



Genişlemeli Tektonik Rejimde Yeniden Aktif Olmuş Atkuyruğu Faylarına Yönelik Kinematik Kanıtlar: Banaz Fayı ve Tektonik Anlamı, Batı Anadolu, Türkiye

Kinematic Evidence for Reactivated Horsetail Faults in an Extensional Tectonic Regime: The Banaz Fault and Its Tectonic Implications, Western Anatolia, Türkiye

**Çağlar Özkaymak^{1,2}, Muammer Can Ünsal³, Hasan Sözbilir^{4,5},
Doğukan Mert Özcan^{3,*}, İbrahim Tiryakioğlu^{2,6}, Halil İbrahim Solak^{2,7}**

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü,
03200, Afyonkarahisar, Türkiye

² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Deprem Uygulama ve Araştırma Merkezi, 03200 Afyonkarahisar, Türkiye

³ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 03200 Afyonkarahisar, Türkiye

⁴ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 35390 İzmir, Türkiye

⁵ Dokuz Eylül Üniversitesi, Deprem Araştırma ve Uygulama Merkezi, 35390 İzmir, Türkiye

⁶ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 03200 Afyonkarahisar, Türkiye

⁷ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Uzaktan Eğitim MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü,
03200, Afyonkarahisar, Türkiye

• Geliş/Received: 09.06.2026

• Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 16.07.2026

• Kabul/Accepted: 07.08.2026

• Çevrimiçi Yayın/Available online: 26.08.2026

• Baskı/Printed: 31.08.2026

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Öz: Batı Anadolu, küresel ölçekte en hızlı genişleyen kıtasal bölgelerden biri olarak kabul edilmekte olup, Akşehir-Simav Fay Sistemi (ASFS) bu rejim içindeki sismik açıdan en aktif yapılardan birisidir. ASFS'nin kuzeybatı bölümünü temsil eden Simav Fay Zonu'nun segmentlerinden birisi olan Banaz Fayı (BF); yapısal haritalama, 11 lokasyondan elde edilen 155 fay çiziği verisinin paleogerilme analizi ve jeodezik veriler ışığında yeniden değerlendirilmiştir. Yaklaşık 37 km uzunluğundaki Banaz Fayı; Gürlek, Kızılcaören ve Derbent olarak adlandırılan üç farklı segmentten oluşan karmaşık bir yapı olarak tanımlanmıştır. Paleogerilme analizleri, yerel gerilme alanında belirgin mekânsal ve zamansal değişimler olduğunu göstermektedir. Kuzeybatıdaki Gürlek segmenti, yataya yakın σ_1 eksenini altında baskın sağ yanal doğrultu atımlı bir karakter sunar. Güneydoğuya doğru fay kavışlenerek Kızılcaören ve Derbent segmentlerine geçiş yapmakta, burada σ_1 ekseninin düşey konuma gelmesiyle mekanizma normal/oblik faylanmaya dönüşmektedir. Evrendede mevkiindeki birbirini üzerleyen kayma çizikleri, saf normal faylanmadan sağ yanal ve normal bileşenli oblik faylanmaya doğru bir geçişi ve σ_3 ekseninin zamanla saat yönünün tersine döndüğünü kanıtlamaktadır.

Jeolojik ve morfolotektonik analizler, Pliyo-Kuvaterner'den bu yana yaklaşık 0,1 mm/yıl düşey kayma hızı göstermekte olup bu değer güncel GNSS gerinim hızları (1-2 mm/yıl) ile uyumludur. Fay doğrultularına (K55°B ve K40°D) paralel gelişen sırt tipi travertenler, fayın güncel aktivitesine işaret etmektedir. Sismik tehlike analizleri, segmentlerin tek tek kırılması durumunda Mw 6,12 – 6,56 aralığında, tüm zonun eş zamanlı olarak kırılması durumunda ise Mw 6,9 büyüklüğünde bir deprem üretme potansiyeli bulunduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak bu çalışma; genişlemeli rejimlerdeki atkuyruğu yapılarının üst üste binen farklı genişleme evreleri, segmentasyon kontrolü, sistematik atım dağılımı ve dinamik lokal gerilme değişimleri ile (eksen rotasyonları) geliştiğini; bu mekanizmaların ise derin hidrotermal akışkan yollarını doğrudan kontrol ettiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Akşehir-Simav Fay Sistemi, at kuyruğu yapısı, Banaz Fayı, Batı Anadolu, kinematik, paleogerilme, sismik tehlike.

