

Dr hab. inż. Violetta Sokoła-Szewioła, prof. PŚ
Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa
i Automatyki Przemysłowej
Politechnika Śląska

Gliwice, 31.07.2023 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej
Mgr inż. Dariusza Głabickiego
pt. "Displacement Forecasting in Mining
Areas using Satellite SAR Interferometry
and Machine Learning"**

Podstawy formalne recenzji

Recenzję poniższą opracowano na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej, dr. hab. inż. Roberta Króla, prof. uczelni (nr pisma: RDND08/67/2023), z dnia 23 maja 2023 roku powołującego się na uchwałę Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej z dnia 17. 05.2023 r. Promotorami recenzowanej rozprawy są dr hab. inż. Wojciech Milczarek, prof. PWr oraz dr. Milan Lazecky (University of Leeds, COMET).

Ocena doboru tematyki badawczej i przyjętego celu rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy bardzo ważnego zagadnienia związanego z ujemnym oddziaływaniem prowadzonej podziemnej eksploatacji górniczej na powierzchnię w postaci przemieszczeń i deformacji. Sposób występowania, przebieg oraz wartości tych wielkości zależą od wielu czynników między innymi budowy geologicznej, własności mechanicznych skał tworzących górotwór, sposobów wybierania i wypełniania pustki poeksploatacyjnej, głębokości eksploatacji, grubości wybieranego pokładu, stopnia naruszenia górotworu przez wcześniejsze eksploatacje. Dodatkowo na istotność podjętego w rozprawie zagadnienia wskazuje fakt, iż deformacje i przemieszczenia powierzchni mogą stanowić przyczynę uszkodzeń obiektów oraz infrastruktury technicznej powierzchni. Do badania przemieszczeń i deformacji najczęściej stosuje geodezyjne techniki pomiarowe zapewniające wysoką dokładność i niezawodność pomiarów. Z uwagi na fakt, iż pomiary takie realizowane są na pojedynczych tworzących linie obserwacyjne lub punktach rozproszonych, dla realizacji monitoringu wielkoobszarowego pomiary zmian wysokościowych powierzchni

terenu można wykonywać np. z wykorzystaniem satelitarnej interferometrii radarowej (Synthetic Aperture Radar Interferometry-InSAR).

Obecnie systemy radarowe są szeroko wykorzystywane do obrazowania powierzchni terenu z uwagi na istotny rozwój w zakresie obrazowania radarowego z orbit satelitarnych oraz istnienie operacyjnych systemów satelitarnych, obliczonych na wieloletnie funkcjonowanie programów obsługujących kolejne satelity. Należy zaznaczyć, iż dane te dostępne są obecnie w wysokiej rozdzielczości czasowej i przestrzennej. Technika InSAR została z powodzeniem wykorzystana w pomiarach przemieszczeń powierzchni na całym świecie. Wyniki obserwacji dostarczają informacji na temat kształtowania się wartości i przebiegu przemieszczeń i deformacji w czasie.

W celu zmniejszenia lub uniknięcia ujemnych skutków eksploatacji górniczej, opracowywane są prognozy deformacji powierzchni, które pozwalają wyznaczenie optymalnych rozwiązań eksploatacyjnych w konkretnych warunkach na podstawie wariantowych obliczeń skutków planowanej eksploatacji. Problematyka opisu ruchów górotworu na terenie górniczym posiada bardzo bogatą literaturę. W dotychczasowych rozwiązaniach przewidywane wielkości wybranych wskaźników deformacji wyznaczane są na podstawie formuł empirycznych lub też w oparciu pewien schemat dedukcyjny, oparty na przyjętych aksjomatach, również pochodzenia empirycznego (np. teorie geometryczno-całkowe opisujące proces deformacji terenu za pomocą wzorów całkowych). Inne rozwiązanie wykorzystują metody i modele ośrodków ciągłych. W takim ośrodku stan przemieszczeń i naprężeń określa układ równań różniczkowych równowagi oraz równania stanu, które zależne są od przyjętego modelu ośrodka. Do wyznaczania prognozowanych wartości przemieszczeń i deformacji wykorzystywana jest również teoria ośrodka stochastycznego, ujęta w formie układu równań różniczkowych typu parabolicznego, pozwalająca na rozwiązywanie różnego rodzaju zagadnień brzeżno-początkowych.

