowej z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych*), Doktorant szczegółowo przedstawił zakres czynności niezbędnych do przeprowadzenia skutecznego procesu prognozowania uszkodzeń nawierzchni z wykorzystaniem wybranego narzędzia analitycznego, tj. programu Statistica i wbudowanych w niej SSN. Autor dysertacji przeprowadził m.in. analizę wrażliwości zmiennych wejściowych w celu doboru danych istotnych dla jakości uzyskanych modeli. Zaprezentował zależności pozwalające na określenie danych wejściowych wpływających na prognozowanie poszczególnych typów uszkodzeń nawierzchni. Dokładność wyuczenia, testowania oraz walidacji sieci neuronowych w odniesieniu do indywidualnego typu analizowanego uszkodzenia przeprowadził za pomocą współczynnika determinacji R^2 . Przyjętym parametrem prognozy była ilość uszkodzonych płyt [%], a parametrem weryfikacyjnym w ramach potwierdzenia postawionej tezy była powierzchnia uszkodzonych płyt [%]. Na podstawie uzyskanych wyników Doktorant stwierdził, że zaproponowany algorytm może służyć do długookresowej predykcji uszkodzeń, gdyż uzyskane błędy prognoz są stosunkowo małe, zarówno dla pierwszego parametru prognozowanego, jak i dla parametru weryfikacyjnego. Tym samym, Autor dysertacji potwierdził postawioną w pracy tezę dotyczącą możliwości zastosowania modeli SSN jako skutecznego narzędzia prognozowania uszkodzeń nawierzchni z betonu cementowego, których predykcja jest bardzo trudna ze względu na złożoność procesu degradacji nawierzchni.

W rozdziale 7 (*Wnioski*) Doktorant w zwartej formie podsumował uzyskane wyniki badań, zaprezentował najważniejsze osiągnięcia oraz zalecenia dotyczące przyszłych prac badawczych. Poprzez zmodyfikowanie sposobu oceny cech powierzchniowych nawierzchni z betonu cementowego i opracowanie prognoz powstawania uszkodzeń płyt betonowych za pomocą SSN, potwierdził możliwość modyfikacji strategii zarządzania nawierzchniami i odrzucenia reaktywnej eksploatacji oraz przejście do bardziej aktywnego procesu utrzymania zapobiegawczego (profilaktycznego), w celu zmniejszenia częstotliwości wykonywania remontów i wydłużenia cyklu życia nawierzchni. Autor dysertacji podkreślił, że wdrożenie przedstawionych procedur poprawia wiarygodność danych oraz umożliwia ich zastosowanie dodatkowo w programach zarządzania nawierzchniami na różnych szczeblach.

Bibliografia obejmuje liczny zbiór 129 pozycji literaturowych, z których znaczna część jest opracowana w języku angielskim. Z analizy pozycji przedstawionych w wykazie literatury wynika, że Doktorant jest współautorem dwóch prac (1 w języku angielskim i 1 w języku polskim) cytowanych w rozprawie. Mając powyższe na uwadze, a także wykonany przegląd stanu wiedzy w rozdziale 2 stwierdzam, że Autor dysertacji dokładnie zapoznał się

z większością dostępnych pozycji literatury z zakresu tematyki pracy doktorskiej i wykazał się dobrą znajomością omawianych zagadnień.

Podsumowując uważam, że układ przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej jest poprawny. Stanowi ona cenne opracowanie naukowe obejmujące postawione cele, wyniki badań, ich analizę i podsumowanie. Kolejność prezentowanych treści nie budzi zastrzeżeń, a objętość rozdziałów, z wyjątkiem 6, jest odpowiednia w stosunku do wagi poruszanych problemów. W ocenie Recenzenta, najobszerniejszy rozdział 6, liczący 113 stron, mógłby zostać podzielony na dwa odrębne rozdziały.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

3.1. Tytuł rozprawy i aktualność tematu

Tytuł rozprawy został dobrany adekwatnie i odpowiada treściom zaprezentowanym w rozdziałach pracy. Wszystkie zastosowane narzędzia i metody badawcze oraz analityczne skutecznie i konsekwentnie pozwoliły Autorowi na osiągnięcie założonych celów i weryfikację tezy pracy.

