



FIRAT ÜNİVERSİTESİ

SOSYAL BİLİMLER DERGİSİ

Journal of Social Sciences

p-ISSN:1300-9702 e-ISSN: 2149-3243



Batı Anadolu Kabuk Deformasyon Modellemesi: GPS ve Depremsellik Verilerine Dayalı Bir Değerlendirme

Western Anatolia Crust Deformation Modelling: An Evaluation Based on GPS and Seismic Data

Fatih SÜNBÜL¹ ve M. Taner ŞENGÜN²

¹Doç. Dr., İzmir Bakırçay Üniversitesi, İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi, Coğrafya Bölümü, İzmir, fatih.sunbul@bakircay.edu.tr, orcid.org/0000-0002-3590-374X

²Prof. Dr., Fırat Üniversitesi, İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Elazığ, mtsengun@firat.edu.tr, orcid.org/0000-0003-4039-6591

Araştırma Makalesi/Research Article

Makale Bilgisi

Geliş/Received:
17.12.2024
Kabul/Accepted:
28.04.2025

DOI:

10.18069/firatsbed.1602975

Anahtar Kelimeler

Batı Anadolu, Kabuk Deformasyonu, GPS ve Sismik Veriler, Kuzey Anadolu Fayı, Ege Açılma Rejimi

Keywords

Western Anatolia, Crustal Deformation, GPS and Seismic Data, North Anatolian Fault, Aegean Extension Regime

ÖZ

Batı Anadolu, farklı tektonik rejimlerin ve deformasyon süreçlerinin etkisi altında bulunan karmaşık bir bölgedir. Bu çalışma, GPS verileri ve depremsellik analizlerini entegre ederek bölgenin deformasyon dinamiklerini detaylı bir şekilde incelemektedir. Çalışmada, Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) boyunca ölçülen yüksek efektif gerinim oranlarının (~140 ngerinim/yıl) sıkışmalı rejimi yansıttığı, buna karşın Ege genişleme bölgesindeki pozitif dilatasyon oranlarının (+50 ngerinim/yıl) genişlemeli rejimin baskın olduğunu gösterdiği tespit edilmiştir. Bu bulgular, çalışmanın temel amacı olan Batı Anadolu'nun aktif tektonik yapısını belirleme ve bölgedeki sismotektonik riskleri değerlendirme hedefine doğrudan katkıda bulunmaktadır. Deprem analizleri, büyük depremlerin bölgesel deformasyon üzerindeki etkisini anlamak için kritik veriler sağlamış; Marmara Denizi doğusunda sıkışmalı, batısında ise genişlemeli rejimlerin hâkim olduğu belirlenmiştir. GPS hız vektörleri ve dilatasyon haritaları, enerji birikimi ve kabuk incilmesi süreçlerinin mekânsal dağılımını ayrıntılı olarak ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, yüksek sismik risk taşıyan bölgelerin belirlenmesine ve risk azaltma stratejilerinin geliştirilmesine bilimsel bir temel oluşturmaktadır. Batı Anadolu'nun deformasyon süreçleri üzerine yapılan bu analizler, bölgesel sismik tehlikelerin azaltılması için kritik bir zemin sunmaktadır.

ABSTRACT

Western Anatolia represents a complex region influenced by diverse tectonic regimes and deformation processes. This study integrates GPS velocity data and seismic analyses to investigate the deformation dynamics of the region comprehensively. High effective strain rates (~140 nanostrain/year) along the North Anatolian Fault Zone (NAFZ) highlight compressional regimes, while positive dilation rates (+50 nanostrain/year) in the Aegean extension zone emphasize crustal thinning under extensional forces. These findings directly address the study's primary aim of identifying the active tectonic framework of Western Anatolia and assessing seismic hazards in the region. Seismic analysis further underscores the influence of significant earthquakes on regional deformation, revealing compressional dominance in the eastern Marmara Sea and extensional regimes in its western segments. The integration of GPS velocity fields and dilation maps delineates the spatial distribution of energy accumulation and crustal thinning across Western Anatolia. These results provide a scientific basis for identifying high-seismic-risk areas and developing risk mitigation strategies. This comprehensive analysis of deformation processes offers critical insights into seismic hazard assessment and risk reduction strategies for Western Anatolia.

Atıf/Citation: Sünbül, F. ve Şengün, M. T. (2025). Batı Anadolu Kabuk Deformasyon Modellemesi: GPS ve Depremsellik Verilerine Dayalı Bir Değerlendirme. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 35, 2, 815-828.

Sorumlu yazar/Corresponding author: Fatih SÜNBÜL, fatih.sunbul@bakircay.edu.tr

1. Giriş

Tektonik levhaların dinamikleri ve aktif fayların oluşumu ile bu fayların gerilme birikimine verdikleri tepki, aktif tektonik özelliklerin anlaşılması açısından temel bir öneme sahiptir (Emre vd., 2018). Bu bilgiler, sadece uzun vadeli fay davranışlarını anlamakla kalmaz, aynı zamanda yüksek sismik risk taşıyan bölgelerin belirlenmesi ve değerlendirilmesine olanak tanır (Slemmons ve Depolo, 1986; Nyst ve Thatcher, 2004). Tektonik süreçlerle yüzey deformasyonu arasındaki bu ilişki, özellikle karmaşık jeodinamik özelliklere sahip olan Anadolu Yarımadası gibi bölgelerde daha da önem kazanmaktadır (Taymaz vd., 2007). Anadolu Levhası, kuzeyde Avrasya Levhası, güney ve doğuda ise sırasıyla Nubya ve Arabistan Levhaları ile çevrilidir (Reilinger ve McClusky, 2011). Bu levha sınırlarının kesişim noktasında yer alan Anadolu, çeşitli deformasyon süreçlerine maruz kalarak benzersiz bir tektonik rejime sahip olmuştur (Dilek ve Sandvol, 2009). Özellikle Batı Anadolu, Ege ve Marmara bölgeleri, genişleme tektoniği ile karakterize edilen yüksek deformasyon oranları ve horst-graben sistemlerinin belirgin olduğu bir alan olarak öne çıkmaktadır (Bozkurt ve Mittweide, 2005). Bu bölgeler, aynı zamanda kabuksal incelme ve batıya yönelimli hareketlerin de yoğun bir şekilde gözlemlendiği alanlardır (Zhu vd., 2006; Karabulut vd., 2019). Bu durum, hem yer kabuğunun dinamiklerini anlamak hem de bölgesel sismik tehlike değerlendirmeleri yapmak için önemli bilgiler sunmaktadır (Taymaz vd., 1991).

