

Kuzey Anadolu Fayı Yedisu Segmenti Kabuk Deformasyon Analizi: GPS ve Sismolojik Veriler ile Entegratif Modelleme

Fatih Sünbül ¹ ,

¹ İzmir Bakırçay Üniversitesi, Coğrafya Bölümü, Türkiye, fatih.sunbul@bakircay.edu.tr

Kaynak Göster: Sünbül, F. (2026) Kuzey Anadolu Fayı Yedisu Segmenti kabuk deformasyon analizi: GPS ve sismolojik veriler ile entegratif modelleme. Geomatik, 11(1), 194-205.

DOI: 10.29128/geomatik.1818628

Anahtar Kelimeler

Yedisu Segmenti
KAF
GPS
CMT Katalog
Gerinim Oranı

Araştırma Makalesi

Geliş:06.11.2025
Revize:26.11.2025
Kabul:07.12.2025
Yayınlanma:01.04.2026



Öz

Bu çalışma, Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun (KAFZ) doğu ucunda yer alan Yedisu Segmenti'nde gerinim birikimi ve sismik boşluk ilişkisini, yüksek çözünürlüklü GPS verileri ile sismolojik moment birikimini entegre ederek analiz etmektedir. Bicubic spline enterpolasyon yöntemi kullanılarak elde edilen gerinim hızı alanları; efektif gerinim ($\epsilon' > 100 \times 10^{-9} \text{ yıl}^{-1}$), dilatasyon ($\epsilon'_{\text{dilatasyon}} < -30 \times 10^{-9} \text{ yıl}^{-1}$) ve makaslama gerinimi ($\epsilon'_{\text{makaslama}} > 125 \times 10^{-9} \text{ yıl}^{-1}$) bakımından Yedisu Segmenti'nde belirgin bir deformasyon yoğunlaşması olduğunu göstermektedir. Negatif dilatasyon değerleri, bu segmentin sıkışmalı bir rejim altında kaldığını ve yüzey kırığı üretmeksizin gerinim biriktirdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, 1784 yılından bu yana yüzey kırılmalı büyük bir depremin meydana gelmemesi ve yaklaşık 2 metrelik kayma açığına (slip deficit) işaret eden veriler, segmentin kilitli ve sismik olarak tehlikeli olduğunu düşündürmektedir. Bu bulgular, hem gerinim kaynaklı hem de tarihsel deprem kayıtlarına dayalı çok disiplinli bir yaklaşımla, segmentin ileri düzeyde yüklenmiş bir sismik boşluk olduğunu doğrulamaktadır. Sonuçlar, bölgesel sismik tehlike modellerinde, Yedisu Segmenti'nin özel olarak değerlendirilmesini ve yerel yönetimlerin önleyici afet stratejilerini bu doğrultuda şekillendirmesini önermektedir.

Crustal deformation analysis of the Yedisu Segment of the North Anatolian Fault: an integrative modeling approach using GPS and seismological data

Keywords

Yedisu segment
NAF
GPS
CMT Catalogue
Strain Rate

Research Article

Received:
Revised:
Accepted:
Published:

Abstract

This study investigates the strain accumulation and seismic quiescence along the easternmost segment of the North Anatolian Fault Zone (NAFZ), namely the Yedisu Segment, through an integrative approach combining high-resolution GPS-based geodetic strain modeling and cumulative seismic moment analysis. Bicubic spline interpolation applied to horizontal velocity vectors reveals pronounced deformation anomalies characterized by effective strain rates exceeding $100 \times 10^{-9} \text{ yr}^{-1}$, dilatational strain below $-30 \times 10^{-9} \text{ yr}^{-1}$ (indicating strong crustal compression), and shear strain peaking at $125 \times 10^{-9} \text{ yr}^{-1}$. These metrics collectively identify the Yedisu Segment as a mechanically locked and critically loaded fault zone. The persistent compressional strain, in the absence of recent surface-rupturing earthquakes since the 1784 event, implies a slip deficit of over 2 meters—sufficient to generate an $M_w \geq 7.0$ earthquake. The findings corroborate earlier paleoseismic, geodetic, and stress modeling studies, positioning Yedisu as a seismic gap within the NAFZ. This work underscores the necessity of incorporating fault-specific strain metrics into regional hazard models and calls for proactive disaster preparedness strategies tailored to this tectonically vulnerable region.

1. Giriş

Kuzey Anadolu Fayı (KAF), Türkiye'nin doğusundaki Karlıova üçlü birleşim noktasından Saros Körfezi'ne kadar yaklaşık 1200 km boyunca uzanan ve küresel ölçekte en etkin sağ yanal doğrultu atımlı fay sistemlerinden biridir. [1]. Anadolu Plakası'nın batıya doğru gerçekleşen hareketini büyük ölçüde denetleyen bu fay sistemi, Ege'nin genişlemeli tektoniği ile Doğu Anadolu'nun sıkışmalı yapısı arasında kritik bir kinematik geçiş zonu oluşturmaktadır. [2-3]. KAF, Alp-Himalaya orojenik kuşağı üzerinde yer alması nedeniyle uluslararası düzeyde sismotektonik araştırmaların merkezinde yer almakta; 1999 Kocaeli (Mw 7.4) ve Düzce (Mw 7.2) depremleri, bu fay sistemine yönelik bilimsel ilgiyi artırmıştır [4-5]. Benzer şekilde, 2023 Kahramanmaraş depremleri, Doğu Anadolu Fay Zonu'na ilişkin araştırmaları hızlandırmış; bölgesel deformasyon aktarımı, levha içi gerilme etkileşimleri ve segment ölçekli fay davranışına yönelik yeni jeodinamik değerlendirmelerin yapılmasına olanak sağlamıştır [6].

KAF'ın batı segmentleri gelişmiş GNSS ağları [7] ile yüksek çözünürlüklü sismik ters çözüm çalışmaları [8] sayesinde ayrıntılı biçimde karakterize edilmiş olsa da, doğu kesimde yer alan Erzincan-Amasya koridoru hem jeodezik hem de sismotektonik açıdan hâlen görece yetersiz temsil edilen bir çalışma alanı niteliğindedir. Bu koridorun doğu ucunda yer alan Yedisu Segmenti, aletsel dönemde kırılmamış olması nedeniyle "sismik boşluk" (seismic gap) olarak tanımlanmakta ve kilitli durumda olduğu değerlendirilmektedir [9-10]. Paleosismolojik veriler, Yedisu Segmenti'nde son 2000 yıl içinde en az altı yüzey kırılmalı depreme işaret etmektedir [11]. Bu bulgular, GPS temelli gerilme modelleri ve Coulomb stres aktarımı analizleri ile desteklenerek segmentin Mw $\geq$ 7.0 büyüklüğünde bir deprem üretme potansiyeli taşıdığını göstermektedir [12-14]. 1939, 1949, 1966 ve 1992 depremlerinin art arda gerçekleşmesi sonucunda, segment üzerinde aktarılan kümülatif Coulomb geriliminin >10 bar düzeyine ulaştığı jeofizik modeller tarafından gösterilmiştir [15-16].

Yedisu Segmenti'nin taşıdığı sismik tehlike yalnızca jeodinamik bağlamla sınırlı değildir; aynı zamanda yüksek demografik maruziyet ile birleşerek çok boyutlu bir risk profilini gündeme getirmektedir. Segmentin etki alanına giren Erzincan, Bingöl, Tunceli gibi kent merkezleri ile birlikte doğrudan fay üzerinde veya yakınında yer alan Üzümlü, Pülümür, Kiğı, Adaklı ve Karlıova gibi yerleşimlerde toplam nüfus 430.000'i aşmaktadır [17]. Özellikle Erzincan'da 1939 (Mw 7.9) ve 1992 (Mw 6.8) depremlerinin neden olduğu ağır can ve mal kayıpları, zayıf zemin koşulları ve yetersiz yapı standartlarıyla birleşerek bu bölgenin kırılganlığını artırmıştır [18-19]. Dolayısıyla, fay-zonuna özgü sismik tehlike değerlendirmeleri, yerel zemin parametrelerine duyarlı kentsel planlama stratejileri ve afet öncesi müdahale kapasitesinin artırılması büyük önem arz etmektedir [20-22].

