

ANALISIS SEISMISITAS WILAYAH TURKI SEBAGAI AKIBAT AKTIVITAS SEISMO-TEKTONIK PATAHAN ANATOLIA

¹⁾Karlita Dewi, ²⁾Muhammad Nurul Fahmi, ³⁾Arie Realita

^{1*)} Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: karlitadewi.21003@mhs.unesa.ac.id

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

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

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis seismisitas dan stress tektonik wilayah Turki berdasarkan data gempa periode 1924-2024 dengan pendekatan *Frequency Magnitude Distribution* (FMD) menggunakan perangkat lunak ZMAP7.0. Wilayah penelitian dibagi menjadi empat zona, yakni Zona 1 (utara Turki bagian barat), Zona 2 (utara Turki bagian timur), Zona 3 (selatan Turki bagian barat) dan Zona 4 (selatan Turki bagian timur). Parameter yang dianalisis meliputi *a*-value untuk tingkat seismisitas dan *b*-value untuk estimasi stress tektonik bawah permukaan. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai *a*-value $\approx 5,80$ – $6,03$ lebih tinggi di Zona 3 dan Zona 4 yang menandakan aktivitas gempa lebih sering terjadi di wilayah selatan. Sebaliknya, Zona 1 dan Zona 2 memiliki nilai *a*-value lebih rendah, menandakan frekuensi gempa yang lebih jarang terjadi. Nilai *b*-value lebih rendah ditemukan di wilayah utara $\approx 0,58$ – $0,66$ menunjukkan tingkat stress tektonik yang tinggi dan potensi gempa besar, terutama di sepanjang Patahan Anatolia Utara. Wilayah selatan memiliki nilai *b*-value lebih tinggi, mencerminkan stress lebih rendah dan didominasi gempa kecil. Untuk kedalaman menengah (*intermediate sources*) analisis hanya dilakukan di Zona 3 dengan nilai *b*-value rendah yang mengindikasikan potensi gempa besar pada kedalaman tersebut. Studi ini berkontribusi dalam memahami karakteristik kegempaan Turki dan penting untuk perencanaan mitigasi bencana gempa bumi.

Kata Kunci: Seismisitas Turki, Patahan Anatolia, *Mc*, *a*-value, *b*-value

Abstract

This study aims to analyze the seismicity and tectonic stress in Turkey based on earthquake data from the period 1924–2024 using the *Frequency-Magnitude Distribution* (FMD) approach with the ZMAP7.0 software. The study area is divided into four zones: Zone 1 (northwestern Turkey), Zone 2 (northeastern Turkey), Zone 3 (southwestern Turkey), and Zone 4 (southeastern Turkey). The parameters analyzed include the *a*-value for seismicity levels and the *b*-value for estimating subsurface tectonic stress. The results show that *a*-values ranging from approximately 5.80 to 6.03 are higher in Zones 3 and 4, indicating more frequent seismic activity in the southern regions. Conversely, Zones 1 and 2 have lower *a*-value, indicating less frequent earthquake occurrences. Lower *b*-value were found in the northern regions (≈ 0.58 – 0.66), suggesting higher tectonic stress and a greater potential for large earthquakes, particularly along the North Anatolian Fault. The southern regions exhibit higher *b*-values, reflecting lower stress levels and predominantly smaller earthquakes. For intermediate-depth sources, analysis was conducted only in Zone 3, where a low *b*-value indicates the potential for large earthquakes at these depths. This study contributes to a better understanding of Turkey's seismic characteristics and is essential for earthquake disaster mitigation planning.

Keywords: Seismicity of Turkey, Anatolian Fault, *Mc*, *a*-value, *b*-value

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Turki merupakan salah satu negara dengan aktivitas seismo-tektonik yang tinggi di dunia karena kehadiran dua patahan aktif, yaitu North Anatolian Fault (NAF) atau Patahan Anatolia Utara dan East Anatolian Fault (EAF) atau Patahan Anatolia Timur (Kolat *et al.*, 2012; Tarakçi *et al.*, 2014; Bikçe and Çelik, 2016; Öztürk, 2020; Işık *et al.*, 2021; Mertol *et al.*, 2023). Aktivitas seismo-tektonik tersebut dipicu oleh pergerakan Lempeng Anatolia ke arah barat (Cetin *et al.*, 2003; Bikçe and Çelik, 2016; Géli *et al.*, 2018; Zilio and Ampuero, 2023) yang didesak oleh Lempeng Afrika dan Lempeng Arab yang bergerak agak miring ke arah utara dengan Lempeng Eurasia yang relatif stabil (Cetin *et al.*, 2003; Ozkula *et al.*, 2023). Patahan Anatolia Utara membentang sepanjang wilayah utara Turki dari barat sampai timur dengan panjang hampir 1500 km. Patahan Anatolia Timur berbentuk melengkung yang memanjang dari Teluk Iskenderun hingga Hakkari dan meluas ke wilayah timur dan tenggara Turki (Mertol *et al.*, 2023).

Patahan Anatolia Utara telah memicu rangkaian gempa dengan berkekuatan $M_w > 7$ yang unik (Géli *et al.*, 2018). Gempa berkekuatan $M_w 7,1$ terjadi di Düzce pada tanggal 12 November 1999 memecah segmen kanan Patahan Anatolia Utara. Segmen kanan yang sudah pecah tersebut berada di sebelah timur dari pusat gempa $M_w 7,4$ di Izmit pada tanggal 17 Agustus 1999. Pusat kedua gempa tersebut merupakan bagian dari rangkaian gempa besar dengan pusat gempa yang bergeser ke arah barat sejajar dengan Patahan Anatolia Utara (Konca *et al.*, 2010). Patahan Anatolia Timur merupakan zona patahan transformasi utama di wilayah timur Mediterania dan mendominasi struktur geologi bagian wilayah timur Turki. Patahan ini membentang dari Karlıova di utara hingga wilayah Antakya di selatan. Patahan Anatolia Timur termasuk patahan geser lateral kiri yang kompleks dengan panjang 550-580 km, memisahkan wilayah barat laut Lempeng Anatolia dari wilayah tenggara Lempeng Arab (Yönlü *et al.*, 2017; Mavroulis *et al.*, 2023).

Dalam konteks tersebut di atas, studi seismisitas wilayah Turki bisa dilakukan melalui perhitungan parameter a -value dan b -value. Selain parameter tersebut, variasi spasial b -value juga dapat memberikan gambaran tentang stres tektonik yang dialami oleh struktur batuan bawah permukaan wilayah Turki. Pengetahuan mengenai seismisitas wilayah Turki bisa dipelajari dengan menghitung M_c (*magnitude of completeness*), a dan b , serta anomali b yang berlaku di wilayah Turki. Perhitungan semua parameter seismik tersebut dilakukan dengan membagi wilayah Turki menjadi 4 zona seismik, yaitu Zona 1, Zona 2 (mempresentasikan wilayah utara Turki) dan Zona 3, Zona 4 (mempresentasikan wilayah selatan Turki).

B. Hukum Gutenberg-Richter

Level seismisitas suatu wilayah dapat ditentukan melalui persamaan FMD dari relasi log-linier Gutenberg-Richter (1944) sebagai berikut,

$$\log N = a - bM \quad (1)$$

di mana N menyatakan jumlah kejadian gempa dengan $M \geq M_c$ di suatu wilayah dalam kurun waktu tertentu (Amaro-Mellado and Bui, 2020). Dalam hal ini, M_c (*magnitude of completeness*) didefinisikan sebagai nilai magnitudo terkecil yang berfungsi sebagai batas bawah jangkauan magnitudo di mana relasi log-linier Gutenberg-Richter berlaku valid (Mignan and Woessner, 2012; Han *et al.*, 2015). Parameter a dan b adalah parameter seismik yang relevan dengan kerentanan wilayah terhadap potensi bahaya bencana seismik. Secara umum, a menunjukkan level seismisitas suatu wilayah yang besarnya bergantung pada luas wilayah, periode, dan magnitudo terbesar (Han *et al.*, 2015; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Sedangkan b adalah rasio jumlah gempa kecil relatif terhadap jumlah gempa besar yang menunjukkan level stres batuan bawah permukaan (Tormann *et al.*, 2014; Scholz, 2015; Yeken, 2016; Rigo *et al.*, 2018; Öztürk, 2020).