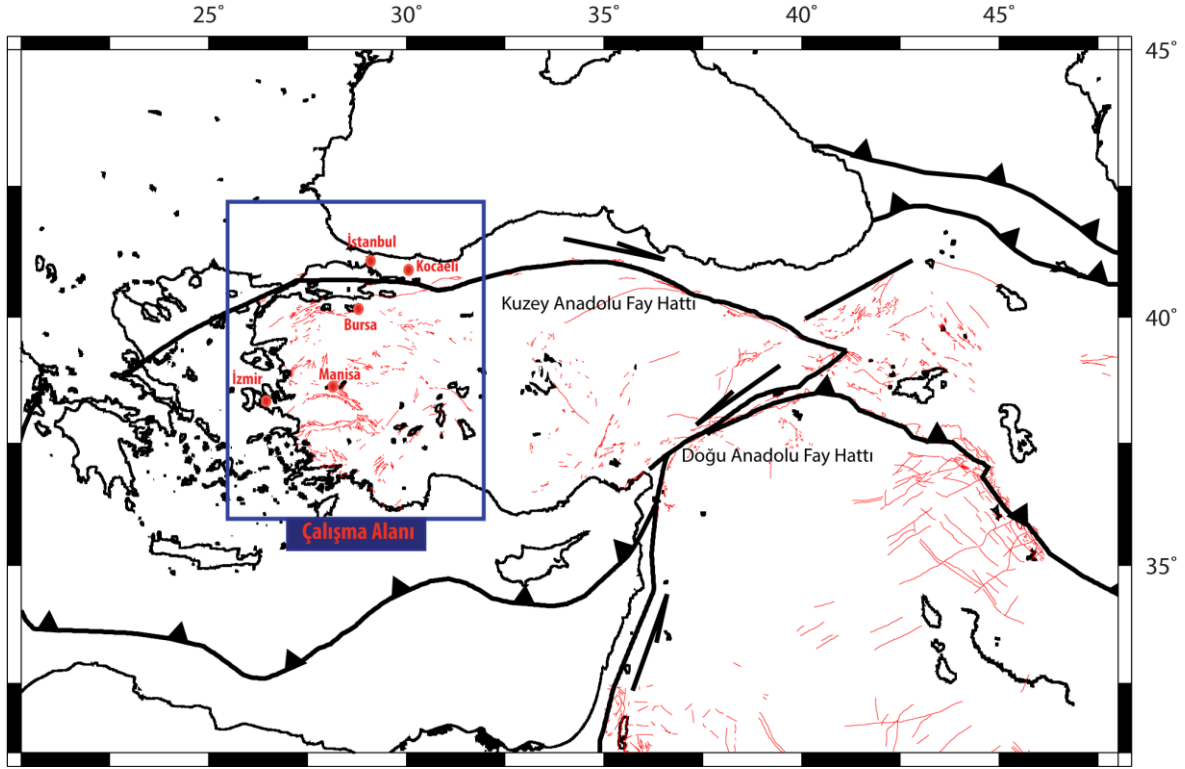
Batı Anadolu, jeolojik ve tektonik açıdan oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir (Barka ve Reilinger, 1997; Yılmaz, 2017). Bu bölge, Ege Denizi ve Batı Anadolu'yu kapsayan geniş bir alanı içine almakta olup, hem sıkışma hem de genişleme rejimlerinin etkisi altında şekillenmiştir (Doglioni vd., 2002). Afrika Levhası'nın kuzeye doğru hareketi ile Avrasya Levhası ile olan etkileşimleri, bölgedeki deformasyon süreçlerini kontrol eden temel mekanizmaları oluşturur (Westaway 1994; Jolivet ve Faccenna 2000). Bu süreçler, Batı Anadolu'da yaygın olarak gözlemlenen genişleme rejimi, kabuksal incelme ve graben sistemlerinin oluşumunda belirleyici rol oynamaktadır (Angus vd., 2006). Bölgedeki başlıca graben sistemleri arasında Büyük Menderes, Gediz ve Küçük Menderes grabenleri bulunmaktadır (Bozkurt vd., 2008). Bu yapılar, aktif faylar tarafından kontrol edilen bölgesel jeodinamik süreçlerin önemli göstergeleri olarak kabul edilir. Özellikle Simav Fay Zonu ve Büyük Menderes Fay Zonu gibi önemli fay sistemleri, depremsellik açısından kritik bir öneme sahiptir (Yolsal-Çevikbilen vd., 2014). Bununla birlikte, Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun (KAFZ) batıya doğru uzanması, Batı Anadolu'nun tektonik hareketliliğini daha da artıran bir faktör olarak öne çıkmaktadır (Sengor ve Canitez, 1982).

Türkiye, tektonik rejimlerin bir sonucu olarak tarih boyunca büyük ölçekli depremlere maruz kalmıştır (Yılmazturk vd., 1998). Özellikle son çeyrek yüzyılda Marmara Bölgesi'nde çalışma kapsamında değerlendirilen alanda, 1999 yılında gerçekleşen Mw 7.4 büyüklüğündeki Kocaeli Depremi ve bunu takip eden Mw 7.2 büyüklüğündeki Düzce Depremi, KAFZ'nun sismotektonik önemini yeniden vurgulamaktadır (Erdik, 2001). Buna ek olarak, 30 Ekim 2020 tarihinde merkez üssü Samos Adası olan Mw 6.9 büyüklüğündeki deprem, Batı Anadolu'nun Ege Genişleme Sistemi'ne bağlı olarak yüksek sismik aktiviteye sahip bir bölge olduğunu açıkça ortaya koymuştur (Kıratzi vd., 2021). Bu depremler, bölgedeki aktif fay sistemleri ile kabuksal deformasyon süreçlerinin dinamik etkilerinin hem yerel hem de bölgesel ölçekte daha derinlemesine anlaşılmasına olanak sağlayan değerli veriler sunmaktadır (Aktuğ vd., 2021). Bu olaylar, yalnızca mevcut tektonik süreçlerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine katkıda bulunmakla kalmayıp, aynı zamanda gelecekteki potansiyel sismik tehlikelerin tahmini ve risk analizi için kritik bir temel oluşturmaktadır (Atkinson, 2004; Abrahamson, 2006).

Batı Anadolu'nun neotektonik rejimi, Kuzey Anadolu Fay Zonu, Ege genişleme sistemi ve Doğu Anadolu Fay Zonu'nun etkileşimleriyle şekillenen karmaşık bir yapıya sahiptir. Bölgedeki deformasyonun mekânsal ve zamansal dağılımının anlaşılması, yerel tektonik süreçlerin yanı sıra bölgesel sismik tehlike analizleri açısından da kritik bir öneme sahiptir. İzmir ve çevresi, Batı Anadolu'da en yüksek deformasyon oranlarının ve sismik aktivitenin gözlemlendiği alanlardan biri olarak dikkat çekerken, bölgedeki diğer büyük nüfus merkezleri de benzer riskler altındadır. Çalışma alanında yer alan İstanbul ve Kocaeli metropollerini de dahil olmak üzere toplamda 30 milyonu aşan bir nüfus, bu yüksek riskli alanlarda yaşamakta olup, bu durum deformasyon süreçlerinin insani ve ekonomik etkilerinin daha kapsamlı bir şekilde incelenmesini gerektirmektedir. Bu çalışma, Batı Anadolu'nun deformasyon dinamiklerini belirleyerek, yüksek sismik risk taşıyan bölgeleri tanımlama ve bu bölgelerdeki risk azaltma stratejilerine bilimsel bir temel oluşturma amacını taşımaktadır. Bulgular, bölgenin aktif tektonik yapısını ve potansiyel deprem risklerini değerlendirme hedefine doğrudan

McKenzie, 1988). Bu süreç, Ege Denizi'nde genişleme hızının 30 mm/yıl'a ulaşmasını ve deformasyonun aktif faylar boyunca yoğunlaşmasını açıklamaktadır (DeMets vd., 1990).

Batı Anadolu, doğu-batı yönelimli Büyük Menderes, Gediz ve Simav grabenleri, horst-graben sistemleri ve aktif normal faylarla karakterizedir (Şengör ve Yılmaz, 1981). İzmir-Ankara-Erzincan Kuşağı boyunca yer alan ofiyolit kompleksleri, Neotetis'in kapanma sürecini yansıtırken, Oligosen-Geç Miyosen dönemine tarihlenen volkanik kayalar, bölgedeki gerilme tektoniğine bağlı magmatik aktiviteleri temsil etmektedir (Bozkurt ve Mittwede, 2001). Bu magmatik süreçler, kalk-alkalin granitoid intrüzyonlarıyla ilişkilendirilerek Batı Anadolu'nun jeolojik evrimini açıklamaktadır.



Şekil 2. Çalışma alanının Türkiye tektonik haritası üzerindeki gösterimi. Kırmızı düz çizgiler fay hatlarını temsil etmektedir (Emre vd., 2013), nüfus yoğunluğu 1,5 milyonu aşan metropol şehirler ise kırmızı dairesel işaretlerle gösterilmiştir.

Batı Anadolu, doğu-batı yönelimli Büyük Menderes, Gediz ve Simav grabenleri, horst-graben sistemleri ve aktif normal faylarla karakterizedir (Şengör ve Yılmaz, 1981). İzmir-Ankara-Erzincan Kuşağı boyunca yer alan ofiyolit kompleksleri, Neotetis'in kapanma sürecini yansıtırken, Oligosen-Geç Miyosen dönemine tarihlenen volkanik kayalar, bölgedeki gerilme tektoniğine bağlı magmatik aktiviteleri temsil etmektedir (Bozkurt ve Mittwede, 2001). Bu magmatik süreçler, kalk-alkalin granitoid intrüzyonlarıyla ilişkilendirilerek Batı Anadolu'nun jeolojik evrimini açıklamaktadır. Batı Anadolu, yüksek depremsellik ve kabuksal deformasyon oranlarıyla Akdeniz bölgesinin en aktif neotektonik alanlarından biridir. Deformasyon, normal faylanma mekanizmalarıyla graben sistemleri boyunca yoğunlaşmakta; Afrika levhasının kuzeye doğru hareketi ve Helenik dalma-batma zonu boyunca gerçekleşen slab geri çekilmesi (slab rollback) mekanizması, kuzey-güney yönlü kabuksal genişlemeye neden olmaktadır. KAFZ ve Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) ile etkileşimler, bölgenin kinematik yapısını karmaşık hale getirmektedir. Son yıllarda meydana gelen büyük depremler, Batı Anadolu'nun genişleme tektoniği altındaki dinamiklerini ve kabuksal deformasyon süreçlerini daha belirgin hale getirmiştir.

