

Identifikasi Sesar Gorontalo Dengan Memanfaatkan Data Gravitasi Satelit Resolusi Tinggi

Aina'ul Mardiyah, Ahmad Fauzi Pohan*

Laboratorium Fisika Bumi, Jurusan Fisika,

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas

Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 22 Juni 2024

Direvisi: 16 Juli 2024

Diterima: 28 Agustus 2024

Kata kunci:

Data gravitasi

Anomali Bouguer lengkap

Analisis SVD

Sesar

Keywords:

Gravity data

Complete Bouguer anomaly

SVD analysis

Fault

Penulis Korespondensi:

Ahmad Fauzi Pohan

Email: ahmadfauzipohan@sci.unand.ac.id

ABSTRAK

Sesar Gorontalo merupakan sesar aktif dan merupakan sumber utama gempa di Provinsi Gorontalo. Gempa bumi kuat dan merusak yang pernah terjadi di Provinsi Gorontalo yaitu pada 16 November 2008 dengan kekuatan 7,4 Mw. Salah satu upaya mitigasi bencana maka dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengidentifikasi jenis sesar Gorontalo. Data yang digunakan dari *global gravity model plus* (GGMplus) sebagai data anomali udara bebas dan *shuttle radar topography mission* (SRTM2Gravity) sebagai data koreksi medan modern yang mengandalkan skala penuh data gravitasi topografi. Data tersebut digunakan untuk menghitung data anomali Bouguer lengkap. Data anomali Bouguer lengkap dilakukan analisis spektrum untuk mendapatkan kedalaman anomali regional dan residual serta dilakukan pemisahan anomali regional dan residual dengan metode kontinuitas ke atas. Pada anomali residual dilakukan analisis *second vertical derivative* (SVD) untuk mengetahui jenis sesar Gorontalo. Hasil inversi model 3D anomali gravitasi menunjukkan adanya Sesar Gorontalo dengan kontras densitas sedang dan rendah. Berdasarkan analisis SVD menunjukkan sesar Gorontalo berjenis sesar turun. Struktur geologi tersebut dinilai berpotensi menjadi sumber bencana alam di wilayah Gorontalo.

The Gorontalo fault is an active fault and is the main source of earthquakes in Gorontalo Province. A strong and destructive earthquake that has occurred in Gorontalo Province was on November 16, 2008 with a magnitude of 7.4 Mw. As one of the disaster mitigation efforts, a research was conducted to identify the type of Gorontalo fault. Data used from global gravity model plus (GGMplus) as free air anomaly data and shuttle radar topography mission (SRTM2Gravity) as modern terrain correction data that rely on full-scale topographic gravity data. These data are used to calculate the complete Bouguer anomaly data. The complete Bouguer anomaly data was subjected to spectrum analysis to obtain the depth of regional and residual anomalies and to separate regional and residual anomalies using the upward continuation method. On the residual anomaly, second vertical derivative (SVD) analysis was conducted to determine the type of Gorontalo fault. The inversion result of 3D model of gravity anomaly shows Gorontalo fault with medium and low density contrast. Based on the SVD analysis, the Gorontalo fault is a turun fault. This geological structure is considered to be a potential source of natural disasters in the Gorontalo region.

Copyright © 2024 Author(s).

