

WYDZIAŁ GEOLOGII, GEOFIZYKI I OCHRONY ŚRODOWISKA



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA
W KRAKOWIE

PROJEKT

**Zastosowanie InSAR w badaniu trzęsienia
ziemi w Iranie w 2017 r.**

ALEKSANDRA PEŁKA

KIERUNEK: GEOINFORMATYKA

NUMER INDEKSU: 404407

ROK 3, GRUPA: 2

KRAKÓW, 01.06.2022

SPIS TREŚCI:

CEL	3
I. WSTĘP	3
DANE	3
II. PRZETWARZANIE	4
1. KOREGISTRACJA	4
2. FORMOWANIE INTERFEROGRAMU I SZACOWANIE KOHERENCJI	5
3. ŁĄCZENIE SERII - TOPS DEBURST	6
4. FILTRACJA	7
5. ROZWIJANIE FAZY	8
6. PRZEŁOŻENIE FAZY NA WARTOŚCI PRZEMIESZCZENIA	11
7. DODANIE OBRAZU KOHERENCJI	12
8. KOREKCJA TERENU	13
9. MASKOWANIE OBSZARÓW O NISKIEJ KOHERENCJI	14
10. EKSPORT WYNIKÓW DO GOOGLE EARTH	15
III. ANALIZA I INTERPRETACJA WYNIKÓW	16
1. ANALIZA TRZĘSIENIA ZIEMI	19
2. ANALIZA STANU PRZED TRZĘSIENIEM ZIEMI	21
3. ANALIZA STANU PO TRZĘSIENIU ZIEMI	21
IV. WNIOSKI	21
V. PODSUMOWANIE	22
VI. LITERATURA	22

CEL: Analiza trzęsienia ziemi, które wystąpiło w środkowo-wschodnim Iranie 1 grudnia 2017 roku, na podstawie zobrazowań wykonanych przez satelitę Sentinel-1 i zastosowaniu metody InSAR.

I. WSTĘP

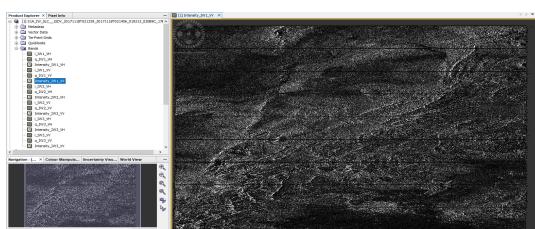
Trzęsienie ziemi o magnitudzie 6.1 wystąpiło w północno-wschodniej części prowincji Kerman, w dniu 1 grudnia 2017 r. o godzinie 06:02 czasu lokalnego (02:32:46 UTC). Epicentrum wstrząsów miało miejsce na terenie niewielkiego miasta Hijdak (30.746°N , 57.307°E), położonego w słabo zaludnionym rejonie odległym o około 1100 km od Teheranu.

1. DANE

Dane pozyskane z Sentinel-1 obejmują okres przed (2 pierwsze zobrazowania) i po (2 ostatnie zobrazowania) trzęsieniu ziemi. Zobrazowania zostały pobrane poprzez wyszukiwarkę Copernicus, zapewniającą dostęp do produktów misji satelitarnej Sentinel.

S1A_IW_SLC__1SDV_20171118T021339_20171118T021406_019313_020B9C_17EE
S1A_IW_SLC__1SDV_20171130T021338_20171130T021405_019488_02111C_300F
S1B_IW_SLC__1SDV_20171206T021251_20171206T021321_008592_00F413_EFC1
S1A_IW_SLC__1SDV_20171224T021337_20171224T021404_019838_021BFA_265C

Pierwszym etapem jaki został wykonany, było wczytanie danych i wyświetlenie ich w programie SNAP (**Rys. 1.1 - Rys. 1.4**). Następnie sprawdzono metadane pobranych zobrazowań, w celu upewnienia się, czy na ich podstawie można wykonać poprawne przetwarzanie. Zdjęcia z dnia 18 i 30 listopada oraz 24 grudnia zostały wykonane przez satelitę S1A, natomiast zobrazowanie wykonane w dniu 6 grudnia pochodzi z satelity S1B. Nie stanowi to jednak problemu w ich przetwarzaniu, gdyż satelity poruszają się po tej samej orbicie, natomiast pozwala dokonać analizy w krótszym odstępie czasowym - czas rewizyty skrócony do 6 dni. Wybrano typ SLC, dzięki któremu dane posiadają informację na temat amplitudy i fazy, bez których nie udałoby się wykonać przetwarzania metodą InSAR. Ważnym aspektem przy wyborze zdjęć była także ich geometria - wszystkie zdjęcia pochodzą z satelitów poruszających się po orbicie zstępującej (descending) o numerze 166. Ponadto, każde z pozyskanych zobrazowań wykonano w trybie Interferometric Wide Swath (IW), zapewniającym jednorodną i wysoką jakość obrazu.



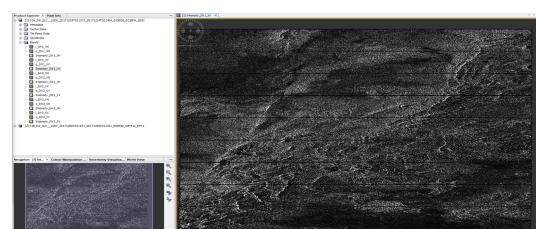
Rys. 1.1 Wizualizacja zobrazowania z dnia 18.11.2017 r.



Rys. 1.2 Wizualizacja zobrazowania z dnia 30.11.2017 r.



Rys. 1.3 Wizualizacja zobrazowania z dnia 06.12.2017 r.



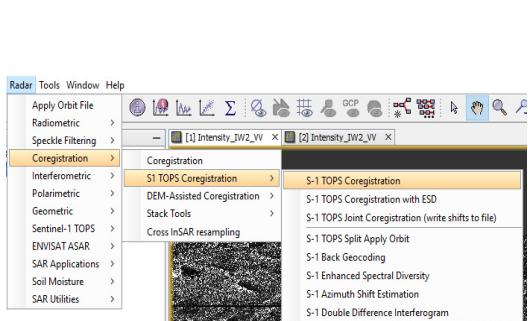
Rys. 1.4 Wizualizacja zobrazowania z dnia 24.12.2017 r.

II. PRZETWARZANIE

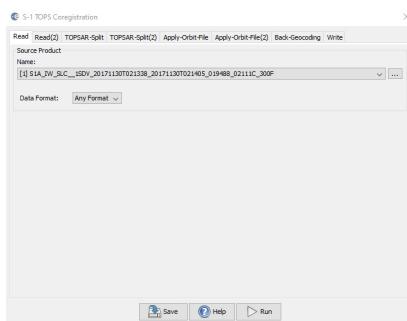
Podstawowe przetwarzanie wykonano na parze zobrazowań z dnia 30 listopada oraz 6 grudnia 2017 r.. Poszczególne kroki zostały zaprezentowane poniżej, na przykładzie wspomnianych zobrazowań. Przetwarzanie przed oraz po trzęsieniu Ziemi zostało wykonane w sposób analogiczny do przedstawionego w krokach 1 - 10.

1. KOREGISTRACJA

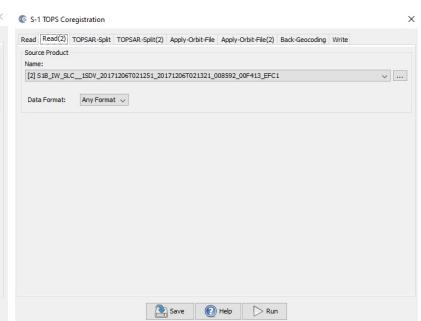
W pierwszym kroku przetwarzania została wykonana korekcja, umożliwiająca dopasowanie geometrii zobrazowania wykonanego później (SLAVE), do geometrii zobrazowania wykonanego wcześniej (MASTER). Prawidłowe wykonanie korekcji jest bardzo istotne, gdyż ma ona znaczący wpływ na jakość wykonanych interferogramów. W celu wykonania korekcji w SNAPie wybrano *Radar > Coregistration > S1 TOPS Coregistration > S-1 TOPS Coregistration (Rys. 2.1.1)*. Następnie, w pierwszej zakładce *Read* wybrano zobrazowanie MASTER (Rys. 2.1.2, tu zdjęcie z dnia 30 listopada), a w drugiej - SLAVE (Rys. 2.1.3, 6 grudnia). Następnie wybrano polaryzację VV oraz ścieżkę przetwarzania IW1. Dodatkowo, w celu uzyskania szybszego przetwarzania i zużycia mniejszej ilości zasobów pamięciowych, została ograniczona liczba burstów w przypadku obu zdjęć (Rys. 2.1.4). Serie wybrano w taki sposób, aby otrzymane części sceny pokrywały się między zobrazowaniami.



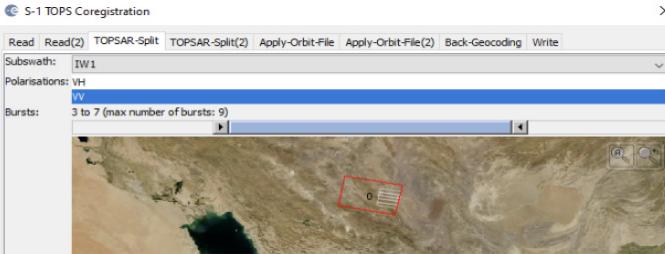
Rys. 2.1.1 Wybór narzędzia S-1 TOPS Coregistration w celu wykonania korekcji.



Rys. 2.1.2 Wybór zdjecia MASTER.

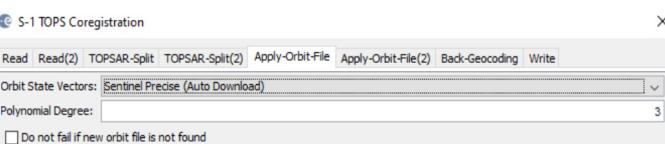


Rys. 2.1.3 Wybór zdjecia SLAVE.

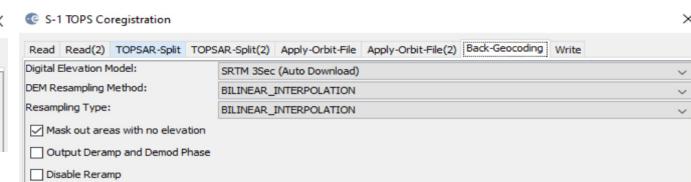


Rys. 2.1.4 Wybór odpowiednich serii dla obu zdjęć.

Zastosowano precyzyjne orbity, sciągnięte automatycznie przez program, zostawiając przy tym ustawienia domyślne dla obu przypadków (Rys. 2.1.5). Ustawienia domyślne pozostały również w kolejnej zakładce, dotyczącej numerycznego modelu terenu (Rys. 2.1.6).



Rys. 2.1.5 Wybór odpowiednich serii dla obu zdjęć.



