

dr hab. inż. Agnieszka Śłosarczyk, prof. PP
Instytut Budownictwa
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 5
60-965 Poznań

Poznań, 9.01.2025 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

pt.: *Instrumentalne metody oceny jakości powierzchni betonu, ze szczególnym uwzględnieniem betonu architektonicznego*

przygotowanej przez Pana mgra inż. Tomasza Benedysiuka z Politechniki Warszawskiej

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę opracowania recenzji stanowi pismo Pana prof. dr hab. inż. Konrada Lewczuka, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport z Politechniki Warszawskiej, z dnia 6.11.2024 o numerze WTBD.521.DR.1445.2024, zlecające wykonanie opinii rozprawy doktorskiej oraz monografia rozprawy pt.: *Instrumentalne metody oceny jakości powierzchni betonu, ze szczególnym uwzględnieniem betonu architektonicznego* przygotowana przez Pana mgra inż. Tomasza Benedysiuka.

2. Przedmiot, cel i zakres pracy

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgra inż. Tomasza Benedysiuka dotyczy opracowania ilościowej metody oceny jakości gładkiego betonu architektonicznego z wykorzystaniem cyfrowej rejestracji obrazu wspomaganej metodami komputerowej analizy. Podjęta przez Doktoranta tematyka badawcza jest aktualna i wpisuje się w zagadnienia związane z diagnostyką elementów i konstrukcji betonowych oraz z potrzebą digitalizacji procesów budowlanych.

Jako główny cel swoich badań Doktorant przyjął opracowanie i wykazanie skuteczności metody ilościowej oceny porowatości i kolorystyki powierzchni gładkiego betonu architektonicznego. Zwrócił również uwagę, że jego celem jest opracowanie metody, która będzie obiektywna, powtarzalna i w sposób jednoznaczny będzie umożliwiała ocenę jakości powierzchni betonu. Zaproponowany kierunek badań jest ambitny z uwagi na niejednorodność betonu, która zależy nie tylko od jakości poszczególnych składników betonu, ale również od

sposobu wbudowania, użytego deskowania, rodzaju i sposobu nanoszenia zastosowanego środka antyadhezyjnego i sposobu wykończenia powierzchni, o czym Doktorant doskonale zdaje sobie sprawę. Jest to wiele czynników, które indywidualnie i synergicznie będą wpływały na jakość finalnego produktu, szczególnie betonu architektonicznego. Rozprawa doktorska stanowi kontynuację prac eksperymentalnych rozpoczętych w pracy magisterskiej, której promotorem była Pani dr inż. Wioletta Jackiewicz-Rek. Doktorant zaproponował autorską metodę oceny ilościowej jakości powierzchni betonu budując stanowisko badawcze w oparciu o cyfrową rejestrację obrazu i jego analizę o nazwie DARK-BOX. Podjęte badania miały na celu potwierdzenie postawionej przez Doktoranta tezy, że *„możliwe jest opracowanie metody jednoczesnego ilościowego pomiaru porowatości i kolorystyki gładkiego betonu architektonicznego metodami analizy obrazu, stwarzając powtarzalne warunki oceny powierzchni, pomimo niejednorodnych warunków badania”*.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz, a promotorem pomocniczym dr inż. Wioletta Jackiewicz-Rek.

Manuskrypt rozprawy zawiera 186 stron tekstu z 76 rysunkami i 54 tabelami. Zacytowano 97 pozycji literaturowych zawierających książki i artykuły powiązane z tematyką badawczą rozprawy, akty prawne i normy.

3. Omówienie rozprawy

Rozprawa doktorska ma charakter eksperymentalno-analityczny i składa się z 13 rozdziałów, w tym ze wstępu przedstawiającego uzasadnienie podjętej tematyki badań, cel i tezę pracy, przeglądu badań literaturowych oraz rozdziałów przedstawiających wyniki badań. Pracę kończy rozdział stanowiący podsumowanie, zestawienie literatury, tabel i rysunków.

W pierwszej części pracy, w rozdziale 1, Doktorant zamieścił uzasadnienie podjętej tematyki pracy i przedstawił jej tezę wraz z podaniem celu, o którym wspominałam powyżej. Doktorant szczególnie podkreślił trudności z jakimi spotykają się wykonawcy i odbiorcy elementów wykonanych z betonu architektonicznego co do obiektywnej oceny jego jakości. Zwrócił również uwagę na brak jednoznacznych wytycznych takiej oceny, wskazując, że w praktyce inżynierskiej często opieramy się na różnych źródłach normowych lub opracowań lokalnych, czego efektem są konflikty na linii architekt-wykonawca, problemy natury technicznej oraz wysokie koszty ewentualnych napraw betonu architektonicznego. Dlatego też istnieje potrzeba opracowania nowej, obiektywnej metody ilościowej oceny jakości betonu architektonicznego. Taka wiedza jest niezwykle ważna w kontekście projektowania trwałych

konstrukcji betonowych i ich diagnostyki, co z kolei przedłuża czas eksploatacji obiektów budowlanych.

