

Katowice, 10.12.2022r.

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Mutke
Zakład Geologii, Geofizyki i Ochrony Powierzchni
Główny Instytut Górnictwa
Katowice, Plac Gwarków 1

Recenzja

Rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Eweliny Lier
pod tytułem: „*Opis parametrów drgań gruntu wywołanych wstrząsami górotworu
uwzględniający kierunkowość tłumienia fal sejsmicznych*”

Rozprawa doktorska została opracowana na Politechnice Śląskiej w Gliwicach pod kierunkiem promotora Pana dr hab. inż. Piotra Bańki, prof. Politechniki Śląskiej

1. Informacje wstępne

Podstawą wykonania recenzji była uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 22.09.2022 Roku oraz pismo Przewodniczącego Rady, Pana prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina, z dnia 11.10.2022r. o znakach RIE-BD.512.44.2022.

Przewód doktorski prowadzony jest na podstawie Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach naukowych i tytule w zakresie sztuki w związku z art. 179 ust. 2 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Zgodnie z wymogami Ustawy rozprawa doktorska powinna być "*oryginalnym rozwiązaniem przez Doktoranta określonego zagadnienia naukowego oraz wykazywać jego ogólną wiedzę teoretyczną w danej dyscyplinie naukowej i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej*". Do tych trzech wymagań ustawowych recenzent odniósł się w ocenie przedmiotowej rozprawy doktorskiej.

2. Struktura rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska posiada 126 stron objętości, plus załączniki na dysku CD. Zawiera 11 głównych rozdziałów, spis literatury obejmujący 81 pozycji, spis tabel z 23 pozycjami i spis rysunków z 44 pozycjami. Tekst rozprawy poprzedzony jest jej streszczeniem w języku polskim i angielskim oraz spisem treści.

W rozdziale 2 doktorantka zebrała literaturowe wyniki wybranych badań drgań gruntu indukowanych eksploatacją górnictwem. W rozdziale 3 przedstawiona została teza pracy: "*istnieje związek między przebiegiem zaburzeń tektonicznych obszaru górnictwem kopalni a rozkładem maksymalnych amplitud przyspieszeń (prędkości)*

drgań powierzchni terenu generowanych przez wstrząsy górotworu indukowane prowadzoną działalnością górniczą" oraz cel pracy: *"określenie wpływu występujących zaburzeń tektonicznych na anizotropię rozchodzenia się drgań gruntu wywołanych wstrząsami indukowanymi prowadzonymi działaniami górniczymi"*. W kolejnych rozdziałach (4-6) doktorantka przedstawiła na podstawie literatury przedmiotu teoretyczne podstawy stanu badań problematyki prognozy i oddziaływania sejsmicznych wstrząsów górotworu na powierzchnię (amplifikacja drgań, eksploracja danych z podziałem na analizę regresji i sztuczne sieci neuronowe). Następnie w rozdziałach 7-8 przedstawiono charakterystykę 2 rejonów badawczych, ze szczególnym uwzględnieniem zagrożenia sejsmicznego i tektoniki. Rozdział 9 to jeden z najważniejszych rozdziałów w pracy, opisujący wyniki analizy parametrów drgań gruntu, w tym amplifikację drgań pod stanowiskami sejsmicznymi oraz mapy rozkładu przyspieszenia drgań dla trzech modeli regresyjnych z pominięciem energii sejsmicznej (1- izotropowy ośrodek, w którym spadek amplitud związany z rozpraszaniem geometrycznym i tłumieniem niesprężystym są niezależne od kierunku, 2- anizotropowy ośrodek, w którym rozpraszanie i tłumienie są zależne od kierunku oraz 3- ośrodek, w którym tłumienie niesprężyste jest zależne od kierunku, a rozpraszanie geometryczne niezależne od kierunku, oraz w wariantach z uwzględnieniem i bez uwzględnienia amplifikacji drgań). W rozdziale tym badano również rozkład pola przyspieszeń drgań gruntu, wykorzystując model sieci neuronowych tj. model bazujący na energii sejsmicznej i odległości epicentralnej od stanowiska oraz model uwzględniający dodatkowo parametry odpowiadające za kierunkowość tłumienia drgań. W rozdziale 10 przedstawiony został przykład praktycznego zastosowania wybranych modeli, uwzględniających kierunkowość tłumienia drgań do opisu pola przyspieszeń. Rozdział 11 to podsumowanie i wnioski.