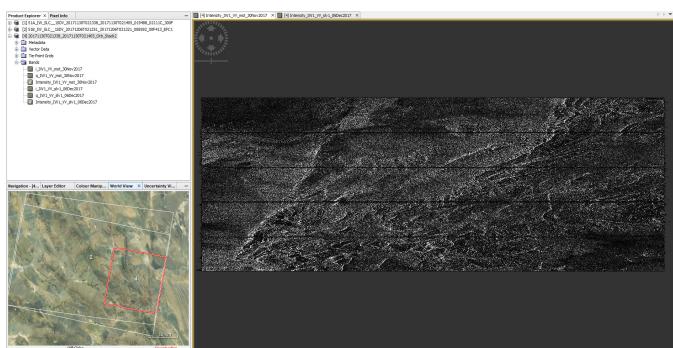
Rys. 2.1.6 Wybór odpowiednich serii dla obu zdjęć.

Następnie podano folder, do którego został zapisany produkt i zmodyfikowano jego nazwę (**Rys. 2.1.7**).

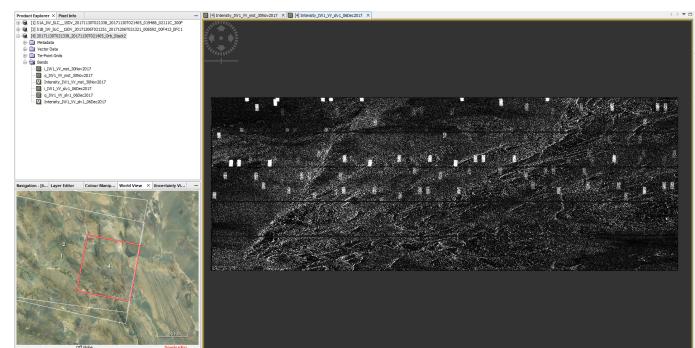


Rys. 2.1.7 Wybór folderu, w którym zapisano plik.

W efekcie otrzymano wyrównanie obu zobrazowań z dokładnością do subpixela oraz mniejszą liczbę serii (**Rys. 2.1.8, Rys. 2.1.9**), wykorzystanych do dalszego przetwarzania.



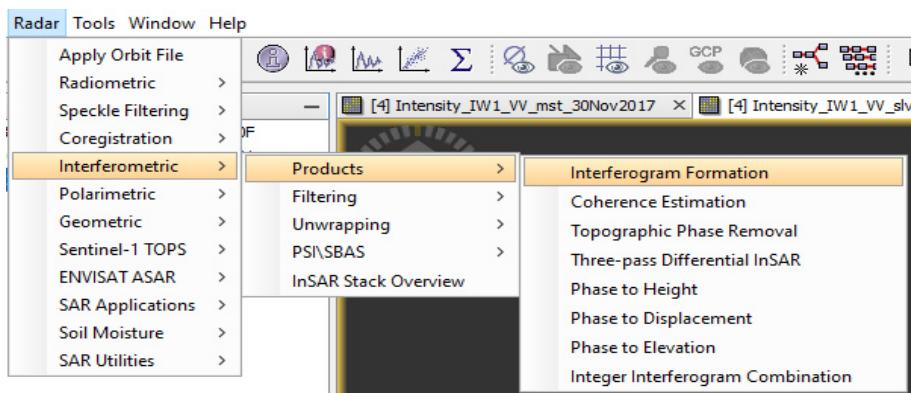
Rys. 2.1.8 Wynik koregistracji dla obrazu MASTER.



Rys. 2.1.9 Wynik koregistracji dla obrazu SLAVE.

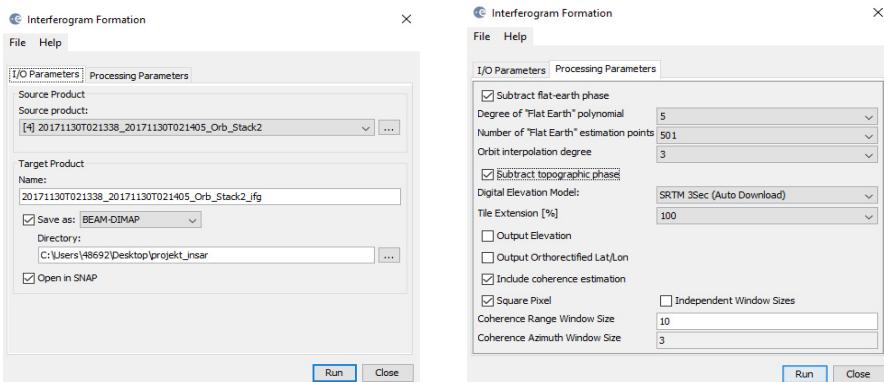
2. FORMOWANIE INTERFEROGRAMU I SZACOWANIE KOHERENCJI

W kolejnym etapie utworzono interferogram oraz oszacowano koherencję. Koherencja to wielkość współczynnika korelacji zespolonych wartości sygnału SAR. Pozwala określić stopień zgodności fazy takich sygnałów. Do utworzenia interferogramu oraz obrazu koherencji wykorzystano opcję *Interferogram Formation*, znajdującą się w zakładce *Radar > Interferometric > Products* (**Rys. 2.2.1**).



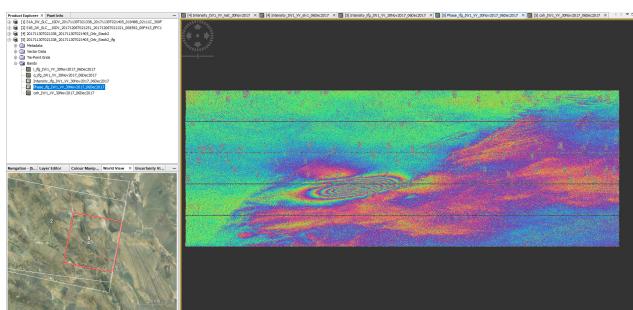
Rys. 2.2.1 Wybór narzędzia *Interferogram Formation* w celu utworzenia interferogramu i obrazu koherencji.

Aby wyeliminować prążki związane z płaską ziemią (*subtract flat-earth phase*) oraz topografią (*subtract topographic phase*), a także oszacować koherencję (*include coherence estimation*) ustawiono parametry przedstawione poniżej (Rys. 2.2.2). W ten sposób na interferogramie otrzymano tylko fazę związaną ze zmianami powierzchni terenu, jakie zaszły pomiędzy kolejnymi akwizycjami.

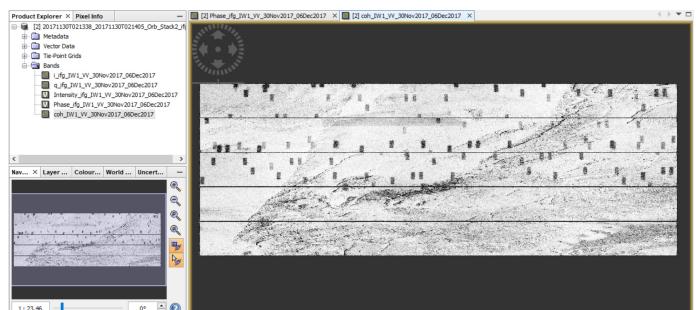


Rys. 2.2.2 Ustawienie parametrów potrzebnych do wykonania interferogramu i obrazu koherencji.

Otrzymany interferogram, składający się z linii interferencyjnych, gdzie za pomocą barwy została zilustrowana różnica faz (Rys. 2.2.3) oraz obraz koherencji (Rys. 2.2.4) przedstawiono poniżej.



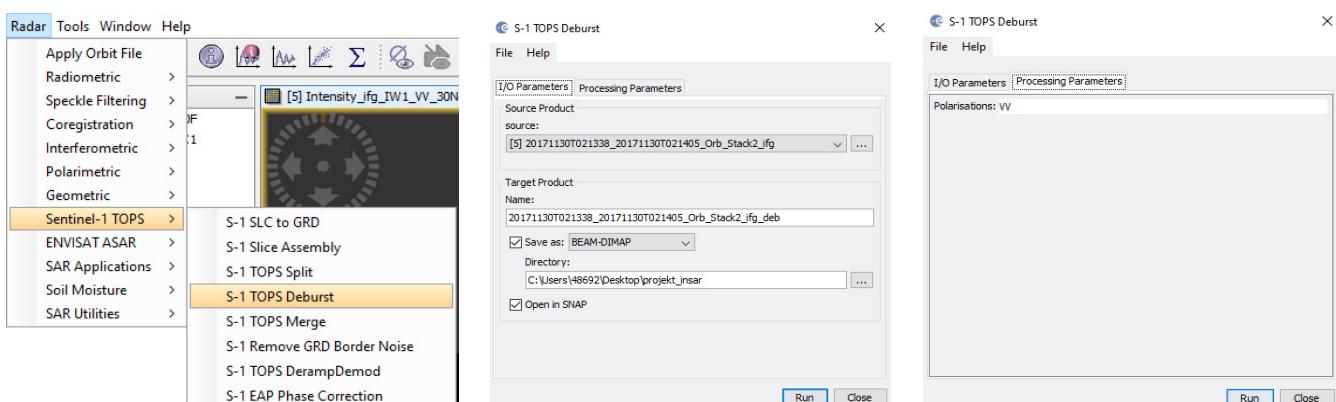
Rys. 2.2.3 Interferogram.



Rys. 2.2.4 Obraz koherencji.

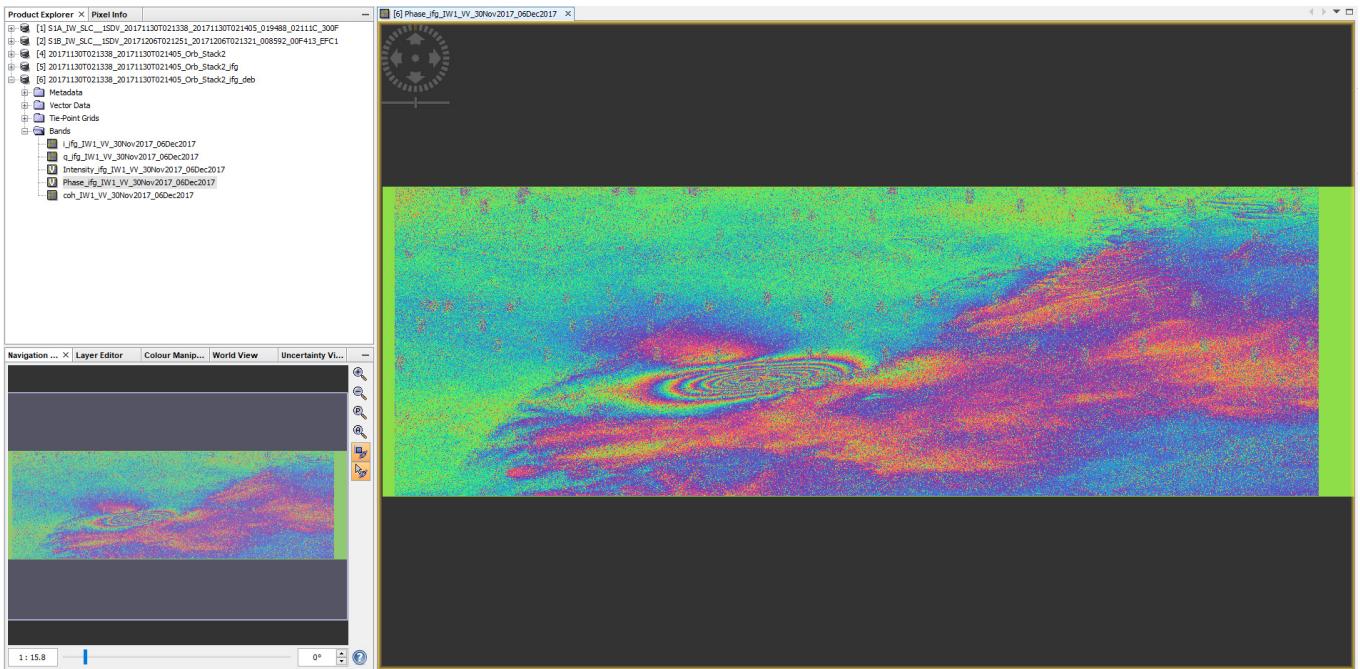
3. ŁĄCZENIE SERII - TOPS DEBURST

W tym kroku zostały połączone serie, wybrane w **punkcie 1.** (Rys. 2.1.4), do czego posłużyło narzędzie *Radar > Sentinel-1 TOPS > S-1 TOPS Deburst*. Parametry (pozostawione domyślnie) oraz wybór narzędzia przedstawiono na Rys. 2.3.1..



