

Kahramanmaraş Deprem dizisinin Erzurum ve çevresinde meydana getirdiği Kosismik Deformasyonlar ve bölgenin Sismik Parametre Analizi

Halil İbrahim Solak ^{1,2}, Cemil Gezgın ³, Ahmet Sami Kılınç ^{4,7}, İbrahim Tiryakioğlu ^{2,*5}, Tamer Baybura ⁵, Kayhan Aladoğan ⁶, Ece Bengünaz Çakanşimşek ⁷

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Uzaktan Eğitim Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye, hisolak@aku.edu.tr

² Afyon Kocatepe Üniversitesi Deprem Uygulama ve Araştırma Merkezi, Afyonkarahisar, Türkiye

³ Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye, cemilgezgın.jfm@gmail.com

⁴ İller Bankası A.Ş., Erzurum Bölge Müdürlüğü, Proje ve Mekansal Planlama Müdürlüğü, Erzurum, Türkiye, akilic@ilbank.gov.tr

⁵ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye, itiryakioğlu@gmail.com, tbaybura@aku.edu.tr,

⁶ Hitit Üniversitesi, Osmancık Ömer Derindere M.Y.O., Çorum, Türkiye, kayhanaladogan@gmail.com

⁷ Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, Türkiye, ece-bengunaz.cakansimsek@usr.aku.edu.tr

Kaynak Göster: Solak, H. İ., Gezgın, C., Kılınç, S., Tiryakioğlu, İ., Baybura, T., Aladoğan, K., Çakanşimşek, E. B., (2025). Kahramanmaraş Deprem dizisinin Erzurum ve çevresinde meydana getirdiği Kosismik Deformasyonlar ve bölgenin Sismik Parametre Analizi. Geomatik, 10(3), 375-392

DOI:10.29128/geomatik.1652700

Anahtar Kelimeler

GNSS
Kosismik Deformasyon
Kahramanmaraş
Depremleri
Kuzeydoğu Anadolu Fay
Zonu (KDFZ)
Tektonik
Sismik parametreler

Araştırma Makalesi

Geliş:06.03.2025
1. Revize:18.04.2025
2. Revize:22.04.2025
Kabul:24.04.2025
Yayınlanma:01.12.2025



Öz

Bu çalışmada, 2023 Kahramanmaraş depremleri (Mw:7.7 Pazarcık ve Mw:7.6 Ekinözü) sonrası Kuzeydoğu Anadolu Fay Zonu üzerinde bulunan Erzurum ve çevresindeki kosismik yer değiştirmelerin hesaplanması amacıyla 22.FENBİL.30 no'lu proje kapsamında kurulan 17 noktalı GNSS ağı kullanılmıştır. Ağda yer alan noktalarda 2022 ve 2023 yıllarında gerçekleştirilen GNSS ölçümlerinden elde edilen koordinatlar, bölgede yer alan TUSAGA-Aktif istasyonları ve TUTGA-99A noktalarının intersismik ve postsismik hızları kullanılarak deprem epöğuna taşınmıştır. Elde edilen sonuçlar Kahramanmaraş depremleri kaynaklı kosismik yer değiştirmelerin Erzurum civarında vektörel olarak 2.5 mm ile 30 mm arasında olduğunu ve bölgede GB yönlü bir atımın meydana geldiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, sol yanal atım karakterine sahip fayların ürettiği bu yıkıcı depremlerin dış merkezleri ve odak mekanizma çözümleri ile literatürde gerçekleştirilen geniş ölçekli çalışmalarla uyum içerisindedir. Ayrıca, Erzurum ve çevresindeki mevcut sismik tehlikeyi değerlendirmek amacıyla 1900-2024 yılları arasında kapsayan KRDAE deprem kataloğu kullanılarak hesaplanan a ve b parametreleri, 3 ayrı alt bölgeye ayrılan alanda bulunan faylarda farklı aktivite ve gerilim birikim düzeyleri olduğunu göstermiştir. Hesaplamalar sonucunda a parametresi, Erzurum'un B-KB'sındaki bölgede yüksek (a=5.29), diğer bölgelerde ise orta seviyede sismik aktiviteyi işaret etmektedir. b parametresi ise Erzurum'un batısında küçük depremlerin daha sık olduğunu (b=0.90), doğusunu kapsayan bölgede büyük depremlerin daha fazla olabileceğini (b=0.69), güneyinde ise daha dengeli bir tehlike profili olduğunu ortaya koymuştur (b=0.76). Elde edilen sonuçlar, bölgenin sismik aktivitesiyle uyumlu olup, bölgedeki heterojen tektonik yapıların büyük deprem potansiyeli taşıdığını göstermektedir. Bu bulgular, bölgedeki gelecekteki deprem tehlike analizleri için önemli bir temel oluşturmaktadır.

Coseismic Deformations from the Kahramanmaraş Earthquake Sequence in Erzurum and Seismic Parameter Analysis

Keywords

GNSS
Coseismic Deformation
Kahramanmaraş
Earthquakes
Northeast Anatolian Fault
Zone (NEAFZ)
Tectonic
Seismic parameters

Research Article

Received: 06.03.2025
1.Revised: 18.04.2025
1.Revised: 22.04.2025
Accepted: 24.04.2025
Published:01.12.2025

Abstract

In this study, a 17-station GNSS network established under project 22.FENBIL.30 was utilized to calculate the coseismic displacements in and around Erzurum, located along the Northeast Anatolian Fault Zone, following the 2023 Kahramanmaraş earthquakes (Mw 7.7 Pazarcık and Mw 7.6 Ekinözü). The coordinates derived from GNSS measurements conducted in 2022 and 2023 were transformed to the earthquake epoch using interseismic and postseismic velocities from regional CORS-TR stations and TNFGN points. The results indicate that coseismic displacements due to the Kahramanmaraş earthquakes in the vicinity of Erzurum range from 2.5 mm to 30 mm, with movement directed toward the southwest. These findings align with the rupture characteristics of the destructive left lateral strike-slip faults responsible for the earthquakes, as well as with the epicentral locations, focal mechanism solutions, and large-scale studies in the literature. Additionally, to assess the current seismic hazard in Erzurum and its surroundings, the *a* and *b* parameters were calculated using the KRDAE earthquake catalog covering the period from 1900 to 2024. The study area was divided into three subregions, revealing varying levels of seismic activity and stress accumulation across different fault segments. The *a* parameter indicates high seismic activity in the northwestern part of Erzurum (*a* = 5.29) and moderate activity in the other regions. The *b* parameter suggests that small earthquakes occur more frequently west of Erzurum (*b* = 0.90), while larger earthquakes are more likely in the eastern section (*b* = 0.69), and a more balanced seismic hazard profile is observed in the southern part (*b* = 0.76). The results are consistent with the seismic activity of the region, demonstrating that the heterogeneous tectonic structures present a significant potential for large earthquakes. These findings provide a crucial foundation for future seismic hazard assessments in the region.

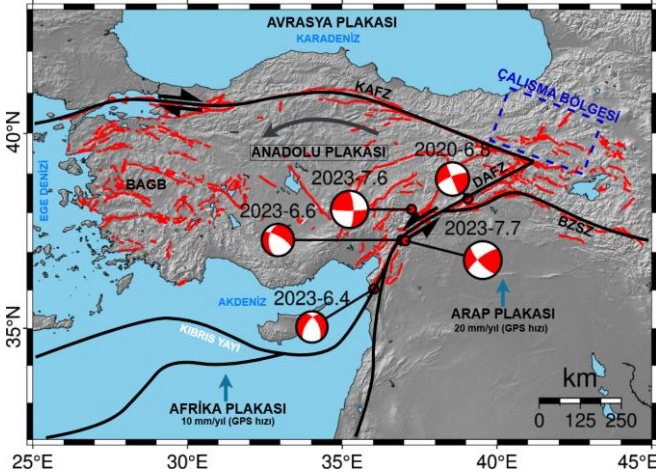
1. Giriş

Türkiye, coğrafi konumu itibarıyla yalnızca kıtalar arasında köprü görevi görmekle kalmaz, aynı zamanda yeryüzündeki ana tektonik plakaların kesişim noktasında yer alır. Bu bölgede, kuzeyde sabit kabul edilen Avrasya Levhası ile güneydeki Afrika ve Arap levhaları arasında sıkışan Anadolu Levhası, levha etkileşimlerinin bir sonucu olarak batı-güneybatı yönünde yılda yaklaşık 25-30 mm'lik rotasyonel bir hareket sergiler. Tektonik kaçış modeli olarak adlandırılan bu dinamik süreç, bölgenin karmaşık yapılı ve hızlı deformasyon geçiren bir jeolojik karaktere sahip olmasına neden olmuştur (Şengör, 1979, 1980; Şengör ve ark., 1985). Küresel Konum Belirleme Uydu Sistemi (GNSS) verileri ışığında yapılan analizler, Avrasya Levhası'nın sabit alındığı durumda Anadolu Levhası'nın hareketinin iki ana baskı unsuru tarafından şekillendiğini ortaya koymaktadır: Afrika Levhası'nın yılda 5 mm hızla kuzeye doğru dalması ve Arap Levhası'nın yılda 19 mm hızla kuzey-kuzeydoğu yönünde uyguladığı sıkıştırma kuvveti, Anadolu Levhası'nın batıya doğru kaymasına ve bölgedeki sismik aktivitenin temel kaynağını oluşturmaya neden olmaktadır (McClusky ve ark., 2000; Reilinger ve ark., 2006; Özener ve ark., 2010; Uzel ve ark., 2013; Özarpacı ve ark., 2024; Tiryakioğlu ve ark., 2024). Gerçekleşen bu basınç ve itirme sonucunda Anadolu plakası yüksek deformasyona uğrarken plaka boyunca çok sayıda faylanma meydana gelmiştir. Bu hızlı deformasyon sonucu bölgede meydana gelen diri fayların birçoğu ise yıkıcı deprem deprem üretme potansiyeline sahiptir (Emre ve ark., 2018; KRDAE).

Bu fay sistemleri arasında, bölgenin sismik karakterini şekillendiren iki ana yapı öne çıkmaktadır: Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ve Doğu Anadolu Fay

Zonu (DAFZ). DAFZ, bu sistemin ikinci büyük bileşeni olarak batıya hareket eden Anadolu bloğunun güney sınırını kontrol eder ve Karlıova civarında KAFZ ile kesişir. Bu iki ana tektonik yapının etkileşimi, bölgenin sismik aktivitesini doğrudan şekillendirerek Erzurum'un hem depremsellik hem de yer kabuğu hareketliliği açısından kritik bir konumda olmasına neden olmaktadır (Koçyiğit ve Canoğlu, 2017; KRDAE; Şekil 1). Bulunduğu jeolojik konum nedeniyle global ölçekte sismik açıdan depremlerin oldukça yoğun meydana geldiği Anadolu plakasında tarihsel ve aletsel dönemde ciddi can kayıplarıyla birlikte ekonomik tahribat yaratan, altyapı ve binaların yıkılmasına sebep olarak ülkeye sosyo-ekonomik açıdan büyük hasarlar veren onlarca deprem meydana gelmiştir (1939-Erzincan 7.9; 1943-Samsun 7.2; 1976-Van 7.5; 1999-Gölcük 7.8; 1999-Düzce 7.5; 2011-Van 7.2; 2023-Kahramanmaraş 7.6; KRDAE). Bu yıkıcı depremlerden sonuncusu olan ve 6 Şubat 2023 tarihinde 04:17 ve 13:24'te yaklaşık 8 saat arayla gerçekleşen Pazarcık (Mw:7.7) ve Ekinözü Kahramanmaraş (Mw:7.6) depremleri büyük bir yıkıma sebep olarak başta Doğu Anadolu Bölgesi olmak üzere, Güneydoğu Anadolu Bölgesi, İç Anadolu Bölgesi ve Akdeniz Bölgesi'ni kapsayacak şekilde geniş bir alanda (11 il) şiddetli olarak hissedilmiş ve çevre bölgelerde bile ciddi oranda yıkıma neden olurken jeomorfolojik yapıda görülecek şekilde yer değiştirmelere de kaynaklık etmiştir. Jeodezik yöntemler ile elde sayısal yükseklik modellerinin analiz edilmesiyle analizler yapılabilmektedir (Yakar, 2010). Özellikle büyük magnitudlü depremlerin neden olduğu maksimum yer değiştirmeler, fay düzlemleri üzerinde ve jeomorfolojik yapıda belirgin izler bırakabilmekte ve bazı durumlarda bunlar belirlenebilmektedir; ancak bu deformasyonların, fay zonlarından uzaklaştıkça şiddetteki azalmayla orantılı olarak doğrudan gözlemlenmesi güçleşmektedir.

Bu nedenle, GNSS ve InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) gibi uzaysal jeodezik tekniklerle elde edilen sürekli ve yüksek hassasiyetli yer değiştirme verileri, fay sistemlerinin hem yakın hem de uzak bölgelerdeki etkilerinin bütüncül bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır (Yalçın, 2023).



Şekil 1. Çalışma bölgesi çevresindeki ana tektonik yapılar ve Erzurum'u etkileyen depremlere ait odak mekanizma çözümleri (KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu, DAFZ: Doğu Anadolu Fay Zonu, BZSZ: Bitlis Zagros Suture Zonu, BAGB: Batı Anadolu Genişleme Bölgesi, Kırmızı çizgiler: Diri faylar), (Özkaymak (2015)'ten derlenmiştir. Odak mekanizma çözümleri AFAD kataloğundan alınmıştır).

Deprem anında meydana gelen ve kosismik deformasyon olarak adlandırılan bu yer değiştirmeler (offset), fay düzlemi boyunca gerçekleşen kayma miktarını, atım yönünü ve deformasyon dağılımını doğrudan yansıtarak depremlerin fiziksel mekanizmalarını analiz etmek için ana bir kaynak olarak önemli bir rol oynamaktadır. Kosismik deformasyonlara neden olan depremler, intersismik (depremler arası) ve presismik (deprem öncesi) olarak adlandırılan dönemlerin ardından meydana gelir. Bu dönemlerde, fay zonları boyunca yer kabuğunda potansiyel enerji birikimi oluşur ve bu birikim gerilimde artışa yol açar. Bu süreç, elastik geri sekme teorisi (elastic rebound theory) ile açıklanmaktadır (Reid, 1910). Artan gerilim yer kabuğunda çeşitli deformasyonlar meydana getirmektedir ve meydana gelen bu bozulmalar jeodezik tekniklerle belirlenebilmektedir.

