

Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI) Volume 13 Nomor 2 Tahun 2024, hal 66-79

ANALISIS KINEMATIK RUPTURE GEMPA GANDA TURKI 6 FEBRUARI 2023 DENGAN METODE MUSIC BPI

¹⁾Ekik Setyo Amalia Ramadhany, ²⁾Arie Realita, ³⁾Tjipto Prastowo

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: ekik.20023@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: arierealita@unesa.ac.id

³⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: tjiptoprastowo@unesa.ac.id

Abstrak

Pada 6 Februari 2023, Turki diguncang oleh gempa tektonik ganda yang unik. Gempa pertama terjadi pada pukul 01:17:34 UTC dengan kekuatan M_w 7,8, diikuti gempa kedua dengan kekuatan M_w 7,6 setelah 9 jam. Gempa ini berdampak hingga wilayah barat laut Syria. Penelitian ini bertujuan menentukan parameter kinematik *rupture* gempa ganda Turki 2023 melalui analisis proses *rupture* menggunakan *multiple signal classification back-projection imaging* (MUSIC BPI). Analisis berbasis sinyal koheren gelombang *P* berfrekuensi tinggi dari jaringan stasiun seismik Alaska. Fokus utama adalah penentuan *rupture extent*, *duration*, *speed*, dan *directivity*. Hasil analisis menunjukkan *rupture* gempa pertama merambat *bilateral* ke timur laut dan selatan-barat daya sepanjang 180 km dari episenter, sementara gempa kedua merambat *bilateral* ke barat sepanjang Sesar Sürgü, kemudian ke timur dan berubah arah ke timur laut sepanjang 72 km. Analisis radiator seismik menunjukkan kecepatan *rupture* gempa pertama 2,54-2,70 km/s selama 75 detik, dan gempa kedua 2,06-2,34 km/s selama 32 detik (kecepatan *rupture* kedua gempa dikategorikan sebagai *sub-shear*). Temuan ini sejalan dengan penelitian terdahulu. *Rupture* gempa pertama bergerak ke arah barat daya Turki dengan radiasi seismik kuat hingga lepas pantai Latakia, Syria di wilayah barat laut Syria.

Kata Kunci: MUSIC BPI, gempa ganda Turki 2023, proses *rupture*

Abstract

On February 6, 2023, Turkey was struck by a unique double tectonic earthquake. The first earthquake occurred at 01:17:34 UTC with a magnitude of M_w 7.8, followed by the second earthquake with a magnitude of M_w 7.6, nine hours later. This earthquake impacted the northwestern region of Syria. This study aims to determine the kinematic rupture parameters of the 2023 double earthquake in Turkey through the analysis of the rupture process using multiple signal classification back-projection imaging (MUSIC BPI). The analysis is based on coherent high-frequency P-wave signals obtained from the Alaska seismic network. The main focus is on determining rupture extent, duration, speed, and directivity. The analysis results show that the rupture of the first earthquake propagated bilaterally to the northeast and south-southwest for 180 km from the epicenter, while the second earthquake propagated bilaterally westward along the Sürgü Fault, then eastward, and changed direction to the northeast for 72 km from the epicenter. Seismic radiator analysis indicates that the rupture speed of the first earthquake was 2.54-2.70 km/s for 75 seconds, and the second earthquake had a rupture speed of 2.06-2.34 km/s for 32 seconds (the rupture speed of the second earthquake is categorized as sub-shear). These findings are consistent with previous studies. The rupture of the first earthquake moved towards southwestern Turkey, carrying strong seismic radiation offshore to Latakia, Syria, in the northwestern region of Syria.

Keywords: BPI MUSIC, Turkey 2023 earthquake, rupture process

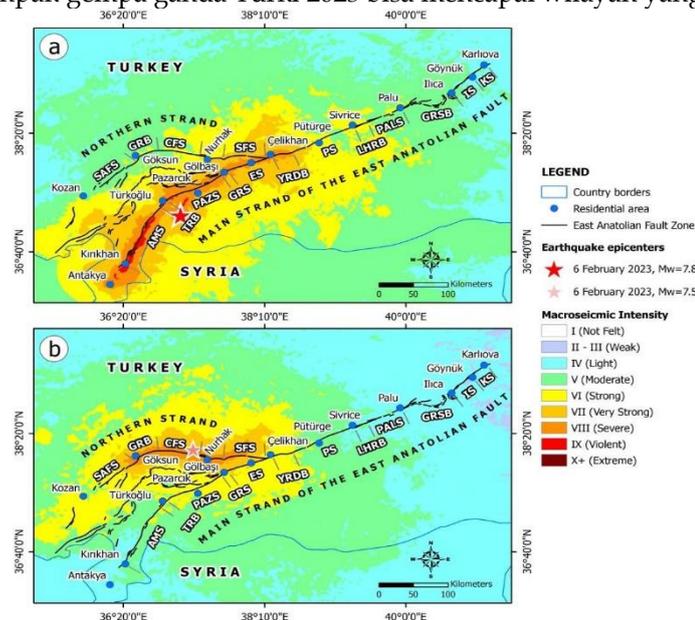
I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Gempa merupakan bencana geologi yang merusak dan bisa memicu tsunami sebagai bencana lanjutan apabila beberapa kondisi dipenuhi (Nugraha *et al.*, 2018; Widiyantoro *et al.*, 2020; Felix *et al.*, 2022). Dalam banyak kasus, dampak gempa bisa dilihat dari kerusakan struktur fisik dan infrastruktur lokal sekitar episenter. Kerugian finansial dalam bentuk kehilangan properti, korban fisik dan korban jiwa seringkali dilaporkan dalam berbagai publikasi (Xu *et al.*, 2009; Kiser, 2012; Satake *et al.*, 2014; Suppasri *et al.*, 2015; Mavroulis *et al.*, 2023; Mertol *et al.*, 2023). Salah satu gempa tektonik terkini yang menarik perhatian, yaitu gempa ganda yang terjadi di Turki pada tanggal 6 Februari 2023. Gempa ganda tersebut memiliki karakteristik unik karena terjadi dalam rentang waktu hanya 9 jam sebagai akibat aktivitas tektonik sesar-sesar yang berdekatan. Kejadian gempa besar berpasangan dalam jeda yang singkat belum pernah teramati sebelumnya di Turki (Mai *et al.*, 2023).

Gempa Turki 2023 tidak hanya merusak wilayah tengah dan selatan Turki, tetapi juga menyebabkan kerusakan pada bagian barat laut Syria (Mai *et al.*, 2023; Mavroulis *et al.*, 2023). Gempa pertama terjadi pada 01:17:34 UTC berkekuatan M_w 7,8 dengan mekanisme *strike-slip* (Mai *et al.*, 2023; Mavroulis *et al.*, 2023; Mertol *et al.*, 2023). Sumber gempa berasal dari aktivitas Sesar Anatolia Timur (Mertol *et al.*, 2023). Selang 9 jam kemudian, gempa kedua berkekuatan M_w 7,6 melanda pada pukul 10:24:28 (Maletckii *et al.*, 2023) yang dipicu oleh aktivitas seismik Sesar Sürgü dengan episenter 90 km arah utara dari Sesar Anatolia Timur (Mai *et al.*, 2023). Turki kembali diguncang oleh gempa besar sepanjang arah utara-timur laut dari episenter gempa pertama (Mai *et al.*, 2023; Maletckii *et al.*, 2023; Mavroulis *et al.*, 2023).

Gambar 1 memperlihatkan lokasi geografis gempa ganda Turki 2023 dan titik episenter masing-masing. Meskipun kedua episenter gempa berada di Turki, dampaknya hingga ke wilayah barat laut Syria (Mavroulis *et al.*, 2023; Mertol *et al.*, 2023). Sampai saat ini masih ada pertanyaan terkait faktor-faktor kinematik yang memengaruhi mengapa dampak gempa ganda Turki 2023 bisa mencapai wilayah yang jauh dari episenter.



Gambar 1. (a) Panel bagian atas menunjukkan lokasi episenter (bintang merah) gempa Turki 2023 dengan kekuatan M_w 7,8 yang terdapat di sepanjang Zona Sesar Anatolia Timur (EAFZ). (b) Panel bagian bawah menunjukkan lokasi episenter (bintang merah muda) gempa Turki 2023 dengan kekuatan M_w 7,6 (sumber: Mavroulis *et al.*, 2023).