Rys. 2.3.1 Narzędzie oraz parametry wykorzystane do połączenia serii.

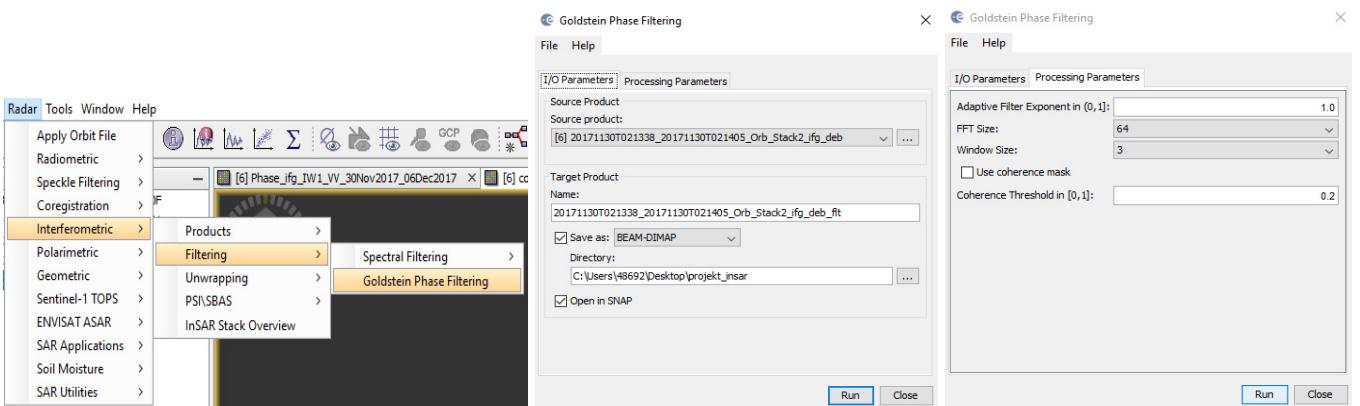
W wyniku wykonanej operacji uzyskano interferogram z połączonymi seriami, co zaprezentowano na Rys. 2.3.2..



Rys. 2.3.2 Interferogram po połączeniu serii.

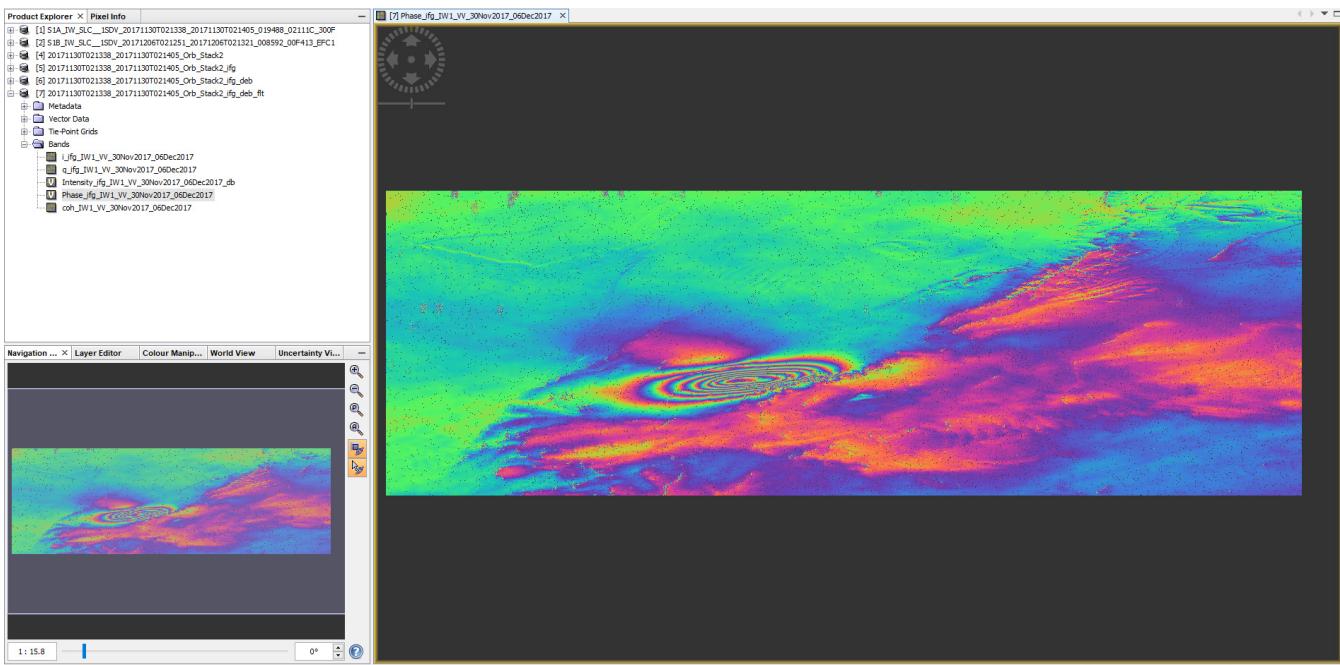
4. FILTRACJA

Na tym etapie wyeliminowano szum, którego przyczyną mogła być czasowa i geometryczna dekorelacja, rozproszenie objętościowe lub błędy przetwarzania. W celu poprawy jakości prążków widocznych na interferogramie (Rys. 2.3.2) użyto filtra Goldsteina, wykorzystującego szybką transformatę Fouriera do wzmacnienia sygnału. Do filtracji wybrano opcję *Radar > Interferometric > Filtering > Goldstein Phase Filtering*, natomiast parametry pozostałe ustawione na wartości domyślne (Rys. 2.4.1).



Rys. 2.4.1 Wybór opcji i wartości parametrów wykorzystane do filtracji interferogramu.

Rezultat filtracji został przedstawiony poniżej (Rys. 2.4.2).



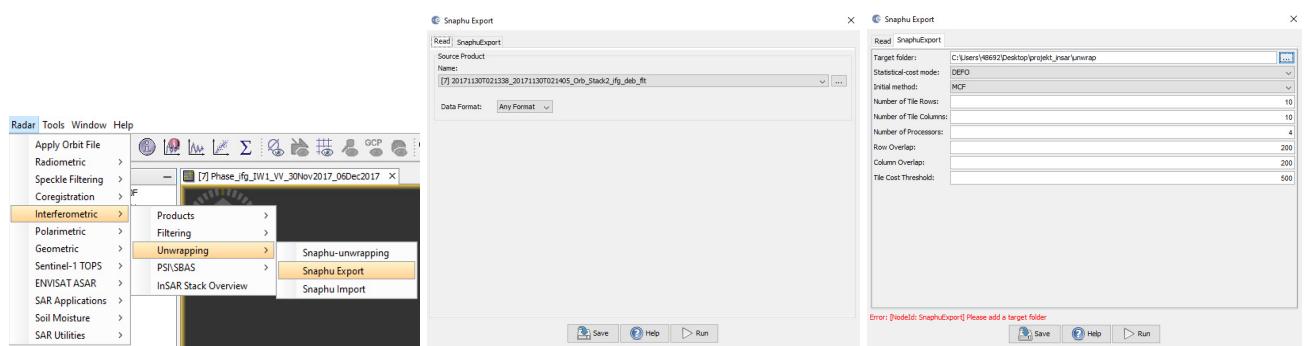
Rys. 2.4.2 Odfiltrowany interferogram.

5. ROZWIJANIE FAZY

Rozwijanie fazy zostało przeprowadzone w trzech krokach, przy użyciu zewnętrznego programu SNAPHU. Wykonanie tego procesu pozwoliło rozwiązać niejednoznaczność zwiniętej fazy oraz określić rzeczywistą wielkość powstały w wyniku trzęsienia deformacji.

➤ Eksport

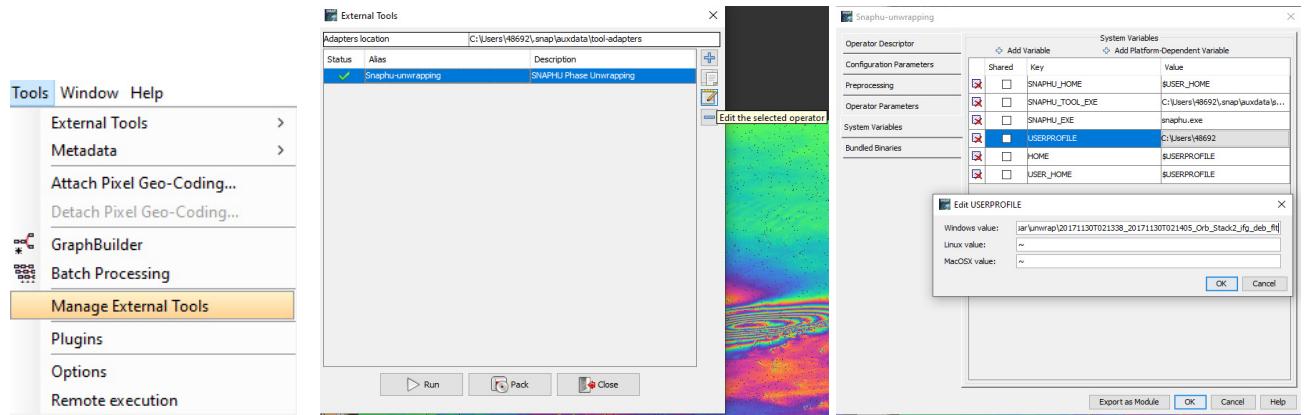
Zainstalowanie wtyczki SNAPHU umożliwiło wykorzystanie opcji *Radar > Interferometric > Unwrapping > Export*. Wybrano przefiltrowany interferogram jako produkt wejściowy oraz określono katalog docelowy dla produktów otrzymanych w wyniku rozwijania fazy, a także ustalono wartości pól *Row Overlap* i *Column Overlap* na 200 (Rys. 2.5.1).