Tablo 1. Orijinal jeodezik çalışmaların tutarlı bir Avrasya Referans Çerçevesine dönüştürülmesi için kullanılan açısız hızlar

Referans	Enlem (°)	Boylam (°)	Ω (°/Ma)	Ortak İstasyon Sayısı	Orijinal RMS (mm/yıl)	Rotasyon Sonrası RMS (mm/yıl)
Aktuğ vd. (2013)	34.73	24.96	-0.089	15	2.86	2.34
Alchalbi vd. (2010)	36.9	25.66	0.079	11	2.78	1.33
Mahmoud vd. (2013)	52.77	13.77	0.087	8	4.91	1.44
Özener vd. (2010)	22.03	51.45	-0.026	3	4.48	4.37
Tatar vd. (2012)	11.05	0.19	0.007	14	2.39	2.33

Bu çalışmada, farklı jeodezik çalışmalar tarafından rapor edilen hız vektörlerinin tutarlı bir referans çerçevesine dönüştürülmesi amacıyla, Reilinger vd. (2006) tarafından tanımlanan referans hızları esas alınmıştır. Dönüşüm sırasında, farklı çalışmalardan elde edilen hız vektörleri ile referans hız vektörleri arasındaki kök-ortalama-kare (RMS) farkları minimize edilmiştir. Bu işlem, hız vektörlerinin birleştirilmesi sırasında potansiyel hataların ve sistematik farkların giderilmesini sağlamıştır.

Gerinim hız alanlarının türetilmesi için hız gradyen tensörleri çift-kübik (bi-cubic) splinler kullanılarak enterpolasyon yöntemiyle işlenir. Sürekli hız alanları, yüzeydeki deformasyon bölgelerinin bir fonksiyonu olarak modellenir.

$$\bar{\mathbf{u}} = \mathbf{r} [\bar{\mathbf{W}}(\hat{\mathbf{x}}) * \hat{\mathbf{x}}] \quad (1)$$

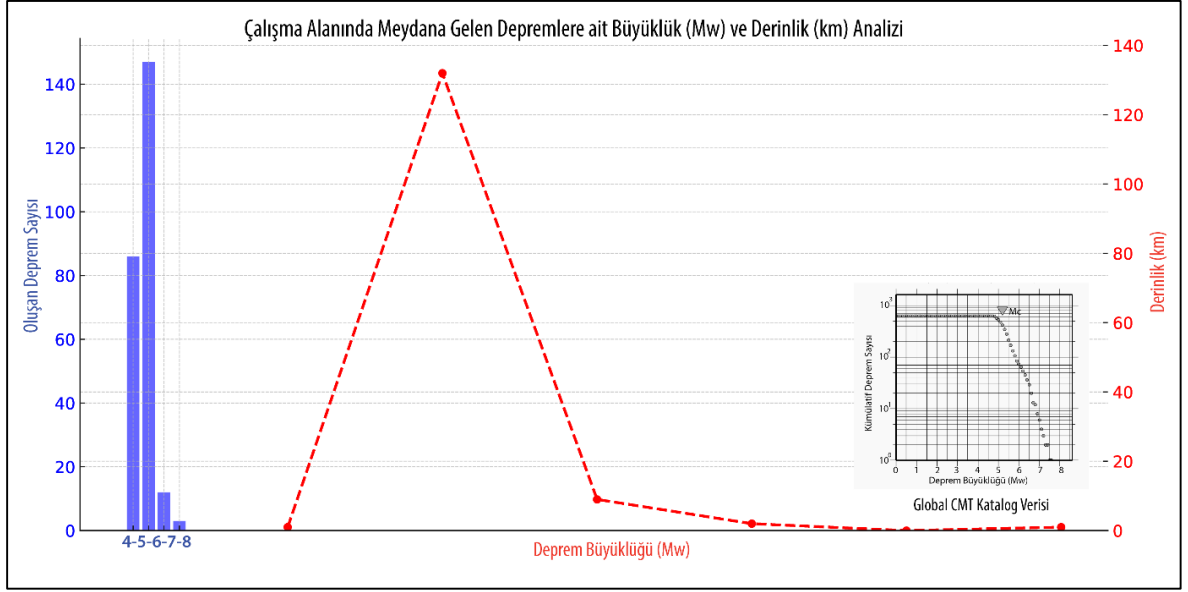
Formül (1)'de $\hat{\mathbf{x}}$ birim radyal konum vektörü, $\mathbf{r}$ Yerkürenin yarıçapı ve $\bar{\mathbf{W}}(\hat{\mathbf{x}})$ ise dönme vektörü fonksiyonudur. Model gerinim hızı, vektör fonksiyonunun $\bar{\mathbf{W}}(\hat{\mathbf{x}})$ uzamsal türevlerini içerir (Haines ve Holt, 1993). Çift-kübik Bessel interpolasyonu kullanılarak, dönme vektör fonksiyonu eğrisel bir grid sistemi üzerinde genişletilmiştir (De Boor, 1978). Bu yöntem, modelin gerinim hızı alanı içinde boyut değişikliklerine uyum sağlamasına olanak tanır. $\bar{\mathbf{W}}(\hat{\mathbf{x}})$ dağılımı, gözlemlenen ve model hızları arasındaki farkın en küçük kareler yöntemiyle minimize edilmesiyle belirlenmiştir. Grid alanları içinde gözlemlenen ve model gerinim hızları bu yöntemle hesaplanmıştır.

3.2. Deprem Verisi

Gerinim oranı alanları, en küçük deformasyon büyüklüğünü minimize eden bir modele dayanarak, yatay hız alanlarının bikübik Bessel interpolasyonu ile türetilmiştir (Holt vd., 1995). Deprem verileri, Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) kataloğundan alınmıştır (Ekström vd., 2012). Çalışmamızda magnitüd tamamlılık (Mc) değeri 5.2 olarak belirlenmiş ve gerinim analizleri için bu değer sınır olarak kullanılmıştır (Şekil 4). Bu güvenilir moment tensör hesaplamaları, levha tektoniği kapsamında karmaşık yeraltı hareketlerinin tutarlı bir şekilde modellenmesini sağlamak ve çalışmanın doğruluğunu artırmaktadır. Moment tensör belirsizlikleri, Frohlich ve Davis (1999) yöntemi ile giderilmiştir (Baskara vd., 2023; Rösler vd., 2023; Manzo vd., 2024). Bir grid alanındaki ortalama sismik gerinim oranları, o grid alanının hacmi ve sismojenik kalınlığı ile moment tensörlerinin toplamı kullanılarak Kostrov (1974) yaklaşımı ile hesaplanmıştır (Guns vd., 2024; Maurer ve Materna, 2023).