Pertanyaan tentang bagaimana dampak gempa ganda Turki 2023 terasa hingga ke wilayah barat laut Syria bisa dijawab dengan mengetahui mekanisme sumber gempa ganda Turki 2023. Dalam hal ini, salah satu cara untuk mengetahui mekanisme sumber gempa adalah menganalisis aspek kinematik rambatan *rupture* gelombang gempa. Analisis citra resolusi tinggi rambatan *rupture* gelombang gempa Turki 2023 dapat dilakukan dengan bantuan **M**Ultiple **S**ignal **C**lassification **B**ack-**P**rojection **I**maging (MUSIC BPI). Kelebihan

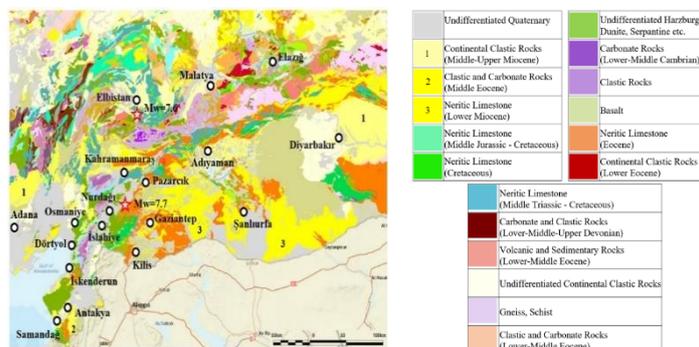
teknik pemrosesan sinyal ini adalah pemrosesan data yang lebih cepat tanpa mengurangi akurasi hasil akhir (Meng *et al.*, 2011; Kiser, 2012), di mana analisis rambatan *rupture* gempa dengan MUSIC BPI digunakan untuk menentukan empat parameter kinematik *rupture*. Kelebihan ini dieksplorasi untuk kebutuhan tanggap darurat bencana sesuai dengan konsep mitigasi bencana. Secara prinsip, teknik pemrosesan sinyal berbasis MUSIC BPI memanfaatkan koherensi gelombang *P* dalam data telesismik yang diperoleh dari rekaman jaringan stasiun seismik dalam jumlah yang sangat banyak dan saling berdekatan dengan membalik jejak rambatan gelombang gempa yang dikenal dengan *back-projection*. Teknik pemrosesan sinyal ini pertama diterapkan dengan sukses untuk menentukan parameter kinematik *rupture* gempa Sumatra-Andaman 2004 (Ishii *et al.*, 2005; Ishii *et al.*, 2007) dengan hasil terkini yang konsisten (Zebua dkk., 2023).

Dengan mempertimbangkan keunikan gempa ganda Turki 2023, tingginya level seismisitas Sesar Anatolia Timur (Mai *et al.*, 2023; Mavroulis *et al.*, 2023; Mertol *et al.*, 2023; Ozkula *et al.*, 2023) dan keunggulan metode MUSIC BPI dalam konteks pemrosesan sinyal seismik frekuensi tinggi untuk memperoleh citra *rupture* gelombang gempa yang akurat dan dengan level *noise* yang kecil agar ambiguitas hasil akhir tereduksi (Meng *et al.*, 2018; Zeng *et al.*, 2020), maka metode seismik *back-projection* digunakan dalam penelitian ini. Data sinyal diperoleh dari jaringan stasiun seismik Alaska (AK dense array teleseismic network). Fokus penelitian ini adalah menentukan parameter kinematik *rupture* gelombang gempa (Bao *et al.*, 2019; Du, 2021; Fahmi *et al.*, 2022) yang direpresentasikan oleh *rupture duration* (ukuran seberapa lama *rupture* bergetar), *rupture extent* (ukuran seberapa jauh pergerakan *rupture* diukur dari sumber), *rupture speed* (ukuran seberapa cepat energi seismik dipindahkan dari sumber) dan *rupture directivity* (arah rambatan *rupture* sekaligus energi gempa).

B. Struktur Geologi Turki

Turki merupakan negara yang berada di wilayah dengan seismisitas tinggi, mengalami guncangan gempa dengan kekuatan beragam setiap beberapa tahun. Menurut Mertol *et al.* (2023), gempa dengan magnitudo M_w 6,0 hingga 6,9 terjadi sekitar setiap dua tahun, sementara gempa yang lebih besar dengan kekuatan M_w 6,9 ke atas, muncul sekitar tiga tahun sekali. Zona sesar yang melintasi Turki adalah Zona Sesar Anatolia Utara (NAFZ) dan Zona Sesar Anatolia Timur (EAFZ) yang memiliki potensi besar untuk menghasilkan gempa kuat yang berdampak luas. Wilayah tempat terjadinya gempa Kahramanmaraş adalah di titik pertemuan antara lempeng Afrika, Arab dan Anatolia (Yönlü *et al.*, 2017), di mana zona sesar seperti Zona Sesar Laut Mati (DSF) merupakan bagian dari zona EAF yang memisahkan Lempeng Afrika dan Anatolia. Gempa-gempa besar yang berada di area ini disebabkan oleh pergeseran lempeng sepanjang garis sesar utama (Mertol *et al.*, 2023).

Akibat gempa 6 Februari 2023 dengan magnitudo M_w 7,8 wilayah selatan dan tenggara Turki mengalami kerusakan yang parah. Wilayah selatan Kahramanmaraş juga memiliki jenis tanah serupa. Islahiye dan Nurdagi, dua kota di Provinsi Gaziantep mengalami kerusakan yang signifikan karena berdekatan dengan pusat gempa pertama. Kedua kota ini memiliki jenis batuan vulkanik seperti basalt dan batuan ofiolitik yang tak terdiferensiasi secara berurutan (Mertol *et al.*, 2023). Gambar 2 mengilustrasikan peta geologi wilayah Turki.



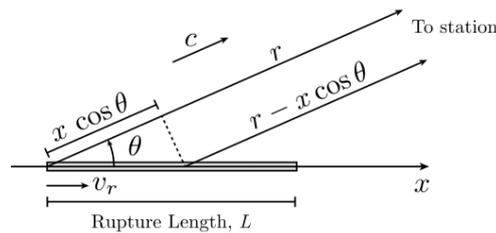
Gambar 2 Peta geologi wilayah teritorial Turki (sumber: Mertol *et al.*, 2023)

C. Fisika Rupture

Secara definisi *earthquake rupture* atau disingkat *rupture* bisa ditemukan baik dalam buku teks (Stein and Wysession, 2013) maupun artikel (Ishii *et al.*, 2005; Ishii *et al.*, 2007; Meng *et al.*, 2011; Bao *et al.*, 2019). Dalam penelitian ini, *rupture* dikategorikan sebagai proses fisis. *Rupture* memiliki ukuran vital panjang (karena memberi informasi jangkauan ekstensi gelombang gempa), dikenal sebagai *rupture extent* atau *rupture length*. Selain itu dalam kompleksitas proses *rupture*, *rupture* melakukan aktivitas, misalnya merambat dalam selang

waktu tertentu (*rupture duration*) dengan kecepatan tertentu (*rupture speed*) dan arah tertentu (*rupture directivity*). Keempat parameter *rupture* tersebut menjadi fokus perhatian yang akan diceritakan secara detail dalam paragraf-paragraf di bawah ini.

Gambar 3 berikut mengilustrasikan sketsa *rupture* gempa yang merambat menuju ke stasiun seismik yang berada pada jarak r yang jauh dari sumber gempa ($r \gg L$). *Rupture* merambat sepanjang sumbu x dengan kecepatan v_r . Untuk stasiun pemantau dengan lokasi geografis yang tidak searah terhadap arah rambat *rupture*, gelombang gempa terlihat bergerak menjauh dari sumber dengan kecepatan c . Perbedaan jarak relatif terhadap stasiun pemantau (referensi) yang searah terhadap arah gerak *rupture* adalah $x \cos \theta$, di mana θ adalah sudut azimuth relatif terhadap posisi (panjang ekstensi) *rupture* sepanjang sumbu x .



Gambar 3. Perambatan *rupture* yang mengilustrasikan jalur gelombang gempa menuju ke stasiun yang jauh dari sumber gempa (sumber: Ammon *et al.*, 2021).

Dalam konteks perambatan *rupture*, hanya stasiun yang berada pada posisi normal terhadap *rupture length* L yang akan mengukur *rupture duration* yang benar sedangkan stasiun lain akan mengukur *apparent rupture duration* yang bergantung pada sudut azimuth posisi pengamat relatif terhadap posisi *rupture* (Ammon *et al.*, 2021). Total waktu yang dibutuhkan oleh gelombang gempa untuk merambat dari sumber gempa (segmen patahan) yang berada di lokasi tertentu sepanjang sumbu x menuju ke stasiun yang jauh berjarak r dari sumber, menurut Ammon *et al.* (2021), adalah sebagai berikut,

$$t(x, \theta) = \frac{x}{v_r} + \frac{(r - x \cos \theta)}{c} \quad (2.1)$$

Suku pertama pada ruas kanan persamaan (2.1) tersebut merepresentasikan waktu yang dibutuhkan oleh *rupture* untuk merambat sejauh x sedangkan suku kedua adalah beda waktu antara gelombang gempa yang menempuh lintasan yang berbeda karena perbedaan lokasi gempa yang berada di $x = 0$ dan $x \neq 0$.

