

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Anny Kopeć
pt. „ **Metodyka przetwarzania danych interferometrycznych w aspekcie oddziaływania
podziemnej eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu**”

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzja została opracowana na zlecenie przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska Górnictwa i Energetyki Politechniki Wrocławskiej Pana dr hab. inż. Roberta Króla prof. PW z dnia 20.04.2021 r.

2. Wstęp – tematyka pracy

Deformacje powierzchni terenu w obszarach działalności górniczej są tematem stale aktualnym ze względu na aspekt bezpieczeństwa obiektów budowlanych, które tym deformacjom podlegają. Prowadzone od wielu lat geodezyjne pomiary deformacji są niezwykle istotne z tego punktu widzenia, lecz nie zawsze obejmują strefy oddziaływań eksploatacji górniczej. Metody teledetekcyjne, nieustannie rozwijane, umożliwiają przestrzenny quasi-ciągły monitoring całej powierzchni terenu górniczego. Z tego względu zastosowanie metod interferometrii radarowej oraz ich doskonalenie ma duże znaczenie dla uzupełnienia wyników klasycznych pomiarów geodezyjnych na terenach górniczych.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji praca składa się z 6 rozdziałów i liczy łącznie 187 stron w tym 152 strony tekstu, 21 stron spisów (bibliografia, spis rysunów i tabel) oraz 15 stron załączników. Spis bibliograficzny zawiera 167 pozycji, z czego w 3 publikacjach Autorka występuje jako współautor. Większość cytowanych publikacji to pozycje anglojęzyczne, 29 w języku polskim. Przeważają publikacje z okresu ostatnich 10 lat. Świadczy to o dobrym rozeznaniu przez autorkę podjętej tematyki badań w kraju i na świecie.

Praca jest bogato ilustrowana, zawiera 65 rysunków dokumentujących postęp badań w prezentowanej tematyce oraz prezentujących graficznie opracowaną metodykę badań. Rysunki są przejrzyste i dobrej jakości, czytelnie prezentują uzyskane w pracy wyniki.

Zarówno dane wejściowe jak i wynikowe są również prezentowane w formie tabelarycznej, łącznie w 16 tabelach.

Układ pracy jest przejrzysty i logiczny.

Rozdział pierwszy wprowadza czytelnika w zagadnienia poruszane w pracy, koncentrujące się głównie wokół metod interferometrii radarowej stosowanych do wyznaczania przemieszczeń powierzchni terenu wywołanych działalnością antropogeniczną, głównie górniczą. W kolejnych dwóch podrozdziałach określony został główny cel pracy, jakim jest: *opracowanie metodyki przetwarzania obrazowań, która pozwoli ograniczyć wpływ niekorzystnych (zaburzających) czynników zewnętrznych na wyniki pomiarów, a także*

rozszerzyć możliwości wykorzystania zobrażeń interferometrycznych w aspekcie opisu procesu przemieszczeń terenu wywołanych podziemną eksploatacją górnictw.

Uzupełnieniem określonego głównego celu pracy są cele szczegółowe, a mianowicie:

- wskazanie istotności wpływu opóźnienia troposferycznego na pomiar przemieszczeń krótko- i długookresowych techniką krótkich baz (ang. *Small Subset Baseline, SBAS*) oraz wskazanie możliwości korekcji tego wpływu,
- wskazanie istotności wyboru modelu statystycznego w procesie rozwijania fazy interferogramów SAR - w przypadku przemieszczeń krótkookresowych, wywołanych zjawiskami sejsmiki indukowanej,
- wpasowanie wyznaczonych obniżzeń (dla przemieszczeń krótkookresowych) do krzywej teoretycznej – walidacja zastosowanej metodyki,
- zbadanie wpływu doboru baz czasowo-przestrzennych na pomiar przemieszczeń długookresowych techniką SBAS.