Należy podkreślić, że w spisie literatury znajdują się dwie pozycje, w których doktorantka jest współautorem.

2. Ocena oryginalności problemu badawczego

W rozprawie doktorskiej pt. *„Opis parametrów drgań gruntu wywołanych wstrząsami górotworu uwzględniający kierunkowość tłumienia fal sejsmicznych”* doktorantka podjęła się badania bardzo istotnego, ale skomplikowanego i trudnego zagadnienia, jakim jest rozkład pola przyspieszeń dla wstrząsów zlokalizowanych blisko uskoków tektonicznych. W dotychczasowej praktyce obliczeniowej w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW), kierunkowość drgań standardowo nie była uwzględniana we wzorach empirycznych, tzw. GMPE (Ground Motion Prediction Equation). Do tej pory standardowo stosowano wzory uwzględniające wpływ energii sejsmicznej (Magnitudy), odległość epi- lub hipocentralną oraz amplifikację drgań. Jedynie w pracach Dubiński i inni (2005) – zastosowano

obliczenia współczynnika radiacji dla znanego mechanizmu ogniska wstrząsu sejsmicznego oraz Chodacki (2019, 2020) – zastosowano modelowanie metodą elementów spektralnych pola przyspieszenia drgań, z uwzględnieniem mechanizmu ogniska indukowanego wstrząsu górotworu, z którym związana jest kierunkowość emisji fal sejsmicznych. Dopiero w pracy Bańka i inni (2020) zastosowano zmodyfikowane równanie GMPE dla modelu anizotropowego, uwzględniające kierunkowość rozchodzenia się drgań w górotworze, przez przyjęcie założenia, że przemieszczające się czoło fali ma kształt elipsoidy obrotowej, która jest obrócona wokół osi pionowej. Badania kierunkowości drgań w sejsmologii globalnej są natomiast prowadzone intensywnie od wielu lat i uwzględniane w prognozie pola przyspieszenia/prędkości drgań (np. Boore and Joyner (1978), Abrahamson (2000), Spagnuolo (2009), Boore (2010), Spudich and Chiou (2008)) i ostatnio dla sejsmiczności indukowanej Ameri i inni (2020).

Kierunkowość propagacji drgań może mieć związek z mechanizmem ogniska wstrząsu oraz z amplifikacją drgań przez warstwy nadkładu, a jej wyznaczenie z pewnością jest ważne dla oceny intensywności drgań i ich oddziaływanie na zabudowę powierzchniową i ludzi. Badanie parametrów pola falowego indukowanych wstrząsów sejsmicznych z uwzględnieniem kierunkowości tłumienia fal sejsmicznych, jest niewątpliwie oryginalnym problemem badawczym. W przedmiotowej dysertacji kierunkowość drgań badana jest w związku z linią biegu (azymutu) bliskiego uskoku. Doktorantka w przedmiotowych obliczeniach, uwzględniła nie tylko oryginalne modele analizy regresji, ale również pierwsze obliczenia rozkładów izolinii przyspieszenia drgań powierzchni, oparte na wykorzystaniu sieci neuronowych.

Powołania literaturowe w powyższym rozdziale recenzji:

Chodacki J. 2020: *Simulation of Ground Motion in a Polish Coal Mine Using Spectral-Element Method*. *Journal of Seismology*. <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09911-w>

Chodacki J. 2019. *Zastosowanie metody elementów spektralnych do określania drgań gruntu od wstrząsów górniczych*. *Przegląd Górniczy* nr. 9. Str. 21-27.