W kolejnych rozdziałach 2-6 Doktorant przedstawił przegląd istniejącego stanu wiedzy na temat charakterystyki betonu architektonicznego, jego definicję i rodzaje, następnie omówił istniejące metody oceny estetyki powierzchni betonu architektonicznego w ujęciu norm obowiązujących w Europie i Ameryce, przedstawił ilościowe metody oceny porowatości i kolorystyki powierzchni betonu. W kolejnym rozdziale Doktorant przedstawił czynniki wpływające na wizualną ocenę kolorystyki betonu przedstawiając budowę ludzkiego oka, charakterystykę źródeł światła i przestrzeni barw, oraz omówił sposoby obliczania różnic koloru w dwóch przestrzeniach sRGB i CIELAB, które posłużyły w części eksperymentalnej do analizy wyników w zaproponowanej przez Doktoranta metody oceny ilościowej jakości powierzchni betonu. Przegląd badań kończy rozdział opisujący metody komputerowej analizy obrazu i przetwarzania obrazów cyfrowych. Literatura jest dobrana prawidłowo, Doktorant umiejętnie z niej skorzystał tworząc krytyczny opis istotnych kryteriów i norm oceny jakości betonów architektonicznych. Jak dotąd, poza przytoczoną przez Doktoranta monografią Pana K. Kuniczuka, p.t. *Beton architektoniczny – wytyczne techniczne* wydaną przez Polski Cement w 2011 r., nie ma w Polsce tego typu opracowań naukowych, które w sposób wyczerpujący opisywałyby charakterystykę i sposoby oceny jakościowej i ilościowej betonów architektonicznych. Z tego powodu przedstawiony przez Doktoranta przegląd badań uważam za bardzo wartościowy.

Część eksperymentalna dysertacji obejmuje rozdziały 7-11. W rozdziale 7 rozprawy Doktorant przedstawił koncepcję i szczegółowy plan badań, których celem było znalezienie odpowiedzi na postawione pytania:

- w jakim stopniu przebarwienia i chropowatość powierzchni wpływają na wynik pomiaru porowatości betonu architektonicznego,

- w jakim stopniu porowatość i chropowatość powierzchni wpływają na wynik pomiaru kolorystyki betonu architektonicznego,

- które parametry statystyczne najlepiej charakteryzują porowatość i kolorystykę powierzchni betonu architektonicznego,

- jakie są optymalne wartości graniczne wybranych parametrów statystycznych dla klasyfikacji powierzchni betonu architektonicznego?

Na podstawie postawionych pytań Doktorant sformułował i zrealizował ambitny plan badawczy obejmujący stworzenie stanowiska badawczego o nazwie własnej DARK-BOX do równoczesnej oceny ilościowej dwóch parametrów – porowatości i kolorystyki powierzchni betonu architektonicznego, które Doktorant wybrał jako istotne kryteria oceny z wykorzystaniem zaproponowanej metody cyfrowej analizy obrazu. Następnie w kolejnym rozdziale przedstawił wyniki badań wstępnych, których celem była weryfikacja poprawności działania zaprojektowanego stanowiska badawczego. Zaproponował dwa algorytmy działania, pierwszy do oceny porowatości betonu, który obejmował wykonanie zdjęcia – progowanie lokalne – erozję (usuwanie pikseli brzegowych) – usuwanie małych obiektów – dylatację (ponowne dodawanie pikseli brzegowych). Kluczowe elementy tego etapu badań polegały na dobraniu optymalnego algorytmu binaryzacji oraz określeniu rozmiaru elementu strukturalnego w operacjach erozji i dylatacji i minimalnej wielkości obiektów usuwanych przed dylatacją. Zaproponował progowanie lokalne wykorzystując 8 algorytmów do oceny zmian jasności i porowatości powierzchni zawierającej również przebarwienia. W drugim algorytmie służącym ocenie kolorystyki betonu zaproponował algorytm korekcji kolorystyki zdjęcia, którego celem było stworzenie funkcji, które przekształcałyby zmierzone składowe barwy (w przestrzeni sRGB i CIELAB) na wartości skorygowane, tak aby były jak najlepiej odpowiadały znanym wartościom koloru wzornika (Datacolor Sydercheckr). Do oceny podobieństwa kolorystycznego przyjął ważoną odległość euklidesową między badaną powierzchnią, a powierzchnią odniesienia ΔE . Algorytm korekcji kolorystyki zdjęcia dla zarówno dla wzornika i testowej powierzchni betonu architektonicznego obejmował następujące etapy: wykonanie zdjęcia wzornika barw w przestrzeni sRGB – konwersję przestrzeni barw – dopasowanie najlepszej funkcji mapującej.

