

dr hab. inż. Tomasz Tracz, prof. PK
Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych
Wydział Inżynierii Lądowej
Politechniki Krakowskiej
ul. Warszawska 24
31-155 Kraków
e-mail: tomasz.tracz@pk.edu.pl

Kraków, 17 maja 2024 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej

mgr inż. Henryka Kowalczyka

"Ocena parametrów struktury porów powietrznych w betonie z wykorzystaniem analizy obrazu 2D"
zrealizowanej pod opieką promotorską Pana prof. dr hab. inż. Jerzego Wawrzeńczyka oraz
Panią dr inż. Agnieszki Molendowskiej jako promotora pomocniczego

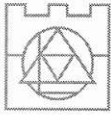
1. Podstawy opracowania opinii

Podstawę formalną opracowania niniejszej opinii stanowi pismo z dnia 19 marca 2024 r. Z-cy Dyrektora Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Pana dr hab. inż. Grzegorza Mazurka, prof. PŚk, zawierające zlecenie wykonania niniejszej recenzji.

Podstawą merytoryczną opinii jest załączony do zlecenia kompletny tekst rozprawy doktorskiej mgr inż. Henryka Kowalczyka pod tytułem jak wyżej.

Podstawę prawną recenzji stanowią:

- Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. poz. 1669), art. 14 ust. 1 pkt 1, ust 2 pkt 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.),
- 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. poz.261).



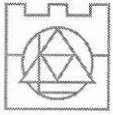
2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska autorstwa Pana mgra inż. Henryka Kowalczyka pt. „Ocena parametrów struktury porów powietrznych w betonie z wykorzystaniem analizy obrazu 2D”. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Jerzy Wawrzeńczyk, a promotorem pomocniczym dr inż. Agnieszka Molendowska. Rozprawa została przygotowana w Katedrze Technologii i Organizacji Budownictwa, Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach.

3. Charakterystyka rozprawy oraz uwagi ogólne

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy oceny parametrów struktury porów powietrznych w betonie z wykorzystaniem analizy obrazu 2D. Rozprawa ma typowy charakter opracowania studialno-doświadczalnego. Praca napisana jest w języku polskim i liczy 143 stron formatu A4. Składa się z 10 rozdziałów i zakończona jest spisem literatury. Pracę podzielono na dwie części.

Pierwsza część studialna zawiera przegląd literatury związany z analizą parametrów struktury porów powietrznych oznaczonych metodą 1D i 2D, badaniami betonu w tomografii komputerowej, generowaniu cyfrowych modeli betonu oraz wykorzystaniem sztucznej inteligencji w badaniach betonu. Pkt 1 to wprowadzenie i prezentacja układu pracy. Punkt 2 to omówienie metodyki pośrednich badań mrozoodporności betonu. Punkt ten został podzielony na 7 podrozdziałów. W pierwszej kolejności Doktorat prezentuje podstawowe informacje zawarte w literaturze sprzed wielu lat będące fundamentem rozwijanych modeli i analiz. Następnie przedstawia rodzaje metod oceny struktury porowatości i skupia się na szczegółowym omówieniu metody zapisanej w normie PN-EN 480-11. Oprócz szczegółowego omówienia metody normowej Doktorant prezentuje również wiele aspektów związanych z preparatyką próbek, nie rzadko używając fachowych sformułowań np. „powierzchnia powinna charakteryzować się matowym połyskiem”. Czytelnik odnosi wrażenie, że Doktorant posiada duże doświadczenie praktyczne w realizacji tego rodzaju badań. Równie szczegółowo w pracy omówione zostały zagadnienia związane z samym pomiarem, ale przede wszystkim z wyznaczaniem parametrów struktury porów. Bardzo ciekawe jest porównanie kryteriów stosowanych w wielu krajach europejski w odniesieniu do wymaganych wartości parametrów opisujących charakterystykę porów powietrznych zawartych w betonie, które zapewniają jego mrozoodporność. W kolejnym punkcie Autor przedstawia metodę powierzchniową analizy obrazu 2D służącą do wyznaczania parametrów struktury porów. Prezentacja tej metody jest opisana na 11 stronach, zawiera odniesienia do doświadczeń wielu badaczy i nasycona jest szczegółami badawczymi które nie rzadko determinują otrzymywane rezultaty. Rozdział 4 Autor poświęcił na omówienie bardzo nowoczesnej i zaawansowanej metody oceny struktur porowatych jaką jest tomografia komputerowa. Rozwój tej metodyki w ostatnich dekadach pozwala aktualnie na precyzyjne pomiary charakterystyki porów w materiale w przestrzeni 3D z zadawalającą dokładnością i rozdzielczością. Doktorant w