Biorąc pod uwagę powyższe oraz uznając że technika InSAR pozwala na pozyskanie znacznie większej ilości danych na temat ruchów powierzchni, niż w przypadku pomiarów realizowanych metodami geodezyjnymi oraz zaproponowane w rozprawie zastosowanie metod uczenia maszynowego do realizacji prognoz przemieszczeń pionowych terenu górniczego, należy ocenić pozytywnie zarówno dobór tematyki badawczej jak i przedstawionego celu rozprawy

Przekazana do recenzji rozprawa jest napisana w języku angielskim, liczy 194 strony, w tym 21 stron załączników. Zawiera 66 rysunków oraz 6 tabel w tym dwie w załącznikach. Rysunki są zasadniczo dobrej jakości. W dysertacji powołano się na 243 pozycje literatury, z czego w dwóch doktorant występuje jako współautor. Większość cytowanych publikacji to pozycje anglojęzyczne, 16 w języku polskim i 2 w języku niemieckim. Przeważają publikacje z ostatnich kilku lat, co wskazuje na bardzo dobre rozeznanie Doktoranta w zakresie tematyki

badan na świecie i w kraju. Układ pracy jest logiczny, czytelność nieco utrudnia umiejscowienie niektórych rysunków przed treścią, do której się odnoszą.

Rozprawa zawiera 9 rozdziałów obejmujących: wstęp, przedstawienie zagadnień dotyczących obniżeń terenu wskutek prowadzenia podziemnej eksploatacji górniczej oraz metod pomiaru i prognozowania obniżeń na terenach górniczych, przedstawienie podstaw teoretycznych interferometrii satelitarnej SAR oraz zastosowań metod SAR, teoretyczne informacje na temat uczenia maszynowego, głębokiego uczenia i ich zastosowania w prognozowaniu szeregów czasowych oraz wybrane dotychczas przeprowadzone badania z zastosowaniem uczenia maszynowego do przewidywania osiadania, charakterystykę obszaru objętego badaniami, opis zastosowanych metodologii szacowania przemieszczeń w badanym obszarze a następnie wybrane podejścia do tworzenia modeli i prognozowania szeregów czasowych wraz z opisem metod uczenia maszynowego i sieci neuronowych wykorzystanych w Rozprawie oraz miernikami dokładności prognoz, przedstawienie wyników i analizę pionowych przemieszczeń powierzchni terenu ustalonych z wykorzystaniem InSAR oraz wyników i analiz wykonanych prognoz przemieszczeń z wykorzystaniem wybranych algorytmów uczenia maszynowego. Ostatni rozdział zawiera krótkie podsumowanie, wnioski oraz spostrzeżenia. Pracę uzupełniają, streszczenie (w języku polskim i angielskim), podziękowania (w języku polskim i angielskim), informacje o źródle danych i finansowania (w języku polskim i angielskim), spis treści, spis rysunków, spis tabel i spis użytych w rozprawie skrótów oraz spis literatury.

Ocena wartości merytorycznej rozprawy

Podjęcie przez Doktoranta tematu o dużym w mojej ocenie, ciężarze utylitarnym określa oryginalność pracy, która przedstawia możliwość wykorzystania modeli uczenia maszynowego do prognozowania wartości przemieszczeń pionowych terenu górniczego z wykorzystaniem pomiarów przemieszczeń techniką satelitarnej interferometrii radarowej InSAR. Badania przeprowadzono na obszarze Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego.

Ocenę wartości merytorycznej rozprawy dokonano na podstawie szczegółowej analizy treści poszczególnych rozdziałów.

