

Katowice, 04-05-2021

dr hab. inż. Adam Lurka, prof. GIG
Główny Instytut Górnictwa
Katowice, Plac Gwarków 1

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Szuły na temat: **„Przestrzenne modele statystyczne w prognozowaniu parametrów drgań gruntu wywołanych sejsmicznością indukowaną”**.

1. Podstawa recenzji

Niniejszą recenzję opracowałem na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 25-02-2021 – dostarczone wraz z rozprawą doktorską jak w tytule recenzji. Rozprawa ujęta jest na 143 stronach druku komputerowego formatu A4. Spis literatury obejmuje 107 pozycji.

2. Treść rozprawy

Część merytoryczna pracy ujęta jest w 14 rozdziałach, w których Doktorant wprowadza w problematykę rozprawy, omawia stan zagadnienia w oparciu o analizę literatury przedmiotu, precyzuje tezę i cel pracy oraz przedstawia krytyczną analizę stosowanych metod estymacji szczytowych wartości poziomych prędkości oraz przyspieszeń drgań gruntu na terenach zagrożonych sejsmicznością indukowaną. W części merytorycznej opisane zostały podstawy liniowej regresji wielokrotnej stosowane w zagadnieniu wyznaczania parametrów relacji tłumienia drgań gruntu oraz związana z nią estymacja błędów. Rozważania Doktoranta oparte są na nieco zmodyfikowanej i powszechnie akceptowanej w sejsmologii relacji Joyner’a-Boore’a oraz na

statystycznym modelu autoregresji przestrzennej, które prowadzą go do nowych i ciekawych wyników opartych o statystykę matematyczną.

Rozdział 1 przedstawia problematykę badań drgań gruntu na powierzchni terenu spowodowanych występowaniem zagrożenia sejsmicznego w warunkach kopalń Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Doktorant przedstawia tutaj geologiczne, techniczne i ekonomiczne problemy związane z rejestracją drgań sejsmicznych na powierzchni generowanych zjawiskami sejsmicznymi indukowanymi działalnością górniczą. Nawiązuje też wstępnie do możliwości zastosowania statystycznych modeli przestrzennych do tego typu zagadnień. Rozdział 2 to krótkie i jasne sformułowanie celu i tezy pracy oraz podkreślenie, że zostanie wykorzystane zjawisko autokorelacji przestrzennej składnika resztowego do modyfikacji regresyjnego modelu Joyner'a – Boore'a. Rozdział 3 zawiera omówienie obecnego stanu wiedzy w zakresie monitorowania sejsmiczności indukowanej w rejonie Górnośląskiego Okręgu Węglowego odwołując się do szeregu prac naukowych powstałych na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat i dotyczących tego zagadnienia. Doktorant podkreśla znaczenie stosowanych metod geofizycznych do badania zjawisk sejsmicznych przedstawiając takie pojęcia jak: lokalizacja ogniska, energia sejsmiczna, amplifikacja drgań czy estymacja amplitudy prędkości i przyspieszenia drgań sejsmicznych. Doktorant dostrzega, że podstawowym w badanej tematyce jest problem estymacji szczytowej amplitudy prędkości i przyspieszenia drgań sejsmicznych określane powszechnie na świecie jako relacja tłumienia drgań lub relacja GMPE (skrót od angielskiego terminu Ground Motion Prediction Equation) i mający kluczowe znaczenie do oceny wpływu drgań sejsmicznych na obiekty na powierzchni terenu.

Rozdział 4 to kompendium wiedzy na temat zasady działania i równań klasycznego oscylatora harmonicznego z tłumieniem. Przedstawiono tutaj rozwiązanie równań tego oscylatora przy braku tłumienia, z tłumieniem oraz dla zadanej siły wymuszającej w postaci harmonicznej. Następnie przeprowadzono znane z literatury rozważania na temat zjawiska rezonansu oscylatora podkreślając przy tym, że analogiczne zjawisko zachodzi dla fal sejsmicznych dla przypowierzchniowej warstwy gruntu.

