Dr hab. inż. Edyta Brzychczy, prof. uczelni
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Kraków, 31.03.2026

Recenzja
pracy doktorskiej mgr inż. Parthkumara Anilbhai Parmara
pt. "AI based modeling method for predicting failure related parameters in conveyor belts at mines"

Podstawa opracowania recenzji: uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej z dnia 21 stycznia 2026 roku oraz pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej prof. dra hab. inż. Roberta Króla z dnia 29 stycznia 2026 roku zlecające wykonanie przedmiotowej recenzji.

1. Tematyka pracy

Przedłożona do recenzji praca doktorska koncentruje się na zagadnieniach związanych z diagnostyką oraz predykcyjnym utrzymaniem ruchu przenośników taśmowych wykorzystywanych w górnictwie odkrywkowym. Praca wpisuje się w aktualne trendy rozwoju przemysłu wydobywczego związane z wdrażaniem rozwiązań Przemysłu 4.0 w obszarze transportu technologicznego (w tym cyfryzacją procesów) oraz rozwojem systemów monitoringu stanu technicznego parku maszynowego.

Pierwszym obszarem badawczym podjętym w rozprawie jest analiza funkcjonowania przenośników taśmowych jako podstawowych elementów systemów ciągłego transportu w górnictwie odkrywkowym oraz przyczyn powstawania ich uszkodzeń. W pracy przedstawiono budowę i zasadę działania tych systemów, a także wskazano przykłady mechanizmów zużycia i degradacji taśm przenośnikowych, ze szczególnym uwzględnieniem czynników prowadzących do ich wystąpienia w warunkach eksploatacyjnych.

Drugim obszarem tematycznym pracy są metody uczenia maszynowego, a w szczególności sztuczne sieci neuronowe typu Long Short-Term Memory (LSTM). W pracy przedstawiono podstawy teoretyczne tych modeli oraz dokonano przeglądu ich zastosowań w predykcyjnym utrzymaniu ruchu systemów transportowych, wskazując na ich

potencjalne zalety w kontekście analizy danych o dynamicznym charakterze i występujących między nimi zależności nieliniowych.

Doktorant, łącząc te dwa wyróżnione obszary w rozprawie, podjął się opracowania metody opartej na sieciach neuronowych typu LSTM do predykcji parametrów uszkodzeń przenośników taśmowych w kopalniach odkrywkowych.

Praca ma charakter interdyscyplinarny, łącząc zagadnienia z zakresu górnictwa, diagnostyki maszyn, analizy danych oraz sztucznej inteligencji. Podjęta tematyka jest aktualna i ważna zarówno z punktu widzenia badań naukowych, jak i praktycznych zastosowań przemysłowych, szczególnie w kontekście zwiększania niezawodności systemów transportowych w górnictwie oraz konieczności optymalizacji kosztów utrzymania ruchu w przedsiębiorstwach górniczych.

Stwierdzam, że podjęty przez Doktoranta temat rozprawy jest aktualny i ważny, nie tylko z badawczego, ale i z praktycznego punktu widzenia.

2. Syntetyczna charakterystyka pracy

Tekst rozprawy obejmuje 152 strony wraz ze spisem bibliografii. Bibliografia obejmuje 287 źródeł literaturowych (z zastrzeżeniem uwag co do występujących w niej powtórzeń).

Recenzowana praca, w mojej ocenie, składa się z dwóch zasadniczych części:

1. Część pierwsza dotyczy zagadnień teoretycznych i zawiera się we wprowadzeniu oraz rozdziałach 1÷3 (strony 1 - 55) oraz rozdziale 5 (strony 85 – 97).
2. Część druga posiada charakter praktyczny (aplikacyjny) i zawarta jest w rozdziałach 4 i 6 (odpowiednio strony 56 – 84 oraz 98– 124) wraz wnioskami końcowymi zawartymi w rozdziale 7 (strony 125 - 128).

W rozdziale pierwszym rozprawy przedstawiono wprowadzenie do problematyki przenośników taśmowych wykorzystywanych w górnictwie odkrywkowym, obejmujące ich rolę w systemach ciągłego transportu materiałów, budowę oraz zasadę działania. Zaprezentowano przegląd literatury dotyczącej zużycia i degradacji przenośników taśmowych, ze szczególnym uwzględnieniem czynników wpływających na ich uszkodzenia w przemyśle wydobywczym. Na podstawie analizy literaturowej zaproponowano diagram Ishikawy jako narzędzie identyfikacji i klasyfikacji głównych grup parametrów oddziałujących na proces degradacji taśm przenośnikowych.