Rys. 2.5.1 Wybór narzędzia oraz ustawienie wartości parametrów potrzebnych do eksportu.

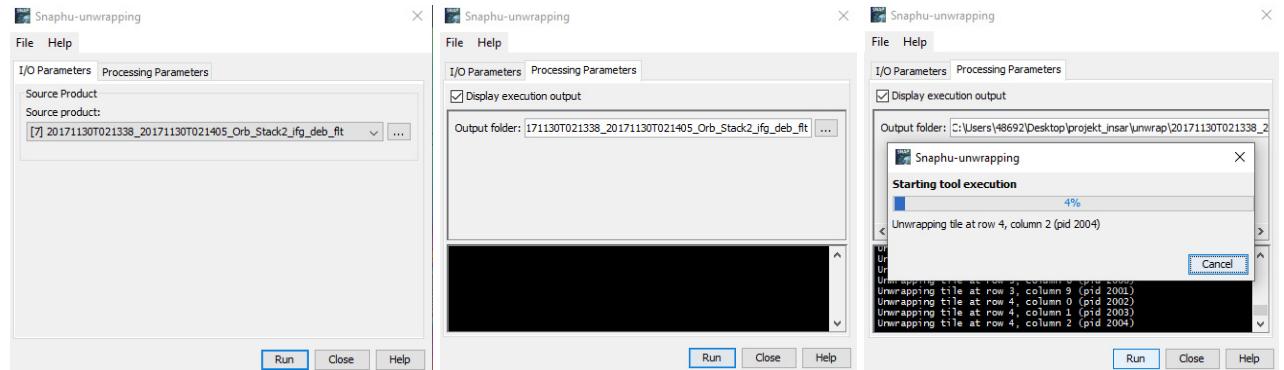
➤ Rozwijanie fazy

Po wykonanym eksporcie, przystąpiono do procesu rozwijania fazy. W tym celu użyto narzędzia *Manage External Tools* znajdującego się w zakładce *Tools*. W zakładce System Variables w polu *USERPROFILE* podano ścieżkę do katalogu wyjściowego produktów rozwijania fazy (**Rys. 2.5.2**).



Rys. 2.5.2 Użycie narzędzia *Manage External Tools* w celu ustawienia katalogu wyjściowego produktów rozwijania fazy.

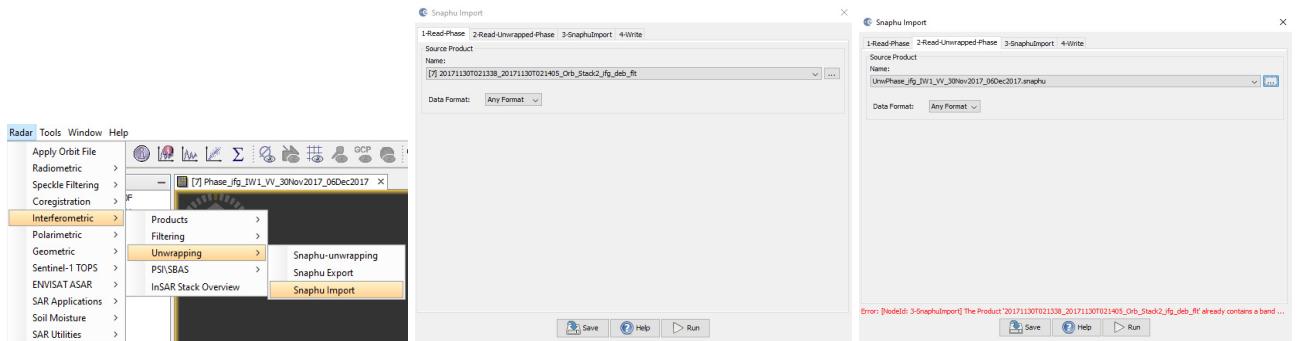
Powyższe działanie wymusiło otwarcie okna Snaphu-unwrapping (**Rys. 2.5.3**), w którym podano produkt wejściowy - przefiltrowany interferogram, oraz zaznaczono opcję *Display execution output*, umożliwiającą monitoring procesu.



Rys. 2.5.3 Proces rozwijania fazy przy użyciu Snaphu-unwrapping.

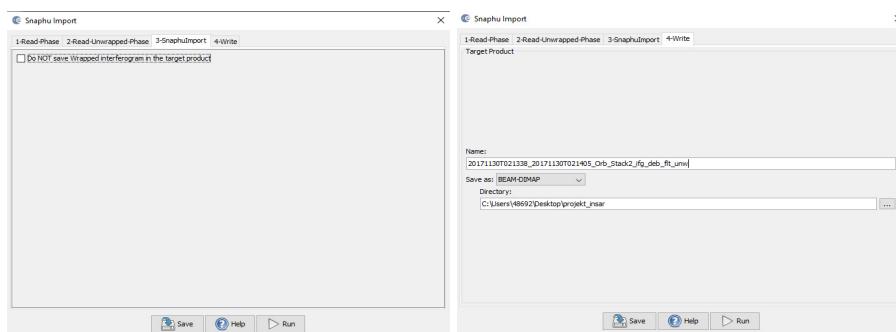
➤ Import

Na koniec wykonano import, wykorzystując narzędzie *Radar > Interferometric > Unwrapping > Snaphu import*. Interferogram z przefiltrowaną fazą podano jako plik wejściowy w zakładce *ReadPhase*, natomiast plik z rozszerzeniem .snaphu.hdr - w zakładce *Read-Unwrapped-Phase* (**Rys. 2.5.4**).



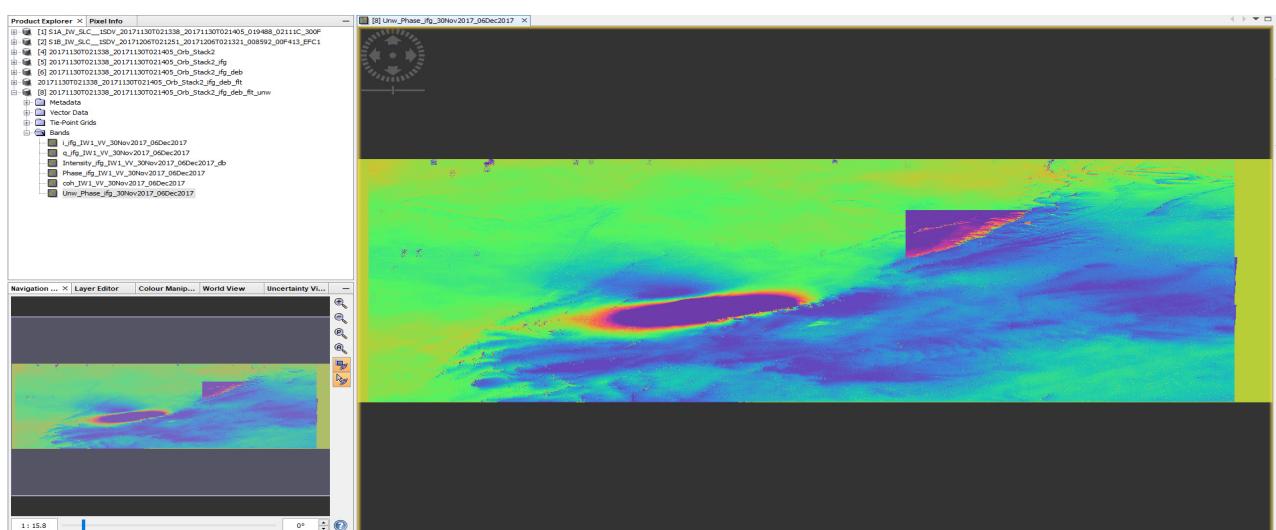
Rys. 2.5.4 Import przy użyciu narzędzia Snaphu-import oraz podanie plików wejściowych.

W kolejnej zakładce pozostawiono ustawienia domyślne (brak zaznaczenia opcji *Do NOT save Wrapped interferogram in the target product*), w ostatniej - zmieniono nazwę pliku wyjściowego w celu jego łatwiejszej identyfikacji (**Rys. 2.5.5**).



Rys. 2.5.5 Zapisanie rozwiniętej fazy.

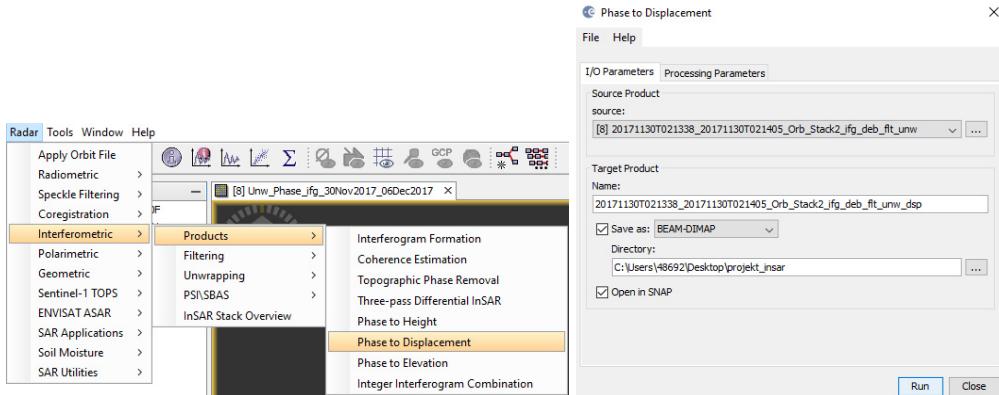
Interferogram z rozwiniętą fazą został przedstawiony na poniższym rysunku (**Rys. 2.5.6**).



Rys. 2.5.6 Interferogram z rozwiniętą fazą.