Rozdział 5 z kolei przedstawia na początku wyprowadzenie relacji tłumienia drgań gruntu z zasady zachowania energii dla kulistego frontu fali

oraz zakładając, że drgania sejsmiczne mają postać drgań tłumionego oscylatora harmonicznego opisanego w rozdziale 4. Omawiana postać relacji tłumienia drgań gruntu ma postać równania linowego wielu zmiennych, a do uzyskania współczynników tego równania Doktorant używa standardowej metody najmniejszych kwadratów. W następnym podrozdziale omawiane są metody statystycznej weryfikacji wieloliniowego modelu regresyjnego. Dla tego modelu wprowadzone zostają następujące pojęcia: współczynnik determinacji, skorygowany współczynnik determinacji, kryterium informacyjne Akaikego, macierz wariancji-kowariancji parametrów regresyjnego modelu liniowego, średni i absolutny błąd prognozy, błąd średniokwadratowy prognozy, błąd średniokwadratowy dla predykcji oraz przedziały ufności dla estymacji regresją wielokrotną. Doktorant przedstawia w tym rozdziale także konstrukcję testu statystycznego oceniającego istotność badanych parametrów modelu oraz podaje testy weryfikujące normalność i homoskedastyczność reszt liniowych równań regresyjnych. Po raz pierwszy pojawia się też koncepcja korelacji przestrzennej w postaci autokorelacji przestrzennej Pesarana. Rozdział 6 zawiera opis i podstawowe statystyki dla danych sejsmometrycznych pochodzących z obszaru górniczego charakteryzującego się wysokim poziomem sejsmiczności indukowanej. W rozdziale 7 przedstawiono estymację i weryfikację czterech, wybranych regresyjnych modelu relacji tłumienia drgań. Każdy z wybranych modeli poddano weryfikacji statystycznej w zakresie istotności ich współczynników oraz ich istotności statystycznej. Analizie poddano również składnik losowy oraz pokazano, że reszty w tych modelach wykazują przestrzenną korelację na poszczególnych stanowiskach pomiarowych, co wykazał wskaźnik korelacji sekcyjnej Pesarana. Od rozdziału 8 rozpoczyna się najistotniejsza część rozprawy dotycząca przestrzennej analizy struktury danych sejsmometrycznych i wprowadzająca podstawowe pojęcia miar geostatystycznych. Rozdział 9 zawiera rozwinięcie koncepcji korelacji przestrzennej danych sejsmometrycznych powołując się na wstępnie na prawo Toblera zaczerpnięte z geografii głoszące, że wszystko jest ze sobą powiązane, a obiekty bliskie, w sensie przestrzennym, są ze sobą bardziej powiązane niż odległe. Chodzi tutaj oczywiście nie o samą bliskość obiektów a o dużą korelację statystyczną obiektów leżących blisko siebie. W rozdziale 9 wprowadzono kluczowe statystyki dla reszt stosowane przez Doktoranta w