Spagnuolo E..2009. *Fault Directivity and Seismic Hazard*. *Ph.D Thesis In Geophysics*. UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI GENOVA.

Boore D.M. (2010). *Orientation-independent, nongeometric-mean measures of seismic intensity from two horizontal components of motion*, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100: 1830–1835. Boore D.M., Joyner W.B. (1978). *The influence of rupture incoherence on seismic directivity*, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 68: 283–300.

Spudich P., Chiou B.S.-J. (2008). *Directivity in NGA earthquake ground motions: Analysis using isochrone theory*, *Earthq. Spectra*, 24: 279–298.

Abrahamson N.A (2000). *Effects of rupture directivity on probabilistic seismic hazard analysis*, *Proceedings, 6th International Conference on Seismic Zonation, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA*.

Ameri G., Martin Ch., Oth A. 2020. *Ground-Motion Attenuation, Stress Drop, and Directivity of Induced Events in the Groningen Gas Field by Spectral Inversion of Borehole Records* . *Bulletin of the Seismological Society of America*. 110 (5): 2077–2094. <https://doi.org/10.1785/0120200149>

Ocena rozprawy doktorskiej

Doktorantka nakreśliła sobie ambitny cel pracy, którym jest *"określenie wpływu występujących zaburzeń tektonicznych na anizotropię rozchodzenia się drgań gruntu wywołanych wstrząsami indukowanymi prowadzonymi działaniami górniczymi"*. Dla realizacji tego celu wykonała obliczenia do sejsmiczności z dwóch różnych rejonów badawczych, wykorzystując modele równań GMPE dla ośrodka izotropowego i anizotropowego oraz sieci neuronowe. Dla każdego wstrząsu z rejonu 1 i 2 oszacowane zostały mapy rozkładu przyspieszenia dla trzech modeli regresyjnych (1 – uwzględniający model izotropowy górotworu, 2- model uwzględniający anizotropię (rozpraszanie geometryczne i tłumienie niesprężyste jest kierunkowe) oraz 3- model uwzględniający kierunkowość tylko tłumienia niesprężystego) i dla dwóch wariantów, tj. z uwzględnieniem zróżnicowania współczynnika amplifikacji drgań oraz bez uwzględnienia amplifikacji. Ostatecznie najlepszą zgodność otrzymano dla modelu 2 bez amplifikacji. Tak uzyskane aproksymacje danych pomiarowych (w każdym zbiorze było tylko kilka danych – dlatego aproksymacja a nie regresja), posłużyły do wstępnego oszacowania kierunkowości drgań, czyli wyznaczenia modelu anizotropowego. Wyniki wykazały, że 53% z 218 analizowanych zdarzeń z rejonu 1 charakteryzowało się kierunkowością rozchodzenia się drgań w przybliżeniu zgodną z azymutem uskoku zlokalizowanego w bliskiej odległości od wstrząsu, natomiast w rejonie 2 dla 78% z 220 analizowanych zjawisk sejsmicznych. Tym samym cel rozprawy doktorskiej został osiągnięty, wskazując procentowy udział zjawisk o kierunkowej charakterystyce emisji drgań.

Dużo trudniejsza do udowodnienia jest teza dysertacji zakładająca, że *"istnieje związek między przebiegiem zaburzeń tektonicznych obszaru górniczego kopalni a rozkładem maksymalnych amplitud przyspieszeń (prędkości) drgań powierzchni terenu generowanych przez wstrząsy górotworu indukowane prowadzoną działalnością górniczą"*. Do udowodnienia tezy pracy dalszej ocenie poddano utworzone zbiory, dla których wykonane aproksymacje wykazały występowanie kierunkowości rozchodzenia się drgań, w przybliżeniu zgodnej z linią biegu uskoku położonego blisko ogniska wstrząsu. Dla poszczególnych uskoków wyznaczono parametry regresji dla modelu 2 bez amplifikacji, ale już z uwzględnieniem energii sejsmicznej w równaniu GMPE. Następnie sprawdzono czy parametry równania dla każdego uskoku, będą nadal wskazywały na kierunkowość drgań zgodną z danym uskokiem, przez wykonanie obliczeń dla hipotetycznego wstrząsu o współrzędnych epicentrum, obliczonych, jako średnia geometryczna dla danego zbioru. Na rysunkach 9.11-9.23 pokazano graficznie wyniki obliczeń dla każdego zbioru i naniesiono przebieg właściwych uskoków. We wszystkich przypadkach potwierdzono, że wyznaczone parametry równania 6.3 potwierdzają kierunkowość tłumienia drgań, zgodną z azymutem biegu wybranego uskoku. Tym samym udowodniono tezę pracy przy