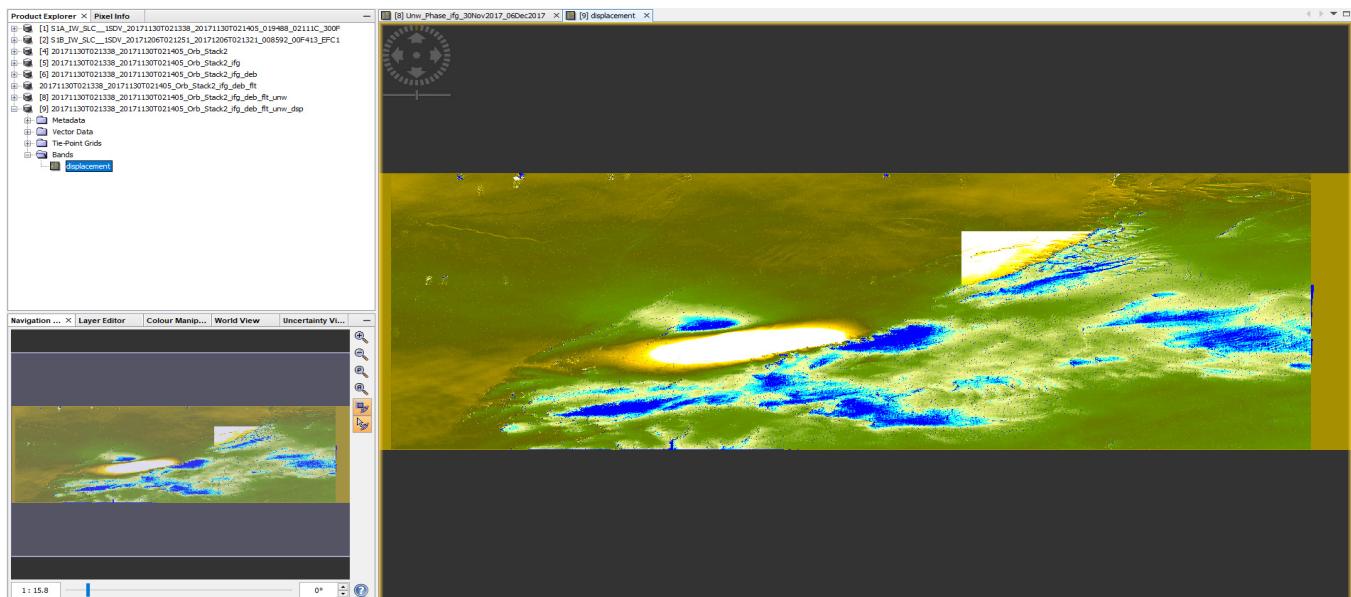
6. PRZEŁOŻENIE FAZY NA WARTOŚCI PRZEMIESZCZENIA

Przejście z fazy na przemieszczenie odbyło się przy użyciu opcji *Radar > Interferometric > Products > Phase to Displacement*, która umożliwiła konwersję rozpakowanej fazy zapisanej w radianach, na wartości bezwzględne w metrach. Pozostawiono domyślne parametry (Rys. 2.6.1).



Rys. 2.6.1 Przejście z fazy na przemieszczenie.

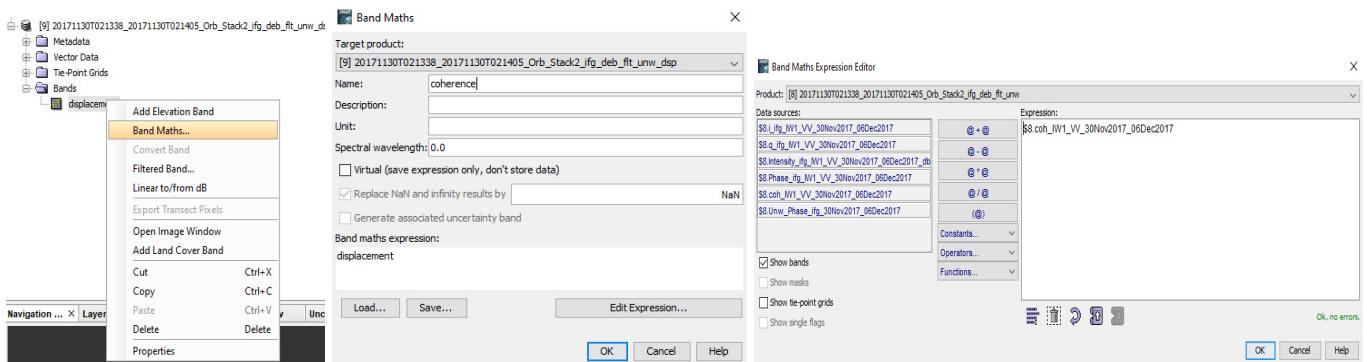
Wynik powyższej operacji został zaprezentowany na Rys. 2.6.2.



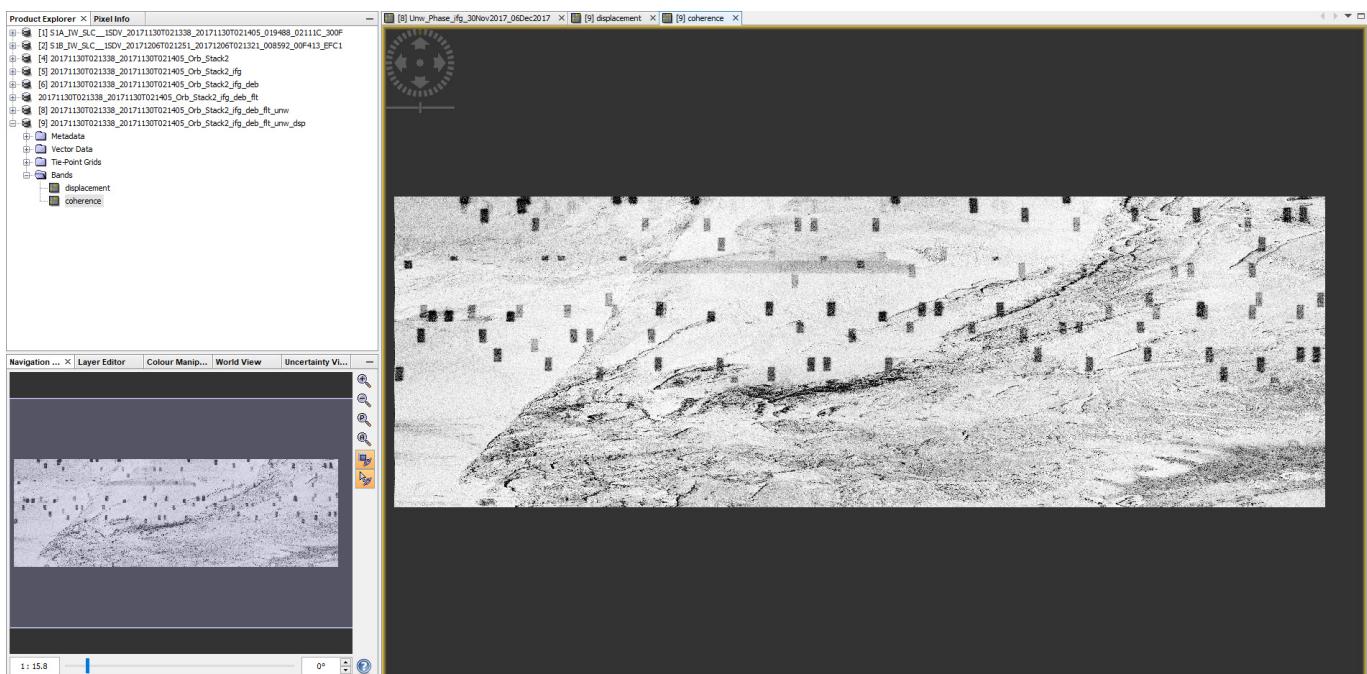
Rys. 2.6.2 Rezultat otrzymany w wyniku przejścia z fazy na przemieszczenie.

7. DODANIE OBRAZU KOHERENCJI

Dodanie obrazu koherencji nastąpiło w wyniku użycia opcji *Band Maths*, po kliknięciu na produkt otrzymany w **punkcie 6**. Opcja Virtual została odznaczona, nadano odpowiednią nazwę oraz wyedytowano wyrażenie, wybierając koherencję z dostępnej listy, co zilustrowano poniżej (**Rys. 2.7.1**). Uzyskany rezultat przedstawiono na **Rys. 2.7.2**.



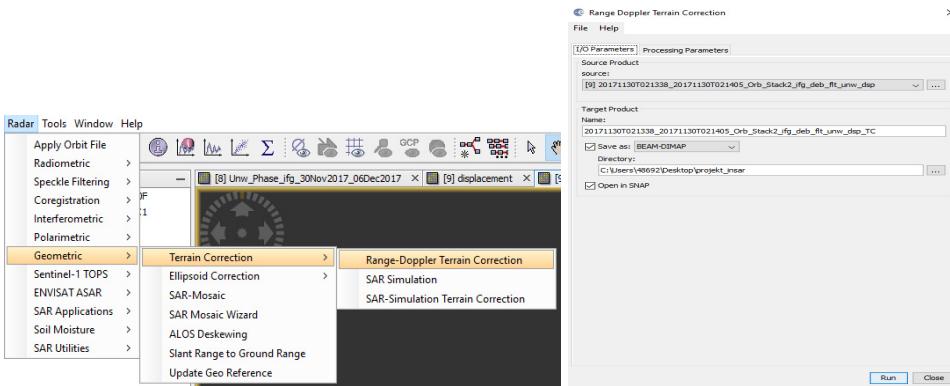
Rys. 2.7.1 Dodanie obrazu koherencji.



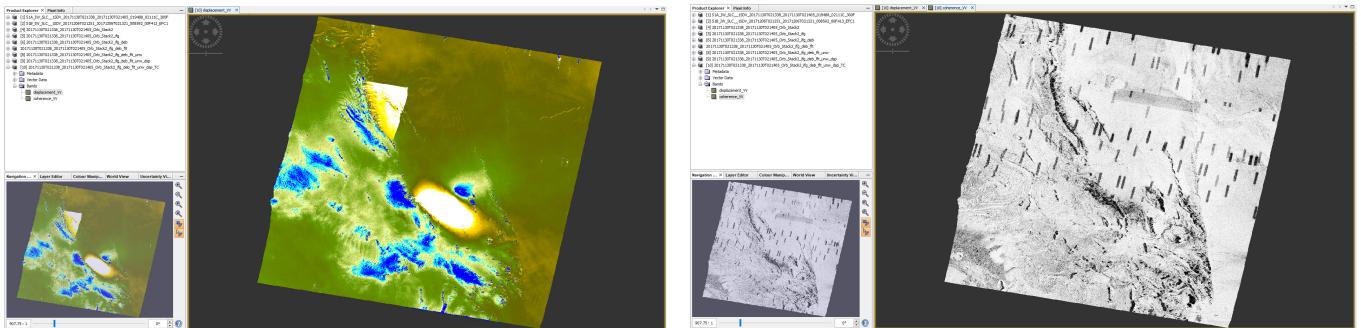
Rys. 2.7.2 Obraz koherencji.

8. KOREKCJA TERENU

Następny krok polegał na usunięciu zniekształceń geometrycznych oraz umożliwił przejście na układ współrzędnych geograficznych. W tym celu wykorzystano narzędzie *Radar > Geometric > Terrain Correction > Range Doppler Terrain Correction*, gdzie jako plik wejściowy podano interferogram przemieszczenia, natomiast pozostałe parametry pozostawiono z przypisanymi wartościami domyślnymi (Rys. 2.8.1). Interferogram przemieszczeniowy i obraz koherencji po wykonaniu korekcji terenu zaprezentowano na Rys. 2.8.2.



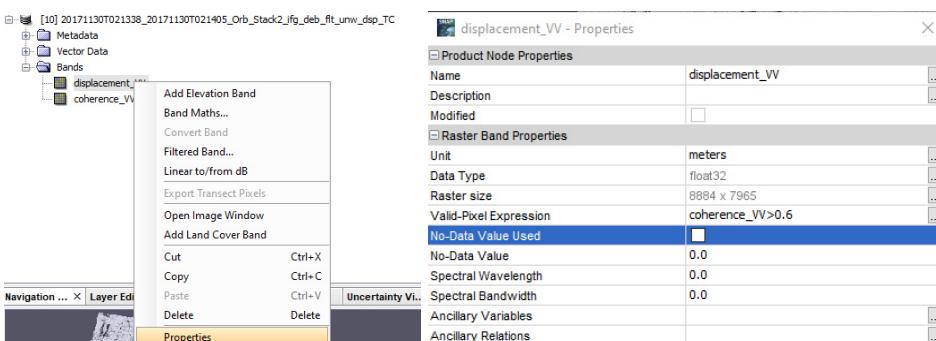
Rys. 2.8.1 Korekcja terenu przy użyciu narzędzia Range Doppler Terrain Correction.