Dalam praktek, dua lokasi sumber gempa dan satu stasiun pemantau bisa diganti dengan satu lokasi sumber gempa dan banyak lokasi stasiun (*seismic array*). Menurut Ammon *et al.* (2021) dan berdasarkan persamaan (2.1) tersebut di atas, *apparent rupture duration* dapat dihitung dari

$$\tau_c(\theta) = \left[\frac{L}{v_r} + \left(\frac{r - L \cos \theta}{c} \right) \right] - \left(\frac{r}{c} \right) = L \left[\frac{1}{v_r} - \frac{\cos \theta}{c} \right] \quad (2.2)$$

di mana kebergantungan τ_c terhadap θ yang berasal dari keberagaman arah rambat *rupture* dari lokasi sumber menuju ke banyak stasiun dengan posisi yang bervariasi dikenal sebagai *rupture directivity*.

Untuk kasus sederhana, yaitu perambatan *rupture* secara unilateral, maka $\tau_c(\theta)$ pada persamaan (2.2) berturut-turut berharga maksimum jika $\cos \theta = -1$ dan minimum jika $\cos \theta = 1$ sehingga bisa dituliskan

$$\tau_{max} \sim L \left(\frac{1}{v_r} + \frac{1}{c} \right) \quad (2.3)$$

dan

$$\tau_{min} \sim L \left(\frac{1}{v_r} - \frac{1}{c} \right) \quad (2.4)$$

Aljabar sederhana melalui pengurangan dan penjumlahan persamaan (2.3) dan (2.4) menghasilkan rumusan estimasi kecepatan *rupture* v_r .

$$\tau_{max} - \tau_{min} \sim \frac{2L}{c} \quad (2.5)$$

dan

$$\tau_{max} + \tau_{min} \sim \frac{2L}{v_r} \quad (2.6)$$

Menurut Ammon *et al.* (2021), kuantitas ruas kiri pada persamaan (2.5) dan (2.6) dapat diukur oleh instrumen ukur. Dengan kecepatan gelombang gempa c yang juga dapat diukur, maka panjang *rupture* L pada persamaan (2.5) di atas dapat dihitung. Substitusi nilai L yang telah dihitung ke dalam persamaan (2.6) memberikan hasil estimasi kecepatan *rupture* v_r .

Dengan memperhatikan persamaan (2.5) dan (2.6), estimasi v_r bergantung kepada akurasi estimasi L dan durasi *rupture* τ_{max} dan τ_{min} . Dengan demikian, hasil akhir estimasi v_r biasanya kurang akurat. Oleh karena itu, v_r bisa dinyatakan dalam jangkauan kecepatan gelombang S , yaitu $\sim 3-4$ km/s yang diperoleh dari fitur di https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Speeds_of_seismic_waves.svg. Apabila $v_r < 3$ km/s maka *rupture* gempa merambat dengan *sub-shear speed* dan apabila $v_r > 4$ km/s maka *rupture* gempa merambat dengan *super-shear speed* (Ammon *et al.*, 2021; Melgar *et al.*, 2023).

D. Teknik MUSIC BPI

Teknik BPI merupakan pemrosesan sinyal seismik frekuensi tinggi yang diperoleh dari *regional and teleseismic dense seismic array*. Teknik ini berhasil digunakan untuk menjelaskan kompleksitas proses *rupture* (Kiser, 2012; An and Meng, 2016; Kiser and Ishii, 2017). Dalam hal ini, *dense seismic array* adalah jaringan stasiun seismik yang sangat banyak tersebar pada berbagai posisi geografis dalam wilayah regional atau teleseismik diukur dari lokasi titik episenter gempa.

Berbeda dengan *finite-fault inversion* (FFI) (Benavente and Cummins, 2013; Shimizu *et al.*, 2021), pemrosesan sinyal dengan BPI berbasis keseragaman koherensi seluruh sinyal dari sumber yang direkam oleh masing-masing stasiun. Dengan fase awal koherensi yang sama, maka hasil akhir pemrosesan sinyal tidak dipengaruhi oleh geometri sumber, lintasan sinyal, dan hambatan geofisik selama propagasi *rupture* (An and Meng, 2016; Meng *et al.*, 2018). Oleh karena itu, BPI diadopsi dalam penelitian ini untuk mempelajari proses *rupture* gempa Turki 2023 dengan kekuatan gempa M_w 7,8 (Mai *et al.*, 2023; Mavroulis *et al.*, 2023).

Pada umumnya, teknik BPI dibedakan menjadi dua, yaitu *beamforming-style* dan *frequency-domain* (Zhang, 2019; Zeng *et al.*, 2020). Metode *frequency-domain* dalam BPI memiliki resolusi hasil pencitraan yang lebih tinggi (Meng *et al.*, 2018; Zhang, 2019; Zeng *et al.*, 2020). Menurut Kiser and Ishii (2017), secara matematis BPI dapat dituliskan sebagai

$$s_j(t) = \sum_{i=1}^N w_{ij}(t) f_{ij}(t + \tau_{ij}) \quad (2.7)$$

di mana $s_j(t)$ adalah *time series* yang berulang, w_{ij} adalah koefisien bobot, f_{ij} adalah *travel time* dari i^{th} menuju ke j^{th} sebagai sumber (Zhang, 2019).

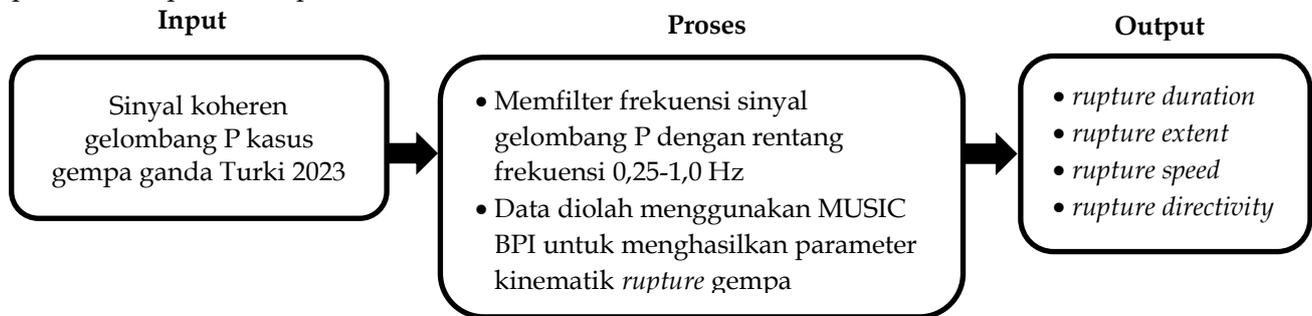
Salah satu teknik yang dikembangkan dalam BPI adalah MUSIC BPI, yaitu pemrosesan sinyal seismik yang koheren dengan waktu pemrosesan cepat dan hasil pemrosesan adalah citra proses *rupture* beresolusi tinggi dan akurat (Meng *et al.*, 2011; Meng *et al.*, 2012; Meng *et al.*, 2016; Meng *et al.*, 2018; Bao *et al.*, 2019). Teknik ini dirancang untuk menyelesaikan kompleksitas sumber gempa simultan yang diamati oleh jaringan stasiun regional (Meng *et al.*, 2012) atau teleseismik (Ishii *et al.*, 2005; Meng *et al.*, 2011). Keunggulan MUSIC BPI ini dimanfaatkan untuk kebutuhan mitigasi bencana di Indonesia terkait dengan prinsip lebih cepat lebih baik berbasis keputusan yang tepat.

MUSIC BPI dihitung berdasarkan lokasi gempa susulan (*aftershocks*) agar bias informasi dapat direduksi secara efektif. Kualitas citra *rupture* yang diperoleh dari pemrosesan dengan memanfaatkan MUSIC BPI memberikan solusi terhadap ketidakpastian hasil pencitraan yang diperoleh melalui pendekatan *beamforming* (Meng *et al.*, 2011; Meng *et al.*, 2012; Meng *et al.*, 2016; Meng *et al.*, 2018; Zhang, 2019; Zeng *et al.*, 2020). Teknik ini mampu memisahkan sumber-sumber gempa yang berdekatan sehingga citra *rupture* yang dihasilkan tidak lagi mengandung ambiguitas (Meng *et al.*, 2012).