Abstract: Western Anatolia is widely recognized as one of the fastest-extending continental regions globally, with the Akşehir–Simav Fault System (ASFS) constituting one of the most seismically active structures within this extensional regime. Representing a segment of the Simav Fault Zone, which forms the northwestern section of the ASFS, the Banaz Fault (BF) was re-evaluated in this study based on structural mapping, paleostress analysis of 155 fault-slip data collected from 11 locations, and geodetic data. Rather than a single uniform strand, the ~ 37-km-long BF is redefined as a complex, multi-segmented structure comprising the Gürlek, Kızılcaören, and Derbent segments. Paleostress analysis reveals significant spatial and temporal variations in the local stress field. The northwestern Gürlek segment exhibits dominant right-lateral strike-slip character with sub-horizontal σ_1 axis. Southeastward, the fault traces a distinct map-view curvature into the Kızılcaören and Derbent segments, where the σ_1 axis transitions to sub-vertical position, shifting the kinematic mechanism to normal and oblique-slip faulting. Superimposed slickenlines at the Evrendede locality preserve a transition from older, pure normal faulting to younger, right-lateral oblique normal faulting, confirming dynamic, counter-clockwise rotation of the σ_3 axis over time.

Geological and morphotectonic analyses yield a long-term vertical slip rate of 0.1 mm/yr since the Plio-Quaternary, which is consistent with contemporary GNSS strain rates (1-2 mm/yr). The active status of the BF is further substantiated by newly-documented ridge-type travertines running strictly parallel to the fault strike (N55°W and N40°E). Seismic hazard assessments indicate that while individual segments have the capacity to generate earthquakes ranging from $M_w = 6.12$ to 6.56, full-segment rupture encompassing the entire zone poses a major seismic risk with potential magnitude of $M_w = 6.9$. Ultimately, this study demonstrates that extensional horsetail structures mature via superimposed extensional phases, structural segmentation control, systematic displacement partitioning, and dynamic local stress variations (axis rotations), mechanisms that directly dictate deep hydrothermal fluid circulation pathways.

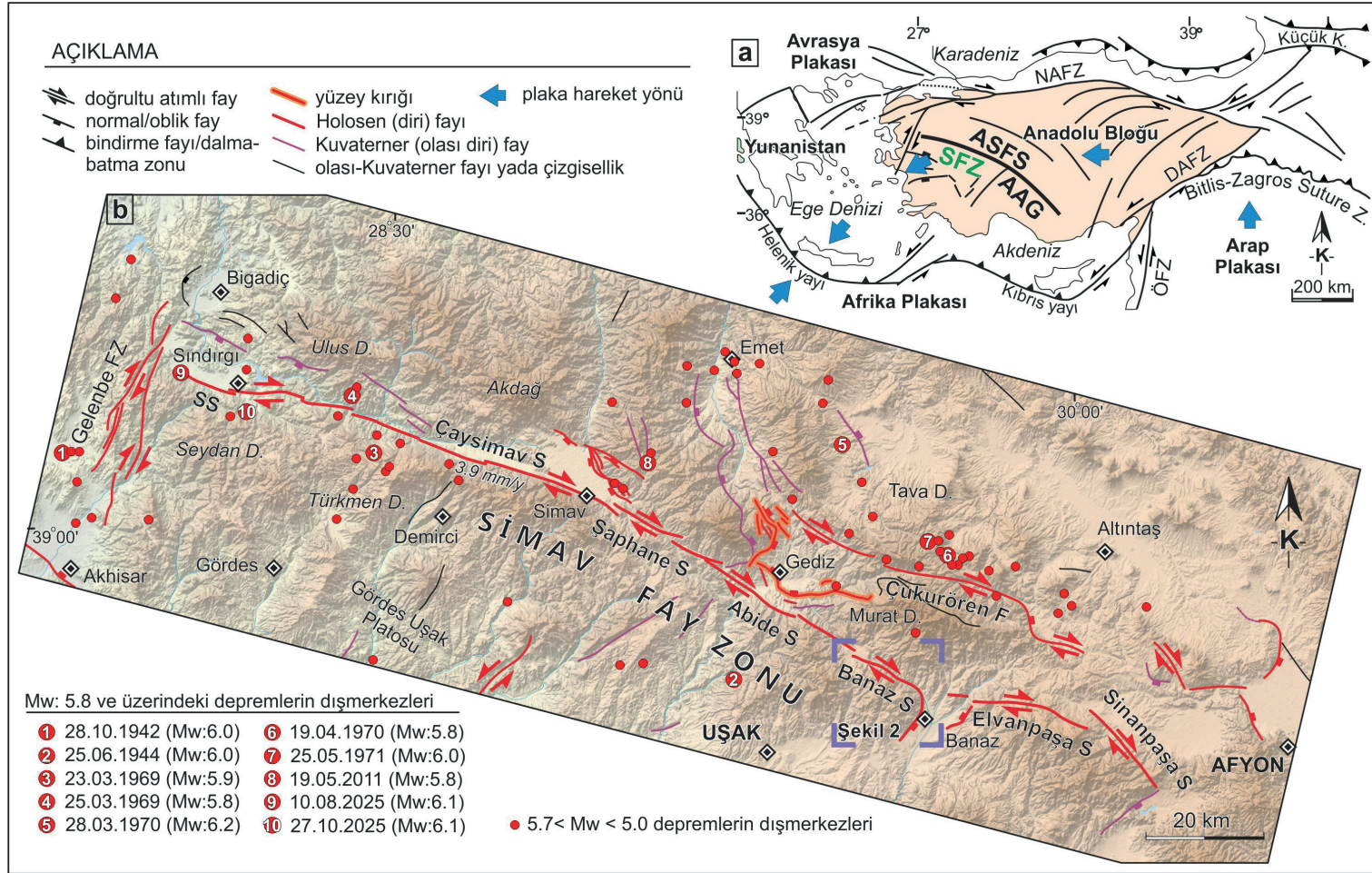
Keywords: Akşehir-Simav Fault System, Banaz Fault, kinematics, horsetail structure, paleostress, seismic hazard, Western Anatolia.