I. PENDAHULUAN

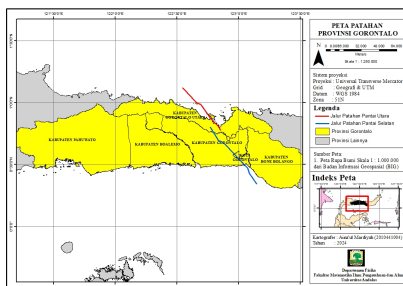
Pulau Sulawesi, khususnya Sulawesi bagian utara merupakan wilayah dengan aktivitas tektonik yang sangat aktif, karena letaknya yang berada di antara tiga lempeng tektonik aktif yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Australia (Keller & Pinter, 2002). Pertemuan ketiga lempeng ini menyebabkan subduksi ganda yang kompleks di bagian utara Pulau Sulawesi dan kawasan Laut Maluku, sehingga menghasilkan beberapa subduksi dan sesar di daratan Sulawesi (Pasau & Tanauma, 2011). Kondisi ini menyebabkan Sulawesi memiliki 45 segmen sesar dengan beberapa sesar utama seperti Sesar Palu-Koro, Sesar Matano dan Sesar Gorontalo. Akibatnya, Sulawesi Utara menjadi daerah rawan gempa bumi dengan risiko bencana gempa yang tinggi di Provinsi Gorontalo, dimana subduksi di Laut Sulawesi dan aktivitas sesar aktif berkontribusi terhadap terjadinya gempa bumi (Manyoe dkk., 2019). Gempa bumi kuat dan merusak yang pernah terjadi di Gorontalo yaitu pada 16 November 2008 dengan kekuatan 7,4 Mw yang diikuti dengan tujuh gempa susulan dengan kekuatan gempa lebih dari 5,0 Mw sehingga menyebabkan 4 orang meninggal dunia, 59 lainnya mengalami luka-luka, dan 800 rumah rusak (USGS, 2008). Gempa terbaru yang terjadi di daerah Gorontalo yaitu pada 18 Januari 2023 dengan kekuatan 6,3 Mw (BMKG, 2023). Menurut, BMKG gempa bumi di Provinsi Gorontalo disebabkan oleh aktivitas sesar Gorontalo.

Peta sesar aktif yang dikeluarkan oleh BNPB Provinsi Gorontalo tahun 2018, dimana Sesar Gorontalo terbagi menjadi dua bagian yaitu jalur sesar di sepanjang pantai utara yang melintasi wilayah Gorontalo Utara hingga mencapai Laut Sulawesi dan jalur sesar di sepanjang pantai selatan yang membentang dari arah tenggara di Teluk Tomini hingga ke arah barat laut, memotong Kota Gorontalo. Berdasarkan hasil penelitian yang pernah dilakukan oleh Pasau dan Raharjo (2014) di wilayah daratan Gorontalo ditemui adanya gempa-gempa sangat dangkal yang di sekitarnya terdapat gempa-gempa dengan kedalaman menengah sampai dalam akibat aktivitas sesar Gorontalo, dengan mekanisme bola fokus sesar ini memiliki panjang sesar 24,54 km dan lebar rupture 8,51 km. Tingkat aktivitas dari sesar Gorontalo belum dapat diketahui dengan baik, sehingga diperlukan penelitian yang lebih lanjut dengan memanfaatkan metode geofisika antara lain dengan metode seismik, metode deformasi, serta metode gravitasi.

Metode gravitasi dipilih karena dapat menampilkan kondisi geologi bawah permukaan berdasarkan variasi nilai gravitasi yang dihasilkan dari perbedaan densitas batuan (Margiono dkk., 2021). Metode gravitasi ini sering diaplikasikan untuk survei dalam kegiatan eksplorasi karena metode ini relatif murah, efektif untuk mengetahui kondisi geologi di bawah permukaan bumi dengan skala yang cukup luas, serta akuisisi data dapat dilakukan dengan survei lapangan maupun data satelit. Pada penelitian ini, *Global Gravity Model plus* (GGMplus) digunakan sebagai data primer yang merupakan data satelit gravitasi dan *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM2Gravity) digunakan sebagai data koreksi topografi skala penuh. Data GGMplus dan SRTM2gravity dipilih karena memiliki resolusi tinggi sehingga menghasilkan informasi yang lebih detail tentang variasi medan gravitasi bumi (Hirt dkk., 2019). Untuk mendapatkan gambaran yang lebih jelas, maka dibutuhkan metode lanjutan yang bertindak sebagai filter yaitu analisis *Second Vertical Derivative* (SVD). Analisis SVD ini dilakukan untuk mengetahui jenis sesar Gorontalo.