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Tujuan penelitian skripsi ini adalah menganalisis dan menentukan parameter kinematik *rupture* gempa (*rupture duration*, *rupture extent*, *rupture speed* dan *rupture directivity*) kasus gempa ganda Turki 2023 dengan bantuan MUSIC BPI. Metode MUSIC BPI berbasis sinyal koheren teleseismik gelombang *P* yang diterima oleh jaringan stasiun seismik yang tersebar. Data penelitian diperoleh dari laman *Incorporated Research Institutions for Seismology* (IRIS) Wilber 3 diakses di http://ds.iris.edu/wilber3/find_event berupa sinyal seismik frekuensi tinggi yang terekam oleh jaringan AK *dense seismic array*. Pengolahan data menggunakan bantuan MUSIC BPI menghasilkan citra *rupture* yang beresolusi tinggi dan akurat. Analisis citra proses *rupture* yang beresolusi tinggi dan akurat memberikan nilai empat parameter kinematik *rupture* tanpa ambiguitas sehingga bisa digunakan untuk mempelajari karakteristik dan mekanisme rambatan gelombang gempa. Rancangan penelitian dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Rancangan penelitian penentuan parameter kinematik rambatan *rupture* gelombang gempa ganda Turki 2023.

B. Teknik Pengumpulan Data

Data gempa ganda Turki 2023 diperoleh dari sinyal koheren gelombang *P* melalui IRIS Wilber 3 (http://ds.iris.edu/wilber3/find_event). Menurut USGS, gempa pertama terjadi pada 6 Februari 2023 pukul 01:17:34 UTC dengan magnitudo M_w 7,8, lokasi episenter $37,23^\circ$ LS dan $37,01^\circ$ BT, serta kedalaman 10 km (Maletckii *et al.*, 2023). Gempa kedua terjadi pukul 10:24:28 UTC dengan magnitudo M_w 7,6, lokasi episenter $38,09^\circ$ LS dan $37,24^\circ$ BT, serta kedalaman 7 km (Mai *et al.*, 2023; Maletckii *et al.*, 2023). Penelitian ini menggunakan gempa ini sebagai bahan studi karena keunikannya, yakni dua gempa signifikan dalam interval waktu hanya 9 jam akibat aktivitas seismo-tektonik sesar yang berdekatan. Sinyal gelombang *P* dari sumber diterima oleh jaringan stasiun teleseismik AK *seismic array* dan dapat diunduh dari situs IRIS Wilber 3 pada *channel vertical only* (BHZ), dipilih karena tingkat *noise* yang lebih rendah dibandingkan komponen horizontal (Benavente and Cummins, 2013). Data diunduh dalam format SAC *binary* (*little-endian*) dan digunakan sebagai input untuk diolah dengan metode MUSIC BPI.

C. Teknik Pengumpulan Data

Pengolahan data difokuskan pada kualitas hasil pengolahan sinyal seismik koheren untuk membandingkannya dengan penelitian sebelumnya. Data yang digunakan adalah komponen vertikal (BHZ) dari seismogram gelombang *P*. Proses dimulai dengan memasukkan input ke dalam *software matrix laboratory*, diikuti dengan *hypocentre alignment* untuk menyelaraskan fase awal seismogram gelombang *P*. Untuk memastikan citra *rupture* yang akurat dan terarah, dilakukan pemfilteran pada gelombang *P* guna menghilangkan *noise* yang dapat mengurangi kualitas pencitraan *rupture* gempa. Sinyal seismik yang telah koheren dan terfilter kemudian digunakan dalam proses lanjutan dengan metode MUSIC BPI. Hasil akhir pengolahan ini adalah empat parameter kinematik *rupture* (*rupture duration*, *rupture extent*, *rupture speed*, dan *rupture directivity*) untuk gempa ganda Turki 2023, yang kemudian dibandingkan dengan beberapa publikasi relevan (Mai *et al.*, 2023; Mavroulis *et al.*, 2023; Mertol *et al.*, 2023; Ozkula *et al.*, 2023).

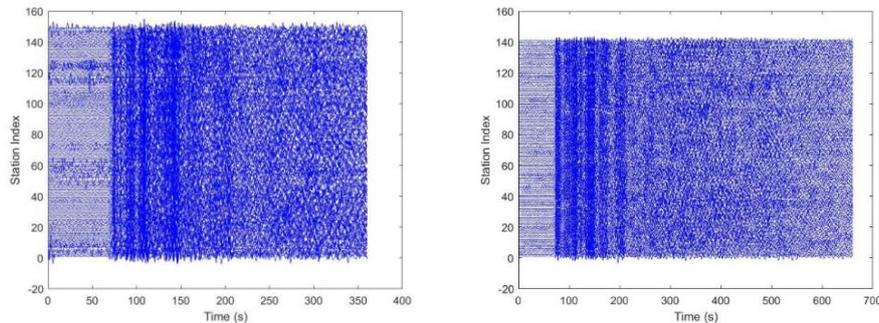
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pemfilteran dan Penyamaan Fase Awal Gelombang *P*

1. Koherensi Gempa Pertama

Gempa tektonik ganda pada 6 Februari 2023 di Turki menyebabkan deformasi permukaan di wilayah tengah dan selatan Turki, serta merusak wilayah barat laut Syria (Mai *et al.*, 2023; Mavroulis *et al.*, 2023; Ozkula

et al., 2023). Gempa pertama, dengan magnitudo M_w 7,8 dan mekanisme *strike-slip*, terjadi pada pukul 01:17:34 UTC (Mai et al., 2023; Mavroulis et al., 2023; Mertol et al., 2023). Kejadian ini terekam oleh jaringan stasiun seismik global Alaska yang dikenal sebagai AK dense array (Mai et al., 2023; Petersen et al., 2023). Data rekaman berupa citra gelombang seismik P diolah menggunakan metode MUSIC BPI, yang sebelumnya telah berhasil menghasilkan citra resolusi tinggi untuk *rupture* gempa Tohoku-Oki, Jepang 2011 (Meng et al., 2011), gempa Illapel, Chili 2015 (Meng et al., 2018), dan gempa Donggala, Indonesia 2018 (Bao et al., 2019). Sinyal gelombang P yang direkam oleh AK array mengandung *noise* yang mengurangi resolusi citra *rupture* gempa. Untuk mengatasi ini, dilakukan pemfilteran dengan rentang frekuensi 0,25-1,0 Hz sebelum sinyal digunakan sebagai input pada MUSIC BPI. Tujuan pemfilteran ini adalah untuk mendapatkan sinyal gelombang P yang lebih koheren (An dan Meng, 2016; Fahmi et al., 2022). Gambar 5 menunjukkan perbandingan seismogram dari AK array sebelum dan sesudah pemfilteran untuk gempa pertama dengan magnitudo M_w 7,8.

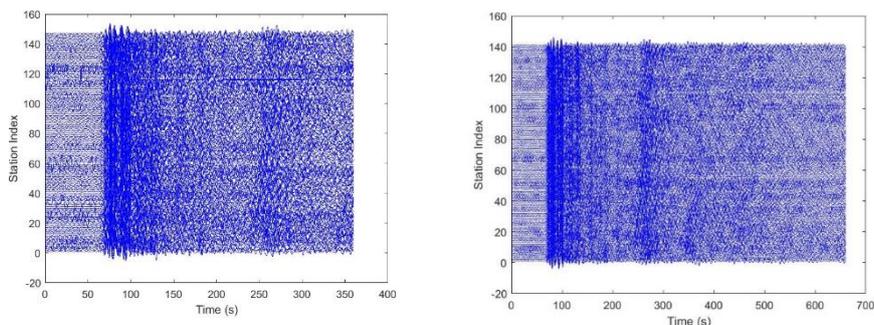


Gambar 5. Seismogram sebelum (kiri) dan sesudah (kanan) pemfilteran melalui proses *hypocenter alignment* untuk menyamakan fase awal gelombang P yang berasal dari radiasi seismik gempa pertama dengan kekuatan M_w 7,8.

Gambar 5 di atas menunjukkan *unfiltered seismogram* (panel kiri) dan *filtered seismogram* (panel kanan) dari AK seismic array yang merekam sinyal gelombang gempa M_w 7,8. Terlihat bahwa seismogram dari seismic array yang telah difilter memiliki citra gelombang P yang lebih halus dengan fase awal yang sama (koheren) dan level *noise* yang lebih rendah dibandingkan dengan citra gelombang P dari *unfiltered seismogram*. Pencitraan gelombang yang halus dengan fase awal yang sama (koheren) dan level *noise* yang lebih rendah digunakan sebagai proses awal pengolahan sinyal melalui MUSIC BPI karena pemfilteran merupakan tahap awal pengolahan sinyal yang belum koheren (Meng et al., 2018; Zeng et al., 2020; Fahmi et al., 2022).

