



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ
I ŚRODOWISKA

Katedra Konstrukcji Inżynierskich
dr hab. inż. Maciej Niedostatkiewicz, prof. PG

I.dz. 04/05/2023/KKI



POLITECHNIKA BYDGOSKA
im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

Wpłynęło..... 8 05 2023
Numer WBAiŚ.....
Referent/symbol.....

04.05.2023r.

Recenzja rozprawy doktorskiej pt.

**Predykcja wybranych cech betonu o niskim stosunku wodno-spoiwowym
z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych**

autorstwa **mgr inż. Agnieszki Grzybowskiej**

wykonanej na Wydziale Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Bydgoskiej
im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich
w dyscyplinie „Inżynieria lądowa, geodezja i transport”

1. Podstawa opracowania

Podstawą sporządzenia recenzji jest pismo Przewodniczącej Rady Naukowej Dyscypliny „Inżynieria lądowa, geodezja i transport” dr inż. Justyny Sobczak – Piątki z dnia 31 marca 2023r. i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr inż. Agnieszki Grzybowskiej pt. „Predykcja wybranych cech betonu o niskim stosunku wodno-spoiwowym z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych” wykonana pod kierunkiem Prof. dr hab. inż. Adama Podhoreckiego jako Promotora i dr inż. Łukasza Mrozika jako Promotora Pomocniczego.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy bardzo aktualnej współcześnie tematyki stosowania w budownictwie mieszanek betonowych które projektowane są z zastosowaniem niskiego stosunku wodno-spoiwowego. Praca jest napisana w języku polskim. Dysertacja ma postać wydawnictwa zwarteo, charakterystycznego w zakresie szaty graficznej dla rozpraw doktorskich przygotowanych na Politechnice Bydgoskiej. Rozprawa doktorska liczy 202 numerowane strony formatu B5 i składa się z 8 Rozdziałów:

- (1) Wstęp,
- (2) Wybrane informacje z zakresu betonów o niskim stosunku wodno-spoiwowym,
- (3) Istota sieci neuronowych zwłaszcza w zastosowaniu do projektowania mieszanek betonowych,
- (4) Przedmiot, cel, tezy badawcze i zakres pracy,
- (5) Badania laboratoryjne mieszanek betonowych,
- (6) Trenowanie sieci neuronowych do predykcji wytrzymałości betonu,
- (7) Predykcja wytrzymałości betonu z użyciem sieci neuronowych wraz z walidacją,
- (8) Zakończenie.

W pracy znajduje się ponadto *Spis literatury*, *Spis rysunków*, *Spis tabel*, *Streszczenie* (w języku polskim i w języku angielskim) oraz *Spis załączników*.

POLITECHNIKA GDANSKA
WILIS Katedra Konstrukcji Inżynierskich
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

Kierownik Regionalnego Laboratorium Budownictwa
Kierownik Zespołu Diagnostyki i Monitoringu Obiektów Budowlanych
tel. +48 58 347-22-31
e-mail: maciej.niedostatkiewicz@wilis.pg.gda.pl
www.wilis.pg.edu.pl

Sekretariat Katedry
tel. +48 58 347-10-57
e-mail: malgorzata.zaborska@wilis.pg.gda.pl

Niedostatkiewicz

Bibliografia obejmuje sporo, bo 303 pozycje literatury. Na uwagę zasługuje fakt, że znaczna część pozycji literaturowych wykorzystanych jako literatura przedmiotu to publikacje zagraniczne pochodzące z ostatniego okresu. Spis rysunków i tabel odnosi się do elementów które powstały w trakcie przygotowywania przez Autorkę dysertacji doktorskiej. Załączniki nie są dołączone do prac w formie drukowanej, znajdują się na nośniku CD stanowiącym załącznik do recenzowanej rozprawy.

W pracy brak jest spisu oznaczeń stosowanych w rozprawie doktorskiej, jak również brak jest spisu publikacji Autorki.

Wymienione powyżej braki nie wpływają w jakikolwiek sposób na wartość naukową recenzowanej rozprawy doktorskiej.