GİRİŞ

At kuyruğu (horsetail) yapıları, doğrultu atımlı fayların uçlarında gelişen genişlemeli veya sıkışmalı fay geometrileri olarak kabul edilir (Cabrera vd. 1988). Sıkışmalı yapılar boyunca sırtların oluşumuyla sonuçlanırken, genişlemeli yapılar derin kökenli akışkanların yerleşmesine izin veren çökme alanları ve sıçramalar (jogs) olarak dikkat çeker (Kim ve Sanderson, 2006). Bu nedenle, bu yapılar hem madencilik hem de enerji kaynağı aramalarında hedef alanlardır. Ayrıca sismik açıdan, ana fay segmenti üzerinde biriken gerilmenin at kuyruğu fayları arasında paylaşıldığı alanlar olarak da bilinirler (Xu vd. 2024). Genişlemeli tektoniğin etkisi altında deforme olan Batı Anadolu, bu tür yapıların gözlemlendiği önemli bölgelerden biridir (Şekil 1a). Batı Anadolu'yu KB-GD doğrultusunda kesen Akşehir-Simav Fay Sistemi boyunca yer alan ana fay segmentlerinin uçlarında bu yapıları gözlemlemek mümkündür (Şekil 1b). Sistemin batı kısmını oluşturan Simav

Fay Zonu (SFZ)'nin güneydoğu ucunda yer alan Banaz Fayı, genişlemeli tektonik rejimlerde gelişen at kuyruğu yapısına iyi bir örnek teşkil etmektedir.

Banaz Fayı'nın bulunduğu bölgede çeşitli jeolojik araştırmalar yapılmış olsa da fayın aktif tektonik, jeomorfolojik ve paleogerilme analizleriyle ilgili veriler kısıtlıdır. Özellikle fayın geometrik segmentasyonu ve kinematik davranışı üzerindeki farklı görüşler ve veri eksikliği, bölgedeki gerilme kuvvetlerinin tam olarak anlaşılabilmesi ve değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Ayrıca birçok araştırmacı, Uşak-Afyonkarahisar arasında gelecekte yıkıcı bir deprem üretebilecek bir sismik boşluğun varlığına dikkat çekmektedir (Koçyiğit vd., 2002, Koçyiğit, 2007 ve Tiryakioğlu vd., 2024). Bu doğrultuda çalışma, Banaz Fayı'nın segment yapısını ve kinematik özelliklerini ayrıntılı saha verilerine dayanarak ortaya koymayı amaçlamaktadır.



Şekil 1. a) Doğu Akdeniz bölgesinin neotektonik yapısı (Özkaymak, 2015; Özkaymak vd., 2019'dan derlenmiştir). Kısaltmalar: AAG: Afyon-Akşehir Grabeni; ASFS: Akşehir-Simav Fay Sistemi; DAFZ: Doğu Anadolu Fay Zonu; KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu; SFZ: Simav Fay Zonu. **b)** Simav Fay Zonu'nun segmentlerini ve sismotektonik özelliklerini gösteren harita (faylar Emre vd., 2013'ten; deprem verileri KRDAE, 2026; AFAD, 2026'dan alınmıştır).