zastosowaniu równań regresji GMPE, uwzględniających kierunkowość rozpraszania geometrycznego i tłumienia niesprężystego. Oczywiście wynik ten dotyczy tylko tych 53% przypadków z 1 rejonu oraz 78% przypadków z rejonu 2. Ponadto dalsza analiza powyższych danych wykazała, że parametr równania „ p ” odpowiadający za przemieszczenia wzdłuż osi x nie zależy od odległości, azymutu i zrzutu uskoku, natomiast parametr „ q ” odpowiadający za obrót wokół osi z , ma związek z azymutem uskoku. Zdaniem recenzenta taka zależność powinna wystąpić z pewnością dla wstrząsów sejsmicznych z mechanizmem „double-couple”, których źródło sejsmiczne zlokalizowane jest na bliskim uskoku. W takim przypadku kierunkowość emisji związana jest z modelem radiacji sejsmicznej dla określonych parametrów mechanizmu ogniska. Inne mechanizmy ognisk oraz lokalizacja zjawiska sejsmicznego poza uskoki, mogą dać różne wyniki propagacji i dystrybucji drgań, niezależne od azymutu biegu uskoku. Doktorantka wykonała również obliczenia dystrybucji przyspieszenia drgań wykorzystując sieci neuronowe i 2 modele obliczeniowe. Obliczenia nie wykazały znaczącej statystycznej różnicy między modelem podstawowym (energia i odległość) od modelu rozszerzonego o parametry opisujące uskok. W rozdziale 10 dokonano weryfikacji metod obliczeniowych na dwóch wybranych zdarzeniach sejsmicznych z 2 rejonów badawczych. Wyniki analizy regresji według modelu 2 potwierdziły kierunkowość drgań zgodną z azymutem biegu uskoku (Rys. 10.1 i 10.3) Jednak dla obliczeń wykonanych przy pomocy sieci neuronowych dla modelu anizotropowego, takiej zależności nie uzyskano, chociaż parametry dopasowania wartości obliczonych (estymowanych) do obserwowanych dla zdarzenia 2, były zdecydowanie lepsze niż dla modelu regresyjnego. Takie wyniki obliczeń wymagają jednak dalszych, pogłębionych badań. Być może wyniki obliczeń byłyby bardziej jednoznaczne, gdyby w analizie regresyjnej uwzględniono wiarygodnie wyznaczoną amplifikację drgań w miejscu lokalizacji stanowisk pomiarowych.

Wysoko oceniam badania przeprowadzone przez doktorantkę, w tym zastosowanie do obliczeń równań regresji uwzględniających kierunkowość drgań. Obliczenia pozwoliły zrealizować cel dysertacji i udowodnić tezę pracy. Stwierdzam również, że interpretacja wyników obliczeń przedstawiona we wnioskach generalnie jest poprawna. Należałoby jednak przeprowadzić dyskusję wyników próbującą wyjaśnić, dlaczego rezultaty uzyskiwane przy zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych, poprawiły wyniki dopasowania uzyskane przy zastosowaniu analizy regresji, ale nie wykazały kierunkowości drgań (np. rys. 10.2 i 10.4). Pewien niedosyt w dysertacji stanowi brak uzasadnienia wyników obliczeń, w aspekcie fizyki zjawiska kierunkowości tłumienia analizowanych wstrząsów sejsmicznych. Jednak wymagałoby to uzupełnienia badań o mechanizmy ognisk wstrząsów i wiarygodne oszacowanie amplifikacji drgań. Doktorantka posiadając odpowiednią wiedzę

geofizyczną podkreśliła jednak, że zastosowane modele obliczeniowe są bardzo uproszczone, niemniej pozwalają na udokumentowanie celu i tezy pracy.