We wstępie (rozdział 1) Doktorant przedstawia krótko uzasadnienie podjęcia tematu badawczego stanowiącego przedmiot Rozprawy, wskazuje na istotność monitoringu oraz prognozowania deformacji powierzchni terenu wskutek prowadzonej eksploatacji górniczej oraz na zalety zastosowania pomiarów ruchów powierzchni terenu metodą satelitarnej interferometrii radarowej a następnie przedstawia propozycję zastosowania metod uczenia maszynowego do prognozowania przemieszczeń, z wykorzystaniem pomiarów InSAR. Uzasadnienie można przyjąć, z uwagi na fakt, iż realizowano dotychczas tylko nieliczne badania w zakresie przedmiotu Rozprawy. Na stronie 24 przedstawiono hipotezę badawczą

(tezę) dysertacji, w brzmieniu: „...models based on machine learning algorithms and measurement data from the InSAR method can be applied to effectively predict vertical ground surface displacement in areas affected by underground mining”, z której wynika, że prognozowanie stanowiące przedmiot Rozprawy będzie dotyczyło przemieszczeń pionowych. Może korzystniej w takiej sytuacji byłoby, gdyby tytuł rozprawy zawierał słowo „pionowe” tj. przyjąłby brzmienie: *Prognozowanie przemieszczeń pionowych na terenach górniczych z wykorzystaniem satelitarnej interferometrii SAR i uczenia maszynowego*. W dalszej części rozprawy Doktorant przedstawia jej cel, którym jak pisze jest zbadanie potencjału połączenia techniki InSAR z uczeniem maszynowym w prognozowaniu przemieszczeń górniczych. *Zachodzi zatem w tym miejscu pytanie: czy prognozami będą objęte także przemieszczenia poziome?* W dalszej części rozdziału określono zakres pracy, który wskazuje jednak na ograniczenie zakresu prognoz do przemieszczeń pionowych.

Rozdział 2, dotyczy zagadnień istotnych z punktu widzenia prognozowania deformacji powierzchni terenu wskutek prowadzonej podziemnej eksploatacji górniczej. Doktorant charakteryzuje nieckę obniżeniową, przedstawia podstawowe wskaźniki deformacji, metody pomiarów które pozwalają na wyznaczenie wartości deformacji oraz podział metod i teorii prognozowania deformacji, koncentrując się na prognozowaniu obniżeń. Wśród metod pomiaru wykorzystywanych do wyznaczenia wielkości deformacji wymienia tradycyjne metody geodezyjne z wykorzystaniem tachimetrów, niwelatorów, czy odbiorników GNSS, słusznie zaznaczając, że w tym przypadku otrzymujemy informację o kształtowaniu się zmian mierzonych wartości w pojedynczych punktach, natomiast inne rozwiązania jak np. wykorzystanie pomiarów InSAR, Lotniczego skaningu laserowego (ALS), czy fotogrametrii, dostarczają danych, dotyczących całych obszarów objętych wpływami eksploatacji górniczej, a ilość danych zależna jest od rozdzielczości przestrzennej pomiaru. *W tej części rozprawy pojawiło się kilka stwierdzeń, które można uznać za dyskusyjne (str. 30), jak np. "Traditional geodesic methods (leveling, tachymetry, and GNSS - Global Navigation Satellite System) are still the most commonly applied techniques for assessing ground deformations in mining areas". Czy metody geodezyjne można uznać za technikę? Również inne np., w których Doktorant stwierdza, że pomiary z wykorzystaniem techniki GNSS pozwalają na uzyskanie informacji o przemieszczeniu powierzchni tylko w miejscu, w którym zlokalizowany jest odbiornik GPS. Czy mamy rozumieć przez to, że pomiary GNSS należy wykonywać tylko z wykorzystaniem systemu GPS? Jaki wpływ na uzyskiwane dokładności wyznaczenia pozycji z wykorzystaniem innych systemów wchodzących w skład systemu GNSS.*