II. METODE

2.1 Data Gravitasi



Gambar 1 Peta lokasi penelitian

Penelitian ini menggunakan data dari *Global Gravity Model plus* (GGMplus) diperoleh melalui <http://ddfe.curtin.edu.au/models/GGMplus/>. Data yang diperoleh berupa nilai *Free Air Anomaly* (FAA) dan elevasi wilayah penelitian. Data topografi DEM SRTM2Gravity diperoleh melalui <http://ddfe.curtin.edu.au/models/SRTM2Gravity2018>, data yang diperoleh berupa nilai *Full Scale Topography* (FSTG). Wilayah penelitian ini adalah Provinsi Gorontalo pada koordinat 0° hingga 1,5° N dan 121,5° hingga 123,5° E dapat dilihat pada Gambar 1.

2.2 Pengolahan Data

Setelah didapatkan nilai koreksi anomali udara bebas (FAA) dan nilai koreksi topografi skala penuh (FSTG) yaitu berupa koreksi terrain dan koreksi Bouguer, maka dilakukan perhitungan untuk menentukan nilai anomali bouguer lengkap menggunakan Persamaan (1)

$$ABL = FAA - FSTG \quad (1)$$

dengan ABL adalah anomali Bouguer lengkap, FAA adalah koreksi anomali udara bebas, FSTG adalah koreksi topografi skala penuh.

Selanjutnya dilakukan proses pemisahan anomali Bouguer lengkap menjadi anomali regional dan anomali residual dengan menggunakan *upward continuation*. Pada anomali residual dilakukan analisis *Second Vertical Derivative* (SVD) untuk mengetahui jenis sesar. Hasil analisis berhubungan dengan efek dangkal yang bersifat lokal. Untuk mengetahui jenis sesar dapat dilakukan *slicing* memotong zona yang diduga merupakan sesar dengan kriteria sebagai berikut (Aufia, 2017):

$$\left| \left(\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} \right) \right|_{maks} > \left| \left(\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} \right) \right|_{min} \quad , \text{untuk sesar turun} \quad (2)$$

$$\left| \left(\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} \right) \right|_{maks} < \left| \left(\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} \right) \right|_{min} \quad , \text{untuk sesar naik} \quad (3)$$

$$\left| \left(\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} \right) \right|_{maks} = \left| \left(\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} \right) \right|_{min} \quad , \text{untuk sesar geser} \quad (4)$$

Inversi anomali gravitasi dilakukan untuk memperoleh data struktur bawah permukaan seperti sebaran kontras kepadatan batuan di sesar Gorontalo. Metode inversi melibatkan perhitungan numerik untuk memperkirakan parameter fisik bawah permukaan yang mendekati data gravitasi yang diamati. Pada penelitian ini memanfaatkan software *grablox* dan *bloxer*. Data yang digunakan memiliki standar deviasi 5% dan gravitasi absolut 0,19 mGal. Untuk inversi data gravitasi, area penelitian dibagi menjadi serangkaian sel persegi panjang, masing-masing dengan serangkaian parameter fisik tertentu:

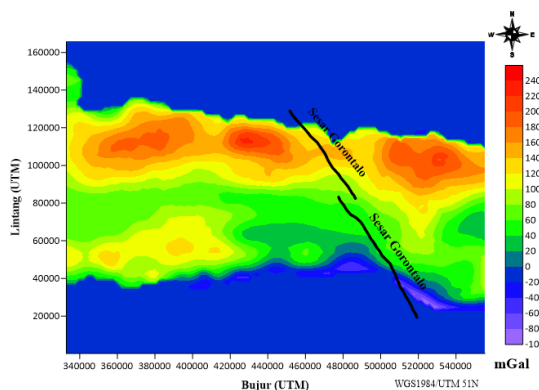
$$Gm = d \quad (5)$$

dengan d adalah data vektor, G adalah matriks sensitivitas n, m .