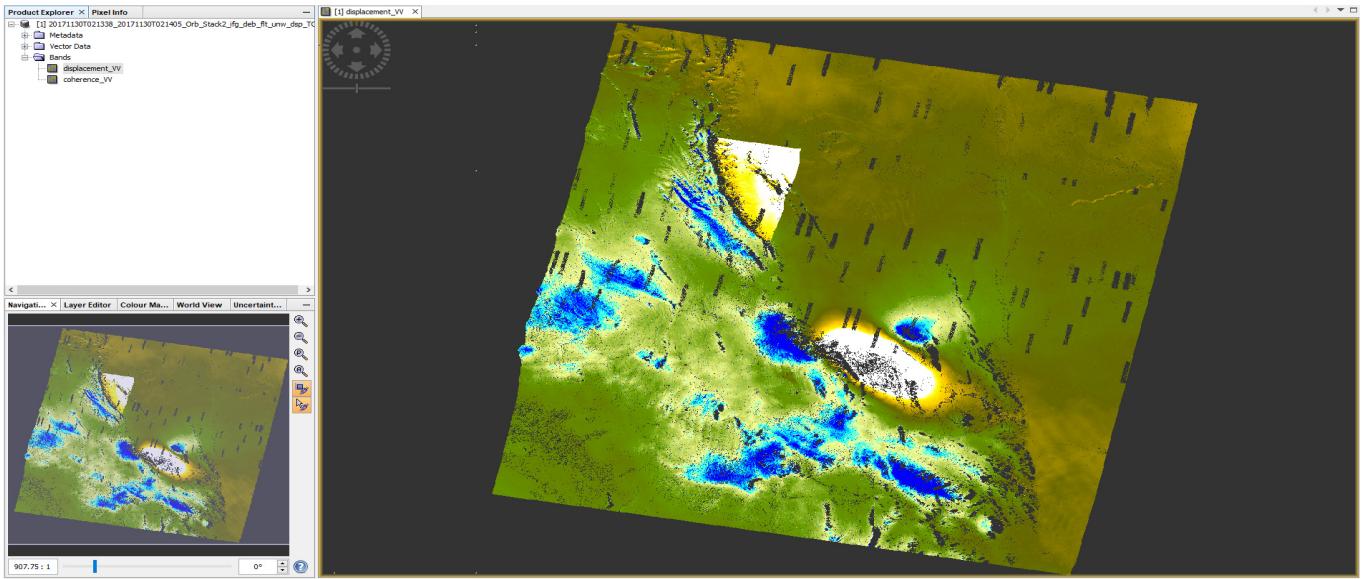
Rys. 2.8.2 Interferogram przemieszczeniowy i obraz koherencji po wykonaniu korekcji terenu.

9. MASKOWANIE OBSZARÓW O NISKIEJ KOHERENCJI

W celu ograniczenia błędów w interpretacji, obszary o niskiej koherencji zostały poddane maskowaniu. We właściwościach interferogramu przemieszczeniowego, ustawiono wartość pola *Valid-Pixel Expression* na *coherence_VV>0.6*, co zostało pokazane na poniższym rysunku (Rys. 2.9.1). W rezultacie, na interferogramie zostały wyświetlane jedynie tereny, dla których wartość koherencji przekraczała zadany próg (Rys. 2.9.2).



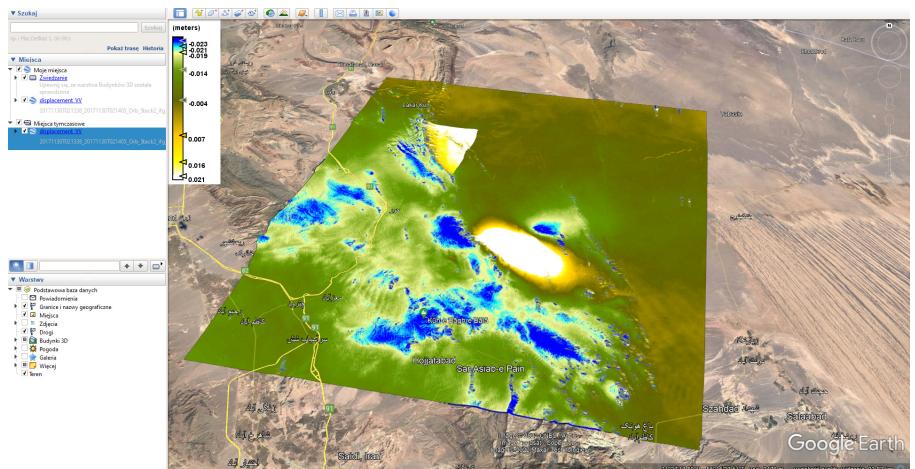
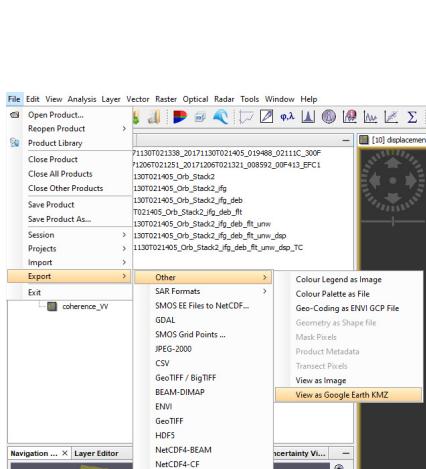
Rys. 2.9.1 Maskowanie obszarów o niskiej koherencji (poniżej 0.6).



Rys. 2.9.2 Rezultat otrzymany w wyniku maskowania obszarów o niskiej koherencji.

10. EKSPORT WYNIKÓW DO GOOGLE EARTH

Kluczowe etapy przetwarzania, w których otrzymano wyniki istotne do dalszej analizy i interpretacji zostały wyeksportowane do formatu KMZ, co umożliwiło ich wizualizację w GoogleEarth. W tym celu, z menu głównego wybrano *File > Export > Other > View as Google Earth KMZ* (Rys. 2.10.1), natomiast wynik zwizualizowano na Rys. 2.10.2.

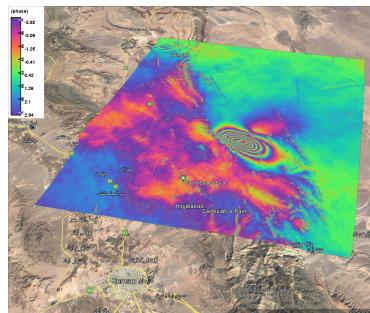


Rys. 2.10.1 Eksport produktów do formatu KMZ. Rys. 2.10.2 Rezultat otrzymanych wyników zaprezentowany w GoogleEarth.

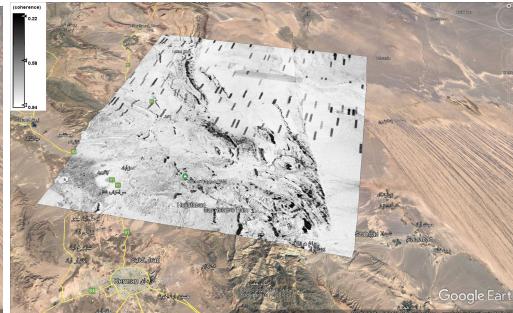
Analogiczne kroki zostały wykonane w przypadku przetwarzania przed i po trzęsieniu ziemi (dla stanu przed trzęsieniem nie została rozwinięta faza, gdyż na otrzymanym interferogramie nie było widocznych deformacji).

III. ANALIZA I INTERPRETACJA WYNIKÓW

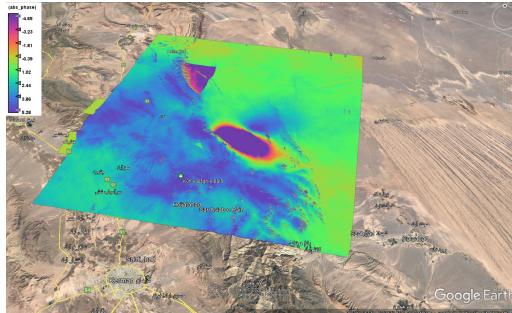
Rezultaty otrzymane w wyniku przetwarzania w programie SNAP, zobrazowań satelitarnych pozyskanych przez satelitę Sentinel-1.
Trzęsienie ziemi, które miało miejsce w Iranie, dnia 1 grudnia 2017 roku.



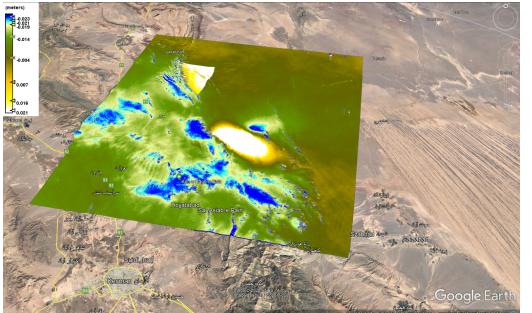
Rys. 3.1.1 Interferogram, obszar badań.



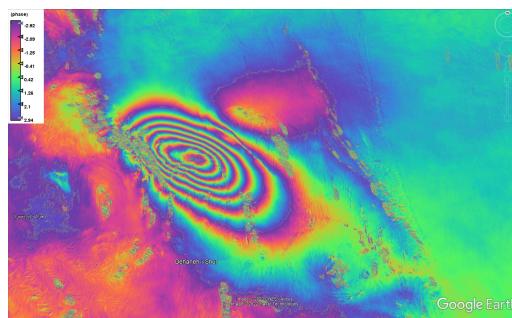
Rys. 3.1.2 Obraz koherencji, obszar badań.



Rys. 3.1.3 Rozwiniona faza, obszar badań.



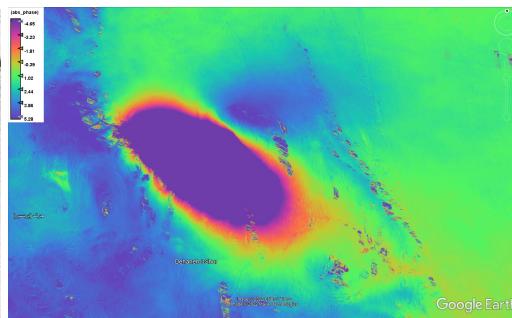
Rys. 3.1.4 Interferogram przemieszczeniowy, obszar badań.



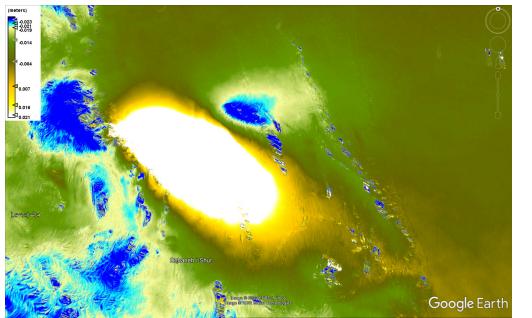
Rys. 3.1.5 Interferogram, obraz przycięty.