3. Treść rozprawy

Rozdział 1 (*Wstęp*) stanowi wprowadzenie w tematykę związaną z projektowaniem mieszanek betonowych charakteryzujących się niskim stosunkiem wodno-spoiwowym. W Rozdziale 1 opisano znacznie betonu w budownictwie i jego udział w realizacji konstrukcji inżynierskich. Wskazano na współczesne trendy w projektowaniu mieszanek betonowych oraz omówiono różnice pomiędzy pojęciem betonu wysokiej wytrzymałości oraz betonu wysokowartościowego, scharakteryzowano cechy współczesnego betonu wysokowartościowego do których dążenie jest możliwe w przypadku stosowania mieszanek betonowych charakteryzujących się niskim stosunkiem wodno-spoiwowym.

W Rozdziale 2 (*Wybrane informacje z zakresu betonów o niskim stosunku wodno-spoiwowym*) przedstawiono w sposób bardzo syntetyczny i bardzo przejrzysty zbiór podstawowych informacji odnoszących się do mieszanek o niskim stosunku wodno-spoiwowym. Wskazano, że wytrzymałość na ściskanie jest zazwyczaj informacją (parametrem) wiodącą przy projektowaniu mieszanek betonowych, aczkolwiek zwrócono uwagę, że bardzo istotne jest uwzględnianie innych właściwości, takich jak: mrozoodporność, nasiąkliwość, moduł sprężystości, ścieralność oraz odporność na agresję chemiczną. Sytuacja ta jest szczególnie istotna w przypadku betonów wysokowartościowych (BWW) stanowiących przedmiot rozprawy doktorskiej. W Rozdziale 2 zamieszczono również bardzo szczegółową analizę celowości stosowania betonów wysokowartościowych (BWW) przeprowadzoną pod kątem technologicznym, jak również z uwzględnieniem aspektu ekonomicznego. Rozdział 2 zawiera również bardzo szczegółową analizę wpływu właściwości materiałowych i technologicznych na charakterystykę mieszanek betonowych, w szczególności mieszanek stanowiących podstawę do tworzenia betonów wysokowartościowych (BWW).

Rozdział 3 (*Istota sieci neuronowych zwłaszcza w zastosowaniu do projektowania mieszanek betonowych*) obejmuje oprócz bardzo obszernego przeglądu literatury odnoszącej się do zagadnienia sztucznych sieci neuronowych i ich zastosowania w projektowaniu mieszanek betonowych omawia zastosowanie sztucznej inteligencji, uczenia maszynowego oraz głębokiego uczenia w procesie automatyzacji i uproszczenia projektowania mieszanek betonowych.

W Rozdziale 4 (*Przedmiot, cel, tezy badawcze i zakres pracy*) przedstawiono w sposób bardzo scalony i skondensowany cel i zakres opracowanej rozprawy doktorskiej. W Rozdziale 4 sformułowana została teza naukowa, której udowodnieniu poświęcone są kolejne Rozdziały.

Rozdział 5 (*Badania laboratoryjne mieszanek betonowych*) zawiera zbiorcze zestawienie wyników badań laboratoryjnych. W Rozdziale 5 scharakteryzowano zastosowane w doświadczeniach cementy i domieszki, opisano zasady wykonanych badań i testów oraz przywołano normy które stanowiły podstawę ich wykonania. Główną zawartość Rozdziału 5 stanowią wyniki badania wytrzymałości na ściskanie uzyskane dla populacji próbek wykonanych z betonów o zróżnicowanych właściwościach.

W Rozdziale 6 (*Trenowanie sieci neuronowych do predykcji wytrzymałości betonu*) opisano w sposób bardzo precyzyjny sposób uczenia (trenowania) sztucznej sieci neuronowej w oparciu o wyniki badań laboratoryjnych.