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Anomali Bouguer

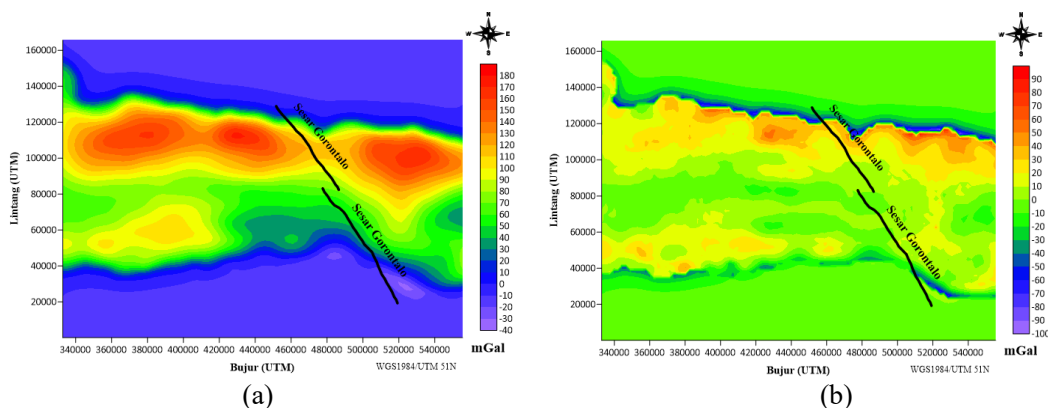
Hasil dari pengolahan data gravitasi di Provinsi Gorontalo menggunakan software Oasis Montaj dan Surfer, diperoleh kontur anomali Bouguer lengkap (Gambar 2). Gambar 2 menunjukkan kontur anomali Bouguer lengkap di kawasan Gorontalo dengan nilai antara – 100 mGal hingga 240 mGal. Nilai ini menunjukkan perbedaan kepadatan material di bawah permukaan tanah. Berdasarkan Gambar 2 variasi rentang nilai anomali Bouguer lengkap dapat dibedakan menjadi tiga pola. Pertama adalah pola anomali tinggi (warna merah - orange) dengan rentang anomali 240 mGal sampai dengan 120 mGal, yang kedua merupakan pola anomali sedang (warna kuning - hijau) dengan rentang anomali 100 mGal sampai dengan 20 mGal, yang ketiga merupakan pola anomali rendah (warna biru - ungu) dengan rentang anomali -100 mGal sampai dengan 0 mGal yang terletak di laut Sulawesi dan teluk Tomini. Anomali rendah terjadi karena adanya struktur batuan dengan densitas relatif rendah, sedangkan anomali tinggi terjadi karena struktur batuan dengan densitas tinggi (Zakariya dkk., 2022).



Gambar 2 Peta kontur anomali Bouguer lengkap

3.2 Pemisahan anomali regional dan residual menggunakan *upward continuation*

Anomali Bouguer lengkap merupakan anomali yang masih terdiri dari berbagai komponen didalamnya sehingga diperlukan pemisahan anomali untuk interpretasi lebih lanjut. Kontinuasi ke atas digunakan untuk memisahkan data anomali gravitasi yang berasal dari kedalaman yang berbeda. Dalam penelitian ini, kontinuasi ke atas dicoba pada berbagai ketinggian, termasuk 3 km dari permukaan tanah, untuk mengidentifikasi ketinggian optimal yang membuat anomali dari sumber yang lebih dalam menjadi lebih menonjol dengan mengabaikan anomali dari sumber yang dangkal yang ditunjukkan pada Gambar 3(a). Nilai anomali residual yang terlihat pada Gambar 3(b) dihasilkan dengan mengurangi nilai anomali Bouguer lengkap dari nilai anomali regional.

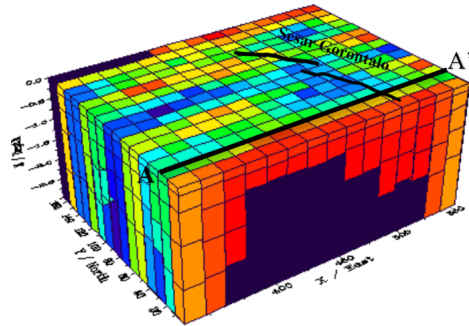


Gambar 3 (a) Anomali regional (b) Anomali residual

Nilai anomali regional pada Gambar 3(a) memiliki rentang dari -40 mGal sampai dengan 180 mGal. Kontur anomali regional ini menghasilkan pola halus dikarenakan anomali regional memiliki pengaruh variasi batuan yang cukup dalam. Anomali regional ini digunakan untuk pemodelan bawah permukaan yang mencakup zona dalam. Anomali residual yang dihasilkan pada Gambar 3(b) memiliki nilai rentang anomali dari -100 mGal sampai dengan 90 mGal. Kontur anomali residual ini menghasilkan pola yang lebih kasar dan kompleks dikarenakan memiliki sifat yang lebih dangkal. Anomali residual dapat digunakan untuk memodelkan struktur dangkal yang berada di dekat permukaan seperti adanya struktur sesar.