Tematyka pracy doktorskiej jest bardzo aktualna i odnosi się do procesu modelowania trwałości nawierzchni drogowych wykonanych w technologii betonu cementowego. Identyfikacja uszkodzeń oraz ich prognozowanie stanowią jeden z kilku istotnych kierunków badawczych w budownictwie drogowym. Kluczową rolę w dysertacji odgrywa opracowana i wdrożona od 2016 roku na wybranych i eksploatowanych odcinkach autostrady zmodyfikowana metoda oceny cech powierzchniowych. Poprzez jednoznaczne przypisanie danego typu uszkodzenia do pojedynczej płyty betonowej o nadanym numerze identyfikacyjnym możliwa jest szybka weryfikacja zgromadzonych danych. W odróżnieniu od obecnie stosowanych ocen cech powierzchniowych, które bazują na ocenie sieciowej, zaprezentowana metoda może być doskonałym punktem odniesienia do zastosowania skutecznego procesu prewencyjnego wybudowanych w Polsce dróg.

3.2. Plan oraz zakres wykonanych badań i ich analiz

Plan oraz zakres wykonanych prac, badań i ich analiz Doktorant przedstawił szczegółowo w rozdziałach 5 i 6 rozprawy. Prace nad zmodyfikowaniem oceny cech powierzchniowych nawierzchni betonowej, ze względu na swoją złożoność, podzielił na 4 etapy:

- opracowanie dedykowanej mapy geodezyjnej nawierzchni betonowej,
- pomiary terenowe – rejestracja powierzchni jezdni,
- kalibracja zdjęć powierzchniowych oraz identyfikacja uszkodzeń,
- identyfikacja i weryfikacja uszkodzeń płyt betonowych w terenie.

W ramach przeprowadzonych badań terenowych, w okresie 2016 – 2021, Autor dysertacji oceniał corocznie 120 438 płyt betonowych na 5 odcinkach jednorodnych (A-E) autostrady A2. Łącznie zinwentaryzował 16 617 szt. uszkodzeń (w tym także naprawione), z czego najliczniejszą grupę oraz największy średni przyrost stanowią wykruszenia szczelin (WS). Sumaryczna powierzchnia zidentyfikowanych uszkodzeń na analizowanych odcinkach do roku 2021 to 774 m², co stanowi 0,04% całkowitej powierzchni jezdni na badanych odcinkach. Natomiast łączna długość zlokalizowanych uszkodzeń to 670 mb. Przedstawione powyżej informacje oznaczają, że zgodnie z aktualnie stosowanymi kryteriami ocen wg DSN analizowaną nawierzchnię (po 10 latach eksploatacji) można zaliczyć do wielkości pożądanej, co określa stan nawierzchni nowych, odnowionych oraz eksploatowanych, które nie wymagają planowania zabiegów remontowych. W zakresie zrealizowanych badań Doktorant przeprowadził identyfikację danych o ruchu pojazdów poruszających się po analizowanych odcinkach jednorodnych, wykonał obliczenia skumulowanej liczby osi standardowych dla

analizowanego okresu, czyli wyznaczył intensywność oddziaływania ruchu na odcinki jednorodne z podziałem na wyodrębnione pasy. Ponadto, uwzględnił również wpływ warunków klimatycznych, w tym termicznych umożliwiającym określenie gradientów dodatnich i ujemnych w płytach betonowych. Zgromadził także informacje o ilości opadów jakie występowały na poszczególnych odcinkach oraz liczbie dni z temperaturą poniżej 0°C, co dodatkowo rozszerzyło zakres informacji możliwych do uwzględnienia w opracowanej prognozie degradacji nawierzchni z betonu cementowego.

W kolejnym kroku pracy badawczej Doktorant przyjął algorytm działania w celu opracowania SSN dla prognozowania uszkodzeń nawierzchni z betonu cementowego, w którym wyróżnił 6 kluczowych etapów:

- wybór metody budowy sieci neuronowej,
- dobór zmiennych prognostycznych,
- opracowanie danych historycznych w jednolitej strukturze,
- ustalenie liczby, rodzaju i architektury testowanych sieci neuronowych,
- przeprowadzanie procesu uczenia i wybór najdokładniejszej sieci jako modelu prognostycznego,
- wykonanie analizy wrażliwości dla zmiennych wejściowych.