dalszym procesie analizy danych sejsmometrycznych, a mianowicie statystyki Morana i Geary'ego. Na podstawie tych dwóch statystyk oraz trzech rodzajów macierzy wag przestrzennych wykazano, że istnieje zjawisko korelacji przestrzennej reszt badanych relacji tłumienia drgań dla poszczególnych stanowisk sieci sejsmometrycznej. Rozdziały 10 i 11 posłużyły Doktorantowi do zbadania trzech przestrzennych modeli regresyjnych: modelu SAR (Spatial Autoregressive Model), modelu SEM (Spatial Error Model) oraz modelu SCM (Spatial Cross-Regressive Model). Poprzez weryfikację odpowiednio dobranych hipotez statystycznych dotyczących parametrów modeli autoregresji przestrzennej Doktorant dokonał wyboru modelu SEM jako najbardziej odpowiedniego modelu przestrzennego dla analizowanych danych sejsmometrycznych. Rozdział 12 przedstawia teoretyczne aspekty estymacji modeli regresji przestrzennej wykorzystujące metodę największej wiarygodności. Rozdział 13 jest najistotniejszy dla pracy Doktoranta z punktu widzenia praktycznego zastosowania opisanych wcześniej statystycznych modeli przestrzennych do estymacji i weryfikacji relacji tłumienia drgań zmodyfikowanej o czynnik przestrzenny. W rozdziale tym pokazano ostatecznie wykorzystanie przestrzennego modelu SEM do obliczenia izolinii szczytowych amplitud prędkości i przyspieszenia drgań gruntu. Izolinie te obliczono dla wartości oczekiwanej modelu SEM oraz dla górnych granic przedziałów ufności tego modelu z wykorzystaniem statystycznej metody bootstrap. Szczytowe amplitudy prędkości i przyspieszenia drgań gruntu uzyskane modelem SEM zostały porównane z wartościami pomiarowymi pokazując skuteczność zaproponowanej metodyki obliczeń w praktyce.

Pracę zakończono wnioskami, które potwierdzają wysuniętą przez Doktoranta tezę, że zastosowanie statystycznych modeli przestrzennych relacji tłumienia drgań gruntu przyczyniają się do zwiększenia wiarygodności estymacji szczytowych wartości prędkości i przyspieszenia drgań gruntu.

3. Merytoryczna opinia rozprawy

3.1. Ocena wyboru tematu rozprawy

Temat rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Szuły odnosi się do nowej metody wykorzystania statystycznych modeli przestrzennych dla reszt

określanych w relacji tłumienia drgań do estymacji szczytowych poziomych wartości prędkości i przyspieszeń drgań gruntu, w celu lepszej, bardziej wiarygodnej oceny wpływu drgań sejsmicznych generowanych wstrząsami górnictwami na obiekty znajdujące się na powierzchni terenu. Problem oceny i prognozy wpływu drgań sejsmicznych generowanych wstrząsami sejsmicznymi na zabudowę powierzchniową jest bardzo trudnym i mającym kilkudziesięcioletnią historię zagadnieniem rozpatrywanym w naukach górniczych. Dlatego każda próba wnosząca nowy wkład do rozwiązania tego problemu powinna być przyjęta z uznaniem, a z takim elementem nowości mamy niewątpliwie do czynienia w rozprawie Doktoranta. Liczne publikacje z tej dziedziny pokazują na drodze empirycznej i teoretycznej, że wstrząsy górnicze i generowane przez nie drgania sejsmiczne mogą mieć negatywny wpływ na zabudowę na powierzchni terenu. Doktorant podjął nowatorskie badania w kierunku zastosowania przestrzennych modeli statystycznych do poprawy estymacji szczytowych wartości prędkości i przyspieszenia drgań gruntu, które wykorzystywane są nie tylko w sejsmologii górniczej, ale mają także podstawowe znaczenie w sejsmologii globalnej.

Temat rozprawy podjęty przez Doktoranta wymaga szerokiego zakresu wiedzy z zakresu sejsmologii górniczej i statystyki, jak też determinacji w poszerzaniu jej poza zakres określony kierunkiem studiów. Z pewnością wymagał także dużej systematyczności i dużego nakładu pracy.

3.2. *Sposób realizacji pracy*

W oparciu o własne badania i studium literatury Doktorant przedstawił stosunkowo szeroką analizę czynników wpływających na estymację szczytowych amplitud prędkości i przyspieszenia drgań gruntu generowanych sejsmicznością indukowaną działalnością górnictwami w kopalniach. W zakresie tematu rozprawy autor dokonał przeglądu literatury obejmującego 107 pozycji, w tym duża część obejmuje literaturę anglojęzyczną. Rdzeń pracy Doktoranta w głównej mierze opiera się na zastosowaniu statystycznych modeli przestrzennych składnika resztowego relacji tłumienia drgań sejsmicznych, która z kolei ma kluczowe znaczenie w ocenie wpływu drgań sejsmicznych na infrastrukturę powierzchniową.