W oparciu o przedstawione cele sformułowana została teza pracy:

Dobór metodyki przetwarzania danych interferometrycznych SAR ma istotne znaczenie dla możliwości wykorzystania technik InSAR do monitoringu przemieszczeń terenu wywołanych podziemną działalnością górnictw.

W końcowej części rozdziału pierwszego Autorka przedstawiła krótką charakterystykę poszczególnych części pracy oraz zawartość kolejnych rozdziałów.

Rozdział drugi w sposób obszerny i szczegółowy opisuje stan wiedzy dotyczący postawionego problemu badawczego. Zawiera on charakterystykę przemieszczeń i deformacji powierzchni terenu wywołanych działalnością górnictw oraz metody pomiaru i wyznaczania ich wartości. Opisane zostały podstawowe założenia i ograniczenia w stosowaniu interferometrii radarowej InSAR. Przedstawiono również krytyczny przegląd wykorzystania technik InSAR w aspekcie wyznaczania przemieszczeń powierzchni terenu wywołanych działalnością górnictw.

Rozdział trzeci to charakterystyka obszaru badań tj. Legnicko - Głogowskiego Okręgu Miedziowego. Zawiera ona opis wpływów eksploatacji górnictw oraz charakterystykę zagospodarowania powierzchni terenu w kontekście zastosowania interferometrii radarowej InSAR.

Rozdział czwarty opisuje przyjętą przez Autorkę metodykę badań i sposób realizacji postawionych w pracy celów. Scharakteryzowano w nim zbiór danych wykorzystanych w realizacji badań oraz przedstawiono procedurę obliczeń bazowych. Omówiona została procedura korekcji troposferycznej. W kolejnych podrozdziałach opisana została metodyka prowadzenia obliczeń i analiz w dwóch przypadkach: przemieszczeń krótkoterminowych wywołanych wstrząsami górnictwymi oraz przemieszczeń długookresowych spowodowanych bezpośrednim wpływem podziemnej eksploatacji górnictw. W przypadku przemieszczeń krótkookresowych omówiono zastosowaną procedurę rozwijania fazy interferometrycznej, dekompozycję wektora przemieszczenia LOS na składowe: pionową (obniżenie) i poziomą (w kierunku E-W), oraz walidację zastosowanej metodyki opartą na nieliniowej aproksymacji uzyskanych wyników modelem teoretycznym. W przypadku przemieszczeń długookresowych przedstawiono procedurę analizy koherencji zobrażeń opartą na rankingowaniu interferogramów na podstawie mediany koherencji oraz określenia progowej wartości mediany, kwalifikującej interferogramy do zbioru danych wejściowych a także opracowaną

przez Autorkę metodykę pseudolosowego wyboru kombinacji interferogramów do algorytmu SBAS.

Rozdział piąty to obszerna prezentacja wyników badań, uzyskanych na podstawie opisanej metodyki, osobno dla przemieszczeń krótkookresowych oraz długookresowych. Analizy przemieszczeń krótkookresowych dotyczyły wpływu zmiany modelu statystycznego w procesie rozwinięcia fazy, zastosowania poprawki troposferycznej oraz walidacji wyników na podstawie estymacji nieliniowej opartej na zmodyfikowanej funkcji obniżenia dla niecki elementarnej (wysypu szczelinowego). W przypadku przemieszczeń długookresowych zaprezentowano wyniki wstępnej analizy koherencji, zastosowane do wytypowania zbioru interferogramów, z którego uzyskano pseudolosowe kombinacje par interferogramów. Umożliwiło to wykonanie dalszych obliczeń z zastosowaniem algorytmu SBAS. Analizie poddano również średnie wartości koherencji i odchyłeń standardowych względem typów pokrycia terenu. W końcowej części rozdziału porównano uzyskane wyniki z wynikami dla standardowego kryterium doboru interferogramów do algorytmu SBAS i opisano wpływ zastosowania poprawki troposferycznej na wartości uzyskanych przemieszczeń długookresowych.

