



Ekstraksi Deformasi Koseismik 2.5-D Menggunakan Data *Multiple* SAR Sentinel-1 (Studi Kasus Gempa Bumi Iran 14 November 2021)

(Extraction of 2.5-D Surface Deformation Using Multiple Sentinel-1 SAR Data (Case Study The 14th November 2021 Iran Earthquake)

Gani Mahendra¹, Hidayat Panuntun²

¹ Mahasiswa Teknologi Survei dan Pemetaan Dasar, Departemen Teknologi Kebumihan, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada

² Dosen Teknologi Survei dan Pemetaan Dasar, Departemen Teknologi Kebumihan, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada

Penulis Korespondensi: Gani Mahendra | **Email:** ganimahendra99@mail.ugm.ac.id

Diterima (*Received*): 05/Oct/2022 Direvisi (*Revised*): 16/Nov/2022 Diterima untuk Publikasi (*Accepted*): 28/Nov/2022

ABSTRAK

Teknik *Synthetic Aperture Radar* (SAR) interferometri merupakan salah satu metode yang digunakan untuk pengamatan deformasi permukaan. Teknik SAR interferometri memiliki kelebihan yaitu dapat mengukur besarnya deformasi permukaan hingga satuan milimeter. Walaupun teknik SAR Interferometri memiliki kelebihan, teknik SAR interferometri tetap memiliki kekurangan yaitu hanya dapat memberikan informasi deformasi permukaan 1 dimensi (vertikal) saja. Kelemahan tersebut mengakibatkan teknik SAR interferometri sulit digunakan untuk membantu dalam proses interpretasi sumber dan mekanisme deformasi yang terjadi. Penelitian ini bertujuan untuk ekstraksi deformasi permukaan 2.5-D (2.5 Dimensi) akibat gempa bumi Iran 14 November 2021. Data yang digunakan untuk uji algoritma 2.5-D adalah citra SAR Sentinel-1 sebanyak 2 pasang citra. Citra tersebut adalah citra yang diakuisisi pada tanggal 13 November 2021 dan 19 November 2021. Citra SAR Sentinel-1A diolah menggunakan perangkat lunak GMTSAR dengan arah orbit *ascending* dan *descending*. Citra SAR Sentinel-1A yang sudah diolah menggunakan GMTSAR menghasilkan pergeseran permukaan tanah terhadap arah pandang satelit (*Line of Sight*). Hasil dari penelitian ini diketahui bahwa komponen horizontal terjadi pergeseran sebesar 200 mm ke arah barat. Pergeseran komponen vertikal mengalami kenaikan permukaan tanah sebesar 541 mm pada area utara dan penurunan permukaan tanah maksimal sebesar 231 mm pada area selatan. Berdasarkan hasil tersebut, diketahui bahwa nilai pergeseran komponen vertikal lebih besar daripada komponen horizontal. Hal tersebut menunjukkan bahwa gempa bumi Iran 14 November 2021 diindikasikan disebabkan oleh aktivitas sesar dengan mekanisme sesar naik (*thrust fault*).

Kata Kunci: SAR Interferometri, 2.5-D, GMTSAR, deformasi koseismik, gempa bumi Iran 2021

ABSTRACT

Interferometry Synthetic Aperture Radar (SAR) technique is one of the methods used to observe surface deformation. The SAR interferometry technique has the advantage that it can measure the magnitude of surface deformation up to millimeters. Although the SAR Interferometry technique has advantages, the SAR interferometry technique still has a disadvantage, namely that it can only provide 1-dimensional (vertical) surface deformation information. These weaknesses make it difficult for interferometric SAR techniques to be used to make the deformation mechanism that occurs. This study to extract 2.5-D surface deformation (2.5 Dimensions) due to the Iran earthquake 14 November 2021. The data used for this study is Sentinel-1 SAR images with 2 pairs of images. These images are images acquired on November 13, 2021 and November 19, 2021. Sentinel-1A SAR images were processed using GMTSAR with ascending and descending orbit directions. Sentinel-1A SAR imagery that has been processed using GMTSAR results in a shift in the ground surface towards the satellite's line of sight (Line of Sight). The results of this study note that the horizontal component that occurs is a shift of 200 mm to the west. The vertical component shift experienced an increase in ground level of 541 mm in the northern area and a maximum land subsidence of 231 mm in the southern area. Based on these results, it is known that the shift value of the vertical component is greater than the horizontal component. This shows that the November 14, 2021 Iran earthquake was indicated by fault activity with a thrust fault mechanism.

Keywords: SAR Interferometry, 2.5-D, GMTSAR, coseismic deformation, 2021 Iran earthquake

1. Pendahuluan

Teknik *Synthetic Aperture Radar* (SAR) interferometri digunakan sejak tahun 1993 (Massonnet dkk., 1993), teknik SAR interferometri telah menjadi metode yang penting dalam deteksi deformasi permukaan tanah akibat aktivitas vulkanis dan tektonis (Elliott dkk., 2016). Teknik SAR interferometri saat ini telah mengalami perkembangan yang signifikan pada sistem satelit dan pemrosesan data. Perkembangan tersebut mengakibatkan peningkatan teknik SAR interferometri untuk pengamatan deformasi dan perubahan permukaan tanah (Pepe & Calò, 2017). Walaupun SAR interferometri telah mengalami perkembangan yang signifikan, pengamatan deformasi permukaan menggunakan teknik SAR interferometri masih memiliki kekurangan.