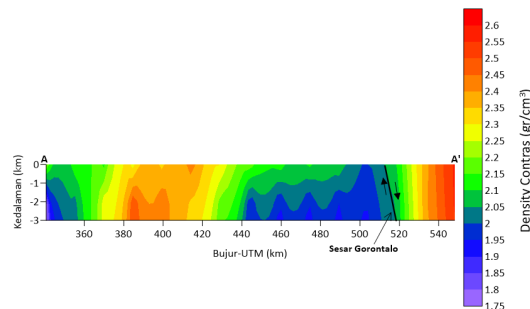
3.3 Pemodelan Inversi 3D

Tujuan utama dari melakukan inversi data gravitasi 3-D adalah untuk menghasilkan informasi bawah permukaan berdasarkan variabel fisik, khususnya kontras kepadatan batuan yang terkait dengan anomali gravitasi di wilayah Gorontalo. Proses pemodelan ini terutama ditargetkan pada sesar Gorontalo. Hasil yang ditampilkan pada Gambar 4 berupa lapisan tiga dimensi yang terdiri dari lapisan pertama hingga lapisan kelima dengan kedalaman mencapai 3 km. Model blok 3D dalam arah z menggambarkan model 3D tiap lapisan dengan menunjukkan nilai densitas, kedalaman lapisan, dan skala warna dari tiap-tiap lapisan menunjukkan variasi nilai densitas pada tiap blok minor.



Gambar 4 Pemodelan inversi 3D anomali residual

Dari model blok 3D dilakukan sayatan A-A' dalam arah y untuk memodelkan struktur di bawah permukaan, yaitu sayatan $y = 27,71$ km yang melintasi sesar Gorontalo. Bentuk model tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.

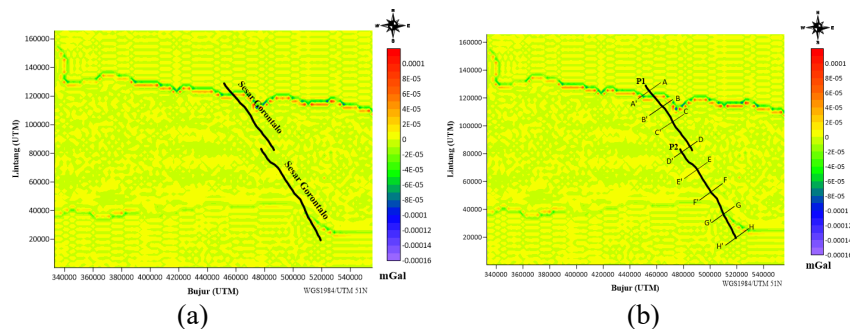


Gambar 5 Model struktur bawah permukaan dengan x melintang di daerah Gorontalo

Pada Gambar 5 di koordinat $x = 520$ km ditafsirkan adalah Sesar Gorontalo, hal itu karena terlihat adanya pola kontras densitas dengan kepadatan rendah ditandai dengan warna biru dan dikelilingi oleh kontras dengan kepadatan sedang yang ditandai dengan warna hijau. Pola ini diyakini mewakili sesar Gorontalo karena perubahan densitas tersebut melihatkan adanya jenis sesar turun yang disebut dengan sesar Gorontalo. Hasil ini didukung oleh penelitian yang pernah dilakukan oleh Pohan dkk. (2023) mengenai pemanfaatan dan pemodelan data gravitasi satelit untuk penilaian geohazard di wilayah Yogyakarta Pulau Jawa, Indonesia. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa garis sesar dapat dilihat dari kontras densitas batuan.