W rozdziale drugim przedstawiono podstawy teoretyczne uczenia maszynowego,

ze szczególnym uwzględnieniem sztucznych sieci neuronowych typu Long Short-Term Memory (LSTM). Omówiono ich właściwości oraz możliwości ich zastosowania w prognozowaniu uszkodzeń elementów systemów transportowych. W rozdziale zamieszczono również przegląd wykorzystania różnego typu sieci neuronowych oraz wybranych metod uczenia maszynowego dla zadań predykcyjnego utrzymania ruchu.

Rozdział trzeci zawiera sformułowanie celów pracy oraz określenie zakresu rozprawy. Zaprezentowano w nim również szczegółową metodykę badań, obejmującą kolejne etapy realizacji pracy badawczej wraz ze schematem procesu badawczego.

W rozdziale czwartym zaprezentowano wyniki badań opartych na danych dotyczących uszkodzeń taśm przenośnikowych pozyskanych z odkrywkowej kopalni węgla brunatnego. Przedstawiono charakterystykę zbioru danych pochodzących z inspekcji wizualnych stanu taśm oraz zbudowane na jego podstawie modele predykcyjne oparte na sieciach LSTM. Dokonano również oceny jakości uzyskanych prognoz przyszłych rozmiarów uszkodzeń.

Rozdział piąty dotyczy omówienia magnetycznego systemu diagnostycznego DiagBelt+, przeznaczonego do monitorowania stanu technicznego taśm przenośnikowych. Przedstawiono zasadę działania tego systemu oraz jego funkcjonalności. Zaprezentowano również przegląd literatury w zakresie diagnostyki taśm przenośnikowych oraz wskazano na znaczenie zaawansowanych systemów pomiarowych w poprawie jakości danych wykorzystywanych w analizach predykcyjnych.

W rozdziale szóstym przedstawiono wyniki modelowania predykcyjnego opartego na danych pochodzących z systemu DiagBelt+ z kopalni wapienia. Zaprezentowano strukturę i charakterystykę zbioru danych, w tym zmienne istotne z punktu widzenia prognozowania rozmiarów uszkodzeń. Przedstawiono prognozy stanu przenośnika w 60-tym i 72-gim miesiącu oraz przeprowadzono analizę porównawczą wyników uzyskanych z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych i metod regresyjnych.

Rozprawę zakończono podsumowaniem, w którym zestawiono najważniejsze wyniki badań oraz dokonano porównania rezultatów prognoz uzyskanych na podstawie danych z inspekcji wizualnych oraz danych pochodzących z systemu DiagBelt+. Wskazano także praktyczne możliwości wykorzystania opracowanej metody oraz kierunki dalszych badań.

Cele i hipotezy badawcze postawione w rozprawie

Celem naukowym pracy było opracowanie metody opartej na sztucznej inteligencji (AI) w celu przewidywania parametrów związanych z awariami przenośników taśmowych, w tym wielkości uszkodzeń i wskaźników występowania, poprzez wykorzystanie charakterystyk

operacyjnych i historycznych zapisów dotyczących konserwacji uzyskanych ze środowisk górniczych („*to develop an artificial intelligence (AI)-based method for predicting parameters associated with conveyor belt failures, including damage size and occurrence metrics, by utilizing operational characteristics and historical maintenance records obtained from mining environments*" – str. 46). Drugim, utylitarnym, celem pracy była poprawa efektywności operacyjnej kopalń poprzez opracowanie opartego na sztucznej inteligencji systemu predykcyjnego utrzymania ruchu przenośników taśmowych (*„to improve the operational efficiency of mines by developing an AI-based predictive maintenance system for conveyor belts*" – str. 48). O ile pierwszy cel w mojej ocenie jest jasno i klarownie określony w kontekście oceny możliwości jego osiągnięcia, tak cel utylitarny, w moim odczuciu, jest sformułowany zbyt ogólnie – samo opracowanie systemu predykcyjnego utrzymania ruchu, bez jego wdrożenia, nie poprawi efektywności operacyjnej kopalni, a to wynika z przywołanego fragmentu pracy.

