

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş merkezli depremler sonrasında Muş ili ve çevresinin deprem tehlikesine yönelik bir değerlendirme¹

An assessment of earthquake hazard of Muş province and its surrounding after the 6 february 2023 Kahramanmaraş-centered earthquakes²

İskender Dölek^{a*}, Rezzan Ekinci^b, Hamdi Alkan^c, Aydın Büyüksaraç^d, Yunus Levent Ekinci^e

^a Muş Alparslan Üniversitesi, Türkçe ve Sosyal Bilimler Eğitimi Bölümü, Muş, Türkiye.

^b Muş Alparslan Üniversitesi, Acil Durum ve Afet Yönetimi Programı, Muş, Türkiye.

^c Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye.

^d Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Maden Teknolojisi Programı, Çanakkale, Türkiye.

^e Bitlis Eren Üniversitesi, Sanat Tarihi Bölümü, Bitlis, Türkiye.

ORCID: İ.D. 0000-0002-5922-8515; R.E. 0000-0002-5367-8857; H.A. 0000-0003-3912-7503; A.B. 0000-0002-4279-4158; Y.L.E. 0000-0003-4966-1208

BİLGİ / INFO

Geliş/Received: 14.06.2023

Kabul/Accepted: 20.07.2023

Anahtar Kelimeler:

Doğu Türkiye
Muş
Coulomb gerilme
değişimi
Depremsellik

Keywords:

Eastern Turkey
Muş
Coulomb stress change
Seismicity

*Sorumlu yazar/Corresponding author:

(İ. Dölek) isdolek@gmail.com

DOI: 10.17211/tcd.1314609



Atf/Citation:

Dölek, İ., Ekinci, R., Alkan, H., Büyüksaraç, A., & Ekinci, Y.L. (2023). 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş merkezli depremler sonrasında Muş ili ve çevresinin deprem tehlikesine yönelik bir değerlendirme. *Türk Coğrafya Dergisi*, (83), 59-71.

<https://doi.org/10.17211/tcd.1314609>

ÖZ / ABSTRACT

Türkiye'nin doğusunda bulunan Muş havzası birçok aktif fay ve fay zonuna sahiptir. Ayrıca bölge tarihsel ve aletsel dönemde yıkıcı etkiye sahip orta ve büyük birçok depreme maruz kalmıştır. Bu çalışmada, Muş havzasında 2010-2023 yılları arasında meydana gelen ve büyüklükleri $M_w \geq 4.0$ olan depremler kullanılarak bölgenin tektonik gerilme durumu Coulomb gerilme analizi ile incelenmiştir. Derinlik ile birlikte statik gerilme değişimlerini modellemek için farklı derinlik seviyeleri için Coulomb gerilme değişimi haritaları oluşturulmuştur. Özellikle, Muş havzasının kuzey batısında bulunan Karlıova üçlü birleşimi civarında bulunan Kuzey Anadolu Fay Zonu ile ilişkili Kargapazarı ve Elmalı segmentleri ile Varto Fay Zonu boyunca sığ derinliklerde pozitif Coulomb gerilme değerleri göze çarpmaktadır. Bunun aksine, Muş şehir merkezinin doğusunda bulunan Bulanık Fayı, Haçlıgölü Fayı ve Malazgirt Fayı civarında ise gerilme değişiminin daha durağan olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak, Muş şehir merkezinin özellikle kuzey doğusunda sığ derinliklerde sismik aktivite ihtimali diğer bölgelere göre daha yüksektir.

The Muş basin, located in eastern Turkey, has many active faults and fault zones. Also, the region has been exposed to many medium and large earthquakes with devastating effects in the historical and instrumental periods. In this study, the tectonic structure of the region was investigated by Coulomb stress analysis using earthquakes with magnitudes of $M_w \geq 4.0$ that occurred in the Muş basin between 2010-2023. Also, we produced the Coulomb stress change maps for different depth levels. The positive Coulomb stress changes were observed at shallow depths along the Kargapazarı and Elmalı segments associated with the North Anatolian Fault Zone and along with the Varto Fault Zone located around the Karlıova triple junction. On the contrary, the stable Coulomb stress changes were observed in and around the Bulanık Fault, Haçlıgölü Fault, and Malazgirt Fault, located in the east of Muş City. As a result, the probability of seismic activity is higher at shallow depths, especially in the northeast of Muş City center, compared to other regions.

¹ Bu çalışma Muş Alparslan Üniversitesi BAP birimi tarafından BAP-23-EMF-4904-01 kodlu proje ile desteklenmiştir.

² This study is supported by the Muş Alparslan University BAP (Scientific Research Projects) with the project code BAP-23-EMF-4904-01.

Extended Abstract

Introduction

Türkiye is located in the Alpine-Himalayan Earthquake Zone, which is one of the most tectonically active regions in the world. Thus, various devastating earthquakes have occurred in many parts of the country so far and other major earthquakes are expected to occur. Eastern Anatolia is a region with intense seismic activity in both historical and instrumental periods. The general tectonism in the region is under the influence of the right-lateral strike-slip North Anatolian Fault Zone and the left-lateral East Anatolian Fault Zone, which converge at the Karlıova Triple Junction (KTJ) as a result of the collision of the Arabian plate and the Anatolian plate. In addition, the generally NW-SE oriented right lateral and NE-SW oriented left lateral faults, which developed due to this collision and are located to the east of the Karlıova Triple Junction, are important units of the complex tectonic structure in the region.

Muş basin, which extends to the Bitlis mountains in the south, has an approximately east-west direction. This basin is separated from the Hınıs basin by the Bingöl volcano and the Hamurpet elevation in the north, and from the Ahlat-Adilcevaz-Van lake basins by the Nemrut volcano in the east. Some important tectonic structures in Muş basin and its surroundings are the North Anatolian Fault Zone (NAFZ), East Anatolian Fault Zone (EAFZ), Palandöken Fault, Akdoğan Lake Fault, Varto Fault Zone (VFZ), Bulanık Fault (BUF), Haçlıgölü Fault (HGF), Malazgirt Fault (MF), Nemrut Fault, Lake Nazik Fault, Muş Fault Zone (MFZ) and Kavakbaşı Fault Zone. These active faults and fault zones cause high seismicity in the region. A major earthquake that will occur in these faults and fault zones is likely to seriously affect the Muş Province.

Studies about the recurrence intervals of the earthquakes, expected magnitudes of the earthquakes, possible surface rupture lengths and type of fault behaviors can reveal the earthquake risks in a region having high seismic activity, and can also determine the degree of precautions to be taken. In this context, it is of great importance to investigate Muş Province, which is under the influence of faults that have the potential to produce large earthquakes in its surroundings. Additionally, the scarcity of such studies covering Muş Province in the literature is an important factor in conducting this study.

Data and Method

Coulomb stress change is an important parameter in terms of earthquake interactions and seismic hazard assessment. It is known that major earthquakes can trigger different earthquakes over short distances by static or dynamic stress transport. For an earthquake to trigger another earthquake, a stress increase of at least 0.5 bar is sufficient in a region. The Coulomb stress change method is based on calculating the stress changes on the receiving fault or faults using the planar parameters and earthquake parameters of a fault that has produced an earthquake. Generally, different fault types such as strike-slip, dip-slip, or oblique-slip are considered as recipient faults. However, in regions with complex tectonism and many faults and fault groups, the planar parameters of the recipient faults cannot be determined exactly. Thus, the recipient fault or faults are determined according to optimally located models.

In this study, Coulomb stress change maps of Muş province and its surroundings were produced for different depths (5.0, 10.0, 15.0, 20.0 km) and interpretations were made about the seismic risk of the region. To calculate static stress changes, focal mechanism parameters of 32 earthquakes with magnitude $M_w \geq 4.5$ that occurred in the region between 2010 and 2023 were used.

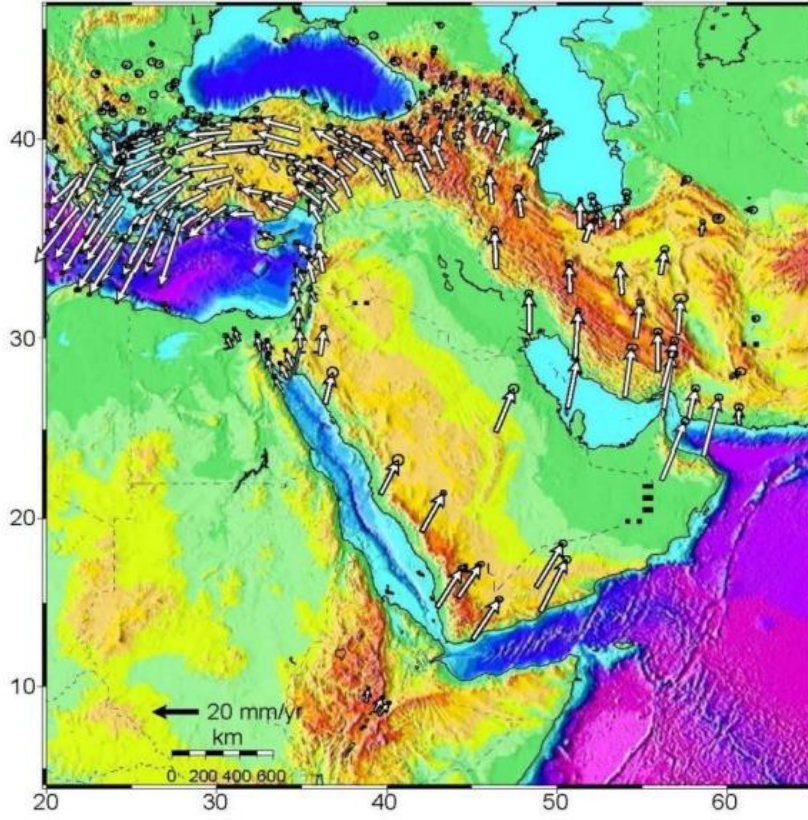
Results and Discussions

While selecting depth ranges, hypocenter depths of previous earthquakes in the region were taken into account. Positive and negative values of Coulomb stress changes represent high and low-stress regions, respectively. There are positive and negative stress changes in the northwest of Muş province. Relatively, stress changes are more stable within the borders of Muş province. In the north-east of the region, there is the VFZ with a right-lateral strike-slip fault mechanism, the Kargapazarı segment (KPS) and Elmalı segment (ELS) of the NAFZ, and the Karlıova and Ilica segments of the EAFZ. Especially around KTJ, 4 positive and 4 negative stress lobes can be observed in the 5-15 km depth range. The directions of the positive stress lobes are NW-SE and NE-SW, while the directions of the negative stress lobes are approximately N-S and E-W. It can be observed that the stress values are quite high (~ 0.1 bar), especially at shallow depths (~ 10 km) around the KTJ. In this case, it is quite reasonable to expect seismic activity along the KPS, ELS and VFZ, especially at shallow depths. Additionally, there are positive stress values around the MF, BUF and HGF in the region, especially at 15-20 km depth levels. It is clear that the area around the MFZ has a relatively more stable structure. According to the modeling results based on Coulomb stress change analysis, the earthquakes that will originate from the complex main tectonic structures, especially around the north-west of Muş province have the potential to affect the region seriously.

