Dr hab. inż. Paweł Stefaniak, prof. nadzw. CUPRUM
Kierownik Zakładu
Zakład Analityki Systemów
KGHM CUPRUM sp. z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe

Wrocław, 10.02.2026 r.

# Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Parthkumar Anilbhai Parmar, pt.: „AI based modeling method for predicting failure related parameters in conveyor belts at mines”

## I. Podstawa recenzji

Niniejszą recenzję opracowano na podstawie przesłanej do oceny rozprawy doktorskiej mgr inż. Parthkumara Anilbhai Parmara pt. „AI based modeling method for predicting failure related parameters in conveyor belts at mines”, przygotowanej na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Promotorami pracy są prof. dr hab. inż. Anna Burduk oraz dr hab. inż. Leszek Jurdziak, prof. uczelni. Podstawą sporządzenia niniejszej opinii jest uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka z dnia 21 stycznia 2026 r. w oparciu o otrzymany egzemplarz rozprawy doktorskiej wraz z pismem przewodnim z dnia 29.01.2026 r., sygnowanym przez Przewodniczącego RDN IŚGiE, Pana prof. dr hab. inż. Roberta Króla.

## II. Charakterystyka rozprawy

Transport taśmowy w kopalniach odkrywkowych stanowi kluczowe ogniwo całego procesu technologicznego: od jego ciągłości zależy nie tylko bieżąca produkcja, ale i zdolność zakładu do realizacji planu wydobycia. Taśmy przenośników – szczególnie długie pętle taśm z linkami stalowymi – są jednymi z najdroższych i najbardziej wrażliwych elementów tych systemów; ich poważniejsze uszkodzenie oznacza zwykle wielodniowy postój, konieczność zrzucenia urobku, demontażu, naprawy lub renowacji, a następnie ponownego montażu i rozruchu, co generuje bardzo wysokie koszty i ryzyko zakłócenia ciągu technologicznego. Z punktu widzenia praktyka kopalnianego szczególnie istotne są więc dwie kwestie: możliwość wczesnego wykrywania uszkodzeń (zanim przerodzą się w awarie krytyczne) oraz możliwość przewidywania tempa degradacji na tyle wcześnie, by sensownie planować postoje, zamówienia taśm i prace renowacyjne. Klasyczne podejścia – oparte na okresowych obchodach, subiektywnych ocenach stanu i doraźnych naprawach – nie zapewniają ani wystarczającej powtarzalności oceny, ani dobrej przewidywalności rozwoju uszkodzeń, co w warunkach rozległych sieci przenośników (o łącznej długości sięgającej dziesiątek lub setek kilometrów) oznacza realne ryzyko nagłych, kosztownych przestojów. Na tym tle rozwój metod magnetycznej diagnostyki taśm z linkami stalowymi – prowadzony od lat siedemdziesiątych – oraz próba powiązania takich danych z metodami sztucznej inteligencji (SI/AI), podejmowana w recenzowanej rozprawie, odpowiadają na bardzo konkretne potrzeby: przejście od reaktywnej lub czysto planowo-zapobiegawczej strategii utrzymania ruchu do podejścia predykcyjnego, opartego na obiektywnych pomiarach i modelowaniu procesów degradacji.

Recenzowana rozprawa została napisana w języku angielskim. Praca liczy około 125 stron zasadniczego tekstu, uzupełnionego o spis treści, wykaz rysunków i tabel, streszczenie w języku polskim oraz angielskim. Struktura pracy obejmuje: wprowadzenie, siedem rozdziałów merytorycznych (w tym przegląd literatury, opis metodyki, dwa rozdziały poświęcone modelowaniu na różnych bazach danych) oraz podsumowanie. Rozdział 1 przedstawia ogólną charakterystykę przenośników taśmowych, rodzaje taśm, wybrane mechanizmy degradacji oraz przegląd literatury dotyczącej zużycia i uszkodzeń taśm. Autor prezentuje również diagram Ishikawy porządkujący czynniki wpływające na uszkodzenia taśm. Rozdział 2 zawiera wprowadzenie do metod sztucznej inteligencji, ze szczególnym uwzględnieniem sieci neuronowych i architektury LSTM, oraz przegląd zastosowań AI w predykcyjnym utrzymaniu ruchu. W rozdziale 3 zarysowano zakres rozprawy, sformułowano cel naukowy i utylitarny oraz opisano ogólne ramy metodyczne. Rozdział 4 dotyczy modelowania predykcyjnego parametrów uszkodzeń taśm na podstawie danych z manualnych inspekcji wizualnych w kopalni węgla brunatnego. Rozdział 5 opisuje system diagnostyki magnetycznej DiagBelt+ oraz gromadzone przez niego dane. Rozdział 6 przedstawia wyniki modelowania predykcyjnego na bazie danych z systemu DiagBelt+ oraz próby prognozowania przyszłych wartości wskaźników uszkodzeń. W zakończeniu (rozdział 7) dokonano porównania wyników uzyskanych dla obu typów baz danych oraz sformułowano ogólne wnioski dotyczące możliwości wykorzystania zaproponowanej metodyki w praktyce kopalnianej. Podsumowując, rozprawa ma wyraźnie zarysowaną strukturę, właściwie lokuje się w obszarze inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki i podejmuje aktualny problem predykcji uszkodzeń taśm przenośnikowych przy użyciu metod AI. Tekst jest momentami zbyt obszerny w częściach przeglądowych i zawiera liczne powtórzenia, ale zasadniczy trzon badawczy – dwa bloki modelowania predykcyjnego na różnych bazach danych – jest jasno wyeksponowany. Praca tworzy spójną całość, której mocną stroną jest osadzenie badań w rzeczywistych warunkach kopalnianych.