W pracy nie sformułowano wprost hipotez(y) rozprawy czy też pytań badawczych. Jest to o tyle ważne, że cele pracy odpowiadają zazwyczaj na pytanie, co autor zamierza osiągnąć, natomiast teza, hipotezy lub pytania badawcze określają, co dokładnie podlega sprawdzeniu lub rozstrzygnięciu w toku badań. Punktem wyjściowym dla pracy naukowej jest problem badawczy, który naukowiec chce rozwiązać w określony sposób, a wyniki pracy badawczej mają pozwolić mu udowodnić prawidłowość przyjętych założeń i opracowanych metod.

W kontekście tematu pracy oraz przedstawionej analizy stanu zagadnienia, w mojej ocenie cel naukowy rozprawy został postawiony trafnie, natomiast razi brak hipotez(y) lub pytań badawczych pozwalających jasno określić, jaki problem naukowy Doktorant chciał rozwiązać.

3. Syntetyczna ocena pracy

Podjęty przez Doktoranta temat posiada bez wątpienia walor praktyczny. Problematyka poruszona w pracy ma istotne znaczenie dla przedsiębiorstw górniczych, w których znaczący udział w kosztach działalności stanowią koszty utrzymania ruchu i napraw. Próby ich ograniczenia poprzez budowę i rozwój modeli predykcyjnych przewidujących uszkodzenia i awarie w posiadanym parku maszynowym zasługują na docenienie.

W ocenie realizacji podjętego tematu pracy chciałam wyróżnić następujące elementy rozprawy Doktoranta:

1. szczegółową analizę stanu zagadnienia i dobór (w przeważającej części)

adekwatnej literatury,

2. zaproponowanie diagramu Ishikawy, jako metody porządkującej możliwe przyczyny problemów związanych z parametrami uszkodzeń taśmy przenośnikowej,
3. wykorzystanie rzeczywistych danych do budowy modeli predykcji parametrów uszkodzeń,
4. wykorzystanie sieci neuronowych typu LSTM jako modeli do przewidywania parametrów związanych z uszkodzeniami przenośników taśmowych,
5. wielowariantowe podejście do tworzenia modeli sieci neuronowych dla różnych ustawień funkcji aktywacji oraz optymalizatora,
6. zaproponowanie różnych wskaźników błędu względnego (A, B, C) do oceny opracowanych modeli.

Doktorant zaprezentował bogaty materiał ilustracyjny w postaci tabel i wykresów wraz z opisami świadczący o kompleksowym podejściu do realizacji badań oraz potwierdził odpowiedni zasób wiedzy w zakresie zagadnień związanych z budową modeli sieci neuronowych do predykcji uszkodzeń taśm przenośnikowych. Wykazał się również umiejętnością stosowania specjalistycznego oprogramowania do analizy danych i budowy modeli AI.

Na tej podstawie mogę stwierdzić, że Doktorant wykazał umiejętność prowadzenia badań naukowych, a opracowane modele predykcyjne są oryginalnym wkładem autora do rozwoju dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Podsumowując ten punkt recenzji, stwierdzam, iż ogólny poziom merytoryczny pracy oceniam pozytywnie.

4. Uwagi dyskusyjne i krytyczne

Jakkolwiek ogólnie pozytywnie oceniam całą rozprawę, tak po szczegółowym zapoznaniu się z jej treścią, nasunęły mi się pewne uwagi o charakterze dyskusyjnym i krytycznym:

1. W rozdziale „Introduction" przedstawiono wyniki poszukiwań w bazie Scopus publikacji z zakresu ANN/modeling, ANN/mining, Predictive maintenance/AI. Dlaczego nie przeszukano bazy z kwerendą ANN/Predictive maintenance/mining? Uważam, że stanowiłoby to dobry punkt odniesienia do dalszej analizy stanu zagadnienia.