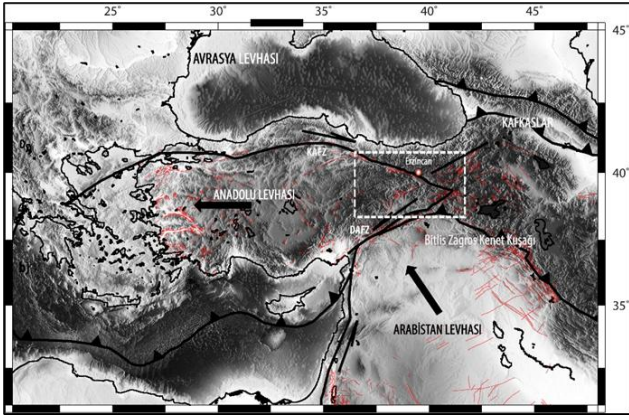
Son yıllarda yapılan çalışmalar, kısa vadeli GPS/InSAR temelli jeodezik hızların, binyıllık jeolojik kayma oranlarıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur [23-24]. Bu iki zaman ölçeği arasında

gözlenen farklılıklar, post-sismik yeniden yapılanma, stresin yönsel yeniden dağılımı ve segment geometrisindeki karmaşıklıklar gibi çok bileşenli mekanizmaların etkisini yansıtmaktadır [25]. Batı Anadolu'da bu tür bütünsel yaklaşımlar yaygın biçimde uygulanırken [7-26], Doğu Anadolu için bu çalışmalar hâlen sınırlıdır [27]. Bu metodolojik eksiklik, Yedisu gibi uzun süredir kırılmamış fay segmentlerinin sismik tehlike modellerine sistematik biçimde dâhil edilmesini gerekli kılmaktadır. Bu çalışma ile elde edilen bulgular, yalnızca bölgesel tektoniğin anlaşılmasına kuramsal katkılar sağlamakla sınırlı kalmamakta; aynı zamanda sismik zarar azaltma politikaları, afet öncesi hazırlık süreçleri, kentsel dönüşüm planlaması ve yüksek riskli topluluklara yönelik afet risk iletişimi açısından doğrudan uygulanabilir pratik çıktılar sunmaktadır.

2. Yedisu Segmenti

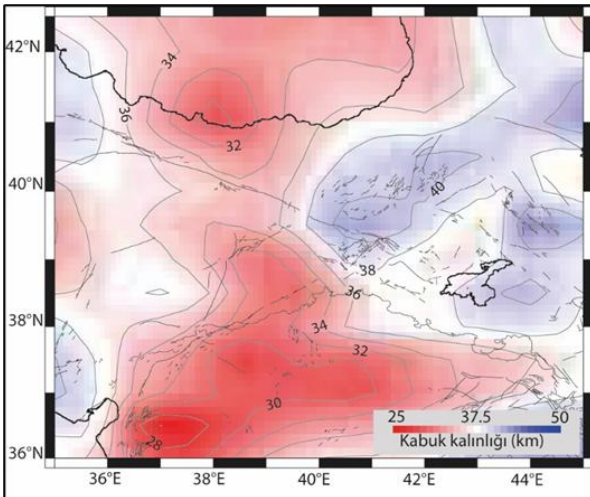
Türkiye, yeryüzündeki en aktif sismotektonik alanlardan biri olan Alp-Himalaya orojenik kuşağı üzerinde yer almaktadır (Şekil 1). Arabistan, Avrasya, Afrika ve Anadolu plakaları arasındaki çarpışma ve etkileşimler, litosferde karmaşık deformasyon desenlerine ve levha kaçışı mekanizmalarına neden olmuştur [28]. Özellikle Arabistan Plakası'nın kuzeye yönelen hareketi, Anadolu mikroplakasının batıya doğru itilmesine yol açarak, kıtasal iç bölgede gelişen iki büyük doğrultu atımlı fay sistemi boyunca deformasyon üretmektedir: sağ yönlü Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ve sol yönlü Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) [29]. Bu iki büyük fay sistemi, Anadolu'nun çevresindeki tektonik kaçışın ana sınırlarını oluşturmaktadır ve tarihsel ile aletsel dönem kayıtlarında çok sayıda büyük depremin kaynağı olarak tanımlanmıştır [30]. Bölgenin daha geniş neotektonik çerçevesi klasik olarak dört ana tektonik bölgeye ayrılmaktadır: sıkışmalı Doğu Anadolu, transpresyonel Kuzey Anadolu sistemi, genişlemeli Ege bölgesi ve içsel deformasyon geçiren Orta Anadolu [31-32]. Bu tektonik bölgeler, Tethys Okyanusu'nun Paleozoik ve Mezozoik dönemlerindeki evrimine bağlı olarak miras kalan litosferik zayıflıkları yansıtmaktadır [33-34].

Kuzey Anadolu Fay Zonu, Doğu Anadolu'daki Karlıova üçlü birleşim noktasından başlayarak kuzeybatıda Saros Körfezi'ne kadar yaklaşık 1200-1500 kilometre boyunca uzanmakta ve Anadolu ile Avrasya plakaları arasındaki birincil levha sınırını oluşturmaktadır [7]. Güncel jeodezik gözlemler, fay zonu boyunca ortalama kayma hızını 20-25 mm/yıl olarak sınırlandırmakta ve bu değerler levha hareketleri ile uyumluluk göstermektedir. Yapısal olarak, KAFZ, reaktif olmuş Neotetis kenet kuşağı üzerinde gelişmiş olan Kuzey Anadolu Makaslama Zonu (NASZ) içerisinde yer almakta ve uzun süreli bir doğrultu atımlı deformasyon geçmişi temsil etmektedir [2]. Fayın iç geometrisi, doğrultusu boyunca önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir; doğu Anadolu'da (örneğin Erzincan çevresi) dar tek faya karşılık gelen zonlar yer alırken, Marmara bölgesinde açılmalı havzaların ve fay adımlarının yer aldığı geniş ve segmentli yapılar öne çıkmaktadır [1].



Şekil 1. Türkiye'nin aktif tektoniği, kırmızı çizgiler fayları temsil etmektedir [35].

KAFZ boyunca yapılan kabuk kalınlığı analizleri, zon üzerinde birinci derece litosferik kontrastın varlığını ortaya koymaktadır. Bu verilere göre, Doğu Anadolu Platosu altında 40 km'yi aşan kabuk kalınlığı, Yedisu bölgesinde 36–38 km'ye düşmekte ve Orta Anadolu bloğu altında yaklaşık 32 km'ye kadar incelmektedir (Şekil 2; [36]). 20. yüzyıl boyunca KAFZ üzerinde gerçekleşen deprem dizisi, 1939 Erzincan depremiyle başlayarak 1999 Düzce depremine kadar ilerleyen bir gerilim boşalması süreci oluşturmuştur. Bu süreçte fay boyunca önemli ölçüde stres boşalması gerçekleşmiş, ancak Marmara Denizi'nin altındaki denizel segment ile Yedisu Segmenti kilitli durumda kalmıştır. GNSS verileri, Yedisu Segmenti'nin halen aktif biçimde tektonik stres biriktirmekte olduğunu ve kısa mesafelerde 10–15 mm/yıl düzeyine ulaşan yatay hız gradyanlarına sahip olduğunu göstermektedir [12]. Bu yüksek gradyan değerleri, segmentin aletsel dönemde kırılmamış olmasıyla birlikte değerlendirildiğinde, gelecekte meydana gelebilecek büyük bir deprem için güçlü potansiyel işaretleri sunmaktadır [13].



Şekil 2. Doğu Anadolu ve Kuzey Anadolu Fay Zonu çevresinde kabuk kalınlığı dağılımı (Mutlu ve Karabulut, [36]'dan yeniden çizilmiştir).

Yedisu Segmenti, Doğu Anadolu'nun en karmaşık jeolojik alanlarından birinde yer almakta olup, bu karmaşıklık uzun bir okyanusal eklenme, dalma-batma ve kıtasal çarpışma geçmişinin ürünüdür. Bölgenin jeodinamik yapısı, Erken Mezozoyik'ten Orta Tersiyer'e kadar

süregeleyen çok sayıda okyanus havzasının açılıp kapanmasıyla şekillenmiş; Pontid, Torid ve Anatolid tektonik bloklarının yakınsaması ile sonuçlanmıştır (Şekil 3). Bu kıtasal fragmanlar, İzmir-Ankara-Erzincan ve Bitlis-Zagros kenet kuşakları gibi majör kenet zonları ile birbirinden ayrılmakta olup, derin denizel tortul dizilerden yüksek basınçlı metamorfik topluluklara kadar uzanan tektono-stratigrafik birimlere ev sahipliği yapmaktadır [37].



Şekil 3. Türkiye ve çevresinin jeotektonik birimleri ile başlıca tektonik blokları [34].