Salah satu kekurangan teknik SAR Interferometri adalah hanya dapat memberikan informasi pergeseran permukaan tanah 1 dimensi berdasarkan pergerakan yang sejajar dengan arah pandang sensor satelit (*Line of Sight*) (Wright dkk., 2004). Efek dari kekurangan tersebut, teknik SAR interferometri tidak dapat memberikan informasi deformasi permukaan dalam posisi 3 dimensi. Seharusnya informasi yang dihasilkan dari pengukuran deformasi permukaan adalah informasi 3 dimensi (X, Y, dan Z). Informasi pergeseran X adalah komponen pergeseran ke arah timur-barat (T-B). Informasi pergeseran Y adalah komponen pergeseran ke arah utara-selatan (U-S). Informasi pergeseran Z adalah komponen pergeseran vertikal *up-down* (U-D). Deformasi permukaan tanah yang terekam oleh citra SAR merupakan deformasi permukaan yang sejajar dengan arah pandang sensor satelit (*Line-of-Sight*).

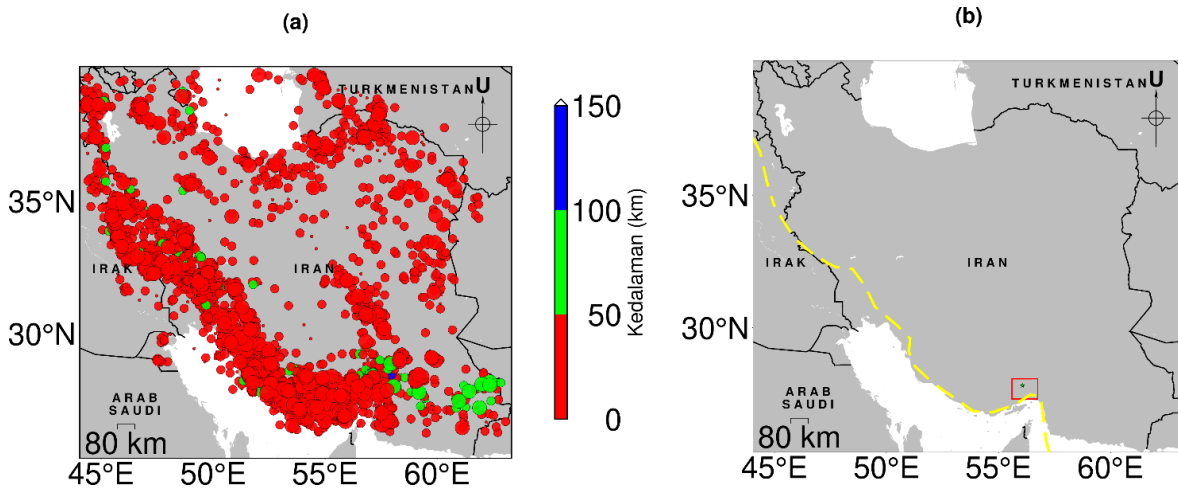
Deformasi permukaan dalam tiga dimensi dapat ditentukan dengan beberapa kombinasi beberapa metode berikut (Hu dkk., 2014) : (1) kombinasi teknik SAR interferometri dengan *Offset-Tracking* (Himematsu & Furuya, 2020), (2) kombinasi teknik SAR interferometri dengan *Multiple Aperture Interferometry* (MAI) (Baek & Jung, 2020), (3) *Multi-pass offset-tracking* (De Michele dkk., 2010). Perlu diketahui bahwa metode MAI dan *offset-tracking* memiliki tingkat presisi dan resolusi spasial yang lebih rendah dibandingkan teknik SAR interferometri (Panuntun, 2022). Akibat dari kekurangan tersebut adalah produk dari hasil pengolahan menggunakan metode MAI dan *offset-tracking* akan memiliki resolusi spasial yang rendah daripada produk asalnya.

Kelemahan tersebut dapat diatasi dengan menggunakan algoritma yang dapat digunakan untuk menghitung besarnya deformasi permukaan menggunakan teknik SAR

interferometri. Teknik SAR interferometri tetap digunakan agar tingkat presisi dan resolusi spasial tidak berubah dan tetap terjaga. Teknik SAR interferometri mampu menghasilkan presisi hingga fraksi milimeter dan resolusi spasial dengan tingkat kerapatan hingga fraksi centimeter. Harapannya dengan presisi dan resolusi spasial yang tidak berubah dan tetap terjaga, informasi penting yang diberikan saat interpretasi dan analisis mekanisme gempa bumi tidak hilang dan tetap terjaga.