dalszej części rozdziału 4 prezentuje opisane w literaturze przykłady stosowania tomografii komputerowej w badaniach różnych materiałów. Na pochwałę zasługuje dobrze dobrany przegląd literatury, zarówno krajowej jak i zagranicznej. Ostatni rozdział pierwszej części pracy Doktorant zatytułował „Rozwój metod sztucznej inteligencji i sieci neuronowych w analizie obrazu”. Już sam tytuł rozbudza w czytelniku ogromną ciekawość. Zagadnienia te są bardzo obszerne i skomplikowane. Doktorantowi udało się w prosty sposób omówić najważniejsze zagadnienia z tym związane i krótko zaprezentować dostępne w literaturze przykłady wykorzystania tych zaawansowanych narzędzi w badaniach materiałowych.

Druga część pracy dotyczy zrealizowanych badań własnych, które związane są z analizą parametrów struktury porów powietrznych oznaczanych metodą powierzchniową 2D. Ta część pracy została podzielona na trzy etapy. W etapie pierwszym Doktorant realizuje badania i prowadzi analizy struktury porów powietrznych w betonach nawierzchniowych. Postawione cele badawcze obejmują: opracowanie procedur wyznaczania parametrów struktury porów powietrznych z zastosowaniem metody 2D, porównanie wartości parametrów struktury i opracowanie uproszczonej metody obliczenia zawartości mikroporów A_{300} wykorzystując pomiary długości cięciw. Wymienione cele zostały osiągnięte w całości a zakres analizowanych betonów nawierzchniowych był bardzo obszerny, 292 betony. Taki zakres betonów zróżnicowanych składem i właściwościami pozwala sądzić, iż zrealizowane przez Doktoranta badania i analizy w tej części pracy mają charakter bardzo uniwersalny, aczkolwiek w obszarze jednak betonów nawierzchniowych. Doktorant w jednym z podrozdziałów opisuje szczegółowo wiele aspektów dotyczących metodyki przygotowania powierzchni próbek do analizy oraz interpretacji otrzymanych rezultatów. Stosowane w badaniach metody są bardzo czułe na wszelkie nawet najdrobniejsze wady przygotowania powierzchni. Ma wrażenie, na podstawie zawartych w pracy opisów, że Doktorant jest specjalistą nie tylko w analizowaniu rezultatów badań, ale również w realizacji samych badań i preparatyce próbek. Bardzo interesujące w pracy są omówione zagadnienia związane z klasyfikacją porów, podziałem porów zgrupowanych i połączonych oraz wyznaczaniem średnic zastępczych. To bardzo cenne informacje szczególnie o charakterze praktycznym. Doktorant na podstawie otrzymanych rezultatów wykazał, iż możliwe jest przy pomocy ośmiu zmiennych niezależnych dokładne oszacowanie parametru A_{300} a tym samym znaczne ułatwienie i skrócenie czasu obliczeń. Etap drugi Doktorant poświęcił na badania struktur powietrznych w zaprawach cementowych zawierających w swym składzie mikrosfery polimerowe. Zakres prac w tym etapie obejmował: określenie rozkładu wielkości mikrosfer polimerowych przy pomocy mikroskopu skaningowego i tomografu komputerowego, oznaczenie rozkładów wielkości porów w zaprawach przy pomocy tomografu komputerowego, pomiarów metodą liniową i powierzchniową wraz z analizą tych rozkładów. Następnie Doktorant dokonał obliczeń parametrów struktury porów powietrznych metodą normowa i powierzchniową oraz przeprowadził analizy tych parametrów. W rezultacie tych badań wykazał wiele podobieństw rozkładów porów oznaczonych metodą 2D i przy użyciu tomografu komputerowego, a parametry struktury porów powietrznych obliczonych metodą 2D i 1D były bardzo do siebie zbliżone, co potwierdza duża



przydatność metody powierzchniowej w tych analizach. Ostatni etap niniejszej pracy to bardzo obszerny etap trzeci, w którym: wygenerowano cyfrowe modele powierzchni betonu na podstawie rozkładów średnic porów w rzeczywistych betonach, przeprowadzono analizę porównawczą wyników uzyskanych metodami 2D i 1D a następnie oznaczono wpływ kształtu porów, rozdzielczości, liczby i wielkości okien pomiarowych na uzyskane parametry rozkładu porów powietrznych. Bardzo rozbudowana analiza rezultatów badań wykonanych w ramach tego etapu pozwoliła potwierdzić, iż pomiary i obliczenia zrealizowane metodą powierzchniową 2D pozwalają na otrzymanie równoważnych wyników w stosunku do metody normowej PN-EN 480-11. Co więcej metoda powierzchniowa analizy obrazu 2D pozwala na wyznaczenie kształtu porów i ostatecznie uzyskanie parametrów rozkładu określonych w analizie znacznie większej ilości porów, niż to ma miejsce w przypadku stosowania metody normowej. Można nawet pokusić się o stwierdzenie, że metoda powierzchniowa 2D dostarcza bardziej wiarygodne wyniki.