Yer kabuğunda oluşan gerilim ve yer değiştirmelerin belirlenmesinde jeodezik yöntemlerin kullanılmasına yönelik bilinen ilk çalışmalar Japon jeofizikçiler Terada ve Miyabe, (1929) ve Tsuboi (1930) tarafından yayınlanmıştır. Jeodezik olarak incelemesi yapılan ilk deprem ise, 19 Mayıs 1892 tarihinde gerçekleşen Tapanuli, Sumatra depremidir. J.J.A. Müller (1895) çalışmasında, deprem sonrası ölçme merkezleri arasında gözlenen açıların depremden önce ölçülen açılardan farklı olduğunu tespit etmiştir (Yeats ve ark., 1997). Özellikle plaka hareketlerinin nasıl ve ne yönde ne kadar bir hız ile hareket ettiğinin belirlenmesi önemli tektonik konuların başında gelmektedir ve geçmişten günümüze yer kabuğu üzerindeki deformasyonların belirlenmesi

amacıyla birçok çalışma yapılmaya devam edilmektedir (Argus ve Heflin, 1995; Nocquet ve Calais, 2004; Yokota ve ark., 2018; Şimşek ve ark., 2019; Konak ve ark., 2020; Lazos ve ark., 2021; Solak ve ark., 2024a). Meydana gelen deformasyonların jeodezik olarak gözlenmesinde açı ve uzunluk ölçme teknikleri ile başlayan jeodezik çalışmalar gelişen uydu teknolojilerine bağlı olarak günümüzde küresel konum belirleme yöntemleri ile önemli sonuçlar elde edebilme imkanı bulmuştur (Erdoğan ve ark., 2021). Özellikle klasik ölçme yöntemlerine nazaran küresel konum belirleme sistemleri kullanılarak yapılan çalışmalar daha büyük alanlarda çalışmayı sağlarken hem zamandan tasarruf etmeyi hem de yüksek doğrulukta ve fazlaca maliyet gerektirmeden sonuçlar elde etmeyi mümkün kılmıştır (Koca ve Ceylan, 2018; Ögütçü ve ark., 2022; Bezicioğlu ve ark., 2023). Tektonik hareketliliğin izlenmesi için oluşturulan GNSS ağları, düzenli aralıklarla yapılan ölçümlerle yüksek hassasiyetli nokta koordinatları ve hız verileri sağlayabilmektedir. Bu veriler, aktif fay zonlarının neden olduğu deformasyon alanlarının dinamiklerini anlamak için kritik bir rol oynamaktadır.

Ülkemiz ölçeğinde yıkıcı etkisiyle insan hayatını tehdit eden başlıca doğal afet olan depremler nedeniyle can ve mal kaybının önüne geçilemediği birçok afet yaşanmıştır. Doğal afetler sonrası can ve mal kaybını en aza indirmek amacıyla risk değerlendirme ve tehlike analizi çalışmaları yapılmaktadır (Habib, ve ark., 2023; Iqbal ve ark., 2023; Öcül ve Şişman, 2023; Touseef, ve ark., 2023; Gull, ve ark., 2023; Kankanamge, 2024; Noor ve ark., 2024). Sismik risk değerlendirmeleri için elde edilen noktasal hızlar, fayların etki alanındaki gerilim dağılımını ve yer kabuğunun güncel deformasyonunu ortaya koyarak temel oluşturmaktadır. Sismik tehlike analizlerinde, fayların dinamik özellikleri ve depremler sonrası kabuk hareketlerini tanımlayan parametreler, GNSS ölçümleriyle elde edilen noktasal hız verileri kullanılarak geliştirilen matematiksel modeller aracılığıyla hesaplanabilmektedir. Özellikle yanal atımlı fay sistemlerinde, blokların birbirine göre hareketini izlemek için fay hatlarına dik olarak konumlandırılan GNSS ağlarından periyodik veya uzun süreli gözlemler sonucunda toplanan veriler, depremlerin yol açtığı kalıcı yer değiştirme miktarını (atım) ve deformasyon alanlarını yüksek hassasiyetle belirlemeye olanak sağlar. Deprem sonrası dönemde ise, GNSS tekniği kabuk deformasyonunun boyutunu, kosismik yer değiştirme değerlerini ve sismik zonların güncel hareket yönü-hız ilişkisini analiz etmek için kritik bir araç olarak öne çıkarak geçmişten günümüze birçok çalışmada kullanılmıştır (Yavaşoğlu ve ark., 2011; Aktuğ ve ark., 2016; 2021; Tiryakioğlu ve ark., 2018; Poyraz ve ark., 2019; Oktar ve ark., 2021; Gezgin ve ark., 2020; 2022; Aladoğan ve ark., 2024; Solak, 2024; Solak ve ark. 2024b; Şafak-Yaşar ve ark., 2025).

GNSS tabanlı jeodezik verilerin tektonik çalışmalarda sağladığı yüksek doğruluğa ek olarak farklı disiplinler tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda da aletsel ve tarihsel deprem katalogları kullanılarak depremlerin yoğunluğu, tekrarlama aralığı ve olasılığı ile ilgili değerli girdiler elde edilerek bölgenin sismik aktivitesi hakkında çıkarımlarda bulunmak mümkün olmaktadır (Akyürek ve Arslan, 2018). Sismik tehlike

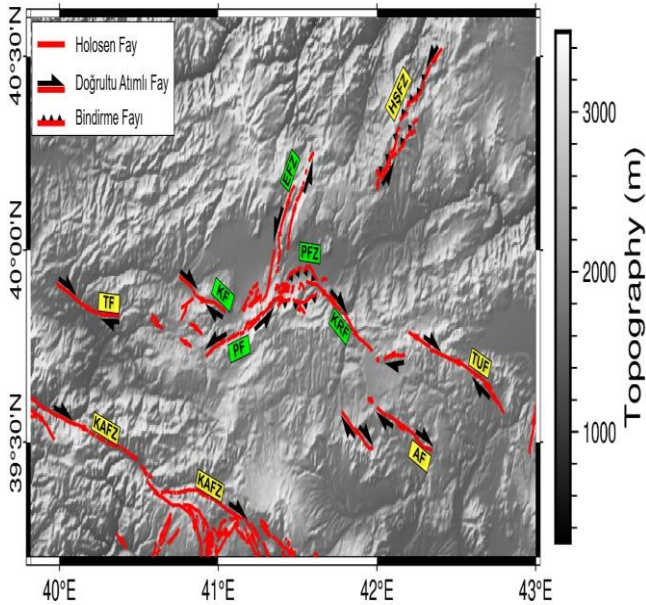
analizi çerçevesinde bir bölgenin sismik değerlendirmesi iki temel yaklaşımla gerçekleştirilir, Deterministik sismik tehlike analizi (DSHA), belirli deprem senaryolarını esas alarak en olası veya en yıkıcı olayın etkilerini incelerken, olasılıksal sismik tehlike analizi (PSHA) deprem olasılıkları, frekansları ve büyüklük dağılımları gibi belirsizlikleri da göz önüne alarak bölgedeki tehlike seviyesini istatistiksel bir çerçevede değişkenler arasındaki ilişkileri kullanarak değerlendirir (Wang, 2011). Gutenberg ve Richter (1944), gelecekte gerçekleşmesi beklenen depremlerin büyüklüklerini tahmin etmek amacıyla tarihsel ve aletsel dönem sismik verilere dayanan temel bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem, büyüklük-frekans ilişkisi olarak adlandırılan ve geçmiş depremlerin büyüklükleriyle tekrarlanma sıklığı arasındaki ilişkiyi temel alan bir modeldir. İlgili modelde, tarih boyunca kaydedilen tüm deprem verilerinden belirli bir eşik magnitüd üzerinde olanlar (M_w, M_L) kullanılarak olası deprem senaryoları istatistiksel olarak değerlendirir. Bu yaklaşım, sismolojide "birincil kaynak model" olarak kabul edilmiş ve günümüzde deprem tehlike analizlerinde referans alınan gözlemlere dayalı bir çerçeve sunmaktadır. *a* ve *b* regresyon parametreleri olarak adlandırılan iki temel değişkenle tanımlanan bu ilişkideki değerler ilgili bölgenin depremselliğine ilişkin çıkarımlarda bulunmak için sismik tehlike çalışmalarında önemli rol oynamaktadır (Nava ve ark., 2017). Katalogda bulunan magnitüd büyüklüklerine göre toplam deprem sayısının logaritması olan *a* değeri, bölgenin genel sismik aktivite seviyesini gösterir ve sismisite oranı ile gözlem süresinin uzunluğuna bağlıdır. Büyük ve küçük depremlerin göreceli oranını yansıtan *b* değeri ise 1'den büyük ya da küçük olması durumuna göre bölgedeki stres ile ilişkilendirilmektedir (Schorlemmer ve ark., 2005; Taroni ve ark., 2021). Sismik tehlike analizlerinde bölgenin sismik durumunun modellenmesi, bölgesel sismik risk haritaların üretilmesi ve yapı stoğunun iyileştirilmesine önemli katkı sağlayarak, afet yönetimi ve risk azaltma stratejilerine bilimsel bir zemin hazırlayan bu parametreler, geçmişten günümüze bir bölgedeki deprem aktivitesi durumunu ortaya koymak için sıklıkla kullanılmaktadır (Olsson, 1999; De Santis ve ark., 2011; Geffers ve ark., 2023).

2023-Kahramanmaraş deprem dizisi, Anadolu levhasındaki gerilim dağılımını önemli ölçüde değiştirerek komşu fay sistemlerinde sismik aktivite riskini artırmış, bu da Erzurum ve çevresi gibi tektonik olarak önemli fay zonlarının kesişiminde yer alan karmaşık bölgelerde kosismik deformasyonların ve sismik tehlike parametrelerinin yeniden değerlendirilmesini kritik bir ihtiyaç haline getirmiştir (Özkan ve ark., 2023; Toda ve ark., 2023; Tan, 2024). Bu nedenle, bu çalışmanın amacı, geçmiş tarihlerde de büyük depremler yaşamış Erzurum ili ve çevresinin 6 Şubat 2023'de meydana gelen Maraş depremleri dolayısıyla oluşan kosismik hız ve yer değiştirmelerinin belirlenmesi ve *a* ile *b* sismik parametrelerinin hesaplanarak 3 ayrı bölgede sismik tehlike analizlerinin gerçekleştirilerek yorumlanmasıdır. Kosismik yer değiştirmelerin belirlenmesi amacıyla Erzurum ve çevresindeki alanda bulunan fayları izlemek için kurulmuş GNSS ağı, TUTGA-99A (Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı) ve TUSAGA- Aktif (Türkiye Ulusal Temel GNSS

Ağı-Aktif) istasyonları ile genişletilmiştir. Bu noktaların deprem öncesi ve sonrası elde edilen hızları yardımıyla enterpolasyon yöntemiyle ağda bulunan kampanya tipi noktalara hız kestirimi yapılmıştır. Kestirilen hızlar kullanılarak noktaların deprem öncesi ve deprem sonrası koordinatlarının deprem günü epöğuna kaydırılmasıyla kampanya şeklinde ölçülen noktalarda deprem nedeniyle meydana gelen atım miktarları elde edilmiştir. Deprem anı ve sonrası hız ve yer değiştirme miktarlarına ek olarak bölgedeki sismik tehlikeyi değerlendirmek amacıyla 1900-2024 yılları arası dönemi kapsayan $M \geq 2$ depremlerin yer aldığı katalogdaki tüm depremler ortak bir magnitüde çevrilerek homojenlik sağlanmıştır. Erzurum ve çevresinde bulunan alan tektonik zonların dağılımına göre 3 bölgeye bölünerek *a* ve *b* parametreleri hesaplanarak bölgenin sismik aktivite ve gerilim durumu ile ilgili önemli bulgular elde edilmiştir.

2. Erzurum ve Çevresinin Tektonik Yapısı ile Depremselliği

Anadolu plakası ve çevresinin deprem aktivitesi açısından baskın olan başlıca unsurları kuzeyde KAFZ, doğuda kıtasal çarpışma ve DAFZ, batıda Ege Gerilme Sistemi ve güneyde Ölü Deniz Fay Sistemi (ÖDFS) ile aktif bir yitim zonu olan Ege-Kıbrıs dalma-batma zonudur (McKenzie, 1972; Şengör ve ark., 1985). KAFZ, Kuzey Ege Denizi'nden Karlıova'ya kadar uzanan yaklaşık 1400 km'lik doğu-batı yönlü, sağ yanal atımlı bir fay sistemidir ve Karlıova-Antakya hattında kuzeydoğu-güneybatı uzanımıyla yaklaşık 600 km boyunca devam eden DAFZ ile Karlıova havzası civarında Anadolu plakası ve çevresinin tektonik dinamiklerinde önemli bir rol oynayan kritik bir kavşak oluşturmaktadır (Tiryakioğlu ve ark., 2024). KAFZ'dan sonra Anadolu plakasının ikinci büyük aktif fay sistemi olan DAFZ, Kuzeyde Karlıova'dan başlayarak güneybatı yönünde Kahramanmaraş üzerinden ilerler ve İskenderun Körfezi ile Akdeniz'e kadar uzanır. Sol yanal doğrultu atımlı bir hareket mekanizması sergileyen ve Anadolu bloğunun güney sınırını oluşturan DAFZ, Arap Levhası ile batıya hareket eden Anadolu Levhası arasındaki tektonik gerilimin önemli bir kısmını absorbe eder (Aydın, 2011; Seyitoğlu ve ark., 2017, 2018, 2022). Bu iki önemli tektonik yapının D-KD kesiminde yer alan Kuzeydoğu Anadolu Fay Zonu (KDAFZ) Doğu Anadolu Sıkışma Bölgesi'nin devamı olarak, Kafkas Bindirme Kuşağı'nın güneybatı uzantısıyla kesişen karmaşık bir tektonik zonu temsil eder (Yeken, 1999). Çok sayıda irili ufaklı fay bloğu ve kırık sistemiyle karakterize edilen jeolojik açıdan karmaşık bir yapıya sahip olan bu bölgede genel olarak kuzeydoğu-güneybatı (KD-GB) yönelimli aktif fay sistemleri baskındır. Kuzeydoğu Anadolu, Avrasya Levhası'na göre doğu yönlü hareketi nedeniyle yoğun bir sıkışma gerilimi altındadır. Bu tektonik sıkışma, bölgedeki depremsel aktivitenin temel kaynağını oluşturur ve özellikle Çaldıran, Tutak, Balıkgölü, Ağrı, Aşkale, Dumlupınar, Çobandede, Horasan ve Kağızman fay kuşakları, bölgede yüksek sismik potansiyeliyle dikkat çeken yapılar arasındadır (Demirtaş ve Yılmaz, 1993).



Şekil 2. Erzurum ve çevresindeki faylar (KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu, TF: Tercan Fayı, KF: Kandilli Fayı, PF: Palandöken Fayı, EFZ: Erzurum Fay Zonu, PFZ: Pasinler Fay Zonu, KF: Karayazı Fayı, AF: Akdağ Fayı, TUF: Tutak Fayı, HŞFZ: Horasan-Şenkaya Fay Zonu).