1. Giriş

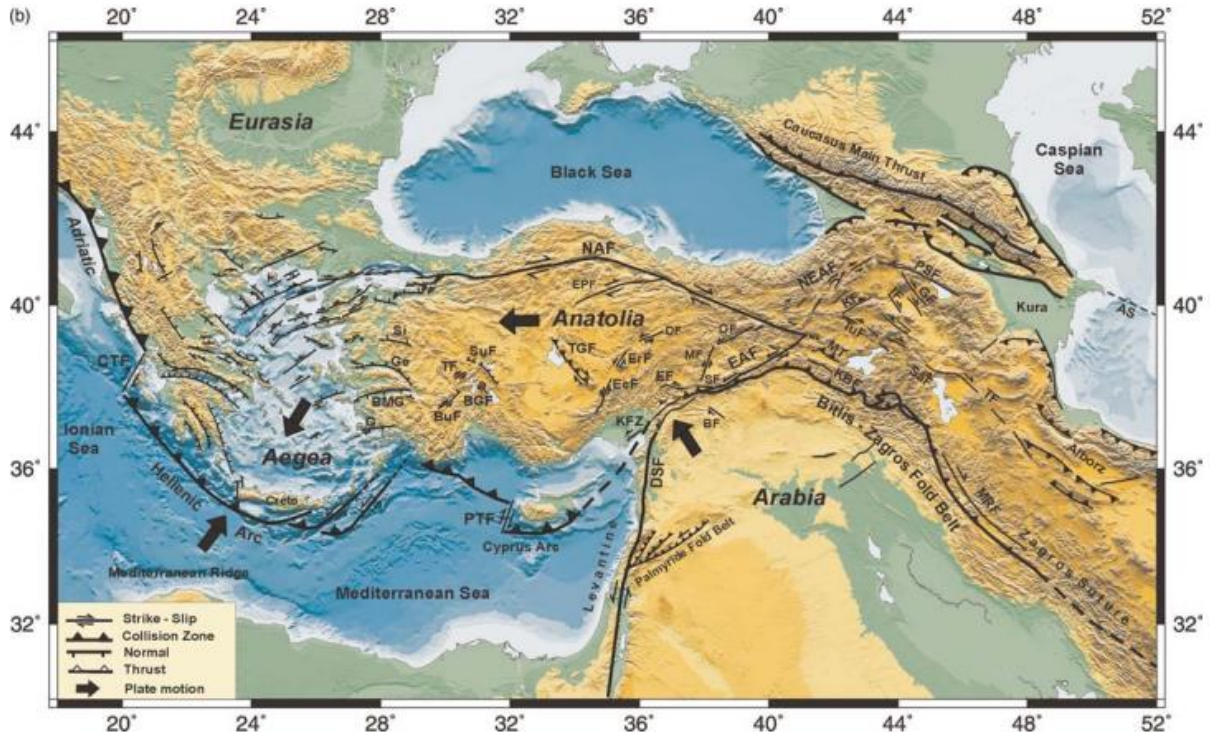
Alp-Himalaya Orojenik Kuşağında bulunan Anadolu levhası, Avrasya levhasının güney yönlü (~ 5 mm/yıl), Arap levhasının kuzey yönlü (~ 15 mm/yıl) ve Afrika levhasının kuzey yönlü (~ 5 mm/yıl) hareketleri nedeniyle batıya doğru hareket etmekte (~ 24 mm/yıl) ve aynı zamanda saat yönünün tersine rotasyonel hareket göstermektedir (Şengör & Yılmaz, 1981; Bozkurt, 2001; Reilinger vd., 2006; Emre vd., 2018; Alkan vd., 2021) (Şekil 1). Dolayısıyla, yaklaşık olarak 12 milyon yıl önce başlayan ve halen devam eden bu çarpışma neticesinde, bu levhaların çarpışma kuşakları boyunca bölgede farklı oryantasyondaki aktif faylar, sıkışma ve açılma tektoniği, yoğun volkanizma, kabuksal kısılma/kalınlaşma gelişmiştir (Koçyiğit vd., 2001; Şengör vd., 2008; Alkan, 2022). Bu deformasyon karakteri doğrultu atımlı olan fay mekanizmalarının gelişmesine sebep olmuştur (Işık vd., 2020; 2021a, b).

Anadolu levhası ve civarındaki en önemli tektonik yapılar, sağ yönlü doğrultu atımlı mekanizmaya sahip Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), sol yönlü doğrultu atımlı mekanizmaya sahip Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) ve Ölü Deniz Fay Zonu (ÖDFZ), Batı Anadolu Graben Sistemi (BAGS), Karlıova Üçlü Birleşimi (KUB) ve Bitlis-Zagros Büklüm Kuşağı (BZBK) olarak gösterilebilir (Keskin, 2003; Şengör vd., 2003; Reilinger vd., 2006) (Şekil 2).



Şekil 1. Orta Doğu ve Avrasya'nın içinde bulunduğu tektonik süreçlerin ve özellikle Anadolu'nun rotasyonel hareketinin GPS verileriyle gösterimi (Reilinger vd., 2006'dan uyarlanmıştır).

Figure 1. Representation of the tectonic processes, particularly the rotational movement of Anatolia, using GPS data in the context of the Middle East and Eurasia (adapted from Reilinger et al., 2006).



Şekil 2. Anadolu'nun tektonik özellikleri. WAEP: Batı Anadolu genişleme bölgesi, NAF: Kuzey Anadolu fayı, EAF: Doğu Anadolu Fayı, DSF: Ölü Deniz Fayı, BZFB: Bitlis-Zagros büküm kuşağı (Taymaz vd. 2007).

Figure 2. Tectonic features of Anatolia. WAEP: Western Anatolian Extensional Province, NAF: North Anatolian Fault, EAF: East Anatolian Fault, DSF: Dead Sea Fault, BZFB: Bitlis-Zagros Fold Belt (Taymaz et al. 2007).

2. Jeolojik ve Tektonik Özellikler

Çalışma alanına çok yakın olan Avrasya-Anadolu ve Arap-Anadolu levhalarını birbirinden ayıran KAFZ ve DAFZ'nun kesişmesi, esas olarak Arap ve Afrika levhalarının Avrasya ve Anadolu levhalarına çarpmasından kaynaklanmaktadır (Şengör vd., 1985, 2005). Kavşağın doğusunda kalan alan, doğrultu atımlı faylanmanın hakim olduğu neotektonik rejim ve ilgili yapılarla karakterizedir (Dhont & Chorowicz, 2006; Koçyigit vd., 2001; Özkaymak vd., 2011). Doğu Türkiye'nin tektonik durumunu etkileyen bir diğer önemli yapısal özellik, sol yanal ÖDFZ olup doğuda Arap levhası ile batıda Afrika levhası arasındaki sınırdır (Freund vd., 1970; McClusky vd., 2000; Quennell, 1958; Walley, 1988) (Şekil 2).

Diğer taraftan, KUB'nin doğusu ve güney doğusunda bu çarpışma tektoniği ile ilişkili olarak KB-GD ve KD-GB doğrultulu sağ ve sol yönlü faylar baskındır. D-B doğrultulu Muş-Van Gölü ve Pasinler rampa havzaları, Doğu Anadolu Bölgesinin önemli tektonik unsurlarıdır (Işık vd., 2017). Muş ili, KUB'nin doğusunda ve BZBK'nin hemen kuzey doğusunda yer almaktadır.

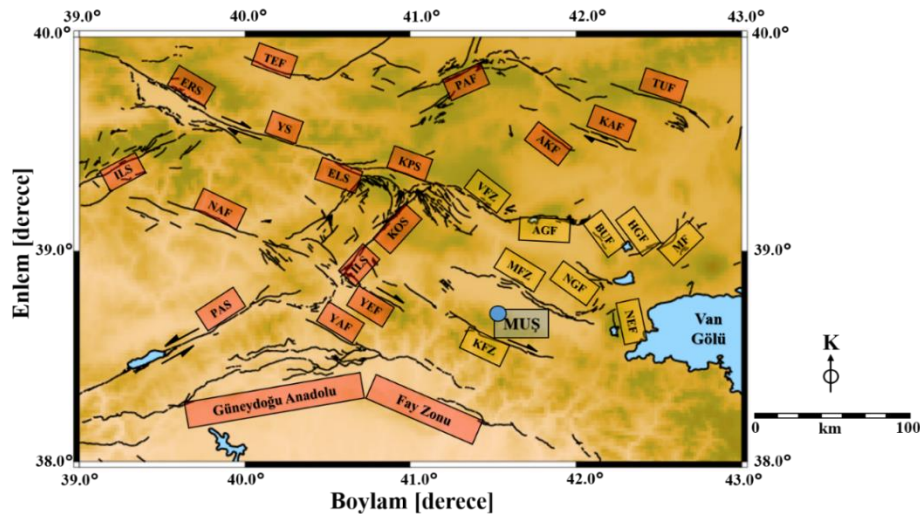
Muş ili ve civarındaki bazı önemli tektonik yapılar; KAFZ, DAFZ, Palandöken Fayı (PAF), Akdoğan Gölü Fayı (AGF), Varto Fay Zonu (VFZ), Bulanık Fayı (BUF), Haçlıgölü Fayı (HGF), Malazgirt Fayı (MF), Nemrut Fayı (NEF), Nazik Gölü Fayı (NGF), Muş Fay Zonu (MFZ) ve Kavakbaşı Fay Zonu (KFZ) olarak verilebilir (Şekil 3).