## III. Ocena realizacji celu naukowego pracy

Celem naukowym rozprawy jest opracowanie metody opartej na AI do przewidywania parametrów związanych z awariami taśm przenośnikowych – w szczególności wielkości uszkodzeń oraz wskaźników ich występowania – z wykorzystaniem danych eksploatacyjnych i konserwacyjnych pochodzących z kopalń. Celem utylitarnym jest poprawa efektywności operacyjnej zakładów górniczych poprzez rozwój systemu predykcyjnego utrzymania ruchu taśm przenośnikowych.

A. Zakres realizacji celu – dane i metody

Doktorant prawidłowo zidentyfikował dwa zasadniczo różne źródła danych:

- subiektywne zapisy z inspekcji wizualnych taśm w kopalni węgla brunatnego (HVI) – obejmujące m.in. wiek segmentu, historię napraw, ocenę stanu, rodzaj transportowanego materiału oraz parametry geometryczne;
- obiektywne dane z systemu DiagBelt+ w kopalni wapienia – opisujące stan rdzenia taśm z linkami stalowymi na podstawie skanów magnetycznych, w tym liczbę uszkodzeń, gęstość uszkodzeń i parametry geometryczne defektów.

Na tej podstawie zbudowano zestaw modeli LSTM dla obu baz, przy czym:

- dla danych HVI celem było m.in. przewidywanie liczby napraw, liczby przecięć linek oraz wskaźników skumulowanych w kolejnych stanach postoju;

- dla danych DiagBelt+ – prognozowanie gęstości uszkodzeń, liczby uszkodzeń, powierzchni uszkodzeń oraz długości i szerokości sygnałów uszkodzeń w kolejnych skanach i w horyzoncie przyszłym.

Doktorant wykazał się samodzielnością w zakresie przygotowania danych (definicja zmiennych X i Y, podział na zbiory uczące i testowe), zaprojektowania i implementacji modeli LSTM (dobór liczby warstw, neuronów, funkcji aktywacji, algorytmów optymalizacji) oraz przeprowadzenia ewaluacji przy użyciu wskaźników błędu względnego i prostych klasyfikacji jakości predykcji (m.in. wskaźniki A, B, C).

B. Ograniczenia danych a realizacja celu

Kluczowym elementem oceny jest relacja między ambitnie postawionym celem pracy a realnymi możliwościami wyznaczonymi przez jakość i strukturę dostępnych danych. Dane z inspekcji wizualnych są silnie subiektywne, nie w pełni znormalizowane i pozbawione informacji o rzeczywistej intensywności pracy (liczbie obiegów taśmy, przetransportowanej masie, warunkach pracy pomiędzy inspekcjami). Dane z systemu DiagBelt+ mają charakter obiektywny, ale liczba skanów w czasie jest ograniczona (zaledwie kilka pomiarów dla danej pętli taśmy), odstępy czasowe między skanami są duże, a historia napraw (wycinanie uszkodzonych fragmentów, renowacje) nie jest jednoznacznie śledzona na poziomie poszczególnych segmentów taśmy. Sam Doktorant wskazuje, że brak szczegółowych danych operacyjnych (obciążenie, masa przetransportowanego urobku między skanami, profil obciążenia przenośnika) w istotny sposób ogranicza zdolność modelu do uchwycenia rzeczywistych mechanizmów degradacji. Ograniczenia te są ważne, ale nie uniemożliwiają realizacji celu naukowego, rozumianego jako „opracowanie i krytyczna ocena metodyki predykcyjnej”; wpływają natomiast na wielkość błędów predykcji oraz na zakres warunków, w których modele mogą być w sensowny sposób stosowane.

C. Jakość uzyskanych wyników

Przedstawione w rozprawie wyniki ilościowe pokazują, że w przypadku danych z inspekcji wizualnych opracowane modele osiągają średnie błędy względne rzędu około 30–40% dla niektórych przewidywanych parametrów, takich jak te związane z wiekiem taśmy czy liczbą napraw, podczas gdy dla innych wielkości błędy są jeszcze wyższe. W przypadku magnetycznych danych DiagBelt+ sytuacja jest jeszcze bardziej wymagająca, ponieważ błędy względne często sięgają około 50% lub więcej, zwłaszcza dla geometrycznych charakterystyk uszkodzeń, takich jak długość, szerokość i powierzchnia. Przy takim poziomie dokładności trudno traktować modele jako samodzielną i wystarczającą podstawę do podejmowania decyzji eksploatacyjnych, na przykład przy planowaniu konkretnych postojów czy definiowaniu dokładnego zakresu napraw. Pomimo tego ograniczenia modele mogą nadal odgrywać użyteczną rolę. Mogą służyć jako wstępne narzędzie do identyfikacji ogólnych trendów degradacji taśmy oraz wskazywania obszarów podwyższonego ryzyka wzdłuż trasy przenośnika. Mogą także pełnić funkcję narzędzia wspomagającego w wstępnych analizach porównawczych pomiędzy różnymi pętlami i segmentami taśm. Ponadto stanowią dowód koncepcji, że zarówno dane magnetyczne, jak i inspekcyjne mogą zostać włączone do modeli opartych na sztucznej inteligencji, pod warunkiem rozszerzenia baz danych o bardziej szczegółowe informacje operacyjne. Istotne jest, że Doktorant nie ogranicza się jedynie do prezentacji wyników liczbowych, lecz podejmuje się również ich interpretacji i próbuje wskazać przyczyny stosunkowo wysokich błędów predykcji. Wśród przyczyn wymienia ograniczoną liczebność próby, brak części potencjalnie istotnych zmiennych objaśniających, trudności związane z wykorzystaniem wielkości skumulowanych oraz wpływ renowacji segmentów taśmy. Zdaniem Recenzenta część z tych interpretacji powinna zostać

sformułowana ostrożniej. Ogólna linia rozumowania jest jednak poprawna i pokazuje, że Doktorant jest świadomy ograniczeń przeprowadzonego badania.