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2\mu VT} \sum_{k=1}^N M_o m_{ij} \quad (2)$$

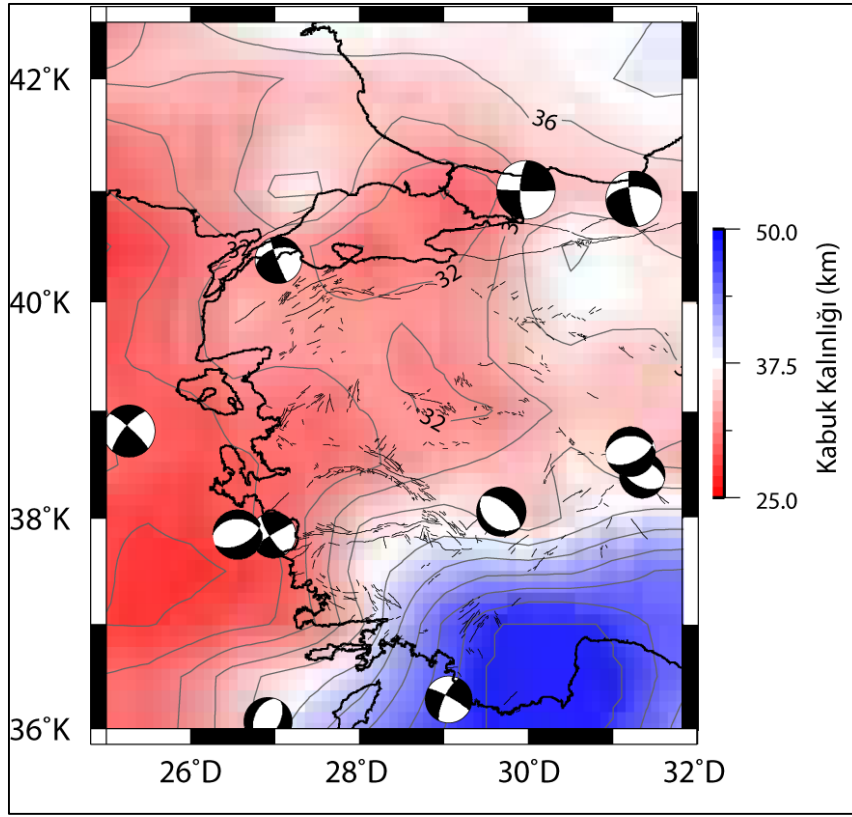
Formül (2)'de N grid alanında meydana gelen deprem sayısı, μ kayma modülü, V hücre hacmi, T deprem oluşum zamanı zaman, M_o sismik moment ve m_{ij} moment tensör birimleridir.



Şekil 4. Çalışmada kullanılan Global CMT veriseti

4. Analizler ve Bulgular

Çalışma alanında, Batı Anadolu bölgesindeki kabuk ve litosfer kalınlık dağılımları (Mutlu ve Karabulut, 2012) ile $M_w \geq 6.0$ büyüklüğündeki depremlerin odak mekanizmaları (Ekström vd., 2012) Şekil 5'te gösterilmektedir. Buna göre, dijital gösterim litosfer kalınlığının bölgesel farklılıklarını renk skalası ile ortaya koymakta; Ege genişleme sisteminin etkisiyle güney kesimlerde litosferin incelendiğini, kuzeyde doğrultu atımlı fay mekanizmasına sahip KAFZ ise kalınlaştığını ifade etmektedir. Bu durum, bölgedeki tektonik süreçlerin farklı kabuk yapıları üzerindeki etkilerini açık bir şekilde yansıtmaktadır. Bu süreçte, Global CMT kataloğundan elde edilen odak mekanizmaları ve depremsellik verileri, gerinim oranı tensörlerine yönelimsel anizotropi kazandırmak amacıyla kullanılmıştır (Savage ve Simpson, 1997). Deprem verilerinin değerlendirilmesi sırasında, $M_w < 5.2$ olan küçük ölçekli olaylar analizden çıkarılmış ve sismik kümelenmelerin yarattığı zamansal eksiklikleri gidermek amacıyla kümeleme yöntemleri uygulanmıştır. Bu yaklaşımlar, büyük depremlerin bölgedeki deformasyon süreçleri üzerindeki etkilerini daha doğru bir şekilde değerlendirmeyi sağlamıştır. Modelleme çalışmaları, KAFZ ile Batı Anadolu Genişleme Sistemi arasındaki dinamik etkileşimlerin daha iyi anlaşılmasına odaklanmıştır. GPS hız vektörleriyle yapılan enterpolasyonlar, deformasyon oranlarının uzamsal ve zamansal dağılımını hassas bir şekilde analiz etme olanağı sunmuştur. Elde edilen bulgular, litosfer kalınlığı ve deformasyon dinamikleri arasındaki ilişkiyi vurgulamaktadır. Güneyde litosferin incilmesiyle genişlemeli rejim belirginleşirken, kuzeyde sıkışmalı alanlar öne çıkmaktadır. Şekil 5'te görülen odak mekanizmaları, bu tektonik rejim değişimlerini destekler niteliktedir. Normal faylanma özellikleri, litosferin incelendiği güney bölgelerinde genişleme rejimi ile uyumlu bir görünüm sergilemektedir. Türkiye'nin bölgesel gerinim oranı incelendiğinde, toplam gerinimin doğuda Bingöl'deki Karlıova Üçlü ekleminden başlayarak batıda Yunanistan'a kadar uzanan sağ yanal doğrultu atımlı Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın deformasyonları tarafından belirlendiği gözlenmektedir (Reilinger vd., 2006). Bu göreceli deformasyon zonu, yavaş hareket eden Avrasya levhası ile batıya doğru daha hızlı hareket eden Anadolu levhası arasında bir sınır görevi görür. Türkiye'nin batı bölümünü oluşturan bu alandaki toplam gerinim değişimleri önemli ölçüde bu yönelim ile şekillenmektedir.



Şekil 5. Batı Anadolu litosferik (kabuk) kalınlık (km) (Mutlu ve Karabulut, 2011) ve bölgede oluşan Mw>6.0 deprem mekanizma çözümleri (globalcmt.org).

4.1. Çalışma Alanı: Kuzey Anadolu Fayı (KAF) Marmara Bölgesi Bölümü

Kuzey Anadolu Fayı, yaklaşık 1.500 kilometre uzunluğunda, doğu-batı uzanımlı ve sağ yönlü bir doğrultu atımlı faydır. Bu fay, Doğu Anadolu'da Arabistan levhası ile Doğu Anadolu Fay Zonu'nun (DAFZ) sol yönlü hareketi arasındaki etkileşim sonucu, Anadolu levhasının batıya doğru hareketini sağlamaktadır. Yapılan araştırmalar, KAF'ın yaklaşık 10 milyon yıl önce oluşarak batıya doğru göç ederek (Şengör, 1985; Hubert-Ferrari vd., 2002), son 5 milyon içerisinde yaklaşık 85 km'lik yanıl yer değiştirme gerçekleştirdiğini öne sürmektedir (Armijo vd., 2002). Bu fay Marmara bölgesinin doğu ucunda Kocaeli körfezinde denize girerek, bu noktada iki kola ayrılmakta ve batıya doğru ilerledikçe kollar arasında bir açılma meydana gelerek Marmara çek-ayır havzasını oluşturmaktadır (Barka ve Kadinsky-Cade, 1988; Şengör vd., 2005). Bu iki kol (kuzey ve güney kollar) Ege denizine ulaştıklarında aralarındaki mesafe 100 km civarındadır. Bu iki kol detaylı incelenirse; kuzey kol Kocaeli körfezinde denize girerek, Gelibolu yarımadasında karaya çıkarak Ganos fayı olarak isimlendirilir ve Ege denizine ulaştıktan sonra izlerini kaybettirir (Le Pichon vd., 2001). Güney kol ise Marmara denizinin güney sınırından Biga Yarımadasına ulaşır ve oradan da Ege Denizine ulaşır (Barka ve Kadinsky-Cade, 1988). Bu fay üzerinde 1953 ve 1964 yıllarında büyük ölçekli depremler oluşmuştur (Kürçer vd., 2017). Kinematik GPS ölçümleri, fayın iki kola ayrıldığı noktadan doğuda, Avrasya ve Anadolu levhaları arasındaki göreceli hareketin neredeyse tamamının, yaklaşık 24 mm/yıl'lık bir kayma oranı ile KAFZ boyunca gerçekleştiğini göstermektedir. İki kola ayrılma noktasının batısında yapılan kinematik analizler, KAFZ'nin Kuzey ve Güney kolları arasında asimetrik bir kayma paylaşımı olduğunu ortaya koymaktadır. Kuzey kol, Güney kola kıyasla çok daha büyük bir hareket sergilemektedir (Armijo vd., 2002; McClusky vd., 2000).