Bu aktif fay ve fay zonları bölgede önemli derecede sismisiteye sebep olmaktadır. 2010-2023 yılları arasında Muş ili ve civarında aletsel büyüklüğü $M_w \geq 4.0$ olan depremlerin episantr dağılımını Şekil 4'de gösterilmektedir. Toplam 93 adet depremin meydana geldiği bölgede depremler daha çok KUB bölgesindeki Kargapazarı segmenti (KPS), Elmalı segmenti (ELS) ve VFZ civarında kümelenmiştir. Aletsel dönem deprem kataloğu (Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem

Araştırma Enstitüsü, 2023) incelendiğinde, bölgede 1900-2023 yılları arasında aletsel büyüklüğü $M \geq 3.0$ olan ~3900 deprem meydana gelmişken, $M \leq 2.9$ olan ~11.300 deprem meydana gelmiştir (Şekil 5).

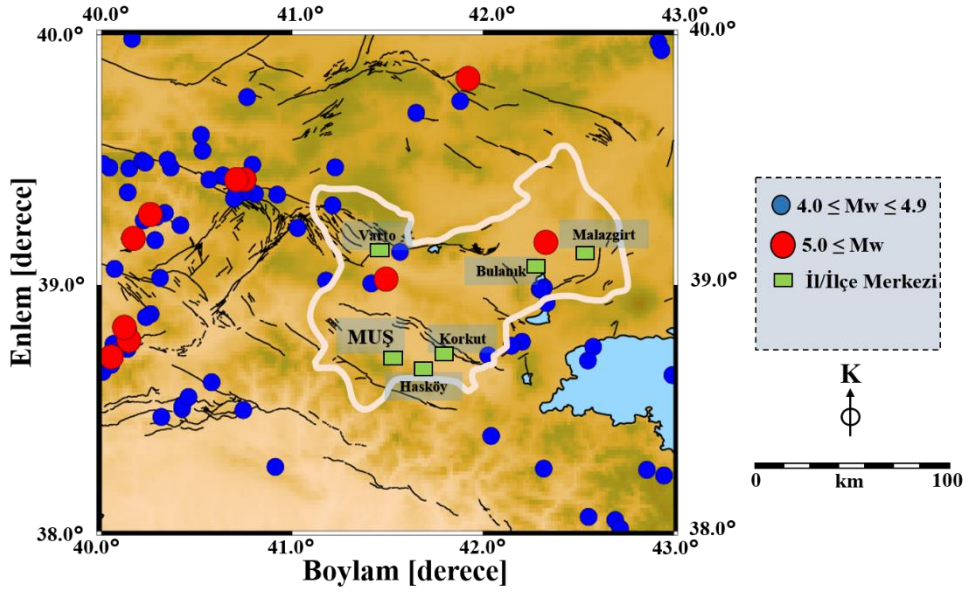
Muş havzası taban kısmında Bitlis Masifini üzerleyen çoğunlukla kırmızımsı alacalı çakıltaşı, çamurtaşı, mikritik kireçtaşı, kumtaşı, killi kireçtaşı ve şeyl araldanmasından oluşan Kızılağaç Formasyonu (Göncüoğlu & Turhan, 1985) bulunmaktadır. Üst Lütésiyen yaşlı birimin alt kısımları karasal, üst kısımları ise denizel ortamdaki çökelimleri temsil etmektedir (Yılmaz & Yılmaz, 2019). Kızılağaç formasyonu, açılmal bir uyumsuzlukla Ahlat formasyonu (Demirtaşlı & Pisoni, 1965) tarafından üzerlenir. Birimin alt kısımlarında kırmızı kumtaşı-çakıltaşı-miltaşı tabakaları bulunurken, üst taraf sarımsı yeşil litolojilerle kırmızı litolojilerin araldanmasıyla oluşur. Ahlat formasyonu Alt-Orta Oligosen yaşlıdır (Uysal, 1986). Birim önce karasal daha sonraları ise denizel ortamda çökelmiştir (Akay vd., 1989). Ahlat formasyonu yukarı doğru, sarımsı yeşil, çakıltaşı mercekli miltaşı-kumtaşından oluşmuş Norkavak formasyonuna (Elnaif, 1969) geçer. Oligosen yaşlı Ahlat formasyonunu üzerleyen ve üst kısımlarında erken Oligosenin en üstünü veren fosil kapsamından dolayı (Akay vd., 1989) birim Alt Oligosen olarak yaşlandırılır.

Birim siğ denizel ortamda çökelmiştir (Akay vd., 1989). Norkavak formasyonu uyumlu bir şekilde Gerisor formasyonuna (Sakinç, 1982) geçmektedir. Kaya ve fosil içeriği siğ denizel bir ortamda çökelim olduğuna işaret etmektedir. Gerisor formasyonu Ebülbahar formasyonu (Özyeğin, 1968) tarafından altlanmıştır. Birim, temelde kumtaşı-kiltası araldanmasıyla oluşur ve üste doğru kumtaşı-kireçtaşı-miltaşı araldanmasına geçiş yapar. Ebülbahar formasyonu tabandaki fosil içeriğine göre Üst Oligosen yaşlıdır (Akay vd., 1989). Sakinç (1982) bu formasyonun alt seviyesi için Orta Oligosen, üst seviyesi için ise Geç Oligosen yaşlarını kullanmıştır.



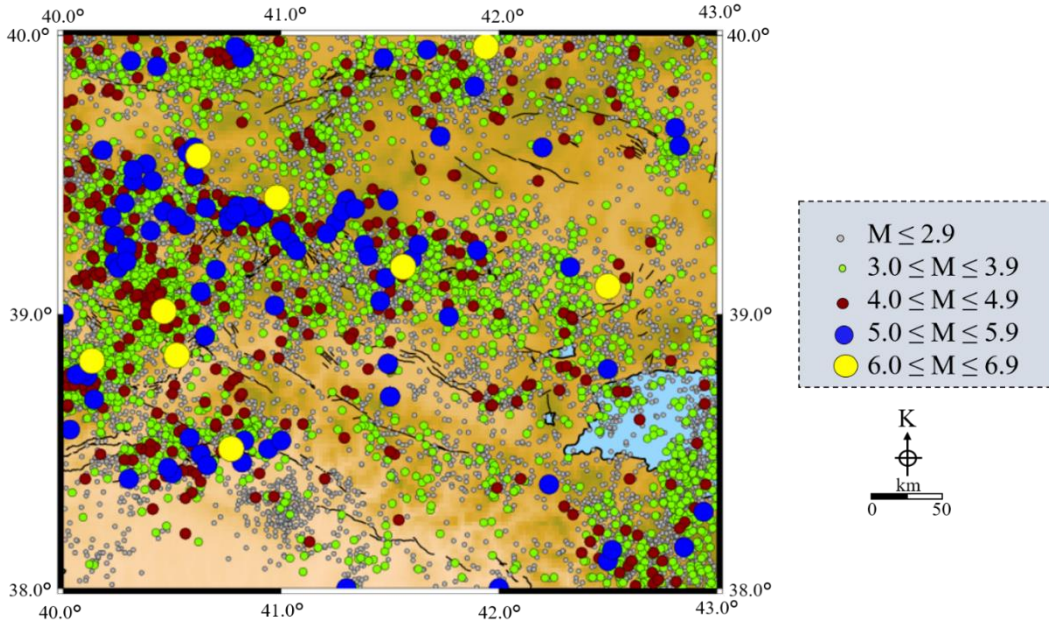
Şekil 3. Muş ili ve civarındaki ana tektonik yapılar (Emre vd., 2018'den değiştirilerek alınmıştır). Kısaltmalar: KPS: Kargapazarı Segmenti, ELS: Elmalı Segmenti, YS: Yedisu Segmenti, ERS: Erzincan Segmenti, KOS: Karlıova Segmenti, ILS: Ilica Segmenti, PAS: Palu Segmenti, NAF: Nazimiye Fayı, TEF: Tercan Fayı, PAF: Palandöken Fayı, TUF: Tutak Fayı, KAF: Kazbel Fayı, AKF: Akdağ Fayı, AGF: Akdoğan Gölü Fayı, VFZ: Varto Fay Zonu, BUF: Bulanık Fayı, HGF: Haçlıgölü Fayı, MF: Malazgirt Fayı, NEF: Nemrut Fayı, NGF: Nazik Gölü Fayı, MFZ: Muş Fay Zonu, KFZ: Kavakbaşı Fay Zonu, YEF: Yenisu Fayı, YAF: Yayla Fayı.

Figure 3. Main tectonic structures in the province of Muş and its vicinity (Modified from Emre et al., 2018). Abbreviations: KPS: Kargapazarı Segment, ELS: Elmalı Segment, YS: Yedisu Segment, ERS: Erzincan Segment, KOS: Karlıova Segment, ILS: Ilica Segment, PAS: Palu Segment, NAF: Nazimiye Fault, TEF: Tercan Fault, PAF: Palandöken Fault, TUF: Tutak Fault, KAF: Kazbel Fault, AKF: Akdağ Fault, AGF: Akdoğan Gölü Fault, VFZ: Varto Fault Zone, BUF: Bulanık Fault, HGF: Haçlıgölü Fault, MF: Malazgirt Fault, NEF: Nemrut Fault, NGF: Nazik Gölü Fault, MFZ: Muş Fault Zone, KFZ: Kavakbaşı Fault Zone, YEF: Yenisu Fault, YAF: Yayla Fault.