Yedisu Segmenti boyunca yüzeylenen yerel jeoloji dört ana stratigrafik birimle karakterize edilmektedir. En yaşlı birimler, Paleozoyik-Mezozoyik yaşlı metamorfik temel kayalar ile Hınıs Metaofioliti gibi ofiyolitik melanjlari içermektedir. Bu birimler, serpantinleşmiş peridotit, dunit ve tektonik olarak yerleşmiş kromitli ultramafik kayalardan oluşmaktadır [38]. Üzerlerine geç Kretase-Eosen yaşlı pelajik kireçtaşları, radyolaritler ve volkanik breşler gelmekte olup, bu litofasiyeler okyanusal ortamdan kıta kenarı tortulanmasına geçişi yansıtmaktadır. Eosen-Miyosen aralığında gelişmiş Elmalı, Navru ve Balpayam formasyonları gibi volkano-sedimanter birimler ise çalışmanın merkez stratigrafisini oluşturmaktadır. Bu formasyonlar, tüf içerikli kireçtaşı, marn, kumtaşı ve lav akıntılarından meydana gelmekte olup, periyodik olarak karasal ile sığ denizel ortamlar arasında değişen tortul ortamların göstergesidir [39].

Daha genç Neojen yaşlı Mollakulaçdere ve Adilcevaz formasyonları ise, gölsel ve akarsu kaynaklı tortul ortamları temsil etmektedir. Bu birimler kömür, bitkisel kalıntı ve evaporit açısından zengin olup, düşey ve yanal fasiyes geçişleri göstermektedir. Söz konusu tortulanma karakteri, Miyosen döneminde tektonik kontrollü çökellerin havza içerisine taşınmasını ve çökme süreçlerini yansıtmaktadır [40]. En genç birimler ise Kuvaterner yaşlı alüvyon, kolüvyon ve kütle hareketi materyallerinden oluşmakta ve özellikle vadi tabanları ile drenaj havzalarında geniş alanlara yayılmaktadır. Bu zayıf tutturulmuş sedimanlar, özellikle Peri Çayı çevresinde, sismik dalga büyütmesine karşı yüksek duyarlılık gösteren zemin özellikleri sergilemektedir [41].

Yedisu Segmenti, Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) üzerinde yapısal olarak en karmaşık ve sismik açıdan en kritik kesimlerden birini oluşturmaktadır. Yaklaşık 70 kilometrelik bir uzunluk boyunca Üzümlü (Erzincan) ile

England ve ark. [47], Özener ve ark. [48] ve Tatar ve ark. [49] tarafından sunulan hata aralığı kullanılarak değerlendirilmiştir. Buna göre, Yedisu Segmenti çevresindeki göreceli tektonik kayma hızı $10-15 \pm 2$ mm/yıl olarak sınırlandırılmıştır. Ayrıca, intersismik kilitleme derinliği (8–15 km) ve kayma oranı hata aralıkları birlikte dikkate alındığında, segment boyunca biriken kayma açığı 2.0 ± 0.4 m olarak hesaplanmıştır.

Veri kümeleri arasındaki uyumu sağlamak amacıyla, tüm GPS hızları Avrasya levhasına sabitlenmiş ortak bir referans çerçevesine dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm, farklı çalışmalar arasındaki küçük sistematik kaymaları gidermek için Alchalbi ve ark. [50] tarafından önerilen üç bileşenli açıl dönüştürme (Euler dönüşü) parametrelerinin uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Dönüşüm sonrası kareler toplamı hatasının (RMS) 1.33 mm/yıl düzeyine kadar düşmesi, veri setlerinin referans çerçevesi açısından uyumlu hâle getirildiğini göstermektedir. Böylece, farklı yıllara ve ekipmanlara ait GPS hız ölçümleri tek bir ortak deformasyon alanı içinde birleştirilmiş; interpolasyon ve ters çözüm aşamalarında yönelim kaynaklı hatalar minimize edilmiştir. Dönüş parametrelerinin sayısal özetleri Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. GPS veri kümelerinin Avrasya’ya sabit referans çerçevesine dönüştürülmesinde RMS hatasını en aza indiren açıl dönüştürme parametreleri

	Enlem (°)	Boylam (°)	ω Kutup (°/Ma)	İstasyon Sayısı	İlk RMS (mm/yr)	Dönüş sonrası RMS (mm/yr)
(Özener ve ark., 2010)	22.03	51.45	-0.026	3	4.48	4.37
(Tatar ve ark., 2012)	11.05	0.19	0.007	14	2.39	2.33
(England ve ark., 2016)	38.5	27.8	0.015	21	2.95	1.88

Gerinim hızı alanları, küresel eğri koordinat sistemine tanımlanmış bicubic Bessel interpolasyonu uygulanarak hesaplanmıştır. Bu interpolasyon yöntemi, gözlenen ve modellenen yüzey hızları arasındaki artık (residual) farkı en aza indirerek yüksek doğrulukta sürekli alan tanımlar sağlar. Hız alanı matematiksel olarak şu şekilde ifade edilmektedir:

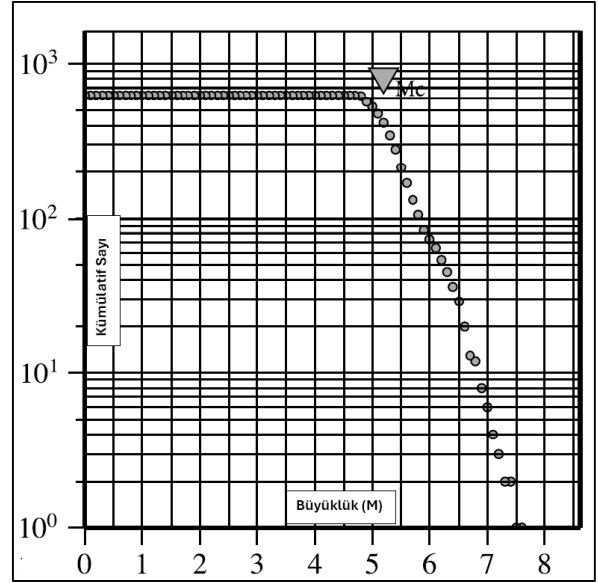
$$\vec{u} = r [\vec{W}(\hat{x}) * \hat{x}]$$

Burada $\hat{x}$ birim radyal konum vektörünü, r Dünya’nın yarıçapını, $\vec{W}(\hat{x})$ ise uzayda konuma göre değişen açıl hız vektör alanını temsil eder. Gerinim oranları ise $\vec{W}(\hat{x})$ vektörünün türevlerinden elde edilerek, hem uzanım (dilatasyon) hem de makaslama (shear) bileşenleri hesaplanmaktadır.

Çalışmada grid hücrelerine atanan anizotropik gerinim varyansı, Global CMT Kataloğu’nun magnitüd-frekans dağılımını gösteren Tablo 2’deki kümülatif grafiğe dayalı olarak belirlenmiştir [51]. Bu grafik, GCMT veri setinde tamamlanabilirlik (M_c) değerinin belirgin biçimde $M_w \approx 5.2$ olduğunu göstermekte; $M_w < 5.2$ aralığında kümülatif sayının yataylaşması, küçük depremlerin katalogta eksik temsil edildiğini ve moment tensörlerinin yüksek belirsizlik içerdiğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık $M_w \geq 5.2$ büyüklüğündeki depremler, hem moment tensörlerinin doğruluğu hem de Gutenberg–Richter eğrisine uygun dağılımları nedeniyle güvenilir bir örnekleme sunmaktadır. Bu nedenle varyans ölçeklendirmesinde yalnızca $M_w \geq 5.2$

büyüklüğündeki depremler dikkate alınmış; bu büyüklükteki depremlerin mekânsal yoğunluğu, özellikle Yedisu Segmenti gibi istasyon yoğunluğunun sınırlı olduğu alanlarda deformasyon anomalilerinin daha esnek ve fiziksel olarak gerçekçi biçimde modellenmesine olanak sağlamıştır.

Tablo 2. GCMT kataloğuna ait kümülatif magnitüd-frekans dağılımı ve $M_w \approx 5.2$ tamamlanabilirlik eşliğinin gösterimi.



Sınır etkilerinin (edge effects) model üzerinde baskın hale gelmesini engellemek amacıyla, hesaplama ızgarası Anatolya’nın çok ötesine taşırılmış; Ege, Arap Platformu ve Doğu Akdeniz gibi komşu tektonik alanları da kapsamıştır. Stabil (kararlı) Avrasya ve Afrika levhaları üzerindeki rijit bloklar maskeleye yoluyla devre dışı bırakılmış; deformasyon serbestliği yalnızca iç bölgelerdeki hücrelere atanmıştır. Son olarak, bölgesel gerinim enerjisi bütçesinin yapay biçimde artmasını önlemek amacıyla, heterojen varyans değerleri homojen bir referans modelin toplam enerjisi ile kalibre edilmiştir.