Rozdział szósty stanowi podsumowanie pracy oraz przedstawia wnioski będące rezultatem przeprowadzonych prac badawczych. Na końcu rozdziału wskazano dalsze kierunki badań.

3. Merytoryczna ocena pracy

Podjęty przez Doktorantkę problem badawczy jest niezwykle złożony. Opracowanie metodyki przetwarzania zobrażeń interferometrycznych eliminującej niekorzystny wpływ czynników zewnętrznych, na potrzeby wyznaczania przemieszczeń powierzchni terenu wywołanych podziemną eksploatacją górniczą wymagało identyfikacji czynników zaburzających dane interferometryczne, ustalenia możliwych kierunków ich eliminacji, pozyskania odpowiednich danych do realizacji celu oraz wykonania wielu analiz zgromadzonego materiału badawczego. Pomimo istnienia rozwiązań części standardowych problemów dotyczących wykorzystania interferometrii radarowej InSAR na terenach górniczych, które zostały opisane w literaturze polskiej i światowej, wykorzystywane metody nadal wymagają udoskonalania w celu uzyskiwania wiarygodnych danych o przemieszczeniach powierzchni terenu. Autorka podjęła się analizy kilku takich czynników, a mianowicie:

- wpływu opóźnienia troposferycznego,
- istotności wyboru modelu statystycznego w procesie rozwijania fazy w przypadku przemieszczeń krótkookresowych,
- wpływu doboru baz czasowo-przestrzennych na wyznaczanie przemieszczeń długookresowych.

Do realizacji postawionych celów Doktorantka wybrała jeden obiekt badawczy spełniający kryteria opisane w pracy. Zbiór danych wejściowych stanowiły zobrażenia SAR uzyskane z misji Sentinel 1 (satelity Sentinel 1A/B), które podlegały procedurom przetwarzania do interferogramów a następnie wieloetapowym analizom w celu ostatecznego opracowania metodyki ich opracowywania. Ze względu na odmienne podejście do wyznaczania przemieszczeń w krótkich i długich okresach, badania zostały podzielone na dwie części. W pierwszej kolejności Doktorantka zajęła się wyznaczeniem przemieszczeń krótkookresowych metodą dInSAR dla wytypowanych 6 niecek obniżeniowych będących następstwem wstrząsów górniczych. Kluczowymi elementami analiz były: wpływ opóźnienia troposferycznego, korygowany poprawką GACOS oraz dobór modelu w procesie rozwijania

fazy (model nieuwzględniający wystąpienia przemieszczeń na powierzchni terenu - MS0 oraz uwzględniający je – MS1). W trakcie wykonywania analiz Autorka sformułowała dodatkowe dwie tezy szczegółowe dotyczące: zasadności stosowania modelu MS1 w konkretnym przypadku oraz zastosowania poprawki troposferycznej GACOS w innym przypadku. Obydwie tezy zostały udowodnione. Wynikiem tych analiz jest zaproponowana przez Doktorantkę metodyka postępowania w przypadku przetwarzania danych interferometrycznych metodą dInSAR.

Następnie analizom poddane zostały przemieszczenia długookresowe. W tym przypadku Doktorantka opracowała i zastosowała metodę opartą na analizie koherencji interferogramów oraz pseudolosowym ich doborze do zbioru par interferogramów wykorzystanych w metodzie SBAS. Kluczowym elementem analizy był losowy dobór 100 kombinacji par interferogramów według zaproponowanej przez Autorkę metody oraz analiza zasadności wprowadzania poprawki troposferycznej. Porównanie uzyskanych wyników z wynikami dla standardowej procedury SBAS potwierdziło, że uzyskane przez Doktorantkę wyniki są bardziej wiarygodne. Dowodzi to, że przedstawiona metodyka opracowania danych interferometrycznych jest właściwa.

