

dr hab. inż. Adam Lurka, prof. Instytutu
Główny Instytut Górnictwa
Plac Gwarków 1
40-166 Katowice

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr Dariusza Nawrockiego na temat: „**Związki widma H/V drgań skrętnych i translacyjnych z przypowierzchniowymi warunkami geologicznymi**”.

1. Podstawa recenzji

Niniejszą recenzję opracowałem na zlecenie Rady Naukowej Instytutu Nauk o Ziemi Wydziału Nauk Przyrodniczych Uniwersytetu Śląskiego, pismo z dnia 11-04-2025 – dostarczone wraz z rozprawą doktorską jak w tytule recenzji. Rozprawa ujęta jest na 122 stronach druku komputerowego formatu A4 wraz z opublikowanymi artykułami. Spis literatury obejmuje 95 pozycji.

2. Wartość naukowa rozprawy

Oryginalność badań.

Przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska została przygotowana w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów, składającego się z trzech oryginalnych publikacji, przy czym w wszystkich trzech Doktorant jest pierwszym autorem. Przedstawione badania Doktoranta dotyczą aktualnej i ważnej dla sejsmologii górniczej tematyki analizy zjawisk sejsmicznych do badania związków widma H/V dla pomierzonych drgań translacyjnych i rotacyjnych uzyskanych metodą Nakamury z przypowierzchniowymi warunkami geologicznymi. Wszystkie analizowane zjawiska sejsmiczne w liczbie 210 są wynikiem działalności człowieka w górotworze, czyli mają naturę antropogeniczną. Rozprawa doktorska zawiera wyniki oryginalnych badań, które miały na celu wyznaczenie krzywych H/V dla drgań skrętnych i translacyjnych, zarejestrowanych przez dwa powierzchniowe stanowiska sejsmometryczne. Uzyskane wyniki pozwoliły na porównanie wartości częstotliwości rezonansowej pomiędzy wzajemnie sprzężonymi drganiami translacyjnymi i rotacyjnymi. Podstawowa oryginalność przedstawionych w pracy wyników i analiz przejawia się zastosowaniem w dysertacji metody Nakamury dla drgań rotacyjnych i zbadanie jej związków bądź rozbieżności z metodą Nakamury zastosowaną do drgań translacyjnych. Wyniki zawarte w dysertacji stanowią oryginalny wkład naukowy Doktoranta i są cennym dodatkiem w procesie analizy drgań sejsmicznych generowanych przez sejsmiczność indukowaną działalnością człowieka.

Wartość naukowa rozdziałów/artykułów.

Trzy artykuły stanowiące podstawę ocenianej rozprawy doktorskiej ukazały się w naukowych czasopismach o międzynarodowym zasięgu, które są wykazane na liście czasopism MNiSzW wraz z przypisaną im punktacją. Są to trzy czasopisma: (1) Applied Sciences, współczynnik wpływu IF=2.5 i 100 pkt. MNiSzW; (2) Frontiers in Earth Science, IF=2.0 i 100 pkt. MNiSzW; oraz (3) Geology Geophysics and Environment, IF=0.9 i 100 pkt.

W pierwszej z prac przedstawiono badania nad wpływem lokalnych warunków geologicznych (efektów lokalnych, ang. site effects) na drgania translacyjne i rotacyjne gruntu oraz na zależność skalującą między szczytowymi wartościami amplitud drgań translacyjnych i rotacyjnych, generowanymi przez wstrząsy antropogeniczne (górnictwo). Celem artykułu było zweryfikowanie, czy warunki lokalne w niezależny sposób modyfikują drgania rotacyjne podłoża, poprzez zastosowanie metody H/V do rotacji, oraz zbadanie wpływu tych efektów na relację skalującą łączącą szczytowe amplitudy drgań translacyjnych i rotacyjnych. Innymi słowy, autorzy dążyli do oszacowania wartości parametrów częstotliwości rezonansowej i współczynnika amplifikacji, osobno dla sygnałów rotacyjnych i translacyjnych oraz do określenia, jak uwzględnienie bądź pominięcie tych efektów wpływa na zależność między szczytowymi wartościami translacyjnych i rotacyjnych drgań gruntu. Wyniki przeprowadzonych badań ujawniły wyraźne różnice w efektach lokalnych między drganiami translacyjnymi a rotacyjnymi. Porównanie empirycznych widm H/V i T/R wykazało, że szczytowe amplitudy drgań rotacyjnych są wzmacniane znacznie słabiej niż translacyjnych – oszacowany współczynnik amplifikacji dla drgań rotacyjnych okazał się około 2–3 razy niższy niż dla odpowiadających im drgań translacyjnych. Ponadto, częstotliwości rezonansowe warstwy przypowierzchniowej dla drgań rotacyjnych są wyższe niż dla translacyjnych na obu badanych stanowiskach sejsmometrycznych. Autorzy sugerują, że drobnoskalowe nieciągłości geologiczne – np. intensywne spękania płytkich warstw lub obecność zwierciadła wody gruntowej mogą zmieniać charakter rezonansu drgań rotacyjnych, nie wpływając istotnie na rezonans drgań translacyjnych. Analiza relacji skalującej między szczytowymi amplitudami drgań rotacyjnych i translacyjnych wykazała istotny wpływ efektów lokalnych. Uzyskano wyraźną liniową zależność między szczytową prędkością rotacyjną (PRV) a szczytowym przyspieszeniem podłoża (PGA) o wysokim stopniu dopasowania ($R^2 > 0,85-0,90$). Liniowy model regresji bez wyrazu wolnego generalnie lepiej opisywał dane pomiarowe niż model regresyjny z wyrazem wolnym, co oznacza że liniowy model regresyjny między PRV a PGA przechodzi przez początek układu współrzędnych. Dla nieskorygowanych danych uwidaczniał się jednak niezerowy wyraz wolny b . Po usunięciu efektów lokalnych (korekcji amplitud drgań o współczynnik amplifikacji) zaobserwowano znaczące zmiany parametrów skalowania: nachylenie prostej regresji (współczynnik a) wzrosło w każdym przypadku (zarówno dla modelu łącznego, jak i osobnych stacji), natomiast wyraz wolny b uległ zmniejszeniu lub stał się nieistotny. Wnioski płynące z artykułu podkreślają, że warunki lokalne wywierają niezależny wpływ na drgania translacyjne