Doğu Anadolu Bölgesi'nin en büyük kenti olan Erzurum, yüzölçümünün büyük bölümü (%64) dağlık araziden oluşan jeolojik açıdan çeşitli bir profile sahiptir. Kentin batısında Karasal Kırıntılı Birimler, güneybatı kesiminde Andezitik Kayaçlar, güneyinde Palandöken Dağı'nın hakim olduğu alanda Ofiyolitik Melanj yapıları, kuzey ve kuzeybatı sınırlarında ise Volkanik Kayaçlar yer almaktadır (Özer, 2019). Erzurum, güneyden Palandöken Dağları (3176 m), kuzeyden Dumlu Dağı (3169 m), kuzeydoğudan Kargapazarı Dağları (3120 m) ile çevrili tektonik bir oluşumdur (İRAP, 2021). Bu dağların birçoğu volkanik kökenli olup daha sonra tektonik olaylara maruz kalarak oluşmuşlardır (Keskin ve ark., 1998, Yarbaşı ve ark., 2004; Özer ve ark. 2019).

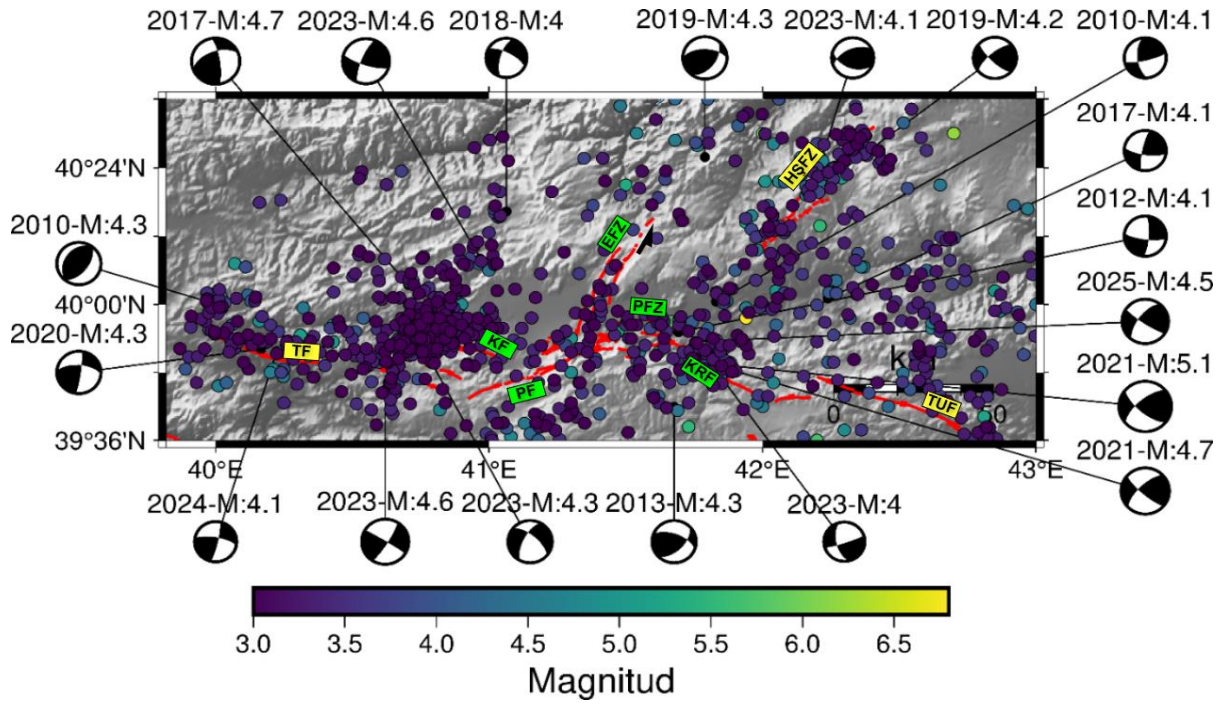
Anadolu'nun maruz kaldığı tektonik hareketler ile gelişen birçok mikro çatlak Erzurum ve çevresinin tektoniğini şekillendirmektedir. Kelkit-Çoruh fayı ile Çat civarından başlayan ve Tortum-Oltu'ya kadar uzanan sol yanal doğrultu atımlı Erzurum Fay Zonu (EFZ) ve Aşkale Fay Zonu (AFZ), Erzurum'un kuzeyinde bulunan KDAFZ içinde yer almaktadır. Bunlara ek olarak; sol yanal atımlı ters faylardan oluşan Palandöken Fayı (PF), Horasan-Şenkaya Fay Zonu (HSFZ) ve Kandilli Fayı (KF) ile doğu batı uzanımlı sağ yanal olarak tanımlanan Karayazı Fayı (KYF) ve ters faylanma görülen Pasinler Fay Zonu (PFZ) ise bölgede bulunan diğer tektonik unsurlardır (Koçyiğit ve Canoğlu, 2017; Duman ve ark., 2017; Tablo 1).

Tablo 1. Erzurum ve çevresinde yer alan fayların potansiyel deprem büyüklükleri ve faylara ait parametreler (Türkelli ve ark., 2003; Zor ve ark., 2003; Emre ve ark., 2018; RL: Sağ yanal, LL: Sol yanal, R: Ters fay karakterini ifade etmektedir).

Fay Zonu				Trend (RHR)		Eğim açısı (C°)		Derinlik (km)		Magnitüd
İsim	Segment	Karakter	Uzunluk (km)	Min	Max	Min	Max	Fokal m.	Literatür	Tahmini Mw
Kandilli	-	RL	28	272	308	87	90	25		6.78
Palandöken	-	LL+R	54	49	77					7.10
Erzurum	Nenehatun	LL	41	10	40					6.97
	Dumlu	LL	39	39	0					6.90
	Börekli	LL+R	12	12	29					6.32
Pasinler	-	R	35	35	133	45	60			6.70
Karayazı	-	RL	59	70	129	87	90			7.14
Horasan-Şenkaya	Gerek	LL+R	25	192	229	87	90			6.73
	Balabantaş	LL+R	24	200	234					6.90
	Gaziler	LL+R	25	202	250			6.73		

Doğu Anadolu bölgesinde yer alan ve yaklaşık bir milyon insana ev sahipliği yapan Erzurum ve çevresinde büyük hasarlara neden olabilecek birçok diri fay bulunmaktadır. Özellikle Erzurum İlının yakın çevresinde bulunan EFZ, HSFZ, PFZ, KF, PLFZ ve KYF bölgenin geçmiş sismik aktivitesi de göz önünde bulundurulduğunda deprem üretme potansiyeline sahip zonlar olarak görülmektedir (Emre ve ark., 2018; Şekil 2). Özellikle 92 km uzunluğundaki EFZ ile yaklaşık 130 km uzunluğundaki KD-GB doğrultulu HSFS, uzunlukları ve segment yapıları dikkate alındığında Kuzeydoğu Anadolu bölgesinin önemli kaynak zonlarının başında gelmektedir (Barka ve Kadinsky-Cade, 1988; Barka ve Gülen, 1989; Koçyiğit ve ark., 2001). Bu tektonik yapılar, Wells ve Coppersmith (1994)'de ifade edilen maksimum

büyüklik ve yüzey kırığı uzunluğu arasındaki ampirik ilişkiye dayanarak yapılan hesaplamalara göre bölgede yıkıcı büyüklükte ($M_w:6.3-M_w:7.1$) depremler üretme potansiyeline sahip fay zonları olarak öne çıkmaktadır (Duman ve ark., 2017; Emre ve ark., 2018). Aletsel dönemde Erzurum şehir merkezinin yakın çevresinde ($r=75$ km) meydana gelen 100'den fazla $M \geq 4$ depreme ek olarak bölgede gerçekleştirilen jeolojik çalışmalar ve hem tarihsel hem de aletsel dönemde meydana gelen depremler, Erzurum'u çevreleyen birçok fayın farklı zamanlarda aktif olarak çalıştığını göstermektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Erzurum ve çevresinde meydana gelen $M \geq 3$ depremlere ait odak mekanizma çözümleri

Tarihsel dönemde (1900'lü yılların öncesi) Erzurum ve yakın çevresinde meydana gelmiş yaklaşık 40'tan fazla deprem 840-1899 yılları arasında can kayıplarına çevre bölgelerde ciddi hasarlara neden olmuştur (AFAD). Şiddeti V ile X arasında değişen depremlerden tarihsel dönemde en yıkıcı olanları ise Ocak ve Haziran 1859 yılında meydana gelmiş ve X şiddetindeki bu depremler çok sayıda yapının yıkılmasına ek olarak yaklaşık 15 bin can kaybına sebep olmuştur (Ambraseys ve ark., 2006; 2009; Aksu, 2014; İrkin ve Satılmış, 2023; KRDAE). 1900'de başlayan aletsel dönemde Erzurum ve çevresinde meydana gelen magnitüdü büyük depremler kronolojik olarak 1901 Pasinler ($M_s=6.1$), 1906 Oltu ($M_s=6.0$), 1924 yılı Köprüköy ($M_s=6.8$), 1952 yılı Pasinler ($M_s=5.8$), 1983 yılı Şenkaya-Horasan ($M_s=6.8$), 1984 Balkaya ($M_b=6.4$), 2004 Aşkale ($M_L=5.1$) ve son olarak yakın zamanda meydana gelen 2025 Pasinler ($M_w=4.5$) depremleri olarak gösterilebilir (Eyidoğan, 1987; Demirtaş ve ark., 2010; Bıkçe, 2015; KRDAE). Bölgenin sismik potansiyelini doğrulayan bu bilgilere göre; Erzurum'da her 30 yılda bir magnitüdü 6 ile 7 arasında değişen büyük magnitüdü bir deprem meydana gelmektedir (Yarbaşı ve Kalkan, 2009). Buna ek olarak bölgede 2004 meydana gelen orta büyüklükteki Aşkale depremleri geniş bir alanda yıkıma neden olarak 2000'e yakın binanın yıkılmasına sebep olmuştur. Bölgede meydana gelen orta şiddetteki bir depremin bile yol açtığı büyük hasar, bölgedeki ilkel yapı stoğuna ek olarak bölgenin Erzurum Havzası'nın güneyinde bulunan Palandöken Dağlarından boşalan geniş alüvyal dolgu alanının gevşek zemin özelliklerinin depremin şiddetini arttırmasından kaynaklanmaktadır (Doğan ve ark., 2004; Gök ve ark., 2007; Demirtaş ve ark., 2010).

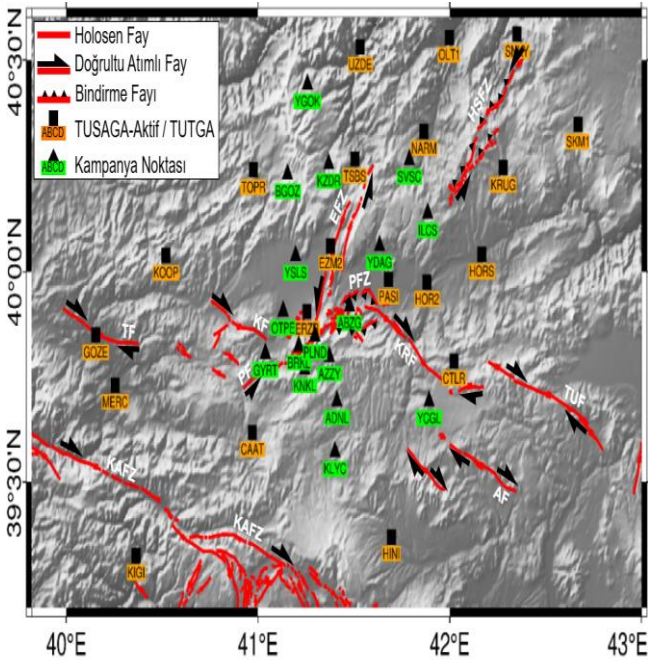
Tamamına yakını 1. ve 2. derece deprem bölgesinde bulunan Erzurum ve çevresi, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı tarafından 2019 yılında hazırlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritasında en büyük yer ivmesi değerleri (PGA 475 yıl) maksimuma (>0.70 g) ulaşan

değerlerle temsil edilir ve bu durum bölgenin deprem tehlikesinin göreceli olarak özellikle KAFZ ile KDAFZ boyunca çok yüksek olduğunu göstermektedir (Özer ve ark., 2019; AFAD). Buna ek olarak, dağlık alanlardan Erzurum Ovası'na doğru boşalan dere yatakları boyunca gelişen ve kalın bir alüvyon istifi oluşturan alüvyal yelpazeler bölgenin düşük taşıma kapasitesi ve zayıf jeoteknik özellikler sergilemesine yol açarak deprem sırasında kritik riskler doğurmaktadır. Özellikle 5.0'den büyük magnitüdü ($M > 5.0$) depremlerde, bu alüvyal zeminlerde şiddetli sismik dalgaların amplifikasyonu (büyümesi) olumsuz zemin-yapı etkileşimi meydana getirerek büyük yıkım potansiyeli doğurmaktadır (Demirtaş ve ark., 2010; Özer, 2019). Bölgenin yüksek sismik aktivitesinin yanında, havzanın genelinin eski ve yeni alüvyonlarla örtülü olması, Horasan-Narman ve Aşkale Faylarında gerçekleştirilen Coulomb analizlerinde artan gerilim ve yakın zamanda gerçekleştirilen jeolojik-paleosismolojik çalışmalarda Erzurum ve çevresinde $M_w > 6,5$ deprem üretme potansiyeline sahip aktif faylar olduğu ve özellikle EFZ'nin Nenehatun Segmenti ve Dumlu segmentleri üzerinde sırasıyla yaklaşık 2000-5500 yıldan günümüze kadar herhangi bir deprem meydana gelmiş olmaması bölgenin deprem potansiyelinin giderek arttığına işaret etmektedir (Bayrak ve ark., 2020; Kürçer ve ark., 2022; Güler ve ark., 2023). Dolayısıyla, bölgenin güncel deprem tehlike haritalarında yüksek riskli zonlarda yer alması ve son çalışmaların işaret ettiği sismik boşluklar, ciddi bir risk oluşturmaktadır. Bununla birlikte, kentsel ve kırsal altyapının sismik dirençsizliği, olası bir depremin Erzurum kent merkezi ve ilçelerinde ağır hasara yol açma ihtimalini artırmasından ötürü bölgede mikro-bölgeleme çalışmaları ve sismik tehlike analizlerinin yapılarak, izleme ağları güçlendirilmesi, deprem etkilerinin azaltılması açısından kritik ve gereklidir.