Şekil 4. Muş ili ve civarında (38.0°-40.0°K Enlem ve 40.0°-43.0°D Boylam) 01.01.2010-25.02.2023 tarihleri arasında $M_w \geq 4.0$ olan depremlerin episentr lokasyonları (Detaylar için Tablo 1'e bakınız).

Figure 4. Epicenter locations of earthquakes with $M_w \geq 4.0$ in and around the Muş province (latitude 38.0°-40.0°N and longitude 40.0°-43.0°E) between January 1, 2010, and February 25, 2023 (Refer to Table 1 for details).

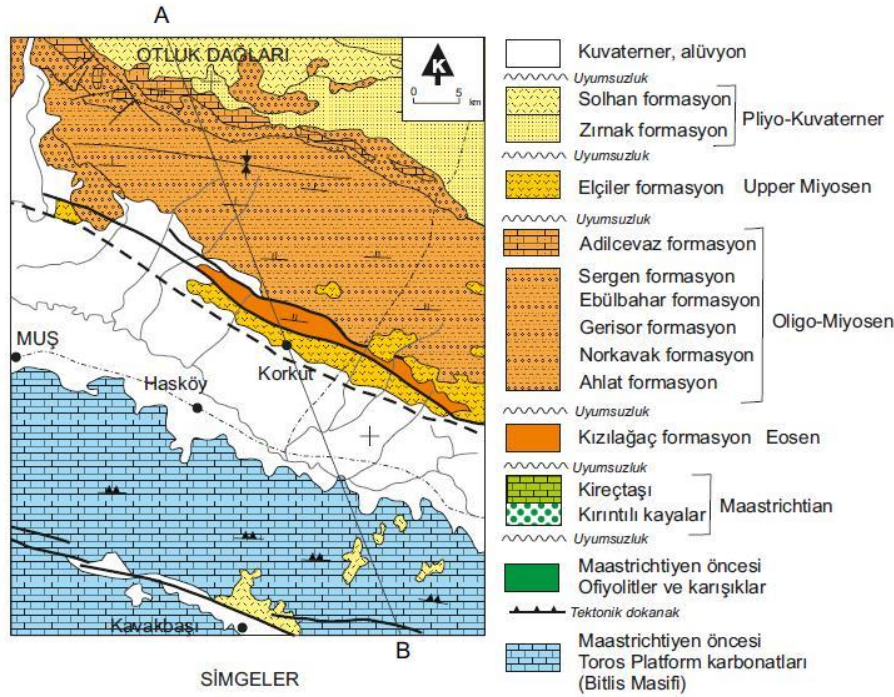


Şekil 5. Muş ili ve civarında (38.0°-40.0°K Enlem ve 40.0°-43.0°D Boylam) 01.01.1900-08.04.2023 tarihleri arasında meydana gelmiş depremlerin episentr lokasyonları (Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, 2023).

Figure 5. Epicenter locations of earthquakes that occurred in and around the province of Muş (latitude 38.0°-40.0°N and longitude 40.0°-43.0°E) between January 1, 1900, and April 8, 2023 (Kandilli Observatory And Earthquake Research Institute, 2023).

Akay vd., (1989) Ebülbahar formasyonunun dalga tabanı altında, derin bir ortamda çökeldiğini belirtmiştir. Ebülbahar formasyonu ile geçişli bir şekilde bulunan Sergen formasyonu (Şaroğlu & Güner, 1981) kilaşı ara katkıları kapsayan riyolitik lav ve tüfitten meydana gelmiştir. Akay vd. (1989)'ne göre Üst Oligosen yaşlı birim de üste doğru, resifal kireçtaşı merclekleri içeren kumtaşı-miltaşı-kireçtaşı ardalanması ile oluşan Adilceviz formasyonu tarafından uyumlu altlanır. Formasyonun tabanı fosil içeriğine göre Geç Oligosen (Akay vd., 1989) veya Akitaniyen (Sakinç, 1982) yaşlıdır. Birimin üst kısmı fosil içeriğine göre Erken Miyosen (Akay vd., 1989) veya Akitaniyen (Sakinç, 1982) yaşlıdır. Bu bulgulardan yola çıkarak Yılmaz & Yılmaz (2019) birimi Alt Miyosen olarak yaşlandırmışlardır.

Adilceviz formasyonu, uyumsuz olarak, açık renkli andezitik lav ve tüfitten meydana gelen Elçiler formasyonu (Akay vd., 1989) tarafından altlanır. Bu birim ise Tekman-Karayazı havzasında bulunan (Yılmaz & Yılmaz, 2019) Pliyosen yaşlı piroklastik ve kömür arakatlı kırıntılılar ve kireçtaşlarından meydana gelen Zırnak formasyonu (İlker, 1967) ile örtülür. Bu veriler ışığında Elçiler formasyonu Orta-Üst Miyosen olarak yaşlandırılmıştır (Yılmaz & Yılmaz, 2019). Elçiler formasyonunu uyumlu şekilde örten Zırnak formasyonu yanal olarak, bazı tortul arakatlıları içeren, bazalt, andezit ve piroklastiklerden oluşmuş Solhan formasyonuna (Yılmaz vd., 1987) geçer (Yılmaz & Yılmaz, 2019). Kuvaterner yaşlı en genç alüvyonal kırıntılı kayalar daha yaşlı birimleri açılal uyumsuzlukla örter (Şekil 6).



Şekil 6. Muş havzasının genelleştirilmiş jeoloji haritası (Yılmaz & Yılmaz, 2019).
Figure 6. Generalized geological map of the Muş Basin (Yılmaz & Yılmaz, 2019).

3. Coulomb Gerilme Değişimleri

Büyük depremler statik veya dinamik stres taşınımı ile kısa mesafelerde farklı depremleri tetikleyebilir (Caskey & Wesnousky, 1997; Nostro vd., 1997; Harris & Simpson, 1998; Gomberg vd., 2001). Bir depremin bir diğerini tetiklemesi için o bölgede minimum 0.5 bar'lık gerilme artışı gerekmektedir (King vd., 1994). Bu yöntemde, deprem üretmiş bir fayın düzlemsel parametreleri ve deprem parametreleri kullanılır ve alıcı fay üzerinde yarattığı gerilme değişimleri hesaplanır. Doğrultu, eğim veya oblik atımlı farklı faylar alıcı fay olarak değerlendirilip hesaplamalar yapılabilirken (Reasenber & Simpson, 1992; King vd., 1994; Stein & Lin, 2006), karmaşık bir tektonik yapıya sahip ve bir çok fay ve fay sistemlerinin olduğu bölgelerde, alıcı fay durumundaki fayların düzlemsel parametrelerinin tam olarak belirlenememesinden dolayı alıcı fay ya da faylar optimal konumlanmış modeller kullanılarak ta belirlenebilir (Toda vd., 1998; Mallman & Zoback, 2007). Bir kaynak fayın veya daykın yer değiştirmesi statik gerilme değişikliklerine neden olur ve elastik yarı uzaydaki yer değiştirme, gerilme değişikliklerini türetmek için elastik sertlik ile çarpılarak 3B gerinim alanını bulmak için kullanılır. Belirtilen alıcı fayları (bir ana şoktan kaynaklanan fay stresi), kaynak fayları tarafından verilen gerilmelerin çözüldüğü belirli bir doğrultu, eğim ve eğime sahip düzlemlerdir. Alıcı fayın eğimi dahil konumuna, geometrisine ve kaymasına bağlı olan kayma gerilmesi değişimi ile alıcı fay eğiminden bağımsız normal gerilme değişiminin gerilme değişimlerini gözlemediği kabul edilir (Toda vd., 2011). Coulomb gerilme değişimi depremin geometrisine ve kaymasına, fayın geometrisine ve kayma hissine ve etkin sürtünme katsayısına bağlıdır (Stein vd., 1994). Bir deprem sırasında faylarda kayma meydana geldiğinde, çevredeki ortam deforme olur ve gerilme alanı değişir (Ansari, 2016). Bu değişikliğin bir ölçüsü, Coulomb arıza kriteri ($\Delta\sigma_{cf}$) kullanılarak hesaplanır. $\Delta\sigma_{cf}$ şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta\sigma_{cf} = \Delta\tau_s + \mu' \Delta\sigma_n' \quad (1)$$

Burada $\Delta\sigma_{cf}$, kaynak faydaki kaymanın neden olduğu alıcı arızası üzerindeki yenilme stresindeki değişikliklerdir, $\Delta\tau_s$ kayma gerilmesindeki değişikliklerdir (fay kayma yönünde pozitif), $\Delta\sigma_n'$ normal gerilimdeki değişimdir (uzamada pozitif) ve μ' fay üzerindeki etkin sürtünme katsayısıdır (Toda vd., 2011). Etkif sürtünme katsayısı boyutsuzdur ve 0 ile 1 arasında değişir. Bu çalışmada, düzgün izotropik elastik özelliklere sahip bir elastik yarı uzayda 0.4 olarak kabul edilir. Kaynak fay geometrisi için boyutsuz Poisson oranı 0.25, Young modülü ise 8×10^5 bar olarak seçilmiştir. Genel olarak -0.1 ile 0.1 (bar) arasındaki Coulomb stres değişiklikleri gelecekteki depremleri tahmin etmek için yeterlidir (Yadav vd., 2012). Coulomb kırılma kriterinin pozitif değerleri stresin arttığını, negatif değerleri ise stresin azaldığını göstermektedir (Bayrak vd., 2013). Bölgedeki gerilme değişimini hesaplamak için Coulomb 3.4 yazılımı kullanılmıştır (Toda vd., 2011). Tablo 1'de Muş ve çevresi meydana gelen depremlerin listesi verilmiştir.