i rotacyjne podłoża. Nie można zakładać, że drgania rotacyjne doświadczają identycznej amplifikacji i rezonansu co drgania translacyjne i konieczne jest odrębne wyznaczanie tych parametrów dla obu typów drgań. Praca ta potwierdza możliwość zastosowania metody HVSR do analizy drgań rotacyjnych celem określenia ich charakterystyki oraz pokazuje, że pominięcie wpływu warunków gruntowych może prowadzić do błędnej interpretacji relacji między szczytowymi drganiami rotacyjnymi i translacyjnymi. Otrzymane rezultaty stanowią istotny wkład w rozwój sejsmologii rotacyjnej, wskazując na potrzebę uwzględniania indywidualnych warunków lokalnych przy analizie i modelowaniu zarówno drgań translacyjnych, jak i rotacyjnych generowanych przez sejsmiczność indukowaną.

W drugim artykule dokonano oszacowania częstotliwości rezonansowych sygnałów sejsmicznych dla szczytowych drgań rotacyjnych i szczytowych drgań translacyjnych generowanych przez wstrząsy górnicze, poprzez porównanie wyników uzyskanych dwoma metodami wyznaczania stosunku H/V: metodą analizy widma Fouriera (FSA) oraz metodą tzw. spektrów odpowiedzi (RSA). Autorzy postawili sobie pytanie, czy metoda spektrów odpowiedzi może znaleźć zastosowanie do analizy drgań rotacyjnych, oraz czy ewentualne różnice między krzywymi H/V wyznaczonymi tymi metodami są podobne. Porównanie krzywych H/V uzyskanych metodami FSA i RSA dla sygnałów translacyjnych wykazało zbliżone częstotliwości rezonansowe, jednak szczytowe amplitudy drgań oszacowane metodą RSA były niższe niż w przypadku metody FSA. Dla drgań rotacyjnych stwierdzono, że metoda FSA często identyfikuje wielokrotne lokalne maksima podczas gdy metoda RSA wyodrębnia głównie pojedynczy dominujący pik, upraszczając tym samym widmo H/V. Zaobserwowano systematyczne różnice między szczytowymi amplitudami drgań translacyjnych i szczytowymi amplitudami drgań rotacyjnych, przy czym te ostatnie w większości badanych przypadków dawały wyższe częstotliwości rezonansowe niż drgania translacyjne. W podsumowaniu artykułu stwierdzono, że metoda RSA zasadniczo pozwala na wyznaczenie głównej częstotliwości rezonansowej w zbliżonym zakresie jak metoda FSA, upraszczając interpretację w przypadkach wystąpienia wielokrotnych maksimów. Wiarygodność metody FSA okazała się jednak ograniczona, a przy jej użyciu nie można było jednoznacznie określić parametrów efektów lokalnych. W związku z tym autorzy zalecają traktować wyznaczania spektrum H/V metodą RSA jedynie jako narzędzie pomocnicze do weryfikacji głównego piku rezonansowego określonego metodą Nakamury.