4.2. Çalışma Alanı: Batı Anadolu ve Ege Bölgesi Bölümü

Batı Anadolu ve Ege Bölgesi, dünyanın en belirgin genişleme rejimlerinden birine sahip olup, bölgedeki deformasyon büyük ölçüde Helenik Yitim Zonu boyunca gerçekleşen slab geri çekilmesi (slab rollback) ve Anadolu levhasının batıya doğru hareketi ile kontrol edilmektedir (Bozkurt, 2001). Bu süreç, doğu-batı

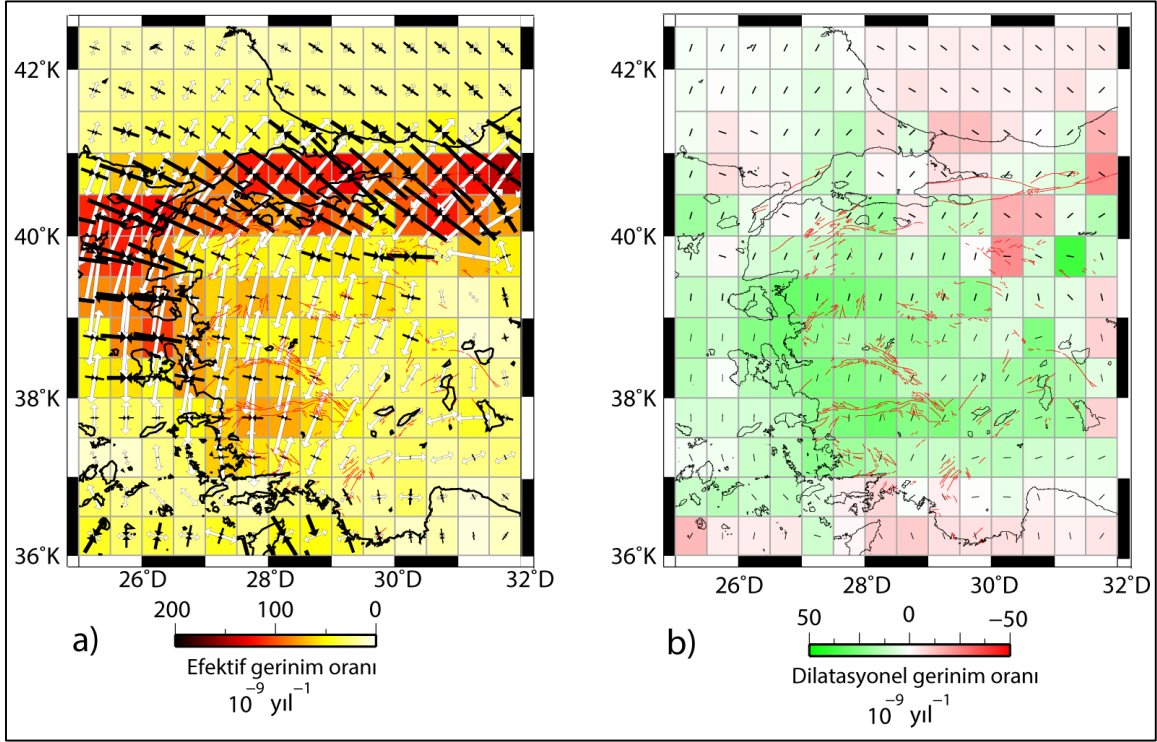
uzanımlı graben sistemlerinin ve aktif normal fayların oluşumuna yol açmıştır. Büyük Menderes, Gediz ve Bakırçay grabenleri gibi yapılar, litosferdeki kuzey-güney yönlü genişleme ile meydana gelmiş önemli tektonik unsurlardır. Grabenler boyunca uzanan eğimli normal faylar, litosferin gerilme altında incelendiğini ve deformasyonun büyük bir kısmını bu hatların karşıladığını göstermektedir (Bozkurt, 2001). Yapılan çalışmalar, bölgedeki genişleme oranlarının yıllık yaklaşık 30 mm'ye kadar ulaşabildiğini ortaya koymaktadır (Reilinger vd., 2006). Özellikle Büyük Menderes Graben'i, Pliyosen döneminden itibaren aktif olmuş ve yüzeydeki deformasyonu belirgin bir şekilde yansıtmaktadır. Helenik Yitim Zonu boyunca tetiklenen slab geri çekilmesi, manto konveksiyonunu hızlandırarak litosferik incelmeyi teşvik etmektedir (Jolivet ve Faccenna, 2000). Sismik tomografi çalışmaları, Ege Denizi ve Batı Anadolu'nun altında litosfer kalınlığının yer yer 25-30 km'ye kadar azaldığını ve bu durumun yüksek ısı akışı ve genişlemeli rejimle ilişkili olduğunu göstermektedir. Batı Anadolu, aktif normal faylar boyunca sık sık meydana gelen orta ve büyük ölçekli depremlerle sismik olarak oldukça aktif bir bölgedir. Bu depremler, graben sınırlarında yoğunlaşmış olup, kuzey-güney yönlü genişleme sırasında biriken elastik enerjinin serbest kalmasıyla ilişkilidir. Örneğin, Gediz Graben'i boyunca normal faylanma mekanizmaları, bölgedeki genişleme tektoniğinin bir yansımasıdır (Bozkurt, 2001). GPS ölçümleri, Batı Anadolu'nun yılda 25-30 mm hızla güneybatıya doğru hareket ettiğini göstermekte ve bu hareket, Helenik Yitim Zonu boyunca gerçekleşen slab geri çekilmesiyle ilişkilendirilmektedir (Reilinger vd., 2006). Bu genişleme, Ege Denizi'nin kuzey-güney doğrultusunda açılmasını ve deformasyonun büyük kısmının graben sistemleri boyunca yoğunlaşmasını açıklamaktadır. Ayrıca, kuzeydeki KAFZ ile güneydeki genişleme sistemleri arasındaki dinamik etkileşimler, Batı Anadolu'daki deformasyonun yön ve büyüklüğünü önemli ölçüde etkilemektedir.

4.3. Efektif ve Dilatasyonel Gerinim Oranlarının Analizi

Efektif gerinim oranları haritası (Şekil 6a), deformasyonun toplam büyüklüğünü renk skalasıyla görselleştirmektedir. Haritada sarıdan kırmızıya doğru artan bir skala kullanılarak, kırmızı bölgelerin yüksek deformasyon oranlarını temsil ettiği ve bu alanların tektonik olarak daha aktif olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle KAFZ boyunca yüksek efektif gerinim oranları dikkat çekicidir. KAFZ'nin Marmara Denizi içindeki kuzey kolu boyunca ~140 ngerinim/yıl değerlerine ulaşan güçlü gerinim hız oranları tespit edilmiştir. Güney kolda ise bu oran deniz içinde ~100 ngerinim/yıl mertebesinde olup, kara üzerindeki değerler <100 ngerinim/yıl seviyesine gerilemektedir. Ancak Ege Denizi'ne yaklaşıldığında bu oran yeniden artarak ~140 ngerinim/yıl seviyelerine ulaşmaktadır. Özellikle Çanakkale'nin Ege Denizi'ne sınır bölgelerinde benzer şekilde yüksek değerler (~140 ngerinim/yıl) kaydedilmiştir.