Rozdział 7 (*Predykcja wytrzymałości betonu z użyciem sieci neuronowych wraz z walidacją*) jest zwieńczeniem rozprawy doktorskiej gdyż zawiera opis narzędzia, którego stworzenie było głównym celem recenzowanej rozprawy doktorskiej oraz wyniki jego zastosowania w celu oszacowania wytrzymałości na ściskanie betonu.

W Rozdziale 8 (*Zakończenie*) przedstawiono w sposób syntetyczny wyniki badań własnych przeprowadzonych w skali laboratoryjnej oraz wyniki analiz teoretycznych. Zamieszczono też wyniki praktycznej aplikacji narzędzia umożliwiającego predykcję wytrzymałości na ściskanie.

Rozprawa zakończona jest wykazem literatury zawierającym pozycje zarówno krajowe, jak również zagraniczne. Zasadniczo uwzględniono pozycje literatury naukowej oraz naukowo-technicznej odzwierciedlające współczesny poziom wiedzy w zakresie tematyki stanowiącej przedmiot rozprawy doktorskiej. Pracę uzupełnia spis ilustracji oraz spis zamieszczonych w rozprawie doktorskiej tabel.

4. Ocena rozprawy

Problemem naukowym, będącym celem pracy było opracowanie i wdrożenie na etapie prac rozpoznawczych efektywnej, niskonakładowej i jednocześnie dokładnej metody projektowania, określanego współcześnie jako predykcja, betonu o niskim stosunku wodno-spoiwowym przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych (SSN).

Autorka rozprawy doktorskiej zaproponowała własny (autorski) zakres badań laboratoryjnych, w oparciu o podstawowe badanie mechaniczne jakim jest badanie wytrzymałości na ściskanie, które to badanie stanowiło podstawę do stworzenia stosownej architektury sztucznej sieci neuronowej (SSN), a która to została w kolejnym kroku działania wytrenowana (nauczona) w oparciu o pozyskane dane, umożliwiające stworzenie pakietów danych wejściowych oraz wyjściowych,

Należy wyraźnie podkreślić, że dostępne źródła literaturowe nie podają w sposób jawny w jaki sposób należy tworzyć bazy danych dla uzyskania populacji umożliwiającej tworzeni zbiorów danych wejściowych i wyjściowych wykorzystywanych jako materiał do obliczeń (analiz) prowadzonych z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych (SSN) które zaliczyć można do elementów tzw. sztucznej inteligencji.

W tym miejscu należy zauważyć, że stworzenie przez Autorkę własnego programu badawczego w zakresie badań laboratoryjnych, pomimo że posiada on istotne ograniczenia, co zostanie wykazane w dalszej części recenzji, jest dużym osiągnięciem.

W ocenie Recenzenta podjęta w pracy tematyka jest aktualna i ważna z praktycznego punktu widzenia, a zakres pracy łączy badania doświadczalne i analizy teoretyczne.

W wyniku prowadzonych prac opracowano oryginalną metodykę pozwalającą na zbliżoną do wiarygodnej identyfikację składu mieszanki betonowej, a w konsekwencji umożliwiającą próbę sformułowania wniosków na temat efektywności projektowania składu mieszanek betonowych z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych (SSN). Jest to szczególnie ważne dlatego, że wnioski wynikające z przedmiotowej rozprawy doktorskiej mogą znaleźć częściowe odniesienie do realnych problemów inżynierskich z którymi spotykamy się we współczesnym budownictwie.

Recenzent ma jednak nieodparte wrażenie, że wyniki badań doświadczalnych przedstawione w pracy posiadają ograniczenia, a ponadto ich zakres ograniczony jest do elementów w skali laboratoryjnej.

Zakres, jaki obejmuje rozprawa doktorska związany jest z celem pracy i można go przedstawić w następujących punktach:

- dokonanie krytycznego przeglądu literaturowego w zakresie projektowania mieszanek betonowych, w szczególności betonów wysokowartościowych (BWW),
- próba usystematyzowania bazy wiedzy dotyczącej metod projektowania mieszanek betonowych, ze szczególnym uwzględnieniem przydatności tych metod w projektowaniu betonów wysokowartościowych (BWW),
- wykonanie badań laboratoryjnych,
- przeprowadzenie analiz teoretycznych w oparciu o mechanizm sieci neuronowych,
- podsumowanie wraz ze sformułowaniem wniosków naukowych i praktycznych oraz podanie kierunków dalszych badań mających na celu rozszerzenie i udoskonalenie wyników badań doświadczalnych oraz analiz teoretycznych.