Trzeci artykuł dotyczy badań nad wpływem rotacji układu współrzędnych na wyniki analizy spektrum H/V dla drgań rotacyjnych i translacyjnych pochodzących z wstrząsów górniczych. Celem tych badań było określenie, czy obrót układu odniesienia (zmiana orientacji poziomych składowych sejsmogramu) wpływa na wyznaczaną częstotliwość rezonansową i amplifikację oraz czy efekty te różnią się między drganiami translacyjnymi i rotacyjnymi. Zastosowana metodyka badawcza opierała się na metodzie Nakamury czyli obliczaniu stosunku widma składowej poziomej do pionowej dla drgań translacyjnych, rozszerzonej o analogiczny odpowiednik dla drgań rotacyjnych, określony jako TRSR. Główne wyniki pracy wskazują, że w przypadku drgań translacyjnych spektrum H/V wykazuje dwa wyraźne

maksima amplifikacji drgań odpowiadające dwóm częstotliwościom rezonansowym podłoża, podczas gdy dla drgań rotacyjnych występuje kilka takich maksimów, przy maksima dla drgań rotacyjnych ujawniają się na wyższych częstotliwościach. Stwierdzono, że średnie spektra H/V – zarówno dla drgań translacyjnych jak i rotacyjnych nie ulegają istotnym zmianom wraz ze zmianą orientacji układu współrzędnych tzn. wartości amplifikacji są zbliżone. Natomiast porównanie widm poszczególnych składowych dla różnych orientacji układu współrzędnych wykazało, że obrót układu odniesienia powoduje wyraźne fluktuacje wartości amplifikacji, a dla drgań translacyjnych zaobserwowano również niewielkie zmiany częstotliwości rezonansowej. Ilustracja tych zależności w postaci diagramów biegunowych (amplifikacja vs. kąt rotacji) ma kształt eliptyczny, co według autorów świadczy o anizotropii ośrodka na badanym stanowisku pomiarowym. Według autorów wnioski te sugerują, że drgania rotacyjne odzwierciedlają wpływ płytszych warstw geologicznych niż drgania translacyjne (z uwagi na wyższe częstotliwości rezonansowe widma rotacyjnego) oraz że częstotliwość rezonansowa i amplifikacja zależą od rodzaju i orientacji drgań. Oznacza to, że przy określaniu właściwości dynamicznych podłoża metodą Nakamury należy także uwzględniać ewentualną anizotropię badanego ośrodka.

3. Wartość merytoryczna rozprawy

W mojej opinii rozprawa zasługuje na wysoką ocenę pod względem merytorycznym. Doktorant umiejętnie wprowadza czytelnika w tematykę badawczą, a wszystkie potrzebne informacje zawarto w pierwszych 6 rozdziałach dysertacji. Techniki badawcze zostały opisane obszernie w 3 opublikowanych wcześniej artykułach oraz rozdziałach 7 i 8. Na ich podstawie można stwierdzić że Doktorant opanował różnorodny i nowoczesny warsztat badawczy, w tym metody analizy Fourierowskiej, spektrów odpowiedzi, metodę Nakamury oraz wyznaczanie składowych drgań sejsmicznych po rotacji układu współrzędnych. Warto też podkreślić, że Doktorant umiejętnie posługuje się narzędziami do analizy danych sejsmicznych. Sposób przedstawienia wyników i krytyczna ich analiza podlegały ocenie przez recenzentów trzech przedmiotowych publikacji będących podstawą rozprawy. Tym niemniej, na podstawie samych rozdziałów dysertacji można stwierdzić, że Doktorant potrafi krytycznie analizować i umiejętnie interpretować wyniki badań oraz dyskutować je na tle cytowanej literatury przedmiotu oraz potrafi poprawnie formułować wnioski. Oznacza to, że posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

4. Poprawność redakcyjna rozprawy

Dysertacja została poprawnie skonstruowana i uwzględnia wszystkie wymagane elementy rozprawy doktorskiej przygotowanej w formie zbioru artykułów. Zawiera streszczenia w języku polskim i angielskim, Wstęp zawierający wprowadzenie do tematyki badawczej oraz rozdział 6 obejmujący tezy i cele badawcze. Dodatkowo zawarto rozdział omawiający

najważniejsze metody zastosowane w trakcie badań, a mianowicie metodę Nakamury oraz metodę spektrów odpowiedzi do analizy zapisów drgań sejsmicznych. Dołączono 3 opublikowane artykuły naukowe oraz oświadczenia współautorów o indywidualnym wkładzie w każdą publikację. W rozdziale 10 obejmującym 10 stron maszynopisu Doktorant umiejętnie dyskutuje uzyskane w prezentowanych artykułach wyniki, na tle cytowanego piśmiennictwa zamieszczonego w rozdziale 12 i obejmującego 95 pozycji. Na podstawie uzyskanych rezultatów Doktorant sformułował wnioski i zamieścił je jako oddzielny rozdział.