Do przeprowadzenia analizy przyjął podział na zbiory: uczący (4 letni okres badawczy, obejmujący lata 2016 - 2019), testowy (rok 2020) oraz walidacji (rok 2021). Do badań wybrał dwa dostępne w programie Statistica typy SSN, tj.: sieci o radialnych funkcjach bazowych (RBF) oraz wielowarstwowe preceptrony (MLP). Za kryterium wyboru modelu Autor dysertacji przyjął minimalną wartość błędu średniokwadratowego dla danych ze zbioru testowego. Dokładność wyuczenia, testowania oraz walidacji sieci neuronowych, w odniesieniu do indywidualnego typu analizowanego uszkodzenia, przeprowadził za pomocą współczynnika determinacji R^2 . Przyjętym parametrem prognozy była ilość uszkodzonych płyt [%], a parametrem weryfikacyjnym powierzchnia uszkodzonych płyt [%]. Podczas analizy uzyskanych rodzajów architektury sieci neuronowych Doktorant zaobserwował, że skuteczność sieci w zależności od analizowanego typu uszkodzenia zależy od doboru danych na wejściu w zależności od prognozowanego parametru na wyjściu. Wytypował kluczowe parametry w zakresie prognozowania uszkodzeń, którymi są: wiek nawierzchni, obciążenie ruchem (osie standardowe) i rodzaj pasa ruchu (szybki, wolny, awaryjny). Na podstawie przeprowadzonych ocen dokładności (trafności) wyuczenia, testowania i walidacji opracowanych SSN Autor dysertacji stwierdził, że średnia wartość przewidywania zawiera się w przedziale od 87% dla uszkodzeń krawędzi płyt do ponad 90% dla pozostałych typów uszkodzeń. Najlepszą wartość uzyskała sieć neuronowa do prognozowania pęknięć poprzecznych, tj. ponad 99%, co można uznać za znakomity wynik. Wartości współczynnika determinacji R^2 mieszczą się w przedziale 96-97% dla uszkodzeń naroży i powierzchni oraz pęknięć podłużnych, co również można uznać za bardzo dobry wynik. Doktorant zwrócił uwagę, że lepszą wartość dopasowania uzyskał dla prognozowanego parametru związanego z ilości uszkodzonych płyt dla uszkodzeń naroży i powierzchni oraz wykruszeń szczelin, niż dla ilości uszkodzonej powierzchni dla tych samych typów uszkodzeń. Z przeprowadzonych analiz wynika, że nawet przy braku uwzględnienia pewnych czynników, które wpływają na stan techniczny powierzchni jezdni, jak błędy w wykonawstwie, prace utrzymaniowe, zdarzenia losowe, uzyskano dużą wartość średnią współczynnika determinacji R^2 dla prognozowanej liczby uszkodzonych płyt na poziomie 94,7%, a w zakresie powierzchni uszkodzeń płyt na poziomie 93,3%.

Tak przyjętą koncepcję pracy, opracowany i zrealizowany plan badań oraz wykonane analizy oceniam pozytywnie, gdyż doprowadziło to skutecznie do osiągnięcia założonego celu badawczego rozprawy doktorskiej.

3.3. Teza, cel i zakres pracy

Tezę pracy zapisano w rozprawie w następującym brzmieniu:

„Na podstawie bazy danych zgodnej z obowiązującymi systemami diagnostyki nawierzchni betonowych możliwe jest efektywne prognozowanie zmian ich stanu technicznego”.

Podany zapis tezy można uznać za właściwy z punktu widzenia treści zawartych w rozprawie doktorskiej. Jej słuszność została udowodniona w pracy poprzez poprawnie zaprojektowany plan oraz zakres badań. Dla sprawdzenia przyjętej tezy Doktorant sformułował cel badawczy, którym była weryfikacja możliwości wykorzystania SSN do prognozowania zmian stanu technicznego nawierzchni betonowej. W celu zrealizowania postawionego celu badawczego, Autor dysertacji sprecyzował następujący zakres rozprawy doktorskiej, który obejmował:

- studium literatury krajowej i zagranicznej dotyczącej trwałości i utrzymania nawierzchni betonowych,
- sformułowanie tezy, celu i zakresu pracy,
- przeprowadzenie pięciu cykli badań terenowych w ramach zmodyfikowanej metody oceny cech powierzchniowych nawierzchni z betonu cementowego,
- opracowanie bazy danych zawierającej informacje o obciążeniu ruchem oraz warunkach klimatycznych w zakresie analizowanych odcinków autostrady,
- opracowanie modeli prognostycznych dla różnych typów uszkodzeń uwzględniających dostępne zmienne wejściowe (konstrukcja nawierzchni, obciążenie ruchem pojazdów, warunki klimatyczne) przy wykorzystaniu SSN,
- przeprowadzenie analiz zmiennych wejściowych oraz określenie optymalnej architektury SSN dla poszczególnych typów uszkodzeń.

Przedstawione wyniki badań i przeprowadzone analizy pozwalają stwierdzić, że Doktorant udowodnił postawioną tezę, a założony cel badawczy został osiągnięty.