Ekstraksi 2.5-D merupakan pergeseran yang memberikan informasi arah timur-barat (T-B) dan vertikal. Pergeseran tersebut dapat ditentukan dengan menggunakan minimal 2 buah citra SAR yang memiliki arah orbit berbeda (Panuntun, 2021). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa ekstraksi 2.5-D dapat memvisualisasikan deformasi permukaan lebih baik daripada 1-D (Huang dkk., 2016) dan dapat membantu menentukan sumber mekanisme gempa yang terjadi (Xu dkk., 2019).

Salah satu gempa terbaru yang dapat terekam dengan baik oleh satelit SAR Sentinel-1A adalah gempa bumi Iran yang terjadi pada tanggal 14 November 2021 (<https://comet.nerc.ac.uk/earthquakes/us7000fu12.html>). Gempa tersebut memiliki magnitudo sebesar 6.4 dengan kedalaman 10 Km. Berdasarkan dari *United States Geological Survey* (USGS), episentrum gempa terletak pada koordinat 27,727° lintang utara dan 56,072° bujur timur (Gambar 1b). Gempa Iran 2021 ini terjadi di sekitar Sesar Zagros (Nissen dkk., 2011). Sesar Zagros merupakan sesar dengan tipe sesar naik (*thrust fault*) (Ghanbarian & Derakhshani, 2022). Gambar 1b menunjukkan bahwa garis merah adalah letak dari Sesar Zagros dan bintang hijau merupakan pusat gempa bumi Iran 14 November 2021. Sesar Zagros merupakan sesar aktif yang ada di area Iran. Hal tersebut dapat diketahui dari Gambar 1b, Gambar 1a merupakan gambar yang menunjukkan gempa yang pernah terjadi di Iran dari tahun 1905 – 2022. Gempa di Iran paling banyak terjadi pada wilayah di sekitar Sesar Zagros. Warna merah, hijau, dan biru menunjukkan kedalaman gempa yang pernah terjadi di Iran, semakin merah warna lingkaran maka kedalaman gempa tersebut akan semakin dangkal atau dekat dengan permukaan bumi. Warna biru menunjukkan bahwa gempa yang terjadi semakin dalam dan semakin jauh dari permukaan bumi. Lingkaran setiap titik gempa memiliki ukuran yang berbeda-beda, perbedaan tersebut menunjukkan besarnya magnitudo gempa. Lingkaran yang memiliki ukuran semakin besar menunjukkan bahwa magnitudo gempa yang terjadi semakin besar, semakin kecil ukuran lingkaran maka magnitudo gempa semakin kecil.



Gambar 1 Lokasi Gempa Bumi Iran 14 November 2021. (a) Lingkaran menunjukkan gempa yang pernah terjadi di Iran dari tahun 1905 – 2022 berdasarkan data dari USGS. Warna merah, hijau, dan biru menunjukkan kedalaman gempa bumi yang pernah terjadi di Iran. (b) Garis warna kuning dengan pola putus-putus menunjukkan lokasi dari Sesar Zagros. Bintang hijau menunjukkan lokasi pusat gempa bumi Iran 14 November 2021. Kotak merah menunjukkan lokasi utama dari penelitian.

Penelitian ini mencoba untuk melakukan ekstraksi 2.5-D menggunakan algoritma 2.5-D dari *multiple* citra SAR Sentinel-1A. Data yang digunakan untuk dilakukan ekstraksi adalah data gempa bumi Iran 2021. Citra SAR Sentinel-1A sebanyak dua pasang diolah menggunakan perangkat lunak GMTSAR untuk memperoleh besarnya LOS. Setelah LOS diketahui, ekstraksi deformasi permukaan 2.5-D dapat dihitung menggunakan algoritma 2.5-D. Secara teori, hasil ekstraksi 2.5-D mampu memberikan informasi tentang deformasi permukaan yang terjadi lebih baik daripada pergeseran 1-D. Hal tersebut dikarenakan hasil ekstraksi 2.5-D dapat membantu interpretasi mekanisme sumber deformasi permukaan. Setelah ekstraksi 2.5-D dengan data gempa bumi Iran 2021 menggunakan algoritma 2.5-D berhasil, harapannya ekstraksi 2.5-D menggunakan algoritma 2.5-D dapat digunakan untuk ekstraksi informasi mekanisme sumber gempa bumi yang terjadi di Indonesia. Algoritma 2.5-D dapat digunakan untuk ekstraksi 2.5-D di Indonesia asalkan gempa bumi di Indonesia dapat terekam oleh satelit SAR dan interferogram dapat terbentuk dengan sempurna.