Dalam penelitian ini, parameter a dan b dihitung dengan pendekatan *maximum likelihood* (Aki, 1965) dengan bantuan perangkat lunak ZMAP7.0 (Reyes and Wiemer, 2019) yang dirancang khusus untuk analisis

statistik gempa di wilayah Turki. Sebelum parameter a dan b ditentukan, Nilai M_c harus diestimasi terlebih dahulu karena berperan sebagai M_c batas bawah data gempa yang dapat dipercaya. Apabila estimasi M_c ditetapkan terlalu tinggi, maka jumlah sampel data gempa yang tersedia untuk analisis akan berkurang secara signifikan, sehingga hasil perhitungan parameter menjadi kurang representative terhadap kondisi sebenarnya. Apabila estimasi M_c terlalu tinggi, maka hal tersebut menyebabkan berkurangnya sampel data gempa.

C. Pendekatan Maximum Likelihood

Pendekatan *maximum likelihood* (Aki, 1965) adalah metode statistik yang digunakan untuk estimasi parameter a dan b berdasarkan probabilitas maksimal (Mignan and Woessner, 2012). Pendekatan ini tidak memperhitungkan variabel dependen, sehingga ketidakpastian estimasi parameter a dan b dapat dikurangi sampai batas minimum yang menyebabkan akurasi hasil perhitungan menjadi tinggi (Nava *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Pendekatan ini didasarkan pada asumsi bahwa statistik gempa mengikuti distribusi eksponensial (Scholz, 2015; Amaro-Mellado *et al.*, 2017). Estimasi parameter b dapat diperoleh melalui persamaan Utsu (1966),

$$b = \frac{1}{\ln 10 [\bar{M} - (M_c - \frac{\Delta M}{2})]} \quad (2)$$

Persamaan ini dilakukan untuk mengurangi bias dalam estimasi b -value terutama akibat efek binning dan pemilihan threshold magnitudo atau magnitudo of completeness (M_c) (Han *et al.*, 2015; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Nilai parameter $b < 1,0$ mengindikasikan batuan geologi bawah permukaan memiliki stres yang tinggi dan sebaliknya untuk parameter $b > 1,0$ maka akumulasi stres tektonik batuan bawah permukaan relatif rendah. $b = 1,0$ mengindikasikan bahwa distribusi gempa suatu wilayah mengikuti pola alami tanpa adanya peningkatan tegangan maupun pelepasan signifikan (Han *et al.*, 2015; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Estimasi parameter a didapatkan melalui persamaan Gutenberg-Richter dan manipulasi matematis dengan asumsi bahwa data hanya digunakan untuk $M \geq M_c$, sehingga dari persamaan (2.2) dengan mengambil titik referensi saat $M = M_c$, sehingga;

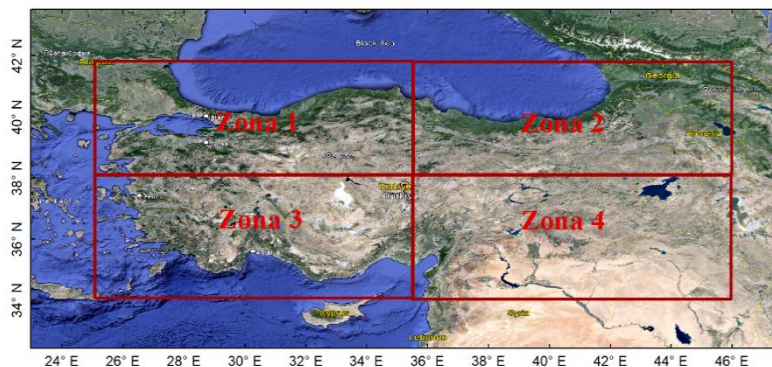
$$a = \log N + \log(b \ln 10) + M_c b \quad (3)$$

Kemudian akurasi perhitungan parameter a bergantung pada akurasi perhitungan parameter b dan M_c (Mignan and Woessner, 2012; Amaro-Mellado and Bui, 2020).

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa catatan kejadian gempa di wilayah Turki dalam rentang waktu 1924-2024 dengan magnitudo $4,0 \leq M_w \leq 8,5$ dan kedalaman sumber dari permukaan hingga 300 km. Sumber data diperoleh dari katalog ISC-GEM (<http://www.isc.ac.uk/iscgem/>) yang menyediakan informasi gempa dengan kualitas tinggi dan konsisten. Proses analisis data dilakukan menggunakan perangkat lunak ZMAP7.0 (Reyes and Wiemer, 2019) untuk menghasilkan estimasi M_c , b -value dan a -value dengan pendekatan *maximum likelihood* (Aki, 1965). Untuk memastikan hanya data mainshock yang di analisis, digunakan metode penyaringan Uhrhammer (1986), sedangkan Teknik MAXC digunakan untuk menentukan nilai M_c dan meningkatkan akurasi estimasi b dan a (Woessner and Wiemer, 2005). Wilayah penelitian dibagi menjadi empat zona berdasarkan koordinat geografis wilayah tersebut. Zona 1 mencakup wilayah utara Turki bagian barat, zona 2 mencakup wilayah utara Turki bagian timur, sedangkan zona 3 mencakup wilayah selatan Turki bagian barat, zona 4 mencakup wilayah selatan Turki bagian timur. Pembagian zona seismik dapat dilihat pada Gambar 1.



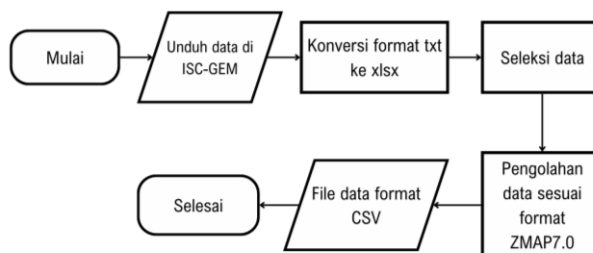
Gambar 1. Pembagian zona seismik wilayah Turki

B. Variabel Operasional Penelitian

Tiga variabel operasional dalam penelitian ini adalah variabel manipulasi, variabel respons, dan variabel kontrol. Dalam penelitian ini, variabel manipulasi adalah magnitudo momen gempa M_w sedangkan variabel respons adalah frekuensi kejadian N atau $\log N$. Variabel kontrol adalah metode perhitungan M_c , b -value, dan a -value berbasis pendekatan *maximum likelihood* (Aki, 1965) melalui pemberlakuan relasi Gutenberg-Richter (1944) dan Utsu (1966) di wilayah Turki.

C. Teknik Pengumpulan Data

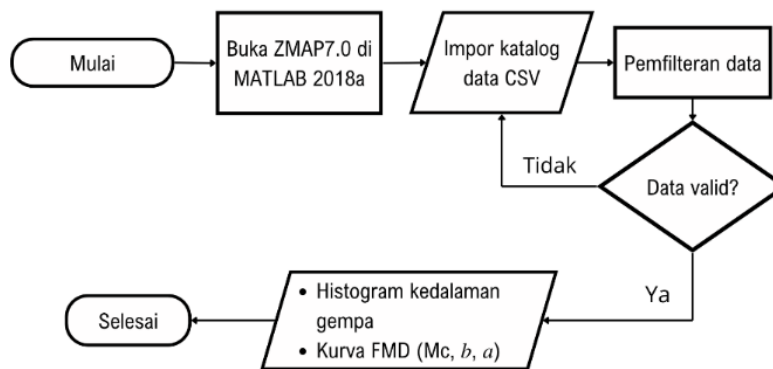
Data dikumpulkan secara sekunder berupa katalog gempa yang diperoleh dari situs resmi ISC-GEM antara tahun 1924-2024 dengan magnitudo yaitu $4,0 \leq M_w \leq 8,5$ dan kedalaman gempa mencapai 300 km. Data tersebut dipilih berdasarkan variasi kedalaman sumber: *shallow* (0–70 km) dan *intermediate* (70–300 km). Selanjutnya, data *foreshocks* dan *aftershocks* dihapus dengan filter Uhrhammer (Uhrhammer, 1986) agar data yang digunakan dalam perhitungan M_c , b -value, dan a -value hanya merupakan data *mainshocks*. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan level akurasi perhitungan ketiga parameter seismik tersebut (Amaro-Mellado *et al.*, 2017). Seluruh prosedur dan teknik pemilahan, pengumpulan, dan pemrosesan data penelitian diterapkan pada 4 zona seismik wilayah Turki. Flowchart pengumpulan data dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 2. Flowchart pengumpulan data seismic.