W kolejnych, właściwych etapach badań w oparciu o zaproponowane algorytmy oceny porowatości i kolorystyki powierzchni betonu architektonicznego Doktorant przeprowadził badania modelowe na 26 powierzchniach odpowiadających różnym klasom chropowatości i porowatości (wariantowanych liczbą otworów o średnicach od 1 do 4 mm) oraz w dwóch odcieniach kolorystycznych - jasno i ciemnoszarym (1 etap badań) oraz na 13 powierzchniach odpowiadających wzornikom kolorów (biały, jasno i ciemnoszary) oraz powierzchniach betonu architektonicznego wykonanych na białym i szarym cemencie (2 etap badań). Efektem prac pierwszego etapu służącego ocenie porowatości powierzchni badań był dobór odpowiednich warunków prowadzenia pomiaru (w tym ogniskowej obiektywu) oraz dobór właściwego algorytmu progowania lokalnego umożliwiającego prawidłową detekcję

wszystkich otworów w próbce – algorytm Sauvola. W etapie tym Doktorant zaproponował również przyjęcie dwóch parametrów statystycznych do opisu powierzchni: pierwszy, opisujący udział procentowy porów na całej powierzchni wyrażony za pomocą średniej lub mediany i drugi, opisujący zmienność udziału porów opisany odchyleniem standardowym lub współczynnikiem zmienności. Ponadto Doktorant określił, że ocenie może być poddana powierzchnia betonu o chropowatości w klasie 1 (gładka) lub 2, odpowiadającej maksymalnej chropowatości papieru ściernego P120. Doktorant podsumował, że parametrami w sposób najbardziej czytelny opisującymi porowatość powierzchni to mediana rozkładu porowatości oraz udział procentowy powierzchni porów dla pojedynczego punktu pomiarowego o najwyższej porowatości. W drugim etapie badań walidacyjnych służących ilościowej ocenie kolorystyki powierzchni betonu ocenie poddano wpływ porowatości i chropowatości na zmiany kolorystyki powierzchni betonu. Efektem tego etapu było wytypowanie najlepszego algorytmu korekcji kolorystyki otrzymanych zdjęć, wytypowano kalibrację mapującą stopnia trzeciego oraz miarę podobieństwa kolorystycznego w przestrzeni barw CIELAB. Ostatecznie Doktorant podsumował, że parametrami w sposób najbardziej czytelny opisującymi kolorystykę powierzchni to różnica $\Delta E(LAB)$ między dominującym kolorem badanej powierzchni obliczonym na podstawie mediany wyników pomiarów a przyjętym wzorcem, oraz różnica $\Delta E(LAB)$ między dominującym kolorem badanej powierzchni a kolorem największego przebarwienia. Rezultaty prac badań modelowych Doktorant potwierdził w badaniach terenowych na 10 wytypowanych powierzchniach betonu architektonicznego. Efektem obu etapów było opracowanie algorytmów postępowania w ilościowej ocenie porowatości i kolorystyki powierzchni betonu z wykorzystaniem cyfrowej rejestracji obrazu i stworzonego urządzenia DARK-BOX. Istotnym rezultatem badań są zaproponowane przez Doktoranta klasy ilościowej oceny porowatości i kolorystyki powierzchni betonu architektonicznego, które zawierają graniczne wartości parametrów w danej klasie i mogą stanowić narzędzie obiektywnej oceny obu parametrów w praktyce inżynierskiej.

Rozprawę kończy podsumowanie wyników pracy i prognoza dalszych badań.