3. Materyal ve Metot

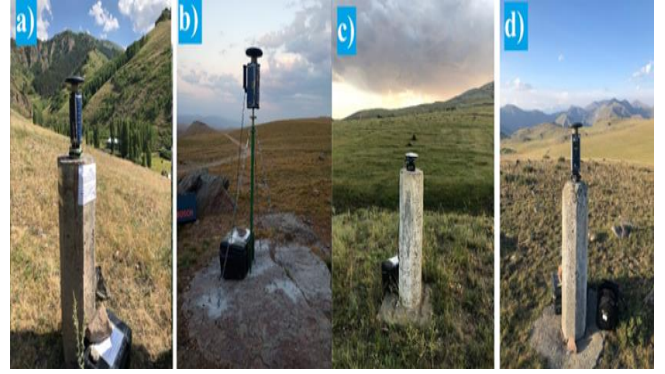
3.1. GNSS ağı ve kampanya ölçmeleri

Çalışma bölgesinde yer alan fayların kabuksal deformasyonlarının belirlenmesi amacıyla oluşturulacak GNSS ağı için Erzurum ve çevresinde yer alan 17 GNSS noktası seçilmiştir (Şekil 4 yeşil noktalar). Bu noktaların 14'ü pilye tipi tesise, 3'ü (BRKL, KNKL ve PLND) ise kayada bronz tipi tesise sahip olup yoğunlukla kayalık zeminlerde yer almaktadır. Daha sonra bölgedeki TUSAGA-Aktif (CORS-TR) istasyonları ve TUTGA-99A noktalarına ait RINEX verileri Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) ve Harita Genel Müdürlüğü (HGM)'nden temin edilmiştir. Veri temini TUSAGA-Aktif istasyonları için her aydan 2 gün, TUTGA-99A noktaları için ise var olan tüm veriler şeklinde gerçekleştirilmiştir. Bu verilerin coğrafi dağılımları bölgeyi kapsamı ve hız kestirimine uygunluk açısından incelenerek kullanılabilir olanlar belirlenmiştir (Şekil 4 turuncu noktalar).



Şekil 4. GNSS ağında yer alan kampanya tipi noktalar ile TUSAGA-Aktif / TUTGA-99A noktaları.

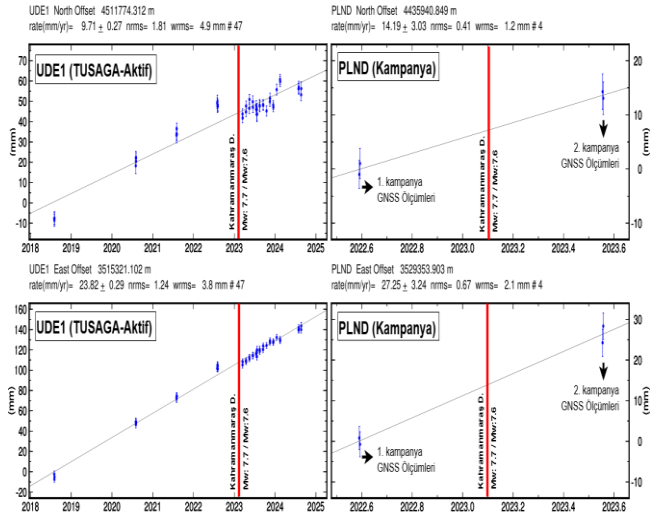
Çalışma kapsamında oluşturulan 17 noktalık GNSS ağında 1. kampanya ölçümler 2022 yılı Ağustos ayında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5). 1. kampanya ölçümlerinin ardından yaklaşık 6 ay sonra 6 Şubat 2023 tarihinde 11 ilde yıkıma neden olan Kahramanmaraş depremleri meydana gelmiştir (KRDAE). Kahramanmaraş depremlerinden 5 ay sonra ise 2023 yılı Temmuz ayında 17 noktalık GNSS ağında 2. kampanya ölçümler gerçekleştirilmiştir. Kayada bronz tipi tesise sahip olan noktalarda merkezleştirme doğruluğunu arttırmak için Zincirli Tripod kullanılmıştır. Arazi çalışmaları "22.FEN.BIL.30" numaralı proje desteği ile yürütülmüş olup tüm veriler 15 sn kayıt aralığıyla, 2 gün tekrarlı ve günlük minimum 8 saat olacak şekilde kaydedilmiştir.



Şekil 5. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen kampanya ölççüleri (a) BGOZ, b) KNKL, c) BRKL, d) YGOK

3.2 GNSS verilerinin değerlendirilmesi ve kosismik deformasyonların hesaplanması

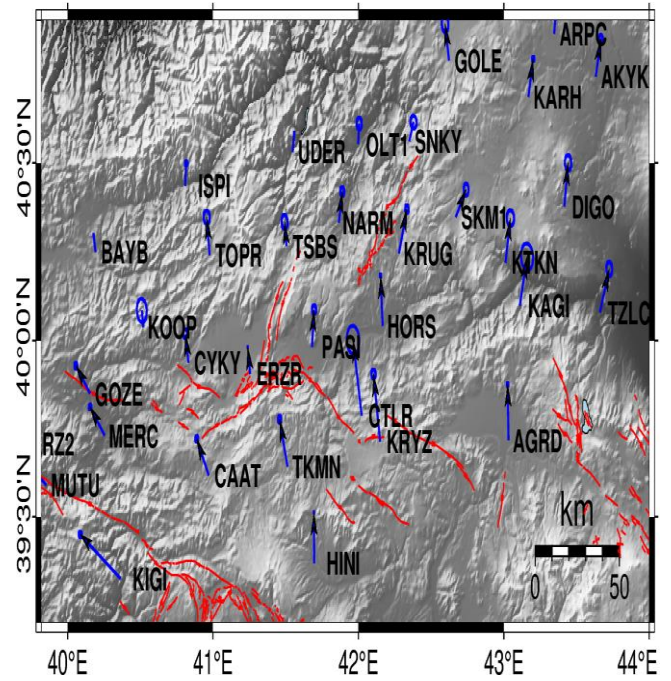
Çalışma kapsamında temin edilen ve ölçümler sonucu elde edilen GNSS verilerini değerlendirmek için bilimsel bir yazılım olan GAMIT/GLOBK kullanılmıştır (Herring ve ark., 2018). Bu yazılım jeodezik çalışmalarda tektonik levha hareketlerini incelemek için çok sayıda araştırmacı tarafından kullanılmaktadır (Tiryakioğlu, 2017 a,b). GAMIT/GLOBK yazılımları ile değerlendirme yapılırken değerlendirme stratejisi olarak iyonosferden bağımsız çözüm seçilmiştir. Troposfer modeli olarak Saastamoinen modeli seçilmiş olup yörünge bilgisi olarak Scripps Orbit ve Permanent Array Center (SOPAC) veri tabanından elde edilen hassas uydu yörünge bilgileri (IGS_FINAL) kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, Anadolu Plakası ve çevresinde yer alan ve tektonik deformasyonlardan etkilenmeyen bölgelerde konumlanacak şekilde, uzun süreli ve tutarlı zaman serilerine sahip 25 IGS istasyonu değerlendirmede tercih edilmiştir. Değerlendirme sonrasında, GLORG aşamasında gerçekleştirilen iterasyonlar sonucunda, düşük belirsizliğe (1-5 mm) sahip 21 nokta stabilizasyon için kullanılmıştır (Herring ve ark., 2016). Deprem öncesi ve sonrasında ait ölçüm kampanyalarına ait verilerin değerlendirilmesi ile noktaların GNSS ölçümü gerçekleştirilen kampanya ölçü epogunda ITRF14 koordinatları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar tüm noktalarda günlük koordinatlara ait belirsizliklerin birkaç mm ile sınırlı olduğunu göstermiştir. Noktaların yer seçimi, ölçüm stratejisi, pilye tipi tesisler ile zorunlu merkezleştirmeye sahip zincirli tripod kullanımının konum doğruluğunu arttırdığı değerlendirilmiştir. UDE1 ve PLND noktalarına ait yıllık zaman serileri Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde çalışma bölgesinde yer alan UDE1 (TUSAGA-Aktif) noktasının deprem öncesine ait trendinin Kahramanmaraş depremlerinin etkisi ile her iki bileşen için de kısmen yön değiştirdiği görülmektedir. Benzer şekilde deprem sonrası aylık olarak değerlendirilen verilerden elde edilen zaman serilerinde de düzensizlik görülmektedir. Açıklanan bu durumlar Kahramanmaraş depremlerinin Erzurum ve çevresinde kosismik deformasyona neden olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 6. UDE1 (TUSAGA-Aktif) ve PLND (Kampanya) noktalarına ait zaman serisi grafiği

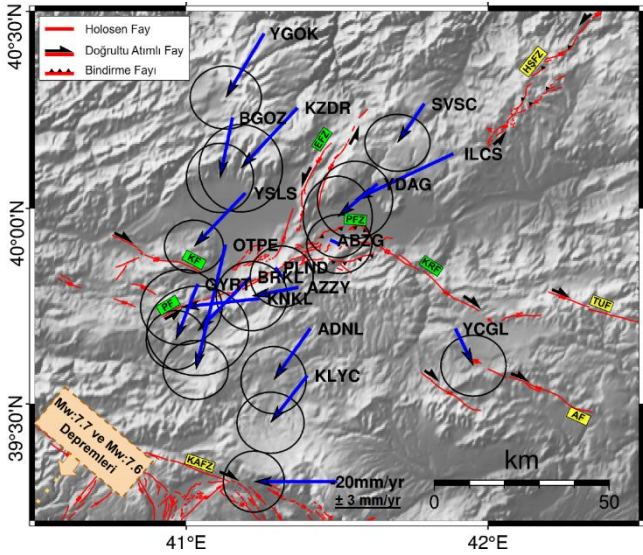
Kosismik deformasyonun belirlenebilmesi için deprem öncesi yapılan 1. kampanya GNSS ölçümlerinin ve deprem sonrası yapılan 2. kampanya GNSS ölçümlerinin deprem anı epoklarına taşınması gerekmektedir. Bunun için ise GNSS ağındaki noktaların deprem öncesi ve sonrası hızlarının bilinmesi gerekmektedir. Ancak kampanya tipi noktaların hızları mevcut değildir. Anadolu Plakası üzerinde en kapsamlı hız alanı Kurt ve ark. (2023) tarafından yayımlanmıştır (Şekil 7).

Şekil 7 incelendiğinde Erzurum ve çevresinde GNSS hızları olan çok sayıda noktanın olduğu görülmektedir. Bu nedenle kampanya tipi noktalar ile TUSAGA-Aktif ve TUTGA-99A ağına ait noktaların koordinatlarını ortak referans çerçevesinde elde edebilmek için bu noktaların RINEX verileri TKGM ve HGM'den temin edilmiştir. Tüm veriler GAMIT/GLOBK yazılımı kullanılarak aynı strateji ile değerlendirilmiştir. Tüm verilerin değerlendirilmesinden sonra ağda yer alan noktaların deprem öncesi koordinatları kullanılarak intersismik, deprem sonrası koordinatları kullanılarak ise postsismik hızlar elde edilmiştir. Hem TUSAGA-Aktif hem de TUTGA-99A noktalarının deprem öncesi (intersismik) hızları hesaplanmış olup deprem sonrası (postsismik) dönem için ise yalnızca TUSAGA-Aktif noktalarının hızları hesaplanmıştır. Bunun nedeni kampanya tipi noktalardan oluşan TUTGA-99A ağına deprem sonrası dönemde HGM tarafından henüz 3 kampanya olarak ölçülmemiş olmasıdır (Şekil 7). Intersismik hızlar incelendiğinde, elde edilen hızların Kurt ve ark. (2023) tarafından yayımlanan hızlar ile büyük ölçüde uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışma bölgesinde noktalardaki hız farklılıkları bileşen bazlı ± 0.5 mm/yıl olarak elde edilmiş olup bu farklar hız belirsizlikleri ile uyumludur.



Şekil 7. Çalışma bölgesinde yer alan TUSAGA-Aktif istasyonları ve TUTGA-99A noktalarının intersismik dönem hızları (Kurt ve ark. 2023'den alınarak, %95 güven aralığıyla görselleştirilmiştir).

Kampanya tipi noktalara ait deprem öncesi hızlar, TUSAGA-Aktif istasyonları ve TUTGA-99A noktalarının deprem öncesi hızları kullanılarak elde edilmiştir. Kampanya noktalarında hız kestirimi, kestirilecek noktanın koordinatları ile çevresinde konumlanmış ve hızları bilinen en yakın üç noktanın koordinatları arasındaki mesafe bağıntıları kullanılarak, ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, kestirilecek noktanın hız değeri, ağırlık katsayılarıyla ölçeklendirilmiş çevresel veri noktalarının hız bileşenleri üzerinden hesaplanmıştır (Baykal ve ark. 2009, Tiryakioğlu ve ark. 2024). Kestirilen hızlar kullanılarak kampanya tipi noktaların koordinatları deprem anı epoguna (2023.1) kaydırılmıştır. Epok kaydırma için kestirilen yıllık hızlar epoklar arası süre ile ölçeklendirilerek deprem öncesi koordinatlara eklenmiştir. Benzer şekilde TUSAGA-Aktif istasyonlarının deprem sonrası döneme ait verilerinin değerlendirilmesi ile elde edilen hızlar kullanılarak kampanya tipi noktaların deprem sonrası hızları hesaplanmıştır. Hesaplanan bu hızlar yardımıyla kampanya tipi noktaların son ölçü epoguna ait koordinatları deprem anı epoguna kaydırılmıştır. Daha sonra ise iki epok arasındaki farklar hesaplanarak kampanya noktalarında meydana gelen kosismik deformasyonlar elde edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. GNSS ağında yer alan 17 noktada hesaplanan kosismik deformasyonlar

Erzurum bölgesinde kampanya tipi noktalarda hesaplanan kosismik deformasyonların genel olarak 2-30 mm arasında G-GB batı yönlü olduğu görülmektedir. Hesaplanan kosismik deformasyonların standart sapmaları hata yayılma kuralı uygulanarak bulunmuş olup 2.5-4.2 mm arasında değişmektedir.

3.3 Sismik parametreler ve Gutenberg-Richter yasası

Sismik tehlike analiz çalışmasının ilk adımı, bölgede meydana gelen depremler arasında Magnitüd-Frekans ilişkisinin kurulması amacıyla, sismik tehlikesinin belirleneceği bölge için geçmiş yıllarda meydana gelen deprem kayıtlarının derlenmesi ve güvenilir bir deprem kataloğunun elde edilmesidir. Bu kapsamda çalışma bölgesi ve çevresinde meydana gelen depremleri içeren üç farklı katalogdan (Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE), U.S. Geological Survey (USGS) ve Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD)), en geniş deprem bilgilerini içeren KRDAE katalogu tercih edilerek kullanılmıştır. Katalog, 1900-2024 yılları arasında $M \geq 2$ olmak üzere 3750'den fazla deprem içerirken $M \geq 3$ deprem sayısı ise yaklaşık 1200'dür. Aletsel dönem deprem verilerinin sınırlı olduğu bölgelerde sismik parametrelerin daha fazla veri ile yüksek doğrulukla hesaplanabilmesi için $M \geq 2$ depremler kullanılmaktadır. Çalışma bölgesindeki $M \geq 3$ depremlerin sınırlı olması ve bölgenin tamamını yeterince temsil etmemesi nedeniyle çalışma kapsamında $M \geq 2$ kullanılmıştır.