D. Teknik Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan untuk setiap zona seismik sebelum menganalisis seismisitas dan stres tektonik struktur batuan bawah permukaan wilayah Turki. Berikut adalah rincian prosedur pengolahan data. Semua data sampel diunduh melalui katalog ISC-GEM dan disimpan dalam format file.csv. Dengan bantuan *spreadsheet*, data gempa yang memiliki magnitudo selain magnitudo momen dikonversi menjadi M_w . Selanjutnya, data gempa diatur sesuai format yang ditentukan oleh ZMAP7.0 yaitu *longitude, latitude, year, month, day, magnitude, depth, hour, minute*. Tahap selanjutnya adalah menyimpan data dalam format file.dat sebagai *input* dalam program ZMAP7.0 dengan bantuan Matlab2018a. Setelah proses penapisan Uhrhammer (1986), data kemudian diolah kembali menggunakan ZMAP7.0 untuk menghasilkan *output* berupa kurva FMD yang berisi estimasi M_c , b -value, a -value, dan histogram variasi kedalaman gempa. Flowchart pengolahan data dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3. Flowchart pengolahan data seismik.

E. Filtering dan Pemilihan Data

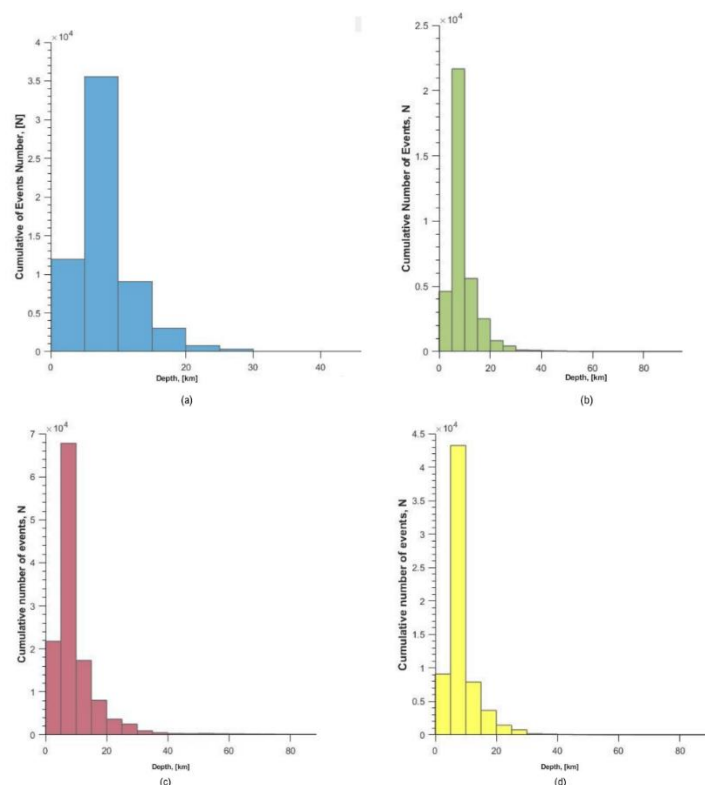
Untuk memastikan kualitas analisis, data gempa yang digunakan difilter berdasarkan beberapa kriteria. Pertama, hanya gempa dengan magnitude di atas M_c yang dihitung berdasarkan analisis kurva FMD menggunakan metode maksimum likelihood. Kedua, data duplikat, entri dengan informasi lokasi tidak lengkap, atau data dengan ketidakpastian waktu dan kedalaman tinggi dihapus. Filtering magnitudo menggunakan metode Uhrhammer dilakukan untuk mengidentifikasi dan menghapus gempa anomali yang tidak merepresentasikan kejadian tektonik utama. Selain itu, analisis dibatasi pada kedalaman tertentu sesuai fokus penelitian (0–70 km untuk seluruh zona dan 70–300 km untuk zona 3) guna meminimalkan bias akibat perbedaan mekanisme sumber di kedalaman berbeda.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini membahas analisis seismik berdasarkan visualisasi data dari ZMAP7.0 mencakup histogram kedalaman gempa dan kurva FMD (M_c , b -value dan a -value). Analisis dalam penelitian ini dilakukan dengan membagi wilayah kajian ke dalam empat zona seismik utama. Zona 1 mencakup wilayah utara Turki bagian barat, sedangkan zona 2 meliputi wilayah utara Turki bagian timur. Selanjutnya, zona 3 difokuskan pada wilayah selatan Turki bagian barat, dan zona 4 mencakup wilayah selatan Turki bagian timur. Pembagian ini dimaksudkan agar karakteristik aktivitas seismik di setiap area dapat dianalisis lebih rinci. Histogram kedalaman sumber gempa kemudian digunakan untuk menunjukkan distribusi vertikal aktivitas seismik di masing-masing zona wilayah Turki. Selain itu, kurva FMD memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai tingkat seismisitas serta kondisi tegangan pada struktur batuan di bawah permukaan. Sementara itu, variasi spasial nilai b -value menyajikan informasi penting terkait potensi bahaya gempa di setiap zona penelitian, sehingga dapat menjadi dasar dalam memahami perbedaan tingkat kerawanan seismik antarwilayah.

A. Histogram Kedalaman Gempa

Histogram kedalaman gempa digunakan untuk menunjukkan jumlah kejadian gempa (frekuensi) pada berbagai rentang kedalaman hiposenter, yaitu titik awal terjadinya gempa di bawah permukaan bumi. Apabila histogram memperlihatkan bahwa sebagian besar gempa berada pada rentang kedalaman 0–70 km, maka wilayah tersebut dapat dikategorikan sebagai daerah yang didominasi oleh gempa dangkal. Jenis gempa ini biasanya memiliki potensi kerusakan yang lebih tinggi karena lokasi sumbernya relatif dekat dengan permukaan (Maden & Öztürk, 2015; Meghraoui et al., 2021). Sebaliknya, apabila distribusi gempa lebih banyak terkonsentrasi pada kedalaman menengah hingga dalam, yaitu sekitar 70–300 km, maka hal tersebut umumnya menunjukkan adanya pengaruh dari zona subduksi aktif yang bekerja di bawah wilayah tersebut (Warren et al., 2015; Zhang et al., 2021). Dengan demikian, pola kedalaman gempa dapat memberikan petunjuk penting mengenai proses tektonik yang mendominasi suatu kawasan. Gambar 2 di bawah ini menyajikan secara visual distribusi kedalaman sumber gempa yang teridentifikasi di wilayah Turki.



Gambar 4. Histogram kedalaman sumber terhadap jumlah kejadian gempa N untuk (a) Zona 1; (b) Zona 2; dan (c) Zona 3; (d) Zona 4.

Pada Gambar 4(a), merupakan histogram gempa pada zona 1 menunjukkan bahwa mayoritas kejadian gempa terjadi di kedalaman 0-15 km, dengan puncak frekuensi sekitar kedalaman 5 km. Hampir tidak terdapat gempa pada kedalaman lebih dari 30 km, yang mengindikasikan bahwa aktivitas seismik di wilayah ini didominasi oleh deformasi kerak atas (Maden, N. and Öztürk, S. 2015; Touma *et.al.*, 2023). Kondisi ini umumnya terkait dengan pergerakan Lempeng Anatolia ke arah barat relatif terhadap Lempeng Eurasia (Cetin *et al.*, 2003; Bikçe and Çelik, 2016; Géli *et al.*, 2018; Zilio and Ampuero, 2023). Temuan ini juga menunjukkan bahwa zona subduksi tidak berperan besar dalam aktivitas seismik di wilayah ini. Jenis gempa yang dominan adalah gempa dangkal (*shallow sources*), yang cenderung lebih berpotensi merusak karena terjadi lebih dekat ke permukaan dan menghasilkan getaran yang lebih kuat di wilayah pemukiman (Maden, N and Öztürk, S. 2015).