3.2. CMT kataloğundan gerinim modellemesi

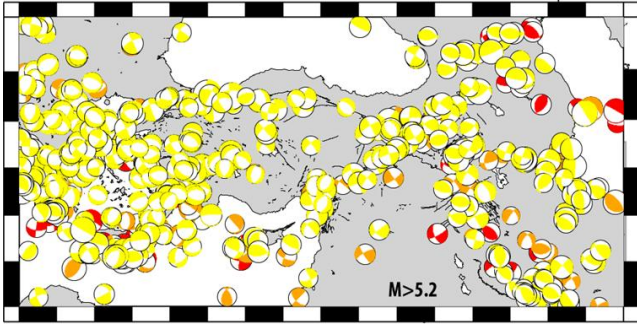
Jeodezik modellemeyi desteklemek amacıyla, bu çalışmada sismik gerinim birikimi moment tensörlerinin toplamı yöntemiyle değerlendirilmiştir. Deprem verileri, Global CMT Kataloğu’ndan [51] temin edilmiştir. Bu veri seti, $M_w \geq 5.2$ büyüklüğündeki depremleri içerecek şekilde filtrelenmiş ve artçı şoklar ile deprem kümelenmelerinin etkisini dışlamak üzere Frohlich ve Davis [52] algoritması kullanılarak deküme (declustering) işlemi uygulanmıştır. Ayrıca, odak mekanizması çözümlerinin güvenilirliği, Frohlich [53] tarafından geliştirilen kalite kontrol ölçütleriyle iyileştirilmiştir.

Sismik gerinim hızları, Kostrov kumulasyon yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır [54]. İlgili gerinim oranı tensörü aşağıdaki formülle ifade edilmektedir:

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

Buna göre, gerinim hızı tensörü $\dot{\epsilon}_{ij}$ belirli bir hacim ve zaman aralığında gerçekleşen depremlerin moment tensör bileşenlerinin toplamı üzerinden tanımlanır. Burada $\dot{\epsilon}_{ij}$ gerinim hızı tensörünün i ve j bileşenlerini temsil ederken μ , 3.2×10^{10} N/m² olarak alınan kayma modülünü ifade etmektedir. V analiz edilen bölgenin yatay alanı ile sabit kabul edilen 30 km kalınlığın çarpımıyla tanımlanan sismojenik hacmi temsil eder. T analiz edilen zaman aralığını, N ise bu süre boyunca meydana gelen ve modele dahil edilen deprem sayısını göstermektedir. Son olarak, m_{ij} terimi, her bir depremin moment tensörünün ilgili bileşenlerini ifade etmektedir. Bu parametrelerin tümü, toplam sismik gerinim oranının hem büyüklük hem de yönelim bakımından doğru biçimde belirlenmesi açısından kritik rol oynamaktadır.

Bu analizde kullanılan filtrelenmiş sismik veri setinin mekânsal dağılımı ve odak mekanizmaları Şekil 5'te sunulmaktadır. Şekilde, Doğu Akdeniz ve Anadolu bölgelerini kapsayan $M_w \geq 5.2$ büyüklüğündeki tüm depremler yer almaktadır. Bu moment tensörleri, başlıca gerinim yönelimlerinin belirlenmesinde ve yüksek sismik deformasyon zonlarının tanımlanmasında kullanılmıştır.

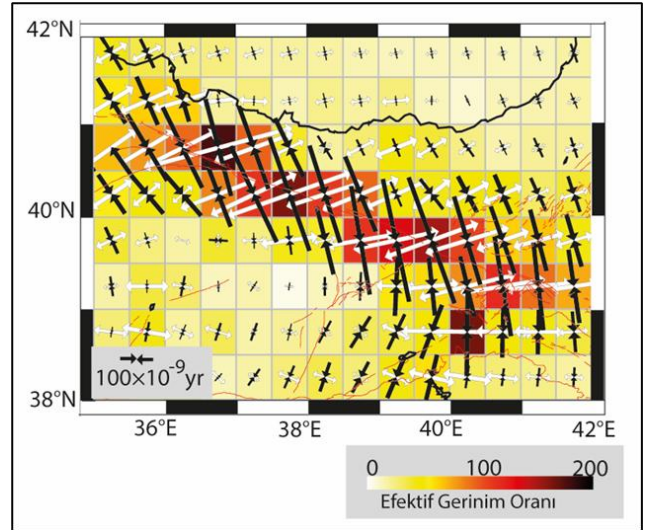


Şekil 5. Global CMT Kataloğu'ndan [51] elde edilen $M_w > 5.2$ büyüklüğündeki depremlerin mekânsal dağılımı ve odak mekanizmaları. Veri seti, analiz bütünlüğünü sağlamak amacıyla filtrelenmiş ve tekrar kümelenmiştir. Bu odak mekanizmaları, sismik gerinim hızı modellerinde kullanılmıştır.

4. Bulgular

4.1. Efektif gerinim oranı

Efektif gerinim oranı ($\dot{\epsilon}$) tam gerinim tensöründen türetilen skaler bir ölçüttür ve hem deviatorik (makaslama) hem de volümetrik (dilatasyonel) bileşenleri entegre ederek yön bağımsız toplam deformasyon şiddetini nicelendirir. Bu çalışmada, efektif gerinim oranları, Haines ve Holt [45] ile de Boor ve Golub [55] tarafından geliştirilen yöntem doğrultusunda, yatay GPS hız vektörlerine bicubic Bessel spline interpolasyonu uygulanarak, küresel eğri bir grid sistemi üzerinde hesaplanmıştır. Elde edilen tüm gerinim oranları 10^{-9} yıl⁻¹ (nanostrain/yıl) cinsinden ifade edilmiş olup, her bir grid noktası üst kabuk içindeki yerel deformasyon yoğunluğunu temsil etmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun (KAFZ) doğu segmenti boyunca dağılım gösteren efektif gerinim oranı (10^{-9} yıl⁻¹). Özellikle Yedisu Segmenti üzerine odaklanılmıştır.

Şekil 6, Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun doğu kesiminde, Karlıova üçlü birleşim noktasından Erzincan Havzası'na kadar uzanan belirgin bir yüksek gerinim koridorunu göstermektedir. Bu deformasyon kuşağı, Yedisu Segmenti boyunca belirginleşmekte olup, bu segment üzerinde ($\dot{\epsilon}$) değerleri 100 nanostrain/yıl seviyesini aşmakta, yer yer 200 nanostrain/yıl düzeyine ulaşmaktadır. Bu bulgular, Sunbul ve ark. [56] tarafından Karlıova-Van bölgesinde belgelenen 310 nanostrain/yıl'lık yüksek değerlerle karşılaştırılabilir düzeydedir ve doğrultu atımlı segmentasyon ile dönel fay kinematiklerinin aktif deformasyon kuşaklarında etkili olduğunu göstermektedir.

Şekil üzerine bindirilen siyah oklarla gösterilen vektör alanı, GPS verilerinden elde edilen yatay hız vektörlerini temsil etmektedir. Bu vektörlerin yönelimi ve uzunluğundaki değişimler, bölgesel kinematik gradyanları yansıtmaktadır. Özellikle Üçdam ve Elmalı çevresinde gözlenen belirgin vektör eğrilikleri ve ayrışmalar, sıklıkla fay adım zonları, geometrik karmaşıklıklar ve sismik çevrimler arası (interseismik) kilitleme ile ilişkilendirilmektedir.

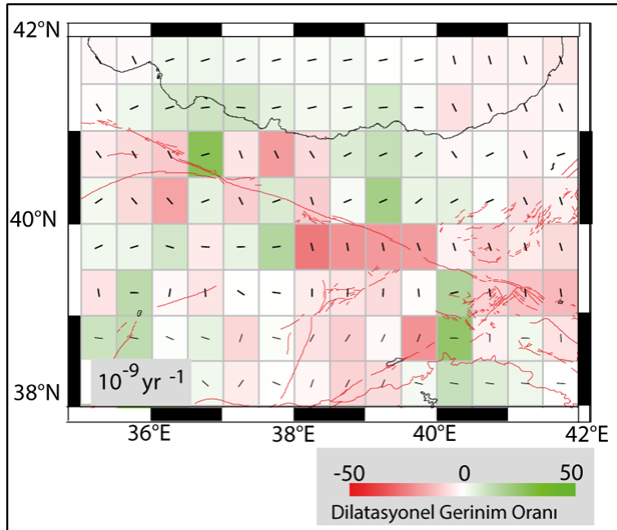
Bu derece yerel düzeyde gerinim birikiminin varlığı, Yedisu Segmenti'nin mekanik olarak kuplajlı ve kritik düzeyde yüklü bir fay kesimi olduğunu desteklemektedir. Bu değerlendirme, daha önce kayma açığı (slip-deficit) modelleri ve Coulomb stres transfer simülasyonları ile ortaya konan bulgularla (örneğin: [14-12]) uyumlu olup, segmentin yakın dönemde sismik boşalım göstermeksizin gerilim biriktirdiği hipotezini güçlendirmektedir.