2. Koherensi Gempa Kedua

Gempa kedua dalam rangkaian gempa ganda Turki 2023 terjadi 9 jam setelah gempa pertama, yaitu pada pukul 10:24:28 UTC dengan magnitudo terukur M_w 7,6 (Maletckii et al., 2023; Mertol et al., 2023; Mavroulis et al., 2023). Gempa ini dipicu oleh aktivitas seismik Sesar Sürgü pada titik episenter dengan jarak 90 km ke arah utara dari Sesar Anatolia Timur (Mai et al., 2023). Aktivitas gempa kedua juga terekam oleh AK array (Mai et al., 2023; Petersen et al., 2023). Untuk mengatasi masalah tersebut, maka dilakukan pemfilteran dengan rentang frekuensi 0,25-1,0 Hz sebelum digunakan sebagai input pada MUSIC BPI. Gambar 7 berikut adalah perbandingan antara seismogram dari AK array sebelum dan setelah proses pemfilteran.



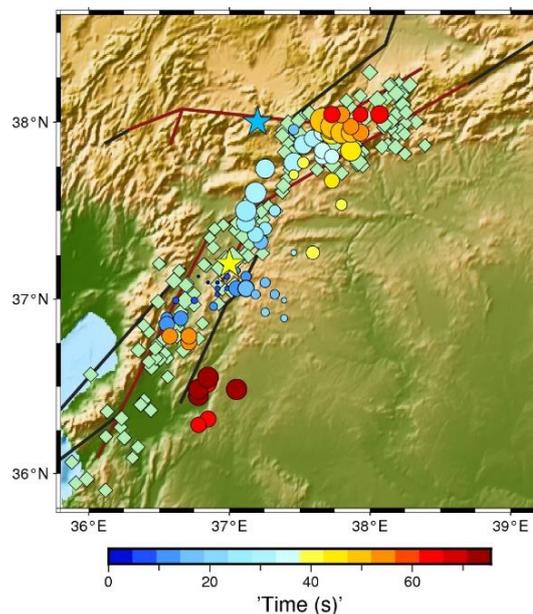
Gambar 6. Seismogram sebelum (kiri) dan sesudah (kanan) pemfilteran melalui proses *hypocenter alignment* untuk menyamakan fase awal gelombang P yang berasal dari radiasi seismik gempa kedua dengan kekuatan M_w 7,6.

Gambar 6 menunjukkan perbandingan antara seismogram yang *unfiltered seismogram* (panel kiri) dan *filtered seismogram* (panel kanan). *Filtered seismogram* menampilkan citra gelombang *P* dengan fase awal yang koheren dan *noise* yang lebih rendah. Proses awal pengolahan sinyal seismik menggunakan teknik MUSIC BPI melibatkan pencitraan gelombang dengan fase awal yang sama dan *noise* yang rendah, karena pemfilteran merupakan langkah pertama untuk mengolah sinyal yang belum koheren (Meng *et al.*, 2018; Zeng *et al.*, 2020; Fahmi *et al.*, 2022). Rentang frekuensi 0,25-1,0 Hz dipilih untuk pemfilteran karena ideal sebagai data input untuk MUSIC BPI saat mengolah sinyal dan mencitrakan *rupture* gempa besar, seperti gempa ganda Turki 6 Februari 2023. Tujuan utama pemfilteran adalah meningkatkan kualitas sinyal gelombang gempa agar hasil pencitraan dengan MUSIC BPI menjadi akurat (Meng *et al.*, 2018; Bao *et al.*, 2019; Zhang, 2019; Zeng *et al.*, 2020; Du, 2021).

B. Analisis Radiasi Rupture Gempa Ganda Turki 2023

1. Radiasi Rupture Gempa Pertama

Gempa Turki 2023 (M_w 7,8) terjadi di Zona Sesar Anatolia Timur (EAFZ) dengan episenter 15 km di timur EAFZ, mempengaruhi barat laut Syria. EAFZ, patahan sepanjang 580 km, memiliki sejarah gempa besar seperti gempa Ganos 1912 (M_w 7,2) dan Erzincan 1939 (M_w 7,8). Gempa ganda Turki 2023, yang terkuat di EAFZ, menyebabkan pergerakan tanah signifikan dan likuifaksi meluas. Analisis kinematik *rupture* gempa seperti panjang, durasi, kecepatan, dan arah propagasi dilakukan menggunakan citra *rupture* dengan teknik MUSIC BPI yang menghasilkan citra resolusi tinggi. Data yang dibutuhkan adalah gelombang *P* dari stasiun *seismic array* yang telah difilter untuk mengurangi *noise*. Pencitraan menunjukkan dua aspek kinematik *rupture* untuk gempa pertama (M_w 7,8): panjang ekstensi dan arah propagasi, dengan energi radiasi menunjukkan rambatan *rupture bilateral* ke timur laut dan selatan-barat daya, konsisten dengan penelitian sebelumnya.



Gambar 7. Propagasi *rupture* peristiwa gempa pertama berkekuatan M_w 7,8 dengan episenter (bintang kuning), gempa susulan (kotak hijau), dan propagasi *rupture* gempa (lingkaran biru tua, biru muda, kuning, oranye, dan merah) semakin menjauh dari sumber gempa.

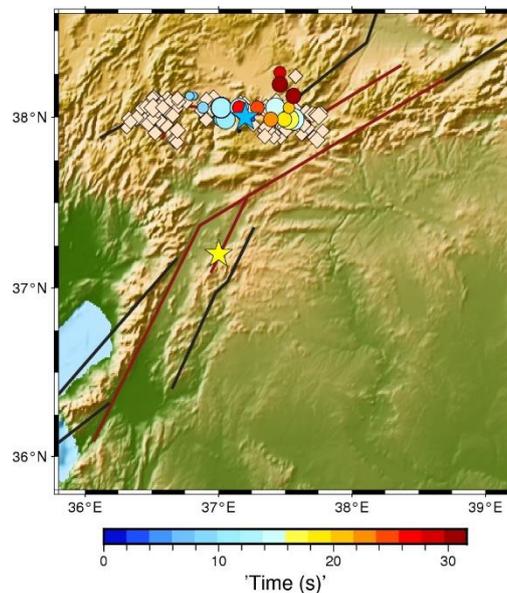
Durasi total rambatan *rupture* gempa yang diilustrasikan pada Gambar 7 adalah mulai dari *onset time* sampai saat *rupture* telah merambat selama 75 s (lingkaran merah tua). Pada fase awal kejadian, beberapa fase pergerakan *rupture* dapat diamati, misalnya distribusi energi masih berkumpul di sekitar episenter, dengan energi radiasi seismik yang dirambatkan relatif kecil (lingkaran biru tua). Setelah beberapa saat, energi yang dilepaskan semakin besar dan *rupture* bergerak sekitar 25 detik. Pada fase kedua, 25 detik setelah peristiwa dimulai di mana *rupture* bergerak ke arah barat daya kemudian secara *bilateral* berlanjut ke arah timur laut. *Rupture* membawa energi yang lebih besar dan mencapai puncak pada detik ke 48 pada jarak 135 km dari lokasi episenter (lingkaran oranye) sebelum mencapai persimpangan dengan jalur EAF dan perpanjangan timur sesar Sürgü, lalu berhenti sekitar 60 s durasi *rupture*. Pada fase ketiga, *rupture* yang pada awalnya mengarah ke barat daya dan sempat berhenti karena terhambat oleh radiasi seismik, namun kemudian bergerak kembali dan melanjutkan rambatan sedikit mengarah ke timur, kemungkinan mengubah keadaan

tegangan pada segmen ini. Hal ini mendorong *rupture* lebih lanjut ke arah barat daya hingga sekitar 75 s setelah peristiwa dimulai. *Rupture* kemudian berhenti dengan membawa radiasi seismik yang kuat.

Dua gempa di Turki pada 6 Februari 2023 disebut gempa ganda karena keduanya bersifat independen. Hal ini terlihat dari lokasi *aftershock* gempa pertama (kotak hijau pada Gambar 7) yang jauh dari episenter gempa kedua (bintang biru), menunjukkan kedua gempa memiliki sumber berbeda dan tidak saling berhubungan. Dampak gempa ganda ini pada timur laut Syria dijelaskan oleh Mei *et al.* (2023) dan Petersen *et al.* (2023), yang mencatat bahwa *rupture* gempa pertama (M_w 7,8) bergerak ke barat daya, mencapai lepas pantai Latakia, Syria dengan radiasi seismik kuat. Energi seismik merambat melalui daerah rentan geologis di Turki dan ditransfer ke timur laut Syria. Kondisi geografis dan topografi yang berdekatan antara Turki dan Syria memungkinkan guncangan gempa merambat lebih efisien melalui permukaan tanah yang terhubung.