D. Stopień realizacji celu naukowego

Biorąc pod uwagę powyższe, można stwierdzić, że:

- **Cel koncepcyjny** – opracowanie metodyki predykcyjnej opartej na LSTM dla dwóch typów baz danych kopalnianych – został zrealizowany. Doktorant zbudował spójny schemat postępowania (przygotowanie danych, budowa modeli, ocena błędów, próba prognozowania w horyzoncie przyszłym).
- **Cel poznawczy** – rozpoznanie wpływu jakości danych i sposobu ich gromadzenia na możliwości predykcji – został zrealizowany częściowo. Rozprawa przekonująco pokazuje, że bez uzupełnienia baz o dane operacyjne i lepszego śledzenia historii segmentów trudno oczekiwać wysokiej jakości prognoz, co jest ważnym wnioskiem dla dalszych badań.
- **Cel utylitarny** – stworzenie narzędzia bezpośrednio wspierającego predykcyjne utrzymanie ruchu – został zrealizowany w stopniu prototypowym. Modele mogą obecnie pełnić rolę pomocniczą, wspierając analizy trendów, ale nie stanowią jeszcze kompletnego rozwiązania do wdrożenia przemysłowego.

W kontekście wymagań stawianych rozprawom doktorskim należy jednak podkreślić, że od doktoratu oczekuje się przede wszystkim wykazania zdolności do samodzielnego zaplanowania, przeprowadzenia i krytycznej oceny badań naukowych, a niekoniecznie dostarczenia w pełni „gotowego" produktu przemysłowego. Z tego punktu widzenia doktorant wykazał, że potrafi:

- poprawnie zidentyfikować istotny problem praktyczny,
- przenieść go na poziom zadań modelowania AI,
- zbudować i uruchomić odpowiednie modele,
- przeprowadzić ich jakościową i ilościową ocenę,
- wyciągnąć wnioski co do ograniczeń i warunków dalszego rozwoju metody.

Podsumowując, mimo istotnych ograniczeń ilościowych wyników, w mojej ocenie cel naukowy rozprawy został zrealizowany w stopniu odpowiadającym wymaganiom stawianym pracom doktorskim w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

## IV. Oryginalność pracy oraz ocena wiedzy teoretycznej Doktoranta

Przedmiotem rozprawy jest zastosowanie metod sztucznej inteligencji, w szczególności sieci LSTM, do prognozowania parametrów związanych z uszkodzeniami taśm przenośnikowych na podstawie dwóch zbiorów danych o zasadniczo odmiennym charakterze (subiektywne, ludzkie inspekcje wizualne oraz obiektywne skany magnetyczne). Rozpatrywana rozprawa wpisuje się w szerszy nurt wykorzystania metod SI w diagnostyce i predykcyjnym utrzymaniu ruchu systemów przenośników taśmowych, ze szczególnym uwzględnieniem taśm z linką stalową monitorowanych metodami magnetycznymi. W tym obszarze istniejący dorobek literaturowy jest wciąż stosunkowo skromny: wcześniejsze prace z wykorzystaniem sieci neuronowych koncentrowały się głównie na klasyfikacji uszkodzeń (np. SOM, proste architektury MLP), często w warunkach laboratoryjnych lub z użyciem metod wizyjnych, a nie na diagnostyce magnetycznej prowadzonej w rzeczywistych warunkach przemysłowych.

Na tym tle należy podkreślić, że Doktorant należy do grona pierwszych badaczy podejmujących próbę wykorzystania zaawansowanych modeli opartych na sieciach neuronowych – w tym architektur LSTM – do prognozowania uszkodzeń taśm przenośnikowych z użyciem danych z systemów magnetycznych, takich jak DiagBelt+, oraz baz diagnostycznych gromadzonych w warunkach przemysłowych. W tym sensie wkład rozprawy ma charakter innowacyjny, zwłaszcza że łączy kilka elementów, które dotychczas rzadko były ze sobą zestawiane. Po pierwsze, wykorzystuje obiektywne dane z diagnostyki magnetycznej taśm z linką stalową. Po drugie, stosuje metody głębokiego uczenia, w szczególności sieci LSTM dostosowane do danych szeregów czasowych. Po trzecie, podejmuje próbę prognozowania nie tylko tego, czy uszkodzenia wystąpią, lecz także tego, jak w czasie będą ewoluować ich geometryczne wymiary i gęstość. Choć uzyskane wyniki liczbowe nie są spektakularne, nie umniejsza to wartości koncepcyjnej pracy. W wielu obszarach diagnostyki przemysłowej pierwsze zastosowania metod SI mają charakter eksploracyjny, a ich główna wartość polega na zbudowaniu ram metodycznych, identyfikacji kluczowych ograniczeń danych oraz wskazaniu kierunków rozbudowy i udoskonalania modeli, a nie na natychmiastowym osiągnięciu bardzo niskich błędów predykcji. Z tego punktu widzenia rozprawa stanowi ważny krok w stronę systematycznego wykorzystania danych magnetycznych i metod SI w predykcyjnym utrzymaniu ruchu taśm przenośnikowych.

Doktorant zaprezentował również szereg istotnych umiejętności. Zdołał samodzielnie zbudować i przetestować kilka wariantów modeli opartych na sieciach LSTM. Porównał jakość predykcji uzyskaną z dwóch zasadniczo odmiennych typów zbiorów danych. Ponadto w sposób krytyczny zidentyfikował ograniczenia wynikające z braku kluczowych danych operacyjnych, takich jak obciążenie, przetransportowana masa i liczba cykli taśmy, co stanowi istotną wskazówkę dla przyszłych badań w tym obszarze.