Ayrıca, Yedisu koridoru boyunca kaydedilen yüksek ($\dot{\epsilon}$) değerleri ile çevresel alanlardaki düşük gerinim değerleri arasındaki keskin fark, belirgin bir deformasyon gradyanını ortaya koymaktadır. Bu mekânsal olarak lokalize olmuş gerinim zonları ile GPS temelli hız vektörlerinin yönelime dayalı rotasyonları birlikte değerlendirildiğinde, Yedisu Segmenti'nin, Kuzey Anadolu doğrultu atımlı deformasyon rejimi içerisinde ileri düzeyde interseismik yüklenme evresinde olduğu anlaşılmaktadır.

4.2. Dilatasyonel gerinim oranı

Dilatasyonel gerinim oranı alanları, yerkabuğundaki hacimsel deformasyon bileşenini nicelendirerek, kabuğun genişlemeye uğradığı (pozitif dilatasyon) ve kısılma rejiminin baskın olduğu (negatif dilatasyon) zonların uzamsal olarak ayırt edilmesine olanak sağlar. Bu parametreler, kabuksal blokların tektonik gerilim altında nasıl deformasyona uğradığını ve hangi bölgelerde gerinim enerjisinin biriktiğini anlamak açısından temel öneme sahiptir. Şekil 7, Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun (KAFZ) doğu segmenti boyunca GPS hız verilerinden bicubic spline enterpolasyonu ile elde edilen dilatasyonel gerinim oranlarının mekânsal dağılımını göstermektedir. Tüm değerler 10^{-9} yıl⁻¹ (nanostain/yıl) biriminde sunulmuştur; kırmızı tonlar sıkışmayı, yeşil tonlar ise alan genişlemesini temsil etmektedir.

Yedisu Segmenti çevresindeki alan, ağırlıklı olarak – 30 nanostain/yıl'ı aşan negatif değerlerle tanımlanan güçlü bir sıkışma rejimiyle karakterize edilmektedir. Erzincan'ın Üzümlü ilçesinden başlayarak Bingöl'ün Yedisu ilçesine kadar uzanan bu bölge, sürekli bir kabuksal daralma kuşağı oluşturmakta ve bu deformasyon alanı, daha önce jeodezik olarak kilitli ve yapısal olarak segmentlenmiş olarak tanımlanan zonlarla çakışmaktadır. Karlıova, Kiğı, Adaklı, Pülümür ve Yedisu gibi doğrudan bu zon içerisinde veya hemen bitişiğinde yer alan ilçeler, Anadolu ve Avrasya plakaları arasındaki oblik yakınsamanın etkisiyle oluşan transpresyonel tektonik rejimle uyumlu şekilde belirgin sıkışma izleri sergilemektedir.



Şekil 7. Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun (KAFZ) doğu kesiminde dağılım gösteren dilatasyonel gerinim oranı alanı (10^{-9} yıl⁻¹). Pozitif (yeşil) ve negatif (kırmızı) değerler sırasıyla genişleme ve sıkışmayı ifade etmektedir.

Bu kabuksal daralma yoğunlaşması, aynı zamanda yüksek Coulomb stres birikimi (bkn [13]), belirgin GPS hız gradyanları ve tarihsel sismik sessizlikle çakışmaktadır. Bu bulgular, Yedisu Segmenti'nin yalnızca geometrik olarak segmentlenmiş bir fay kesimi olmadığını, aynı zamanda mekanik olarak güçlü biçimde kilitlenmiş bir yapıya sahip olduğunu göstermekte;

dolayısıyla bölgenin gelecekte büyük ölçekli bir tektonik kırılma üretme potansiyelini açık biçimde ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, segmentte uzun tekrarlanma aralıkları öngören paleosismik kayıtlarla da uyumludur; nitekim Yedisu Segmenti yaklaşık iki yüzyıldır yüzey kırığı üreten bir depremle aktive olmamıştır.

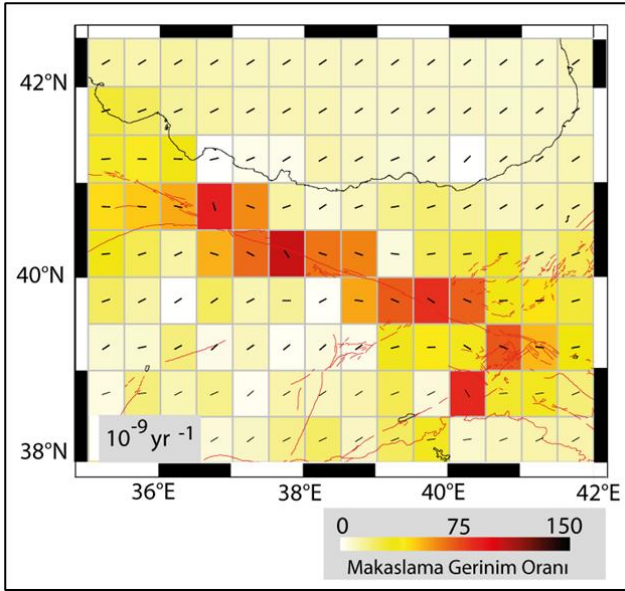
KAFZ'nin kuzeyindeki Tercan, Erzincan ve Çayırli gibi alanlarda ise düşük genlikli genişlemeli (pozitif) gerinim alanlarına geçiş gözlenmektedir. Bu bölgelerdeki genişleme, blok rotasyonları, esneklik kaynaklı kabuksal yükselmeler veya ikincil normal faylanma ve kıvrımlanma yoluyla gerinimin karşılandığına işaret edebilir. Bu farklı gerinim rejimlerinin ~50 km gibi dar bir mekânsal geçiş zonu içerisinde yer alması, deformasyonun yanal olarak güçlü bir gradiyente sahip olduğunu ve bu lokalizasyonun ardında, miras alınmış litosferik heterojenliğin önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Ayrıca, bu gerinim alanı nüfus yoğunluğu verileri (Şekil 4) ile üst üste bindirildiğinde, dikkat çekici bir mekânsal çakışma ortaya çıkmaktadır: en yüksek sıkışmalı gerinim bölgeleri, Erzincan (158.093), Bingöl (173.856) ve Karlıova (26.176) gibi yoğun nüfuslu yerleşim alanlarıyla örtüşmektedir. Bu durum, bölgeye özgü sismik tehlike modellerinin oluşturulmasında dilatasyonel gerinim parametrelerinin, demografik risk göstergelerinin ve fay geometrisinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini açıkça göstermektedir. Özellikle kilitlenmiş fay davranışı ile sıkışmalı gerinimin ve nüfus yoğunluğunun aynı bölgede birleşmesi, Yedisu Segmenti'ni deprem hazırlık ve risk azaltma stratejileri açısından kritik bir hedef haline getirmektedir.

4.3. Makaslama gerinim oranı

Makaslama gerinim oranı alanları, bitişik kabuksal bloklar arasındaki yanal deformasyon hızını karakterize ederek, doğrultu atımlı fay sistemlerinde (örneğin Kuzey Anadolu Fay Zonu- KAFZ) elastik gerinim birikiminin önemli bir göstergesini oluşturur. (10^{-9} yıl⁻¹) biriminde ifade edilen bu değerler, fay izine paralel diferansiyel hareketin şiddetini yansıtır ve doğrudan, kilitlenmiş fay segmentlerinin sismojenik potansiyeli ile ilişkilidir.

Şekil 8, KAFZ'nin doğu kesimi boyunca makaslama gerinim oranlarının dağılımını göstermektedir. Doğubati doğrultusuna yakın, kuzeydoğu-güneybatı uzanımlı belirgin bir yüksek gerinim kuşağı gözlenmektedir ve bu kuşak, Erzincan'ın Üzümlü ilçesinden Bingöl'ün Karlıova ilçesine kadar uzanan Yedisu Segmenti ile mekânsal olarak örtüşmektedir. Bu kuşak içerisinde, özellikle Adaklı, Kiğı ve Yedisu çevresinde, makaslama gerinim değerleri 125 nanostain/yıl seviyesini aşmakta olup, bu lokal maksimumlar büyük miktarda gerinim enerjisinin biriktiğine işaret etmektedir. Bu durum, segmentin sismik olarak kilitlenmiş olabileceğine dair önemli bir göstergedir.