5. Uwagi krytyczne

1. Na stronie 19 pada stwierdzenie „...jednakże zauważyć należy, że jest ona rekomendowana przede wszystkim do wyznaczania efektów lokalnych przy zastosowaniu spektrum fal typu S (Nakamura, 2000; Nakamura, 2019)”. Powinno jednak być, w myśl prac Nakamury, że zastosowano spektrum fali wielokrotnie odbitej typu S. Proszę o komentarz w tej sprawie?
2. Na stronie 11 podano, że „drgania skrętne ulegają zjawisku efektów lokalnych, osiągając inne niż w przypadku drgań translacyjnych wartości amplifikacji jak i częstotliwości rezonansowej, co świadczy, że efekty lokalne drgań skrętnych i translacyjnych pochodzą od struktur geologicznych zalegających na różnej głębokości”, a zaraz później na tej samej stronie, stwierdzono, że „Tendencja do osiągania różnych wartości częstotliwości rezonansowej i amplifikacji przez drgania skrętne i translacyjne nie wyklucza generowania rezonansu przez tę samą warstwę geofizyczną”. Obydwa stwierdzenia wydają się sobie wzajemnie zaprzeczać, proszę odnieść się do tej kwestii?
3. Na stronie 62 w Podsumowaniu pada stwierdzenie: „Powyżej przytoczone aspekty wpływają na postrzeganie niniejszej rozprawy doktorskiej za nowatorską i wnoszącą istotny wkład do wiedzy teoretycznej, praktycznej i pomiarowej w obszarze sejsmologii indukowanej”. W mojej ocenie dysertacja wnosi wkład do wiedzy praktycznej i pomiarowej, natomiast w żadnym stopniu nie wnosi nic do wiedzy teoretycznej. Proszę o komentarz w tej sprawie?
4. Na stronach 19 i 20 pada stwierdzenie, że „wzbudzenie drgań skrętnych zachodzi w źródle wstrząsu sejsmicznego, wskutek padania wygenerowanej fali translacyjnej na niejednorodności będące efektem generacji szczelin oraz sfałdowań w niniejszym źródle”. W źródle nie zachodzi wzbudzenie drgań skrętnych a jedynie translacyjnych typu podłużnego i poprzecznego, proszę o komentarz co Doktorant miał na myśli w powyższym stwierdzeniu?
5. Na stronie 11 podano, że „drganie skrętne są skutkiem propagacji drgań translacyjnych przez niejednorodny ośrodek skalny, nie pochodzą zatem od potencjalnie wygenerowanej fali sprężystej”. Zdanie to jest niezrozumiałe, tzn. co oznacza, że nie pochodzą one zatem od potencjalnie wygenerowanej fali sprężystej? Proszę o komentarz.

6. Na stronie 34 podano, że „Analiza falkowa sygnału jak również algorytm iteracyjny matching-pursuit pozwala na poznanie pełnego rozkładu spektrum częstotliwościowego danego sygnału z ujęciem zależności generacji określonych częstotliwości względem punktu w czasie”. Cały zawarty akapit jest zbędny w pracy, gdyż analiza falkowa oraz algorytm matching-pursuit nie są nigdzie w pracy ani omawiane ani stosowane.
7. Na stronie 57 w Podsumowaniu podano, że „Zważywszy na fakt, że analiza przeprowadzona była równolegle dla drgań translacyjnych i drgań skrętnych, zarejestrowanych wskutek wystąpienia tych samych zjawisk sejsmicznych, porównanie otrzymanych wyników było dokładne i miarodajne”. Otóż fakt, że analiza drgań translacyjnych i drgań skrętnych była prowadzona dla tych samych zjawisk sejsmicznych nie implikuje dokładności uzyskanych wyników. Proszę o komentarz.
8. Na stronach 19 i 20 pada stwierdzenie, że „Dodatkowo, wykazano zasadniczy wpływ rozmiaru fundamentu na otrzymywaną krzywą amplifikacji drgań skrętnych”. Proszę o komentarz, w jaki sposób dowiedziono tego zasadniczego wpływu rozmiaru fundamentu?

6. **Ocena końcowa.**

Oceniana rozprawa doktorska zawiera interesujące wyniki badań, które mają cechy odkryć naukowych. Rozprawa wskazuje, że Doktorant prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie „Nauki o Ziemi i Środowisku”, poprzez umiejętność interpretacji skomplikowanych wyników. Pragnę też zaznaczyć, że krytyczne uwagi zawarte w recenzji nie wpływają na moją wysoką ocenę przedłożonej mi do recenzji dysertacji.

Na podstawie przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej mgr Dariusza Nawrockiego pt.: „Związki widma H/V drgań skrętnych i translacyjnych z przypowierzchniowymi warunkami geologicznymi”, stwierdzam, że spełnia ona wymagania ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku, Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. 2023, poz. 742. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Adam Linka