W rozdziale 3 przedstawiono bardzo szeroko teoretyczne podstawy interferometrii satelitarnej SAR (InSAR), jako metody teledetekcji, która jest skutecznym narzędziem do badania przemieszczeń powierzchni terenu. Wskazano na ograniczenia metody. Przedstawiono szereg podejść do przetwarzania danych InSAR, wykorzystujących parę obrazów SAR (DInSAR) lub szereg obrazów SAR (np. PSInSAR, SBIInSAR) do rozwiązywania szeregów czasowych

przemieszczeń. Wyczerpująco wyjaśniono geometryczne ograniczenia stosowania InSAR do pomiaru przemieszczeń powierzchni terenu. Doktorant skoncentrował się na problemie pomiaru przemieszczeń pionowych. Omówiono liczne podejścia do wyznaczania przemieszczeń pionowych z pomiarów InSAR. *Natomiast korzystniej byłoby, gdyby w rozdziale dotyczącym objaśnieniach dotyczących metod rozwiązywania przemieszczeń 3D wykorzystywać te same oznaczenia omawianych wielkości (str. 51 i 52).* W dalszej części rozdziału Doktorat przedstawia przegląd zastosowań techniki InSAR wraz z przykładami z różnych dziedzin, także tych, które nie mają istotnego związku z przedmiotem rozprawy. Tę część opracowania należy ocenić jednak wysoce pozytywnie.

W rozdziale 4 zawarto teoretyczne podstawy uczenia maszynowego oraz głębokiego uczenia. Doktorant przedstawia dostatecznie szeroko modele i algorytmy m.in. uczenia nadzorowanego, nienadzorowanego oraz uczenia ze wzmocnieniem, a także zagadnienia dotyczące wykorzystania sieci neuronowych w uczeniu głębokim. W dalszej części przedstawia tradycyjne podejścia do prognozowania szeregów czasowych oraz zagadnienie prognozowania szeregów czasowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego, w szczególności głębokich sieci neuronowych, w przypadku złożonych zbiorów danych. Rozdział kończy przedstawieniem wyników zrealizowanych badań z zastosowaniem uczenia maszynowego do przewidywania przemieszczeń terenu i łączenia uczenia maszynowego z interferometrią SAR. *Przedstawione treści uzasadniają przyjętą przez Doktoranta tematykę badawczą i wskazują na dostateczną wiedzę w zakresie problematyki rozdziału.*

W dalszej części Rozprawy (rozdział 5) przedstawiono obszar badań tj. Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy. Omówiono warunki geologiczne- górnicze w badanym obszarze oraz zagadnienia związane z wpływem prowadzonej eksploatacji na środowisko, w tym sejsmiczność indukowaną oraz przemieszczenia i deformacje terenu, które są w wybranych rejonach obszaru badań monitorowane metodami geodezyjnymi. *W rozdziale tym Doktorant stwierdza, iż aktywność sejsmiczna intensyfikuje proces osiadania. Czy według Doktoranta oznacza to, iż obserwowane są zwiększone okresowo wartości przemieszczeń po wystąpieniu zjawisk sejsmicznych, przy uzyskaniu wartości końcowej obniżenia odpowiadającej wpływom prowadzonej eksploatacji, czy też w rejonach tych obserwowane wartości końcowe obniżen wyższe z uwagi na występującą aktywność sejsmiczną.*

Rozdział 6 należy uznać za bardzo istotny z punktu widzenia realizacji celu pracy. Doktorant przedstawia opis zakresu i źródeł danych InSAR oraz metod wykorzystanych w Rozprawie w celu uzyskania szeregów czasowych przemieszczeń terenu w obszarze objętym badaniami. Przedstawiono przejrzyście zakres prac prowadzących do utworzenia interferogramów z wykorzystaniem techniki DInSAR, co stanowiło podstawę do dalszych analiz z wykorzystaniem szeregów czasowych. Przedstawiono procedurę prowadzącą do szacowania wartości przemieszczeń z wykorzystaniem szeregów czasowych interferogramów metodami

Persistent Scatterer (PS) i Small Baseline (SB). *Ważne, iż Doktorant przedstawił ograniczenia towarzyszące zastosowaniu InSAR w górnictwie.*