2. Radiasi Rupture Gempa Kedua

Gempa kedua dalam gempa ganda Turki 2023 dengan magnitudo M_w 7,6 terjadi 9 jam setelah gempa pertama berkekuatan M_w 7,8, dimulai dari titik 90 km utara episenter gempa pertama di sepanjang sesar Sürgü, cabang dari jaringan EAF. Kedua gempa ini, dengan magnitudo besar dan lokasi terpisah, bukanlah rangkaian gempa utama dan susulan (Taymaz *et al.*, 2022). Parameter kinematik *rupture* untuk gempa ganda Turki 2023 dapat dianalisis menggunakan teknik MUSIC BPI, yang mampu mencitrakan *rupture* gempa dengan ekstensi spasial dan temporal panjang serta resolusi tinggi dan akurat (Ishii *et al.*, 2005; Ishii *et al.*, 2007; Meng *et al.*, 2018; Bao *et al.*, 2019; Zeng *et al.*, 2020). Data yang diperlukan adalah sinyal koheren gelombang *P* untuk mengurangi *noise* dan ketidakpastian pencitraan (An dan Meng, 2016; Kiser dan Ishii, 2017; Zhang, 2019; Zeng *et al.*, 2020; Fahmi *et al.*, 2022). Hasil pencitraan *rupture* untuk gempa kedua M_w 7,6 dengan MUSIC BPI terlihat pada Gambar 8.



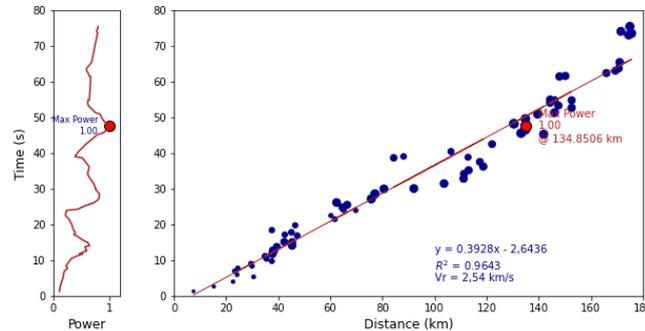
Gambar 8. Propagasi *rupture* peristiwa gempa kedua berkekuatan M_w 7,6 dengan episenter (bintang biru), gempa susulan (kotak coklat), dan propagasi *rupture* gempa (lingkaran biru tua, biru muda, kuning, oranye, dan merah) semakin menjauh dari sumber gempa.

Gambar 8 menunjukkan citra *rupture* gempa kedua (M_w 7,6) dengan kualitas tinggi, memudahkan analisis parameter kinematik. Episenter gempa ini ditandai dengan bintang biru, dengan energi radiasi menunjukkan rambatan *rupture bilateral* awalnya ke barat lalu ke timur, konsisten dengan penelitian sebelumnya. Durasi *rupture* terlihat dari perubahan warna dari biru ke merah, sementara ukuran kotak menunjukkan energi radiasi dari episenter. Pada fase awal, *rupture* bergerak *bilateral* ke arah barat Sesar Sürgü hingga puncaknya pada detik ke-12 sekitar 29 km dari episenter, lalu berlanjut ke arah timur laut setelah 32 detik. Wilayah Turki yang dikenal rentan terhadap gempa tektonik karena keberadaan NAFZ dan EAFZ mengalami gempa kedua dalam rangkaian gempa ganda 2023 di Sesar Sürgü, sekitar 90 km di utara gempa pertama, mengaktifkan Zona Savaşan-Maraş-Fevzipaşa (SMFZ). *Rupture* gempa ini berorientasi timur-barat dengan panjang 72 km, lebih pendek dibandingkan gempa pertama.

C. Kinematika Rupture Gempa Ganda Turki 2023

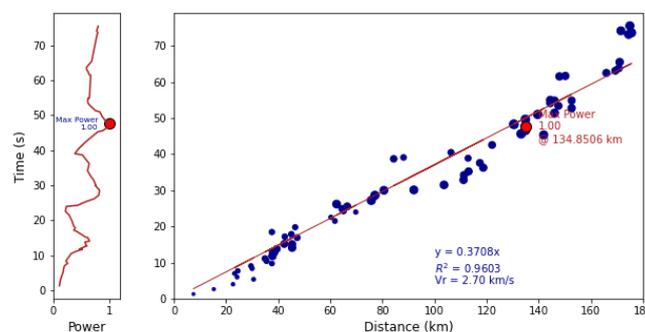
1. Kinematika Rupture Gempa Pertama

Radiasi energi seismik melalui rambatan *rupture* memberikan konsekuensi bahwa energi gempa dipindahkan dalam ruang-waktu dengan kecepatan *rupture* (Weng and Ampuero, 2020). Dalam konteks gempa ganda Turki 2023, kecepatan *rupture* merupakan gradien garis regresi linier antara jarak tempuh *rupture* terhadap waktu rambat *rupture*. Gambar 9 menampilkan grafik kinematika rambatan *rupture* gempa pertama berkekuatan M_w 7,8.



Gambar 9. Kinematika rambatan *rupture* hasil dari pencitraan dengan bantuan MUSIC BPI untuk gempa pertama berkekuatan M_w 7,8 dari peristiwa gempa ganda Turki 2023 yang terekam oleh jaringan stasiun seismik Alaska. Panel sebelah kanan menunjukkan regresi linier (garis lurus merah) yang mengalami *offset* dari pusat salib sumbu dan memotong sumbu horisontal pada jarak sekitar 7 km atau setara dengan $t = 2,64$ s dari radiator seismik frekuensi tinggi (bulatan biru) yang berasal dari rambatan *rupture* gempa. Gradien garis lurus merah adalah 0,393 menunjukkan kecepatan *rupture* gempa sebesar $1/0,393 = 2,54$ km/s. Panel kiri menunjukkan fase puncak energi pada detik ke 48.

Gambar 9 menunjukkan rambatan *rupture* gempa pertama dengan M_w 7,8 sepanjang sumbu horisontal sejauh hampir 180 km dari lokasi episenter dalam waktu ditunjukkan oleh sumbu vertikal selama 75 s. Berdasarkan gambar tersebut, analisis gerak uniform memberikan kecepatan *rupture* sebesar 2,54 km/s (*subshear speed*), Panel kiri pada Gambar 10 menunjukkan rambatan *rupture* yang membawa energi gempa yang relatif tinggi ke arah utara selama 75 s dengan menempuh jarak sejauh 180 km dari episenter gempa pertama. Garis lurus merah pada panel kanan dengan persamaan $y = 0,393x - 2,644$ di mana x adalah jarak terukur dalam kilometer dan y adalah waktu rambat terukur dalam sekon, mengalami *offset* dari titik potong sumbu vertikal pada $t = 2,64$ s. Oleh karena itu, pelepasan energi yang pertama untuk gempa pertama (panel kiri Gambar 10) terjadi pada saat $t = 28,60$ s ≈ 29 s yang bersesuaian dengan jarak 50 km ke arah barat daya dari lokasi episenter (Gambar 7). Puncak pelepasan energi yang terbesar (panel kiri Gambar 9) terjadi pada saat $t = 47,63$ s ≈ 48 s yang bersesuaian dengan jarak 135 km ke arah barat daya dari episenter (Gambar 9).



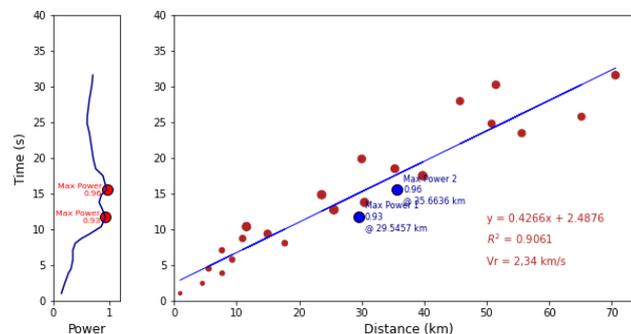
Gambar 10. Kinematika rambatan *rupture* hasil dari pencitraan dengan bantuan MUSIC BPI untuk gempa pertama berkekuatan M_w 7,8 dari peristiwa gempa ganda Turki 2023 yang terekam oleh jaringan stasiun seismik Alaska. Panel sebelah kanan menunjukkan regresi linier (garis lurus merah) dari radiator seismik frekuensi tinggi (bulatan biru) yang berasal dari rambatan *rupture* gempa. Gradien garis lurus merah adalah 0,371 menunjukkan kecepatan *rupture* gempa sebesar $1/0,371 = 2,70$ km/s. Panel menunjukkan fase puncak energi yaitu pada detik ke 48.