Autor systematycznie wprowadza w problematykę obejmującą zakres zagadnień związanych z tematyką pracy rozpoczynając od omówienia zagadnień geofizycznych dotyczących związku łączącego szczytową amplitudę drgań sejsmicznych z energią sejsmiczną oraz odległością od źródła sejsmicznego. Następnie przedstawia podstawy zagadnień związanych z przestrzennymi statystykami epicentrów analizowanych wstrząsów w kontekście korzyści, jakie ze sobą niesie ich zastosowanie do analizy reszt relacji tłumienia drgań sejsmicznych. Doktorant słusznie dostrzega w pracy problem przestrzennej korelacji tych reszt i związaną z tym możliwość poprawy estymowanych wartości amplitud drgań sejsmicznych. Jako punkt odniesienia Doktorant odwołuje się jawnie i słusznie do heurystycznego prawa Toblera zaczerpniętego z geografii głoszącego, że iż wszystkie analizowane obiekty są ze sobą powiązane, a obiekty bliskie, w sensie odległości przestrzennej, są ze sobą bardziej powiązane niż odległe.

Przesłana do recenzji dysertacja zawiera podstawowe wzory i opis statystyk przestrzennych, które zakładają korelacje przestrzenne pomiędzy analizowanymi danymi. Doktorant wykorzystuje do tego dwie podstawowe statystyki opracowane przez australijskiego statystyka Patryka Morana oraz przez irlandzkiego statystyka Roberta Geary'ego. Na podstawie tych dwóch rodzajów statystyk oraz trzech rodzajów wag przestrzennych Autor wykazuje, że istotnie zachodzi dodatnia autokorelacja składnika resztowego modelu relacji tłumienia drgań na poziomie istotności mniejszym niż 0.001. W następnym etapie pracy Doktorant, poprzez weryfikację hipotezy statystycznej mówiącej, że odpowiednie współczynniki w modelu autoregresji przestrzennej są istotnie różne od zera wskazuje na model SEM (Spatial Autoregressive Model), jako najbardziej odpowiedni z uwagi na najniższe wartości prawdopodobieństwa testowego p, które dla modelu SEM jest kilka rzędów wielkości mniejsze niż dla pozostałych modeli przestrzennych.

Etap eksperymentalno-badawczy pracy dotyczy konstrukcji i analizy zbioru danych sejsmometrycznych zarejestrowanych na 7 sejsmicznych stanowiskach powierzchniowych. Doktorant posłużył się tutaj specjalistycznym pakietem do obliczeń modeli przestrzennych o nazwie „spatialreg” działającym w środowisku obliczeń statystycznych i języka R. W oparciu o 6 macierzy przestrzennych wag Doktorant dokonał estymacji metodą największej

wiarygodności współczynników dla 6 modeli SEM dla szczytowych amplitud prędkości i przyspieszeń relacji tłumienia drgań. W pierwszym etapie badań Doktorant dokonuje oceny wiarygodności obliczonych współczynników z użyciem prawdopodobieństwa testowego p oraz wykorzystuje 5 parametrów statystycznych do oceny dopasowania uzyskanych modeli przestrzennych i porównawczo dla modelu tłumienia drgań bez korelacji przestrzennej. Parametrami tymi są: współczynnik korelacji Pearsona, kryterium informacyjne Akaike, błąd średniokwadratowy, maksymalne niedoszacowanie modelu oraz maksymalne przeszacowanie modelu. W drugim etapie eksperymentalno-badawczym Doktorant dokonuje porównania zarejestrowanych i estymowanych szczytowych amplitud prędkości i przyspieszeń drgań gruntu dla modeli przestrzennych z modelami oszacowanymi metodą najmniejszych kwadratów. W tym etapie Doktorant dokonuje także oszacowania 90% górnych granic przedziałów ufności estymowanych szczytowych amplitud prędkości i przyspieszeń drgań gruntu z wykorzystaniem metody bootstrap, wskazując przy tym, że mogą one być bardziej właściwymi metodami prognozowania parametrów drgań gruntu. Powyższe badania potwierdziły duży potencjał predykcyjny tkwiący w modelach przestrzennych estymujących drgania gruntu na powierzchni terenu i są niewątpliwym oryginalnym wynikiem pracy Doktoranta. Praca kończy się syntetycznymi wnioskami i pozytywnym stwierdzeniem na temat możliwości poprawy prognozy drgań z użyciem modeli przestrzennych.