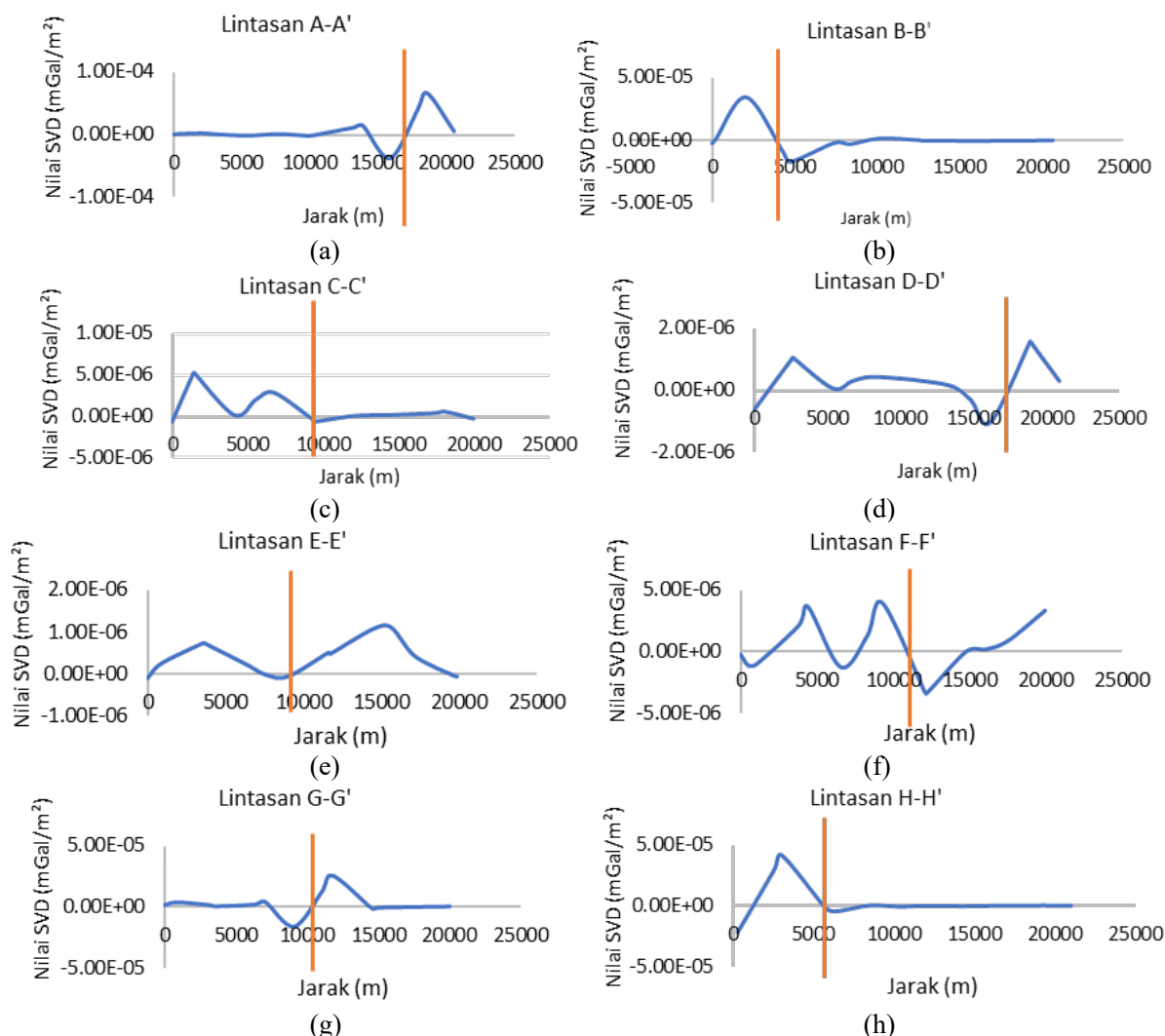
3.4 Analisis Sesar Menggunakan Metode SVD