2007 yılından sonra, bölgede meydana gelen depremlerin odak mekanizması çözümleri genellikle doğrultu atımlı fay mekanizmasına sahiptir. Bu depremler genellikle Muş ilinin batısı ve kuzey batısında KUB civarında kümelenmiştir (Şekil 7). Bu depremlerin birbirileri ile olan ilişkisini, birbirlerini tetiklemelerini, kümelenmelerini ve normal/kesme gerilme değişimlerini araştırmak için total gerilme değişimlerinin incelenmesi gerekmektedir. Bunun için önceden oluşmuş depremlerin odak mekanizması çözümleri gereklidir (Tablo 2). Coulomb gerilme değişimi haritaları depremlerin birbiri ile olan etkileşimleri, gelecek depremlerin yorumlanması ve sismik tehlike değerlendirmesi için sıklıkla kullanılmaktadır. Coulomb gerilme kriterinde, bir faydaki yenilme gerilmenin belli bir değeri aştığında meydana gelir ve ardından bir deprem meydana gelir (King vd., 1994; Toda vd., 2011). Diğer taraftan, Coulomb gerilme değişimini hesaplamak için farklı elastik parametrelere de ihtiyaç vardır.

Bu parametreler Young modülü (E) ve Poisson oranıdır (m). Doğrultu atımlı mekanizmaların bulunduğu kıtasal kabuksal depremler için $E = 8 \times 10^5$ ve $m = 0.25$ olarak kullanılır (King vd., 1994). Coulomb gerilme değişiminin pozitif değerleri bir deprem anındaki yırtılma olasılığının artacağını temsil ederken, negatif değerler gerilmenin azalacağına temsil etmektedir (Alkan & Bayrak, 2022). Buna ek olarak, gelecek deprem kestirimi için gerilme değişim aralığı bar cinsinden -0.1 bar ve +0.1 bar arasında seçilmesi yeterli bir kriterdir (Yadav vd., 2012).

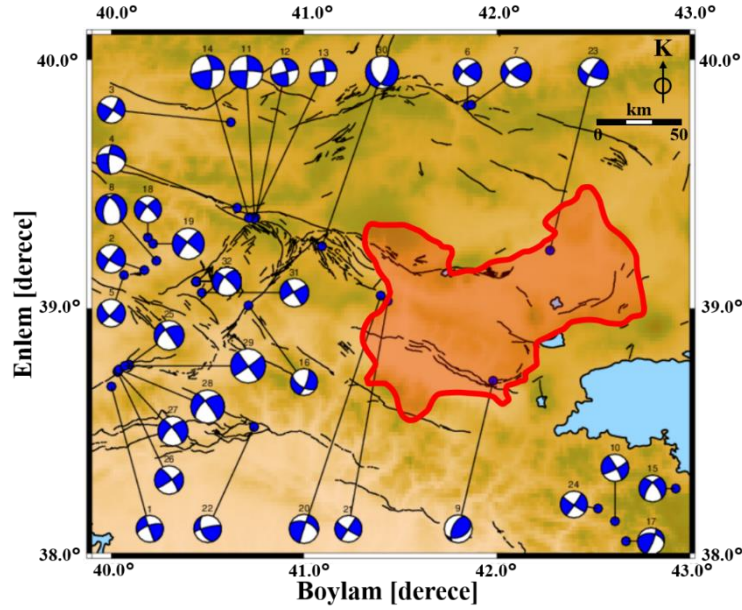
Coulomb gerilme değişimleri, büyük depremler ve bu depremlerle ilişkili faylar ve uzun zaman periyotları için artçı şoklar arasındaki değişimin incelenmesi için sıklıkla kullanılmaktadır. Dolayısıyla Muş ili ve civarı için de aletsel büyüklüğü $M_w \geq 4.5$ 'ten büyük 32 adet depremin (Tablo 2) odak mekanizması çözümlerinden faydalanarak, bölgenin Coulomb gerilme değişimi modellenmiştir ve gelecek deprem tehlikesi için yorumlanmıştır.

Tablo 1. Muş ili ve civarında (38.0° - 40.0° K Enlem ve 40.0° - 43.0° D Boylam) 01.01.2010-25.02.2023 tarihleri arasında $M_w \geq 4.0$ olan depremlerin katalog bilgileri (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2023).

Table 1. Catalog information of earthquakes with $M_w \geq 4.0$ in and around the province of Muş (latitude 38.0° - 40.0° N and longitude 40.0° - 43.0° E) between January 1, 2010, and February 25, 2023 (Disaster and Management Authority, 2023).

No	Tarih (UTC+3)	Enlem (°K)	Boylam (°D)	Büyükük (M_w)	Derinlik (km)	Lokasyon
1	2023-02-25 03:28:10	38.991	41.109	4.2	10.0	Doğu Türkiye
2	2023-02-22 10:09:44	38.465	40.313	4.4	13.7	Hani, Türkiye
3	2023-02-20 04:07:38	38.648	40.005	4.4	11.4	Palu, Türkiye
4	2023-02-17 03:35:58	39.187	40.148	4.6	10.0	Yayladere, Türkiye
5	2023-02-09 04:38:13	38.498	40.422	4.4	8.8	Doğu Türkiye
6	2023-02-09 02:40:01	38.512	40.424	4.2	13.0	<u>Hani, Türkiye</u>
7	2023-02-08 20:57:22	39.753	40.763	4.4	10.0	<u>Aşkale, Türkiye</u>
8	2023-02-06 05:52:14	38.546	40.456	4.2	12.8	<u>Doğu Türkiye</u>
9	2023-02-06 04:47:43	38.606	40.577	4.6	11.3	<u>Genç, Türkiye</u>
10	2022-11-17 02:57:20	38.749	42.578	4.2	10.0	<u>Ahlat, Türkiye</u>
11	2022-11-10 07:57:33	38.694	42.551	4.2	10.0	<u>Doğu Türkiye</u>
12	2022-10-01 08:41:14	39.602	40.521	4.3	3.1	<u>Yedisu, Türkiye</u>
13	2022-09-30 00:49:03	39.539	40.529	4.3	10.0	<u>Yedisu, Türkiye</u>
14	2022-09-16 23:30:36	39.367	40.704	4.8	10.9	<u>Yedisu, Türkiye</u>
15	2022-08-02 03:37:18	39.472	41.225	4.2	2.3	<u>Karlıova, Türkiye</u>
16	2022-05-27 15:49:33	39.483	40.791	4.1	14.6	<u>Yedisu, Türkiye</u>
17	2022-01-31 09:07:00	39.064	40.068	4.6	10.0	<u>Karakoçan, Türkiye</u>
18	2022-01-31 03:49:57	39.193	40.159	4.7	10.0	<u>Yayladere, Türkiye</u>
19	2021-11-22 11:31:25	39.737	41.881	4.7	10.0	<u>Karavazı, Türkiye</u>
20	2021-11-19 15:40:53	39.827	41.922	5.1	6.2	<u>Karavazı, Türkiye</u>
21	2021-07-28 15:27:14	39.289	40.332	4.1	10.0	<u>Yedisu, Türkiye</u>
22	2021-06-25 21:28:37	39.187	40.167	5.4	3.1	<u>Doğu Türkiye</u>
23	2021-05-26 00:37:54	39.985	40.159	4.3	10.0	<u>Otlukbeli, Türkiye</u>
24	2021-02-17 13:02:32	39.471	40.362	4.3	10.0	<u>Yedisu, Türkiye</u>
25	2020-11-08 12:22:56	39.366	40.805	4.0	10.0	<u>Karlıova, Türkiye</u>
26	2020-10-28 12:16:15	39.827	39.827	4.5	10.0	<u>Tercan, Türkiye</u>
27	2020-09-18 03:15:13	38.770	42.205	4.0	10.0	<u>Ahlat, Türkiye</u>
28	2020-09-16 17:48:21	38.715	42.028	4.6	10.0	<u>Güroymak, Türkiye</u>
29	2020-09-07 11:47:49	38.591	38.591	4.2	10.0	<u>Güroymak, Türkiye</u>
30	2020-06-16 15:57:42	39.434	40.649	4.4	10.0	<u>Yedisu, Türkiye</u>
31	2020-06-15 19:52:37	39.440	40.635	4.5	5.7	<u>Yedisu, Türkiye</u>
32	2020-06-15 10:14:36	39.368	40.718	4.2	10.0	<u>Yedisu, Türkiye</u>
33	2020-06-15 09:51:31	39.423	40.748	5.5	10.0	<u>Yedisu, Türkiye</u>
34	2020-06-15 01:40:36	39.406	40.770	4.5	10.0	<u>Yedisu, Türkiye</u>
35	2020-06-14 18:09:18	39.372	40.745	4.5	10.0	<u>Yedisu, Türkiye</u>
36	2020-06-14 17:34:50	39.417	40.751	4.5	10.0	<u>Yedisu, Türkiye</u>
37	2020-06-14 17:24:29	39.423	40.707	5.9	10.0	<u>Yedisu, Türkiye</u>
38	2020-05-22 06:21:13	39.471	40.041	4.1	10.0	<u>Pülümür, Türkiye</u>
39	2020-04-12 09:38:06	39.363	40.921	4.2	10.0	<u>Karlıova, Türkiye</u>
40	2019-12-23 02:58:05	39.468	40.144	4.3	10.0	<u>Doğu Türkiye</u>