Batı Anadolu'nun en yoğun nüfuslu metropollerinden biri olan ve 4,5 milyona yaklaşan nüfusa sahip İzmir, bölgedeki genişlemeli rejimin etkilerini doğrudan yansıtmaktadır. İzmir ve çevresinde ölçülen efektif gerinim oranları nispeten daha düşük olup ~80 ngerinim/yıl mertebesinde (Şekil 6a). Ancak bu oranlar, genişlemeli deformasyon süreçlerinin sürdüğünü ve bölgenin aktif tektonik yapısını göstermektedir. İzmir, İzmir-Balıkesir Transfer Zonu (İBTZ) içerisinde yer almakta olup, sağ yanal doğrultu atımlı faylanmalar ve genişlemeli rejimin birlikte gözlemlendiği karmaşık bir deformasyon alanıdır. Bu transfer zonu boyunca yapılan GNSS çalışmaları, 20-25 mm/yıl arasında değişen deformasyon oranlarını ortaya koymaktadır (Poyraz ve Hastaoglu, 2020). Özellikle Tuzla Fayı ve Seferihisar Fayı gibi aktif faylar, İzmir Körfezi çevresinde önemli sismik tehlike oluşturmaktadır. İBTZ'nin sağ yanal doğrultu atımlı faylanmalar ve genişlemeli rejimi içeren yapısı, İzmir'de gözlemlenen deformasyonun heterojenliğini açıklamaktadır (Zhu vd., 2006). Tarihsel ve aletsel dönemde meydana gelen depremler, bu fayların yüksek sismik potansiyele sahip olduğunu doğrulamakta ve İzmir'in, bölgedeki en riskli alanlardan biri olduğunu göstermektedir (Eyübagil vd., 2021). Batı Anadolu'nun genişleme rejimi, bölgedeki litosferin geniş çaplı uzanması ve kabuksal incelmeye ile karakterizedir. Mutlu ve Karabulut (2012) tarafından yapılan Pn tomografi çalışmaları, Batı Anadolu ve Ege Denizi'nde Pn dalga hızlarının 7.9–8.1 km/s arasında değiştiğini göstermektedir. Bu yüksek hızlar, Menderes Masifi ve Ege'deki Metamorfik Çekirdek Kompleksleri ile ilişkilidir ve bölgede önemli miktarda litosferik incelmeye işaret etmektedir. Ayrıca, bu bölgede litosfer kalınlığının güneyde azaldığı, kuzeyde ise arttığı belirlenmiştir. GPS verileriyle yapılan analizler, kuzey-güney yönlü kabuksal genişlemenin kuzeyden güneye doğru arttığını ortaya koymaktadır (Kahle vd., 1998; McClusky vd., 2000). Bu genişleme, Batı Anadolu'da ve Ege Denizi'nde kabuk kalınlığının 45 km'den 33 km'ye kadar incelmeye yol açmıştır. Mutlu ve Karabulut (2012) çalışmasında da belirtildiği gibi, yüksek sıcaklıklarda (>800 °C) alt manto kayalarının sünek hale gelmesi, alt kabuk ile manto arasındaki

viskozite kontrastını azaltarak Moho topografyasının düzleşmesine ve manto hızlarının daha homojen olmasına neden olmaktadır. Dilatasyonel gerinim oranları, deformasyonun yönünü vurgulayan önemli bir göstergedir. Şekil 6b’de yeşil tonlar genişlemeyi (pozitif dilatasyon), kırmızı tonlar ise sıkışmayı (negatif dilatasyon) temsil etmektedir. Marmara Denizi’nin doğu kesiminde ve İstanbul çevresinde, dilatasyonel gerinim oranlarının -25 ngerinim/yıl mertebesinde olduğu belirlenmiştir. Ancak bu sıkışmalı değerlerin, bölgenin genel tektonik rejiminin doğrultu atımlı faylanma olduğunu değiştirmedeği unutulmamalıdır. Marmara Bölgesi’nde transpresyon ve transtansiyon rejimleri hâkimdir ve dilatasyonel gerinim oranları bu karmaşık rejimlerin lokal yansımalarını göstermektedir.



Şekil 6. a) Batı Anadolu yıllık gerinim oranı (ngerinim/yıl); b) Batı Anadolu dilatasyonel gerinim bileşeni (ngerinim/yıl) ve deformasyon gelişim yönü.

Hergert ve Heidbach (2010) çalışmasına göre, Marmara Denizi altındaki KAFZ, kompleks fay segmentlerinden oluşan bir sistemdir. Deformasyonun büyük bir kısmı ana fay boyunca sağ yanal doğrultu atımlı kayma ile gerçekleşirken, bir kısmı da ikincil faylarda bölünmüş kayma (slip partitioning) ve iç deformasyon olarak dağıtılmaktadır. Bu durum, Marmara Denizi’ndeki farklı segmentlerin geometrisi ve kinematik özelliklerine bağlı olarak lokal sıkışmalı ve genişlemeli alanların oluşumunu açıklamaktadır. Özellikle, Marmara Denizi’nin altındaki bazı fay segmentlerinin eğim açılarının ve doğrultularının değişmesi, dikine kayma bileşenlerini (dip-slip) ortaya çıkararak bölgesel gerilim alanlarını karmaşıktırmaktadır. Bu çalışmada, Marmara Denizi’nin doğusunda gözlemlenen sıkışmanın, KAFZ’nin segment geometrisi ve kinematik özelliklerine bağlı olarak lokal etkilerden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Doğu Marmara’daki sıkışmalı tektonik rejim, yalnızca dilatasyonel gerinim oranları ile değil, aynı zamanda fayların üç boyutlu yapısı, segmentler arası etkileşimler ve bölgedeki dağılımlı deformasyon (distributed deformation) ile birlikte ele alınmalıdır. Bu bulgular, Marmara Bölgesi’nin tektonik rejiminin yalnızca doğrultu atımlı faylanma ile açıklanamayacağını, lokal gerilme ve sıkışma alanlarının fay geometrisi ve kayma oranlarındaki değişkenlikten kaynaklandığını göstermektedir. Segment geometrisi, fayların eğim açıları ve ikincil faylarda kaymanın bölünmesi (slip partitioning), bu bölgede karmaşık bir deformasyon alanı oluşturarak, sıkışmalı ve genişlemeli rejimlerin birlikte gözlenmesine yol açmaktadır (Hergert and Heidbach, 2010).

5. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışma, Batı Anadolu'nun tektonik dinamiklerini GPS ve depremsellik verileri ışığında analiz ederek, bölgesel deformasyon mekanizmalarının kapsamlı bir değerlendirmesini sunmaktadır. Özellikle, literatürde ilk kez bu ölçekte GPS hız vektörleri ve gerinim analizlerinin bir arada kullanıldığı yöntemle, farklı tektonik rejimlerin mekânsal etkileri eş zamanlı olarak değerlendirilmiştir. Çalışma alanı, genişleme rejimi ve sıkışmalı rejim gibi farklı tektonik süreçlerin bir arada gözlemlendiği karmaşık bir yapıya sahiptir. Litosfer kalınlığı, efektif gerinim oranları ve dilatasyonel gerinim oranlarına dayalı olarak yapılan analizler, bölgedeki deformasyon süreçlerinin yön ve büyüklük bakımından çeşitlilik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Litosfer kalınlık haritası, Ege genişleme sisteminin güneyde litosferi incelttiğini, kuzeyde ise doğrultu atımlı fay mekanizmasına sahip olan Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) boyunca litosferin kalınlaştığını göstermektedir. Bu durum, bölgenin farklı deformasyon rejimlerine nasıl tepki verdiğini anlamak açısından önemlidir. Güneyde genişlemeli rejim etkisinde litosferin yer yer 25-30 km'ye kadar incilmesi, kuzeyde sıkışmalı alanların ve litosfer kalınlığının artmasıyla çarpıcı bir tezat oluşturmaktadır. Özellikle İzmir ve çevresinde ölçülen yüksek dilatasyonel gerinim oranları (+50 ngerinim/yıl), bu bölgede genişlemeli rejimin hakim olduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Efektif gerinim oranları analizi, deformasyonun büyüklüğünü anlamak için kritik bir veri sunmuştur. KAFZ boyunca Marmara Denizi'nin kuzey kolunda ölçülen yüksek efektif gerinim oranları (~140 ngerinim/yıl), bu bölgedeki yoğun deformasyonun ve yüksek sismik potansiyelin bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Güney kolda bu oran daha düşük olmasına rağmen (~100 ngerinim/yıl), Ege Denizi'ne yaklaşıldıkça değerlerin yeniden artarak yaklaşık 140 ngerinim/yıl seviyelerine ulaştığı görülmüştür. Bu durum, özellikle Çanakkale ve çevresinde yoğun enerji birikimine işaret etmektedir. İzmir ve çevresinde daha düşük bir efektif gerinim oranı (~80 ngerinim/yıl) gözlemlense de bu değerler bölgedeki genişleme rejimiyle uyumlu bir deformasyon karakteristiği sunmaktadır. İzmir-Balıkesir Transfer Zonu (İBTZ) boyunca yapılan GNSS çalışmaları, bölgede yılda 20-25 mm arasında değişen deformasyon oranlarını ortaya koymakta ve bu durum, İzmir'in sismik tehlike potansiyelini artırmaktadır. Dilatasyonel gerinim oranları, deformasyonun yönünü belirlemek için önemli bilgiler sağlamıştır. Marmara Denizi'nin doğusunda ve İstanbul çevresinde tespit edilen negatif dilatasyon oranları (-25 ngerinim/yıl), bölgedeki sıkışmalı rejimin etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. Buna karşılık, Marmara Denizi'nin batısında bu değerlerin pozitif değerlere dönüşmesi (+25 ngerinim/yıl), bölgenin genişlemeli rejime doğru bir geçiş sergilediğini göstermektedir. Ege Bölgesi, özellikle İzmir ve çevresi, pozitif dilatasyon oranlarının (+50 ngerinim/yıl) maksimum değerlere ulaştığı bir alan olarak dikkat çekmektedir. Bu değerler, genişlemeli rejimin litosfer üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Bu bulgular, çalışmanın temel hedefi olan Batı Anadolu'nun aktif tektonik yapısını tanımlama ve bölgedeki potansiyel sismik riskleri belirleme amacını doğrudan desteklemektedir. Örneğin, KAFZ boyunca yüksek efektif gerinim oranlarının enerji birikimini ve sismik riski artırdığı görülmektedir. Buna karşılık, Ege Bölgesi'ndeki pozitif dilatasyon, genişlemeli rejimin etkisiyle litosferin incelmelerini ve deformasyonun bu bölgelerde daha çok genişleme yönelimli olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma Batı Anadolu'nun deformasyon dinamiklerini ve sismotektonik risklerini ortaya koyarak, büyük deprem riski taşıyan bölgeleri net bir şekilde belirlemekte ve risk azaltma stratejilerine bilimsel bir zemin hazırlamaktadır. KAFZ boyunca sıkışma rejimi ve yüksek enerji birikimi, büyük deprem riski taşıyan alanlar olarak değerlendirilirken, Ege genişleme bölgesinde genişleme rejimi ve litosfer incelmeleri belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir. Sunulan analizler çalışmanın başında belirtilen amaca uygun olarak, gelecekteki sismik risklerin değerlendirilmesi ve yerel yönetimler için etkili risk azaltma stratejilerinin geliştirilmesi adına kritik bilgiler sunmaktadır. Çalışma, deformasyon süreçlerini ve sismik tehlikeleri daha derinlemesine değerlendirmek için, GPS verilerinin ve depremsellik analizlerinin birlikte kullanımının, bölgesel tektonik dinamiklerin anlaşılmasında ne kadar etkili olabileceğini bir kez daha göstermiştir. Gelecekteki çalışmalar, daha ayrıntılı modelleme ve veri entegrasyonu yoluyla bu çalışmada sunulan bulguları geliştirebilir ve bölgesel risk analizlerine önemli katkılar sağlayabilir.