Wnioski końcowe zostały przedstawione w rozdziale 10. Zaprezentowane wnioski obejmują całość zrealizowanego zakresu badań i przeprowadzonych analiz. W ostatniej części pracy Doktorant krótko prezentuje planów dalszych badań.

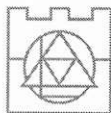
Załączony do rozprawy spis literatury w tym norm zawiera 111 pozycji. 11% cytowanych prac pochodzi z ostatnich 5 lat a 36% z ostatnich 10 lat, co dobrze ilustruje zainteresowania badaczy tą tematyką w ostatnim okresie oraz dowodzi aktualności problemu badawczego jaki jest przedmiotem niniejszej dysertacji. Natomiast 10% cytowanych prac pochodzi sprzed pół wieku co potwierdza, iż wiele podstaw teoretycznych opracowanych wiele lat temu jest wykorzystywanych w nowoczesnych metodach badawczych i są one nadal aktualne. Praca zawiera 28 tabel w zasadniczym tekście dysertacji oraz 36 tabel w załączniku. W pracy zamieszczono 123 rysunki a wiele z nich to grupy kilku wykresów, które wymagały od Doktoranta zapewne poświęcenia ogromu pracy na ich przygotowanie.

Podsumowując stwierdzam, że układ rozprawy, kolejność prezentowanych wyników, sposób ich prezentacji oraz poprawność językowa nie budzi moich zastrzeżeń. Dobór pozycji literaturowych jest wystarczający i dobrze dopasowany do tematyki rozprawy.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Tytuł rozprawy odpowiada jej zawartości. Cel pracy oraz spodziewane rezultaty zostały wystarczająco jasno przedstawione, a zrealizowane badania doświadczalne wraz z analizą uzyskanych wyników to potwierdzają.

Część studialna prezentowana na 55 stronach jest opracowana starannie, porusza wiele aspektów związanych z analizą parametrów struktury porów powietrznych oznaczonych różnymi metodą, badaniami betonu w tomografii komputerowej, generowaniu cyfrowych modeli betonu oraz wykorzystaniem sztucznej inteligencji w badaniach betonu. Zakres omówionych zagadnień wprowadza czytelnika do prezentacji w dalszej części pracy badań, jednak brak jest podsumowania. Posumowania, z którego wynikałoby, iż obszary badań



którymi Doktorat zajmuje się w pracy są cennym uzupełnieniem stanu techniki i wartością dodaną do rozwoju dyscypliny. Dobry zakres cytowanych osiągnięć innych badaczy jest trafny i wystarczający.

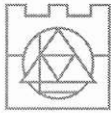
Część doświadczalna pracy, zawarta została w 5 rozdziałach. Zrealizowany program badań własnych był rozbudowany i składał się z trzech etapów. Generalnie zrealizowane badania własne obejmowały pomiary rozkładu porów powietrznych w kompozytach cementowych wraz z wyznaczeniem parametrów tych rozkładów przy użyciu trzech metod opartych o analizy przestrzenną 3D, powierzchniową 2D i liniową 1D. Program oraz zakres przeprowadzonych badań własnych został opracowany poprawnie i wystarczająco obszernie, stosownie do postawionych celów. Doktorant najwięcej uwagi poświęcił tytułowej metodzie powierzchniowej 2D. Opracowana w najdrobniejszych szczegółach i zweryfikowana pod wieloma kątami, metoda powierzchniowa oceny rozkładu porów powietrznych w kompozytach cementowych ma charakter oryginalnego rozwiązania naukowego. Doktorant realizując obszerne badania i analizy wykazał się dużą dojrzałością oraz jak sądzę samodzielnością w planowaniu, ale przede wszystkim w realizacji badań o charakterze naukowym.

Doktorant nie sformułował tez pracy, które byłyby podstawą zaplanowanego zakresu badań własnych. Zrealizowany program badawczy dostarczył licznych wyników, które zostały przez Doktoranta poddane szczegółowej analizie. Rozbudowane analizy statystyczne wyników badań są na wysokim poziomie i były podstawą formułowania przez Doktoranta wielu wniosków.