Rekomendowane kierunki dalszych badań

Z punktu widzenia dalszego rozwoju tej linii badawczej zasadne wydają się następujące rekomendacje:

1. **Rozbudowa i integracja baz danych** – uzupełnienie baz diagnostycznych o dane eksploatacyjne (intensywność pracy, masa urobku, liczba obiegów, informacje o remontach i renowacjach) oraz jednoznaczne śledzenie historii poszczególnych segmentów taśmy (w tym operacji skracania i regeneracji). Połączenie danych magnetycznych z innymi źródłami informacji (np. systemy SCADA, pomiary obciążenia, dane o warunkach środowiskowych), co umożliwiłoby budowę modeli wielośródłowych (data fusion) bardziej odpornych na niepełność pojedynczych rejestrów.
2. **Porównanie z klasycznymi modelami niezawodnościowymi** – systematyczne zestawienie skuteczności modeli LSTM z wynikami uzyskiwanymi przy użyciu standardowych metod niezawodności (np. modele oparte na rozkładach statystycznych, wskaźnikach MTBF, modelach procesów punktowych), tak aby ilościowo ocenić „wartość dodaną" podejścia AI.
3. **Przedefiniowanie architektur i procedur uczenia** – eksploracja innych architektur sekwencyjnych (GRU, modele hybrydowe CNN-LSTM) oraz metod uczenia z uwzględnieniem niepewności (np. modele bayesowskie), co mogłoby poprawić stabilność predykcji przy ograniczonej liczbie obserwacji. Zastosowanie technik radzenia sobie z małymi i niezbilansowanymi zbiorami danych (data augmentation, metody transfer learning, uczenie wielozadaniowe), szczególnie w kontekście niewielkiej liczby pozytywnych przypadków uszkodzeń.
4. **Przejście od predykcji „statycznej" do scenariuszowej** – rozwój modeli umożliwiających nie tylko przewidywanie wartości wskaźników uszkodzeń w kolejnych punktach czasowych, ale także szacowanie prawdopodobieństwa przekroczenia określonych progów krytycznych

w zadanym horyzoncie (time-to-failure, prawdopodobieństwo awarii w przedziale czasu). Integracja modeli predykcyjnych z prostymi modułami wspomagania decyzji (np. rekomendacja okna czasowego dla zatrzymania taśmy i renowacji wybranego segmentu), co zwiększyłoby przełożenie wyników na praktykę ruchową.

5. **Walidacja międzyobiektowa i uogólnienie modeli** – przeniesienie i przetestowanie opracowanych metod na danych z innych kopalń i innych systemów magnetycznych, co pozwoliłoby ocenić stopień uogólnienia modeli i ich wrażliwość na specyfikę danej instalacji.

Podsumowując, oryginalność pracy nie polega na demonstracyjnie wysokich wskaźnikach dokładności, lecz na podjęciu dość odważnej próby połączenia diagnostyki magnetycznej i zaawansowanych metod AI w obszarze, który dopiero zaczyna się rozwijać. W ocenie recenzenta stanowi to wartościowy, choć wymagający dalszego rozwinięcia, wkład w rozwój narzędzi predykcyjnego utrzymania ruchu przenośników taśmowych.

## V. Uwagi szczegółowe

W niniejszym rozdziale przedstawiam pięć głównych uwag dotyczących części badawczej rozprawy. Po każdej uwadze zamieszczam pytanie skierowane do Doktoranta z prośbą o dodatkowe wyjaśnienie.

A. Zasadność i sposób przedstawienia przeglądu literatury

Wstępne motywowanie pracy poprzez wykresy liczby publikacji ze Scopusa może być ciekawym uzupełnieniem, jednak w obecnej formie budzi zastrzeżenia metodyczne (dobór słów kluczowych „mining" – brak rozróżnienia od „data mining", brak informacji o dacie kwerendy). Aby poprawnie wyselekcjonować prace dotyczące kopalni, lepiej jest zbudować rozszerzoną kwerendę, która precyzuje typ kopalni (underground, open-pit) lub rodzaj wydobywanego surowca (coal, copper, lead). Przegląd metod diagnostycznych taśm przenośnikowych, w szczególności metod magnetycznych rozwijanych od lat 70., mógłby zostać przedstawiony w sposób bardziej syntetyczny, np. w formie tabel porównawczych (zakres wykrywalności uszkodzeń, rodzaje taśm, warunki pracy, ograniczenia).

**Czy mógłby Pan wyjaśnić bardziej szczegółowo, w jaki sposób zostały zbudowane zapytania w bazie Scopus użyte do wygenerowania wykresów liczby publikacji (dobór słów kluczowych, filtrów, zakresu czasowego) oraz dlaczego zdecydowano się nie rozróżniać pojęć „mining" i „data mining"?**

B. Dane z inspekcji wizualnych

Zdefiniowane zmienne zależne (m.in. liczba napraw, liczba przecięć linek, wartości skumulowane) oraz niezależne (parametry geometryczne, rodzaj materiału, stan segmentu, wiek) są stosunkowo dobrze opisane, ale odnoszą się do segmentu taśmy jako całości, bez rozróżnienia konkretnych lokalizacji uszkodzeń. Brak jest informacji o liczbie obiegów taśmy, przetransportowanej masie czy obciążeniu eksploatacyjnym pomiędzy kolejnymi inspekcjami, co znacząco ogranicza możliwości interpretacyjne modeli. Użycie jednocześnie wartości bieżących i skumulowanych jako zmiennych wyjściowych prowadzi do bardzo wysokich korelacji z niektórymi wejściami, co wykazuje tabela korelacji i co może podważać sens statystyczny konstrukcji części modeli.

**Dlaczego kluczowe zmienne eksploatacyjne, takie jak liczba obiegów taśmy, przetransportowana masa czy obciążenie pomiędzy kolejnymi inspekcjami, nie zostały uwzględnione w bazie danych? Czy dane te były niedostępne, czy też świadomie je pominięto? Historyczne dane prądowe (sygnał prądu silnika) mogłyby**

**stanowić prosty sposób uzupełnienia tych informacji. Sygnał prądu dostarcza cennych informacji o rozruchu, zatrzymaniu i pracy przenośnika, zwłaszcza gdy pracuje on z pełną taśmą (wysoki pobór prądu) oraz z taśmą pustą (niski pobór prądu).**

C. Dane z systemu DiagBelt+

Opis działania systemu DiagBelt+ jest dość szczegółowy, jednak zajmuje w pracy nieproporcjonalnie dużo miejsca w stosunku do faktycznego wykorzystania danych w modelowaniu. Praca koncentruje się niemal wyłącznie na jednym rozwiązaniu diagnostycznym, co w połączeniu z obszerną częścią opisową może tworzyć wrażenie nadmiernego eksponowania konkretnego produktu, zamiast szerzej zakrojonej analizy metod magnetycznych. Liczba dostępnych skanów w czasie (rzędu 4–5 na pętlę taśmy) oraz brak szczegółowej informacji o naprawach (odcinanie fragmentów, renowacje) powodują, że modele operują na bardzo szczątkowej historii degradacji.