Wartością dodaną uzyskaną w wyniku przeprowadzonych procedur jest analiza przestrzenna średnich wartości koherencji w zależności od rodzaju pokrycia terenu oraz analiza zależności wartości koherencji od średnich wartości odchyłeń standardowych wektorów przemieszczeń LOS. Wyniki tych analiz pozwalają stwierdzić niepewność/dokładność wyznaczonych wartości przemieszczeń w zależności od typu pokrycia powierzchni terenu. Umożliwiają zatem typowanie obszarów o wysokiej i niskiej dokładności wyznaczania przemieszczeń powierzchni terenu.

Wnioski ogólne oraz szczegółowe sformułowane przez Autorkę w pracy stanowią ważny element przeprowadzonych badań.

Uważam, że mnogość wykonanych analiz oraz szczegółowe podejście do prezentowanego zagadnienia świadczy o dogłębnej analizie problemu. Do oryginalnych osiągnięć Autorki rozprawy należy zaliczyć *opracowanie metodyki przetwarzania obrazów interferometrycznych pozwalającej na ograniczenie wpływu niekorzystnych czynników zewnętrznych na uzyskiwane wartości przemieszczeń powierzchni terenu wywołanych podziemną eksploatacją górnictwem na terenie LGOM dla przemieszczeń krótkookresowych oraz autorskie rozwiązanie dla metody SBAS oparte o kryterium średnich wartości koherencji dla przemieszczeń długookresowych.*

4. Uwagi krytyczne i pytania do Doktorantki

W rozprawie doktorskiej Autorka nie ustrzegła się błędów i nieścisłości, które przedstawiam poniżej. Powinny być one omówione w trakcie publicznej obrony.

- 1) Drugi element zawarty w celu pracy, dotyczący rozszerzenia możliwości wykorzystania obrazów interferometrycznych w aspekcie opisu procesu przemieszczeń terenu wywołanych podziemną eksploatacją górnictwem został w pracy tylko nakreślony bez szerszego opracowania. Czy w tym stwierdzeniu Autorka miała na myśli wyznaczenie, na podstawie przemieszczeń poziomych i pionowych po dekompozycji wektora LOS, pozostałych wskaźników deformacji wykorzystywanych w ocenie zagrożenia obiektów na terenach górnictwem?