Figure 1. a) Neotectonic structures in the Eastern Mediterranean region (compiled from Özkaymak, 2015; Özkaymak et al., 2019). Abbreviations: AAG, Afyon-Akşehir Graben; ASFS, Akşehir-Simav Fault System; DAFZ: East Anatolian Fault Zone (EAFZ); KAFZ: North Anatolian Fault Zone (NAFZ); SFZ: Simav Fault Zone. **b)** Map showing the segments and seismotectonic characteristics of the SFZ (faults are taken from Emre et al., 2013; earthquake data are taken from KRDAE, 2026 and AFAD, 2026).

Bu amaçla, söz konusu jeolojik yapı 1/25.000 ölçeğinde haritalanmış ve yapıyı oluşturan fay segmentlerindeki gerilme eksenlerinin konumlarını belirlemek amacıyla kinematik analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler fayın karakterinin ortaya konulması, deprem üretme potansiyelinin belirlenmesi ve bölgenin aktif tektonik evriminin anlaşılması açısından önem taşımaktadır. Bununla beraber, SFZ boyunca bu tür asimetrik atkuyruğu geometrilerinin ve segment sınırlarının doğru tanımlanması, hem bölgedeki deprem tehlikesinin (sismik boşlukların) doğru analiz edilmesi hem de derin jeotermal/hidrotermal akışkan göç yollarının ve rezervuarlarının tespit edilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Bölgesel Jeoloji ve Tektonik

Doğu Akdeniz’de Helenik yayı kuzeyindeki yay gerisi genişleme ile Anadolu Bloğu’nun Kuzey Anadolu Fay Zonu ve Doğu Anadolu Fay Zonu boyunca batı/güneybatıya doğru kaçış mekanizması, Batı Anadolu’da genişlemeli bir neotektonik rejimin gelişmesine yol açmış ve Dünya’daki en hızlı genişleyen kıtasal alanlardan biri haline getirmiştir (McKenzie, 1978; Le Pichon ve Angelier, 1979; Şengör vd., 1985; Seyitoğlu ve Scott, 1991; Koçyiğit vd., 1999; Yılmaz ve Gürer, 2024) (Şekil 1a). Akşehir-Simav Fay Sistemi (ASFS), bu genişlemeli rejim içerisinde yaklaşık 400 km uzunluğunda, sismik olarak oldukça aktif bir yapı olarak tanımlanmaktadır (Koçyiğit ve Deveci, 2005; 2007, Tiryakioğlu vd., 2015; 2018; Özkaymak vd., 2017; 2019) (Şekil 1b). Bu sistem içerisinde çok segmentli bir yapıda olan Simav Fay Zonu (SFZ), Sındırgı (Balıkesir) ile Sinanpaşa (Afyonkarahisar) arasında KB-GD genel uzanımında yaklaşık 200 km boyunca morfolojik olarak belirgindir. Bu zon, Emre vd. (2013, 2018) tarafından, Sındırgı, Çaysımav, Şaphane, Abide, Banaz, Elvanpaşa ve Sinanpaşa gibi yedi ana segmente ayırmıştır (Şekil 1b). Tarihsel dönemden beri sismik olarak aktivitesi bilinen SFZ ve