Gambar 10 menunjukkan rambatan *rupture* gempa pertama (M_w 7,8) sejauh hampir 180 km dari episenter dalam waktu 75 detik. Analisis menunjukkan kecepatan *rupture* sebesar 2,70 km/s (*subshear speed*), tanpa penundaan atau *offset*. Garis merah pada panel kanan, dengan persamaan $y = 0,371x$, menunjukkan hubungan antara jarak (x dalam km) dan waktu rambat (y dalam detik). Puncak pelepasan energi terbesar terjadi pada $t = 47,63$ detik (≈ 48 detik), berjarak 135 km ke arah barat daya dari episenter. Ini konsisten dengan Gambar 10, yang juga mencatat durasi *rupture* selama 75 detik dengan kecepatan *rupture* antara 2,54 km/s hingga 2,70 km/s. Kecepatan ini diperoleh dari analisis grafik dengan dan tanpa *offset*, sesuai dengan temuan sebelumnya (Mai *et al.*, 2023).

Penelitian Melgar *et al.* (2023) menyatakan kemungkinan adanya proses *supershear speed* pada fase awal radiasi, meskipun tidak jelas dalam rekaman gelombang P . Ini menunjukkan transisi kecepatan *rupture* dari *supershear* ke *subshear* di sepanjang EAFZ untuk mencegah kerusakan yang luas. Dampak gempa ganda Turki 2023 dirasakan di banyak kota karena sebagian besar wilayah Turki terdiri dari tanah alluvial, yang memperbesar magnitudo dan durasi gempa (Mertol *et al.*, 2023). Energi radiasi gempa dipelajari melalui distribusi energi ternormalisasi terhadap waktu rambat *rupture*, seperti terlihat pada panel kiri Gambar 9 dan 10. Distribusi energi ternormalisasi ditunjukkan oleh kurva amplitudo radiasi ternormalisasi, menggambarkan proses *rupture* sebagai bagian dari kinematika gempa (Fahmi *et al.*, 2022).

2. Radiasi Rupture Gempa Kedua

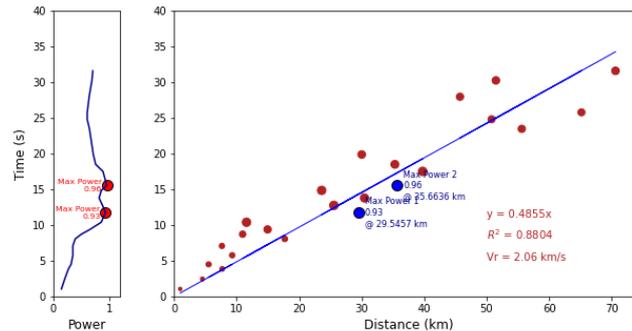
Gempa rambatan *rupture* gempa kedua M_w 7,6 ditunjukkan oleh Gambar 4.7 dan Gambar 4.8. Kedua grafik tersebut menunjukkan kecepatan *rupture* gempa kedua dengan M_w 7,6 yang diperoleh sebagai gradien garis lurus regresi linier antara jarak tempuh *rupture* terhadap waktu rambat *rupture*. Pelepasan energi seismik melalui rambatan *rupture* memindahkan energi gempa dalam ruang-waktu dengan kecepatan *rupture* (Weng and Ampuero, 2020). Panel kanan Gambar 12 menampilkan grafik kinematika rambatan *rupture* gempa kedua.



Gambar 11. Kinematika rambatan *rupture* hasil dari pencitraan dengan bantuan MUSIC BPI untuk gempa kedua berkekuatan M_w 7,6 dari peristiwa gempa ganda Turki 2023 yang terekam oleh jaringan stasiun seismik Alaska. Panel sebelah kanan menunjukkan regresi linier (garis lurus biru) yang mengalami *offset* dari pusat salib sumbu dan memotong sumbu horisontal pada jarak sekitar 6 km atau setara dengan $t = 2,49$ s dari radiator seismik frekuensi tinggi (bulatan merah) yang berasal dari rambatan *rupture* gempa. Gradien garis lurus adalah 0,427 menunjukkan kecepatan *rupture* gempa sebesar $1/0,427 = 2,34$ km/s. Panel kiri menunjukkan dua kali fase puncak energi, yaitu pada detik ke 12 dan 16.

Gambar 11 menunjukkan rambatan *rupture* gempa kedua sejauh 70 km dari episenter dalam waktu 30 detik, dengan kecepatan *rupture* 2,34 km/s (*subshear speed*), sesuai dengan garis lurus biru. Energi radiasi gempa kedua dianalisis melalui distribusi energi ternormalisasi terhadap waktu rambat *rupture* (panel kiri). Panel ini menunjukkan rambatan *rupture* membawa energi tinggi ke arah barat-timur selama hampir 32 detik, menempuh jarak 72 km dari episenter pertama. Garis biru pada panel kanan memiliki persamaan $y = 0,427x - 2,488$, dengan x sebagai jarak (km) dan y sebagai waktu (detik), mengalami *offset* pada $t = 2,49$ detik. Terdapat dua puncak pelepasan energi: yang pertama terjadi pada $t = 11,76$ detik (≈ 12 detik) dengan jarak ~ 29 km ke arah barat dari episenter, dan yang kedua terjadi pada $t = 15,53$ detik (≈ 16 detik) dengan jarak ~ 35 km ke arah barat dari episenter.

Gambar 12 mengilustrasikan rambatan *rupture* gempa kedua sepanjang sumbu horisontal sejauh 70 km dari lokasi episenter dalam waktu ditunjukkan oleh sumbu vertikal selama 30 s tanpa mempertimbangkan adanya *offset* pada sumbu vertikal. Berdasarkan data ini, garis regresi dihitung langsung dari data dan menghasilkan garis regresi yang melalui titik asal (0,0). perhitungan sederhana gerak uniform memberikan kecepatan *rupture* sebesar 2,06 km/s (*subshear speed*), konsisten dengan gradien garis lurus biru.



Gambar 12. Kinematika rambatan *rupture* hasil dari pencitraan dengan bantuan MUSIC BPI untuk gempa kedua berkekuatan M_w 7,6 dari peristiwa gempa ganda Turki 2023 yang terekam oleh jaringan stasiun seismik Alaska. Panel sebelah kanan menunjukkan regresi linier (garis lurus biru) dari radiator seismik frekuensi tinggi (bulatan merah) berasal dari rambatan *rupture* gempa. Gradien garis lurus adalah 0,486 menunjukkan kecepatan *rupture* gempa sebesar $1/0,486 = 2,06 \text{ km/s}$. Panel kiri menunjukkan dua kali fase puncak energi, yaitu pada detik ke 12 dan 16.

Dalam konteks rambatan *rupture* gempa kedua, garis lurus biru pada panel kanan (Gambar 12) memiliki persamaan yaitu $y = 0,4844x$ di mana x adalah jarak dalam kilometer dan y adalah waktu rambat terukur dalam sekon, tanpa mengalami *offset* dari titik potong sumbu vertikal. Dua puncak pelepasan energi diamati pada gempa kedua, di mana puncak pelepasan energi pertama (panel kiri Gambar 12) terjadi saat $t = 11,76 \text{ s} \approx 12 \text{ s}$ bersesuaian dengan jarak $\sim 29 \text{ km}$ arah barat dari lokasi episenter (Gambar 8). Puncak pelepasan energi yang kedua, di mana energi ini merupakan energi terbesar selama gempa kedua (panel kiri Gambar 12) terjadi pada saat $t = 15,53 \text{ s} \approx 16 \text{ s}$ yang bersesuaian dengan jarak $\sim 35 \text{ km}$ arah barat dari lokasi episenter (Gambar 8). Dengan demikian terdapat kesesuaian antara Gambar 11 dan Gambar 12 di mana durasi *rupture* tercatat selama 32 s, dengan kecepatan *rupture* berkisar antara 2,06 km/s hingga 2,34 km/s (*subshear speed*). Kecepatan tersebut diperoleh dari analisis grafik yang diukur dengan *offset* (Gambar 11) dan tanpa *offset* (Gambar 12).

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis parameter kinematik *rupture* gempa yang meliputi *rupture duration*, *rupture extent*, *rupture speed* dan *rupture directivity* pada kasus gempa ganda Turki pada tanggal 6 Februari 2023 dengan bantuan MUSIC BPI. Analisis dimulai dengan mengolah sinyal seismik gelombang P dari AK array. Pengolahan sinyal seismik dilakukan melalui penyamaan fase awal dan pemfilteran frekuensi tinggi. Kemudian, MUSIC BPI menghitung empat parameter kinematik, di mana hasil perhitungan dan analisis berupa citra *rupture* beresolusi tinggi yang menjelaskan dampak gempa ganda Turki hingga ke wilayah barat laut Syria.