Pada gambar 4(b) ini menunjukkan histogram kedalaman gempa di zona 2, di mana sebagian besar gempa terjadi pada kedalaman dangkal 0-20 km dengan puncak sekitar kedalaman 5-10 km. Wilayah ini juga berada dalam pengaruh NAF mendekati ujung timur sistem patahan tersebut. Selain itu, terdapat interaksi dengan Lempeng Eurasia dan Lempeng Arab yang saling menekan, sehingga menghasilkan deformasi kerak dangkal (Yolsal-Çevikbilen *et al.*, 2012; Bohnhoff *et al.*, 2016; Kaduri *et al.*, 2017). Oleh karena itu, aktivitas gempa pada zona ini didominasi gempa dangkal (*shallow sources*) akibat gaya kompresi antar lempeng (Meghraoui *et al.*, 2021; Ding *et al.*, 2023). Jumlah total kejadian gempa di zona 2 sedikit lebih rendah dibandingkan zona 1, yang mengindikasikan bahwa seismik lebih intens terjadi di zona 1.

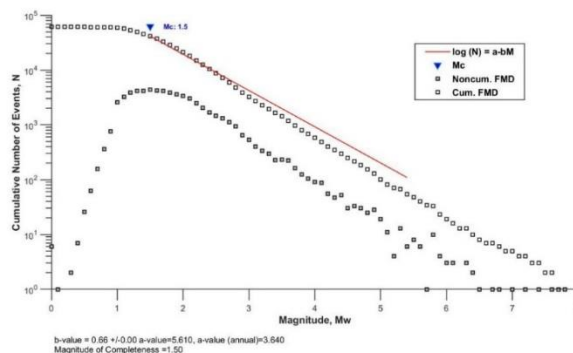
Pada Gambar 4(c) histogram kedalaman gempa pada zona 3 menunjukkan bahwa sebagian besar terjadi pada kedalaman 0-20 km dengan puncak tajam sekitar kedalaman 10 km serupa dengan pola yang terlihat pada zona 1 dan zona 2. Namun, berbeda dari dua zona sebelumnya di mana zona 3 masih menunjukkan sebaran gempa yang cukup banyak hingga kedalaman sekitar 70 km, bahkan beberapa mencapai kedalaman 200 km, meskipun dengan frekuensi yang jauh lebih rendah. Kondisi ini mengindikasikan bahwa wilayah ini kemungkinan berada di atas zona subduksi aktif (Polat, O. *et al.*, 2008; Öztürk, S. 2015; Bayrak, E. *et al.*, 2017).

Pada Gambar 4(d) histogram kedalaman gempa pada zona 4 menunjukkan pola yang hampir identik dengan zona 1 dan 2. Sebagian besar gempa yang terjadi pada kedalaman 0-15 km dengan puncak frekuensi sekitar kedalaman 5 km. Aktivitas gempa menurun drastis setelah kedalaman 20 km. Di mana zona ini terletak di wilayah interaksi Lempeng Antolia dan Lempeng Arab, khususnya sepanjang Patahan Anatolia Timur (Yönlü *et al.*, 2017; Işık *et al.*, 2021; Guvercin *et al.*, 2022). Mekanisme ini menciptakan banyak gempa dangkal karena pergerakan geser dan tekanan antar lempeng, sehingga hanya ada sedikit aktivitas gempa menengah hingga dalam (Maden, N. and Öztürk, S. 2015; Ding *et al.*, 2023).

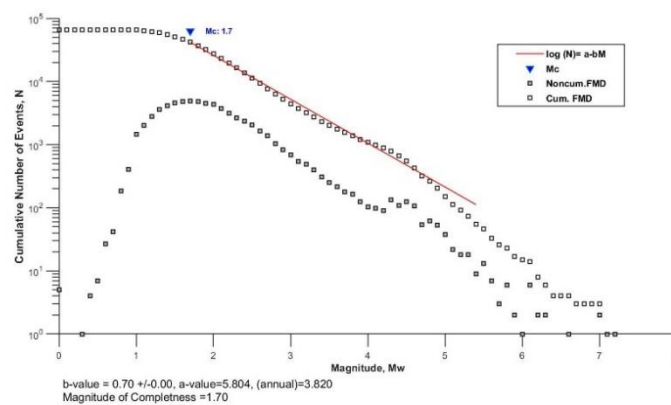
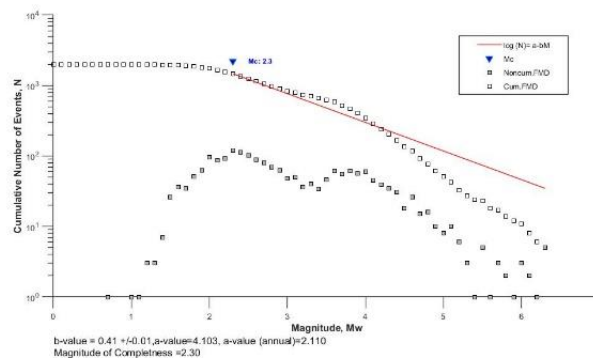
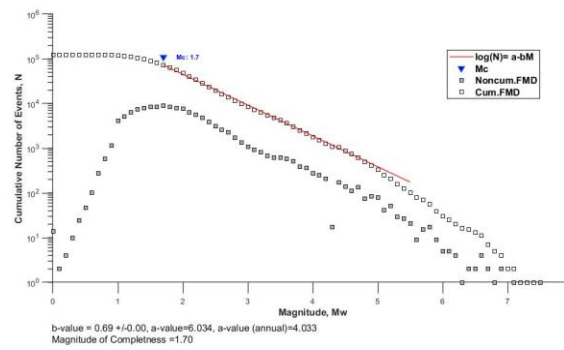
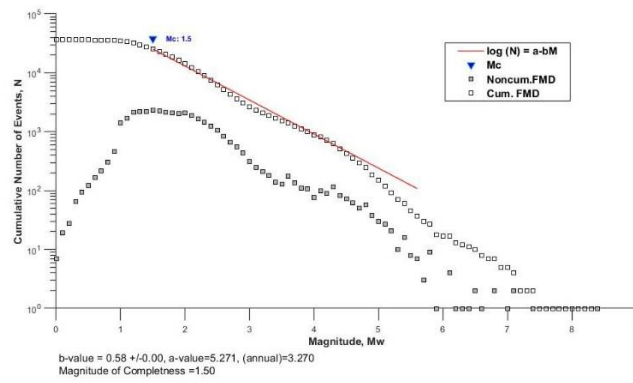
Berdasarkan analisis histogram distribusi kedalaman gempa wilayah Turki pada zona 1, 2, 3, dan 4 secara umum aktivitas seismik didominasi oleh gempa dangkal (*shallow sources*). Diperkirakan sekitar 97-98% dari total kejadian gempa diseluruh zona terjadi pada kedalaman kurang dari 70 km, menunjukkan dominasi aktivitas seismik di kerak atas. Dominasi gempa dangkal ini terutama disebabkan oleh keberadaan sistem patahan yang sangat aktif seperti Patahan Anatolia Utara (NAF) dan Patahan Anatolia Timur (EAF) akibat tektonik geser mendatar (*strike-slip*) yang intens pada lapisan kerak atas (Kolat *et al.*, 2012; Tarakçi *et al.*, 2014 Bohnhoff *et al.*, 2016; Güvercin *et al.*, 2022; Mai *et al.*, 2023). Sementara itu, zona 3 menunjukkan karakteristik yang berbeda karena selain gempa dangkal, juga terdapat sejumlah gempa menengah (*intermediate sources*) yang mencapai 2-3% dari total kejadian. Fenomena ini terjadi karena zona 3 meliputi wilayah selatan Turki bagian barat yang berada dekat dengan Zona Subduksi Hellenic, di mana Lempeng Afrika menujam ke bawah Lempeng Eurasia (Polat, O. *et al.*, 2008; Bayrak, Y. and Bayrak, E. 2012; Öztürk, S. 2015). Proses subduksi inilah yang menyebabkan aktivitas seismik tidak hanya terjadi di kerak atas, tetapi juga di zona mantel atas, sehingga menghasilkan gempa pada kedalaman menengah. Oleh karena itu, dominasi gempa dangkal dan keberadaan gempa menengah di zona 3 ini mencerminkan interaksi kompleks antara deformasi kerak dangkal dan dinamika subduksi lempeng di wilayah tersebut (Bayrak, Y. and Bayrak, E., 2012; Öztürk, S. 2015; Bikçe and Çelik, 2016; Öztürk, 2020; Mertol *et al.*, 2023).