**Jakie zmiany w procedurach zbierania danych (częstotliwość skanów, sposób rejestrowania napraw) byłyby Pana zdaniem kluczowe, aby uzyskać pełniejszą historię degradacji taśm i poprawić jakość budowanych modeli?**

D. Metodyka modelowania i walidacja

Wybór sieci LSTM jako głównej architektury jest uzasadniony czasowym charakterem danych, jednak brakuje systematycznego porównania z prostszymi modelami (np. klasyczna regresja, MLP, modele statystyczne bazujące na wskaźnikach niezawodności), co utrudnia ocenę wartości dodanej. Rozdział poświęcony teorii ANN/LSTM jest rozbudowany i zawiera elementarne treści znane z literatury, natomiast stosunkowo mało miejsca poświęcono omówieniu kompromisów modelowych (dobór funkcji kosztu, strategii regularyzacji, sposobu radzenia sobie z niezbilansowanymi danymi). Tabele z wynikami zawierają miejscami błędy techniczne (np. komunikaty #DIV/0), a brak jest pełnych zestawień wyników dla wszystkich modeli – co utrudnia weryfikację spójności prezentowanej analizy.

**Czy mógłby Pan wyjaśnić swoje decyzje dotyczące kluczowych elementów budowy modeli, takich jak wybór funkcji straty, zastosowane techniki regularyzacji oraz metody radzenia sobie z niezbilansowanym zbiorem danych?**

E. Jakość predykcji i interpretacja

Średnie i mediany błędów względnych dla wielu wielkości (długość, szerokość i powierzchnia uszkodzeń, liczba przecięć linek) pozostają na poziomie rzędu kilkudziesięciu procent, co trudno uznać za satysfakcjonujące z punktu widzenia precyzyjnej predykcji eksploatacyjnej. W podsumowaniu i komentarzach do wyników doktorant momentami formułuje wnioski o potencjale praktycznym metody w sposób zbyt kategoryczny; właściwe byłoby silniejsze podkreślenie prototypowego charakteru rozwiązań i konieczności dalszego rozwinięcia modeli oraz baz danych.

**W jakich konkretnych scenariuszach decyzyjnych (jeśli w ogóle) uważa Pan, że obecne modele mogłyby już dostarczać wartościowego wsparcia, mimo istniejących poziomów błędów?**

## VI. Pozostałe uwagi

Uwagi ogólne:

- W pracy występuje wyraźna niespójność formatowania: brak jednolitych odstępów pomiędzy akapitami (czasem nadmierne przerwy, czasem ich brak), liczne braki spacji lub podwójne spacje, a także brak odstępu pomiędzy podpisami rysunków i tabel a kolejnym tekstem głównym.
- Często, przy odwoływaniu się do kilku pozycji literaturowych lub kilku rysunków w szeregu, kolejność ich numeracji jest niepoprawna. W przypadku cytowania większej liczby pozycji z jednego zakresu (np.[1], [2], [3], [4], [5]) zasadne byłoby stosowanie skróconej formy ([1–5]), co zwiększyłoby czytelność i przejrzystość tekstu. Podobnie tyczy się rysunków i tabel.
- W całej rozprawie widoczna jest tendencja do nadmiernego cytowania źródeł w miejscach, w których wystarczyłoby ogólne stwierdzenie faktu, np. wielokrotne odwołania do literatury przy opisie standardowych narzędzi programistycznych (Python i typowe biblioteki) – patrz strona 41.
- W wielu miejscach Autor w sposób przesadny i powtarzalny uzasadnia korzyści płynące z predykcyjnego utrzymania ruchu oraz magnetycznych metod diagnostyki taśm przenośnikowych, co prowadzi do zbędnych dublowań treści. Podobnie tyczy się nadmiernego opisu przewagi systemu DiagBelt+ nad innymi systemami, biorąc pod uwagę, że metoda opracowana w rozprawie doktorskiej jest możliwa do zastosowania w przypadku większości systemów magnetycznych.

Abstrakt:

- Abstrakt zawiera odwołania do literatury, co nie jest typową praktyką redakcyjną.
- W polskim streszczeniu tłumaczenie nazwy LSTM jako „sieć neuronowa o długiej i krótkiej pamięci” odbiega od przyjętej terminologii („sieć o długiej pamięci krótkotrwałej”).

Rozdział 1:

- Rozdział 1 wymaga wyraźnego skrócenia. Wielokrotnie powtarzane są te same informacje, co nie wnosi nowych treści, a następnie podobne opisy pojawiają się w kolejnych rozdziałach.
- Na stronie 7 fragment „The belt segments are connected by splices to create a continuous loop, as shown in Fig. 1.1. This Fig. shows a schematic representation…” zawiera nieeleganckie użycie skrótu „Fig.” w drugim zdaniu; poprawniejsze byłoby „This figure shows…”.
- Na stronie 12 zapis „Researchers Błazej et–al.noted that …” wymaga korekty: zbędny myślnik, brak spacji przed „noted”; poprawnie „Researchers Błazej et al. noted that…”.
- Na stronie 21 zdanie „Inadequate lubrication , lubrication is crucial for the smooth operation of moving parts in the conveyor system” jest stylistycznie niepoprawne, a odwołanie do cytowanej pozycji wydaje się zbędne, gdyż stwierdzenie ma charakter oczywisty. Podobne, słabo umotywowane cytowania powtarzają się w innych miejscach.
- Diagram Ishikawy jest graficznie mało czytelny: zbyt małe odstępy między elementami, część opisów jest obrócona, a niektóre hasła pogrubiono bez wyjaśnienia tej decyzji, co utrudnia odbiór tego ważnego podsumowania.