Anomali residual yang dihasilkan, kemudian dianalisis dengan metode *Second Vertical Derivative* (SVD) yang ditunjukkan pada Gambar 6(a). Anomali SVD digunakan untuk menganalisis jenis sesar. Pola kontur anomali yang terbentuk menunjukkan efek dangkal, ditandai dengan pola kontur yang berskala kecil (Jayatri dkk., 2023). Untuk memastikan jenis struktur sesar, dilakukan analisis grafik SVD yang diperoleh melalui proses *slicing* pada sesar Gorontalo. Dalam penelitian ini, *slicing* pada delapan lintasan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6(b). Lintasan *slicing* ini melintasi jalur dugaan sesar berdasarkan peta kontur anomali SVD.



Gambar 6 (a) Anomali SVD (b) Lintasan *slicing* pada anomali SVD

Hasil dari *slicing* sebanyak 8 lintasan berupa grafik SVD yang dapat dilihat pada Gambar 7. Dari hasil grafik ini dapat diketahui jenis sesar Gorontalo.



Gambar 7 Grafik SVD (a) Lintasan A-A' (b) Lintasan B-B' (c) Lintasan C-C' (d) Lintasan D-D' (e) Lintasan E-E' (f) Lintasan F-F' (g) Lintasan G-G' (h) Lintasan H-H'

Grafik yang melewati nilai anomali 0 mGal/m^2 menunjukkan kepadatan lateral pada kontras yang diinterpretasikan sebagai zona sesar (Ibrahim dkk., 2022). Dari analisis grafik SVD dapat diketahui struktur sesar yang ditandai oleh garis lurus berwarna merah. Pada *slicing* setiap sesar bagian 1 dan 2 terdapat 8 lintasan struktur sesar yang diidentifikasi jenis sesarnya. Dalam menentukan jenis dari setiap sesar tersebut, dilakukan dengan cara melihat nilai mutlak antara nilai SVD max dan SVD min (Leni dkk., 2023). Jika $|\text{SVDMax}| > |\text{SVDMin}|$ menandakan sesar turun, $|\text{SVDMax}| < |\text{SVDMin}|$ menandakan sesar naik, dan $|\text{SVDMax}| = |\text{SVDMin}|$ menandakan sesar geser. Hasil dari proses perhitungan dan analisis struktur sesar diuraikan pada Tabel 1. Berdasarkan hasil pada Tabel 1 sesar Gorontalo diketahui merupakan jenis sesar turun karena menunjukkan nilai mutlak SVD minimum yang lebih kecil dari SVD maksimum.

IV. KESIMPULAN

Sesar Gorontalo berhasil diidentifikasi dengan metode gravitasi yang memanfaatkan data citra satelit GGMplus dan SRTM2gravity. Pemodelan inversi 3D menunjukkan adanya kontras densitas pada anomali gravitasi yang mengindikasikan keberadaan Sesar Gorontalo. Berdasarkan analisis grafik *Second Vertical Derivative* pada data anomali residual menunjukkan sesar Gorontalo berjenis Sesar Turun dengan parameter nilai mutlak SVD minimum lebih kecil daripada nilai mutlak SVD maksimum. Sesar turun ini memiliki potensi untuk menyebabkan gempa bumi yang signifikan. Oleh karena itu, informasi ini sangat berguna dalam merencanakan langkah-langkah mitigasi yang lebih efektif.

Tabel 1 Jenis sesar

Sesar	Lintasan	$ SVD_{Max} $	$ SVD_{Min} $	Jenis Sesar
1	A-A'	$6,67 \times 10^{-5}$	$3,80 \times 10^{-5}$	Turun
	B-B'	$3,43 \times 10^{-5}$	$1,70 \times 10^{-5}$	Turun
	C-C'	$2,88 \times 10^{-6}$	$0,50 \times 10^{-6}$	Turun
	D-D'	$1,60 \times 10^{-6}$	$1,01 \times 10^{-6}$	Turun
2	E-E'	$1,12 \times 10^{-6}$	$0,06 \times 10^{-6}$	Turun
	F-F'	$3,90 \times 10^{-6}$	$3,40 \times 10^{-6}$	Turun
	G-G'	$2,52 \times 10^{-5}$	$1,60 \times 10^{-5}$	Turun
	H-H'	$4,15 \times 10^{-5}$	$0,45 \times 10^{-5}$	Turun