W odczuciu Recenzenta za najważniejsze oryginalne elementy rozprawy można uznać:

- uporządkowany i bardzo szczegółowy przegląd literatury tematycznie związanej z przedmiotem rozprawy doktorskiej umożliwiający na wstępnym etapie czytania pracy wyrobienie sobie opinii o aktualnym poziomie wiedzy (informacji) odnośnie sposobów i możliwości projektowania mieszanek betonowych,
- próbę uporządkowania i autorskiego podziału istniejących metod projektowania mieszanek betonowych, z uwzględnieniem przydatności poszczególnych metod do projektowania betonów wysokowartościowych (BWW),
- wykonanie badań laboratoryjnych na podstawie rozbudowanego autorskiego programu badawczego, umożliwiających określenie wpływu parametrów zmiennych takich jak klasa i ilość cementu, rodzaj i ilość kruszywa, ilość wody, rodzaj i ilość plastyfikatora na gęstość pozorną, wodorzadność i czas wiązania zaczynów oraz wytrzymałość na ściskanie betonu,
- zbudowanie właściwej architektury sztucznej sieci neuronowej (SSN), która następnie została wytrenowana (nauczona) w oparciu o stworzone pakiety danych wejściowych oraz wyjściowych,
- sformułowanie treści i rozwiązanie 2 zadań naukowych w oparciu o przygotowaną sieć neuronową:
 - ❖ zadanie 1: zastosowanie sieci do istniejącej mieszanki betonowej, w celu predykcji wytrzymałości betonu na ściskanie,

- ❖ zadanie 2: uzyskanie teoretycznego składu mieszanki betonowej w zakresie ilościowym, na podstawie podanych danych wejściowych zdefiniowanych jako zbiór danych ilościowych oraz jakościowych.
- w oparciu o wytrenowaną sztuczną sieć neuronową (SSN) zaprojektowanie predykcji mieszanki betonowej umożliwiającej otrzymanie betonu o z góry założonej klasie wytrzymałości,
- weryfikacja doświadczalna sprawności zbudowanego modelu teoretycznego - na podstawie stworzonej drogą predykcji receptury wykonanie mieszanki betonowej i laboratoryjne określenie rzeczywistej wytrzymałości betonu,
- wprowadzenie bardzo czytelnego systemu edycyjnego w przygotowanej rozprawie doktorskiej: ryciny (rysunki) i tabele są ujednolicone pod względem graficznym, nawet jeżeli są one elementami przywołanymi jako pochodzące z innych (obcych) pozycji literaturowych.
- docelowa możliwość wykorzystania otrzymanych rezultatów badań i analiz jako podstawa do próby formułowania szczegółowych zaleceń w zakresie upowszechnienia stosowania sztucznych sieci neuronowych (SSN) do projektowania receptur mieszanek betonowych wykorzystywanych do realizacji elementów konstrukcyjnych z betonu wysokowartościowego (BWW).

5. Uwagi ogólne

Poniżej zamieszczono uwagi ogólne odnoszące się do całości opracowanej rozprawy doktorskiej.

