

Katedra Górnictwa
Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii
Politechnika Wrocławska
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Michał Siegmund
pt. „Metoda odspajania skał z użyciem kotew”

Podstawa prawna recenzji: Pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska,
Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej,
Pana prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina nr RIE-BD.512.54.2023 z dn. 25.07.2023 r.

1. Ocena ogólna pracy

Rozprawa doktorska mgr inż. Michała Siegmunda obejmuje zakres prac zmierzających do zweryfikowania możliwości stosowania metody odspajania skał poprzez wrywanie kotew i określenie parametrów efektywnej realizacji tego procesu. Dotychczasowa wiedza w tym obszarze dotyczyła wrywania kotew montowanych w betonie, którego charakter pęknięcia zdecydowanie różni się zarówno od zachowania skał o niskiej wytrzymałości jak i skał mocnych. Poszukiwanie technologii umożliwiającej urabianie fragmentów calizny bez destrukcji górotworu, która mogłaby stanowić alternatywę dla znanych i powszechnie stosowanych metod urabiania mechanicznego czy też przy zastosowaniu materiałów wybuchowych z wielu względów jest całkowicie uzasadnione. Wynika choćby z konieczności ograniczenia emisji gazów szkodliwych dla zdrowia i środowiska czy z potrzeby zapewnienia bezpieczeństwa prowadzonych robót w obszarze krytycznych budowli czy istniejących instalacji przemysłowych. Rozwój takiej technologii wymaga jednak zintensyfikowanych prac badawczo-rozwojowych mających na celu m.in. wyznaczenie empirycznego modelu niszczenia różnego typu skał w złożonym stanie naprężeń (dotychczas nie określonego), geometrii odspojenia czy sił krytycznych powodujących destrukcji różnych surowców skalnych. Dlatego uważam, iż podjęcie tego tematu przez Doktoranta było celowe i przemyślane, a tematyka rozprawy jest moim zdaniem w pełni uzasadniona. Wspomniane wyżej aspekty problemu zostały dostatecznie uwypuklone w części literaturowej, gdzie Autor m.in. przedstawił założenia idei odspajania większych brył skalnych za pomocą kontrolowanego wrywania kotew podcinających, przeanalizował mechanizmy uszkodzenia złącza kotwowego, istniejące modele analityczne, co pozwoliło na zdefiniowanie celu i zakresu koniecznych do zrealizowania prac badawczo-rozwojowych.

Rozprawa składa się z dziewięciu rozdziałów, w tym spisu literaturowego (194 pozycji wykorzystanych w pracy). Jakość prezentacji graficznej zawartej w pracy oceniam bardzo wysoko, rysunki wykonane są starannie i przejrzyste, a literatura cytowana bez większych uchybień. Układ pracy jest tradycyjny, zawiera część wstępną – literaturową (rozdział 1 i 2), przedstawienie celu i zakresu pracy (rozdział 3), część doświadczalną opisującą przyjętą procedurę badawczą, przebieg prowadzonych eksperymentów oraz analizę wyników badań

wraz z ich dyskusją (rozdziały 4-6). Rozdział 7 zawiera opisane możliwości użytecznego zastosowania technologii poprzez adaptację wyników i analiz do zmodyfikowanej metody, opartej o ideę rozpięcia kotwy w otworze. W tej części pracy Autor wskazuje również kierunki dalszych prac oraz opisuje budowę prototypowego rozwiązania głowicy odspajającej wykorzystującej mechanizm śrubowy oraz multiplikator momentu. Podsumowanie i wnioski wyciągnięte na podstawie przeprowadzonych badań ujęto w rozdziale 8. W pracy zawarto również dwa załączniki, które stanowią zestawienie wyników badań in-situ oraz wygenerowane przekroje odspojenia dla każdej próby badawczej we wszystkich typach skał.