Kataloglar, depremlerin oluş zamanı, konumları ve derinlik bilgilerini içermekle birlikte (Mb-cisim dalgası, MS-yüzey dalgası, ML—lokal, MD—süreyle bağlı, MW—moment) farklı magnitüd bilgilerini içermektedir ve her deprem için tüm magnitüd bilgileri mevcut olmayabilmektedir. Bu sebeple parametrelerin güvenilir şekilde hesaplanması için sismik tehlike analizinde kullanılacak olan katalogda bulunan tüm deprem verilerinin homojenlik ve süreklilik sağlaması gerekmektedir. Bu nedenle, literatürde geliştirilmiş değişik magnitüd türleri ve magnitüd-şiddet arasındaki

ampirik ilişkiler yardımıyla katalog homojen hale getirilebilmektedir (Scordilis, 2006; Bayrak ve ark., 2009; Güla ve ark., 2016; Das ve ark., 2018). Ancak, bu çalışmalarda sunulan eşitliklerin çalışma alanına özgü karakteristik özellikleri yansıtabilme potansiyelinden dolayı dönüşüm işleminin güvenilirliğini artırmak amacıyla kullanılan katalogda bulunan depremler arasında dönüşüm katsayıları bu çalışma kapsamında yeniden belirlenmiştir. Moment magnitüdü (M_w), global ölçekte en güvenilir ve fiziksel temeli en güçlü büyüklük olması nedeniyle ortak magnitüd türü olarak belirlenmiştir. Farklı magnitüd türlerinin M_w 'ye dönüştürülmesi sürecinde hem bağımlı (M_w) hem de bağımsız (MD, ML, Ms, Mb) değişkenlerin ölçüm hatası içerebileceği göz önünde bulundurularak, regresyon analizinde klasik en küçük kareler yöntemi yerine her iki değişkenin belirsizliklerini hesaba katan Ortogonal Regresyon (Total Least Squares) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, x ve y yönündeki sapmaları minimize ederek daha doğru ve dengeli bir ilişki kurulmasını sağlamasından ötürü literatürde de sıklıkla kullanılmaktadır (Öztürk, 2015; Khemis and Athmani, 2023; Solak ve Gezgün, 2025). Magnitüdlarin arasındaki ilişki seviyesi ve kullanılan veri sayısını içeren bilgiler Tablo 2'de sunulmuştur. Burada magnitüd ölçeklendirmesi için elde edilen katsayılar (regresyon sabiti ve magnitüd katsayısı) ve bunlara ait standart sapma değerleri yer almaktadır. Yanı sıra M_w ile diğer magnitüd türleri arasındaki regresyona ait ilişki seviyeleri ise %96'nın üzerindedir. Bu durum regresyon değerlerinin magnitüd ölçeklendirmesi için kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

Tablo 2. Magnitüd ölçeklendirmesi için elde edilen katsayılar ve RMS (Root Mean Square) değerleri.

Mag.	Veri	a	b	c	d	e
MD	72	-0.11	0.05	1.02	0.01	99.10
Mw	165	0.18	0.05	0.93	0.01	97.47
Ms	35	1.08	0.05	0.77	0.01	99.46
Mb	45	-0.17	0.14	1.02	0.03	96.61

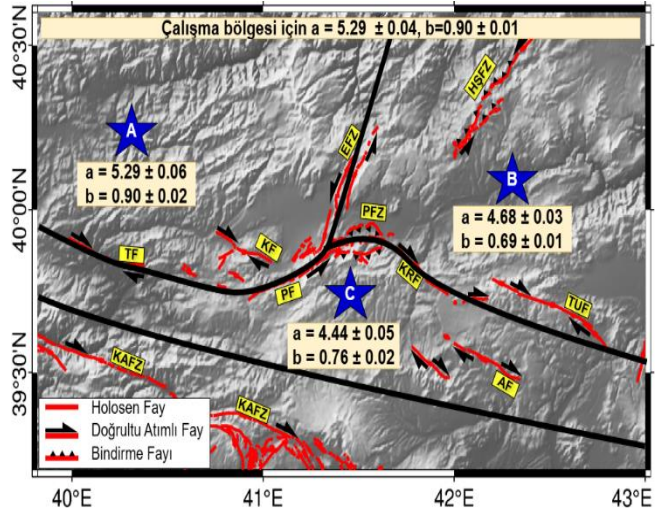
*a: Regresyon sabiti, b: Regresyon sabitinin standart sapması, c: Magnitüd katsayısı, d: Magnitüd katsayısının standart sapması, e: İlişki Seviyesi'ni ifade etmektedir.

Bir bölgede meydana gelen depremlerin sayısı ile büyüklükleri arasındaki doğrusal magnitüd-sıklık ilişkisi deprem istatistiğinin temelini oluşturur ve günümüzde deprem etkinliğinin bir ölçütü olarak kullanılmaktadır. Depremsellik ve deprem magnitüdlarının olasılık dağılımlarını belirlemek için yaygın şekilde kullanılan, deprem magnitüdü M_y 'i, birim zamandaki bütün depremlerin sayısı N_y 'ye bağlayan istatistiksel bağıntı aşağıda (Denklem 1) gösterildiği gibi ifade edilmiştir;

$$\log_{10} N(M) = a - b.M \quad (1)$$

Burada, a parametresi bölgenin genel sismik aktivite seviyesini ifade eder ve inceleme alanının genişliğine, gözlem dönemine ve deprem düzeyine bağlı olarak değişiklik gösterirken b değeri ise bölgenin tektonik karakteristiğini belirleyen bir parametre olarak kabul edilmektedir (Gutenberg ve Richter, 1944; Wyss, 1973; Utsu, 1999). İlgili alanın deprem aktivitesini ve potansiyel riskini sayısal olarak karakterize eden sismik parametrelerden, a parametresi; genel sismisite seviyesini yansıtırken, b parametresi, bölgedeki gerilim birikimi ve deprem üretkenliğinin dinamiklerine ışık tutmaktadır. Yüksek a değeri, çalışma alanındaki sismik aktivitenin yoğun olduğunu ve daha fazla sayıda küçük depremin meydana geldiğini gösterirken, büyüklük-frekans dağılımının eğimini belirleyen ve genellikle 1 civarında gözlemlenen b değerinin düşük ya da yüksek olması bölgedeki stres dağılımı, tektonik özellikler ve gerilim birikiminin dinamiğine dair ipuçları sunar (Popandopoulos ve ark., 2016; Bayrak ve ark., 2017; Fiedler ve ark., 2018; Spassiani ve ark., 2023). Bir bölgede gözlenen düşük b değerleri, büyük depremlerin görece daha sık meydana geldiğini, yüksek b değerleri ise bölgede küçük depremlerin daha baskın olduğunu ifade eder ve fay sistemlerindeki gerilim birikiminin artması veya azalması gibi tektonik süreçlerin bir göstergesi olarak yorumlanabilir (Scholz, 2015; Godano ve ark., 2022). Global ölçekte b değerinin 1 ile 1.6 arasında değiştiği öne sürülmüş ve sığ depremler için $b=0.9\pm0.02$, orta ve derin depremler için $b=1.2\pm0.2$, Anadolu plakası için ise $b=0.9\pm0.2$ olarak hesaplanmıştır (Gutenberg ve Richter, 1954). Ancak farklı kıtalar, bölgeler, zaman aralıkları ve sismik kaynaklar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda b -değerini, Guo ve Ogata (1977) Japonya için 0.7-1.3 arasında, Bath (1983) İsveç için 0.84, Monterroso ve Kulhanek (2003), Orta Amerika için kıtasal çerçevede 0.6-1.6 arasında hesaplamıştır. Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde gerçekleştirilen hesaplamalarda ise Yılmaztürk ve Burton (1999) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, güney bölgelerde b -değerinin 0.33-1.13 arasında, Sayıl ve Osmanşahin'in (2008) Batı Anadolu'yu ele alan çalışmasında 0.42-0.66 arasında, Bayrak ve ark.'ın (2015)'de DAFZ'ı segment bazında ele alan çalışmalarında en düşük b değeri Bingöl-Karlıova'da olmak üzere 0.63-0.91 arasında ve Ali ve Akkoyunlu (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise Karlıova üçlü kavşağı için b değeri 0.97 - 1.28 arasında hesaplanmıştır. Büyüklük-frekans dağılımının temelini oluşturan a ve b parametrelerinin belirlenmesinde maksimum olabilirlik yöntemleri ve istatistiksel belirsizlik analizleri gibi çeşitli yöntemler kullanılsa da lineer en küçük kareler regresyonu ve maksimum benzerlik metotları literatürde en sık kullanılan iki yöntemdir (Utsu, 1965; Aki, 1965; Öztürk, 2012; Ju, 2023). Bu çalışmada, Erzurum ve çevresindeki üç ayrı alt-bölge için Gutenberg-Richter (G-R) yasasındaki ' a ' ve ' b ' parametrelerinin tahmini, doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemiyle yapılmıştır (Şekil 9). Bu yaklaşım, özellikle küçük büyüklüklerdeki verilerin log-kümülatif dağılımında görülebilecek sapmaları daha iyi temsil edebilmekte model parametrelerinin daha güvenilir şekilde belirlenmesine olanak tanımaktadır. Böylelikle

veri ile model arasındaki uyum doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemi ile optimize edilebilmektedir (Marzocchi ve Sandri, 2003).



Şekil 9: Gutenberg-Richter yasasına göre çalışma bölgesinin tümü ve alt bölgeleri için kestirilen a ve b değerleri

4. Tartışma ve Sonuçlar

Çalışma kapsamında hesaplanan TUSAGA-Aktif istasyonlarının postsismik (deprem sonrası) dönem hızları incelendiğinde, uzun dönemden hesaplanan intersismik hızlarla arasında 1-2 mm fark olduğu görülmektedir. Bu hızlar postsismik döneme ait 1.5 yıllık veriden elde edilmiş olup incelenen dönemde standart sapma sınırları içerisinde kalmaktadır. Bu hızlar kullanılarak gerçekleştirilen epok kaydırma sonucunda elde edilen 2023 Kahramanmaraş depremlerinden kaynaklı kosismik yer değiştirmeler incelendiğinde literatürde yer alan çalışmalarla uyumlu olarak bölgede GB yönlü bir atımın baskın olduğu görülmektedir (Eyübagil ve ark., 2023; Özkan ve ark., 2023). Bu durum sol yanal atım karakterine sahip fayların ürettiği Pazarcık (Mw:7.7) ve Ekinözü (Mw:7.6) depremlerinin dış merkezleri ve odak mekanizma çözümleri ile uyum içerisinde (AFAD, KRDAE).

Ergintav ve ark. (2024) tarafından yürütülen çalışmada Erzurum bölgesinde meydana gelen toplam yer değiştirmeler bölgedeki TUSAGA-Aktif istasyonları kullanılarak hesaplanmış olup ERZR noktasında E ve N bileşenleri için sırasıyla -2.82 ve -15.63 olarak hesaplanmıştır. ERZR noktası çevresinde yer alan kampanya tipi noktalarda ise yer değiştirmeler, Ergintav ve ark. (2024)'le uyumlu şekilde N bileşeninde daha baskın olup -12 mm civarındadır.

Kosismik yer değiştirmeler bileşen bazında incelendiğinde, E bileşeni için yer değiştirmeler minimum 1.8 mm (BGOZ) ile maksimum -24 mm (ILCS) arasında değişirken ağda yer alan noktaların 6'sında 10 mm'den büyüktür. Bu değerler, noktaların E bileşenindeki yıllık hızlarının ortalaması olan ve 1 yıllık dönemde gerçekleşmesi beklenen yer değiştirmenin (~25 mm) %40'ının Kahramanmaraş depremlerinde kosismik yer değiştirme olarak meydana geldiğini göstermektedir. N bileşeni incelendiğinde ise kosismik

yer değiştirmelerin 1 mm ile -29 mm arasında değiştiği görülmektedir. E bileşeninden farklı olarak, ağda yer alan kampanya noktalarının 9'unda N bileşenindeki yer değiştirmeler 10 mm'den büyüktür. Ağda yer alan noktaların N bileşeni için yıllık ortalama intersismik hızlarının ~15 mm olduğu dikkate alındığında, bir yıllık yer değiştirmenin %67'sinin Kahramanmaraş depremlerinde meydana geldiği görülmektedir.

Kosismik yer değiştirmeler vektörel olarak incelendiğinde minimum ve maksimum yer değiştirmeler 2 mm ile 30 mm arasında elde edilmiştir. Buna göre maksimum yer değiştirme EF ile KF arasında kalan bölgede yer alan OTPE noktasında meydana gelmiştir. Ancak saha gözlemleri sırasında bu noktanın bulunduğu bölgede arkeolojik kazı çalışmalarının yürütüldüğü bilgisine ulaşılmıştır. Bu nedenle ağda meydana gelen kosismik yer değiştirmelerin çoğunlukla 20 mm'den küçük olması dikkate alındığında OTPE noktasındaki yer değiştirmenin tamamının kosismik deformasyonu yansıtmayabileceği, bir kısmının bölgedeki kazı çalışmalarından kaynaklı lokal deformasyon olabileceği değerlendirilmiştir. Bu noktanın gelecekte bölgede yapılacak deprem tehlike analizi çalışmalarında kullanılması durumunda analiz sonuçlarını etkileyebileceği değerlendirilmektedir. Benzer bir durum ILCS noktası için de geçerlidir. Bu noktada yer değiştirme miktarı vektörel olarak 26 mm olarak elde edilmiş olup bu noktaya 15-20 km uzaklıktaki SVSC ve YDAG noktalarındaki yer değiştirmeler sırasıyla 10 ve 12 mm olarak elde edilmiştir. Bu nedenle Kahramanmaraş depremlerinin merkez üssüne en uzak noktalardan biri olan ILCS noktasındaki bu yer değiştirmenin bir kısmının lokal deformasyonun etkisi olabileceği değerlendirilmektedir. Ancak bu noktada lokal deformasyona neden olan faktörler bilinmemekle birlikte belirtilen durumlar lokal deformasyonun varlığına işaret etmektedir. ILCS ve OTPE dışında kalan noktalarda maksimum yer değiştirmeler EFZ'nin batı kısmında meydana gelmiştir. Bu bölgede maksimum yer değiştirme GB yönünde 18 mm ile KZDR noktasında elde edilmiştir.

PF ve PFZ üzerinde yer alan PLND ve ABZG noktalarında hesaplanan yer değiştirmeler 3 mm'den küçüktür. Bu yer değiştirmelerin ilgili noktalardaki belirsizlik değerlerinden küçük olması nedeniyle istatistiksel olarak anlamsız olduğu değerlendirilmiştir. PF'nin kuzeyinde yer alan GYRT ve BRKL noktalarında ise ortalama 15 mm civarında yer değiştirmeler hesaplanmıştır. Kahramanmaraş depremlerine en yakın bölge PF, PFZ ve KRF'nin güneyidir. Bu bölgede yer alan noktalardaki yer değiştirmeler 10.5 mm ile 18.5 mm arasında değişmektedir. Bu bölgede AZZY ve KNKL noktalarındaki yer değiştirmeler batı yönündeyken, ADNL ve KLYC noktasında güneybatı ve YCGL noktasında ise güneydoğu yönündedir. Bu bölgedeki seyrek nokta yoğunluğundan dolayı bölgesel yer değiştirmeler yüksek çözünürlükle hesaplanamamıştır. Yer değiştirmelerdeki bu aşılabilir farklılığın standart sapma değerlerinden yüksekliği dikkate alındığında, bu farklılığın bölgenin tektonik yapısı ile ilişkisinin olup olmadığının belirlenebilmesi için gelecekteki çalışmalarda yüksek çözünürlüklü bir jeodezik ağ kurulması gerekmektedir. Böylelikle daha yoğun bir jeodezik ağ ile bölgenin

intersismik dönemine ait veriler elde edilecek ve bu veriler sismik aktivitelerle ilişkilendirilerek bölgenin sismik parametrelerinin yorumlanmasına ve deprem tehlike analizi çalışmalarına katkı sağlayacaktır.