B. Kurva FMD

Hasil analisis data seismik yang diperoleh dan divisualisasikan dalam kurva FMD (*Frequency-Magnitude Distribution*) menunjukkan pola distribusi frekuensi gempa terhadap magnitudo di wilayah penelitian. Setelah proses homogenisasi magnitudo menggunakan konversi magnitudo dan pemurnian data menggunakan pemfilteran uhrhammer (1986) di mana, kurva FMD yang dihasilkan memberikan gambaran mengenai aktivitas seismik wilayah penelitian. Dari perhitungan parameter seismik menggunakan ZMAP7.0 (Reyes and Wiemer, 2019) diperoleh nilai M_c yang mencerminkan batas bawah magnitudo yang dapat terdeteksi dengan baik. Gambar 5. menampilkan kurva FMD yang memuat hasil perhitungan b -value yang merefleksikan akumulasi stress pada batuan bawah permukaan, serta a -value yang menggambarkan tingkat seismisitas di wilayah penelitian (Scholz, 2015; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Selain itu, kurva FMD juga mencakup hasil perhitungan M_c untuk berbagai kategori kedalaman sumber gempa yang dipengaruhi oleh perbedaan karakteristik data gempa. Nilai a (*annual*) dalam kurva ini menunjukkan tingkat seismisitas tahunan selama periode pengumpulan data dari tahun 1924 hingga 2024.



(a)



Gambar 5. Plot kurva FMD (a) Zona 1: *shallow sources*; (b) Zona 2: *shallow sources*; (c) Zona 3: *shallow sources*; (d) Zona 3: *intermediate sources*; (e) Zona 4: *shallow sources* berdasarkan kedalaman sumber gempa.

Analisis kurva FMD pada gambar 4.2 diperjelas dengan tabulasi jumlah data serta hasil perhitungan tiga parameter seismik pada keempat zona seismik yang ditampilkan dalam bentuk tabel. *Raw data* mengacu pada jumlah data yang diperoleh langsung dari ISC-GEM, sementara *converted data* merupakan jumlah data setelah melalui proses homogenisasi magnitudo. Adapun *filtered data* menunjukkan jumlah data yang tersisa setelah diterapkan filter Uhrhammer (1986).

Tabel 1. Distribusi data gempa pada Zona 1 (wilayah utara Turki bagian barat).

No	Type Data	Zona Seismik 1	
		<i>Shallow sources</i>	<i>Intermediate sources</i>
1.	<i>Raw data</i>	75972	6
2.	<i>Converted data</i>	75855	6
3.	<i>Filtered data</i>	60937	6

Tabel 2. Nilai parameter seismik Zona 1 (wilayah utara Turki bagian barat).

No.	Kedalaman Sumber Gempa	Parameter Seismik		
		M_c	<i>b</i> -value	<i>a</i> -value
1.	<i>Shallow sources</i>	1,5	0,66	5,61
2.	<i>Intermediate sources</i>	-	-	-

Tabel 3. Distribusi data gempa pada Zona 2 (wilayah utara Turki bagian timur).

No.	Type Data	Zona Seismik 2	
		<i>Shallow sources</i>	<i>Intermediate sources</i>
1.	<i>Raw data</i>	41963	24
2.	<i>Converted data</i>	41953	24
3.	<i>Filtered data</i>	36107	24

Tabel 4. Nilai parameter seismik Zona 2 (wilayah utara Turki bagian timur).

No.	Kedalaman Sumber Gempa	Parameter Seismik		
		M_c	<i>b</i> -value	<i>a</i> -value
1.	<i>Shallow sources</i>	1,5	0,58	5,27
2.	<i>Intermediate sources</i>	-	-	-

Tabel 5. Distribusi data gempa pada Zona 3 (wilayah selatan Turki bagian barat).

No.	Type Data	Parameter Seismik	
		<i>Shallow sources</i>	<i>Intermediate sources</i>
1.	<i>Raw data</i>	196976	2056
2.	<i>Converted data</i>	194754	1984
3.	<i>Filtered data</i>	126415	1974

Tabel 6. Nilai parameter seismik Zona 3 (wilayah selatan Turki bagian barat).

No.	Kedalaman Sumber Gempa	Parameter Seismik		
		M_c	b -value	a -value
1.	<i>Shallow sources</i>	1,7	0,69	6,03
2.	<i>Intermediate sources</i>	2,3	0,41	4,10

Tabel 7. Nilai parameter seismik Zona 4 (wilayah selatan Turki bagian timur).

No.	Type Data	Parameter Seismik	
		<i>Shallow sources</i>	<i>Intermediate sources</i>
1.	<i>Raw data</i>	131948	61
2.	<i>Converted data</i>	131931	61
3.	<i>Filtered data</i>	66640	61

Tabel 8. Nilai parameter seismik Zona 4 (wilayah selatan Turki bagian timur).

No.	Kedalaman Sumber Gempa	Parameter Seismik		
		M_c	b -value	a -value
1.	<i>Shallow sources</i>	1,7	0,70	5,80
2.	<i>Intermediate sources</i>	-	-	-

Tabel 1–8 menunjukkan hasil data untuk setiap zona di wilayah Turki, di mana nilai M_c di wilayah Turki pada kedalaman dangkal (*shallow sources*) bervariasi antar zona. Zona 1 (wilayah utara Turki bagian barat) dan Zona 2 (wilayah utara Turki bagian timur) memiliki nilai M_c sebesar 1,5, sedangkan Zona 3 (wilayah Selatan Turki bagian barat) dan Zona 4 (wilayah selatan Turki bagian timur) menunjukkan nilai M_c sebesar 1,7. Perbedaan ini mencerminkan variasi kepadatan jaringan seismik, kondisi geologis, dan tingkat kebisingan latar (*background noise*) yang memengaruhi sensitivitas deteksi gempa kecil. Sementara itu, di kedalaman menengah (*intermediate sources*), nilai M_c pada Zona 3 meningkat signifikan menjadi 2,3. Kenaikan ini dapat disebabkan oleh berkurangnya sensitivitas deteksi terhadap gempa di kedalaman lebih besar, yang umumnya menghasilkan amplitudo gelombang permukaan lebih kecil dan sinyal yang lebih lemah ketika mencapai permukaan, sehingga hanya gempa dengan magnitudo lebih besar yang terdeteksi secara konsisten.

Pada Zona 1 yang mencakup wilayah utara Turki bagian barat, nilai b untuk sumber gempa dangkal (*shallow sources*) sekitar 0,6 menunjukkan bahwa wilayah ini masih didominasi oleh gempa kecil hingga menengah, tetapi dengan potensi gempa besar yang signifikan (Öztürk, S. and Gerdan, S. 2020; Ding *et.al.*, 2023). Pada gambar Zona 2 untuk sumber gempa dangkal (*shallow sources*) mencakup wilayah utara Turki bagian timur memperoleh nilai b -value sekitar 0,5 yang mengindikasikan dominasi gempa besar yang lebih signifikan dibandingkan dengan wilayah utara Turki bagian barat, sedangkan pada Zona 3 dan Zona 4 yang merepresentasikan wilayah selatan Turki memperoleh nilai b -value sekitar 0,69–0,70 mengindikasikan bahwa wilayah ini sering mengalami gempa kecil hingga menengah. Secara keseluruhan, Nilai b -value untuk zona 2 dengan kedalaman dangkal menunjukkan kecenderungan yang paling rendah di antara semua zona.

Pada Zona 3 untuk sumber gempa kedalaman menengah (*intermediate sources*), diperoleh nilai b sekitar 0,4 yang mengindikasikan bahwa di zona ini gempa besar lebih dominan dan menunjukkan potensi seismik yang signifikan di zona tersebut. Zona ini menjadi satu-satunya wilayah dengan kedalaman menengah yang memenuhi syarat analisis FMD karena memiliki jumlah data gempa lebih dari 200 kejadian (Woessner dan Wiemer, 2005). Sementara itu, zona lainnya tidak memenuhi untuk dianalisis lebih lanjut karena jumlah data

gempa terlalu sedikit, bahkan tidak mencapai 100 kejadian gempa, sehingga tidak cukup representatif untuk penentuan karakteristik statistik gempa secara baik.