Şekil 8. Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun doğu segmenti boyunca makaslama gerinim oranlarının dağılımı (10^{-9} yıl $^{-1}$). Yüksek makaslama gerinimi, Yedisu Segmenti boyunca yoğunlaşarak lokalize elastik gerinim birikimini ve artan sismik tehlike potansiyelini ortaya koymaktadır.

Bu yüksek gerinim zonunun aksine, kuzeyde Tercan ve Erzincan ile güneyde Göynük ve Bingöl Havzası gibi çevresel alanlar görece düşük makaslama gerinim değerleri sergilemektedir (genellikle 25 nanostrain/yıl'ın altındadır). Bu mekânsal farklılık, deformasyonun bölge geneline yayılmadığını; aksine, ana fay izi boyunca yoğunlaştığını ve Yedisu Segmenti'nde mekanik süreklilik ile gerilme birikiminin ön planda olduğunu göstermektedir. Gözlenen makaslama desenleri, aynı zamanda fay basamakları, en echelon (şeritli) segmentler ve fay bükülmeleri gibi geometrik karmaşıklıklara da duyarlıdır. Bu yapılar, büyük depremlerin nükleasyon (başlangıç) noktaları olarak işlev görebilir. Özellikle Üçdam ve Elmalı'nın güney kesimi gibi bölgelerde, makaslama gerinim gradyanlarında keskin artışlar gözlenmektedir.

Bu bulgular, Yedisu Segmenti'nin kilitlenmiş ve kritik düzeyde gerilim biriktiren bir fay kesimi olduğu yönündeki önceki Coulomb stres transferi analizleri, hız gradyanları ve paleosismik çalışmalarla uyumludur. Makaslama geriniminin güçlü bir şekilde lokalize olması, bu segmentin aktif bir sismik boşluk (seismic gap) olarak değerlendirilmesini desteklemektedir. Bu durum, Doğu Anadolu'da deprem tehlikesi öngörüsü, erken uyarı sistemlerinin tasarımı ve kent planlaması gibi konularda kritik öneme sahiptir. Segment çevresinde yer alan yoğun nüfuslu ilçeler ve uzun süreli sismik sessizlik göz önünde bulundurulduğunda, bu bulgular, fay-özelinde izleme stratejilerinin ve kapsamlı tehlike azaltım planlarının geliştirilmesi gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır [57].

5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, Yedisu Segmenti'nin kinematik özelliklerini bölgesel GPS hız alanları ve güncel sismolojik veriler ışığında yeniden değerlendirerek, segmentteki gerilme birikimi ile buna bağlı sismik

tehlikeyi tanımlayan güncel bir jeodinamik çerçeve sunmaktadır. Sürekli GPS tabanlı gerinim çözümleri ile odak mekanizması temelli deformasyon göstergelerinin birlikte yorumlanması, Yedisu Segmenti'nin halen belirgin düzeyde kabuksal deformasyon biriktirdiğini ve bölgesel ölçekte yüksek sismik potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Jeodezik gerinim alanı çözümleri, özellikle yüksek efektif gerinim ($\epsilon' > 100 \times 10^{-9}$ yıl $^{-1}$), belirgin sıkışmalı dilatasyonel gerinim ve 125 nanostrain/yıl'ı aşan makaslama gerinim değerlerinin segment boyunca lokalize olarak yoğunlaştığını göstermektedir. Bu göstergeler birlikte ele alındığında, Yedisu Segmenti'nin mekanik olarak kilitlenmiş olduğu ve biriken deformasyonu aseismik kayma ya da orta büyüklükteki depremlerle boşaltmadığı anlaşılmaktadır. Elde edilen sonuçlar, Aktuğ ve ark. [12] ile Sunbul ve ark. [56] tarafından yapılan önceki jeodezik yorumlar ve Haines & Holt [45] kaynaklı nümerik modeller ile örtüşmektedir. Bu durum, Yedisu'nun KAF sistemi içinde kritik bir sismik boşluk (seismic gap) olarak değerlendirilmesi gerektiğini kuvvetle desteklemektedir.

Ayrıca, bu jeodezik göstergelerin daha önce haritalanmış olan jeomorfolojik yapılarla (örneğin fay sıçramaları, akarsu ötelenmeleri ve fay yelpazeleri) mekânsal olarak çakışması, segmentin uzun vadeli gerinim lokalizasyonuna sahip yapısal olarak kalıcı bir fay zone olduğunu göstermektedir [11, 45]. Tarihsel deprem katalogları, bu segmentte son iki yüzyılda yüzey kırığı oluşturan herhangi bir büyük depremin meydana gelmediğini ve son büyük kırığın 1784 yılında gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca, 1939–1992 yılları arasındaki depremler sonrası yapılan Coulomb stres aktarım modellemeleri [14, 15], Yedisu çevresinde biriken toplam stresin 10 bar'ı aştığını ve segmentin kritik düzeyde gerilme biriktirdiğini ortaya koymaktadır.

Bu bulgular, jeodezik gerinim oranları ile sismik moment salınımı arasındaki belirgin uyumsuzluğa dikkat çekmektedir. Son 200 yılda $M_w \geq 6.5$ büyüklüğünde bir depremin gerçekleşmemesi, buna karşın yılda 10–15 mm'lik tektonik hareketin devam ediyor olması, 2 metreden fazla bir kayma açığına (slip deficit) işaret etmektedir. Bu birikim, $M_w \geq 7.0$ büyüklüğünde yıkıcı bir depremin meydana gelebileceği anlamına gelmektedir. Bu durum, Yedisu, Kiğı ve Karlıova gibi yerleşim merkezleri için ciddi sonuçlar doğurabilecek bir tehlike oluşturur. Global CMT kataloğundan türetilen anizotropik moment tensör yönelimlerinin, KAFZ'nin temel gerilme eksenleriyle sistematik olarak örtüşmesi, bu segmentteki gerilme lokalizasyonunun sürekliliğini desteklemektedir.

Bu bağlamda, segment kaynaklı sismik tehlikenin azaltılmasına yönelik bir dizi teknik öneri sunulmaktadır. Öncelikle, Yedisu Segmenti boyunca sürekli çalışan, yüksek örnekleme hızlı bir GNSS izleme ağıının kurulması; intersismik gerinim birikimi ile olası nükleasyon evrelerinin gerçek zamanlı izlenebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. İkinci olarak, bölgesel sismisite ağıının sıklaştırılması, düşük magnitudü depremlerin daha yüksek doğrulukla belirlenmesini sağlayarak olası öncü dizilerin, yavaş kayma olaylarının veya aseismik deformasyon süreçlerinin daha güvenilir biçimde ayırt edilmesine imkân tanıyacaktır. Üçüncü olarak, segmentin özellikle orta ve doğu kesimlerinde

paleosismolojik hendek çalışmalarının genişletilmesi gerekmektedir; mevcut çalışmaların mekânsal kapsamı sınırlı olduğundan, tarihsel deprem tekrarlama döngüsünün daha sağlıklı belirlenebilmesi için ek stratigrafik veriye ihtiyaç vardır [11]. Son olarak, uydu tabanlı InSAR gözlemlerinin GPS verileriyle bütünleştirilmesi, intersismik deformasyon alanının daha yüksek mekânsal çözünürlükle haritalanmasına ve fay kilitlenme derinliği ile kayma hızı parametrelerinin daha güvenilir biçimde modellenmesine olanak sağlayacaktır [58–59].

Yedisu Segmenti boyunca yüksek gerinim zonlarının, kritik altyapı hatları ve yoğun nüfuslu yerleşimlerle mekânsal olarak çakışması, bölgesel ölçekte sismik dirençliliğin artırılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, yerel yönetimlerin ve planlama otoritelerinin, zemin büyütme etkilerini dikkate alan yapı standartlarını uygulaması, mevcut yapı stokunun sismik güçlendirmesini teşvik etmesi ve toplumun afet farkındalığını kurumsallaştırması büyük önem taşımaktadır. Çalışmada elde edilen jeodezik ve sismolojik bulgular, senaryo temelli tehlike analizlerinin ve erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi için sağlam bir bilimsel temel sunmakta; Yedisu Segmenti'nin yapısal karmaşıklığı ve kinematik davranışı dikkate alındığında, bu bölgenin Doğu Anadolu'da gelecekte meydana gelebilecek yüksek magnitüdü bir depremin olası kaynağı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, segmentin sismik tehlikesinin yönetimi, yalnızca jeodinamik gözlemlere değil; aynı zamanda bilimsel, idari ve toplumsal aktörlerin eşgüdümüne dayanan bütünleşik, disiplinler arası bir yaklaşıma ihtiyaç duymaktadır.