yakın çevresi boyunca, aletsel dönem içerisinde büyüklüğü 5,8 ve 6,2 arasında çok sayıda yıkıcı deprem meydana gelmiştir (Şekil 1b). Zon boyunca son yıllarda meydana gelen 19 Mayıs 2011 Simav Depremi (Mw: 6,0) ve 10.08.2025 ve 27.10.2025 Sındırgı depremleri (Mw: 6,1) bölgenin sismik olarak aktif yapısını belgeleyen önemli depremlerdir (Tiryakioğlu vd., 2026; Sözbilir vd., 2026) (Şekil 1b). Ayrıca, SFZ’nin segment bazında üretebileceği maksimum deprem büyüklüğü 7,1 olarak hesaplanmış olup (Duman vd. 2018), GNSS verileri, kısa dönem kayma hızının 3,9 mm/yıl olduğunu göstermektedir (Aktuğ vd., 2009). SFZ’nin 2013 yılında güncellenen Türkiye Diri Fay Haritasında (TDFH) diri fay statüsünde tanımlanmasına ve aletsel dönem deprem aktivitesine göre, zon boyunca istatistiksel olarak yaklaşık her 9 yılda bir yıkıcı deprem meydana gelmesine rağmen literatürde, SFZ’nin kinematik davranışına yönelik farklı görüşler bulunmaktadır. Banaz bölgesinde fayın oblik atımlı normal fay niteliğinde olduğu ileri sürülürken (Koçyiğit, 2007), güncellenen Türkiye Diri Fay Haritası ve sonraki çalışmalar SFZ’nin sağ yanal doğrultu atımlı bir karaktere sahip olduğuna işaret etmektedir (Emre vd., 2013; 2018; Duman vd., 2013, 2018). Buna karşılık, SFZ boyunca gerçekleştirilen jeolojik ve jeodezik çalışmalar, yaklaşık kuzey-güney yönlü genişleme rejimi altında gelişen normal faylanmaya ilişkin bulgular ortaya koymuştur (Gürboğa, 2013; Demirci vd., 2015; Dönmez ve Tiryakioğlu, 2018). Öte yandan, SFZ içerisindeki Çaysımav ve Şaphane segmentlerinde yürütülen paleosismolojik hendek çalışmaları, bu segmentlerin Holosen dönemindeki aktivitesinin sağ yanal doğrultu atımlı faylanma karakteri taşıdığını göstermektedir (Duman vd., 2013).

YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında yürütülen araştırmalar; (i) uzaktan algılama, (ii) 1/25.000 ölçekli jeolojik

haritalama ve (iii) yapısal jeoloji (kinematik analiz) olmak üzere üç ana aşamada gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ön hazırlık aşamasında, Banaz Fayı ve yakın çevresinin morfolojik özelliklerini belirlemek amacıyla Google Earth veri tabanında yer alan yüksek çözünürlüklü (Quickbird, Ikonos vb.) uydu görüntüleri kullanılmıştır. Bu görüntüler üzerinde fayın oluşturduğu çizgisel süreksizlikler, ötelenmiş drenaj kanalları ve fay sarplıkları gibi morfolojik göstergeler tespit edilmiştir. Ayrıca, bölgenin topografik analizlerini gerçekleştirmek ve üç boyutlu morfolojik yapıyı incelemek amacıyla SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) verilerinden üretilen Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM) kullanılmıştır.

Saha çalışmaları kapsamında, Banaz Fayı ve civarında yüzlek veren litolojik birimlerin ve yapısal unsurların 1/25.000 ölçeğinde haritalanması yapılmıştır. Bu amaçla Uşak K23-a3, K23-a4 ve K23-d2 topografik harita paftaları altlık olarak kullanılmıştır. Haritalama sırasında birimlerin stratigrafik ilişkileri, dokanak özellikleri ve faya bağlı gelişen ikincil yapılar incelenerek bölgenin detaylı jeoloji haritası ve enine kesitleri oluşturulmuştur. Banaz Fayı'nın kinematik evrimini ve gerilme rejimini belirlemek amacıyla, fay düzlemleri üzerinde 11 farklı lokasyonda ölçümler yapılmıştır. Saha gözlemleri sırasında fay düzlemlerinin doğrultu ve eğimi ile bu düzlemler üzerindeki kayma çizikleri (striations), oluklar ve kertikler (fault groove/fault notch) ölçülmüştür. Farklı kinematik hareketlerin bağlı yaşları, kesen-kesilen yapı ilişkisine göre yapılmıştır. Elde edilen veriler; Angelier'in (1984, 1991, 1994) gerilme terslenme yöntemini kullanan BRUTE3 bilgisayar programı (Hardcastle ve Hills, 1991) ile kinematik analizler için geliştirilen FaultKinWin yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu analizlerle üç asal gerilme ekseninin (σ_1 , σ_2 , σ_3) konumları ve eksenel oran (Φ) hesaplanarak bölgedeki hakim tektonik rejim tanımlanmıştır. Gerilme rejimi, bu eksenlerin konumuna göre yapılmaktadır. En büyük asal gerilme eksen (σ_1) düşey düzlemde