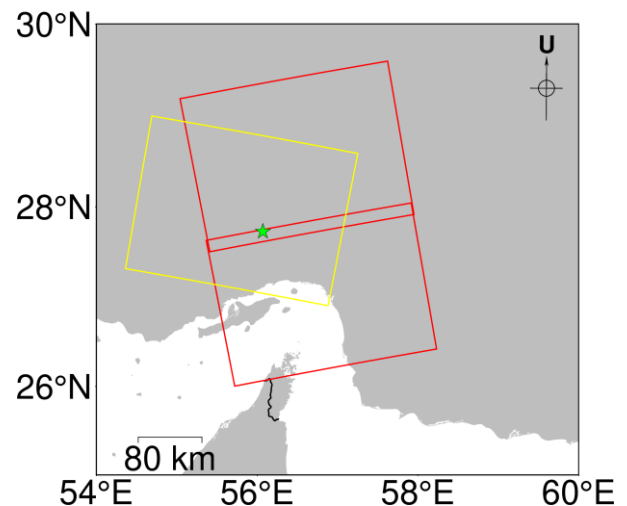
2. Data dan Metodologi

2.1. Data dan Lokasi

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah citra SAR Sentinel-1A *master* (citra SAR yang direkam sebelum terjadinya gempa bumi) dan *slave* (citra SAR yang direkam sesudah terjadinya gempa bumi) dengan arah orbit *ascending* serta *descending* (Gambar 2). *Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model 1* (SRTM DEM1) dengan resolusi 30 meter, data tersebut digunakan untuk menghilangkan efek topografi. Lokasi penelitian ini berada pada area di sekitar gempa bumi Iran 14 November 2021 (Gambar 1c). Data Citra SAR harus direkam sebelum (*master*) dan sesudah (*slave*) kejadian gempa bumi Iran 14

November 2021. Resolusi temporal antara citra *master* dan *slave* tidak boleh terlalu jauh, sehingga data yang digunakan harus di tahun dan bulan yang sama yaitu bulan November tahun 2021.

Footprint Citra Sentinel-1A



Gambar 2 *Footprint* Citra Sentinel-1A. Kotak warna merah menunjukkan citra SAR Sentinel-1A dengan arah orbit *ascending*. Kotak warna kuning menunjukkan citra SAR Sentinel-1A dengan arah orbit *descending*.

Resolusi Spasial antara citra *master* dan *slave* yang terlalu lama mengakibatkan tingkat koherensi citra yang rendah. Tingkat koherensi citra yang rendah mengakibatkan interferogram tidak terbentuk dengan sempurna. Apabila interferogram tidak terbentuk dengan sempurna maka ekstraksi 2.5-D tidak dapat dilakukan. Oleh karena itu, resolusi citra *master* dan *slave* tidak boleh terlalu lama agar tetap memiliki tingkat koherensi yang tinggi. Tingkat koherensi yang tinggi mengakibatkan

interferogram dapat terbentuk dengan sempurna. Interferogram yang terbentuk dengan sempurna dapat digunakan untuk ekstraksi 2.5-D. Interferogram kedua arah orbit yang terbentuk dengan sempurna dapat digunakan untuk ekstraksi 2.5-D.

2.2. Metodologi

Pengolahan citra SAR Sentinel-1A untuk orbit *ascending* dan *descending* menggunakan perangkat lunak berbasis UNIX yaitu GMTSAR (Sandwell dkk., 2011). Tahapan pengolahan citra SAR Sentinel-1A antara lain ;

1. Koregistrasi Citra

Tahapan ini merupakan tahapan pertama dalam pengolahan citra SAR Sentinel-1A. Tujuan dari tahapan ini adalah untuk menyelaraskan piksel citra *master* dan *slave*. Tahapan ini digunakan untuk memastikan data yang terekam memiliki koordinat yang sama.

2. Pembentukan Interferogram

Pembentukan interferogram merupakan tahapan kedua dalam pengolahan citra SAR Sentinel-1A menggunakan GMTSAR setelah koregistrasi citra. Interferogram dapat terbentuk melalui proses penampalan citra *master* dan *slave*.

3. Proses Differential InSAR

Proses *Differential* InSAR merupakan tahapan pengurangan efek topografi menggunakan data DEM. Proses ini digunakan untuk menaikkan *Signal Noise Ratio* (SNR). Proses *filtering* dilakukan dengan menggunakan metode *advance goldstein* (Goldstein & Werner, 1998),

4. Phase Unwrapping

Tahapan ini, beda fase antara citra *master* dan *slave* diubah menjadi nilai deformasi. Proses perubahan tersebut dilakukan menggunakan algoritma SNAPHU (Chen & Zebker, 2002).

5. Geocoding

Tahapan ini dikerjakan untuk mengubah sistem koordinat interferogram dari sistem koordinat radar menjadi sistem koordinat geodetis WGS 84.

Ekstraksi 2.5-D menggunakan metode yang pernah digunakan oleh Fujiwara dkk. (2000). Metode tersebut berhasil digunakan untuk pengamatan deformasi koseismik gempa bumi. Ekstraksi 2.5-D dihitung menggunakan ekstraksi LOS dengan arah orbit yang berbeda. Rumus yang digunakan untuk ekstraksi 2.5-D adalah.

$$U = -hz \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\theta) + ve \cdot \cos(\theta) \quad (1)$$