Zaletą pracy jest logiczny układ podporządkowany konkretnemu celowi. W przypadku prac naukowych polegających na ocenie wpływu określonych parametrów na skuteczność zachodzących procesów fizycznych, istotne jest przedstawienie założeń modelowych pozwalających na ocenę zakresu stosowalności otrzymanych wyników. Doktorant podjął się zadania i na podstawie wyników prowadzonych badań laboratoryjnych wytypowanych rodzajów skał, które dalej wykorzystał do prowadzenia symulacji numerycznych wrywania kotew w programie MES ABAQUS, badań in-situ w różnym układzie kotew za pomocą autorskiej podpory badawczej oraz opracowanego modelu empirycznego zniszczenia materiału skalnego opartego o sieci neuronowe i analizę regresji pozyskał nową wiedzę w zakresie kształtowania się siły wrywającej kotwę F oraz zasięgu Z i objętości V potencjalnego odspojenia. Chciałbym wyraźnie podkreślić duże znaczenie użyteczne podjętych działań, których efekty istotnie poszerzają wiedzę na temat przebiegu niszczenia struktur skalnych pod działaniem obciążenia wynikającego z oddziaływania kotwy podcinającej i technik mocowania elementów konstrukcji w surowym górotworze.

Na uwagę zasługuje zaproponowana przez Doktoranta wieloetapowa procedura badawcza obejmująca zarówno badania eksperymentalne wrywania kotew podcinających in-situ, badania laboratoryjne parametrów fizyko - mechanicznych pobranych próbek skalnych jak i badania numeryczne. Zbieżność uzyskanych wyników zasięgu odspojenia w symulacjach numerycznych z otrzymanymi podczas badań terenowych stanowiła podstawę do opracowania przez Doktoranta nowego modelu teoretycznego odspajania brył skalnych, pozwalającego na szacowanie ich zasięgu odspojenia pod działaniem kotwy podcinającej.

Znaczącym dokonaniem poznawczym Autora są wyniki bardzo licznie (wykonano 172 próby) prowadzonych badań odspojenia fragmentu materiału skalnego za pomocą utwierdzonych w nim kotew, gdzie powierzchnię podstawy stożka, powierzchnię odspojenia oraz ich objętość Autor wyznaczył na podstawie skanów 3D. Takie podejście pozwoliło na uzyskanie przekrojów odpowiadających ekstremalnym zasięgom propagacji szczeliny odspajającej. Doktorant wykazał, że dla badanych, efektywnych głębokości kotwienia oraz parametrów mechanicznych badanych skał, zasięg powierzchni zniszczenia Z jest znacznie większy, niż to wynika z dotychczasowych procedur obliczeniowych stosowanych w konstrukcjach betonowych, a kształt powierzchni nie jest kształtem stożka, wynikającym z zakładanych dotychczas analizach. Dowiódł również, że wartość kąta stożka zniszczenia ośrodka skalnego jest znacząco mniejsza, niż wynika to z metody CCD stosowanej w obliczeniach mocowań kotew w betonie. Są to bez wątpienia konkluzje o istotnym znaczeniu dla planowania rozmieszczenia kotew w technice odspajania skał zaproponowanej przez Doktoranta.

Doktorant wykazał się interdyscyplinarnymi kompetencjami, o czym świadczy chociażby fakt wykorzystania przez Niego do weryfikacji i adaptacji stanu wiedzy dotyczącej tematyki odspojenia brył skalnych autorskich modeli zbudowanych w oparciu o regresję statystyczną jednoczynnikową oraz wieloczynnikową. Na podstawie zebranych danych o parametrach mechanicznych skał w górotworze, podjął się również próby zbudowania modelu sieci neuronowych prognozujących wielkości wynikowe opisujące proces odspojenia.