2. Przegląd literatury dotyczący m.in. zasadniczych zagadnień związanych z utrzymaniem predykcyjnym, uczeniem maszynowym i programowaniem powinien być oparty na rzetelnych publikacjach naukowych z czasopism lub książek, a nie pochodzić ze stron internetowych i forów np. [18], [155], [156], [217], [228], [229]. Równie krytycznie podchodzę do treści dotyczących przenośników taśmowych i cytowania stron internetowych w tym zakresie np. [23], [25], [28], [32], [44], [47], [268], [284].
3. Choć wyróżniłam w swojej ocenie dość szczegółowy przegląd literatury, to w moim odczuciu zabrakło w nim syntezy i podsumowania najważniejszych wniosków. Wrażenie to potęgują powtarzające się zdania/sformułowania, które wskazano w uwagach o charakterze edytorskim. Również zamieszczenie teoretycznego rozdziału piątego w dalszej części pracy zaburzyło, w mojej ocenie, dość czytelną strukturę rozprawy, utrudniając całościowe zrozumienie podstaw teoretycznych zagadnień poruszonych w pracy (tj. *state-of-the-art*) .
4. Oryginalnie diagram Ishikawy obejmuje wymiary: Pomiar, Materiał, Maszyna, Środowisko, Człowiek oraz Metoda. W tym kontekście proszę o skomentowanie pominięcia grupy Pomiar oraz rozdzielenie grupy Maszyna na Taśmę oraz Przenośnik. Typowo do rozważań przyjmuje się jeden problem; natomiast na przygotowanym diagramie są podane trzy. Czy zawsze wszystkie wymienione czynniki będą potencjalnymi przyczynami każdego z tych trzech problemów? W moim odczuciu w pewnych przypadkach mogą być to zbiory rozłączne.
5. W opisie przyjętej metodyki (str. 52/53) kroki opisane są z powtórzeniami np. *„Steps 1 & 2—Collection of data measured at mine & Checking and pretreatment of data"* i *„Steps 2 & 3—Checking and pre-treatment of data & Select dependent (output) variables and independent (input) variables"*, co czyni opis niezrozumiałym. W mojej ocenie kroki 4 i 5 oraz 6 – 9 opisano zbyt ogólnie, a są to zasadnicze kroki w pracy.
6. Brak w pracy rzetelnej i prawidłowej eksploracyjnej analizy danych (EDA) obejmującej m.in. w ujęciu jednowymiarowym statystyki opisowe wszystkich zmiennych, wizualizacje oraz badanie rozkładów zmiennych. W pracy występują pojedyncze analizy, które nie dają pełnego obrazu zbiorów danych. Podobnie jest z dwuwymiarową EDA, która powinna obejmować wyczerpującą analizę zależności i wizualizacje zależności pomiędzy zmiennymi w zbiorach danych.
7. Przyjęcie do analizy korelacji współczynnika Pearsona wiąże się z pewnymi założeniami, wśród których znajduje się normalność rozkładu analizowanych zmiennych. Czy takie założenie było sprawdzone? Jaki był jego rezultat? Jeśli

zakładamy, że zależności pomiędzy zmiennymi mają charakter nieliniowy (str. 31: *Moreover, as described in chapters 4 and 6, presented thesis has highdimensional data with evident nonlinear associations*"), w jakim celu sprawdzana jest korelacja liniowa? Czy nie bardziej odpowiedni byłby współczynnik korelacji Spearmana?

8. Na diagramie Ishikawy wskazano potencjalnie wiele możliwych przyczyn uszkodzeń przenośnika taśmowego i taśmy. Zabrakło jasnego przypisania wybranych zmiennych do poszczególnych przyczyn/grupy czynników przedstawionych na diagramie, co ułatwiłoby ocenę takiego, a nie innego wyboru. Czy wykorzystanie tylko części możliwych przyczyn (w postaci adekwatnych zmiennych) do budowy modelu jest wystarczające z punktu widzenia jakości predykcji?
9. Proszę podać uzasadnienie wprowadzenia do modeli predykcyjnych zmiennych o wartości stałej (Tab. 6.5 – X_1 i X_2) oraz zmiennych wysoce ze sobą skorelowanych (Tab. 4.3 – zmienne X_9 i X_{11}).
10. W uczeniu maszynowym podział na zbiór uczący i testowy najczęściej dzieli zbiór danych w proporcji (70% - 30%, 80% - 20%). Czym uzasadniony jest podział 57,4%-42,6% na str. 98? Czy zbiór uczący był odpowiednio bogaty do wytrenowania modelu?
11. Wątpliwe dla mnie wydaje się przyjęcie dwóch punktów (skanów) jako danych do zbioru uczącego i jednego do zbioru testowego (tak rozumiem zapisy na str. 106). Modele powinny mieć dostęp do jak najpełniejszego zbioru przykładów, w przeciwnym wypadku można spodziewać się wysokich błędów na zbiorze testowym. Proszę o komentarz Doktoranta do tej kwestii.
12. W jaki sposób zostały wyliczone wartości w Tabeli 7.1 podsumowujące wyniki predykcji dla stworzonych modeli? Czym Doktorant tłumaczy lepsze wyniki modeli dla danych pochodzących z inspekcji wizualnych stanu taśm? Czy modele w tej postaci nadają się do wdrożenia w zakładach górniczych?