Rozdział 2:

- W rozdziale 2 Autor stara się wprowadzić czytelnika w zagadnienia uczenia maszynowego, lecz w krótkich fragmentach tekstu pojawia się kilka istotnych nieścisłości:

  a) Strona 35: „The working mechanism of ANNs can be simplified into forward propagation learning, and backpropagation learning." – propagacja w przód nie jest metodą uczenia, lecz procesem przepływu danych przez sieć; za uczenie odpowiada algorytm wstecznej propagacji błędu.

  b) Strona 35: „(…) using the derivative of the activation function to determine the gradient of the error (…)" – gradient wyznacza się z pochodnej funkcji opisującej wyjście neuronu; funkcja aktywacji nie zawsze musi występować w tej samej formie, jak sugeruje Autor.

  c) Strona 35: „(…) typically using an optimization algorithm like gradient descent." – w praktyce w sieciach neuronowych stosuje się najczęściej warianty stochastyczne (SGD i jego modyfikacje), co warto byłoby zaznaczyć.

  d) Strona 35: „(…) CNNs are a type of MLP (…)" – sieci konwolucyjne nie są typem MLP; są specyficzną klasą sieci neuronowych, które historycznie wyewoluowały z MLP, ale nie można ich kwalifikować jako podtyp MLP.

- Rysunki 2.2 i 2.3 odpowiadają schematom opublikowanym wcześniej w artykule Autora i współautorów (Parmar et al., Energies 2024) i wymagają jednoznacznego oznaczenia źródła.

- Sekcja 2.3, w której Autor długo omawia potencjał i ograniczenia LSTM zanim zaczął go stosować, mogłaby zostać istotnie skrócona; ważniejsze byłoby przeniesienie akcentu na późniejszą, opartą na danych analizę skuteczności modelu.

Rozdział 3:

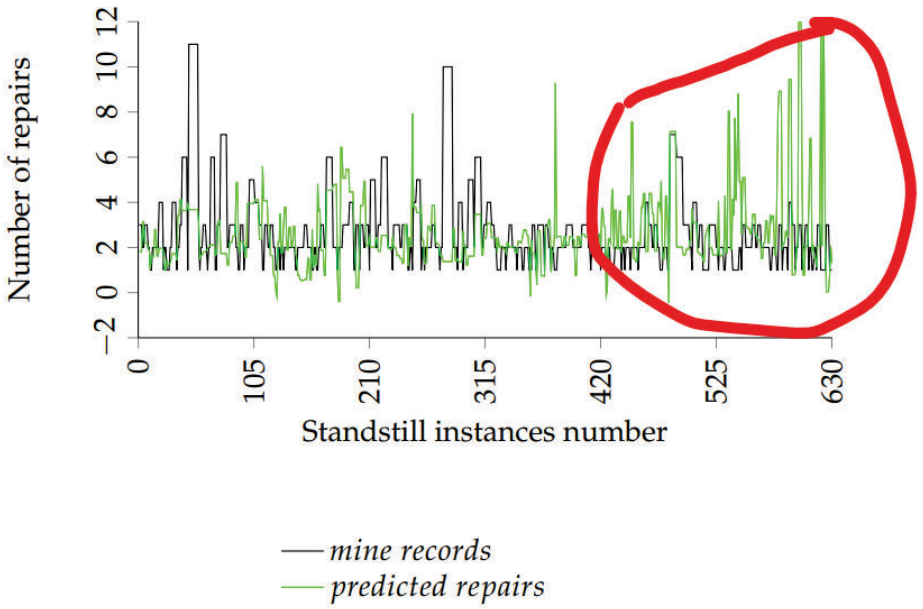
- Zawartość rozdziału 3 (opis zakresu, celów i ram metodycznych) w dużej części mogłaby zostać włączona do wstępu lub rozdziału 1, tak aby zwiększyć czytelność pracy.
- Strona 48: „Fig. 3.1 was devised and followed throughout the course of the dissertation." – odwoływanie się do rysunku umieszczonego w późniejszej części rozdziału jest mało wygodne dla czytelnika; lepiej byłoby umieścić rysunek bezpośrednio po jego omówieniu.
- Strona 49: odwołanie „described in sections 2.2 and 2.3 of Chapter 2" jest niepoprawne – wymaga korekty numeracji sekcji.
- Strona 50, Autor opisuje przyjętą metodykę badań, w trakcie której odwołuje się do wyników z badań własnych z dalszej części pracy. Przykładowo porównuje wyniki predykcji dla dwóch zbiorów danych odsyłając czytelnika w jednym zdaniu do 5 rysunków oraz 5 tabel. Zdanie dalej odwołuje się do dwóch kolejnych sekcji, oraz kolejnych 5 wykresów i 5 tabel. Po czym piszę, że analiza porównawcza podkreśla niezawodność opracowanej metody i jej przydatność w różnych obszarach górnictwa. Zdaniem autora ten etap stanowi solidne uzasadnienie proponowanej metodologii rozprawy. W mojej ocenie takie złożone odwołania oraz dygresje są po pierwsze niestosowne, po drugie rozpraszają uwagę czytelnika w początkowej fazie czytania rozprawy, po trzecie są niespójne z prawdą. Mianowicie, analizując rysunki zlokalizowane w kolejnym rozdziale nie można wnioskować o bardzo dobrym

dopasowaniu modelu i skuteczności predykcji. Trudno jest wiec mówić o solidnym uzasadnieniu metodologii.