Ayrıca, 6 Şubat 2023'te meydana gelen Kahramanmaraş merkezli Mw 7.7 ve Mw 7.6 depremlerinin Doğu Anadolu Fay Zonu üzerindeki stres evrimine etkisi, bu çalışmanın bulgularıyla tutarlı biçimde değerlendirilmelidir. Daha önceki çalışmamızda Sunbul [13]'te gösterildiği üzere, özellikle 1939 Mw 7.9 Erzincan depremi sonrası viskoelastik gevşemenin, Kahramanmaraş–Malatya segmentinde yaklaşık 0.1–0.2 bar düzeyinde bir stres azalmasına; buna karşılık Yedisu segmenti boyunca 4–6 bar arasında önemli bir stres artışına yol açtığı belirlenmişti (bkz. Şekil 6–8). 6 Şubat 2023 depremleri, bu tarihsel stres boşalmasının ardından uzun süredir yük biriken bölgesel segmentlerin beklenen kırılma davranışı ile tutarlı olup, özellikle Kahramanmaraş–Malatya segmentinin 200 yılı aşkın bir süredir biriktirdiği gerinim enerjisinin aniden boşalması şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca bu büyük çift-deprem, Doğu Anadolu Fay Zonu'nun kuzeydoğusundaki segmentlerde özellikle Yedisu Segmenti ve Karlıova Üçlü Bileşimi çevresinde Coulomb stres rejimini yeniden şekillendirmiş; mevcut model ve bölgesel jeodinamik yapı dikkate alındığında, bu segmentlerin orta vadede artan sismik tehlike potansiyeli taşıdığı görülmektedir. Dolayısıyla 2023 depremleri, hem bu çalışmada sunulan jeodezik–sismolojik gerinim alanlarının hem de daha önceki viskoelastik stres aktarımı modellerinin öngördüğü uzun dönemli birikim–boşalım döngüsünü doğrulamakta; bölgedeki geleceğe yönelik tehlike değerlendirmelerinin bütünleşik, zaman bağımlı stres

modelleri ile güncellenmesi gerekliliğini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Bilgilendirme/Teşekkür

Yazar, makalenin değerlendirme sürecindeki yapıcı katkıları için Geomatik Dergisi editörüne ve değerli hakemlerine teşekkür eder.

Araştırmacıların katkı oranı

Fatih Sünbül: Literatür taraması, modelleme, yazma ve düzenleme

Çatışma Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

- Şengör, A. M. C., Tüysüz, O., Imren, C., Sakıncı, M., Eyidoğan, H., Görür, N., ... & Rangin, C. (2005). The North Anatolian fault: A new look. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33(1), 37–112. doi: 10.1146/annurev.earth.32.101802.120415.
- Yurdakul, Ö. (2026). Analysis of surface displacements occurring in the February 6, 2023 Türkiye earthquake sequence with GNSS observations based on CORS stations and the Static PPP technique. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 11(2), 510–528. <https://doi.org/10.26833/ijeg.1765899>
- Bozkurt, E. (2001). Neotectonics of Turkey—a synthesis. *Geodinamica acta*, 14(1–3), 3–30. doi: 10.1080/09853111.2001.11432432
- Barka, A. (1999). The 17 august 1999 Izmit earthquake. *Science*, 285(5435), 1858–1859. doi: 10.1126/science.285.5435.1858
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Şaroğlu, F., Olgun, Ş., Elmacı, H., & Çan, T. (2018). Active fault database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8), 3229–3275. doi: 10.1007/s10518-016-0041-2
- Meng, J., Kusky, T., Mooney, W. D., Bozkurt, E., Bodur, M. N., & Wang, L. (2024). Surface deformations of the February 2023 earthquake sequence, eastern Türkiye. *Science*, 383(6680), 298–305. doi: 10.1126/science.adj3770
- 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). doi: 10.1029/2005JB004051
- Fichtner, A., Saygin, E., Taymaz, T., Cupillard, P., Capdeville, Y., & Trampert, J. (2013). The deep structure of the North Anatolian fault zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 373, 109–117. doi: 10.1016/j.epsl.2013.04.027