Deprem oluşumunun fiziki, bölgenin tektonik dinamikleri ve toplam sismik aktivite ile ilişkili olan a ve b parametreleri, öncelikle Erzurum ve çevresi tüm bir çalışma alanı olarak kabul edilerek sonrasında ise 3 ayrı bölgeye ayrılarak lineer olmayan regresyon yöntemiyle hesaplanmıştır. Erzurum ve çevresinde bulunan tüm sismik kaynakların bir arada değerlendirildiği tüm kataloğu içerisine alan hesaplamalarda $a=5.38$, $b=0.80$ olarak elde edilmiştir. Erzurum'un B-KB'sında bulunan Tercan Fayı, KF ve EFZ sismik kaynaklarını içeren A bölgesi için sismik parametreler; $a=5.29$, $b=0.90$, D-KD'sunda bulunan HŞFZ, KYFZ, PFZ ve Tutak Fayı'nı içeren B bölgesi için $a=4.68$, $b=0.69$, Güney bölümünde bulunan Çat Fay Zonu, PLFZ, Kazbel FZ ve Akdağ FZ'yi içerisine alan C bölgesi için ise $a=4.44$, $b=0.76$ olarak hesaplanmıştır. Bölgedeki tüm sismik kaynakların bir arada değerlendirilerek elde edildiği bulgulara 4 - 6 arasında hesaplanan a parametresi bölgenin genelinde orta-yüksek derece sismik aktivite gözlemlendiğini, global değer olarak kabul edilen 1'den küçük olarak kestirilen b parametresinin ise bölgedeki çoklu ve heterojen tektonik yapının sıklıkla olmasa da büyük depremler üretebileceğini işaret etmektedir (Wiemer ve Wyss (2002). Tüm çalışma alanında bulunan farklı karaktere sahip fay zonlarının içerdiği bu bulgular bölgenin geçmiş dönem sismik aktivitesi ve yaklaşık 30 yılda bir meydana gelen büyük magnitudlü deprem üretme karakteriyle birlikte değerlendirildiğinde, elde edilen sonuçlarla bölge tektoniğinin uyum içerisinde olduğu düşünülmektedir. Sismik aktivite yoğunluğunu yansıtan a parametresi sırasıyla A, B ve C bölgeleri için 5.29, 4.68 ve 4.44 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen değerlere göre bölgedeki sismik aktivitenin Tercan Fayı, KF ve EFZ'nin bulunduğu A bölgesinde yoğunlaştığı görülse de B ve C bölgelerinde elde edilen değerlerin 4'ten büyük oluşu tüm bölgelerin orta ve yüksek derece sismik aktiviteye sahip olduğu göstermektedir. Diğer bölgelere oranla A bölgesinde elde edilen yüksek a parametre değeri bölgenin geçmiş dönem sismik aktivitesi ile karşılaştırıldığında A bölgesinde $M < 4$ depremlerin çok daha sıklıkla meydana geldiği görülmektedir, bu nedenle her üç bölge özelinde kestirilen değerlerin bölgenin deprem üretme karakteriyle uyumlu olduğu düşünülmektedir (Şekil 2).

Yüksek gerilim oranlarına ve deformasyon hızına sahip bölgeler veya fay zonları genellikle daha düşük b değerleri sergilerken, düşük gerilim birikimi olan alanlarda ise daha yüksek b değerleri gözlenmektedir (Scholz, 1968; Schorlemmer ve ark., 2005; Lacioglu ve ark., 2023). Buna ek olarak birçok araştırmacı tarafından yer kabuğundaki gerilimle ilişkili olduğu belirtilen b değeri çalışma alanında sırasıyla A, B ve C bölgeleri için 0.90, 0.69 ve 0.76 olarak hesaplanmıştır. Buna göre çalışma alanında b değeri için elde edilen bulgular, A bölgesinde küçük depremlerin büyük magnitudlü depremlere oranla daha sık ve yoğun olduğunu, stresin periyodik olarak küçük magnitudlü kırılmalarla boşaldığını göstermektedir. B bölgesinde oldukça düşük gözlenen b değeri bölgede büyük depremlerin küçüklere

oranla daha fazla olduğunu göstermekte ve yüksek stres birikimine işaret etmektedir. Erzurum kent merkezinin doğusunda yer alan B bölgesinde diğer bölgeler oranla daha fazla enerji biriktiren faylar olduğu ve meydana gelmesi halinde bu bölgenin potansiyel olarak daha yıkıcı deprem riski taşıdığı düşünülmektedir. Erzurum'un güneyinde yer alan C bölgesinde elde edilen b değerleri ise diğer bölgelere oranla orta seviyede elde edilse de 1'den düşük olarak hesaplanan parametre değeri bölgede kısmen stres boşalımı olduğunu, ancak büyük deprem potansiyelinin de bulunduğunu göstermektedir. Tüm bölgeler için elde edilen sismik parametre değerleri bir arada değerlendirildiğinde A bölgesinde bulunan faylarda biriken enerjinin diğer bölgelere oranla daha sık gerçekleşen düzenli küçük depremlerle boşaldığı, B bölgesinde A bölgesine göre daha az yoğunlukta sismik aktivite gözlenmesine karşın büyük depremler üretmeye daha yatkın tektonik unsurlar bulunduğu ve C bölgesinin ise iki bölgeye oranla daha dengeli bir tehlike profili taşıdığı sonucuna ulaşılmaktadır. Elde edilen bulgular bölgenin tarihsel ve aletsel dönem etkinliğiyle karşılaştırıldığında A bölgesindeki yüksek sismik aktivitenin bölgeyle uyumlu olduğu düşünülmektedir. B ve C bölgelerinin bulunduğu Erzurum'un Güney ve özellikle Doğusunda kalan bölgelerin tarihsel (1766, 1859, 1868-Pasinler) ve aletsel (1901, 1952-Pasinler, 1924-Köprüköy, 1983-Şenkaya-Horasan) dönemde büyük depremler ürettiği göz önünde bulundurulduğunda sonuçların bölgenin heterojen tektonik karakteriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Bölgenin gerilme oranlarına ilişkin bulgular sunan ve bu çalışma sonucunda 3 farklı bölge için elde edilen sonuçlar literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Genel anlamda gerçekleştirilen çalışmaların çoğunda Anadolu plakası bir bütün olarak ele alınarak daha sıklıkla KAFZ, DAFZ ve Karlıova üçlü kavşağına odaklanılmış ve Erzurum bölgesi ile çevresindeki tektonik unsurlar tehlike analizi kapsamında özel olarak incelenmemiştir. Tüm Anadolu'nun bütün olarak ele alındığı çalışmalarda katalog ve yöntem farklılıkları bulunmakta olup Erzurum bölgesini içeren geniş bir alanda b-değerleri 0.55 - 0.80 arasında değişmektedir (Yilmaztürk ve ark., 1998; Bayrak ve ark., 2002; 2005). Bölgeyi daha dar bir ölçekte inceleyen çalışmalarda ise KDFZ için kestirilen b değerleri ise 0.59 - 1.02 arasında değişmektedir (Alptekin, 1978; Erdik ve ark., 1985; Kayabalı, 2002). Ayrıca, yakın zamanda gerçekleştirilen çalışmalarda ise KDFZ ve çevresini kapsayan bir alanda b değeri 0.70-1.15 arasında hesaplanmış, 2015 yılından itibaren b değerinin özellikle Erzurumun doğusunda düşmeye başladığı ve KDFZ ve çevresinde büyük depremler yaşanabileceği belirtilmiştir (Öztürk ve ark., 2008; Bayrak ve ark., 2008, 2009; Maden ve Öztürk, 2015; Öztürk ve Bayrak, 2012; Öztürk, 2017). Tüm bulgulara ek olarak Öztürk, (2018) ve Özer ve ark. (2022)'de HŞFZ ve PFZ için hesaplanan 1'in altındaki b değerleri göz önünde bulundurulduğunda bu çalışmadan elde edilen sismik parametre değerlerinin hem literatürdeki çalışmalarla hem de bölgenin tektonik yapısı ile uyum içerisinde olduğu düşünülmektedir.

Bu çalışmada, 6 Şubat 2023'de meydana gelen Kahramanmaraş depremleri sonrasında Erzurum ve çevresinde kosismik hız ve yer değiştirmelerin

belirlenmesi ile bölgenin sismik parametrelerinin (a ve b değerleri) hesaplanması amaçlanmıştır. Elde edilen bulgular, Kahramanmaraş depremlerinin Erzurum ve çevresinde 2.5–30 mm aralığında GB yönlü kosismik yer değiştirmelere neden olduğunu ve bu deformasyonların sol yanal atımlı fay karakteriyle uyumlu olduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca, farklı alt bölgelere göre hesaplanan a ve b parametreleri, A bölgesinde küçük depremlerin daha sık olduğunu, B bölgesinde ise düşük b değeriyle büyük depremlere yönelik potansiyelin arttığını ortaya koymuştur. İleride yapılacak çalışmalarda, bu çalışmada sunulan bulguların, zemin davranışı modelleri ve yapısal risk analizleriyle entegre edilerek yerel yönetimler için afet yönetim planlarına doğrudan katkı sağlayacak şekilde gerçekleştirilmesinin bölgenin maruziyeti açısından önemli olduğu düşünülmektedir. Özellikle B bölgesinde tespit edilen düşük b değeri ve yüksek stres birikimi, bu alandaki kritik altyapıların (hastaneler, okullar) ve eski yapı stokunun güçlendirilmesini acil bir öncelik haline getirmektedir. Bununla birlikte, OTPE noktasında gözlenen yerel anomaliler, mevcut kampanya tipi ölçmelerin sınırlılıkları ve özellikle PFZ ve KRF gibi faylar üzerinde GNSS ağının seyrek nokta yoğunluğu yüksek çözünürlüklü deformasyon analizini sınırlayabilmektedir. Bu nedenle bölgenin yüksek çözünürlüklü bir jeodezik ağ ile izlenmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda TÜBİTAK 1001 (UDAP), çağrısı kapsamında desteklenen 124R029 numaralı proje ile bölge, daha yoğun ve yüksek çözünürlüklü bir ağ ile gelecek yıllarda takip edilecektir.

Bilgilendirme/Teşekkür

Bu çalışma "Erzurum Civarındaki Fayların Kinematığının Jeodezik Ölçülerle Belirlenmesi" isimli 22.FEN.BİL.30 numaralı AKÜ-BAP projesi tarafından desteklenmektedir. GNSS ağında yer alan noktalara ilişkin veri temininin sağlanmasında çalışmayı destekleyen Tapu Kadastro Genel Müdürlüğü ve Harita Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

Araştırmacıların katkı oranı

Halil İbrahim Solak: Arazi Çalışması, Modelleme, Makale Yazımı, Görselleştirme, Tartışma, Bulgular

Cemil Gezgın: Literatür Taraması, Makale Yazımı, Tartışma, Bulgular

Ahmet Sami Kılınc: Arazi Çalışması, Modelleme, Makale Yazımı

İbrahim Tiryakioğlu: Arazi Çalışması, Modelleme, Literatür Taraması, Makale düzenleme, Tartışma, Bulgular