41	2019-09-02 18:46:36	39.372	40.137	4.3	10.0	<u>Yayladere, Türkiye</u>
42	2019-08-12 16:34:28	38.262	40.911	4.1	10.0	<u>Hazro, Türkiye</u>
43	2019-01-01 05:09:36	39.423	40.564	4.2	10.0	<u>Yedisu, Türkiye</u>
44	2018-05-24 01:10:44	38.255	42.319	4.0	10.0	<u>Hizan, Türkiye</u>
45	2018-03-07 03:33:54	39.028	40.306	4.3	10.0	<u>Bingöl, Türkiye</u>
46	2017-05-01 19:30:42	38.227	42.950	4.5	10.0	<u>Gevaş, Türkiye</u>
47	2017-02-10 15:27:32	39.773	39.773	4.5	10.0	<u>Eleşkirt, Türkiye</u>
48	2016-10-23 11:22:03	38.388	42.043	4.2	10.0	<u>Bitlis, Türkiye</u>
49	2016-06-21 09:25:22	39.390	40.730	4.1	6.0	<u>Yedisu, Türkiye</u>
50	2016-06-10 21:57:00	39.070	40.856	4.3	10.0	<u>Solhan, Türkiye</u>
51	2016-01-23 09:53:44	38.045	42.694	4.3	10.9	<u>Beğendik, Türkiye</u>
52	2015-12-08 01:27:19	39.200	40.289	4.5	10.0	<u>Yayladere, Türkiye</u>
53	2015-12-04 17:37:40	39.260	40.220	4.4	5.0	<u>Yayladere, Türkiye</u>
54	2015-12-03 02:36:28	39.273	40.286	4.3	10.0	<u>Yayladere, Türkiye</u>
55	2015-12-03 01:27:09	39.283	40.255	5.4	10.0	<u>Yayladere, Türkiye</u>
56	2015-09-07 03:37:37	39.180	40.280	4.5	5.0	<u>Yayladere, Türkiye</u>
57	2015-02-10 00:52:53	39.502	40.345	4.2	10.0	<u>Yedisu, Türkiye</u>
58	2015-02-04 04:48:04	38.010	42.720	4.0	6.0	<u>Beğendik, Türkiye</u>
59	2015-01-21 15:58:03	38.250	42.860	4.5	4.0	<u>Bahçeşaray, Türkiye</u>
60	2014-10-30 16:35:43	38.754	42.150	4.3	5.0	<u>Güroymak, Türkiye</u>
61	2013-10-05 01:50:29	39.970	42.920	4.2	10.0	<u>Kağızman, Türkiye</u>
62	2013-09-18 21:22:40	39.690	41.650	4.4	5.0	<u>Tekman, Türkiye</u>
63	2013-09-17 23:40:51	39.023	41.492	5.0	5.3	<u>Varto, Türkiye</u>
64	2013-09-16 13:31:39	39.006	41.414	4.1	6.5	<u>Varto, Türkiye</u>
65	2013-05-15 10:09:58	39.017	41.177	4.0	5.0	<u>Solhan, Türkiye</u>
66	2012-09-23 12:10:41	38.635	42.994	4.1	5.0	<u>Adilcevaz, Türkiye</u>
67	2012-06-14 22:17:43	38.058	42.554	4.2	2.5	<u>Güleçler, Türkiye</u>
68	2012-04-28 06:17:04	38.493	40.743	4.7	5.0	<u>Lice, Türkiye</u>
69	2012-04-04 17:18:38	39.229	41.028	4.4	10.0	<u>Karlıova, Türkiye</u>
70	2012-03-26 13:35:32	39.171	42.330	5.5	5.0	<u>Bulanık, Türkiye</u>
71	2012-03-25 17:50:29	39.940	42.936	4.0	3.4	<u>Ağrı, Türkiye</u>
72	2011-11-17 04:37:18	39.133	41.565	4.9	3.9	<u>Varto, Türkiye</u>
73	2011-10-23 14:10:47	38.325	42.607	5.0	10.0	<u>Hizan, Türkiye</u>
74	2011-10-08 06:25:19	39.347	40.694	4.0	5.0	<u>Yedisu, Türkiye</u>
75	2011-08-24 18:47:25	39.486	40.005	4.4	5.0	<u>Pülümür, Türkiye</u>
76	2011-03-06 09:58:40	39.240	40.413	4.3	10.0	<u>Yedisu, Türkiye</u>
77	2011-02-22 20:15:52	38.927	42.335	4.5	4.8	<u>Bulanık, Türkiye</u>
78	2011-02-22 11:16:06	38.989	42.320	4.3	5.0	<u>Bulanık, Türkiye</u>
79	2011-02-22 11:11:44	38.983	42.297	4.6	5.0	<u>Bulanık, Türkiye</u>
80	2011-02-22 11:08:14	38.983	42.305	4.4	5.0	<u>Bulanık, Türkiye</u>
81	2010-11-07 07:51:29	39.499	40.212	4.1	5.0	<u>Pülümür, Türkiye</u>
82	2010-09-07 05:48:54	39.491	40.229	4.1	5.0	<u>Yedisu, Türkiye</u>
83	2010-05-22 05:30:33	39.320	41.211	4.1	3.8	<u>Karlıova, Türkiye</u>
84	2010-03-24 16:11:31	38.821	40.138	5.1	4.5	<u>Karakoçan, Türkiye</u>
85	2010-03-09 09:21:23	38.882	40.257	4.0	5.0	<u>Bingöl, Türkiye</u>
86	2010-03-09 08:14:57	38.741	40.136	4.1	5.0	<u>Palu, Türkiye</u>
87	2010-03-08 17:04:54	38.677	40.050	4.9	10.0	<u>Palu, Türkiye</u>
88	2010-03-08 13:12:10	38.776	40.143	5.1	5.0	<u>Palu, Türkiye</u>
89	2010-03-08 12:14:23	38.828	40.119	5.2	5.0	<u>Karakoçan, Türkiye</u>
90	2010-03-08 11:00:46	38.761	40.062	4.9	5.0	<u>Palu, Türkiye</u>
91	2010-03-08 10:11:21	38.736	40.076	4.6	5.1	<u>Palu, Türkiye</u>
92	2010-03-08 09:47:41	38.709	40.051	5.6	10.0	<u>Palu, Türkiye</u>
93	2010-03-08 05:20:24	38.870	40.232	4.4	5.0	<u>Karakoçan, Türkiye</u>



Şekil 7. Muş ili ve civarında (38.0°-40.0°K Enlem ve 40.0°-43.0°D Boylam) 2007-2023 yılları arasında meydana gelmiş ($M_w \geq 4.5$) depremlerin odak mekanizması çözümleri gösterilmiştir (Detaylı bilgi için Tablo 2'ye bakınız). Depremlerin odak mekanizması çözümleri Coulomb stress değişimi haritalarının oluşturulması için kullanılmıştır. Odak parametresi çözümleri AFAD web sitesinden alınmıştır (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2023).

Figure 7. Focal mechanism solutions of earthquakes ($M_w \geq 4.5$) that occurred in and around the province of Muş (latitude 38.0°-40.0°N and longitude 40.0°-43.0°E) between 2007 and 2023 are shown (Refer to Table 2 for detailed information). The focal mechanism solutions of the earthquakes were utilized in the construction of Coulomb stress change maps. (Disaster and Management Authority, 2023).

Tablo 2. Muş ili ve civarında (38.0°-40.0°K Enlem ve 40.0°-43.0°D Boylam) 2007-2023 tarihleri arasında $M_w \geq 4.5$ olan depremlerin katalog bilgileri (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2023).

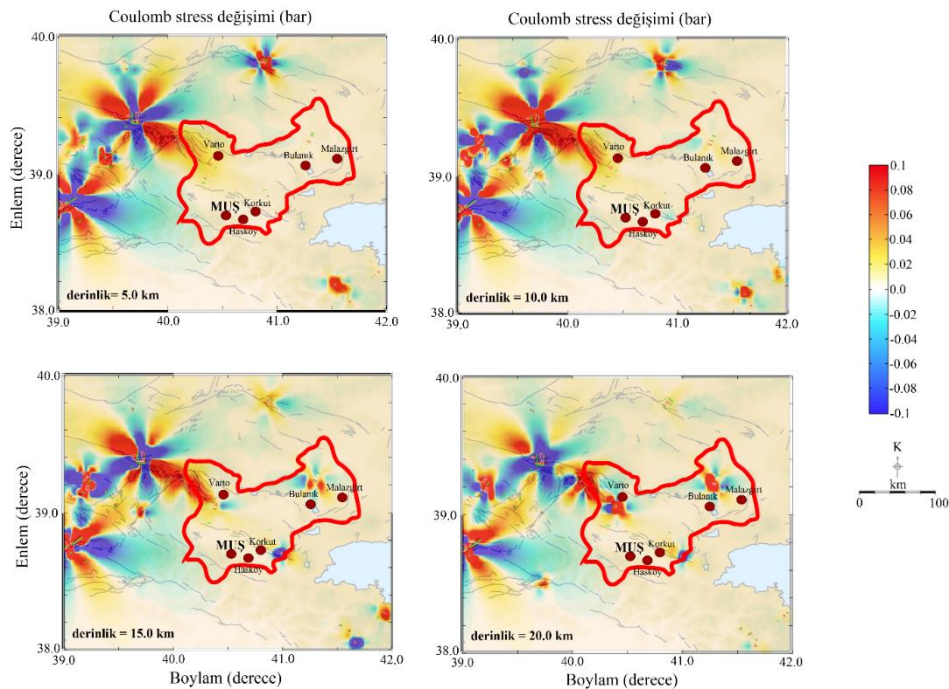
Table 2. Catalog information of earthquakes with $M_w \geq 4.5$ in and around the province of Muş (latitude 38.0°-40.0°N and longitude 40.0°-43.0°E) between 2007 and 2023 (Disaster and Management Authority, 2023).