9. Akbayram, K., Kıranşan, K., Varolğüneş, S., Büyükkapınar, P., Karasözen, E., & Bayık, Ç. (2023). Multidisciplinary analyses of the rupture characteristic of the June 14, 2020, M_w 5.9 Kaynarıpınar (Karlhova, Bingöl) earthquake reveal N70E-striking active faults along the Yedisu Seismic Gap of the North Anatolian Fault Zone. *International Journal of Earth Sciences*, 112(2), 489–509. doi: 10.1007/s00531-022-02256-4
10. Solak, H. İ., Gezgin, C., Kiliç, A. S., ... Tiryakioğlu, İ. (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
11. Zabcı, C., Akyüz, H. S., & Sançar, T. (2017). Palaeoseismic history of the eastern part of the North Anatolian Fault (Erzincan, Turkey): Implications for the seismicity of the Yedisu seismic gap. *Journal of Seismology*, 21(6), 1407–1425. doi: 10.1007/s10950-017-9673-1
12. Aktug, B., Dikmen, U., Dogru, A., & Ozener, H. (2013). Seismicity and strain accumulation around Karlhova triple junction (Turkey). *Journal of Geodynamics*, 67, 21–29. doi: 10.1016/j.jog.2012.04.008
13. Sunbul, F. (2019). Time-dependent stress increase along the major faults in eastern Turkey. *Journal of Geodynamics*, 126, 23–31. doi: 10.1016/j.jog.2019.03.001
14. Stein, R. S., Barka, A. A., & Dieterich, J. H. (1997). Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophysical Journal International*, 128(3), 594–604. doi: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb05321.x
15. Yildirim, Ü. K., & Sisman, Y. (2019). The deformation analysis using hypothesis tests. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 4(2), 88–93. <https://doi.org/10.26833/ijeg.473944>
16. Barka, A. (1996). Slip distribution along the North Anatolian fault associated with the large earthquakes of the period 1939 to 1967. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(5), 1238–1254. doi: 10.1785/BSSA0860051238
17. TÜİK. (2025, Mayıs 6). Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi sonuçları, 2024. TÜİK Veri Portalı. <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Nufus-ve-Demografi-109>
18. Saatcioglu, M., & Bruneau, M. (1993). Performance of structures during the 1992 Erzincan earthquake. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 20(2), 305–325. doi: 10.1139/193-035
19. Duman, E. S., İkizler, S. B., & Angin, Z. E. K. A. I. (2015). Evaluation of soil liquefaction potential index based on SPT data in the Erzincan, Eastern Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 5269–5283. doi: 10.1007/s12517-014-1550-4
20. Konakoglu, B., & Akar, A. (2021). Elazığ ve Çevresindeki İllerde Meydana Gelen Tektonik Hareketlerin TUSAGA-Aktif İstasyonlarının Konumlarına Etkisinin Statik Deformasyon Modeller Kullanılarak İncelenmesi. *Geomatik*, 6(2), 165–178. <https://doi.org/10.29128/geomatik.735565>
21. Uzel, T. (2023). Etrafı faylarla çevrili arazilerde tektonik levha hareketleri. *Geomatik*, 8(1), 72–78. <https://doi.org/10.29128/geomatik.1181893>
22. Uysal, A., Sunkar, M., & Avcı, V. (2025). Malatya ve Çevresinde Aletsel Dönem (1900-2024) Depremlerinin Mekânsal Analizleri. *Geomatik*, 10(2), 218–240. <https://doi.org/10.29128/geomatik.1593289>
23. Lasserre, C., Peltzer, G., Crampé, F., Klinger, Y., van Der Woerd, J., & Tapponnier, P. (2005). Coseismic deformation of the 2001 M_w = 7.8 Kokoxili earthquake in Tibet, measured by synthetic aperture radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B12). doi: 10.1029/2004JB003500
24. Fialko, Y. (2006). Interseismic strain accumulation and the earthquake potential on the southern San Andreas fault system. *Nature*, 441(7096), 968–971. doi: 10.1038/nature04797
25. Bürgmann, R., & Dresen, G. (2008). Rheology of the lower crust and upper mantle: Evidence from rock mechanics, geodesy, and field observations. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 36(1), 531–567. doi: 10.1146/annurev.earth.36.031207.124326
26. Uzel, T., Eren, K., Gulal, E., Tiryakioğlu, İ., Dindar, A. A., & Yilmaz, H. (2013). Monitoring the tectonic plate movements in Turkey based on the national continuous GNSS network. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 3573–3580. doi: 10.1007/s12517-012-0631-5
27. Liu, J., Huang, C., Zhang, G., Shan, X., Korzhnikov, A., & Taymaz, T. (2024). Immature characteristics of the East Anatolian Fault Zone from SAR, GNSS and strong motion data of the 2023 Türkiye-Syria earthquake doublet. *Scientific Reports*, 14(1), 10625. doi: 10.1038/s41598-024-61326-6
28. Köküm, M., & İnceöz, M. (2018). Structural analysis of the northern part of the East Anatolian Fault System. *Journal of Structural Geology*, 114, 55–63. doi: 10.1016/j.jsg.2018.06.016
29. Westaway, R. O. B. (1994). Present-day kinematics of the Middle East and eastern Mediterranean. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B6), 12071–12090. doi: 10.1029/94JB00335
30. Stucchi, M., Sesetyan, K., Augusto Antonio, G. C., & Sbeinati, M. R. (2022). Exploiting the legacy of N. N. Ambraseys: known and unknown earthquakes in the Anatolian area. *Mediterranean Geoscience Reviews*, 4(4), 555–568. doi: 10.1007/s42990-022-00087-8
31. Konak, H., Küreç Nehbit, P., 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>
32. van Hinsbergen, D. J., Gürer, D., Koç, A., & Lom, N. (2024). Shortening and extrusion in the East Anatolian Plateau: How was Neogene Arabia-Eurasia convergence tectonically accommodated?. *Earth and Planetary Science Letters*, 641, 118827. doi: 10.1016/j.epsl.2024.118827
 33. Şengör, A. C., & Canitez, N. (1982). The North Anatolian Fault. *Alpine-Mediterranean Geodynamics*, 7, 205–216. doi: 10.1029/GD007p0205
 34. Okay, A. I., & Tüysüz, O. (1999). Tethyan sutures of northern Turkey. *Geological Society, London, Special Publications*, 156(1), 475–515. doi: 10.1144/GSL.SP.1999.156.01.22
 35. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2025). *Diri fay haritaları*. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/diri-fay-haritalari>
 36. Mutlu, A. K., & Karabulut, H. (2011). Anisotropic Pn tomography of Turkey and adjacent regions. *Geophysical Journal International*, 187(3), 1743–1758. doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05235.x
 37. Civelekler, E., & Pekkan, E. (2022). The application of GIS in visualization of geotechnical data (SPT-Soil Properties): a case study in Eskisehir-Tepebaşı, Turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 7(3), 302–313. <https://doi.org/10.26833/ijeg.980611>
 38. Akkan, E. (1964). *Erzincan Ovası ve Çevresinin Jeomorfolojisi*. Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih Coğrafya Fakültesi Yayınları, Sayı: 153. Ankara: Ankara Üniversitesi.
 39. Tarhan, N., Yusufoglu, H., Bağirsakçı, S., Parlak, İ., & Karabalık, N. N. (1991). Bingöl-Karlıova-Yedisu dolayının jeolojisi ve petrojisi (MTA Raporu, Derleme No: 9448). *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü*.
 40. Uysal, A., & Sunkar, M. (2024). *Erzincan Ovası ve Çevresinin Depremselliği ile Depremlerin Mekânsal ve Yoğunluk Analizleri*. Fırat University Journal of Social Sciences, 34(2), 419–436. <https://doi.org/10.18069/firatsbed.1451933>
 41. Polat, H. E. (2015). *Yedisu Fayı'nın (Kuzey Anadolu Fayı) sismik tehlike analizi (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü)*. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
 42. Barka, A. A., & Kadinsky-Cade, K. (1988). Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics*, 7(3), 663–684.
 43. Allen, C. R. (1969). *Active faulting in northern Turkey* (Contribution No. 1577). Division of Geological Sciences, California Institute of Technology.
 44. Zabcı, C., Sancar, T., Akyüz, H. S., & Kiyak, N. G. (2015). Spatial slip behavior of large strike-slip fault belts: Implications for the Holocene slip rates of the eastern termination of the North Anatolian Fault, Turkey. *JGR Solid Earth*, 120(11), 7510–7531. <https://doi.org/10.1002/2015JB011874>
 45. Haines, A. J., & 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. doi: 10.1029/93JB00892
 46. Kreemer, C., Haines, J., Holt, W. E., Blewitt, G., & Lavalée, D. (2000). On the determination of a global strain rate model. *Earth, Planets and Space*, 52(10), 765–770. doi: 10.1186/BF03352279
 47. England, P., Houseman, G., & Nocquet, J. M. (2016). Constraints from GPS measurements on the dynamics of deformation in Anatolia and the Aegean. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(12), 8888–8916. doi: 10.1002/2016JB013382
 48. Ozener, H., Arpat, E., Ergintav, S., Dogru, A., Cakmak, R., Turgut, B., & Dogan, U. (2010). Kinematics of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone. *Journal of Geodynamics*, 49(3–4), 141–150. doi: 10.1016/j.jog.2010.01.003
 49. Tatar, O., Poyraz, F., Gürsoy, H., Cakir, Z., Ergintav, S., Akpınar, Z., ... & Yavaşoğlu, H. (2012). Crustal deformation and kinematics of the Eastern Part of the North Anatolian Fault Zone (Turkey) from GPS measurements. *Tectonophysics*, 518, 55–62. doi: 10.1016/j.tecto.2011.11.010
 50. Alchalbi, A., Daoud, M., Gomez, F., McClusky, S., Reilinger, R., Romeyeh, M. A., ... & Barazangi, M. (2010). Crustal deformation in northwestern Arabia from GPS measurements in Syria: Slow slip rate along the northern Dead Sea Fault. *Geophysical Journal International*, 180(1), 125–135. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04431.x
 51. Ekström, G., Nettles, M., & 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. doi: 10.1016/j.pepi.2012.04.002
 52. Frohlich, C., & Davis, S. D. (1999). How well constrained are well-constrained T, B, and P axes in moment tensor catalogues?. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B3), 4901–4910. doi: 10.1029/1998JB900071
 53. Frohlich, C. (1995). Characteristics of well-determined non-double-couple earthquakes in the Harvard CMT catalogue. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 91, 213–228. doi: 10.1016/0031-9201(95)03031-Q
 54. Küreç Nehbit, P., & Konak, H. (2020). The global and local robustness analysis in geodetic networks. *International Journal of Engineering*

- and Geosciences, 5(1), 42–48.
<https://doi.org/10.26833/ijeg.581568>
55. de Boor, C., & Golub, G. H. (1978). The numerically stable reconstruction of a Jacobi matrix from spectral data. *Linear Algebra and Its Applications*, 21(3), 245–260.
[https://doi.org/10.1016/0024-3795\(78\)90086-1](https://doi.org/10.1016/0024-3795(78)90086-1)
56. Sünbül, F., Arslan, H. M., & Karadeniz, E. (2021). Van İli Çevresi Kabuk Deformasyon Analizi ve Deprem Tehlike Değerlendirmesi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi (Van Özel Sayısı)*, 783–802.
57. Bayata, H. F., Mazlum, Y. E., Baş, F. İ., & Çolak, M. A. (2025). Erzincan kent merkezinin deprem güvenliği: yapı stoğu, ulaşım ağı, toplanma ve geçici barınma alanlarının stratejik analizi. *Geomatik*, 10(1), 34–44.
<https://doi.org/10.29128/geomatik.1512396>
58. Pérouse, E., Chamot-Rooke, N., Rabaut, A., Briole, P., Jouanne, F., Georgiev, I., & Dimitrov, D. (2012). Bridging onshore and offshore present-day kinematics of central and eastern Mediterranean: Implications for crustal dynamics and mantle flow. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(9). doi: 10.1029/2012GC004289
59. Ergintav, S., McClusky, S., Hearn, E., Reilinger, R., Cakmak, R., Herring, T., ... & Tari, E. (2009). Seven years of postseismic deformation following the 1999, M=7.4 and M=7.2, Izmit-Düzce, Turkey earthquake sequence. *Journal of Geophysical Research*, 114(B7), B07403. doi: 10.1029/2008JB006021.



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