DAFTAR PUSTAKA

- Aufia, Y. F. (2017). Pendugaan Sesar Daerah “Y” Berdasarkan Anomali Gayaberat Dengan Analisis Derivative.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2018). Indeks Risiko Bencana Indonesia.
- BMKG. (2023). Gempabumi Tektonik M6,3 di Teluk Tomini, Luwuk, Gorontalo, Tidak Berpotensi Tsunami. <https://www.bmkg.go.id/press-release/?p=gempabumi-tektionik-m63-di-teluk-tomini-luwuk-gorontalo-tidak-berpotensi-tsunami&tag=press-release&lang=ID>
- Hirt, C., Yang, M., Kuhn, M., Bucha, B., Kurzmann, A., & Pail, R. (2019). SRTM2gravity: an ultrahigh resolution global model of gravimetric terrain corrections. *Geophysical Research Letters*, 46(9), 4618–4627.
- Ibrahim, M. M., Utami, P., & Raharjo, I. B. (2022). Analisis Struktur Geologi Berdasarkan Data Gravitasi Menggunakan Metode Second Vertical Derivative (SVD) Pada Lapangan Panas Bumi” X”. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*, 3(2), 59.
- Jayatri, A. U., Multi, W., & Hayatuzzahra, S. (2023). Identifikasi Keberadaan Sesar Menggunakan Metode Gravitasi dan Analisis Second Vertical Derivative (SVD) di Bagian Selatan Kabupaten Sumbawa. *Jurnal TAMBORA*, 7(2), 53–57.
- Keller, E. A., & Pinter, N. (2002). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*. Prentice Hall.
- Leni, A. F. F. P. F., Hadi, A. I., Zakariya, H., & Refrizon, R. (2023). Identification of the Manna Segment Sumatran Fault Using GGMplus Gravity Anomaly Data with the Second Vertical Derivative (SVD) Method. *Jurnal Ilmu Fisika Universitas Andalas*, 15(2), 123–136.
- Manyoe, I. N., Arif, S., & Lahay, R. J. (2019). Earthquake Damage Level of Gorontalo Area Based on Seismicity and Peak Ground Acceleration. *Jambura Geoscience Review*, 1(1), 7–12.
- Margiono, R., Novitri, A., Pevriadi, A., & Zakariya, H. (2021). Identifikasi Sesar Lokal di Wilayah Barat Daya Sumba, Indonesia Berdasarkan Sebaran Hiposenter Gempabumi Dan Data Gravitasi. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 22, 67. <https://doi.org/10.31172/jmg.v22i2.824>
- Pasau, G., & Raharjo, S. S. (2014). Identifikasi Sesar di Wilayah Gorontalo dengan Analisis Mekanisme Bola Fokus. *Jurnal MIPA*, 3(1), 40–43.
- Pasau, G., & Tanauma, A. (2011). Pemodelan sumber gempa di Wilayah Sulawesi Utara sebagai upaya mitigasi bencana gempa bumi. *Jurnal Ilmiah Sains*, 11(2), 202–209.
- Pohan, A. F., Sismanto, S., Nurcahya, B. E., Lewerissa, R., Koesuma, S., Saputro, S. P., Amukti, R., Saputra, H., & Adhi, M. A. (2023). Utilization and modeling of satellite gravity data for geohazard assessment in the Yogyakarta area of Java Island, Indonesia. *Kuwait Journal of Science*.
- USGS. (2008). M 7.4 - 135 km NW of Gorontalo, Indonesia. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000gnur/executive>
- Zakariya, H., Margiono, R., Novitri, A., & Pevriadi, A. (2022). Identifikasi Anomali Gravitasi Di Wilayah Sulawesi Tenggara Berdasarkan Data Gravitasi GGMplus. *PROGRESS: Jurnal Geofisika*, 1(1), 63–68.