Fenomena ini menjelaskan kondisi tektonik wilayah Turki, sebagian besar didominasi oleh aktivitas tektonik dangkal yang berkaitan dengan sistem Patahan Anatolia Utara (NAF) dan Patahan Anatolia Timur (EAF) (Bikçe and Çelik, 2016; Géli et al., 2018; Zilio and Ampuero, 2023). Struktur litosfer di wilayah ini cenderung tipis dan didominasi oleh gaya tektonik horizontal, sehingga proses subduksi yang menghasilkan gempa menengah tidak berkembang secara luas di sebagian wilayah Turki (Öztürk, S. 2018; Meghraoui et al., 2021). Hanya wilayah selatan Turki bagian barat yang berdekatan dengan Zona Subduksi Hellenic Arc di Laut Aegea, sehingga terdapat interaksi antar lempeng yang memungkinkan terjadinya gempa pada kedalaman menengah (Polat, O. et al., 2008; Bayrak, Y. and Bayrak, E. 2012; Öztürk, S. 2015; Öztürk, 2020). Zona ini dipengaruhi oleh pergerakan Lempeng Afrika ke bawah Lempeng Eurasia, sehingga aktivitas seismik pada kedalaman menengah lebih sering terjadi dan tercatat lebih banyak. Hal ini menjelaskan mengapa hanya Zona 3 ini yang memiliki data gempa menengah dalam jumlah yang cukup untuk analisis statistik lebih lanjut.

Nilai parameter b yang lebih kecil dari nilai normal ($b \approx 1$) menunjukkan bahwa wilayah tersebut terdapat kecenderungan terjadi lebih banyak gempa dengan magnitudo besar dibandingkan dengan daerah yang memiliki nilai b normal (Godano et al., 2014; Hiemer et al., 2014). Nilai b sekitar 1 berlaku untuk wilayah yang sangat luas, di mana distribusi gempa mengikuti rata-rata global. Namun, Ketika nilai b lebih rendah, hal ini dapat mengindikasikan adanya kondisi khusus, seperti peningkatan tegangan tektonik atau karakteristik geologi yang menyebabkan proporsi gempa besar lebih tinggi dibandingkan gempa kecil. Namun, perubahan nilai b dapat disebabkan oleh banyak faktor seperti jumlah kejadian gempa kecil dan gempa besar, kompleksitas geologi, dan tingkat heterogenitas pada media yang retak, serta kondisi regangan (*strain*) dan tegangan (*stress*) di wilayah tersebut (Öztürk, S. 2015; Öztürk, S. 2018; Meghraoui et al., 2021; Convertito, V et al., 2024).

Grafik hubungan antara frekuensi kejadian gempa dan magnitudo ini menunjukkan bahwa di wilayah Turki, gempa kecil terjadi jauh lebih sering dibandingkan dengan gempa besar. Hal ini menyebabkan kurva distribusi magnitudo tampak curam, karena frekuensi cepat menurun seiring meningkatnya magnitudo (Pailoplee and Choowong 2014; Öztürk, S. 2018; Geffers, et.al. 2022). Sebaliknya, di wilayah yang jarang mengalami gempa kecil tetapi kadang mengalami gempa besar, kemungkinan kurva distribusinya tidak securam itu. Gambar 3 menunjukkan bahwa hubungan antara frekuensi kejadian gempa dengan magnitudo gempa, di mana semakin kecil magnitudo maka frekuensi kejadian gempa akan semakin besar, begitupun sebaliknya. Berdasarkan analisis nilai a -value atau level seismisitas, wilayah Turki menunjukkan variasi dalam frekuensi kejadian gempa. Wilayah selatan Turki bagian barat memiliki nilai a tertinggi sebesar 6,03 yang mengindikasikan tingkat aktivitas seismik yang lebih tinggi dibandingkan wilayah lainnya. Disusul oleh wilayah selatan Turki bagian timur dengan nilai 5,80 dan wilayah utara Turki bagian barat sebesar 5,61. Sementara itu, wilayah utara Turki bagian timur memiliki nilai a terendah, yaitu 5,27 yang menunjukkan frekuensi gempa relatif lebih rendah dibandingkan wilayah lain. Variasi nilai a -value tersebut mencerminkan perbedaan karakteristik tektonik di masing-masing wilayah (Han et al., 2015; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Wilayah selatan Turki baik barat maupun timur yang menunjukkan nilai a tinggi umumnya berada di zona tumbukan antara Lempeng Anatolia, Afrika, dan Arab yang menghasilkan deformasi kerak intensif dan aktivitas seismik yang lebih sering (Bektaş et al., 2007; Yolsal-Çevikbilen et al., 2012; Bikçe and Çelik 2016; Öztürk, 2020). Sebaliknya, wilayah utara Turki yang memiliki nilai a lebih rendah kemungkinan dipengaruhi oleh sistem sesar yang lebih stabil (Yolsal-Çevikbilen et al., 2012; Güvercin et al., 2022; Mai et al., 2023).

Wilayah selatan Turki menunjukkan nilai a -value yang tinggi, mencerminkan frekuensi gempa kecil yang lebih besar. Sementara itu, gempa-gempa besar disepanjang North Anatolian Fault (NAF) cenderung mengikuti pola propagasi dari timur ke barat, yang menunjukkan adanya transfer tegangan antarsegmen patahan, di mana pelepasan energi di timur mendorong akumulasi tegangan di barat (Bohnhoff, et al. 2016; Meghraoui. 2021). Dengan demikian, meskipun wilayah barat lebih aktif secara mikro-seismik, potensi gempa besar di sana tetap signifikan akibat proses akumulasi tegangan tersebut (Bayrak. Y., et al 2008; Bayrak. Y and Bayrak. E 2012; Bayrak. E., 2017; Bohnhoff, et al. 2016; Meghraoui. 2021). Sejak tahun 1939, serangkaian gempa

besar telah terjadi berurutan menuju arah barat, dan kini segmen NAF di sekitar Istanbul menjadi salah satu zona yang paling diwaspadai akan terjadinya gempa besar di masa depan (Bayrak. 2011; Geli, *et.al.* 2018). Hal ini menunjukkan bahwa tingginya seismisitas mikro tidak serta-merta mengurangi kemungkinan terjadinya gempa besar, terutama di wilayah dengan akumulasi tegangan jangka panjang.

Hasil penelitian ini menunjukkan variasi a -value dan b -value di Turki yang mencerminkan perbedaan tingkat seismisitas dan kondisi stres tektonik antarwilayah. Temuan ini memiliki kesesuaian dengan beberapa studi di wilayah tektonik aktif lain di dunia yang memiliki karakteristik geologi serupa. Studi terbaru di Sarıgöl-Buldan, Anatolia Barat, mengidentifikasi variasi spasial b -value ($\approx 0,20$ – $2,00$) yang berkorelasi dengan anomali gravitasi *Bouguer*. Korelasi tersebut menunjukkan bahwa area dengan b -value rendah (lebih banyak gempa besar) cenderung berada di wilayah anomali gravitasi positif, yang mengindikasikan batuan lebih padat dan kaku sehingga mudah menyimpan tegangan, sedangkan b -value tinggi (lebih banyak gempa kecil) cenderung berada di area anomali gravitasi negatif dengan batuan kurang padat (Koçbulut and Kutoğlu, 2022). Meskipun penelitian ini tidak menganalisis data gravitasi, hal ini mengindikasikan potensi hubungan serupa di wilayah Turki secara umum, khususnya pada zona dengan b -value rendah seperti Zona 2. Penelitian pada zona Patahan Anatolia Timur (EAF) pascagempa Kahramanmaraş 2023 juga menunjukkan penurunan b -value pra-seismik hingga 0,45 dan kenaikan pasca-gempa hingga 1,18, menandakan respons pelepasan tegangan yang signifikan (Akkar *et al.*, 2024).

Di luar Turki, wilayah Aegea-Yunani yang berada di zona subduksi Hellenic memiliki distribusi magnitudo yang mengikuti hukum Gutenberg–Richter dengan variasi b -value yang dipengaruhi oleh tingkat regangan regional, mirip dengan kondisi di Anatolia Barat (Chouliaras *et al.*, 2004). Sistem Sesar San Andreas di California juga memperlihatkan kontras b -value antar segmen yang terkait erat dengan tingkat *coupling* dan segmentasi patahan, menyerupai perilaku NAF dan EAF di Turki (Schorlemmer *et al.*, 2005; Tormann *et al.*, 2014). Di Jepang, variasi temporal b -value telah diidentifikasi sebagai indikator perubahan stres menjelang gempa besar, seperti yang terjadi sebelum gempa Tohoku 2011 (Nanjo *et al.*, 2012). Selain itu, zona tumbukan di Iran (Zagros) menunjukkan mekanisme sumber dan kluster seismisitas yang relevan sebagai pembanding untuk interpretasi segmentasi di Anatolia Timur (Talebian and Jackson, 2004).