W rozdziale 7 przedstawiono metody przetwarzania danych i techniki prognozowania, które zastosowano w Rozprawie. Doktorant słusznie zaznacza, że szeregi czasowe przemieszczeń pionowych na badanym obszarze mają różną charakterystykę oraz ustala wymagania dla modelu prognozowania przemieszczeń, który powinien uwzględniać wielkość przemieszczeń oraz prognozować zarówno wyższe, jak i niższe wartości przemieszczeń w punktach w obrębie niecek osiadania. Proces przygotowania danych oraz przyjęty sposób uzupełnienia brakujących danych z wykorzystaniem zwykłej interpolacji liniowej można uznać za prawidłowy. Również sposób podziału danych na dane treningowe i dane testowe nie budzi zastrzeżeń, biorąc pod uwagę cel rozprawy. W rozdziale tym przedstawiono wykorzystane w badaniach algorytmy i modele prognozowania przemieszczeń pionowych, obejmujące różne strategie. Zaprezentowano metody statystyczne i uczenia maszynowego zastosowane w pracy, przy czym dla każdej metody ustalono liczbę kroków wejściowych, natomiast kroków wyjściowych przyjęto taką samą dla każdej z metod, co należy uznać za uzasadnione, w celu porównania wyników. W rozdziale zawarto również zastosowane mierniki dokładności prognoz, które wykorzystano do oceny dokładności prognoz. *Wzór 7.3. wymaga jednak modyfikacji, dotyczy on średniego bezwzględnego błędu procentowego, a ze wzoru to nie wynika. Wymaga wyjaśnienia zakres prognozowania, w tradycyjnych metodach prognozowania, co przedstawiono w rozdziale 2 Doktorat przedstawia prognozowanie obniżień. Warto byłoby zaznaczyć, skąd wynika zakres prognoz, dotyczący przemieszczeń pionowych.*

W następnym rozdziale (rozdział 8) przedstawiono najważniejsze, dla oceny realizacji celów Rozprawy i udowodnienia tezy przyjętej w rozprawie rezultaty. Doktorant prezentuje wyznaczone wartości przemieszczeń z wykorzystaniem szeregów czasowych InSAR na metodami SB i PS. *Pewną niejasność budzi objęcie badaniami także obszaru oznaczonego na rysunkach 8.1 oraz 8.2 jako d , w odniesieniu do obszarów badań wskazanych na rysunku 7.1. W obszarze d , jak Doktorant pisze nie ma danych wynikających z pomiarów naziemnych. Wybór zatem tego obszaru do analiz nie jest dostatecznie jasny.* Jednocześnie w dalszej części Rozprawy Doktorant przedstawia wyniki przetwarzania danych InSAR metodą SB, w zakresie obszarowym określonym na rysunku 7.1. *Dodatkowo niekonsekwencja w numeracji obszarów na rysunku 8.9 (PSInSAR (a-b, c-d?)) utrudnia czytelność rozprawy.* Ważny wniosek wynikający z tej części Rozprawy dotyczy wyników analiz przebiegu przemieszczeń obserwowanych przez dwie niezależne ścieżki akwizycji wznoszącą i opadającą, wskazujący na konieczność uwzględnienia obu z nich w celu prawidłowej interpretacji zakresów przemieszczeń pionowych oraz konieczność uwzględnienia skumulowanych wartości przemieszczeń w okresie badania. Istotny element badań stanowi także wynik analiz porównawczych pionowych przemieszczeń uzyskanych z wykorzystaniem metod SB i PS. Pomiary teledetekcyjne przemieszczeń powierzchni terenu zostały zweryfikowane