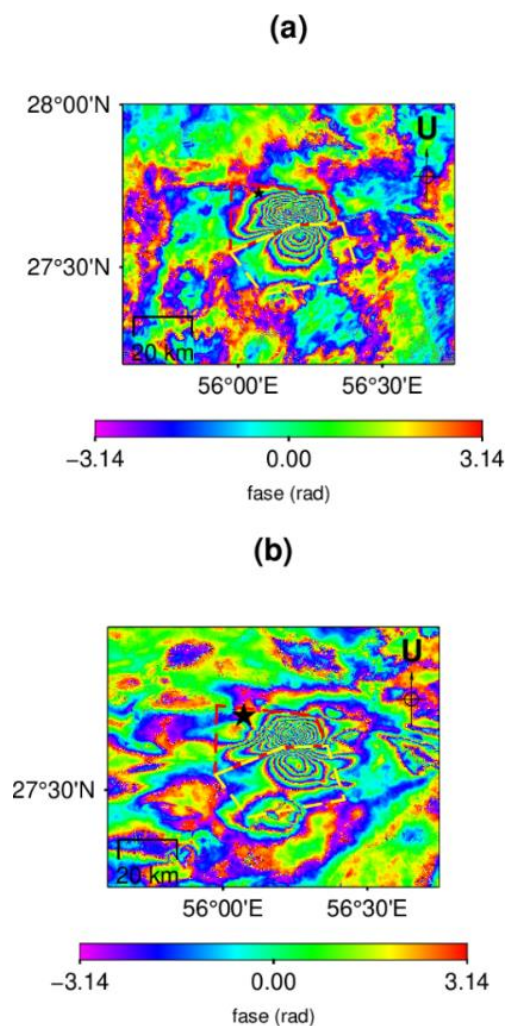
Simbol φ dan θ adalah simbol untuk azimuth vektor dan sudut insiden. Simbol hz dan ve merupakan simbol untuk pergeseran horizontal dan vertikal.

LOS hasil pengolahan citra SAR Sentinel-1A menggunakan GMTSAR dipotong pada area sekitar gempa bumi Iran 14 November 2021. LOS dipotong agar penelitian ini hanya berfokus pada area gempa bumi Iran 14

November 2021. LOS yang sudah dipotong kemudian dilakukan sampling data dengan metode interpolasi linear. Sampling data tersebut digunakan untuk mempercepat proses perhitungan ekstraksi 2.5-D. Ekstraksi 2.5-D dicari menggunakan perhitungan metode hitung kuadrat terkecil. Hasil dari pengolahan data kemudian divisualisasikan menggunakan perangkat lunak GMT (Wessel dkk., 2019)

3. Hasil dan Pembahasan

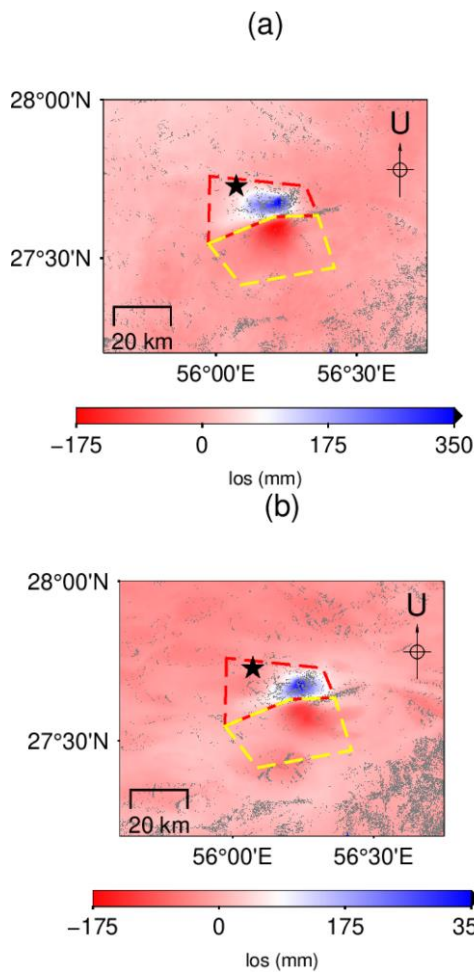
Pada penelitian ini, sinyal gempa bumi Iran tanggal 14 November 2021 dapat terekam dengan jelas oleh citra SAR sehingga interferogram dapat terbentuk dengan sempurna pada kedua arah orbit *ascending* dan *descending* (Gambar 3). Pola interferogram yang terbentuk dengan sempurna dapat digunakan untuk perhitungan ekstraksi 2.5-D.



Gambar 3 Hasil Interferogram (a) arah orbit *ascending* (b) arah orbit *descending*. Bintang Warna Hitam merupakan lokasi pusat Gempa Bumi Iran 14 November 2021. Garis putus-putus berwarna kotak menunjukkan area tersebut terjadi kenaikan permukaan tanah. Garis putus-putus berwarna kuning menunjukkan area tersebut terjadi penurunan permukaan tanah.

Gambar 3 menunjukkan bahwa interferogram memiliki pola yang sama untuk kedua arah orbit. Pola Interferogram yang terbentuk pada area selatan (kotak putus-putus warna kuning) adalah dari warna ungu menuju warna merah, pola warna tersebut mengindikasikan area tersebut mengalami pergerakan menjauhi sensor satelit, artinya permukaan tanah mengalami penurunan. Pola interferogram yang terbentuk pada area utara (kotak putus-putus warna merah) adalah dari warna merah menuju warna ungu. Pola tersebut mengindikasikan permukaan tanah area tersebut bergerak mendekati sensor satelit, artinya permukaan tanah mengalami kenaikan permukaan tanah.