No	Tarih (UTC+3)	Enlem (°K)	Boylam (°D)	Büyükklük (M_w)	Derinlik (km)	Doğrultu (°)	Eğim (°)	Dalım (°)
1	20-02-2023 03:45:37	38.682	40.001	4.5	7.01	251	69	2
2	17-02-2023 00:35:56	39.154	40.172	4.8	11.58	215	84	11
3	08-02-2023 17:57:20	39.750	40.620	4.6	7.0	32	81	3
4	16-09-2022 20:30:35	39.406	40.653	4.9	15.0	281	61	-163
5	31-01-2022 00:49:55	39.134	40.066	4.7	10.28	135	71	-175
6	22-11-2021 08:31:25	39.816	41.848	4.7	6.9	131	78	158
7	19-11-2021 12:40:52	39.820	41.868	5.1	5.18	130	69	155
8	25-06-2021 18:28:37	39.192	40.234	5.2	15.51	195	49	-58
9	16-09-2020 14:48:19	38.705	41.981	4.7	17.08	64	40	121
10	07-08-2020 19:20:13	38.131	42.613	4.6	6.99	331	83	171
11	15-06-2020 06:51:29	39.367	40.743	5.6	7.01	271	82	174
12	14-06-2020 15:09:16	39.366	40.748	4.7	9.28	257	89	166
13	14-06-2020 14:34:47	39.362	40.739	4.6	7.32	356	78	4
14	14-06-2020 14:24:27	39.365	40.714	5.7	8.0	355	70	9
15	01-05-2017 16:30:40	38.265	42.928	4.5	12.44	319	64	-153
16	10-06-2016 18:57:01	39.011	40.712	4.5	12.81	21	74	-33
17	23-01-2016 07:53:44	38.049	42.670	4.5	15.21	279	42	163

18	07-12-2015 23:27:17	39.286	40.190	4.5	9.75	209	49	-13
19	02-12-2015 23:27:07	39.261	40.217	5.3	10.66	221	72	-19
20	17-09-2013 20:40:50	39.051	41.398	4.9	19.01	289	51	-178
21	16-09-2013 10:31:39	39.029	41.434	4.5	19.46	33	90	-7
22	28-04-2012 03:17:05	38.517	40.741	4.6	22.47	256	80	41
23	26-03-2012 10:35:33	39.234	42.276	5.0	16.96	116	67	168
24	30-04-2011 15:26:03	38.183	42.525	4.5	5.0	125	86	-176
25	24-03-2010 14:11:30	38.771	40.093	5.0	22.57	234	53	-2
26	08-03-2010 15:04:51	38.741	40.033	4.8	15.67	55	83	15
27	08-03-2010 11:12:10	38.745	40.034	5.0	11.75	227	68	-11
28	08-03-2010 07:47:38	38.751	40.041	5.6	15.15	323	82	-150
29	08-03-2010 02:32:30	38.766	40.071	5.8	5.01	54	86	-1
30	25-08-2007 22:05:48	39.251	41.093	5.5	23.88	145	42	-140
31	10-03-2007 01:24:54	39.063	40.470	4.8	5.0	238	85	2
32	08-03-2007 12:35:39	39.108	40.441	4.8	26.4	313	79	-152

Şekil 8, farklı derinlik değerleri (5.0, 10.0, 15.0, 20.0 km) için Coulomb gerilme değişimi sonuçlarını göstermektedir. Coulomb gerilme değişimi sonucu elde edilen pozitif değerler yüksek gerilme bölgelerini ve negatif değerler düşük gerilme bölgelerini temsil etmektedir. Derinlik aralıkları seçilirken, bölgedeki meydana gelmiş önceki depremlerin hiposantr derinlikleri dikkate alınmıştır. Tüm derinlik haritaları incelendiğinde, ilk olarak göze çarpan Muş ilinin kuzey batısında pozitif ve negatif gerilme değişimlerinin olmasıdır. Nispeten, Muş'ın sınırlarında gerilme değişimleri daha durağandır.

Bölgenin kuzey doğusunda sağ yönlü doğrultu atımlı fay mekanizmasına sahip VFZ, KAFZ'nun KPS ve ELS segmentleri ve DAFZ'ye ait KOS ve ILS segmentleri bulunmaktadır. Özellikle KUB civarında 5-15 km derinlik aralığında 4 adet pozitif ve 4 adet negatif gerilme lobu gözlenebilmektedir. Pozitif gerilme loblarının doğrultuları KB-GD ve KD-GB iken, negatif gerilme loblarının doğrultuları yaklaşık olarak K-G ve D-B'dir. Özellikle KUB civarında sığ derinliklerde (~10 km) gerilme değerlerinin oldukça yüksek olduğu (~0.1 bar) gözlenebilir.



Şekil 8. Tablo 2'deki depremlerin odak mekanizması çözümleri kullanılarak Muş ili ve civarı için farklı derinlik değerleri için Coulomb gerilme değişimi haritaları. (a) 5 km, (b) 10 km, (c) 15 km ve (d) 20 km.

Şekil 8. Coulomb stress change maps for different depth values for Muş province and its surroundings, using the focal mechanism solutions of the earthquakes in Table 2. (a) 5 km, (b) 10 km, (c) 15 km, and (d) 20 km.

Bu durumda, KPS, ELS ve VFZ boyunca özellikle sığ derinliklerde sismik aktivite beklemek oldukça mantıklıdır. Aynı zamanda, DAFZ'nin KOS ve ILS segmentleri civarında her derinlik seviyesinde KD-GB ve KB-GD yönlü pozitif gerilmelerin olduğu gözlemlenir. Yine bu durum, diğer bölgelere göre bu bölgenin depremselliğinin yüksek olduğuna işaret etmektedir. Bunlara ek olarak, aletsel dönem deprem aktivitesini gösteren Şekil 5 incelendiğinde, depremlerin genellikle KUB ve VFZ doğrultularında meydana geldiği görülmektedir. Diğer taraftan, Bulanık ve Malazgirt ilçelerinin bulunduğu bölgedeki MF, BUF ve HGF civarında özellikle 15-20 km derinlik seviyelerinde pozitif gerilme değerleri bulunmaktadır. Ayrıca MFZ civarının göreceli olarak daha stabil bir yapıda olduğu söylenebilir. Sonuç olarak, Coulomb gerilme değişimi analizlerine bağlı olarak yapılan modelleme sonucuna göre, Muş ilinin özellikle kuzey batısı civarında bulunan kompleks haldeki ana tektonik yapılardan kaynaklanan ve kaynaklanacak olan depremler Muş ili ve civarı için önemli ölçüde tehlikeye sebep olacaktır.

4. Sonuçlar

Türkiye'nin doğusunda bulunan Muş ili ve civarı, önemli aktif fayların kesişim güzergahındadır ve hem tarihsel hem de aletsel dönemde birçok yıkıcı depreme maruz kalmıştır. Özellikle, Muş havzasının kuzey batısında bulunan KAFZ, KUB ve VFZ ve güney-güney batısında bulunan Güney Anadolu Fay Zonu boyunca yüksek depremsellik göze çarpmaktadır. Bu çalışma kapsamında, Muş ili ve civarının Coulomb gerilme değişimi haritaları oluşturulmuştur. Coulomb gerilme değişimi, deprem etkileşimleri ve sismik tehlike değerlendirmesi açısından oldukça önemli bir parametredir. Statik gerilme değişimlerinin hesaplanabilmesi için, bölgede 2010-2023 yılları arasında meydana gelmiş büyüklüğü $M_w \geq 4.5$ olan 32 adet depremin odak mekanizması parametreleri kullanılmıştır. Farklı derinlik seviyeleri (5.0, 10.0, 15.0, 20.0 km) için oluşturulan Coulomb gerilme değişimi haritalarına göre KAFZ ve VFZ boyunca pozitif gerilme ($\sim +1$ bar) değişimleri gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, bu fay zonları boyunca gelecekte deprem meydana gelme potansiyeli bölgedeki diğer fay ve fay zonlarına göre daha yüksek olduğu söylenebilir. Bunun aksine, Muş'un doğu ilçeleri olan Malazgirt, Korkut ve Bulanık civarında meydana gelen depremlerle de ilişkili olarak negatif (~ -1 bar) yada stabil gerilme değerleri hesaplanmıştır ve bu bölgelerin deprem üretme ihtimallerinin daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Çıkar Çatışması / Conflict of interest : Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder. *The authors declare that there is no conflict of interest.*

Yazar Katkısı/Author Contribution :

Bu çalışmada yazarlar makaleye eşit oranda katkı sunmuşlardır. *In this study, the authors contributed equally to the article.*

Kaynakça

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2023). *Odak Mekanizmaları Çözümü*. T.C. İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. <https://deprem.afad.gov.tr/event-focal-mechanism>

Akay, E., Erkan, E., & Ünay, E. (1989). Stratigraphy of the Muş Tertiary Basin. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 109, 51. <https://dergipark.org.tr/en/pub/bulletinofmre/issue/392>

[8/461435#article_cite](https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104532)

- Alkan, H. (2022). Crustal structure in and around the East Anatolian volcanic belt by using receiver functions stacking. *Journal of African Earth Sciences*, 191, 104532. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104532>
- Alkan, H., Büyüksaraç, A., Bektaş, Ö., & Işık, E. (2021). Coulomb stress change before and after 24.01. 2020 Sivrice (Elazığ) Earthquake (Mw=6.8) on the East Anatolian Fault Zone. *Arabian Journal of Geosciences*, 14 (23), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09080-1>
- Alkan, H., & Bayrak, E. (2022). Coulomb stress changes and magnitude-frequency distribution for Lake Van region. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 168 (168), 141–156. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.990666>
- Ansari, S. (2016). Co-seismic stress transfer and magnitude-frequency distribution due to the 2012 Varzaqan-Ahar earthquake doublets (Mw 6.5 and 6.4), NW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 132, 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.10.006>
- Bayrak, Y., Yadav, R.B.S., Kalafat, D., Tsapanos, T.M., Çınar, H., Singh, A. P., Bayrak, E., Yılmaz, Ş., Öcal, F., & Koravos, G. (2013). Seismogenesis and earthquake triggering during the Van (Turkey) 2011 seismic sequence. *Tectonophysics*, 601, 163–176. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.05.008>
- Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü. (2023). *Kandilli Rasathanesi BDTİM Deprem Sorgulama Sistemi*. Boğaziçi Üniversitesi. <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/>
- Bozkurt, E. (2001). Neotectonics of Türkiye-a synthesis. *Geodinamica Acta*, 14 (1–3), 3–30. <https://doi.org/10.1080/09853111.2001.11432432>
- Caskey, S.J., & Wesnousky, S.G. (1997). Static stress changes and earthquake triggering during the 1954 Fairview Peak and Dixie Valley earthquakes, central Nevada. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87 (3), 521–527. <https://doi.org/10.1785/BSSA0870030521>
- Demirtaşlı, E., & Pisoni, C. (1965). Ahlat-Adilcevaz bölgesinin jeolojisi (Van gölü kuzeyi). *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 64 (64), 22–43. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/bulletinofmre/issue/389/0/51943>
- Dhont, D., & Chorowicz, J. (2006). Review of the neotectonics of the Eastern Turkish–Armenian Plateau by geomorphic analysis of digital elevation model imagery. *International Journal of Earth Sciences*, 95, 34–49. <https://doi.org/10.1007/s00531-005-0020-3>
- Emre, O., Duman, T. Y., Ozalp, S., Saroglu, F., Olgun, S., Elmaci, H., & Can, T. (2018). Active fault database of Türkiye. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, 3229–3275. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2>
- Elnaif, S. (1969). *Muş kuzey sahasının petrol etüdü raporu (1: 25 000 ölçekli Erzurum-J47d4 Muş-K47a. a; K47b3 b4; K47a3; K46a3 b3, b4; K47d2; K48a4 d1 paftaları)* (Rapor No.