Uważam, że ze względu na dużą wartość naukową i aplikacyjną uzyskanych wyników, powinny one zostać opublikowane. Należy podkreślić, że rozprawa została bardzo starannie zredagowana.

Uwagi o charakterze dyskusyjnym i krytycznym

W opinii recenzenta w rozprawie brakuje kompleksowego opisu metodyki badań, co znacznie poprawiłoby komfort czytania. Metodyka badań i obliczeń rozrzucona jest po całej pracy, co utrudnia ocenę przedstawionych osiągnięć, wyników i wniosków.

Amplifikacja drgań wyznaczana z równań nieliniowych według programu NERA, wymaga wiarygodnej znajomości parametrów charakteryzujących skały i grunty nadkładu - ich miąższość, prędkość propagacji fal poprzecznych oraz częstotliwość drgań. Według recenzenta dla analizowanych przypadków należało obliczyć amplifikację drgań z wykorzystaniem rzeczywistych rejestracji i wyznaczonej charakterystyki częstotliwościowej dla tych wstrząsów sejsmicznych. Zapewne takie obliczenia amplifikacji drgań byłyby dużo bardziej wiarygodne i być może pozwoliłyby na przyjęcie do ostatecznych analiz, modelu z uwzględnieniem amplifikacji drgań. Drugim rozwiązaniem mogłoby być zastosowanie metody Nakamury obliczania widma H/V do wyznaczenia amplifikacji drgań dla każdego stanowiska pomiarowego i dla każdego wstrząsu z osobna.

Z niektórych przykładów obliczeniowych, np. porównania wyników obliczeń z rys. 10.3 i rys. 10.4 wynika, że dopasowanie parametrów obliczeniowych do przyspieszeń zarejestrowanych jest lepsze dla oszacowanych techniką sieci neuronowych (tab. 10.4) niż dla wyników z analizy regresji (tab. 10.2). Jednak w rozwiązaniu uzyskanym z sieci neuronowych nie jest widoczna kierunkowość drgań i jej związek z azymutem uskoku Bieruńskiego. W tym przypadku wniosek o kierunkowość drgań związanej z azymutem uskoku jest co najmniej niejednoznaczny. Na przykładzie obliczeniowym z obszaru uskoku Rydułtowskiego, kierunkowy rozkład drgań obliczony analizą regresji (rys. 10.1), również różni się znacząco od rozkładu uzyskanego za pomocą sieci neuronowych. Dyskusyjne jest, więc stwierdzenie zapisane na stronie 111 dysertacji, że wyznaczone metodą sieci neuronowych rozkłady przyspieszenia drgań są ukierunkowane zgodnie z azymutami uskoku Rydułtowskiego i Bieruńskiego.

Na rysunkach 9.11 – 9.23 pokazane są rozkłady przyspieszenia na tle uskoku. Jednak drgania gruntu odnoszą się do powierzchni, a uskoki odwzorowane są z map pokładowych kilkaset metrów pod ziemią. Lepszym rozwiązaniem byłoby przeprowadzenie korelacji z azymutem uskoku na stropie karbonu, czyli dużo bliżej powierzchni terenu, na którym przyspieszenia są rejestrowane oraz obliczane.