Wysoko oceniam również zaproponowane przez Doktoranta podejście do badań symulacyjnych z wykorzystaniem metody elementów skończonych, którymi posłużył się do określenia optymalnego układu kotew, dążąc do określenia efektywnej głębokości kotwienia kotew w zespole, skutkującej równomiernym obciążeniem w trakcie wyrywania każdej z nich (rozdz. 6). Autor wykazał, że dla badanych głębokości kotwienia oraz parametrów mechanicznych analizowanych skał, zasięg powierzchni zniszczenia jest znacznie większy, niż to wynika z dotychczasowych procedur obliczeniowych stosowanych w konstrukcjach betonowych, a jej kształt zupełnie nie przypomina stożka, który w tych oszacowaniach jest zakładany. Wysoko oceniam zarówno etap przygotowania do badań związany z wyborem modelu opisującego mechanikę zniszczenia, określeniem geometrii modelu, stopni swobody czy modelu tarcia w kontakcie powierzchni jak i uzyskane efekty dla przyjętych wariantów symulacji. Przeprowadzone analizy w pierwszej kolejności dotyczyły zagadnienia kształtowania się zasięgu odspojień Z podczas wyrywania pojedynczej kotwy z zastosowaniem modelu płaskiego ze zdyskretyzowanym działaniem siły, gdzie obciążenie kotwy zastępowano równoważnym, sumarycznym obciążeniem od sił składowych mocowanych w węzłach siatki elementów skończonych zlokalizowanych w stożkowym podcięciu modelu. Niesatysfakcjonujące wyniki, obarczone błędem wynikającym z braku uwzględnienia wpływu współczynnika tarcia μ na przebieg i zasięg szczeliny odspajającej skutkowały powtórzeniem symulacji dla pojedynczej kotwy modelem osiowo-symetrycznym, lepiej oddającym rzeczywiste zachowanie się układu kotew – skała. Kolejne symulacje dotyczyły zniszczenia podczas wyrywania układów wielokotwowych tj. dla układu dwóch i trzech kotew, podczas których Doktorant wyznaczał efekt interakcji stożków zniszczenia zależnie od odległości osi tych kotew i głębokości kotwienia. Wykazał przy tym występowanie interakcji stożków zniszczenia rzędu 5,0-5,4 co jest wartością znacząco większą w porównaniu do zalecanej metody CCD. Uzyskane wyniki wskazują na wyraźny wpływ wartości kąta stożkowej części kotwy podcinającej, jak i współczynnika tarcia kotwy o ośrodek na zasięg ścieżki zniszczenia. Dodatkowo w tej części pracy, Autor przeprowadził analizę możliwości potencjalnego, naturalnego rozdrabniania skały w strefie stożka zniszczenia pod wpływem kotwy podcinającej uzyskując propagację strefy zniszczenia, szczeliny promieniowej oraz deformacji ośrodka skalnego.

2. Uwagi do pracy.

Autor nie ustrzegł się drobnych błędów bądź niejasności rodzących następujące pytania/uwagi dyskusyjne:

- Autor w rozdziale 4.2.1. przedstawił wyniki badań laboratoryjnych pobranych próbek skalnych, wyznaczając m.in. wytrzymałość na rozciąganie bezpośrednio wyznaczone na podstawie wykonanych prób rozciągania metodą brazylijską. W tym celu przyjął współczynnik proporcjonalności równy $k_b=0,52$. Proszę o komentarz dotyczący wyboru takiej wartości, skoro wg. Tomiczka współczynnik ten może przyjmować wartość w zakresie $0,2 \div 0,9$. Poza tym, proszę wyjaśnić jak traktować wyniki badań ujęte

w tabeli 1, czy są to wartości uśrednione? Jeśli tak jest, to należałoby w pracy umieścić więcej szczegółów np. liczebność próbek czy chociażby statystyki zmienności własności dla każdego rodzaju skały przyjętej do badań. Znaczenie tego podkreśla fakt, że w kolejnym rozdziale 4.2.2 przywołano badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie σ_c i rozciąganie σ_T wykonane w innym laboratorium, dla tych samych próbek, jednak wyniki istotnie się różnią. Dla przykładu, w przypadku piaskowca BRENNA wartość σ_c wyznaczona w laboratorium Politechniki Lubelskiej jest aż o ok. 63% większa.