z wykorzystaniem wyników niwelacji terenowej i danych górniczych. Stwierdzono niedoszacowanie skumulowanych przemieszczeń metodą PS oraz SB przy czym różnice w niedoszacowaniu wartości przemieszczeń metodą SB są niższe. Dalsze badania Doktorant realizował z wykorzystaniem wyników uzyskanych z wykorzystaniem metody SB. Szczegółowe przyczyny zostały jasno przedstawione i można je uznać za uzasadnione. Autor zaprezentował szczegółowe analizy pomiarów przemieszczeń pionowych powierzchni metodą SB z wartościami przemieszczeń zmierzonymi metodą niwelacji w punktach niwelacyjnych oraz danymi na temat eksploatacji w rejonie badań. *W tych analizach uwzględniono czasoprzestrzenny rozwój eksploatacji, natomiast wartości obserwowanych przemieszczeń zależą od szeregu czynników, między innymi od grubości wybieranego złoża, stąd też interpretacja wyników może nie być do końca wiarygodną.* W dalszej części rozprawy przedstawiono szczegółowo analizę możliwości wykorzystania algorytmów uczenia maszynowego do prognozowania przemieszczeń pionowych powierzchni w wybranych rejonach, w oparciu o wyniki pomiarów uzyskane metodą SBInSAR. Jest to z punktu udowodnienia tezy określonej w rozprawie najważniejsza część. Analizę oparto na wynikach prognozowania szeregów czasowych, wykorzystujących wyniki pomiarów przemieszczeń powierzchni terenu uzyskane metodą SBInSAR. Przedstawiona analiza dokładności w odniesieniu do modelu bazowego przyjętego w rozprawie wykazała, iż możliwe jest wykorzystanie modeli opartych na algorytmach uczenia maszynowego i danych pomiarowych InSAR do prognozowania przemieszczeń pionowych wywołanych eksploatacją górniczą. Powyższe udowadnia tezę sformułowaną w Rozprawie. *Natomiast interesująca byłaby również weryfikacja uzyskanych wyników w oparciu o pomiary metodami geodezyjnymi oraz porównanie uzyskanych prognoz z prognozami opracowanymi metodami opisanymi w rozdziale 2, np. z wykorzystaniem teorii geometryczno-całkowych.*

W ostatnim rozdziale Doktorant zawarł ogólne podsumowanie, wnioski i spostrzeżenia wynikające z prezentowanych wyników badań oraz istotne zastosowanych rozwiązań. Istotne jest, że wykazał się przy tym głęboką znajomością zagadnień stanowiących przedmiot rozprawy, wskazując na kierunki dalszych badań, dotyczących przedmiotu pracy.

Przedstawione w powyższej części recenzji uwagi krytyczne nie zmieniają pozytywnej oceny rozprawy.

Podczas lektury rozprawy stwierdzono pewne błędy, które uznano za błędy o charakterze edycyjnym, utrudniające jednak czytelność Rozprawy np. umiejscowienie rysunków w sekcjach, które nie zawierają w swej treści odniesienia do rysunków, np. rys.4.1., 5.1., 7.2., 7.4.

Ocena końcowa

Na podstawie przedstawionej do recenzji Rozprawy stwierdzam, iż tezę pracy udowodniono i założony cel pracy zrealizowano. Doktorant udowodnił, że możliwe jest wykorzystanie modeli opartych na algorytmach uczenia maszynowego i danych pomiarowych InSAR do prognozowania przemieszczeń pionowych wywołanych eksploatacją górnictw. Rozprawa dotyczy dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka i stanowi oryginalne rozwiązanie przez Doktoranta problemu naukowego, z możliwością zastosowania praktycznego wskazanych rozwiązań do prognozowania przemieszczeń pionowych terenu górnictw wskutek prowadzonej eksploatacji górnictw, jako metody alternatywnej do obecnie stosowanych rozwiązań. Doktorant zrealizował szeroki program badań, wykazał się umiejętnością prowadzenia analiz naukowych z wykorzystaniem potężnych narzędzi badawczych jakim są metody uczenia maszynowego i pomiarów InSAR do prognozowania przemieszczeń terenu górnictw a także krytycznym podejściem do uzyskanych wyników, co świadczy o jego bardzo dobrym przygotowaniu do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w tej dyscyplinie.

Wniosek końcowy

W konkluzji wyrażam opinię, że recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Dariusza Głębickiego pt. **” Displacement Forecasting in Mining Areas using Satellite SAR Interferometry and Machine Learning”** ma charakter poznawczy i użyteczny, stanowi kompleksowe i oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oraz oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych Doktoranta w sferze gospodarczej, co potwierdza, że Doktorant posiada pełne umiejętności samodzielnego wykonywania pracy naukowej. Stwierdzam, że rozprawa ta spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r., poz. 574 z późn. zmianami) i wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