- Strona 51, Figure 3.1. literówka w przedostatnim prostokącie. Powinno być “incorporation” a nie “incorporationa”.
- Strona 54, w pierwszym rombie od góry powinno być „belt damages” a nie „belt damage”
- Rozdział 3 kończy się praktycznie pustą stroną z mocno przeskalowanymi rysunkami, co świadczy o niedopracowanym formatowaniu.

Rozdział 4:

- W schemacie na rys. 4.1 pojawiają się drobne błędy edytorskie (np. indeks dolny dla słowa „to” w zapisie „X6 to X11 and Y1 to Y5”).
- W tabeli 4.1 – czym się różni “number of small repair in current standstill” od “cumulative number of small repair in current standstill”, to samo dla Y3 i Y4. Wydaje mi się, że w y2 i y4 chodziło o „cumulative amount overall”.
- Tabela 4.3 zawiera współczynniki korelacji równe 1 między niektórymi zmiennymi wejściowymi i wyjściowymi, co wskazuje na problemową konstrukcję modelu (nadmierne użycie wartości skumulowanych).
- Tabela 4.4 zajmuje całą stronę, choć jej zawartość jest na tyle kompaktowa, że mogłaby być umieszczona w układzie poziomym, oszczędzając miejsce.
- Rysunek 4.5 nie przekonuje co do wysokiej jakości dopasowania modelu; jeśli celem było pokazanie zgodności predykcji z wartościami rzeczywistymi, lepszym rozwiązaniem byłby chyba wykres punktowy (predykcja vs. pomiar).




- Analizując wyniki modelu predykcji przedstawiane na kolejnych wykresach trudno jest wnioskować o jego wysokiej predykcji, a szczególnie odkrywczym znaczeniu i przełożeniu na wartości biznesowe w kopalni.
- Rysunki 4.10–4.14 są mało wygodne do analizy; rozważenie użycia wykresów pudełkowych (box-plot) mogłoby znacząco poprawić klarowność prezentacji. Dodatkowo podpisy pod tymi rysunkami nie mają adekwatnych długości linii, co pogarsza estetykę.

- Konkluzje z rozdziału 4 są mało odkrywcze: sprowadzają się do stwierdzenia, że inspekcje wizualne są mało wiarygodne jako podstawa modelowania predykcyjnego, co jest intuicyjnie oczywiste w świetle literatury i praktyki.

Rozdział 5:

- Strona 88 „…(sh shown in the Fig. 5.5),” – niepotrzebne “sh”
- Strona 89 w zdaniu „The system processes the signals using a thresholding method (…) to predefined thresholds thmin and thmax” okeślenia “thmin” oraz “thmax” powinny mieć zastosowane indeksy dolne dla określeń “min” oraz “max”.
- Sekcja 5.2 – trochę nie rozumiem po co Autor wykonuje w końcowej części pracy doktorskiej przegląd literatury na temat systemu DiagBelt+, który jest produktem Politechniki Wrocławskiej. Brakuje syntetycznego przeglądu literatury o ewolucji systemów diagnostyki magnetycznej taśm, metod rozpoznawania uszkodzeń. W tym rozdziale Autor skupił się na egocentrycznym podejściu do prezentacji systemu DiagBelt+. Dalej w szczegółowym przeglądzie przedstawił co prawda kilka podobnych rozwiązań, ale ostatecznie skupił się na podkreśleniu przewagi DiagBelt+, co zupełnie nie wnosi nic do części własnej pracy Doktoranta. Wyodrębnienie rozdziału na ten temat uważam za mocno przesadzone, szczególnie w tak zaawansowanym miejscu rozprawy.
- Na stronie 96 Autor opisuje zastosowanie sieci SOM w pracy Olchówka i in., wskazując ją jako jedną z pierwszych prób użycia ANN w diagnostyce taśm. Artykuł przedstawia jedynie wykorzystanie sieci samoorganizujących się w analizie eksploracyjnej a nie automatyzacji modelu predykcyjnego, który może stanowić element systemu klasy DSS w kopalni. Faktycznie w przypadku diagnostyki magnetycznej, wątek wykorzystania sztucznych sieci neuronowych pozostaje mocno marginalizowany w literaturze światowej. Informacja ta mogłaby zostać lepiej wykorzystana przez Doktoranta do podkreślenia oryginalności niniejszej pracy w obszarze predykcji uszkodzeń na bazie danych magnetycznych; obecnie wątek ten pozostaje niewystarczająco wyeksponowany. W literaturze znaleźć można pierwsze próby wykorzystania ANN w diagnostyce taśm w 2001 roku w pracy „Alport, M., Govinder, P., Plum, S., & Van Der Merwe, L. (2001). Identification of conveyor belt splices and damages using neural networks. *Bulk Solids Handling*, *21*(6), 622-627.” – jednak praca ta dotyczy metod wizyjnych, nie magnetycznych. Dla metod magnetycznych odnotowałem pracę z 2025 roku „Yuan, Y., Li, Y., Gao, B., Bai, Y., Wang, M., Wang, H., & Zhou, L. (2025). Conveyor belt damage detection based on machine learning. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, *25*(1), 438-454”.

Rozdział 6:

- Tabela 6.5 zawiera widoczne błędy obliczeniowe (komunikaty typu #DIV/0), co świadczy o niedostatecznej kontroli poprawności zestawień.
- Brakuje tabeli z wynikami predykcji (w ujęciu procentowym) dla modelu 1, co utrudnia pełną ocenę jego działania.
- Średnie błędy względne dla większości modeli kształtują się na poziomie około 0% lub wyższym; trudno uznać takie wyniki za satysfakcjonujące w kontekście zastosowań eksploatacyjnych – mogą one co najwyżej stanowić punkt wyjścia do dalszych badań.
- Z punktu widzenia oceny wartości dodanej LSTM zasadne byłoby porównanie uzyskanych wyników z klasycznymi modelami niezawodnościowymi (np. bazującymi na standardowych rozkładach i wskaźnikach MTBF/MTTR); brak takiego odniesienia ogranicza możliwość oceny, czy sieć LSTM rzeczywiście wnosi istotną poprawę.