iken genişlemeli, orta asal gerilme eksen (σ_2) düşey düzlemde iken doğrultu atımlı ve en küçük asal gerilme eksen (σ_3) düşey düzlemde iken sıkışmalı tektonik rejim söz konusudur (Angelier 1984; 1991; Özkaymak, 2013). Delvaux vd. (1997) gerilme rejiminin 0 ile 1 değerleri arasında değişen gerilim oranının fonksiyonuna bağlı olarak değiştiğini önermektedir: dairesel genişleme (σ_1 düşeyde, $0 < \phi < 0,25$), saf genişleme (σ_1 düşeyde, $0,25 < \phi < 0,75$), transtansiyon (σ_1 düşeyde, $0,75 < \phi < 1$ ya da σ_2 düşeyde, $1 > \phi > 0,75$), saf doğrultu atımlı (σ_2 düşeyde, $0,75 > \phi > 0,25$), transpresyonel (σ_2 düşeyde, $0,25 > \phi > 0$ ya da σ_3 düşeyde, $0 < \phi < 0,25$), saf sıkışma (σ_3 düşeyde, $0,25 < \phi < 0,75$) ve dairesel sıkışma (σ_3 düşeyde, $0,75 < \phi < 1$).

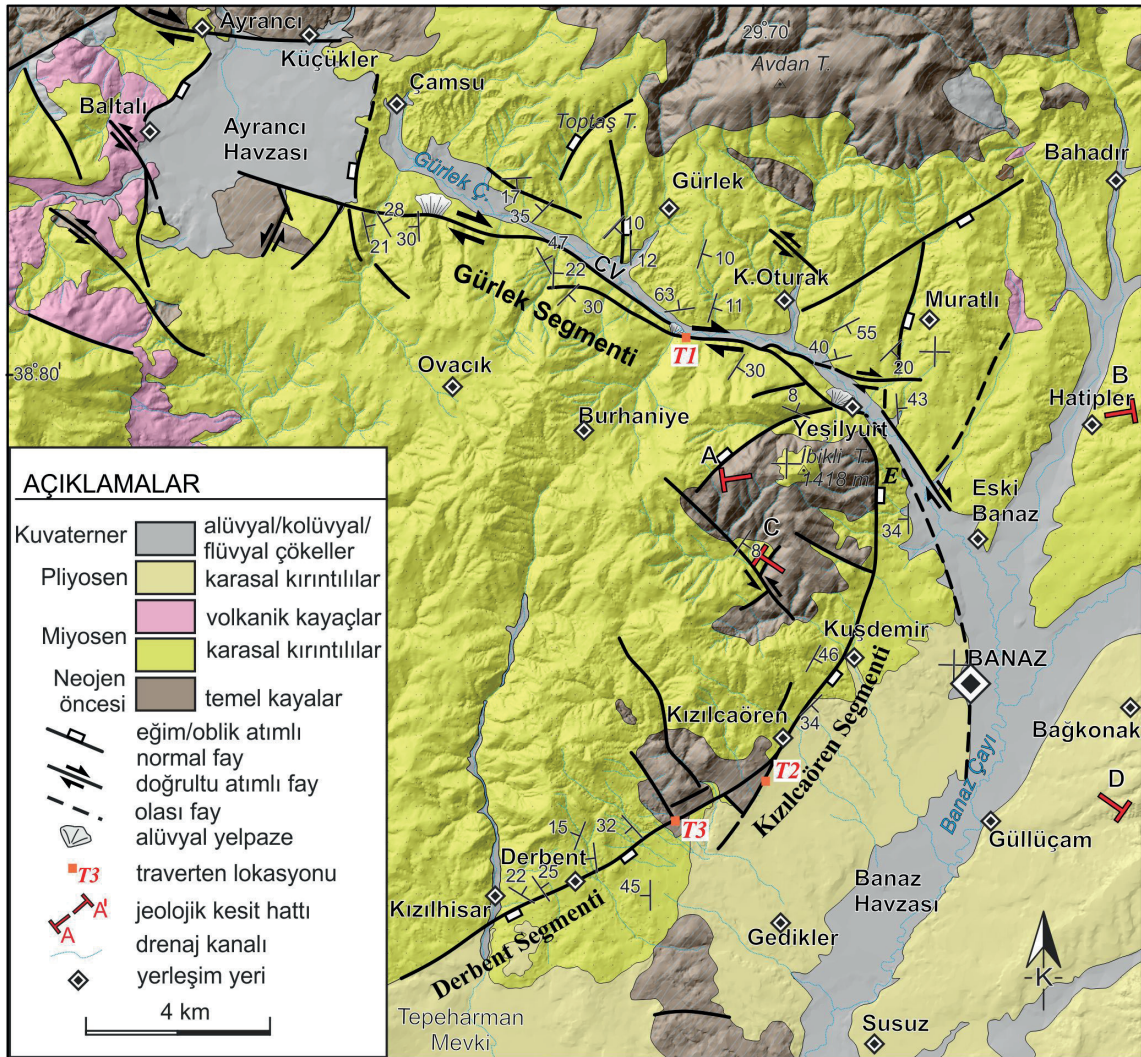
BULGULAR

Banaz Fayı

Bu çalışmanın konusunu oluşturan Banaz Fayı ilk defa Koçyiğit (2007) tarafından Gürlek, Kızılcaören ve Derbent fayları şeklinde isimlendirilerek haritalanmış ve tanımlanmıştır. Şaroğlu vd. tarafından 1992 yılında hazırlanan TDFH'de yer almayan bu fay, 2013 yılında güncellenen TDFH'de SFZ'ye ait diri segmentlerden birisi olarak "Banaz Segmenti" adı ile yer almıştır. Fay kuzeybatıda Baltalı ile Yeşilyurt arasında Gürlek Çayı'nın aktığı Comburt Vadisi (CV) boyunca doğrusal bir geometri sunarken, Yeşilyurt ile Kızılcahisar arasında doğuya kavis yapan bir yay geometrisi sergilemektedir (Emre vd., 2013) (Şekil 2). Tiryakioğlu vd. (2024) tarafından 2016-2023 yılları arasında gerçekleştirilen kampanya ölçülerine göre bölge, 20-30 mm/yıl hızlarla güneybatı