3.4. Najważniejsze osiągnięcia naukowe i ocena kierunków dalszych badań

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta z naukowego punktu widzenia zrealizowanej rozprawy doktorskiej, należy zaliczyć:

- zmodyfikowanie metody oceny cech powierzchniowych nawierzchni drogowych wykonanych w technologii z betonu cementowego, dzięki czemu możliwe jest:
 - zastąpienie subiektywnej oceny obserwatora obiektywną oceną geometrii i obmiaru uszkodzeń,
 - analizowanie przypadków na dużych populacjach,
 - przeprowadzenie wiarygodnej oceny stanu technicznego nawierzchni, pozbawionej wad subiektywności,
 - weryfikowanie zgromadzonych danych oraz prowadzenie efektywnego utrzymania prewencyjnego nawierzchni;
- opracowanie modeli sztucznych sieci neuronowych do długookresowej prognozy uszkodzeń nawierzchni z betonu cementowego;
- potwierdzenie skuteczności i wydajności zastosowania sztucznych sieci neuronowych do predykcji typów uszkodzeń nawierzchni z betonu cementowego; składają się na to: indywidualne modele sieci neuronowej dedykowane dla poszczególnych typów uszkodzeń charakterystycznych dla drogowych nawierzchni betonowych oraz określenie istotnych danych wejściowych w zależności od prognozowanego typu uszkodzenia.

Wyżej wymienione dokonania Autora dysertacji stanowią istotny wkład w obszarze modelowania trwałości betonowych nawierzchni drogowych z wykorzystaniem SSN, a także wartość dodaną w zakresie dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Zrealizowana przez Doktoranta praca badawczo – analityczna potwierdziła, że:

- opracowane modele SSN mogą być wykorzystywane do wieloletniej predykcji, gdyż uzyskane błędy prognoz są stosunkowo małe;
- przedstawione modele mogą być skutecznym narzędziem prognozowania uszkodzeń betonowych nawierzchni drogowych, których przewidywanie jest utrudnione ze względu na złożoność mechanizmu degradacji nawierzchni;
- najlepsze rezultaty w rozwiązywaniu problemów dotyczących oszacowania ilości uszkodzeń betonowej nawierzchni drogowej uzyskano stosując sieci jednokierunkowe warstwowe (MPL), a dominującym algorytmem uczenia jest iteracyjna metoda rozwiązywania nieliniowych problemów optymalizacji BFGS (algorytm Broydena-Fletcher-Goldfarba-Shanno);
- sztuczne sieci neuronowe mogą być wykorzystywane do optymalizacji strategii prewencyjnego utrzymania oraz oceny stanu nawierzchni drogowych z betonu cementowego;
- korzyści ze stosowania SSN wielokrotnie przekraczają pracochłonność ich tworzenia; najdłuższym etapem procesu ich opracowania jest zgromadzenie i przygotowanie odpowiedniej jakości danych wejściowych, choć dzięki zmodyfikowanej metodzie oceny cech powierzchniowych i ten czas można skutecznie zautomatyzować.

Doktorant wskazał również, że dalsze prace badawcze będą dotyczyć analiz przy zastosowaniu sztucznej inteligencji (AI) i wykorzystaniu utworzonej bazy danych z identyfikacji uszkodzeń na wykonanych zdjęciach płyt betonowych, w celu opracowania automatycznego algorytmu rozpoznawania uszkodzeń.

3.5. Uwagi szczegółowe

3.5.1. Uwagi redakcyjne

Strukturę pracy należy uznać za właściwą. Praca została zredagowana poprawnie, napisana językiem technicznym, z niewielką liczbą uwag edytorskich i językowych. Błędy redakcyjne miały znikomy wpływ na ogólny ogład pracy. Kilka z nich podano poniżej:

- str. 6, w liście akronimów – brakuje wszystkich używanych w rozprawie skrótów, np. SSN – sztuczne sieci neuronowe;
- str. 7, w liście akronimów – zapisany skrót „Unn” jest niepoprawny i powinien mieć formę „UNn”;
- str. 40, w górnym akapicie – zapisany zwrot „... Odcinek E od km 68+485 do km 91+415, Odcinek F od km 91+415 do km 107+900...” jest niepoprawny i powinien mieć formę „... Odcinek D od km 68+485 do km 91+415, Odcinek E od km 91+415 do km 107+900m ...”;
- od str. 47 (podrozdział 4.2.6) do końca pracy – niepoprawna numeracja tabel;
- na rys. 59-65 (str. 93-99) – brak jednostki miary [szt.] na osi pionowej;
- podpisy rys. 68-70 (str. 102-104) – zapisany zwrot „... Zestawienie powierzchni zidentyfikowanych pęknięć...” jest niepoprawny i powinien mieć formę „... Zestawienie długości zidentyfikowanych pęknięć ...”;
- str. 151, w Tabeli 32 – w ostatniej kolumnie Aktywacja (wyjściowa) zapis „Liniowa” jest niepoprawny i powinien mieć formę „Logistyczna”;