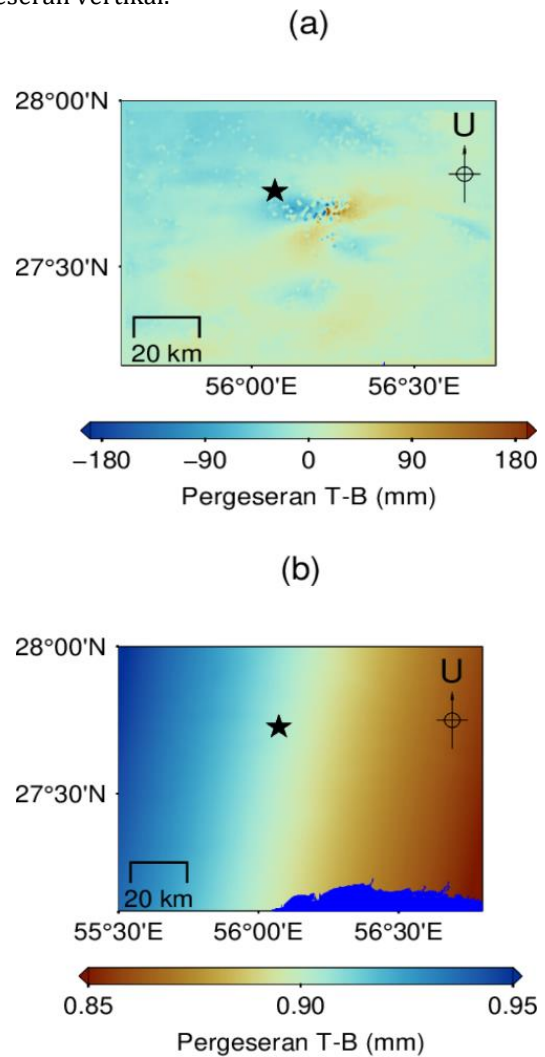
Hasil dari pengolahan citra SAR Sentinel-1A menggunakan GMTSAR adalah *Line-of-Sight* (LOS). Gambar 4 berikut menunjukkan hasil LOS dari pengolahan citra SAR Sentinel-1A menggunakan perangkat lunak GMTSAR.



Gambar 4 Hasil *Line of Sight* (LOS). (a) arah orbit *ascending*. (b) arah orbit *descending*. Bintang Warna Hitam merupakan lokasi pusat Gempa Bumi Iran 14 November 2021. Garis putus-putus berwarna kotak menunjukkan area tersebut terjadi kenaikan permukaan tanah. Garis putus-putus berwarna kuning menunjukkan area tersebut terjadi penurunan permukaan tanah.

Hasil *Line of Sight* (LOS) gempa bumi Iran 14 November 2021 memiliki pola warna yang sama. Area utara (kotak putus-putus berwarna merah) didominasi oleh warna biru tua. Hal tersebut mengindikasikan pada area utara terjadi kenaikan permukaan tanah dengan kenaikan maksimal sebesar 354 mm. Area selatan (kotak putus-putus berwarna kuning) didominasi oleh warna merah tua. Warna tersebut mengindikasikan bahwa area sebelah selatan mengalami penurunan permukaan tanah dengan penurunan maksimal sebesar 175 mm.

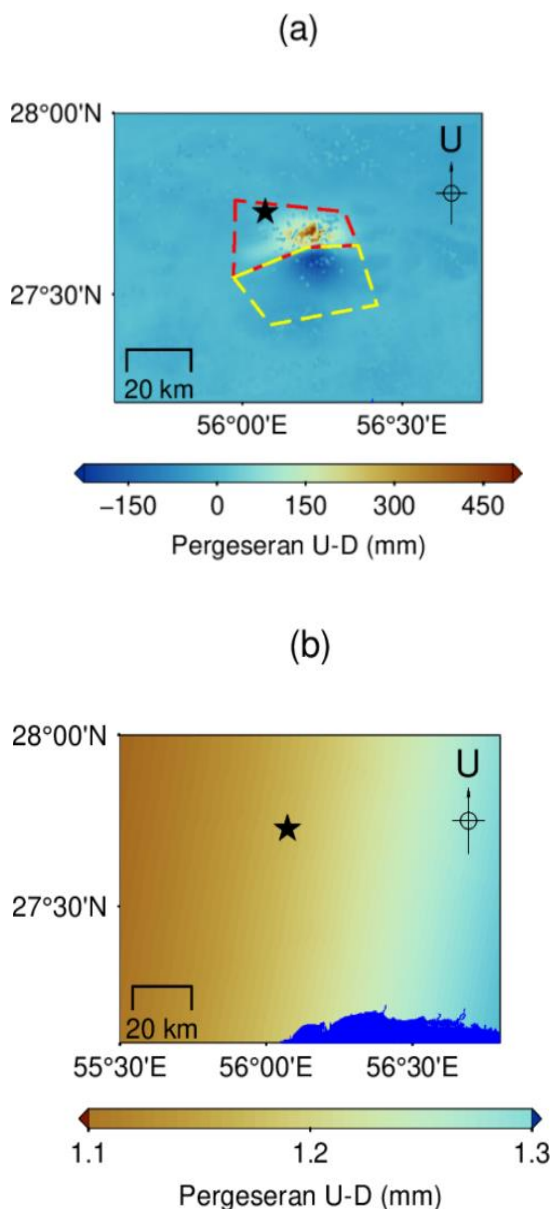
Hasil dari ekstraksi 2.5-D adalah pergeseran horizontal dan vertikal. Gambar 5 menunjukkan hasil dari ekstraksi 2.5-D komponen pergeseran horizontal. Gambar 6 menunjukkan hasil dari ekstraksi 2.5-D komponen pergeseran vertikal.