Wybrane uwagi o charakterze edytorskim:

- Spis treści zawiera tytuł „Wstęp i zakres pracy", który nie występuje w dalszej części – jest „Introduction",
- W spisie rysunków występują dwa takie same tytuły dla rysunków: Fig.1. i Fig.2, powinny się one różnić.
- W pracy często występują różne zapisy pojęć np. Diag Belt + albo DB+, genesis i Genesis, conveyor belt (CB) systems, conveyor belt systems (CBS). Kilkukrotnie wprowadzane są skróty np. LSTM – str. 32 i 67, RNNs – str. 33 i 56 czy ANNs – str. 31 i 36.

- W pracy występują liczne powtórzenia np. na str. 1 („*These trends reflect* (…) / *These trends highlight* (…)), str. 12/13 (*Understanding the construction and operational characteristics of steel cord conveyor belts (...) / Understanding the typical modes of failure and degradation is therefore essential (...) / Understanding and addressing the root causes of failure in steel cord conveyor belts is essential to prevent recurring issues (...)*), str. 15 (*Many of these diagnostic tools are increasingly integrated with advanced digital platforms that support predictive maintenance and real-time monitoring* – zdanie powtórzone dwa razy), str. 21 (*Lack of training [102], [103], [104], insufficient training for personnel handling (...) / Lack of maintenance personnel, insufficient training* (…), str. 22/23 (*Zimroz et al. [113] underscore the importance of environmental and ambient working conditions / Zimroz et al. [113] stressed the importance of ambient working conditions during mining operations*). Jest to tylko kilka wybranych przykładów. Należy podkreślić, że tego typu powtórzenia i parafrazy utrudniają czytelnikowi śledzenie toku rozprawy.
- W mojej ocenie niepotrzebnie w rozdziałach są dodane nienumerowane podtytuły, co zaburza ciągłość przyswajania treści przez czytelnika (np. w rozdziałach 1.2.2, 1.3.1, 2.1, 2.2, 5.1). Dla przykładu, w rozdziale 1.3.1 można było na początku zaznaczyć, jakie parametry będą omawiane w formie wypunktowanej listy, której elementy będą potem omawiane.
- Referencje posiadają zduplikowane pozycje np. [1] = [90], [21] = [34], [76] = [95], [49] = [96], [85] = [126], [125] = [146] = [149] oraz [23] = [25] = [32], [52] = [86], w [26] brak jakichkolwiek danych, weryfikacji wymagają również (z uwagi na występujące błędy, czy braki w opisie bibliograficznym) następujące pozycje: [5], [19], [21], [30], [42], [75], [95], [97], [102], [116], [154], [160], [180], [201], [243], [257], [260], [267], [268], [278], [281], [283], [284]. Również referencje [139], [140], [141], [142] posiadają błędne dane bibliograficzne.
- W tekście pojawiają się niepełne zdania, np. na str. 32, co świadczy o braku staranności w opracowaniu edytorskim pracy.

Pozostałe drobne uwagi:

- W tekście pracy kilkukrotnie pojawia się znak „&" - w tekście naukowym powinno być użyte pełne słowo „and".

- Na rysunku 6.1 znajduje się ucięty tekst.
- Brak opisów osi na rysunkach 6.17 i 6.18.
- W tabeli 6.11 podano błędne parametry – powinny być Y_4 i Y_5.
- Niska jakość rysunków, szczególnie Fig. 1-3, 6.17, 6.18.

Zgłoszone w tej części recenzji uwagi o charakterze dyskusyjnym i krytycznym nie umniejszają osiągnięcia doktoranta w postaci opracowania oryginalnego rozwiązania i chętnie zapoznam się z odpowiedziami na nie w czasie publicznej obrony rozprawy.

Wniosek końcowy

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Parthkumara Anilbhai Parmara pt. "*AI based modeling method for predicting failure related parameters in conveyor belts at mines*" stanowi oryginalny dorobek naukowy doktoranta.

Przedłożona praca potwierdza odpowiedni poziom wiedzy naukowej Doktoranta i umiejętności prowadzenia samodzielnych badań związanych z dyscypliną inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Stwierdzam, że recenzowana praca doktorska mgr inż. Parthkumara Anilbhai Parmara **spełnia warunki** stawiane pracom doktorskim w *art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2024 poz. 1571 z późn. zmianami)* i wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

[redacted]