5. Uwagi, spostrzeżenia i wątpliwości recenzenta

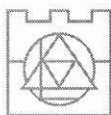
Poniżej zamieszczam uwagi, spostrzeżenia lub wątpliwości o różnym poziomie istotności, które powstały w trakcie lektury rozprawy. Wiele z nich to uwagi pozytywne, podkreślające walory recenzowanej pracy.

- 1) Wiele rysunków posiada jedynie opisy anglojęzyczne, np. na Rys. 2, 3 i 4.
- 2) Bardzo często w tabelach Autor nie podaje jednostek poszczególnych parametrów np. Tabelach 8, 9, 10, 11, 17, 18 i innych.
- 3) Str. 13 - niefortunne sformułowanie „.... matowym połyskiem” a być może fachowe, specjalistyczne określenie stosowane przez wielu badaczy.
- 4) Str. 16, Rys. 11 - brak jednostek wymiarowania.
- 5) Str. 57 – Doktorant nie wyjaśnia co rozumie pod pojęciem „zestaw danych dla 292 betonów”. Czy dla każdego rodzaju betonu wykonywano badania dla jednej przygotowanej powierzchni, czyli jedna próbka z jednego betonu? Czy może próbek w poszczególnych betonach było więcej?
- 6) Str. 82, Rys. 78, 79, 80, 81 i innych – błędny opis osi y (pionowej) jest „Liczba porów” a powinno być np. „Liczba mikrosfer” lub „Liczba ziaren”.
- 7) Str. 83 - Doktorant słusznie zauważa, że rozkład uziarnienia mikrosfer prezentowany na wykresie Rys. 78 jest nie poprawny ponieważ w trakcie przygotowania próbek nastąpiło wydmuchiwanie większych ziaren co spowodowało, iż największą liczebność reprezentowały ziarna o średnicy 12 μm . Moim



zdaniem z wykresu wynika raczej, że największą liczebności ziaren rejestrowano przy średnicy raczej powyżej 20 μm . Skupiając się jednak na fakcie niereprezentatywności próbki z przyklejonymi ziarnami mikrosfer, Doktorant dokonuje zmiany metodyki tym razem stosując tomograf komputerowy. Uzyskuje odmienne, bardziej wiarygodne rezultaty jednak sposób przygotowania próbki również obejmuje zabieg przedmuchiwanie, który przez Doktoranta był wskazany jako powód uzyskania poprzednio niewiarygodnych wyników. Mam zatem wątpliwości co faktycznie jest powodem rozbieżności rozkładów uziarnienia prezentowanych na Rys 78 i 79.

- 8) Str. 86, Rys. 82 – brak wyjaśnienia oznaczeń HK1, HK15 i HK2. W tekście poprzedzającym Rys. 82 są oznaczenia Z1, Z2 i Z3, które prawdopodobnie są powiązane.
- 9) Str. 86, Rys. 83, 85 i 87 – to logarytmo-normalne rozkłady długości cięciw lub wielkości porów, uśrednione powstałe z uśrednionych zbiorów pochodzących z zapraw o różnym składzie. W pierwszej chwili czytelnik skoncentrowany na problemach materiałowych ma wrażenie, że takie grupowanie jest raczej niepoprawne. Jednak, jeśli skupimy się bardziej na metodyce pomiaru a nie na zjawiskach zachodzących w materiale to wówczas postępowanie Doktoranta wydaje się słuszne. Mam jednak wątpliwość czy dobrym wyborem jest opisywanie wykresów w zależności od metody pozyskiwania rezultatów raz jako rozkład długości cięciw a raz jako rozkład wielkości porów.
- 10) Na Rys. 79, 80, 85, 87, 92 i 94 występują punkty pomiarowe które otoczone są dodatkowym okręgiem. Czy to punkty które odrzucano w analizie?
- 11) Str. 89 – Autor pisze „Bez względu na wykorzystaną metodę pomiarową i obliczeniową nie udało się wyznaczyć rozkładu porów powietrznych na podstawie rozkładu mikrosfery”. Przyjęcie, że będzie możliwe wyznaczenie rozkładu porów w zaprawie na podstawie rozkładu uziarnienia jednego ze składników zaprawy jest moim zdaniem raczej złudne. Należy pamiętać, iż w zaprawie oprócz porów pochodzących z mikrosfer jest jeszcze dużo porów innego pochodzenia.
- 12) Str. 89 - Autor pisze „W przypadku określenia rozkładu porów w zaprawach cementowych uzyskano bardzo podobne rozkłady metodą powierzchniową i przy pomocy tomografu”. Na jakiej podstawie Autor to podobieństwo ocenia, jeśli na Rys. 88 nie jest to widoczne. Być może Doktorant dokonuje oceny w odniesieniu do innych parametrów, o których nie wspomniał.
- 13) Str. 90 – Autor pisze „Jedynie rozkład opracowany metodą normową był stosunkowo podobny.” Brakuje wyjaśnienia do czego podobny.
- 14) W tabelach, w tekście rozprawy oraz na niektórych rysunkach Autor stosuje separator dziesiętny jako kropkę. Powinien być przecinek.
- 15) Str. 91 – ocena zgodności wyników obliczeń uzyskanych dwoma metodami. Moim zdaniem Autor z dużą śmiałością dopuszcza się uogólnień. Stwierdza, że poszczególne parametry mają większą lub mniejszą