- 5.1 Tytuł przedmiotowej rozprawy doktorskiej wydaje się być dyskusyjny. O ile nie wzbudza jakichkolwiek zastrzeżeń użycie w tytule słowa „predykcja”, to wątpliwości wzbudza użycie określenia „wybranych cech betonu”. Jak zostało to wykazane w dalszej części niniejszej recenzji projektowanie mieszanki betonowej z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych (SSN) stanowiące temat niniejszej recenzji odbywa się na podstawie jednoparametrycznej populacji danych obejmujących wytrzymałość na ściskanie. Tak więc projektowany beton, domyślnie rozumiany jako beton wysokowartościowy (BWW) kształtowany jest w zakresie receptury mieszanki betonowej jedynie przez pryzmat wytrzymałości na ściskanie, bez uwzględnienia innych właściwości mechanicznych oraz fizyczno-chemicznych, spośród których do najistotniejszych należą: mrozoodporność, nasiąkliwość, moduł sprężystości, ścieralność oraz trwałość rozumiana jako odporność na agresję chemiczną. Powyższe stwierdzenie pozostaje to w pełnej zbieżności z przedmiotem rozprawy doktorskiej który został przedstawiony przez Autorkę w Rozdziale 4 i określony jako predykcja wytrzymałości na ściskanie w odniesieniu do betonu charakteryzującego się niskim stosunkiem wodno-spoiwowym.
- 5.2 Przedmiot, cel, zakres, jak również teza naukowa pracy nie zostały sformułowane na samym początku rozprawy, co w początkowej fazie zapoznawania się z rozprawą utrudnia możliwość oceny zaproponowanego przez Autorkę programu badawczego.
- 5.3 Rozprawa nie posiada osobnego Rozdziału pt. *Przegląd literatury*, a bardzo szczegółowa analiza aktualnego poziomu wiedzy przeprowadzona została na początku każdego z Rozdziałów dotyczących odpowiednich etapów rozprawy, co skutkuje brakiem możliwości oceny zakresu tematyki rozprawy i zakresu zaproponowanych badań doświadczalnych i analiz teoretycznych przed przystąpieniem do szczegółowego zapoznania się z poszczególnymi Rozdziałami dysertacji zawierającymi wyniki wykonanych analiz.

- 5.4 Podsumowania znajdujące się pod koniec każdego z Rozdziałów są zbyt długie, co utrudnia ich porównanie z syntetycznymi wnioskami zamieszczonymi w podsumowaniu rozprawy doktorskiej.
- 5.5 Rozprawa nie posiada spisu użytych symboli, co zmniejsza czytelność pracy.
- 5.6 Dysertacja nie zawiera zestawienia publikacji Autorki, które powstały w okresie przygotowywania rozprawy doktorskiej, co uniemożliwia ocenę stopnia naukowej komercjalizacji uzyskanych podczas pracy nad doktoratem wyników.
- 5.7 W rozprawie doktorskiej, w jej początkowej części brak jest jednoznacznego rozróżnienia i wytłumaczenia jak jest różnica pomiędzy mieszanką betonowa a betonem – zamieszczenie takiego protego wytłumaczenia znacznie by polepszyło czytelność pracy i ułatwiło zapoznanie się z jej treścią osobom które nie są specjalistami z zakresu technologii betonu.
- 5.8 W zakresie badań laboratoryjnych bardzo zawężone zostały badania cech betonów wykorzystane w dalszej części rozprawy. W praktyce analiza zastosowania sztucznych sieci neuronowych (SSN) przeprowadzona została na podstawie bazy wyników odnoszących się tylko i wyłącznie do wytrzymałości na ściskanie uzyskanej z próbek laboratoryjnych. Pomimo dużej ilości analizowanych przypadków składów mieszanek betonowych w praktyce mamy do czynienia z jednoparametryczną charakterystyką mieszanki betonowej. Wysoce wskazane było by uwzględnienie istotnych z inżynierskiego punktu widzenia parametrów takich jak przywołane już wcześniej: mrozoodporność, nasiąkliwość, moduł sprężystości, ścieralność oraz odporność na agresję chemiczną.
- 5.9 Badania laboratoryjne dotyczące betonów zawierających w składzie superplastyfikator i mikrokrzemiokę zostały potraktowane w sposób zbyt uproszczony – ich mała ilość (dla wspomnianych przypadków) nie pozwala sformułować jednoznacznych wniosków. Uzyskane wyniki badań laboratoryjnych pokazały, że wytrzymałości betonu na ściskanie uzyskane dla ekstremalnie niskich stosunków wodno-spoiwowych są relatywnie niskie (~1 MPa). Wykonane dla tych przypadków próbki betonu kruszyły się (rozpadały) przy rozformowywaniu, a w ich strukturze widoczne były bryły (konglomeraty) cementu, które nie uległy procesowi hydratacji. Powyższa sytuacja powala na sformułowanie wniosku, że zastosowanie domieszki upłynniającej (superplastyfikatora) w ilości 3% okazało się niewystarczającym zabiegiem, a uzyskane betony na podstawie opracowanych receptur okazały się nieprzydatne z inżynierskiego punktu widzenia. Tym samym wysoce celowe byłoby więc uwzględnienie konieczności prowadzenia dalszych badań dla tego przypadku.
- 5.10 W zakresie analizy teoretycznej przeprowadzonej z zastosowaniem sztucznej sieci neuronowej (SSN) w rozprawie doktorskiej brak jest sprawdzenia rozwiązania zadania 2 algorytmem XGBoost, którym sprawdzano rozwiązanie zadania 1.