yönünde hareket etmektedir. Aynı çalışmada 40-50 ns/yıl arasında hesaplanan yamulma analizine göre Banaz Segmenti ve yakın civarında KKD-GGB doğrultulu açılmalar görülmektedir. Bölgenin sismik geçmişi incelendiğinde, Banaz Fayı boyunca aletsel dönemde yıkıcı bir deprem kaydı bulunmamaktadır. Bununla beraber, 1970 yılından

günümüze kadar olan dönemde büyüklükleri 1,2 ve 4,8 arasında olan toplam 71 deprem kayda geçmiştir (KRDAE, 2026). Bu depremlerden büyüklüğü 4 üzerinde olan 9'u 1970 – 1973 yılları arasında gerçekleşmiştir. Tarihsel dönem kayıtlarına göre ise, 30 Eylül 1887 Banaz depremi ($M_s:6,3$) en önemli olay olarak öne çıkmaktadır (Ambraseys, 2009; Ambraseys ve Jackson, 1998;

Duman vd., 2018, Satılmış, 2016). Bu depremin $M_s: 6,3$ büyüklüğünde olduğu (Ambraseys ve Jackson, 1998), deprem sırasında Comburt vadisi boyunca KB-GD doğrultusunda, yaklaşık 10 km'lik bir yüzey kırığı oluşturmuş olabileceği ve Banaz ile çevre köylerde büyük bir yıkım yaşandığı ifade edilmektedir (Satılmış, 2016).



Şekil 2. Banaz Fay Zonu ve yakın çevresinin jeoloji haritası. (Saha çalışmaları ile ulaşılamayan alanların jeolojik özellikleri Bingöl, 1974; Bingöl, 1977; Ercan vd., 1978; Akdeniz ve Konak, 1979; Leflef, 1980 çalışmalarından düzenlenmiştir). Kısaltmalar, CV: Comburt Vadisi; E: Evrendede Mevkii.

Figure 2. Geological map of the Banaz Fault Zone and immediate vicinity. (Geological features of areas inaccessible in field studies were compiled from Bingöl, 1974; Bingöl, 1977; Ercan et al., 1978; Akdeniz and Konak, 1979; Leflef, 1980). Abbreviations, CV: Comburt Valley; E: Evrendede locality.