Rys. 3.1.6 Obraz koherencji, obraz przycięty.

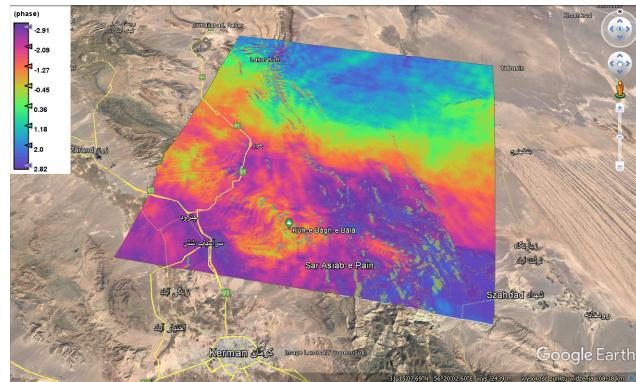


Rys. 3.1.7 Rozwiniona faza, obraz przycięty.

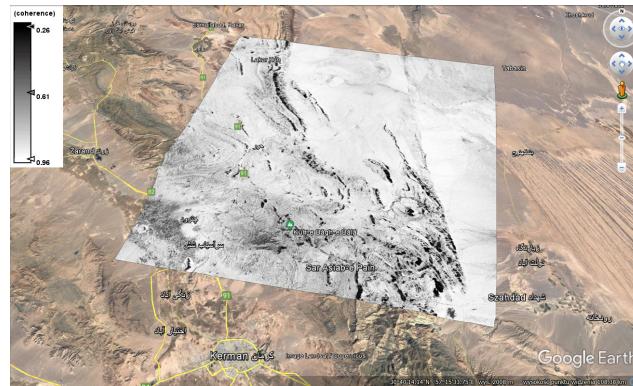


Rys. 3.1.8 Interferogram przemieszczeniowy, obraz przycięty.

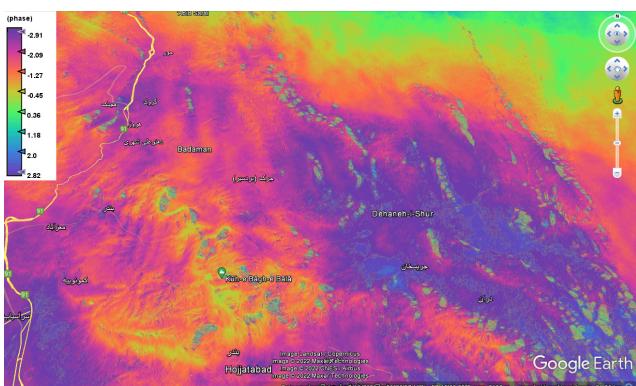
Rezultaty otrzymane dla stanu przed trzęsieniem ziemi.



Rys. 3.2.1 Interferogram, obszar badań.



Rys. 3.2.2 Obraz koherencji, obszar badań.

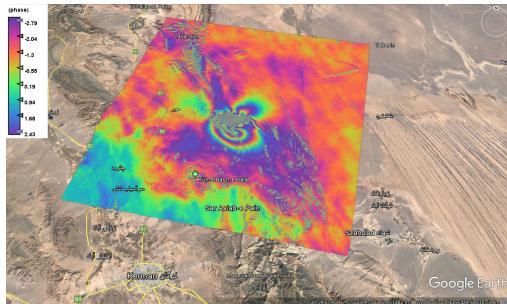


Rys. 3.2.3 Interferogram, obraz przycięty.

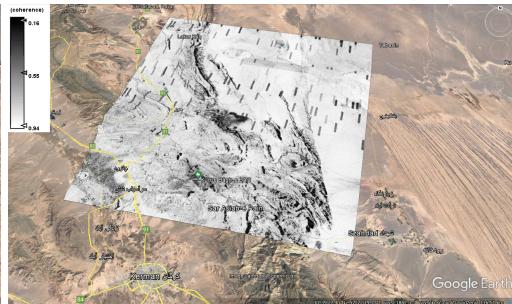


Rys. 3.2.4 Obraz koherencji, obraz przycięty.

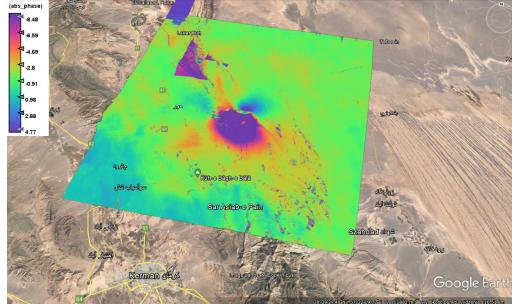
Rezultaty otrzymane dla stanu po trzęsieniu ziemi.



Rys. 3.3.1 Interferogram, obszar badań.



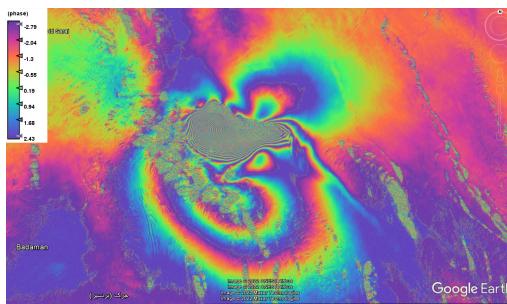
Rys. 3.3.2 Obraz koherencji, obszar badań.



Rys. 3.3.3 Rozwinięta faza, obszar badań.



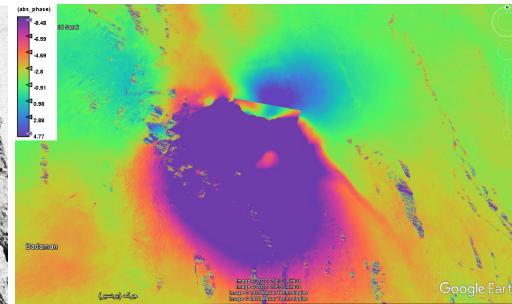
Rys. 3.3.4 Interferogram przemieszczeniowy, obszar badań.



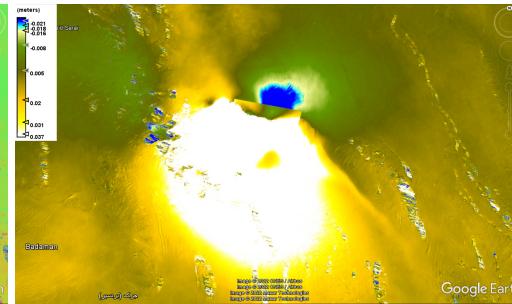
Rys. 3.3.5 Interferogram, obraz przycięty.



Rys. 3.3.6 Obraz koherencji, obraz przycięty.

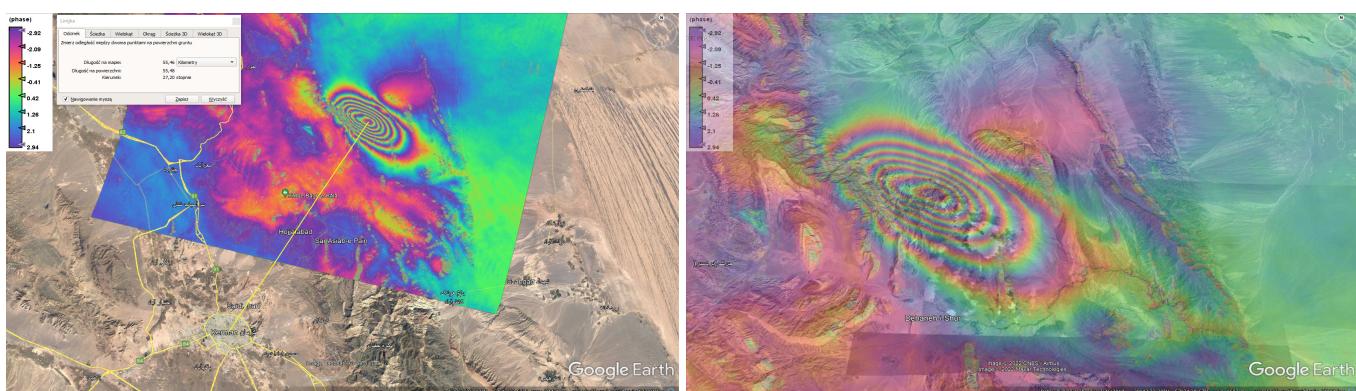


Rys. 3.3.7 Rozwinięta faza, obraz przycięty.



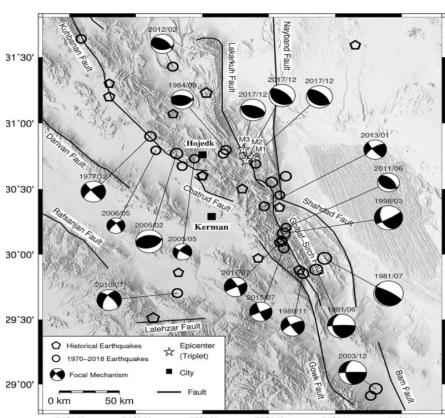
Rys. 3.3.8 Interferogram przemieszczeniowy, obraz przycięty.

1. ANALIZA TRZĘSIENIA ZIEMI



Rys. 3.1.9 Epicentrum trzęsienia ziemi.

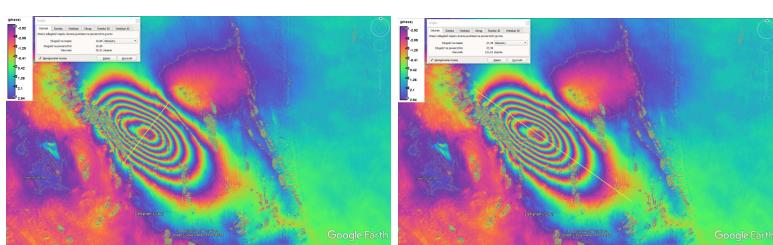
Analizie zostało poddane trzęsienie ziemi, które miało miejsce w środkowo-wschodnim Iranie, na północny-wschód od miasta Kerman. Wstrząsy zostały zarejestrowane dnia 1 grudnia 2017 r. o godzinie 02:32:46 UTC. W odległości ok. 55 km od centrum Kerman, położone było epicentrum trzęsienia ziemi (Rys. 3.1.9), obejmujące rejon Hojedk - niewielkiego, górzystego miasta liczącego ok. 3000 mieszkańców (według danych na rok 2017¹). Hipocentrum trzęsienia znajdowało się stosunkowo płytka - na 10 km głębokości.



Obszar badań, często nawiedzany przez silne trzęsienia ziemi, położony jest między systemami uskoków Kuhbanan oraz Nayband (Rys. 3.1.10, epicentrum oznaczono identyfikatorem M1). Dodatkowo, szeroka strefa sejsmotektoniczna środkowo-wschodniego Iranu, składająca się z bloków tektonicznych o znacznej niejednorodności przestrzennej sprzyja licznym dragniom skorupy ziemskiej. Mimo, iż magnituda wynosiła 6.1 w skali Richtera, analizowane trzęsienie ziemi nie spowodowało katastrofalnych zniszczeń, a śmierć poniosło niewiele osób, z powodu trudnych warunków naturalnych badanego terenu, co z kolei przyczyniło się do niewielkiego zaludnienia regionu.