Perbandingan ini menunjukkan bahwa meskipun setiap wilayah memiliki konfigurasi tektonik yang unik, pola umum hubungan antara variasi b -value, distribusi magnitudo, dan kondisi tegangan bawah permukaan dapat digunakan untuk meningkatkan pemahaman terhadap proses akumulasi dan pelepasan energi seismik. Implikasinya secara ilmiah, pola ini memperkuat validitas parameter b -value sebagai indikator potensial untuk mengidentifikasi segmen patahan dengan stres tinggi dan kemungkinan terjadinya gempa besar, sehingga layak dipertimbangkan dalam kajian hazard seismik lintas wilayah tektonik.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Penelitian ini menganalisis karakteristik seismisitas dan stress tektonik wilayah Turki berdasarkan data gempa tahun 1924–2024 menggunakan pendekatan kurva FMD (*Frequency-Magnitude Distribution*) yang diolah melalui ZMAP7.0. Analisis ini dilakukan terhadap empat zona seismik dengan mempertimbangkan parameter statistik gempa, yaitu nilai a -value dan b -value. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai a -value yang merepresentasikan tingkat seismisitas, di mana wilayah Selatan Turki yaitu, Zona 3 (*shallow sources*) dan zona 4 mengindikasikan bahwa aktivitas gempa yang lebih sering terjadi, meskipun umumnya bermagnitudo kecil hingga menengah. Sebaliknya, nilai a -value lebih rendah di wilayah utara Turki yakni, Zona 1 dan Zona 2 yang menunjukkan frekuensi gempa yang lebih jarang.

Sementara itu, nilai b -value yang menggambarkan kondisi stress tektonik bawah permukaan menunjukkan hasil yang berlawanan. Di mana wilayah utara Turki dengan kedalaman dangkal (*shallow sources*), nilai b -value cenderung lebih rendah $b \approx 0,58$ – $0,66$ yang mengindikasikan tingkat stress tektonik tinggi dan potensi terjadinya gempa dengan magnitudo besar, khususnya di sepanjang Patahan Anatolia Utara. Sebaliknya, nilai b -value yang lebih tinggi di wilayah selatan menunjukkan dominasi gempa kecil dan

kondisi stress tektonik yang lebih rendah. Untuk zona dengan kedalaman menengah (*intermediate sources*), analisis hanya dapat dilakukan pada Zona 3 karena keterbatasan data dan hasilnya menunjukkan nilai *b*-value yang lebih rendah dari zona-zona dangkal yang menandakan adanya potensi gempa dengan magnitudo besar pada kedalaman menengah akibat aktivitas tektonik dalam. Secara keseluruhan, pendekatan kurva FMD melalui ZMAP7.0 dapat mengidentifikasi perbedaan karakteristik seismotektonik antarzona di wilayah Turki, baik secara spasial maupun kedalaman. Temuan ini memberikan gambaran geodinamika regional yang penting untuk mendukung mitigasi risiko bencana seismik di wilayah Turki. Implikasi praktis dari temuan ini adalah bahwa zona dengan *b*-value rendah, seperti Zona 2 di Turki, sebaiknya menjadi prioritas pemantauan seismik jangka panjang dan perencanaan mitigasi bencana. Penerapan strategi serupa di wilayah tektonik lain yang memiliki pola *b*-value rendah telah terbukti efektif untuk meminimalkan risiko gempa besar, sehingga pendekatan ini berpotensi diadaptasi oleh pemerintah Turki.

B. Saran

Dengan demikian, penelitian ini telah memberikan Gambaran umum mengenai karakteristik seismisitas dan stress tektonik bawah Turki melalui pendekatan statistik gempa menggunakan kurva FMD dan perangkat lunak ZMAP7.0. Temuan ini diharapkan dapat menjadi referensi awal dalam kajian seismotektonik regional dan mendukung upaya mitigasi risiko gempa di wilayah Turki. Meskipun terdapat keterbatasan, terutama dalam ketersediaan data pada kedalaman menengah (*intermediate sources*), hasil penelitian ini membuka peluang untuk pengembangan studi lanjutan yang lebih terintegrasi dengan pendekatan multidisipliner guna memahami dinamika tektonik secara lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Aki, K. 1965. Maximum likelihood estimated of *b* in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. *Bulletin of Earthquake Research*, Vol. 43, pp. 237–239.
- Akcar, S., et al. 2024. Temporal variations of *b*-value before and after the 2023 Kahramanmaraş earthquakes along the East Anatolian Fault. *Acta Geophysica*.
- Amaro-Mellado, J.L. and Bui, D.T. 2020. GIS-based mapping of seismic parameters for the Pyrenees. *International Journal of Geo-Information*, Vol. 9, Issue 7.
- Amaro-Mellado, J.L., Morales-Esteban, A., Asencio-Cortés, G. and Martínez Álvarez, F. 2017. Comparing seismic parameters for different source zone models in the Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, Vol. 717, pp. 449–472.
- Bayrak, Y., Öztürk, S., Koravos, G. Ch., Leventakis, G. A. and Tsapanos, T. M. 2008. Seismicity assessment for the different regions in and around Turkey based on instrumental data: Gumbel first asymptotic distribution and Gutenberg-Richter cumulative frequency law. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 8, No. 2, pp. 109–122.
- Bayrak, Y., Çınar, H. and Bayrak, E. 2011. The North Anatolian Fault Zone: An evaluation of earthquake hazard parameters. In E. Bozkurt (Ed.), *New Frontiers in Tectonic Research - At the Midst of Plate Convergence*, pp. 269–287.
- Bayrak, Y. and Bayrak, E. 2012. Regional variations and correlations of Gutenberg-Richter parameters and fractal dimension for the different seismogenic zones in Western Anatolia. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 58, pp. 98–107.
- Bayrak, E., Yılmaz, S. and Bayrak, Y. 2017. Temporal and spatial variations of Gutenberg-Richter parameter and fractal dimension in Western Anatolia, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 138, pp. 1–11.
- Bektaş, O. Eyüboğlu, Y. and Maden, N. 2007. Different modes of stress transfer in a strike-slip fault zone: an example from the North Anatolian Fault System in Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, Vol. 16, pp. 1–12.
- Bikçe, M. and Çelik, T.B. 2016. Failure analysis of newly constructed RC buildings designed according to 2007 Turkish seismic code during the October 23, 2011 Van earthquake. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 64, pp. 67–84.
- Bohnhoff, M., Martínez-Garzón, P., Bulut, F., Stierle, E. and Ben-Zion, Y. 2016. Maximum earthquake magnitudes along different sections of the North Anatolian fault zone. *Tectonophysics*, Vol. 674, pp. 147–165.