Teşekkür ve Katkı Belirtme Bu çalışma İzmir Bakırçay Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri, Kariyer Başlangıç Destek Projeleri (KBP) KBP.2021.007 nolu proje tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Abrahamson, N. A. (2006, September). Seismic hazard assessment: Problems with current practice and future developments. In *First European conference on earthquake engineering and seismology* (pp. 3–8).
- Aktuğ, B., Tiryakioğlu, İ., Sözbilir, H., Özener, H., Özkaymak, Ç., Yiğit, C. Ö., ... and Softa, M. (2021). GPS-derived finite source mechanism of the 30 October 2020 Samos earthquake, Mw = 6.9, in the Aegean extensional region. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30(8), 718–737.
- Angus, D. A., Wilson, D. C., Sandvol, E., and Ni, J. F. (2006). Lithospheric structure of the Arabian and Eurasian collision zone in eastern Türkiye from S-wave receiver functions. *Geophysical Journal International*, 166(3), 1335–1346. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03070.x>
- Armijo, R., Meyer, B., Navarro, S., King, G., and Barka, A. (2002). Asymmetric slip partitioning in the Sea of Marmara pull-apart: A clue to propagation processes of the North Anatolian fault? *Terra Nova*, 14(2), 80–86.
- Atkinson, G. M. (2004, August). An overview of developments in seismic hazard analysis. In *13th World Conference on Earthquake Engineering* (No. 5001, pp. 1–6).
- Barka, A. A., and Kadinsky-Cade, K. (1988). Strike-slip fault geometry in Türkiye and its influence on earthquake activity. *Tectonics*, 7(3), 663–684.
- Barka, A., and Reilinger, R. (1997). Active tectonics of the Eastern Mediterranean region: Deduced from GPS, neotectonic, and seismicity data.
- Baskara, A. W., Sahara, D. P., Nugraha, A. D., Rusdin, A. A., Zulfakriza, Z., Widiyantoro, S., ... and Elly, E. (2023). Aftershock study of the 2019 Ambon earthquake using moment tensor inversion: Identification of fault reactivation in northern Banda, Indonesia. *Earth, Planets and Space*, 75(1), 124. <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01825-3>.
- Bozkurt, E. (2001). Neotectonics of Türkiye – A synthesis. *Geodinamica Acta*, 14(1–3), 3–30.
- Bozkurt, E., and Mittwede, S. K. (2005). Introduction: Evolution of continental extensional tectonics of western Türkiye. *Geodinamica Acta*, 18(3–4), 153–165.
- Bozkurt, E., Winchester, J. A., Ruffet, G., and Rojay, B. (2008). Age and chemistry of Miocene volcanic rocks from the Kiraz Basin of the Küçük Menderes Graben: Its significance for the extensional tectonics of southwestern Anatolia, Türkiye. *Geodinamica Acta*, 21(5–6), 239–257.
- Candan, O., Akal, C., Koralay, O. E., Okay, A. I., Oberhänsli, R., Prelević, D., and Mertz-Kraus, R. (2016). Carboniferous granites on the northern margin of Gondwana, Anatolide-Tauride Block, Türkiye: Evidence for southward subduction of Paleotethys. *Tectonophysics*, 683, 349–366.
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., and Stein, S. (1990). Current plate motions. *Geophysical Journal International*, 101(2), 425–478.
- Dilek, Y., and Sandvol, E. (2009). Seismic structure, crustal architecture, and tectonic evolution of the Anatolian-African plate boundary and the Cenozoic orogenic belts in the Eastern Mediterranean region. *Geological Society, London, Special Publications*, 327(1), 127–160.
- Doglioni, C., Agostini, S., Crespi, M., Innocenti, F., Manetti, P., Riguzzi, F., and Savascin, Y. (2002). On the extension in western Anatolia and the Aegean Sea. *Journal of the Virtual Explorer*, 8, 169–183.
- Ekström, G., Nettles, M., and Dziewoński, A. M. (2012). The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200, 1–9.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Şaroğlu, F., Olgun, Ş., Elmacı, H., and Çan, T. (2018). Active fault database of Türkiye. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8), 3229–3275.
- Erdik, M. (2001). Report on 1999 Kocaeli and Düzce (Türkiye) earthquakes. In *Structural control for civil and infrastructure engineering* (pp. 149–186).
- Eyübağıl, E. E., Solak, H. İ., Kavak, U. S., Tiryakioğlu, İ., Sözbilir, H., Aktuğ, B., and Özkaymak, Ç. (2021). Present day strike-slip deformation within the southern part of the İzmir-Balıkesir Transfer Zone based on GNSS data and implications for seismic hazard assessment in Western Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30(2), Article 1. <https://doi.org/10.3906/yer-2005-26>.
- Frohlich, C., and Davis, S. D. (1999). How well constrained are well-constrained T, B, and P axes in moment tensor catalogs? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B3), 4901–4910.
- Guns, K., Sandwell, D., Xu, X., Bock, Y., Yong, L. W., and Smith-Konter, B. (2024). Seismic moment accumulation rate from geodesy: Constraining Kostrov thickness in southern California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129(5), e2023JB027939. <https://doi.org/10.1029/2023JB027939>
- Haines, A. J., and Holt, W. E. (1993). A procedure for obtaining the complete horizontal motions within zones of distributed deformation from the inversion of strain rate data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B7), 12057–12082.