zgodność a następnie bez podania konkretnych kryteriów ocenia zaobserwowane zróżnicowanie jako dobrą zgodność.

- 16) W tekście pracy sporadycznie występują błędy edytorskie np. str. 2 spis treści, „Wstęp” to pkt 1.1 a nie 1, „Układ pracy” to pkt 1.2 a nie 1.1. itp.

Poniżej przedstawiam również kilka uwag o charakterze bardzo ogólnym:

- 1) Analizy wyników oraz dyskusje nad zaobserwowanymi zjawiskami są zwarte i merytorycznie poprawne, jednak czytelnik ma czasem wrażenie zbyt dużej ogólności i pewnego odczucia nieomówienia wszystkich szczegółów. Prawdopodobnie to świadomy wybór Doktoranta w dążeniu do prezentowania w treści dysertacji zwartych i merytorycznie udokumentowanych opisów oraz analiz.
- 2) W etapie pierwszych zakres badanych struktur dotyczył aż 292 betonów stosowanych do nawierzchni dróg. Oczywiście zdając sobie sprawę z faktu, iż Doktorant skupiał się w swych badaniach i analizach na metodyce oceny parametrów struktury porów powietrznych to jednak cennym uzupełnieniem tej części pracy byłaby, choćby bardzo ogólna informacja o składach i właściwościach analizowanych 292 betonów.
- 3) Bardzo wysoko oceniam prace Doktoranta związane z generowaniem obrazów cyfrowych. Dowodzi to, iż Doktorant posługuje się doskonale warsztatem matematycznym na poziomie ponad przeciętnym, jaki charakteryzuje badaczy w tej dyscyplinie naukowej.
- 4) W treści pracy brak jest objaśnienia symboli, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz spisu tabel i rysunków. Wprowadzenie te elementy nie są niezbędne to jednak często stanowią wartościowe uzupełnienie dysertacji.
- 5) Wypracowane przez Doktoranta rezultaty badań własnych wraz z przeprowadzoną analizą mają dużą wartość praktyczną i mogą być podstawą do formułowania wytycznych dotyczących oceny parametrów rozkładu porów powietrznych ocenianych metodą powierzchniową 2D.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Podjęta w rozprawie doktorskiej Pana mgr inż. Henryka Kowalczyka tematyka, jest bardzo aktualna i ważna z punktu widzenia zapewnienia oczekiwanej trwałości betonów konstrukcyjnych. Autor rozprawy wniósł istotny wkład nowej wiedzy dotyczącej oceny parametrów struktury porów powietrznych w betonie z wykorzystaniem analizy obrazu 2D w odniesieniu do aktualnego stanu techniki. Doktorant dobrze przeprowadził przegląd literatury, sformułował cele badawcze i zaproponował stosowny program badań własnych. Zrealizował obszerny zakres własnych badań i analiz, które stanowiły podstawę sformułowania licznych wniosków.

W moim przekonaniu Autor wykazał się obszerną znajomością stanu wiedzy dotyczącej tematyki rozprawy oraz potwierdził, iż posiada dobrą umiejętność planowania badań doświadczalnych, ich realizacji, ale przede wszystkim opracowania szczegółowej analizy uzyskanych rezultatów. Ponadto potrafi formułować trafne



wnioski, wynikające z analizy wyników. Dowodzi to o dobrym przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia w przyszłości rozbudowanych prac badawczych.

Biorąc pod uwagę wszystko co wyżej, przedłożoną rozprawę oceniam **pozytywnie w całości spełniającą wymagania** Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. poz. 1669), art. 14 ust. 1 pkt 1, ust 2 pkt 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.), w związku z czym wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

dr hab. inż. Tomasz Tracz
prof. Politechniki Krakowskiej

Recenzje wykonana zgodnie z wymogami

DYREKTOR NAUKOWY DISCYPLINY
Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

prof. dr hab. inż. Jerzy Wawrzeńczyk