6. Uwagi szczegółowe

Poniżej zamieszczono uwagi szczegółowe odnoszące się do opracowanej rozprawy doktorskiej

- 6.1. strona 31: brak jest wyjaśnienia jakiego rodzaju skurczu dotyczy zamieszczony opis.
- 6.2. strony 90-117: brak informacji na temat zgodności ilości przebadanych próbek z wymogami normowymi,

- 6.3. strony 90-117: brak analizy czynników wpływających na uzyskane wartości wyników,
- 6.4. strona 167: przedstawiono weryfikację modelu na podstawie próbek betonu wykonanych tylko z jednego zarobu laboratoryjnym (3 próbki), co wydaje się zbyt ryzykownym i bardzo odważnym podejściem.
- 6.5. strony 167 -170: brak informacji dlaczego predykcja wytrzymałości naściskanej przperowadozna została tylko dla jednego przypadku betonu. jaka była przyczyna wybory modelowoanego betonu.
- 6.6. strony 171-175: wnioski mają charakter opisowy (beletrystyczny), a nie inżynierski. Utrudnia to sformułowanie własnych wątpliwości i zapytań po zapoznaniu się z treścią całości rozprawy doktorskiej.

7. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska świadczy o umiejętności samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemów naukowych przez jej Autorkę. Pomimo sformułowanych i przedstawionych powyżej uwag krytycznych oraz wątpliwości należy stwierdzić, że Autorka opiniowanej rozprawy doktorskiej przeprowadziła badania, zarówno doświadczalne, jak i teoretyczne, na odpowiednim poziomie merytorycznym. Zaproponowane autorski program badań laboratoryjnych i indywidualnie dopasowany program analizy teoretycznej, przeprowadzonej w oparciu o mechanizm sztucznych sieci neuronowych oraz uzyskane na ich podstawie wyniki wskazują jednoznacznie, że Autorka posiada potencjał naukowy który należy rozwijać.

W mojej ocenie Autorka rozprawy wykazała się dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w przedmiotowym zakresie oraz umiejętnością planowania i prowadzenia zarówno badań doświadczalnych, jak również prac teoretycznych. Uzyskane wyniki pracy świadczą o jej dobrym przygotowaniu do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych.

Recenzowana praca ze względu na poruszaną tematykę doskonale wpasowuje się w dyscyplinę „Inżynieria lądowa, geodezja i transport”.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam jednoznacznie, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z dnia 14 marca 2003 roku) i dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr inż. Agnieszki Grzybowskiej do publicznej obrony.

Jednocześnie uwzględniając treść recenzowanej rozprawy doktorskiej jako całości wnoszę o wyróżnienie opiniowanej pracy zgodnie z przyjętymi zasadami nagradzania prac naukowych obowiązującymi w Politechnice Bydgoskiej.

dr hab. inż. *Maciej Niedostatkiwicz*

prof. Politechniki Gdańskiej