Gambar 5 Hasil Ekstraksi 2.5-D Komponen Horizontal. (a) Pergeseran Komponen Horizontal (b) Standar Deviasi Komponen Horizontal.

Berdasarkan hasil ekstraksi 2.5-D pergeseran komponen horizontal terjadi pergeseran maksimal sebesar 180 mm dan pergeseran minum sebesar -180 mm. Nilai standar

deviasi untuk komponen pergeseran horizontal maksimal adalah sebesar 0.95 mm dan standar deviasi minimumnya sebesar 0.85 mm.



Gambar 6 Hasil Ekstraksi 2.5-D Komponen Vertikal. (a) Pergeseran Komponen Vertikal (b) Standar Deviasi Pergeseran Komponen Vertikal. Bintang Warna Hitam merupakan lokasi pusat Gempa Bumi Iran 14 November 2021. Garis putus-putus berwarna kotak menunjukkan area tersebut terjadi kenaikan permukaan tanah. Garis putus-putus berwarna kuning menunjukkan area tersebut terjadi penurunan permukaan tanah.

Berdasarkan hasil ekstraksi 2.5-D pergeseran komponen vertikal pada area utara (kotak putus-putus berwarna merah) didominasi oleh warna coklat tua. Warna tersebut menunjukkan bahwa area utara terjadi kenaikan

permukaan tanah dengan kenaikan maksimal sebesar 541 mm. Area selatan (kotak putus-putus berwarna kuning) didominasi oleh warna biru tua. Warna tersebut menunjukkan bahwa area selatan mengalami penurunan permukaan tanah dengan penurunan maksimal sebesar 231 mm. Hasil ekstraksi 2.5-D pada pergeseran komponen horizontal diketahui pergeseran ke arah timur dan barat dengan pergeseran maksimal sebesar 192 mm. Hasil ekstraksi 2.5-D diketahui bahwa nilai pergeseran vertikal lebih dominan daripada nilai pergeseran horizontal.

Identifikasi sumber mekanisme gempa berdasarkan pergeseran LOS 1-D lebih sulit dilakukan karena LOS 1-D hanya memberikan informasi pergeseran permukaan tanah menjauhi atau mendekati sensor satelit. Ekstraksi 2.5-D dapat memberikan informasi sumber mekanisme gempa yang terjadi. Ekstraksi 2.5-D dapat dicari dari pergeseran LOS dengan perhitungan hitung kuadrat terkecil (Panuntun, 2021). Ekstraksi 2.5-D dapat memberikan hasil yang baik dengan menggunakan empat data LOS (Wang dkk., 2020) atau dengan menggunakan tiga data LOS (Panuntun, 2022). Akan tetapi, pada ekstraksi 2.5-D gempa bumi Iran 14 November 2021 hanya menggunakan dua data LOS. Ekstraksi 2.5-D gempa Iran 14 November 2021 data LOS yang tersedia dan terlihat jelas hanya dua data LOS saja.

Berdasarkan hasil ekstraksi 2.5-D pergeseran vertikal lebih dominan daripada pergeseran vertikal. Hal tersebut mengindikasikan bahwa sumber mekanisme gempa bumi Iran 14 November 2021 diakibatkan oleh aktivitas sesar naik.

4. Kesimpulan

Dari hasil ekstraksi 2.5-D deformasi permukaan akibat gempa bumi Iran 14 November 2021 dapat diketahui bahwa mekanisme gempa tersebut diindikasikan disebabkan oleh aktivitas sesar naik. Ekstraksi 2.5-D dapat memberikan informasi pergeseran permukaan yang lebih baik daripada pergeseran 1-D. Selain itu, hasil ekstraksi 2.5-D dapat membantu interpretasi mekanisme sumber gempa bumi.

Penulis menyarankan agar dilakukan penelitian lebih lanjut dengan membandingkan hasil pergeseran vertikal ekstraksi 2.5-D dengan pengukuran GNSS. Selanjutnya, diharapkan ekstraksi 2.5-D dapat diterapkan di Indonesia untuk membantu interpretasi sumber gempa bumi di Indonesia.

5. Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam penelitian ini

6. Referensi

Baek, W. K., & Jung, H. S. (2020). Precise Three-Dimensional Deformation Retrieval in Large and Complex Deformation Areas via Integration of Offset-Based

- Unwrapping and Improved Multiple-Aperture SAR Interferometry: Application to the 2016 Kumamoto Earthquake. *Engineering*, 6(8), 927–935. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2020.06.012>
- Chen, C. W., & Zebker, H. A. (2002). Phase unwrapping for large SAR interferograms: statistical segmentation and generalized network models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8), 1709–1719. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.802453>
- De Michele, M., Raucoules, D., De Sigoyer, J., Pubellier, M., & Chamot-Rooke, N. (2010). Three-dimensional surface displacement of the 2008 May 12 Sichuan earthquake (China) derived from Synthetic Aperture Radar: Evidence for rupture on a blind thrust. *Geophysical Journal International*, 183(3), 1097–1103. <https://doi.org/10.1111/J.1365-246X.2010.04807.X>
- Elliott, J. R., Walters, R. J., & Wright, T. J. (2016). The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes. *Nature Communications*, 7(1), 13844. <https://doi.org/10.1038/ncomms13844>
- Fujiwara, S., Nishimura, T., Murakami, M., Nakagawa, H., Tobita, M., & Rosen, P. A. (2000). 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, 27(14), 2049–2052. <https://doi.org/10.1029/1999GL011291>
- Ghanbarian, M. A., & Derakhshani, R. (2022). The folds and faults kinematic association in Zagros. *Scientific Reports*, 12(1), 8350. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12337-8>
- Goldstein, R. M., & Werner, C. L. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25(21), 4035–4038. <https://doi.org/10.1029/1998GL900033>
- Grandin, R., Klein, E., Métois, M., & Vigny, C. (2016). Three-dimensional displacement field of the 2015 Mw8.3 Illapel earthquake (Chile) from across- and along-track Sentinel-1 TOPS interferometry. *Geophysical Research Letters*, 43(6), 2552–2561. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2016GL067954>
- Himematsu, Y., & Furuya, M. (2020). Coseismic and Postseismic Crustal Deformation Associated With the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence Revealed by PALSAR-2 Pixel Tracking and InSAR. *Earth and Space Science*, 7(10), e2020EA001200. <https://doi.org/10.1029/2020EA001200>
- Hu, J., Li, Z. W., Ding, X. L., Zhu, J. J., Zhang, L., & Sun, Q. (2014). Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review. *Earth-Science Reviews*, 133, 1–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscrev.2014.02.005>
- Huang, M.-H., Tung, H., Fielding, E. J., Huang, H.-H., Liang, C., Huang, C., & Hu, J.-C. (2016). Multiple fault slip triggered above the 2016 Mw 6.4 MeiNong earthquake in Taiwan. *Geophysical Research Letters*, 43(14), 7459–7467. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2016GL069351>
- Liu, J., Jun, H., Xu, W., 李志伟 Z., Jian-Jun, Z., Ding, X., & Zhang, L. (2019). Complete Three-Dimensional Coseismic Deformation Field of the 2016 Central Tottori Earthquake by Integrating Left- and Right-Looking InSAR Observations With the Improved SM-VCE Method. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124. <https://doi.org/10.1029/2018JB017159>
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., & Rabaut, T. (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364(6433), 138–142. <https://doi.org/10.1038/364138A0>
- Nissen, E., Tatar, M., Jackson, J. A., & Allen, M. B. (2011). New views on earthquake faulting in the Zagros fold-and-thrust belt of Iran. *Geophysical Journal International*, 186(3), 928–944. <https://doi.org/10.1111/J.1365-246X.2011.05119.X>
- Panuntun, H. (2021). Geodetic slip model of the November 26, 2019 Albania earthquake estimated from Sentinel-1 TOPS interferometry. *Tectonophysics*, 807, 228814. <https://doi.org/10.1016/J.TECTO.2021.228814>
- Panuntun, H. (2022). 2.5-D Surface Deformation due to the 24 January 2020 Elazig, Turkey Earthquake Estimated by Multiple Sentinel-1 InSAR Data. *January 2020*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/apsar52370.2021.9688500>
- Pepe, A., & Calò, F. (2017). A Review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements. In *Applied Sciences* (Vol. 7, Nomor 12). <https://doi.org/10.3390/app7121264>
- Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M., & Wessel, P. (2011). Open radar interferometry software for mapping surface Deformation. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 92(28), 234–234. <https://doi.org/10.1029/2011EO280002>
- Wang, Z., Liu, G., hu, L., Tao, Q., & Yu, S. (2020). Method for determining weight matrix for resolving three-dimensional surface deformation using Multi-LOS D-InSAR technology. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102062>
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., & Tian, D. (2019). The Generic Mapping Tools Version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(11), 5556–5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>
- Wright, T., Parsons, B., & Lu, Z. (2004). Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR. *Geophys. Res. Lett.*, 31. <https://doi.org/10.1029/2003GL018827>

Xu, G., Xu, C., Wen, Y., & Yin, Z. (2019). Coseismic and Postseismic Deformation of the 2016 MW 6.2 Lampa Earthquake, Southern Peru, Constrained by Interferometric Synthetic Aperture Radar. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(4), 4250–4272. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2018JB016572>