3.3. Uwagi krytyczne i pytania.

Recenzowana praca doktorska zawiera elementy, które stanowią oryginalny i własny wkład Doktoranta. Niemniej jednak zawiera też pewne niedociągnięcia przedstawione poniżej w postaci uwag i pytań.

- Generalnie w tekście powtarza się określenie maksymalnych wartości dla amplitud prędkości lub przyspieszenia. Ze względu na niejednoznaczność tego terminu raczej powinien zostać użyty termin wartości szczytowe, gdyż chodzi zawsze chodzi o wartości albo dodatnie (maksymalne) albo ujemne (minimalne)
- Na stronie 5 podano błędne jednostki $[m/s]$ zamiast $[m/s^2]$

- Na stronie 6 pojawia się stwierdzenie „...dla poprawnego oszacowania parametrów strukturalnych modelu relacji tłumienia drgań oraz wyznaczenia wiarygodnych prognoz, uwzględnienie amplifikacji drgań jest niezbędne”. Z drugiej strony wprowadzone przestrzenne modele dla relacji tłumienia wykorzystują ją bez uwzględnienia amplifikacji. Proszę o wyjaśnienie, co było tego powodem?

- Na stronie 12 w opisie wzoru (3.4) podano nieprawidłowo, że cS jest klasyfikatorem gruntu, podczas gdy S to klasyfikator, a c to parametr modelu

- Na stronie 24 w kontekście opisu drgań oscylatora harmonicznego z tłumieniem podano, że „Każdy grunt charakteryzowany jest przez określoną częstotliwość rezonansową”. Generalnie ośrodek skalny jest scharakteryzowany nieskończoną liczbą stopni swobody i przybliżanie go jednowymiarowym oscylatorem harmonicznym wydaje się zbyt dużym uproszczeniem. Proszę o odniesienie się do tematu amplifikacji drgań w kontekście ośrodka określonego jako medium o nieskończonej liczbie stopni swobody i podanie parametrów które odpowiadają za amplifikację drgań sejsmicznych

- Na stronie 25 we wzorze (5.1) powinna pojawić się raczej formuła całkowa po wektorze ze strumienia gęstości energii, co pozwoliłby płynnie przejść do związku (5.4) na stronie 26, w który pojawia się pojęcie strumienia energii. Proszę o komentarz w tej sprawie

- Na stronie 26 podano stwierdzenie „Akceptowalne przybliżenie takiego sejsmogramu otrzymuje się poprzez wyznaczenie pierwszej pochodnej z przemieszczenia punktu materialnego, co zostało pokazane w formule np. 4.17b”, co oznacza, że przyjęto tłumione drgania oscylatora harmonicznego jako model sejsmogramu amplitud prędkości. Generalnie jednak rejestrowane sejsmogramy amplitud czy przyspieszeń mają ciągłe widmo częstotliwościowe w pewnym zakresie rejestrowanych częstotliwości. Proszę o wyjaśnienie jakie są tego konsekwencje w kontekście dalszych rozważań prowadzonych w rozdziale 5.1