- 4296). MTA. https://eticaret.mta.gov.tr/index.php?route=product/product&product_id=4296
- Freund, R., Garfunkel, Z., Zak, I., Goldberg, M., Weissbrod, T., Derin, B., Bender, F., Wellings, F.E., & Girdler, R.W. (1970). The shear along the Dead Sea rift. *Philosophical Transactions for the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 267, 107–130. <https://doi.org/10.1098/rsta.1970.0027>
- Gomberg, J., Reasenberg, P. A., Bodin, P. L., & Harris, R. A. (2001). Earthquake triggering by seismic waves following the Landers and Hector Mine earthquakes. *Nature*, 411 (6836), 462–466. <https://doi.org/10.1038/35078053>
- Göncüoğlu, M.C., & Turhan, N. (1985). *Bitlis Metamorfik kuşağı orta bölümünün temel jeolojisi* (Rapor No. 7707). MTA. https://eticaret.mta.gov.tr/index.php?route=product/product&product_id=18225
- Harris, R.A., & Simpson, R.W. (1998). Suppression of large earthquakes by stress shadows: A comparison of Coulomb and rate-and-state failure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103 (B10), 24439–24451. <https://doi.org/10.1029/98JB00793>
- Işık, E., Bozkurt, N., & Taşkın, V. (2017). Muş ili yapı stoğunun Kanada sismik tarama yöntemi ile incelenmesi ve bölgenin depremselliği. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21 (2), 421–429. <https://doi.org/10.19113/sdufbed.46538>
- Işık, E., Büyüksaraç, A., Ekinci, Y.L., Aydın, M.C., & Harirchian, E. (2020). The effect of site-specific design spectrum on earthquake-building parameters: a case study from the Marmara region. *Applied Sciences*, 10 (20), 7247. <https://doi.org/10.3390/app10207247>
- Işık, E., Harirchian, E., Büyüksaraç, A. & Ekinci, Y.L. (2021a). Seismic and structural analyses of the Eastern Anotolian Region (Turkey) using different probabilities of exceedance. *Applied System Innovation*, 4 (4), 89. <https://doi.org/10.3390/asi4040089>
- Işık, E., Ekinci, Y.L., Sayıl, N., Büyüksaraç, A., & Aydın, M.C. (2021b). Time-dependent model for earthquake occurrence and effects of design spectra on structural performance: a case study from the North Anatolian Fault Zone, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30 (2), 215–234. <https://doi.org/10.3906/yer-2004-20>
- İlker, S., (1967). *Erzurum-Muş bölgesinde Karaköse J-48 a4, d1 paftalarının 1/25.000 ölçekli detay petrol etüdü hakkında rapor* (Rapor No. 4177). MTA. https://eticaret.mta.gov.tr/index.php?route=product/product&product_id=4177
- Keskin, M. (2003). Magma generation by slab steepening and breakoff beneath a subduction–accretion complex: an alternative model for collision-related volcanism in Eastern Anatolia, Türkiye. *Geophysical Research Letters*, 30, 8046. <https://doi.org/10.1029/2003GL018019>
- King, G. C., Stein, R. S., & Lin, J. (1994). Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (3), 935–953. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840030935>
- Koçyiğit, A., Yılmaz, A., Adamia, S., & Kuloshvili, S. (2001). Neotectonics of East Anatolian plateau (Turkey) and lesser Caucasus: implication for transition from thrusting to strike-slip faulting. *Geodinamica Acta*, 14, 177–195. [https://doi.org/10.1016/S0985-3111\(00\)01064-0](https://doi.org/10.1016/S0985-3111(00)01064-0)
- Mallman, E.P., & Zoback, M.D. (2007). Assessing elastic Coulomb stress transfer models using seismicity rates in southern California and southwestern Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112, B03304. <https://doi.org/10.1029/2005JB004076>
- Mcclusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., & Kastens, K. (2000). Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105, 5695–719. <https://doi.org/10.1029/1999JB900351>
- Nostro, C., Cocco, M., & Belardinelli, M.E. (1997). Static stress changes in extensional regimes: an application to southern Apennines (Italy). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87 (1), 234–248. <https://doi.org/10.1785/BSSA0870010234>
- Özyeğin, G. (1968). *Muş Bölgesi I :25 000 ölçekli Erzurum J47-d3, Muş K42-a2 paftalarının detay petrol etüdü hakkında rapor* (Rapor No. 1743). MTA. https://eticaret.mta.gov.tr/index.php?route=product/product&product_id=4129
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Bozkurt, E., Dirik, K., Topal, T., Hüseyin, A., & Çağlan, D. (2011). 23 Ekim 2011 Tabanlı-Van depreminin sismik jeomorfolojisi ve Doğu Anadolu'daki aktif tektonik yapılarla olan ilişkisi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 35 (2), 175–200. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jmd/issue/28179/295907>
- Quennell, A.M. (1958). The structural and geomorphic evolution of the Dead Sea Rift. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 114 (1-4), 1–24. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.114.1.0001>
- Reasenberg, P.A., & Simpson, R.W. (1992). Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake. *Science*, 255 (5052), 1687–1690. <https://doi.org/10.1126/science.255.5052.1687>
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradisis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., & et al. (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111, B05411. <https://doi.org/10.1029/2005JB004051>
- Stein, R.S., King, G.C., & Lin, J. (1994). Stress triggering of the 1994 M=6.7 Northridge, California, earthquake by its predecessors. *Science*, 265 (5177), 1432–1435. <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.265.5177.1432>
- Stein, R.S., & Lin, J. (2006). *Seismic constraints and Coulomb stress changes of a blind thrust fault system, 2: Northridge,*

- California (p. 17). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20061158>
- Sakıncı, M. (1982). Mollababa—Uruman (Mus İli) yöresinin jeolojisi—biostratigrafisi ve paleontolojisi. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, 3, 235–275. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/iuyerbilim/issue/18576/196117>
- Şaroğlu, F., & Güner, Y. (1981). Doğu Anadolu'nun jeomorfolojik gelişimine etki eden öğeler: Jeomorfoloji, tektonik, volkanizma ilişkileri. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 24 (2), 39–50. https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/d863b367aa379f7_ek.pdf
- Şengör, A.M.C., & Yılmaz, Y. (1981). Tethyan evolution of Türkiye: a plate Tectonic approach. *Tectonophysics*, 75, 181–241. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90275-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90275-4)
- Şengör, A.M.C., Görür, N.S., & Şaroğlu, F. (1985) Strike-slip faulting and related basin formation in zones of Tectonic escape: Turkey as a case study. In Biddle KT, Christie-Blick N (Eds.), *Strike-slip deformation, basin formation and sedimentation society of economic paleontologists and mineralogists special publication*. SEPM Society for Sedimentary Geology, Tulsa, 37, 227–264. <https://doi.org/10.2110/pec.85.37.0211>
- Şengör, A.M.C., Özeren, S., Genç, T., & Zor, E. (2003). East Anatolian high plateau as a mantle-supported, north-south shortened domal structure. *Geophysical Research Letters* 30, 4. <https://doi.org/10.1029/2003GL017858>
- Şengör, A.M.C., Tüysüz, O., Imren, C., Sakıncı, M., Eyidoğan, H., Görür, N., Le Pichon, X., & Rangin, C. (2005). The North Anatolian fault: A new look. *Annual Review of Earth and Planet Science*, 33, 37–112. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.32.101802.120415>
- Şengör, A.M.C., Özeren, M.S., Keskin, M., Sakıncı, M., Özbakır, A.D., & Kayan, I. (2008). Eastern Turkish high plateau as a small Turkic-type orogen: Implications for post-collisional crust-forming processes in Turkic-type orogens. *Earth-Science Reviews*, 90 (1-2), 1–48. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.05.002>
- Taymaz, T., Yılmaz, Y., & Dilek, Y. (2007). The geodynamics of the Aegean and Anatolia: introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 291 (1), 1–16. <https://doi.org/10.1144/SP291>
- Toda, S., Stein, R.S., Reasenber, P.A., Dieterich, J.H., & Yoshida, A. (1998). Stress transferred by the 1995 Mw=6.9 Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 103, 24543–24565. <https://doi.org/10.1029/98JB00765>
- Toda, S., Stein, R.S., & Lin, J. (2011). Widespread seismicity excitation throughout central Japan following the 2011 M= 9.0 Tohoku earthquake and its interpretation by Coulomb stress transfer. *Geophysical Research Letters*, 38, L00G03. <https://doi.org/10.1029/2011GL047834>
- Uysal, Ş. (1986). Muş Tersiyer havzasının stratigrafisi ve Üst Lütesiyen'in varlığı. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 105/106, 69–74. https://dergi.mta.gov.tr/dosyalar/images/mtadergi/makaleler/tr/20150626144708_500_2274ada3.pdf
- Walley, C.D. (1988). A braided strike-slip model for the northern continuation of the Dead Sea Fault and its implications for Levantine tectonics. *Tectonophysics*, 145 (1-2), 63–72. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90316-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90316-2)
- Yadav, R.B.S., Gahalaut, V.K., Chopra, S., & Shan, B. (2012). Tectonic implications and seismicity triggering during the 2008 Baluchistan, Pakistan earthquake sequence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 45, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.10.003>
- Yılmaz, Y., Şaroğlu, F., & Güner, Y. (1987). Initiation of the neomagmatism in East Anatolia. *Tectonophysics*, 134 (1-3), 177–199. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(87\)90256-3](https://doi.org/10.1016/0040-1951(87)90256-3)
- Yılmaz, H., & Yılmaz, A. (2019). Structural evolution of the Eastern Anatolian Basins: an example from collisional to postcollisional tectonic processes, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 28, 329–350. <https://doi.org/10.3906/yer-1805-20>