- Cetin, H., Güneşli, H. And Mayer, L. 2003. Paleoseismology of the Palu-Lake hazard segment of the East Anatolian Fault Zone, Turkey. *Tectonophysics*, Vol. 374, Issue 3-4, pp. 163-197.
- Chouliaras, G., Stavrakakis, G. and Drakatos, G. 2004. Temporal and spatial variations of seismicity in the Aegean area. *Tectonophysics*, Vol. 383, Issue 3-4, pp. 145-154.
- Convertito, V., Tramelli, A. and Godano, C. 2024. b map evaluation and on-fault stress state for the Antakya 2023 earthquakes. *Scientific Reports*, Vol. 14, No. 1596.
- Ding, Y., Xu, Y. and Ding, S. 2023. A stochastic earthquake ground motion database and its application in seismic analysis of an RC frame-shear wall structure. *Buildings*, Vol. 13, No. 7, pp. 1637.
- Hiemer S, Woessner J, Basili R, Wiemer S, Finger M and Danciu L. 2014. A smoothed stochastic earthquake rate model considering seismicity and fault moment release for Europe. *Geophysical Journal International*. Vol. 198, No. 2, pp. 1159-74
- Işık, E., Harirchian, E., Büyüksaraç, A. and Ekinçi, Y.L. 2021. Seismic and structural analyses of the eastern Anatolian region (Turkey) using different probabilities of exceedance. *Applied System Innovation*, Vol. 4, No. 89.
- Geffers, G.-M., Main, I. G. dan Naylor, M. (2022). Biases in estimating b-values from small earthquake catalogues: how high are high b-values? *Geophysical Journal International*, Vol. 229, No. 3, pp. 1840-1855.
- Géli, L., Henry, P., Grall, C., Tary, J.-B., Lomax, A., Batsi, E., Riboulot, V., Cros, E., Gürbüz, C., Işık, S. E., Sengör, A. M. C., Le Pichon, X., Ruffine, L., Dupré, S., Thomas, Y., Kalafat, D., Bayrakci, G., Coutellier, Q., Regnier, T., Westbrook, G., Saritas, H., Çifçi, G., Çağatay, M. N., Özeren, M.S., Görür, N., Tryon, M., Bohnhoff, D., Marinaro, G., Frugoni, F., Monna, S., Etiope, G., Favali, P. and Bécél, A. 2018. Gas and seismicity within the Istanbul seismic gap. *Scientific Reports*, Vol. 8, No. 6819.
- Güvercin, S.E., Karabulut, H., Konca, Ö.A., Doğan, U. and Ergintav, S. 2022. Active seismo-tectonics of the East Anatolian Fault. *Geophysical Journal International*, Vol. 230, pp. 50-69.
- Godano, C., Lippiello, E. and de Arcangelis, L. 2014. Variability of the b value in the Gutenberg-Richter distribution. *Geophysical Journal International*, Vol. 199, No. 3, pp. 1765-1773.
- Han, Q., Wang, L., Xu, J., Carpinteri, A. and Lacidogna, G. 2015. A robust method to estimate the b-value of the magnitude-frequency distribution of earthquakes. *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 81, Part A, pp. 103-110.
- Kaduri, M., Gratier, J.-P., Renard, F., Çakir, Z. and Lasserre, C. 2017. The implications of fault zone transformation on aseismic creep: Example of the North Anatolian Fault, Turkey. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 122, pp. 4208-4236.
- Koçbulut, F. and Kutoğlu, H. Ş. 2022. Spatial variation of the b-value and its relationship with Bouguer gravity anomalies: Sarıgöl-Buldan graben, western Anatolia, Turkey. *Journal of Mountain Science*, Vol. 19, pp. 2925-2938.
- Kolat, C., Ulusay, R. and Suzen, M.L. 2012. Development of geotechnical microzonation model for Yenisehir (Bursa, Turkey) located at a seismically active region. *Engineering Geology*, Vol. 127, pp. 36-53.
- Konca, O., Leprince, S., Avouac, J.-P. and Helmberger, D.V. 2010. Rupture Process of the 1999 Mw 7.1 Düzce earthquake from joint analysis of SPOT, GPS, InSAR, strong-motion, and teleseismic data: a supershear rupture with variable rupture velocity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 100, No. 1, pp. 267-288.
- Maden, N. and Öztürk, S. 2015. Seismic b-values, Bouguer gravity and heat flow data beneath Eastern Anatolia, Turkey: Tectonic implications. *Surveys in Geophysics*, Vol. 36, No. 6, pp 785-818.
- 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.
- 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., Avsar, U., Klinger, Y. and Jonsson, 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.
- Meghraoui, M., Toussaint, R. and Aksoy, M. E. 2021. The slip deficit on the North Anatolian Fault (Turkey) in the Marmara Sea: Insights from paleoseismicity, seismicity and geodetic data. *Mediterranean Geoscience Reviews*, Vol. 3, pp 45-56.
- 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.

- Mignan, A. 2012. Functional shape of the earthquake frequency-magnitude distribution and completeness magnitude. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, Issue B8.
- Mignan, A. and Woessner, J. 2012. Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs. *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*, doi: 10.5078/corssa-00180805.
- Nanjo, K. Z., Hirata, N., Obara, K., and Kasahara, K. 2012. Decade-scale decrease in b value prior to the M9-class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes. *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, No. 20.
- Nava, F.A., Ávila-Barrientos, L., Márquez-Ramírez, V. H., Torres, I. and Zúñiga, F.R. 2017. Sampling uncertainties and source b likelihood for the Gutenberg-Richter b value from the Aki-Utsu method. *Journal of Seismology*, Vol. 22, pp. 315–324.
- 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.
- Öztürk, S. 2015. A study on the correlations between seismotectonic b-value and Dc-value, and seismic quiescence Z-value in the Western Anatolian region of Turkey. *Austrian Journal of Earth Sciences*, Vol. 108, No. 2, pp. 172–184.
- Öztürk, S. 2018. Earthquake hazard potential in the Eastern Anatolian Region of Turkey: Seismotectonic b and Dc-values and precursory quiescence Z-value. *Frontiers of Earth Science*, Vol. 12, No. 1, pp. 215–236.
- Öztürk, S. 2020. A study on the variations of recent seismicity in and around the Central Anatolian region of Turkey. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 301, No. 106453.
- Öztürk, S. and Gerdan, S. 2020. A general overview on the region-time behaviors of the recent earthquake activity in the Marmara region of Turkey. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, Vol. 38. No.3, pp. 1623–1641.
- Pailoplee, S. and Choowong, M. 2014. Earthquake frequency-magnitude distribution and fractal dimension in mainland Southeast Asia. *Earth, Planets and Space*, Vol. 66, No. 8.
- Polat, O., Gök, E. and Yılmaz, D. 2008. Earthquake hazard of the Aegean extension region (West Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, Vol. 17, No. 3, pp. 593–614.
- Reyes, C. and Wiemer, S. 2019. ZMAP7, a refreshed software package to analyze seismicity. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 21, EGU2019-13153.
- Rigo, A., Souriau, A. and Sylvander, M. 2018. Spatial variations of b-value and crustal stress in the Pyrenees. *Journal of Seismology*, Vol. 22, pp. 337–352.
- Scholz, C.H. 2015. On the stress dependence of the earthquake b value. *Geophysical Research Letter*, Vol. 42, pp. 1399–1402.
- Schorlemmer, D., Wiemer, S. and Wyss, M. 2005. Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes. *Nature*, Vol. 437, No. 7058, pp. 539–542.
- Talebian, M. and Jackson, J. 2004. A reappraisal of earthquake focal mechanisms in Iran, 1978–2001. *Geophysical Journal International*, Vol. 156, No. 3, pp. 506–526.
- Tarakçı, M., Harmanşah, C., Saç, M.M., A. and İçhedef, M. 2014. Investigation of the relationships between seismic activities and radon level in western Turkey. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 83, pp. 12–17.
- Tormann, T., Enescu, B., Woessner, J. and Wiemer, S. 2014. Randomness of megathrust earthquakes implied by rapid stress recovery after the Japan earthquake. *Nature Geoscience*, Vol. 7, No. 10, pp. 665–669.
- Tormann, T., Wiemer, S. and Mignan, A. 2014. Systematic survey of high-resolution b value imaging along Californian faults: inference on asperities. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 119, pp. 2029–2054.
- Touma, R., Le Ber, A., Campillo, M. and Aubry, A. 2023. Imaging the crustal and upper mantle structure of the North Anatolian Fault: A transmission matrix framework for local adaptive focusing. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 128, No. 11.
- Utsu, T. 1966. A statistical significance test of the difference in b-value between two earthquake groups. *Journal of Physics of The Earth*, Vol. 14, No. 2, pp. 37–40.
- Warren, L.M., Baluyut, E.C., Osburg, T., Lisac, K. and Kokkinen S. 2015. Fault plane orientations of intermediate-depth and deep-focus earthquakes in the Japan-Kuril-Kamchatka subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 120, Issue 12, pp. 8366–8382.
- Woessner, J. and Wiemer, S. 2005. Assessing the quality of earthquake catalogues: estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 2, pp. 684–698.
- Yeken, T. 2016. Spatial analysis of b-value variability in Armutlu Peninsula (NW Turkey). *Open Geoscience*, Vol. 8, pp. 548–555.

- Yolsal-Çevikbilen, S., Biryol, C.B., Beck, S., Zandt, G., Adıyaman, H.E. and Özacar, A.A. 2012. 3-D crustal structure along the North Anatolian Fault Zone in north-central Anatolia revealed by local earthquake tomography. *Geophysical Journal International*. Vol. 188, pp. 819–849.
- Yönlü, Ö., Altunel, E. and Karabacak, V. 2017. Geological and geomorphological evidence for the southwestern extension of the East Anatolian Fault Zone, Turkey. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 469, pp. 1–14.
- 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.
- Zilio, L.D. and Ampuero, J.-P. 2023. Earthquake doublet in Turkey and Syria. *Communications Earth & Environment*, Vol. 4, No. 71.