Tamer Baybura: Arazi Çalışması

Kayhan Aladoğan: Arazi Çalışması

Ece Bengünaz Çakanşimşek: Arazi Çalışması, Modelleme

Çatışma Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

- AFAD. (2025). *Deprem Dairesi Kataloğu*. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Retrieved from <http://www.deprem.gov.tr/sarbis/Veritabani/DDA.aspx?param=1>.
- Aki, K. (1965). Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo University*, 43, 237–239.
- Aksu, B. (2014). Erzurum Şehir Merkezinde Kuzey Güney Doğrultulu Bir Hat Boyunca Yer Alan Yapı Stoğunun, Zemin ve Yapı Periyodu Açısından Değerlendirilmesi (Master's thesis). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Aktuğ, B., Özener, H., Doğru, A., et al. (2016). Slip rates and seismic potential on the East Anatolian Fault system using an improved GPS velocity field. *Journal of Geodynamics*, 94–95, 1–12.
- Aktuğ, B., Tiryakioğlu, İ., Sözbilir, H., Özener, H., Özkaymak, Ç., Yiğit, C. O., Solak, H. İ., Eyübagil, E. E., Gelin, B., Tatar, O., & Softa, M. (2021). GPS-derived finite source mechanism of the 30 October 2020 Samos earthquake, $M_w = 6.9$ in Aegean extensional region. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30, 718–737. <https://doi.org/10.3906/yer-2101-18>.
- Akyürek, Ö., & Arslan, O. (2018). Kocaeli ili ve çevresinde (1900-2016) yılları arasında gerçekleşen tarihsel depremlerin konumsal İstatistik analizi. *Geomatik*, 3(1), 48-62.
- Aladoğan, K., Alkan, M. N., Tiryakioğlu, İ., Yavaşoğlu, H. H., Solak, H. İ., Gezgin, C., ... & Köse, Z. (2024). Preliminary results on deformations of the Central North Anatolian Fault Zone. *Hittite Journal of Science and Engineering*, 11(3), 115–122.
- Ali, S. M., & Akkoyunlu, M. F. (2022). Statistical analysis of earthquake catalogs for seismic hazard studies around the Karliova Triple Junction (eastern Turkey). *Journal of African Earth Sciences*, 186, 104436.
- Alptekin, Ö. (1978). Magnitude-frequency relationships and deformation release for the earthquakes in and around Turkey. Karadeniz Technical University.
- Ambraseys, N., & Finkel, C. (2006). Türkiye’de ve Komşu Bölgelerde Sismik Etkinlikler 1500–1800 (M. Koçak, Trans.). TÜBİTAK Yayınları.
- Ambraseys, N. (2009). Earthquakes in the Mediterranean and Middle East: A multidisciplinary study of seismicity up to 1900. Imperial College Press.
- Argus, D. F., & Heflin, M. B. (1995). Plate motion and crustal deformation estimated with geodetic data from the Global Positioning System. *Geophysical Research Letters*, 22(15), 1973–1976.
- Aydın, U. (2011). Erzurum-Muş-Oltu (Erzurum) arasındaki yüzey kayaçlarının soğurma özelliklerinin incelenmesi (Doctoral dissertation). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Barka, A. A., & Kadinsky-Cade, K. (1988). Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics*, 7(3), 663–684.
- Barka, A. A., & Gülen, L. (1989). Complex evolution of the Erzurum Basin (eastern Turkey). *Journal of Structural Geology*, 11(3), 275–283.
- Bath, M. (1983). Earthquake magnitude—recent research and current trends. *Earth-Science Reviews*, 17(4), 315–398.
- Baykal, O., Tarı, E., ve Coşkun, Z., (2009). Mühendislik Ölçmeleri: 2 Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Bayrak, Y., Öztürk, S., Çınar, H., Kalafat, D., Tsapanos, T. M., Koravos, G. C., & Leventakis, G. A. (2009). Estimating earthquake hazard parameters from instrumental data for different regions in and around Turkey. *Engineering Geology*, 105(3–4), 200–210.
- Bayrak, E., Özer, C., & Perk, S. (2020). Stress tensor and Coulomb analysis for Erzurum and its surroundings. *Turkish Journal of Earthquake Research*, 2(1), 101–114.
- Bayrak, E., Yılmaz, Ş., Softa, M., Türker, T., & Bayrak, Y. (2015). Earthquake hazard analysis for East Anatolian Fault Zone, Turkey. *Natural Hazards*, 76(2), 1063–1077.
- Bayrak, E., Yılmaz, Ş., & Bayrak, Y. (2017). Temporal and spatial variations of Gutenberg-Richter parameter and fractal dimension in Western Anatolia, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 138, 1–11.
- Bayrak, Y., Yilmaztürk, A., & Öztürk, S. (2002). Lateral variations of the modal (a/b) values for the different regions of the world. *Journal of Geodynamics*, 34(5), 653–666.
- Bayrak, Y., Yilmaztürk, A., & Öztürk, S. (2005). Relationships between fundamental seismic hazard parameters for the different source regions in Turkey. *Natural Hazards*, 36(3), 445–462.
- Bayrak, Y., Öztürk, S., Koravos, G. C., Leventakis, G. A., & 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*, 8(1), 109–122. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-109-2008>.
- Bezioğlu, M., Ucar, T., & Yiğit, C. Ö. (2023). Investigation of the capability of multi-GNSS PPP-AR method in detecting permanent displacements. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 8(3), 251–261.
- Bikçe, M. (2015). Türkiye’de hasara ve can kaybına neden olan deprem listesi (1900–2014). *İçinde*, 3(1), 1–10.
- Das, R., Wason, H. R., Gonzalez, G., Sharma, M. L., Choudhury, D., Lindholm, C., ... & Salazar, P. (2018). Earthquake magnitude conversion problem. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(4), 1995–2007.
- De Santis, A., Cianchini, G., Favali, P., Beranzoli, L., & Boschi, E. (2011). The Gutenberg-Richter law and entropy of earthquakes: Two case studies in Central Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(3), 1386–1395.
- Demirtaş, R., & Yılmaz, R. (1993). 13 Mart 1992 Erzurum Depremi Raporu. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Daire Başkanlığı.
- Demirtaş, R., Penirci, O., & Yağyemez, B. (2010). Erzurum İli Büyükşehir Belediyesi Yerleşim Alanının 1/5000 Ölçekli Nazım İmar Planına Esas Jeolojik-Jeoteknik Etüt Raporu Kapsamında Erzurum Fay Zonunun Paleosismolojik ve Yüzey Faylanma Tehlike Zonu

- (Fay Tampon Bölge) Açısından Değerlendirilmesi. Retrieved from <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15047.34723>.
- Doğan, A., Yıldırım, C., Nefeslioğlu, A. H., & Emre, Ö. (2004). 25 Mart (Mw 5.5) ve 28 Mart (Mw 5.5) 2004 Aşkale (Erzurum) Depremleri Değerlendirme Raporu. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi.
- Duman, T. Y., Emre, Ö., Özalp, S., Çan, T., Olgun, Ş., Elmacı, H., & Şaroğlu, F. (2017). Türkiye ve Yakın Çevresindeki Diri Faylar ve Özellikleri, Türkiye Sismotektonik Haritası Açıklama Kitabı (Ed. T. Y. Duman). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayınlar Serisi.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Olgun, Ş., Elmacı, H., & Şaroğlu, F. (2018). Active fault database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8), 3229–3275.
- Erdogan, H., Oktar, O., Gezgın, C., Poyraz, F., Arslan, N., & Yilmaztürk, F. (2021). Investigating the effects of groundwater level changes on GNSS observations in the Konya Closed Basin. *Earth Sciences Research Journal*, 25(4), 405-414. <https://doi.org/10.15446/esrj.v25n4.92490>
- Erdik, M., Doyuran, V., Akkaş, N., & Gülkan, P. (1985). A probabilistic assessment of the seismic hazard in Turkey. *Tectonophysics*, 117(3-4), 295–344.
- Ergintav, S., Vernant, P., Tan, O., Karabulut, H., Özarpacı, S., Floyd, M., ... & Farımaç, İ. (2024). Unexpected far-field deformation of the 2023 Kahramanmaraş earthquakes revealed by space geodesy. *Science*, 386(6719), 328-335.
- Eyidoğan, H. (1987). Levha-içi depremlerin göçü. *Jeofizik*, 1(1), 103–110.
- Eyübagil, E. E., Yaşar, Ş. Ş., Çakanşimşek, E. B., Duman, H., Solak, H. İ., Özkan, A., ... & Özener, H. (2023). 6 Şubat 2023 Sofalaca-Şehitkamil Gaziantep (Mw: 7.7) ve Ekinözü Kahramanmaraş (Mw: 7.6) Depremlerinin GNSS Gözlemlerine Bağlı Öncül Sonuçları. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(1), 160–176.
- Fiedler, B., Hainzl, S., Zöller, G., & Holschneider, M. (2018). Detection of Gutenberg–Richter b-value changes in earthquake time series. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(5A), 2778–2787.
- Geffers, G. M., Main, I. G., & Naylor, M. (2023). Accuracy and precision of frequency–size distribution scaling parameters as a function of dynamic range of observations: Example of the Gutenberg–Richter law b-value for earthquakes. *Geophysical Journal International*, 232(3), 2080–2086.
- Gezgın, C., Tiryakioğlu, İ., Ekercin, S., & Gürbüz, E. (2020). Monitoring of tectonic movements of southern part of the Tuz Gölü Fault Zone (TGFZ) with GNSS observations. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), 456–464. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.690886>.
- Gezgın, C., Ekercin, S., Tiryakioğlu, İ., Aktuğ, B., Erdoğan, H., Gürbüz, E., & Kaya, E. (2022). Determination of recent tectonic deformations along the Tuzgölü Fault Zone in Central Anatolia (Turkey) with GNSS observations. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 31(1), 20–33.
- Godano, C., Tramelli, A., Petrillo, G., Bellucci Sessa, E., & Lippiello, E. (2022). The dependence on the Moho depth of the b-value of the Gutenberg–Richter law. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 112(4), 1921–1934.
- Gök, Y., Altaş, N. T., & Zaman, S. (2007). Aşkale depremleri ve etkileri. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 12(17), 161–184.
- Gull, A., Liaqut, A., & Mahmood, S. (2023). Landslide Risk Assessment using Geo-spatial Technique: A study of District Abbottabad, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Advanced Geomatics*, 3(2), 47-55.
- Guo, Z., & Ogata, Y. (1997). Statistical relations between the parameters of aftershocks in time, space, and magnitude. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B2), 2857–2873.
- Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34(4), 185–188.
- Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1954). *Seismicity of the Earth and Related Phenomena*. Princeton University Press.
- Güler, T., Kürçer, A., Yıldırım, M. K., Avcu, İ., Özalp, S. (2023). Erzurum Fay Zonu’nun Deprem Potansiyeli ve Erzurum Kenti Üzerine Olası Etkileri, (Doğu Anadolu, Türkiye). *Uluslararası Katılımlı 75. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı*, 112.
- Gülal, E., Tiryakioğlu, İ., Kalyoncuoğlu, U. Y., Erdoğan, S., Dolmaz, M. N., & Elitok, O. (2016). The determination of relations between statistical seismicity data and geodetic strain analysis, and the analysis of seismic hazard in southwest Anatolia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(1), 138–155.
- Habib, W., Mahmood, S., Noor, S., Saleem, A., Siraj, M., & Ahmad, H. (2023). A post earthquake damage assessment using GIS in district Mirpur, Pakistan. *Advanced GIS*, 3(2), 53-58.
- Herring, T. A., Melbourne, T. I., Murray, M. H., Floyd, M. A., Szeliga, W. M., King, R. W., et al. (2016). Plate Boundary observatory and related networks: GPS data analysis methods and geodetic products: PBO data analysis methods and products. *Reviews of Geophysics*, 54(4), 759–808. <https://doi.org/10.1002/2016RG000529>
- Herring, T. A., Floyd, M. A., Perry, M., King, R. W., & McClusky, S. C. (2018). *Gamit/globk for GNSS. GNSS Data Processing and Analysis with GAMIT/GLOBK and Track Hotel Soluxe*, Bishkek, Kyrgyzstan, 2–7.
- Iqbal, A., Nisar, A., & Mahmood, S. (2023). Geospatial assessment of GLOF hazards in Hunza-Nagar, Gilgit-Baltistan, Pakistan. *Advanced Remote Sensing*, 3(2), 47-57.
- İRAP. (2021). İl Afet Risk Azaltma Planı Hazırlama Kılavuzu. AFAD Planlama ve Risk Azaltma Daire Başkanlığı. Retrieved from <https://irap.afad.gov.tr>.
- İrkin, Z., & Satılmış, S. (2023). 1901 Erzurum depremi ve afet yönetimi. *Osmanlı Medeniyeti Araştırmaları Dergisi*, 17, 129–151.
- Ju, A. (2023). Modelling of earthquake b-and a-values using least squares and maximum likelihood estimate methods in different tectonic regions of the world. *Asian Research Journal of Mathematics*, 19(1), 52–60.

- Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE). (2025). Deprem Kataloğu. Retrieved from <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/son-depremler/liste-halinde/>.
- Kankanamge, H. P. N. K., & Mahmood, S. (2024). Post-Flood Disaster Management Challenges and Issues in the Bulathsinghala Divisional Secretariat Division, Sri Lanka: A Comprehensive Analysis and Strategic Framework for Resilience and Recovery. *Advanced Geomatics*, 4(1), 09-16.
- Kayabali, K. (2002). Modeling of seismic hazard for Turkey using the recent neotectonic data. *Engineering Geology*, 63(3-4), 221-232.
- Keskin, M., Pearce, J. A., & Mitchell, J. G. (1998). Volcano-stratigraphy and geochemistry of collision-related volcanism on the Erzurum-Kars Plateau, Northeastern Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85(1-4), 355-404.
- Khemis, A., & Athmani, A. (2023). Regional relations converting the surface and body wave magnitudes to moment magnitude for Northern Algeria using the general orthogonal regression method. *Acta Geophysica*, 71(6), 2747-2762.
- Koca, B., & Ceylan, A. (2018). Uydu konum belirleme sistemlerindeki (GNSS) güncel durum ve son gelişmeler. *Geomatik*, 3(1), 63-73.
- 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(1-3), 177-195.
- Chapman, D., Metje, N., & Stark, A. (2010). Introduction to tunnel construction. Taylor & Francis Group, 1st edn. 417.
- Koçyiğit, A., & Canoğlu, M. C. (2017). Neotectonics and seismicity of Erzurum pull-apart basin, East Turkey. *Russian Geology and Geophysics*, 58(1), 99-122. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.04.015>.
- Konak, H., Nehbit, P. K., Karaöz, A., & Cerit, F. (2020). Interpreting deformation results of geodetic network points using the strain models based on different estimation methods. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 5(1), 49-59. <https://doi.org/10.26833/ijeg.581584>
- Kurt, A. I., Özbakır, A. D., Cingöz, A., Ergintav, S., Doğan, U., & Özarpacı, S. (2023). Contemporary velocity field for Turkey inferred from combination of a dense network of long-term GNSS observations. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 32(3), 275-293.
- Kürçer, A., & Özalp, S. (2022). Yedisu Segmenti'nin yaklaşık son 4000 yıllık paleosismik tarihçesi, Kuzey Anadolu Fayı, Türkiye. *Aktif Tektonik Araştırma Grubu 25. Çalıştayı (ATAG-25), Bildiri Özleri Kitabı*, 17-18.
- Lacidogna, G., Borla, O., & De Marchi, V. (2023). Statistical seismic analysis by b-value and occurrence time of the latest earthquakes in Italy. *Remote Sensing*, 15(23), 5236. <https://doi.org/10.3390/rs15235236>.
- Lazos, I., Sboras, S., Pikridas, C., Pavlides, S., & Chatzipetros, A. (2021). Geodetic analysis of the tectonic crustal deformation pattern in the North Aegean Sea, Greece. *Mediterranean Geoscience Reviews*, 3(1), 79-94. <https://doi.org/10.1007/s42990-021-00056-7>.
- Maden, N., & Öztürk, S. (2015). Seismic b-values, Bouguer gravity, and heat flow data beneath Eastern Anatolia, Turkey: Tectonic implications. *Surveys in Geophysics*, 36(4), 549-570. <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9333-3>.
- Marzocchi, W., & Sandri, L. (2003). A review and new insights on the estimation of the b-value and its uncertainty. *Annals of geophysics*, 46(6).
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., ... & Veis, G. (2000). Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B3), 5695-5719. <https://doi.org/10.1029/1999JB900351>.
- McKenzie, D. P. (1972). Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 30(2), 109-185. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb02351.x>.
- Monterroso, D. A., & Kulhánek, O. (2003). Spatial variations of b-values in the subduction zone of Central America. *Geofísica Internacional*, 42(4), 239-250.
- Müller, J. J. A. (1895). De verplaatsing van eenige triangulatie-pilaren in de residentie Tapanoeli (Samatra) tengevolge van de aardbeving van 17 mei 1892. *Natuurkundig Tijdschrift voor Nederlandsch-Indië*, 54, 1-10.
- Nava, F. A., Márquez-Ramírez, V. H., Zúñiga, F. R., Ávila-Barrientos, L., & Quinteros, C. B. (2017). Gutenberg-Richter b-value maximum likelihood estimation and sample size. *Journal of Seismology*, 21(1), 127-135. <https://doi.org/10.1007/s10950-016-9590-8>.
- Nocquet, J. M., & Calais, E. (2004). Geodetic measurements of crustal deformation in the Western Mediterranean and Europe. *Pure and Applied Geophysics*, 161(3), 661-681. <https://doi.org/10.1007/s00024-003-2468-z>.
- Noor, S., Mahmood, S., & Habib, W. (2024). Risk Assessment of Attabad lake Outburst Flooding using integrated Hydrological and Geo-spatial Approach. *Advanced Geomatics*, 4(1), 57-67.
- Oktar, O., Erdoğan, H., & Poyraz, F. (2021). Investigation of deformations with the GNSS and PSInSAR methods. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(23), 2586. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08765-x>.
- Olsson, R. (1999). An estimation of the maximum b-value in the Gutenberg-Richter relation. *Journal of Geodynamics*, 27(4-5), 547-552. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(98\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(98)00022-1).
- Öcül, M., & Şişman, A. (2023). Landslide susceptibility analysis with multi criteria decision methods; a case study of Taşova. *Advanced GIS*, 3(1), 14-21.
- Öğütçü, S., Shakor, A., Farhan, H., Investigating the effect of observation interval on GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou static PPP, *International Journal of Engineering and Geosciences*, 7(3), 294-301. <https://doi.org/10.26833/ijeg.980148>
- Özarpacı, S., Kılıç, B., Bayrak, O. C., Taşkıran, M., Doğan, U., & Floyd, M. (2024). Machine learning approach for GNSS geodetic velocity estimation. *GPS Solutions*, 28(2), 65.