- Na rys. 52 przedstawiono zestawienie średnich wartości zakresu odspojenia Z_{av} w poszczególnych próbach badawczych, wraz z zaznaczoną linią trendu oraz współczynnikiem determinacji R-kwadrat, dla różnych rodzajów skał. Z uwagi na niskie wartości R^2 mam wątpliwość związaną z doбором przyjętych linii trendu. Dlaczego akurat Doktorant wybrał domyślną funkcję liniową i czy przeprowadzono próby dopasowania wyników przy użyciu innych funkcji aproksymujących?
- Zestawienie rejestrowanych przekrojów strefy zniszczenia w rozdziale 4.7 prezentuje schematy odspajania oraz dane przedstawione w tabelach. Warto zauważyć, że przekroje te ukazują płaski kształt powierzchni urabianej skały, który został zmapowany przy użyciu skanera 3D. Czy zatem należy uznać, że wszystkie badania były prowadzone wyłącznie na powierzchniach idealnie płaskich? Ponadto, czy objętości odspojenia, odnosi się do objętości stożka poniżej jego podstawy, czy może obejmuje całą ilość odspojonej masy (szczególnie w przypadku skał o zróżnicowanej powierzchni)? Być może te informacje wynikają z geometrii, która została uzyskana podczas skanowania obszaru przed i po procesie urabiania.
- W rozdziale 5.1.1. Autor używa pojęcia wykładnika potęgowego n w modelach. Proszę wyjaśnić co oznacza ta wartość i dlaczego jest istotna w kontekście prowadzonych analizy. Poza tym, proszę o komentarz dotyczący wyboru przyjętego modelu regresji. Właściwa zależność opisująca model powinna być dobrana wg ściśle określonych kryteriów np. wskaźnik determinacji, błędu dopasowania, analiza reszt, walidacji krzyżowej czy test istotności współczynników? Dopiero na tej podstawie można dobrać model o najlepszym dopasowaniu. Inną sprawą jest interpretacja zmian parametrów współzależnych. Czy Autor może wyjaśnić fizyczne podstawy do stosowania właśnie tego modelu?
- Opisując model regresji wieloczynnikowej w rozdziale 5.1.2. uważam, że Doktorant powinien dostarczyć czytelnikowi objaśnień dotyczących znaczenia współczynników "a", "n", i "m". Należałoby doprecyzować, że "a" jest współczynnikiem skalującym, a "n" i "m" to wykładniki potęg określające charakter zależności między zmiennymi.
- Na rys. 69 Autor porównał zależności sił wrywania w funkcji efektywnej głębokości kotwienia uzyskane według metody CCD z krzywymi wyznaczonymi na podstawie badań terenowych. Można zaobserwować duże różnice pomiędzy wynikami empirycznymi, a modelem szczególnie dla przypadku piaskowca z kopalni GUIDO. Ponieważ nie znalazłem w pracy dyskusji na ten temat, czy też wskazania ewentualnych przyczyn takiego stanu, proszę Doktoranta o krótki komentarz?