Proses *rupture* gempa pertama (M_w 7,8) dan gempa kedua (M_w 7,6) adalah sebagai berikut. *Rupture* gempa pertama merambat *bilateral* ke arah timur laut dan selatan-barat daya sepanjang 180 km dari episenter. *Rupture* gempa kedua juga merambat *bilateral* ke arah barat sepanjang Sesar Sürgü, kemudian ke timur dan berubah arah ke timur laut sepanjang 72 km dari episenter. Temuan arah rambat dan panjang ekstensi *rupture* kedua gempa tersebut konsisten dengan temuan terdahulu. Analisis radiator seismik mengkonfirmasi gerak *rupture* gempa pertama dengan kecepatan 2,54 km/s hingga 2,70 km/s selama 75 s dan gempa kedua dengan kecepatan 2,06 km/s hingga 2,34 km/s selama 32 s (kecepatan *rupture* kedua gempa dikategorikan sebagai *subshear*). Temuan kecepatan dan durasi *rupture* kedua gempa tersebut sesuai dengan temuan terdahulu. *Rupture* gempa pertama bergerak ke arah barat daya wilayah Turki dengan membawa radiasi seismik yang kuat hingga lepas pantai Latakia, Syria yang berada di wilayah barat laut Syria.

UCAPAN TERIMAKASIH

Tim penulis mengucapkan terima kasih kepada para reviewer atas masukan berharga yang telah membantu menyempurnakan artikel IFI ini. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada pengelola laman IRIS Wilber 3 (http://ds.iris.edu/wilber3/find_event) yang menyediakan sinyal gelombang P frekuensi tinggi dari gempa ganda Turki 2023, direkam oleh jaringan stasiun seismik Alaska (AK Array), yang diunduh sebagai data sekunder untuk penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Bao, H., Ampuero, J-P, Meng, L., Fielding, E. J., Liang, C., Milliner, C. W. D., Feng, T. and Huang, H. 2019. Early and persistent supershear rupture of the 2018 magnitude 7.5 Palu earthquake. *Nature Geoscience*, Vol. 12, Issue 3, pp. 200-205.
- Benavente, R. and Cummins, P. R. 2013. Simple and reliable finite fault solutions for large earthquakes using the W-phase: the Maule (Mw = 8.8) and Tohoku (Mw = 9.0) earthquakes. *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, Issue 14, pp. 3591-3595.
- Cummins, P. R. 2017. Geohazards in Indonesia: earth science for disaster risk reduction—introduction. *Geological Society of London: Special Publications*, Vol. 441, pp. 1-7.
- Du, H. 2021. Estimating rupture front of large earthquakes using a novel multi-array back-projection method. *Frontiers in Earth Science. Section: Solid Earth Geophysics*, Vol. 9, Article 680163.
- Fahmi, M. N., Realita, A., Risanti, H., Prastowo, T. and Madlazim. 2022. back-projection results for the Mw 7.5, 28 September 2018 Palu earthquake-tsunami. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2377, No 012032.
- Felix, R. P., Hubbard, J. A., Bradley, K. E., Lythgoe, K. H., Li, L. and Switzer, A. D. 2022. Tsunami hazard in Lombok and Bali, Indonesia, due to the Flores back-arc thrust. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 22, Issue 5, pp. 1665-1682.
- Ishii, M., Shearer, P. M., Houston, H. and Vidale, J. E. 2005. Extent, duration and speed of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake imaged by the Hi-net array. *Nature Letters*, Vol. 435, pp. 933-936.
- Ishii, M., Shearer, P. M., Houston, H. and Vidale, J. E. 2007. Teleseismic P wave imaging of the 26 December 2004 Sumatra-Andaman and 28 March 2005 Sumatra earthquake ruptures using the Hi-net array. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, Issue B11307.
- Kiser, E. D. 2012. *Earthquake characteristics as imaged by the back-projection method*. Dissertation, Harvard University at Cambridge, Massachusetts, US, pp. 1-176.
- Kiser, E. D. and Ishii, M. 2017. Back-projection imaging of earthquakes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 45, Issue 1, pp. 271-299.
- Mai, P. M., Aspiotis, T., Aquib, T. A., Cano, E. V., Castro-Cruz, D., Espindola-Carmona, A., Li, B., Li, X., Liu, J., Matrau, R., Nobile, A., Palgunadi, K. H., Ribot, M., Parisi, L., Suhendi, C., Tang, Y., Yalcin, B., Avşar, U., Klinger, Y. and Jónsson, S. 2023. The destructive earthquake doublet of 6 February 2023 in south-central Türkiye and Northwestern Syria: initial observations and analyses. *The Seismic Record*, Vol. 3, No. 2, pp. 105-115.
- Maletckii, B., Astafyeva, E., Sanchez, S. A., Kherani, E. A. and de Paula, E. R. 2023. The 6 February 2023 Türkiye earthquake sequence as detected in the ionosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 128, Issue 9.
- Mavroulis, S., Argyropoulos, I., Carydis, P. and Lekkas, E. 2023. Earthquake environmental effects and building properties controlling damage caused by the 6 February 2023 earthquakes in East Anatolia. *Geosciences*, Vol. 13, No. 303.
- Melgar, D., Taymaz, T., Ganas, A., Crowell, B. W., Öcalan, T., Kahraman, M., Tsironi, V., Yolsal-Çevikbilen, S., Valkaniotis, S., Irmak, T. S., Eken, T., Erman, C., Özkan, B., Doğan, A. H. and Altuntaş, C. 2023. Sub- and super-shear ruptures during the 2023 Mw 7.8 and Mw 7.6 earthquake doublet in SE Türkiye. *Seismica*, Vol. 2, No. 3.
- Meng, L., Inbal, A. and Ampuero, J-P. 2011. A window into the complexity of the dynamic rupture of the 2011 Mw 9 Tohoku-Oki earthquake. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, Issue 7.
- Meng, L., Ampuero, J-P., Sladen, A. and Rendon, H. 2012. High-resolution backprojection at regional distance: application to the Haiti M7.0 earthquake and comparisons with finite source studies. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, Issue B4.
- Meng, L., Zhang, A. and Yagi, Y. 2016. Improving back projection imaging with a novel physics-based aftershock calibration approach: A case study of the 2015 Gorkha earthquake. *Geophysical Research Letters*, Vol. 43, pp. 628-636.
- Meng, L., Bao, H., Huang, H., Zhang, A., Bloore, A. and Liu, Z. 2018. Double pincer movement: encircling rupture splitting during the 2015 Mw 8.3 Illapel earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 495, pp. 164-173.
- Mertol, H. C., Tunç, G., Akiş, T., Kantekin, Y. and Aydın, İ. C. 2023. Investigation of RC buildings after 6 February 2023, Kahramanmaraş, Türkiye earthquakes. *Buildings*, Vol. 13, Issue 7.

- Nugraha, A. D., Shiddiqi, H. A., Widiyantoro, S., Thurber, C. H., Pesicek, J. D., Zhang, H., Wiyono, S. H., Ramdhan, M., Wandono and Irsyam, M. 2018. Hypocenter relocation along the Sunda Arc in Indonesia using a 3D seismic-velocity model. *Seismological Research Letters*, Vol. 89, No. 2A, pp. 603- 612.
- Ozkula, Gulen., Dowell, R. K., Baser, T., L, J-L., Numanoglu, O. A., Ilhan, O., Olgun, C. G., Huang, C-W. and Uludag, T. D. 2023. Field reconnaissance observations from the February 6, 2023, Turkey earthquake sequence. *Natural Hazards*, Vol. 119, pp. 663- 700.
- Petersen, G. M., Büyükakpınar, P., Sanhueza, O. V., Metz, M., Cesca, S., Akbayram, K., Saul, J. and Dahm, T. 2023. The 2023 southeast Türkiye seismic sequence: rupture of a complex fault network. *The Seismic Record*, Vol. 3, No. 2, pp. 134-143.
- Suppasri, A., Goto, K., Muhari, A., Ranasinghe, P., Riyaz, M., Affan, M., Mas, E., Yasuda, M. and Imamura, F. 2015. A decade after the 2004 Indian Ocean Tsunami: the progress in disaster preparedness and future challenges in Indonesia, Sri Lanka, Thailand, and the Maldives. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 172, Issue 12, pp. 3313-3341.
- Zhang, A. 2019. *Theories and applications of enhanced earthquake back-projection imaging*. Dissertation, University of California at Los Angeles, Los Angeles, US, pp. 1-140.
- Zhang H, van der Lee, S., Bina, C. R. and Ge, Z. 2021. Deep dehydration as a plausible mechanism of the 2013 Mw 8.3 Sea of Okhotsk deep-focus earthquake. *Frontiers in Earth Science*, Vol. 9, No. 521220, pp. 1-13.