- Özener, H., Arpat, E., Ergintav, S., Doğru, A., Çakmak, R., Turgut, B., & Doğan, U. (2010). Kinematics of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone. *Journal of Geodynamics*, 49(3-4), 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2010.01.003>.
- Özer, C., Kocadagistan, M. E., & Perk, S. (2019). Earthquake monitoring network of Erzurum: ATANET. *International Journal of Scientific and Technological Research*, 5(8), 35–47.
- Özer, Ç. (2019). Erzurum ve çevresinin yerel zemin etkilerinin incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 21(61), 247–257. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2020216114>.
- Özer, Ç., Öztürk, S., & Pamuk, E. (2022). Tectonic and structural characteristics of Erzurum and its surroundings (Eastern Turkey): A detailed comparison between different geophysical parameters. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 31(1), 85–108. <https://doi.org/10.3906/yer-2106-20>.
- Özkan, A., Solak, H. İ., Tiryakioğlu, İ., Şentürk, M. D., Aktuğ, B., Gezin, C., ... & Yavaşoğlu, H. H. (2023). Characterization of the co-seismic pattern and slip distribution of the February 06, 2023, Kahramanmaraş (Turkey) earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6) with a dense GNSS network. *Tectonophysics*, 866, 230041. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.230041>.
- Öztürk, S., Bayrak, Y., Çınar, H., Koravos, G. C., & Tsapanos, T. M. (2008). A quantitative appraisal of earthquake hazard parameters computed from Gumbel I method for different regions in and around Turkey. *Natural Hazards*, 47(3), 471–495. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9234-6>.
- Öztürk, S., & Bayrak, Y. (2012). Spatial variations of precursory seismic quiescence observed in recent years in the eastern part of Turkey. *Acta Geophysica*, 60(1), 92–118. <https://doi.org/10.2478/s11600-011-0044-y>.
- Öztürk, S. (2015). Depremselliğin fraktal boyutu ve beklenen güçlü depremlerin orta vadede bölgesel olarak tahmini üzerine bir modelleme: Doğu Anadolu Bölgesi, Türkiye. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(1), 1-23.
- Öztürk, S. (2017). Space-time assessing of the earthquake potential in recent years in the Eastern Anatolia region of Turkey. *Earth Sciences Research Journal*, 21(2), 67–75. <https://doi.org/10.15446/esrj.v21n2.58908>.
- 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*, 12(2), 215–236. <https://doi.org/10.1007/s11707-017-0645-0>.
- Özkaymak, Ç. (2015). Tectonic analysis of the Honaz Fault (western Anatolia) using geomorphic indices and the regional implications. *Geodinamica Acta*, 27(2-3), 110–129. <https://doi.org/10.1080/09853111.2015.1063479>.
- Popandopoulos, G. A., Baskoutas, I., & Chatziioannou, E. (2016). The spatiotemporal analysis of the minimum magnitude of completeness M_c and the Gutenberg–Richter law b-value parameter using the earthquake catalog of Greece. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 52(2), 195–209. <https://doi.org/10.1134/S1069351316010079>.
- Poyraz, F., Hastaoğlu, K. O., Koçbulut, F., Tiryakioğlu, I., Tatar, O., Demirel, M., & Sığircı, R. (2019). Determination of the block movements in the eastern section of the Gediz Graben (Turkey) from GNSS measurements. *Journal of Geodynamics*, 123, 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.11.001>.
- Reid, H. F. (1910). *The mechanics of the earthquake*. In Lawson, A. C. (Ed.), *The California earthquake of April 18, 1906* (Vol. 2, pp. 1–192). Carnegie Institution of Washington.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Çakmak, R., ... & Karam, G. (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(B5).
- Sayıl, N., & Osmanşahin, İ. (2008). An investigation of seismicity for Western Anatolia. *Natural Hazards*, 44(1), 51–64. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9141-2>.
- Scholz, C. H. (2015). On the stress dependence of the earthquake b value. *Geophysical Research Letters*, 42(5), 1399–1402. <https://doi.org/10.1002/2015GL063362>.
- Scholz, C. H. (1968). The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(1), 399–415.
- Schorlemmer, D., Wiemer, S., & Wyss, M. (2005). Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes. *Nature*, 437(7058), 539–542. <https://doi.org/10.1038/nature04094>.
- Scordilis, E. M. (2006). Empirical global relations converting M_s and M_b to moment magnitude. *Journal of Seismology*, 10(2), 225–236. <https://doi.org/10.1007/s10950-006-9012-4>.
- Seyitoğlu, G., Esat, K., & Kaypak, B. (2017). The neotectonics of southeast Turkey, northern Syria, and Iraq: The internal structure of the Southeast Anatolian Wedge and its relationship with recent earthquakes. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 26(2), 105–126. <https://doi.org/10.3906/yer-1606-5>.
- Seyitoğlu, G., Esat, K., Kaypak, B., Toori, M., & Aktuğ, B. (2018). Internal deformation of Turkish–Iranian plateau in the hinterland of Bitlis–Zagros Suture Zone. In *Developments in Structural Geology and Tectonics* (Vol. 3, pp. 161–244). Elsevier.
- Seyitoğlu, G., Aktuğ, B., Esat, K., & Kaypak, B. (2022). Neotectonics of Turkey (Türkiye) and surrounding regions: A new perspective with block modelling. *Geologica Acta*, 20(1), 1–21. <https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2022.20.1>.
- Solak, H. İ. (2024). Prediction of GNSS velocity accuracies using machine learning algorithms for active fault slip rate determination and earthquake hazard assessment. *Applied Sciences*, 15(1), 113. <https://doi.org/10.3390/app15010113>.
- Solak, H. İ., Şentürk, M. D., Çakanşimşek, E. B., Yaşar, Ş. Ş., Eyübagil, E. E., Erdoğan, A. O., ... & Tiryakioğlu, İ. (2024a). Earthquake magnitude estimation based on

- peak ground displacements recorded by high-rate GNSS for February 6, 2023, earthquake sequence in Türkiye. *The European Physical Journal Plus*, 139(9), 817.
- Solak, H. İ., Tiryakioğlu, İ., Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Aktuğ, B., Yavaşoğlu, H. H., & Özkan, A. (2024b). Recent tectonic features of Western Anatolia based on half-space modeling of GNSS data. *Tectonophysics*, 872, 230194. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.230194>.
- Solak, H. İ., & Gezgın, C. (2025). Seismic Hazard Evaluation and Strain Dynamics in the Simav Fault Zone: A Comprehensive Analysis of Earthquake Recurrence and Energy Release Patterns. *Applied Sciences*, 15(6), 3039. <https://doi.org/10.3390/app15063039>
- Spassiani, I., Taroni, M., Murru, M., & Falcone, G. (2023). Real-time Gutenberg–Richter b-value estimation for an ongoing seismic sequence: An application to the 2022 Marche offshore earthquake sequence (ML 5.7 central Italy). *Geophysical Journal International*, 234(2), 1326–1331. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac492>.
- Şafak Yaşar, Ş., Tiryakioğlu, İ., Aktuğ, B., Erdoğan, H., & Özkaymak, Ç. (2025). Determination of Anatolian Plate's tectonic block boundaries with clustering analysis using GNSS site velocities. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 16(1), 2446588. <https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2345678>.
- Şengör, A. M. C. (1979). The North Anatolian transform fault: Its age, offset, and tectonic significance. *Journal of the Geological Society*, 136(3), 269–282. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.136.3.0269>.
- Şengör, A. M. C. (1980). *Türkiye'nin neotektoniğinin esasları*. Türkiye Jeoloji Kurumu Yayını.
- Şengör, A. M. C., Görür, N., & Şaroğlu, F. (1985). Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication*, 37, 227–264.
- Şimşek, M., Özarpacı, S., & Doğan, U. (2019). Yer Kabuğu Hareketlerinin Belirlenmesinde Web Tabanlı Çevrimiçi GNSS Servislerinin Performans Analizi. *Geomatik*, 4(2), 147-159.
- Tan, O. (2024). Long-term aftershock properties of the catastrophic 6 February 2023 Kahramanmaraş (Türkiye) earthquake sequence. *Acta Geophysica*, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01335-1>.
- Taroni, M., Vocalelli, G., & De Polis, A. (2021). Gutenberg–Richter b-value time series forecasting: A weighted likelihood approach. *Forecasting*, 3(3), 561–569. <https://doi.org/10.3390/forecast3030035>.
- Terada, T., & Miyabe, N. (1929). Deformation of the earth crust in Kwansai districts and its relation to the orographic feature. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo Imperial University*, 5(8), 322–325.
- Tiryakioğlu, I., Yiğit, C. O., Yavaşoğlu, H., Saka, M. H., & Alkan, R. M. (2017a). The determination of interseismic, coseismic, and postseismic deformations caused by the Gökçeada-Samothraki earthquake (2014, Mw: 6.9) based on GNSS data. *Journal of African Earth Sciences*, 133, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.05.012>.
- Tiryakioğlu, I., Yavaşoğlu, H., Uğur, M. A., Özkaymak, Ç., Yılmaz, M., Kocaoglu, H., & Turgut, B. (2017b). Analysis of October 23 (Mw 7.2) and November 9 (Mw 5.6), 2011 Van earthquakes using long-term GNSS time series. *Earth Sciences Research Journal*, 21(3), 147–156. <https://doi.org/10.15446/esrj.v21n3.62812>.
- Tiryakioğlu, I., Aktuğ, B., Yiğit, C. Ö., Yavaşoğlu, H. H., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç., ... & Özener, H. (2018). Slip distribution and source parameters of the 20 July 2017 Bodrum-Kos earthquake (Mw 6.6) from GPS observations. *Geodinamica Acta*, 30(1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/09853111.2017.1408264>.
- Tiryakioğlu, İ., Koçbulut, F., Gezgın, C., Solak, H. İ., Eyübagil, E. E., Çakanşimşek, E. B., ... & Poyraz, F. (2024). 6 Şubat Kahramanmaraş depremleri sonrasında Ecemiş Fayı'nda meydana gelen kabuksal deformasyonların GNSS yöntemiyle belirlenmesi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 14(2), 913–931.
- Toda, S., Stein, R. S., Özbakir, A. D., Gonzalez-Huizar, H., Sevilgen, V., Lotto, G., & Sevilgen, S. (2023). Stress change calculations provide clues to aftershocks in 2023 Türkiye earthquakes. *Temblor*. <http://doi.org/10.32858/temblor.295>
- Touseef, A., & Mahmood, S. (2023). Risk assessment of Rawal dam outburst flood using integrated hydrological and geo-spatial approaches. *Advanced GIS*, 3(1), 07-13.
- Tsuboi, C. (1930). Investigation of the deformation of the Earth's crust in the Tango District connected with the Tango Earthquake of 1927, Part 1. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo Imperial University*, 8(2), 153-221.
- Turkelli, N., Sandvol, E., Zor, E., Gok, R., Bekler, T., Al-Lazki, A., & Barazangi, M. (2003). Seismogenic zones in eastern Turkey. *Geophysical Research Letters*, 30(24).
- Utsu, T. (1965). A method for determining the value of b in a formula $\log N = a - bM$ showing the magnitude frequency relation for earthquakes. *Geophysical Bulletin of Hokkaido University*, 13, 99-103.
- Utsu, T. (1999). Representation and analysis of the earthquake size distribution: A historical review and some new approaches. *Pure and Applied Geophysics*, 155, 509–535.
- Uzel, T., Eren, K., Gulal, E., Tiryakioğlu, I., Dindar, A. A., & Yılmaz, H. (2013). Monitoring the tectonic plate movements in Turkey based on the national continuous GNSS network. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 3573-3580.
- Wang, Z. (2011). Seismic hazard assessment: Issues and alternatives. *Pure and Applied Geophysics*, 168, 11-25.
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 974–1002.
- Wiemer, S., & Wyss, M. (2002). Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes. *Advances in Geophysics*, 45, 259–302.

- Wyss, M. (1973). Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 31(4), 341-359. <https://doi.org/10.1111/j.1365246X.1973.tb06506.x>
- Yakar, M., Yilmaz, H. M. & Yurt, K. (2010). The effect of grid resolution in defining terrain surface. *Experimental Techniques*, 34, 23-29.
- Yalçın, C. (2023). The interpretation of the Arabian-Taurus plates collision zone by satellite images: Western Çağlayançerit (Kahramanmaraş, Türkiye). *Advanced Remote Sensing*, 3(2), 69-78.
- Yarbaşı, N., Kadirov, A., & Bayrakturan, M. S. (2004). Erzurum şehir merkezi batı kesimi jeoteknik haritasında kullanılan kriterlerin istatistiksel analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(2), 211-219.
- Yarbaşı, N., & Kalkan, E. (2009). Geotechnical mapping for alluvial fan deposits controlled by active faults: A case study in the Erzurum, NE Turkey. *Environmental Geology*, 58, 701-714. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1544-1>
- Yavaşoğlu, H., Tari, E., Tüysüz, O., Çakır, Z., & Ergintav, S. (2011). Determining and modeling tectonic movements along the central part of the North Anatolian Fault (Turkey) using geodetic measurements. *Journal of Geodynamics*, 51, 339-343. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2010.07.003>
- Yeats, R. S., Sieh, K., & Allen, C. R. (1997). *The geology of earthquakes*. Oxford University Press, New York.
- Yeken, T. (1999). Kuzeydoğu Anadolu ve Kafkasya bölgesinin sismotektoniği. *Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul*.
- Yilmazturk, A., & Burton, P. W. (1999). An evaluation of seismic hazard parameters in southern Turkey. *Journal of Seismology*, 3(1), 61-81. <https://doi.org/10.1023/A:1009791320420>
- Yilmaztürk, A., Bayrak, Y., & Çakır, Ö. (1998). Crustal seismicity in and around Turkey. *Natural Hazards*, 18, 253-267.
- Yokota, Y., Ishikawa, T., & Watanabe, S. I. (2018). Seafloor crustal deformation data along the subduction zones around Japan obtained by GNSS-A observations. *Scientific Data*, 5(1), 1-11.
- Zor, E., Sandvol, E., Gurbuz, C., Turkelli, N., Seber, D., & Barazangi, M. (2003). The crustal structure of the East Anatolian Plateau (Turkey) from receiver functions. *Geophysical Research Letters*, 30(24), 8044. <https://doi.org/10.1029/2003GL018192>



© Author(s) 2025. This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>