4. Ocena pracy i uwagi szczegółowe

Oceniana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Tomasza Benedysiuka ma dobre podstawy naukowe i spodziewane możliwości aplikacyjne w diagnostyce powierzchni betonu architektonicznego. Stanowi samodzielne rozwiązanie problemu badawczego pod kierunkiem Promotora i Promotora pomocniczego, przedstawiające istotne dla rozwoju inżynierii lądowej

wyniki badań. Problematyka pracy dotyczy ilościowej oceny porowatości i kolorystyki powierzchni betonu architektonicznego z wykorzystaniem zaprojektowanego i wykonanego przez Doktoranta stanowiska badawczego. W przedstawionym programie badań Doktorant udowodnił postawioną tezę pracy uzyskując oryginalne wyniki, z których za najważniejsze uważam:

- zaprojektowanie i zbudowanie przenośnego stanowiska badawczego DARK-BOX umożliwiającego wykonywanie cyfrowych obrazów powierzchni betonu w jednorodnych warunkach otoczenia, które umożliwia badanie jakości betonu na placu budowy i stanowi alternatywne rozwiązanie dla profilometrów optycznych, czy skanerów wyposażonych w kamery 3D,

- opracowanie algorytmu postępowania podczas ilościowej oceny porowatości i kolorystyki powierzchni betonu architektonicznego, który umożliwia uzyskanie obiektywnych i powtarzalnych wyników badań, co zostało potwierdzone przez Doktoranta terenowymi badaniami walidacyjnymi na 10 różnych powierzchniach betonowych,

- podanie kryteriów oceny porowatości i kolorystyki betonu architektonicznego, które są obiektywne w interpretacji i mogą posłużyć w praktyce inżynierskiej w diagnostyce jakości powierzchni betonu. O ile ilościowa ocena powierzchni betonu może być wykonana innymi metodami, o tyle zaproponowany w dysertacji równoczesny sposób ilościowej oceny porowatości i kolorystyki jest oryginalnym rozwiązaniem Doktoranta.

Doktorant nie uniknął jednak pewnych błędów i uchybień, a niektóre zagadnienia wymagają dodatkowego wyjaśnienia. Przedstawione poniżej uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na wysoką ocenę merytoryczną pracy:

- tytuł rozprawy jest bardzo ogólny i wskazuje na zastosowanie różnych metod instrumentalnych w ocenie jakości betonu, w tym betonu architektonicznego. Nie odnosi się do zaproponowanej cyfrowej metody analizy obrazu oraz ilościowej oceny porowatości i kolorystyki betonu, co przecież stanowi główny cel pracy. Po tytule spodziewałam się zastosowania różnych metod instrumentalnych, między innymi kolorimetrii, czy metod spektrofotometrycznych, o których zresztą Doktorant wspomina w części teoretycznej rozprawy,

- opis stanowiska badawczego DARK-BOX. Doktorant zastosował 2 rodzaje położenia lamp boczne do oceny porowatości i górne do oceny kolorystyki. Czy Doktorant badał inne położenia (inny kąt padania światła) lamp bocznych do oceny porowatości betonu? W

urządzeniu Doktorant zastosował diody LED, które mogą charakteryzować się różnym odcieniem barwy (zimna, neutralna i ciepła), co zmienia charakterystykę widma takiego źródła światła. Jakiego typu diody zostały zastosowane w urządzeniu DARK-BOX i czy rodzaj światła może wpływać na procedurę badawczą zaproponowaną przez Doktoranta,

- czy algorytm postępowania zaproponowany przez Doktoranta w ocenie ilościowej porowatości i kolorystyki powierzchni betonu może być również wykorzystany dla kolorowych betonów architektonicznych.

Uwagi edytorskie:

- str. 40 – brak opisu w tekście rysunku 3.3, który jest autorskim rysunkiem Doktoranta,
- str. 73 i 74 – brak pełnej legendy dla wzorów 5.1, 5.2 i 5.4,
- str. 89 – numery rysunków nie odpowiadają numeracji danego rozdziału,
- str. 119, 121 – brak w tabeli 9.8 wyników dla serii 17 i 20,
- niejednorodny sposób cytowania literatury.

5. Wniosek końcowy

Przedłożona rozprawa doktorska świadczy o posiadaniu przez Doktoranta ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport oraz umiejętności przygotowania planu i zrealizowania szeroko zakrojonych badań w stosunku do potrzeb rynku materiałów budowlanych. Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia eksperymentu oraz analizy wyników badań obejmujących zarówno zagadnienia inżynierskie z zakresu technologii betonu, jak i zagadnienia dodatkowe z obszarów optyki oraz cyfrowej i komputerowej analizy obrazu. Rezultatem rozprawy jest opracowana autorska metoda ilościowej oceny porowatości i kolorystyki powierzchni betonu architektonicznego oraz zaproponowanie procedur badawczych i ilościowych kryteriów oceny jakości betonu, co z pewnością stanowi nową wiedzę i może znaleźć zastosowanie w diagnostyce budynków.

Oceniając pozytywnie całość dotychczasowych dokonań Pana mgr. inż. Tomasza Benedysiuka wnoszę o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony.