Recenzent chciałby uzyskać podczas obrony odpowiedzi na następujące pytania:

1. W tabeli 9.2 podane są parametry do obliczania amplifikacji drgań w poszczególnych miejscach pomiarowych. Można z nich wyczytać, że np. dla ARP-4, ARP-3 oraz ARP-10 występują w litologii trzeciorzędowe ility o parametrze ciężaru objętościowego 21.5 kN/m^3 , a przypisano im różne prędkości propagacji fali poprzecznej „S”, odpowiednio 600 m/s, 220 m/s i 400 m/s. Jak wytłumaczyć tę różnicę.
2. Czy amplifikacja drgań dla zapisów prędkościowych i przyspieszeniowych, analizowanych w pracy zjawisk sejsmicznych, będzie różna czy taka sama i co wpłynie na wynik obliczeń?
3. W obliczeniach regresyjnych rozkładu pola przyspieszeń drgań gruntu przyjęto wiele uproszczeń. Nie uwzględniono osobno kierunkowości drgań wynikającej bezpośrednio z mechanizmu wstrząsu sejsmicznego. Nasuwa się pytanie, na ile wyznaczony rozkład pola przyspieszeń zależał od azymutu bliskich uskoku, a na ile od kierunkowości emisji sejsmicznej związanej ze ścinającym mechanizmem wstrząsu górotworu, np. związanym z położeniem linii frontu eksploatacji, filarów czy niewyeksplotowanych resztek pokładów węgla.
4. Proszę o wyjaśnienie (interpretację) przyczyny różnic w uzyskanych wynikach przedstawionych w rozdziale 10, dla dwóch badanych zdarzeń sejsmicznych analizą regresji i sieciami neuronowymi, w szczególności odnośnie różnic dotyczących kierunkowej i izotropowej dystrybucji przyspieszenia drgań, w zależności od metody obliczeniowej.

Kilka drobnych uwag porządkowych przed ewentualną publikacją pracy:

- str. 12 - praca Mutke 1991 (lit. 57) wykorzystywała regresję nieliniową, a nie jak doktorantka podała regresję liniową do prognozowania maksymalnych amplitud prędkości i przyspieszenia drgań podłoża.
- obliczenia regresji, a właściwie aproksymację wykonywano dla bardzo wielu wstrząsów sejsmicznych osobno, na które składały się małe zbiory danych (4-14). Wyniki przedstawiono w tabelach w załączniku 1 i 2. Trudno jest z tych tabel odczytać na ile obliczenia są zgodne z obserwacjami. W przypadku publikowania tej dysertacji, sugerowałbym zrobić proste wykresy wartości obserwowanych vs. obliczonych (estymowanych).

Sformułowane uwagi nie zmieniają wysokiej oceny rozprawy, chociaż recenzent ma świadomość wielu uproszczeń w przedstawionych obliczeniach.

Ogólna ocena dysertacji

Niewątpliwie rozprawa doktorska Pani mgr inż. Eweliny Lier wnosi nowatorskie rozwiązania do zagadnienia opisu parametrów drgań gruntu wywołanych wstrząsami górotworu, uwzględniającego kierunkowość tłumienia fal sejsmicznych. Opracowane przez doktorantkę rozwiązania metodyczne, mogą być z powodzeniem wykorzystane w codziennej praktyce prowadzonych obliczeń dystrybucji przyspieszenia drgań, z uwzględnieniem ośrodka anizotropowego. Oczywiście metodyka ta powinna być uzupełniona o model z amplifikacją drgań i mechanizmem wstrząsu sejsmicznego. Odpowiadając na pytania ustawowe stwierdzam, że przedstawione w pracy badania stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Doktorantka wykazała się dużą wiedzą merytoryczną. Pokazała, że potrafi odpowiednio zaplanować badania, zaproponowała nowe rozwiązania do równań empirycznych GMPE dla sejsmiczności indukowanej w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. W ten sposób udowodniła, że posiada umiejętności potrzebne do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt. *Opis parametrów drgań gruntu wywołanych wstrząsami górotworu uwzględniający kierunkowość tłumienia fal sejsmicznych*” jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego i świadczy dostatecznie o ogólnej wiedzy teoretycznej kandydatki w zakresie dyscypliny naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, a także o umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Uwzględniając powyższe stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Eweliny Lier, spełnia warunki określone w art. 13, ustęp 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595) oraz Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. i wnoszę, aby Rada Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej, dopuściła Panią mgr inż. Ewelinę Lier, do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim.