- podpis rys. 117 (str. 155) – zapisany zwrot „... Zestawienie procentowe płyt ze zinwentaryzowanym uszkodzeniem powierzchniowym (UP)...” jest niepoprawny i powinien mieć formę „... Zestawienie procentowe płyt ze zinwentaryzowanym wykruszeniem szczeliny (WS)...”;
- str. 163, w Tabeli 37 – w ostatniej kolumnie Aktywacja (wyjściowa) zapis „Logistyczna” jest niepoprawny i powinien mieć formę „Wykładnicza”;
- str. 175, w Tabeli 41 – w ostatniej kolumnie Aktywacja (wyjściowa) zapis „Liniowa” jest niepoprawny i powinien mieć formę „Logistyczna”;
- str. 188, w wykazie literatury – podane pozycje o nr 57 i 58 są takie same, więc jedna z nich powinna zostać usunięta.

Część graficzna pracy jest estetyczna, rysunki wykonane z dużą starannością, w sposób czytelny i przejrzysty.

3.5.2. Uwagi merytoryczne

1. W rozdziale 2 (Tabela 1, str. 11) Autor dysertacji szczegółowo przedstawił i omówił zalety nawierzchni drogowych wykonanych w technologii betonu cementowego, natomiast nie wspomniał o ich słabych stronach. Czy Doktorant zna wady betonowych nawierzchni drogowych? Proszę o odpowiedź.
2. W rozdziale 2 (Tabela 2, str. 13 oraz podrozdział 2.3.2, str. 18-21) Autor dysertacji scharakteryzował typy powierzchniowych i strukturalnych uszkodzeń nawierzchni drogowych wykonanych w technologii betonu cementowego. Czy Doktorantowi znana jest stosowana klasyfikacja, podział i typy uszkodzeń dla betonowych nawierzchni lotniskowych oraz miara oceny ich stanu powierzchniowego w postaci stopnia degradacji nawierzchni? Proszę o odpowiedź.
3. W rozdziale 5 rozprawy Doktorant zaproponował autorskie zmodyfikowanie stosowanej metody oceny cech powierzchniowych nawierzchni drogowych wykonanych w technologii z betonu cementowego. Na czym dokładnie polega przedmiotowa modyfikacja? Proszę o odpowiedź.
4. W rozdziale 6 (str. 73-74) Autor dysertacji omówił dwa dostępne w programie Statistica typy SSN, tj.: sieci o radialnych funkcjach bazowych (RBF) oraz wielowarstwowe preceptrony (MLP). Dlaczego Doktorant do rozwiązywania problemów dotyczących prognozowania ilości uszkodzeń betonowej nawierzchni drogowej zastosował sieci jednokierunkowe, warstwowe MPL, a nie sieci o radialnych funkcjach bazowych RBF? Proszę o odpowiedź.

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie zmniejszają merytorycznej wartości pracy, którą uważam za dobrą.

4. Podsumowanie

Przedłożoną do recenzji rozprawę doktorską oceniam pozytywnie. Dotyczy to zarówno jej strony naukowej, jak i formalnej. Obie nie wzbudzają większych wątpliwości. Na szczególną uwagę zasługuje duży nakład pracy Autora podczas wykonania wielu pracochłonnych badań terenowych i analiz. Praca doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego dyscypliny inżyniera lądowa, geodezja i transport. Doktorant potwierdził znajomość wiedzy teoretycznej w zakresie dyscypliny naukowej oraz przygotowanie do samodzielnego wykonywania prac naukowych, analizy wyników i formułowania wniosków.

Wskazane niedociągnięcia redakcyjne i nieścisłości w zapisach nie obniżają w istotny sposób pracy doktorskiej z merytorycznego punktu widzenia.

Uwzględniając zapisy określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. z 2023 r., poz. 742 z późn. zm.) stwierdzam, że sformułowana teza pracy została udowodniona, a cele osiągnięte.

W związku z powyższym, przedkładam Radzie Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy doktorskiej pt.: „**Modelowanie trwałości nawierzchni drogowych z betonu cementowego**”, przygotowanej przez mgr. inż. Łukasza Rudzińskiego.

.....
Mariusz Wesółowski

Dr hab. inż. Mariusz Wesółowski, prof. WITPiS