Rys. 3.1.10 System uskoków na obszarze badań².

Ponadto, według wykonanych pomiarów, dokonanych po wyeksportowaniu uzyskanych wyników do GoogleEarth, można oszacować, że trzęsienie obejmowało swoim zasięgiem obszar liczący blisko 300 km^2 (Rys. 3.1.11).



Rys. 3.1.11 Oszacowanie szerokości i długości zasięgu wstrząsów sejsmicznych.

¹ <https://en.wikipedia.org/wiki/Hojedk>

² <https://link.springer.com/article/10.1007/s10950-020-09934-3>

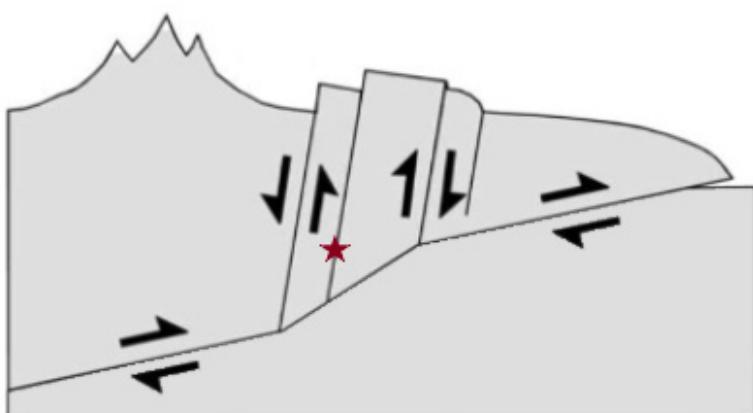
Analizując otrzymane wyniki (w szczególności **Rys. 3.1.3** i **Rys. 3.1.4**), można zauważyć, że na północny-zachód od głównych wstrząsów wystąpiło zniekształcenie. Z powodu bardzo nienaturalnego kształtu i przypuszczeń o powstających nieprawidłowościach, obserwowanych na wspomnianych interferogramach, postanowiono pominąć tę część obszaru badań w dalszej interpretacji. Powstanie ewentualnego błędu można tłumaczyć występowaniem w tamtym miejscu niskich wartości koherencji lub ruchami przepowiadającymi kolejne trzęsienie ziemi (**Rys. 3.1.10**, punkt M3).

Na podstawie ilustracji **Rys. 3.1.5**, można stwierdzić, że trzęsienie ziemi jest reprezentowane przez układ siedmiu koncentrycznych prążków interferencyjnych, których rozkład pokrywa się z przebiegiem NW-SE uskoku Lakar Kuh (**Rys. 3.1.10**), w wyniku którego nastąpiło prawdopodobnie rozerwanie wspomnianego uskoku. Prążki umiejscowione w południowo-wschodniej części omawianego zdjęcia, wykazują większe rozluźnienie, co oznacza łagodniejszą deformację, w porównaniu do północno-zachodniej części, gdzie gęsto rozmieszczone prążki wskazują na występowanie większych stromizn. Kierunek przemieszczenia świadczący o podnoszeniu terenu, został określony na podstawie sekwencji kolorów prążków, interpretowanych od zewnętrz, zmierzając ku centrum zniekształcenia. Podnoszenie terenu w miejscu wystąpienia trzęsienia, potwierdza również obraz rozwiniętej fazy, przedstawiający ogólny trend wzrostowy odkształcającego się elementu (**Rys. 3.1.7**). Ponadto, na północny-wschód od epicentrum wstrząsów, zaznacza się obszar osiadania.

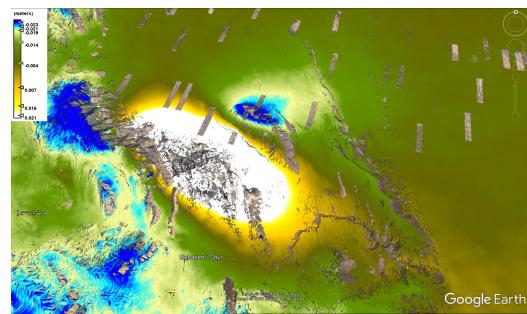
Iran jest położony w regionie bardzo aktywnym sejsmicznie, czego przyczyną jest skomplikowana tektonika obszaru. Analizowany teren leży w strefie kolizji trzech płyt litosfery: eurazjatyckiej, arabskiej i indyjskiej, co wiąże się z występowaniem na tym obszarze wielu deformacji skorupy ziemskiej, sprzyjających powstawaniu licznych uskoków.

Według ilustracji przedstawiającej system uskoków na obszarze badań (**Rys. 3.1.12**) oraz interferogram przemieszczeniowy (**Rys. 3.1.8**), można zauważyć, że wstrząsy wystąpiły na terenie płytowych uskoków. W miejscu najsilniejszych drgań utwory mas skalnych zostały wyniesione w górę - skrzydło wiszące, natomiast graniczące z nim obszary stanowiły skrzydła zrzucone. Dodatkowo wierzchnia pokrywa skalna została przesunięta w kierunku wschodnim lub północno-wschodnim, względem mas położonych niżej.

Na podstawie interferogramu przemieszczeniowego, można zauważyć, że nie zostały dokładnie zarysowane deniwelacje, obserwowane na poniższym rysunku (**Rys. 3.1.12**), w miejscu wyniesienia terenu. Może to być spowodowane wystąpieniem niskiej koherencji w południowo-zachodniej części wstrząsów, skutkującej ograniczeniu dokładności otrzymanych wyników (**Rys. 3.1.13**).



Rys. 3.1.12 System uskoków w rejonie trzęsienia ziemi.



Rys. 3.1.13 Maskowanie obszarów o niskiej koherencji.

1. ANALIZA STANU PRZED TRZĘSIENIEM ZIEMI

Biorąc pod uwagę rezultaty uzyskane w wyniku przetwarzania dla stanu sprzed trzęsienia ziemi (patrz interferogram **Rys. 3.2.1**), można zauważyć, że nie wystąpiły żadne wstrząsy przepowiadające - brak prążków na interferogramie. Deformacja widoczna na zachód od miejsca trzęsienia ziemi, może jednak świadczyć o pierwszych ruchach, które wystąpiły przed trzęsieniem i były przyczyną osiadania wskazanego obszaru. Powstanie obniżenia w późniejszym czasie - podczas trzęsienia ziemi - potwierdzają wyniki otrzymywane dla analizowanego trzęsienia (**Rys. 3.1.1 - Rys. 3.1.8**). Jednakże, w związku z brakiem znacznych zmian obserwowanych na interferogramie i niepewności powyższych przypuszczeń, rozwinięcie fazy nie zostało wykonane w tym przypadku.

2. ANALIZA STANU PO TRZĘSIENIU ZIEMI

Analizując interferogramy uzyskane dla stanu po trzęsieniu ziemi (**Rys. 3.3.1 - Rys. 3.3.8**), można stwierdzić, że na obszarze badań wystąpiło kolejne trzęsienie ziemi o magnitudzie 6.0, którego epicentrum znajdowało się w niewielkiej odległości od poprzedniego. Również w tym przypadku, wzór kierunkowości otrzymywanych prążków pokrywa się z przebiegiem uskoków Lakar Kuh. Na podstawie interferogramu (**Rys. 3.3.5**), można stwierdzić, że trzęsienie jest przedstawione jako układ trzech głównych prążków, w miejscu których zaobserwowano wyniesienie terenu. Podobnie jak podczas pierwszego trzęsienia, południowy obszar objęty przez drugie trzęsienie, charakteryzuje się mniejszymi deformacjami. W północnej części można zauważyć serię wielu, gęsto skupionych prążków, wskazujących na wyniesienie terenu o stromych zboczach. Po drugiej stronie uskoku, można natomiast zaobserwować inwersję w układzie prążków, oznaczającą osiadanie terenu. Podobny układ występuje również na południe od blisko siebie leżących prążków, co dokładnie zostało zwizualizowane na interferogramie z rozwiniętą fazą (**Rys. 3.3.7**). Duże deniwelacje terenu dobrze prezentuje natomiast rysunek przedstawiający interferogram przemieszczeniowy (**Rys. 3.3.8**).

IV. WNIOSKI

Na podstawie otrzymanych rezultatów, można stwierdzić, że region środkowo-wschodniego Iranu jest obszarem wysoce aktywnym sejsmicznie i często nawiedzanym przez trzęsienia ziemi. Ponadto, niezwykle rozwinięty i nieregularny system płytowych uskoków, w szczególności tych jeszcze nieodkrytych, stanowi poważne zagrożenie. Często pojawiające się wstrząsy spowodowane jednym trzęsieniem, sprzyjają powstawaniu kolejnych, w stosunkowo krótkim odstępie czasowym i z równie niszczycielską siłą. Zarówno trzęsienie ziemi z dnia 1 grudnia 2017 r., jak i wstrząsy, które miały miejsce po analizowanym trzęsieniu, przerwały ślepy, zapadający się na NE uskok odwrócony poniżej pasma górskiego Mian Kuh³. Do przerwania uskoku przyczyniło się występowanie epicentrum drugiego trzęsienia ziemi na obszarze poślizgu pierwszego. Oba trzęsienia utworzyły wydłużone strefy poślizgowe, które mogą wskazywać na strukturalne ograniczenie dolnych i górnych krawędzi poślizgu, zbudowanych ze słabych warstw skał osadowych. Ponadto, omawiane wstrząsy wystąpiły w obrębie licznych, ewoluujących uskoków, związanych z południowym zakończeniem prawobocznego uskoku poślizgu Lakar Kuh.

³ <https://academic.oup.com/gji/article/217/2/909/5304981?login=true>

V. PODSUMOWANIE

Analiza trzęsienia ziemi, które miało miejsce dnia 1 grudnia 2017 roku, została przeprowadzona w oparciu o pozyskane zobrazowania z satelity Sentinel-1. Otrzymane, w wyniku przetwarzania metodą InSAR rezultaty, pozwoliły uwypuklić wysokie zagrożenie sejsmiczne obserwowane na terenie środkowo-wschodniego Iranu. Trzęsienie ziemi, które wystąpiło na obszarze badań o charakterze górkim z licznymi równinami aluwialnymi, nie spowodowało jednak większych zniszczeń, dzięki utrudnionemu budownictwu na tym terenie i odizolowaniu go poprzez góry.

VI. LITERATURA

- <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/2017/12/01/02h32/magnitude6-NorthernandCentralIran-quake.html>
- <https://link.springer.com/article/10.1007/s10950-020-09934-3>
- <http://earthjay.com/?p=6733>
- <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/7/1189/htm>
- <https://geoforum.pl/news/29037/kolejna-nowosc-iceye-interferometria-w-18-dniowym-cyku>
- https://pl.wikipedia.org/wiki/Płyta_tektoniczna#/media/Plik:Płyty_tektoniczne.svg
- <https://academic.oup.com/gji/article/217/2/909/5304981?login=true>