- Hergert, T., and Heidbach, O. (2010). Slip-rate variability and distributed deformation in the Marmara Sea fault system. *Nature Geoscience*, 3(2), 132–136. <https://doi.org/10.1038/ngeo739>
- Hubert-Ferrari, A., Armijo, R., King, G., Meyer, B., and Barka, A. (2002). Morphology, displacement, and slip rates along the North Anatolian Fault, Türkiye. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B10), ETG-9.
- Jackson, J., and McKenzie, D. (1988). The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East. *Geophysical Journal International*, 93(1), 45–73.
- Jolivet, L., and Faccenna, C. (2000). Mediterranean extension and the Africa-Eurasia collision. *Tectonics*, 19, 1095–1106.
- Karabulut, H., Paul, A., Özbakır, A. D., Ergün, T., and Şentürk, S. (2019). A new crustal model of the Anatolia–Aegean domain: Evidence for the dominant role of isostasy in the support of the Anatolian plateau. *Geophysical Journal International*, 218(1), 57–73.
- Kiratzı, A., Papazachos, C., Özacar, A., Pinar, A., Kkallas, C., and Sopacı, E. (2021). Characteristics of the 2020 Samos earthquake (Aegean Sea) using seismic data. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1–23.
- Kostrov, B. V. (1974). Seismic moment and energy of earthquakes, and seismic flow of rock. *Izvestiya, Academy of Sciences, USSR, Physics of the Solid Earth*, 1, 23–44.
- Kreemer, C., Haines, J., Holt, W. E., Blewitt, G., and Lavalée, D. (2000). On the determination of a global strain rate model. *Earth, Planets and Space*, 52(10), 765–770.
- Kürçer, A., Özaksoy, V., Özalp, S., Güldoğan, Ç. U., Özdemir, E., and Duman, T. Y. (2017). The Manyas fault zone (southern Marmara region, NW Türkiye): Active tectonics and paleoseismology. *Geodinamica Acta*, 29(1), 42–61.
- Le Pichon, X., Şengör, A. M. C., Demirbağ, E., Rangin, C., Imren, C., Armijo, R., ... and Tok, B. (2001). The active main Marmara fault. *Earth and Planetary Science Letters*, 192(4), 595–616.
- Manzo, R., Cesca, S., Galluzzo, D., La Rocca, M., Picozzi, M., and Di Maio, R. (2024). Source analysis of low frequency seismicity at Mt. Vesuvius by a hybrid moment tensor inversion. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 454, 108173. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.108173>.
- Maurer, J., and Materna, K. (2023). Quantification of geodetic strain rate uncertainties and implications for seismic hazard estimates. *Geophysical Journal International*, 234(3), 2128–2142. <https://doi.org/10.1093/gji/ggad313>
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., ... and 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.
- McKenzie, D. (1972). Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophysical Journal International*, 30(2), 109–185.
- Mutlu, A. K., and Karabulut, H. (2011). Anisotropic Pn tomography of Türkiye and adjacent regions. *Geophysical Journal International*, 187(3), 1743–1758. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05015.x>
- Nyst, M., and Thatcher, W. (2004). New constraints on the active tectonic deformation of the Aegean. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B11).
- Okay, A. I. (2000). Was the late Triassic orogeny in Türkiye caused by the collision of an oceanic plateau? In E. Bozkurt, J. A. Winchester, and J. D. Piper (Eds.), *Tectonics and Magmatism in Türkiye and the Surrounding Area* (Special Publication 173, pp. 25–42). Geological Society, London.
- Okay, A. I., and Nikishin, A. M. (2015). Tectonic evolution of the southern margin of Laurasia in the Black Sea region. *International Geology Review*, 57(5–8), 1051–1076.
- Okay, A. I., and Tüysüz, O. (1999). Tethyan sutures of northern Türkiye. *Geological Society, London, Special Publications*, 156(1), 475–515.
- Poyraz, F., and Hastaoğlu, K. Ö. (2020). Monitoring of tectonic movements of the Gediz Graben by the PSInSAR method and validation with GNSS results. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 844. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05834-5>
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Çakmak, R., ... and 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).
- Reilinger, R., and McClusky, S. (2011). Nubia–Arabia–Eurasia plate motions and the dynamics of Mediterranean and Middle East tectonics. *Geophysical Journal International*, 186(3), 971–979.
- Rösler, B., Stein, S., and Spencer, B. (2023). When are non-double-couple components of seismic moment tensors reliable? *Seismica*, 2(1). <https://doi.org/10.26443/seismica.v2i1.418>

- Savage, J. C., and Simpson, R. W. (1997). Surface strain accumulation and the seismic moment tensor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(5), 1345–1353.
- Slemmons, D. B., and Depolo, C. M. (1986). Evaluation of active faulting and associated hazards. *Active Tectonics*, 1986, 45–62.
- Stampfli, G. M., and Borel, G. D. (2002). A plate tectonic model for the Palaeozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrones. *Earth and Planetary Science Letters*, 169, 17–33.
- Şengör, A. C. and Canitez, N. (1982). The North Anatolian Fault. *Alpine-Mediterranean Geodynamics*, 7, 205–216.
- Şengör, A. M. C. (1985). Geology: East Asian tectonic collage. *Nature*, 318(6041), 16–17.
- Şengör, A. M. C., Altın, D., Cin, A., Ustaömer, T., and Hsü, K. J. (1988). Origin and assembly of the Tethyside orogenic collage at the expense of Gondwana Land. *Geological Society, London, Special Publications*, 37(1), 119–181.
- Şengör, A. M. C., Tüysüz, O., Imren, C., Sakıncı, M., Eyidoğan, H., Görür, N., ... and Rangin, C. (2005). The North Anatolian fault: A new look. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33(1), 37–112.
- Şengör, A. M. C., and Yılmaz, Y. (1981). Tethyan evolution of Türkiye: A plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75, 81–241.
- Tatar, O., Poyraz, F., Gürsoy, H., Cakir, Z., Ergintav, S., Akpınar, Z., ... and Yavaşoğlu, H. (2012). Crustal deformation and kinematics of the Eastern Part of the North Anatolian Fault Zone (Türkiye) from GPS measurements. *Tectonophysics*, 518, 55–62.
- Taymaz, T., Jackson, J., and McKenzie, D. (1991). Active tectonics of the north and central Aegean Sea. *Geophysical Journal International*, 106(2), 433–490.
- Taymaz, T., Yılmaz, Y., and Dilek, Y. (2007). The geodynamics of the Aegean and Anatolia: Introduction (Vol. 291, No. 1, pp. 1–16). London: The Geological Society of London.
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., and Tian, D. (2019). The Generic Mapping Tools Version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(11), 5556–5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>.
- Westaway, B. (1994). Present-day kinematics of the Middle East and eastern Mediterranean. *Journal of Geophysical Research*, 99, 12071–12090.
- Yılmaz, Y. (2017). Major problems of Western Anatolian geology. *Active Global Seismology*, 141–187.
- Yılmaztürk, A., Bayrak, Y., and Çakır, Ö. (1998). Crustal seismicity in and around Türkiye. *Natural Hazards*, 18, 253–267.
- Yolsal-Cevikbilen, S., Taymaz, T., and Helvacı, C. (2014). Earthquake mechanisms in the Gulfs of Gökova, Sığacık, Kuşadası, and the Simav Region (western Türkiye): Neotectonics, seismotectonics, and geodynamic implications. *Tectonophysics*, 635, 100–124.
- Zhu, L., Mitchell, B. J., Akyol, N., Çemen, I., and Kekovali, K. (2006). Crustal thickness variations in the Aegean region and implications for the extension of continental crust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B1).
- Zhu L, Akyol N, Mitchell BJ, Sözbilir H (2006). Seismotectonics of Western Türkiye from high resolution earthquake relocations and moment tensor determinations. *Geophysical Research Letters* 33, L07316. doi: 10.1029/2006GL025842
- Poyraz, F., and Hastaoğlu, K. Ö. (2020). Monitoring of tectonic movements of the Gediz Graben by the PSInSAR method and validation with GNSS results. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 844. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05834-5>.

Etik, Beyan ve Açıklamalar

1. Etik Kurul izni ile ilgili;
☒ Bu çalışmanın yazar/yazarları, Etik Kurul İznine gerek olmadığını beyan etmektedir.
 2. Bu çalışmanın yazar/yazarları, araştırma ve yayın etiği ilkelerine uyduklarını kabul etmektedir.
 3. Bu çalışmanın yazar/yazarları kullanmış oldukları resim, şekil, fotoğraf ve benzeri belgelerin kullanımında tüm sorumlulukları kabul etmektedir.
 4. Bu çalışmanın benzerlik raporu bulunmaktadır.
-