- Na stronie 27 we wzorze (5.11) przed całką brakuje iloczyn gęstości ośrodka oraz prędkości fali sejsmicznej

- Na stronie 33 wzór (5.30) podaje wartość $AIC \cdot n$, zamiast AIC

- Na stronie 37 we wzorze (5.38) suma po współczynnikach powinna być podana bez modułu
- Na stronie 41 podano wzór na (6.3) energię sejsmiczną. Powinien pojawić się odnośnik do literatury anglojęzycznej, gdyż obliczanie energii sejsmicznej nie jest problemem jednoformułowym. Nie podano też opisu dla t_1 i t_2
- Na stronie 52 pojawia się zdanie „Heteroskedastyczność w praktyce może oznaczać, że wraz ze wzrostem poziomu wartości zmiennych objaśniających rosną wartości reszt...”. Akurat w przypadku relacji tłumienia ta zależność jest odwrotna dla odległości, czyli dla małych odległości rosną wartości reszt.
- z podanych w Tabelach 13.2 oraz 13.4 wartości parametrów opisujących dobroć dopasowania modeli tak naprawdę tylko wartość AIC może zostać użyta do wykazania, który z tych modeli jest lepszy lub gorszy. Proszę o odniesienie się do tej kwestii.
- Na Rys. 13.1, 13.2, 13.3, 13.10, 13.11 i 13.12 pokazana niebieska krzywa danych empirycznych jest nieco odmienna dla modelu klasycznego. Proszę o komentarz dlaczego tak jest?

Wymienione uwagi i pytania nie pomniejszają niezaprzeczalnego i istotnego wkładu własnego Doktoranta i służą jedynie do wskazania możliwości dalszych badań lub wprowadzenia korekt w ewentualnych publikacjach wyników tej pracy.

3.4. Ogólna ocena dysertacji

Przeprowadzona analiza rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Szuły na temat: „Przestrzenne modele statystyczne w prognozowaniu parametrów drgań gruntu wywołanych sejsmicznością indukowaną” pozwala na stwierdzenie, że Doktorant twórczo zastosował swoje oryginalne rozwiązanie polegające na wykorzystaniu przestrzennych modeli statystycznych do estymacji szczytowych amplitud prędkości i przyspieszenia drgań gruntu na powierzchni terenu. Rozprawa Doktoranta dotyczy dyscypliny naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka i świadczy o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz o tym, że posiadał on ogólną wiedzę teoretyczną w tej dyscyplinie.

Doktorant w sposób przekonujący udokumentował na praktycznych przykładach obliczeń z użyciem statystycznych modeli przestrzennych dla relacji tłumienia drgań gruntu, że nowy sposób prognozy szczytowych amplitud prędkości i przyspieszenia drgań gruntu jest bardziej wiarygodny niż relacja tłumienia drgań, która posłużyła jako punkt odniesienia do przeprowadzonych badań.

Wyznaczanie w nowy sposób prognozowane przestrzenne rozkłady szczytowych amplitud prędkości i przyspieszenia drgań gruntu są ważnym osiągnięciem badawczym Doktoranta. Ten kierunek badań jest bardzo istotny do oceny wpływu drgań sejsmicznych na obiekty powierzchniowe i ma znaczenie nie tylko w naukach górniczych, ale również w sejsmologii globalnej i z pewnością wymaga dalszych intensywnych dociekań.

Rozprawa doktorska jest opracowana starannie, zwłaszcza w części dotyczącej obliczeń statystycznych i prezentacji graficznej. Generalnie jest napisana jasnym i poprawnym językiem technicznym, co oznacza że recenzowaną rozprawę należy także ocenić pozytywnie od strony edytorskiej.

4. Wniosek końcowy

Na podstawie przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Szuły pt. „Przestrzenne modele statystyczne w prognozowaniu parametrów drgań gruntu wywołanych sejsmicznością indukowaną” stwierdzam, że spełnia ona wymagania ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