- W rozdziale 5.4. Autor do przeprowadzenia analizy oddziaływania kotwy podcinającej na skałę zaproponował zastosowanie sieci neuronowych, dla których utworzono kilka modeli sieci, zmieniając liczbę warstw ukrytych, liczbę neuronów w każdej warstwie ukrytej oraz parametry treningowe. W tekście można znaleźć zdanie, które brzmi następująco: „we wszystkich sieciach jedna warstwa ukryta była wystarczająca do uzyskania dobrej predykcji danej wielkości wyjściowej”. Takie stwierdzenie sugeruje, że zastosowane narzędzie w postaci sieci neuronowej jest "zbyt wyszukany działaniem optymalizacyjnym" dla analizowanego zagadnienia, skoro można z powodzeniem prognozować poszukiwane zmiany z wykorzystaniem prostej regresji. W tym samym rozdziale w tab. 12 przedstawiono podsumowanie działania 5 najlepszych sieci do prognozowania wartości kąta stożka zniszczenia. W przypadku sieci 4 błęd uczenia okazał się być większy od błędu samego testowania i walidacji. Proszę o krótką interpretację takiego wyniku?
- Podzielim konkluzję Doktoranta ujętą w rozdz. 5.4. o trudnościach w wyborze najlepszej sieci neuronowej, szczególnie wtedy gdy otrzymujemy wiele modeli o zbliżonej jakości. To wynika m.in. z tego, że proces trenowania sieci jest stochastyczny i zależy od początkowo przyjętych wag, algorytmów optymalizacyjnych itp. Stąd też nasuwa się pytanie: Jakie praktyczne podejścia można zastosować do zarządzania zróżnicowanymi wynikami uzyskiwanymi w wyniku treningu różnych modeli sieci neuronowych? Czy tworzenie zespołów modeli (ensemble models) jest skuteczną strategią i jakie są inne metody poprawiania jakości predykcji w kontekście różnic wynikających z procesu trenowania sieci neuronowych. Proszę Doktoranta o krótki komentarz.
- podczas lektury pracy zauważyłem kilka mało istotnych potknięć redakcyjnych. Najważniejsze z nich to:
 - 70₂ (co oznacza stronę 70, od dołu 2 wiersz) błędne odniesienie do rysunku, powinno być rys. 61, poza tym powinno być „przekroje”
 - Rozdział 5.1.1: mylące jest używanie różnych nazw modeli regresji, takich jak "model regresji" i "funkcja trendu",
 - 79₃ dwukrotne użycie zwrotu „jest mniejsza”
 - 104₂ „zazumienie danych” jest określeniem dość potocznym, lepiej użyć zwrotu „duża liczba zakłóceń danych”
 - na str. 160 w dwóch ostatnich akapitach Autor powtarza konkluzje na temat wyników prowadzonych badań symulacyjnych MES

Przedstawione powyżej komentarze nie umniejszają mojej wysokiej oceny recenzowanej pracy. Podjęcie tematu badań w rozprawie było uzasadnione jego dużym znaczeniem poznawczym i użytkowym, a uzyskane wyniki w pełni odpowiadają postawionemu celowi badawczemu. Należy podkreślić, że realizacja postawionych zadań badawczych przez Doktoranta odznaczała się bardzo dużą starannością w zakresie doboru czynników wpływu, zastosowanych metod doświadczalnych oraz sposobu prowadzenia badań symulacyjnych i eksperymentalnych, co stwarza podstawy do wysokiej wiarygodności uzyskanych wyników i właściwego wnioskowania.

4. Wniosek końcowy.

W przedstawionej do recenzji pracy Doktorant wykazał umiejętność formułowania celów badawczych, samodzielnego prowadzenia badań, odpowiedniego rozwiązywania zagadnień teoretycznych i eksperymentalnych, a także umiejętność wnioskowania w oparciu o wyniki prowadzonych badań. Praca poszerza wiedzę w zakresie niszczenia struktur skalnych, pod działaniem obciążenia wynikającego z oddziaływania kotwy podcinającej. Sposób rozwiązania problemów naukowych i badawczych świadczy o bardzo dobrym opanowaniu wiedzy przez Doktoranta. Recenzowana praca mgr inż. Michała Siegmunda pt. „Metoda odspajania skał z użyciem kotew” tematycznie mieści się w reprezentowanej przez Niego dyscyplinie naukowej oraz spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim w myśl art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki w związku z Art. 179 ust. 2 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Na tej podstawie wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej wniosek o dopuszczenie mgr inż. Michała Siegmunda do publicznej dyskusji na temat rozprawy.