Podsumowanie:

- W tabeli 7.1 warto byłoby ponownie zdefiniować lub choćby krótko przypomnieć znaczenie użytych wskaźników (indicator A, B, C), aby czytelnik nie musiał wracać do wcześniejszych partii tekstu.

Wszystkie powyższe uwagi mają charakter konstruktywny; mogą posłużyć do dopracowania tekstu rozprawy lub kolejnych publikacji na podstawie przedstawionych badań.

## VII. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Parthkumara Anilbhai Parmara pt. „AI based modeling method for predicting failure related parameters in conveyor belts at mines" stanowi istotny i oryginalny wkład w rozwój nowoczesnych metod analizy danych diagnostycznych w obszarze utrzymania ruchu przenośników taśmowych w górnictwie odkrywkowym. Tematyka pracy jest wysoce aktualna i dobrze wpisuje się w globalne tendencje cyfryzacji procesów przemysłowych oraz rozwoju koncepcji predykcyjnego utrzymania ruchu, szczególnie w kontekście dążenia do budowy „inteligentnych" systemów transportu kopalnianego.

Mocne strony rozprawy obejmują przede wszystkim oparcie badań na rzeczywistych danych z dwóch kopalń odkrywkowych, co nadaje pracy wyraźny wymiar aplikacyjny. Wykorzystanie zarówno subiektywnych danych z inspekcji wizualnych, jak i obiektywnych danych z diagnostyki magnetycznej DiagBelt+ pozwala w sposób praktyczny pokazać zalety i ograniczenia różnych sposobów gromadzenia informacji o stanie taśm przenośnikowych. Interdyscyplinarne podejście, łączące wiedzę z zakresu inżynierii górniczej, diagnostyki technicznej oraz metod sztucznej inteligencji, świadczy o dobrym przygotowaniu merytorycznym Doktoranta i zrozumieniu specyfiki badanego problemu. Szczególnie cenne jest osadzenie badań w realnych uwarunkowaniach eksploatacyjnych – z uwzględnieniem długości pętli taśm, złożonej historii segmentów, ograniczonej liczby pomiarów i niekompletności danych.

Na tle dotychczasowego stanu wiedzy w obszarze diagnostyki magnetycznej taśm przenośnikowych rozprawa ma charakter w dużej mierze pionierski. Doktorant prawdopodobnie jako jeden z pierwszych badaczy podjął próbę wykorzystania zaawansowanych sieci neuronowych, w tym architektury LSTM, do modelowania i prognostyki parametrów uszkodzeń taśm na podstawie przemysłowych danych z systemu magnetycznego. Mimo, że uzyskane wyniki numeryczne – ze względu na jakość i rozmiar próbki – nie są spektakularne, opracowana metodyka stanowi ważny krok w kierunku szerszego wykorzystania danych magnetycznych w predykcyjnym utrzymaniu ruchu oraz jasno identyfikuje, jakie warunki (w szczególności rozbudowa baz danych i dostęp do informacji operacyjnych) muszą zostać spełnione, aby takie modele mogły osiągnąć pełnię swoich możliwości.

Autor wykazał się solidną wiedzą teoretyczną z zakresu budowy i eksploatacji przenośników taśmowych, mechanizmów degradacji taśm oraz podstaw metod sztucznej inteligencji. Zrealizował samodzielnie kompletny cykl badawczy: od sformułowania celów, przez zaprojektowanie schematu postępowania, przygotowanie danych, budowę modeli LSTM i analizę wyników, aż po krytyczne omówienie ograniczeń i wskazanie kierunków dalszych prac. Kompleksowe ujęcie problematyki – obejmujące zarówno aspekty diagnostyczne, jak i modelowe – potwierdza zdolność Doktoranta do prowadzenia samodzielnych badań na poziomie odpowiadającym wymaganiom stopnia doktora nauk technicznych.

Prezentowane rozwiązania wpisują się w strategiczne kierunki rozwoju przemysłu górniczego, związane z podnoszeniem niezawodności infrastruktury transportowej oraz przechodzeniem od strategii reaktywnej i planowo-zapobiegawczej do strategii predykcyjnej, opartej na analizie danych. Choć zaproponowane modele mają na obecnym etapie charakter prototypowy, wyniki pracy mogą stanowić podstawę do dalszego rozwoju systemów wspomagania decyzji dla służb utrzymania ruchu, a zastosowane koncepcje – po odpowiednim dopracowaniu i zasileniu bogatszymi danymi – mogą znaleźć zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, w których odstawa taśmowa stanowi główny środek transportowy.

Rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w zakresie:

- podjęcia aktualnego i istotnego problemu z obszaru inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki,
- wniesienia oryginalnego, choć w znacznej mierze eksploracyjnego wkładu w rozwój metod predykcji uszkodzeń taśm przenośnikowych,
- poprawnego poziomu merytorycznego i metodycznego, adekwatnego do dostępnych danych,
- wykazania samodzielności w projektowaniu i realizacji badań,
- zgodności tematyki z profilem kształcenia i potrzebami praktyki przemysłowej.

**Wartość naukowa i praktyczna** przedstawionych osiągnięć, połączona z kompetencjami Doktoranta w zakresie łączenia wiedzy dziedzinowej o przenośnikach taśmowych z metodami AI, uzasadnia pozytywną ocenę całości pracy.

**Wobec powyższego, stwierdzam, że** recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Parthkumara Anilbhai Parmara **spełnia wymogi** stawiane w obowiązującej Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2023 r., poz. 742). Z tego względu wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżyniera Środowiska, Górnictwo i Energetyka o przyjęcie i dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Paweł Kazimierz Stefaniak

Elektronicznie podpisany przez Paweł Kazimierz Stefaniak
Data: 2026.02.10 18:13:29 +01'00'