- 2) Podstawowym mankamentem jaki występuje w recenzowanej pracy jest brak właściwej referencji (np. wyników pomiarów geodezyjnych) dla przemieszczeń uzyskanych metodami InSAR. Jest to zarzut odnoszący się do przemieszczeń długookresowych, ponieważ zdarzenia nagłe, takie jak wstrząsy górnicze są nieprzewidywalne i trudno uzyskać dla nich odpowiednią referencję czasową i przestrzenną. W tym przypadku wykorzystanie modelu wysypu szczelinowego można uznać za pewnego rodzaju odniesienie, ale pozwalające na wyznaczenie jedynie wewnętrznej dokładności uzyskanych wyników. W przypadku przemieszczeń długookresowych można było tak zaprojektować eksperyment naukowy, żeby uzyskać korelację czasową z prowadzonymi na terenach górniczych LGOM pomiarami deformacji w punktach sieci szczegółowej LGOM, które są wykonywane przynajmniej dwa razy w roku.
- 3) Nie zgadzam się ze stwierdzeniem Autorki, że cyt. „weryfikacja wiarygodności i dokładności pomiarów techniką InSAR w wykorzystaniu innych niezależnych technik pomiarowych jest bardzo trudna w realizacji i mało wiarygodna”. Jak sama Autorka dowodzi w pracy, nieodpowiedni dobór metodyki opracowania danych InSAR ma duży wpływ na wynik. Skoro można pomylić się w istotny sposób stosując metody InSAR, to właściwym postępowaniem jest porównanie uzyskanych wyników z innym pomiarem referencyjnym, tzn. o większej lub porównywalnej dokładności.
- 4) W trakcie realizacji pracy Doktorantka korzystała z oprogramowania GMTSAR, które było wystarczające do realizacji postawionych celów. Czy można było skorzystać z innego oprogramowania i przetestować inne rozwiązania?
- 5) Jaki jest błąd wyznaczenia lokalizacji epicentrum wstrząsów wskazanych na mapach obniżeń?
- 6) Estymacja nieliniowa zastosowana do walidacji przemieszczeń krótkookresowych oparta była na zmodyfikowanej funkcji obniżeń dla wysypu szczelinowego. Jednym z estymowanych parametrów był parametr „r” – promień rozproszenia wpływów. Czy Autorka analizowała jego wartości uzyskane dla 6 niecek powstrząsowych pod kątem porównania z występującymi w LGOM wartościami zasięgu wpływów eksploatacji górniczej?
- 7) Wartości przemieszczeń poziomych, prezentowane na rys. 5.16, 5.18, 5.20, 5.23, 5.26, 5.29, 5.31 i 5.33 (rozdział 5.1.3) sugerują przeciwny zwrot wektorów przemieszczenia niż jest to opisane w tekście pracy. Autorka stwierdza, że przemieszczenia poziome wyznaczone zostały w kierunku E-W, zatem wartości dodatnie powinny mieć zwrot na W, natomiast wartości ujemne na E. Na prezentowanych mapach jest przeciwnie, co oznaczałoby, że wektory przemieszczenia skierowane są na zewnątrz niecki a nie w kierunku jej centrum. Błąd prawdopodobnie tkwi w określeniu kierunku wyznaczenia przemieszczeń. Być może właściwsze byłoby operowanie kierunkiem W-E w odniesieniu do wyznaczanych przemieszczeń poziomych. Wtedy wektory dodatnie po stronie W mają zwrot w kierunku E, natomiast wektory po stronie E mają zwrot na W czyli w kierunku środka geometrycznego niecki.

- 8) Dlaczego próg koherencji dla zobrażeń interferometrycznych został określony na 0,275 jeśli Autorka pisze w pracy, że poniżej wartości 0,3 występują problemy z interpretacją?
- 9) Czy zdaniem Autorki zaprezentowana metodyka postępowania, opracowana dla warunków LGOM jest możliwa do zastosowania w innych rejonach eksploatacji górniczej w Polsce czy na świecie?


Uwagi drobne, redakcyjne

- 1) Praca napisana jest w sposób czytelny i przejrzysty, jednak Autorka nie ustrzegła się dość licznych błędów literowych a także interpunkcyjnych i stylistycznych.
- 2) Nie wszystkie wskaźniki deformacji opisane w pracy są „parametrami geometrycznymi”.
- 3) Dla opracowań dotyczących powierzchni terenu na obszarach eksploatacji górniczej bardziej właściwe jest posługiwanie się pojęciem „teren górniczy” niż „obszar górniczy” ze względu na definicje tych pojęć.
- 4) W rozdziale 2.3 cytowany jest za (Hanssen, 2001) wzór dla fazy interferometrycznej (wzór 2.4), który w oryginale ma nieco inną postać.
- 5) W rozdziale 4.3.2, str. 71. brakuje pełnego odwołania do rys. 2.2.

5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska zawiera wszystkie niezbędne elementy świadczące o ogólnej wiedzy teoretycznej Autorki a także umiejętności realizowania przez nią pracy naukowej, przy wykorzystaniu dostępnych metod oraz aplikacji. Pomimo kilku krytycznych uwag, praca jest oryginalnym rozwiązaniem zaprezentowanego w niej zagadnienia naukowego, a osiągnięcie w niej zawarte stanowi przyczynek do rozwoju dyscypliny naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca doktorska w pełni odpowiada warunkom określonym w *art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.)* i wnioskuję o przyjęcie pracy i dopuszczenie do jej publicznej obrony.

.....

.....
Dr hab. inż. Tomasz Stoch – prof. AGH