Çalışma Alanının Jeolojik Özellikleri

Bölgede yüzlek veren birimler; Neojen öncesi temel kayalar (NÖT), Neojen yaşlı karasal sedimanter ve volkanik birimler ile Kuvaterner yaşlı çökeller olarak üç ana grupta toplanmaktadır (Şekil 2). İnceleme alanı, Batı Anadolu'nun tektonik evriminde kritik bir role sahip olan metamorfik kuşaklardan Menderes Masifi ile Afyon Zonu'nun sınırında yer almaktadır. Bu nedenle, çalışma alanında her iki kuşağa ait birimler de yüzylemektedir. NÖT, baskın olarak Paleozoyik yaşlı kristalize kireçtaşları ve şistler ile temsil edilmektedir. Üst Kretase yaşlı Murat Dağı Melanji (Bingöl, 1977), temel kayaçlar içerisinde geniş yayılım sunar ve harzburjit, serpantinit, dunit ile radyolarit/çört bloklarını içerir. Çalışma alanının kuzeybatı bölümünde Ayrancı ve Küçükler köyleri çevresinde; orta bölümünde Yeşilyurt Köyü güneyinde; güney bölümünde ise Kızılcaören ve Derbent köylerinin arasındaki bölgede gözlenmektedir. Koyu yeşilimsi ve siyahımsı renkli Murat Dağı Melanjına ait serpantinit kayaları ile Paleozoyik birimlerin ilişkisi tektoniktir. NÖT, üst seviyelerde Miyosen-Pliyosen yaşlı karasal kırıntılılar ve volkanitler tarafından uyumsuz olarak örtülür. Tabanda metamorfik ve ofiyolitik kökenli çakıllardan oluşan flüviyal konglomera ile baskın karasal kırıntılılar üst seviyelere doğru görsel kumtaşı, silttaşı ve marn aralanması sunar (Ercan vd. 1978). Çalışma alanında oldukça geniş bir alanda yüzlek veren kırıntılılar, baskın olarak andezit ve trakiandezit bileşimli lav ve aglomeralardan oluşan Miyosen yaşlı volkanik istif ile yanal geçişlidir. Çalışma alanında gözlenen Neojen yaşlı birimler stratigrafik olarak üzerlerinde uyumsuz olarak yer aldıkları Miyosen öncesi temel kayaçlar ile çoğunlukla yapısal kontrollü olarak yan yana gelirler (Şekil 3). Kızılcaören Segmenti'nin yükselen bloğunda yer alan 1418 metre rakımlı İbikli Tepe'de temel kayaçları uyumsuz olarak üzerleyen Miyosen sedimanlarının tabanı yaklaşık 1300 metre rakımda gözlenmektedir. Bu noktadan

yaklaşık 1,2 km doğuda yer alan Kızılcaören Segmenti'nin düşen bloğunda ise, aynı sedimanların taban seviyesi yaklaşık 800 metre rakımında yer almaktadır (Şekil 3a). Bu verilere göre Miyosen sonrası (Pliyosen ve Kuvaterner) düşey yer değiştirme dikkate alındığında fay üzerindeki uzun dönem düşey kayma hızı yaklaşık 0,1 mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Kuvaterner birimler, Comburt Vadisi ve Banaz Çayı'nın beslediği havza ve çevresinde geniş yayılım sunan alüvyal yelpaze çökelleri, flüviyal çökeller ve güncel havza dolgusu ile belirgindir (Şekil 2, 3a ve b). Alüvyal yelpaze çökelleri Comburt Vadisi'ni güneyden sınırlayan segment üzerinde Yeşilyurt, Höyük Deresi güneyi ve T1 lokasyonu (Şekil 2) yakın batısında gözlenmektedir. Bu alanlarda kaba kırıntılılar içeren çökelleri, Miyosen yaşlı birimleri uyumsuz olarak üzerler ve Comburt vadisini besleyen derelerin flüviyal çökelleri (Şekil 4a) ile yanal geçişli olarak gözlenirler. Güncel havza dolgusu genel olarak Ayrancı ve Banaz havzalarındaki düzlük alanlarda gözlenen alüvyal birimler ile temsil edilmektedir. Bununla beraber, BFZ segmentleri üzerinde 1/25.000 ölçeğinde haritalanamayacak boyutta, tabaka kalınlıkları birkaç cm olan sırt tipi travertenler saptanmıştır. Comburt vadisi içerisinde Banaz Fayı'nın genel doğrultusuna yaklaşık paralel uzanan ve Şekil 2'de T1 ile gösterilen sırt tipi travertenin merkezi çatlak doğrultusu K55°B olarak ölçülmüştür (Şekil 4b). Bu bölgede fayın gidişi K60-70°B arasındadır. T1 ile simgelenen traverten çökelleri, Miyosen yaşlı karasal kırıntılıları kesen kırık üzerinde çökelmiştir. Sırt tip travertenlere ait diğer ölçüm, çalışma alanının güney bölümünde Kızılcaören – Derbent yerleşim alanları arasında kalan, Şekil 2'de T2 ile gösterilen İçmeler mevkiinde yapılmış ve sırt doğrultusu K40°D olarak ölçülmüştür (Şekil 4c). Bu bölgede fayın gidişi K30-60°D arasında değişmektedir. T2 bölgesinde traverten çökelleri, NÖT ile Pliyosen yaşlı kırıntılıları yan yana getiren fay kolu üzerinde gözlenmiştir. Şekil 2'deki T3 lokasyonunda daha dar bir

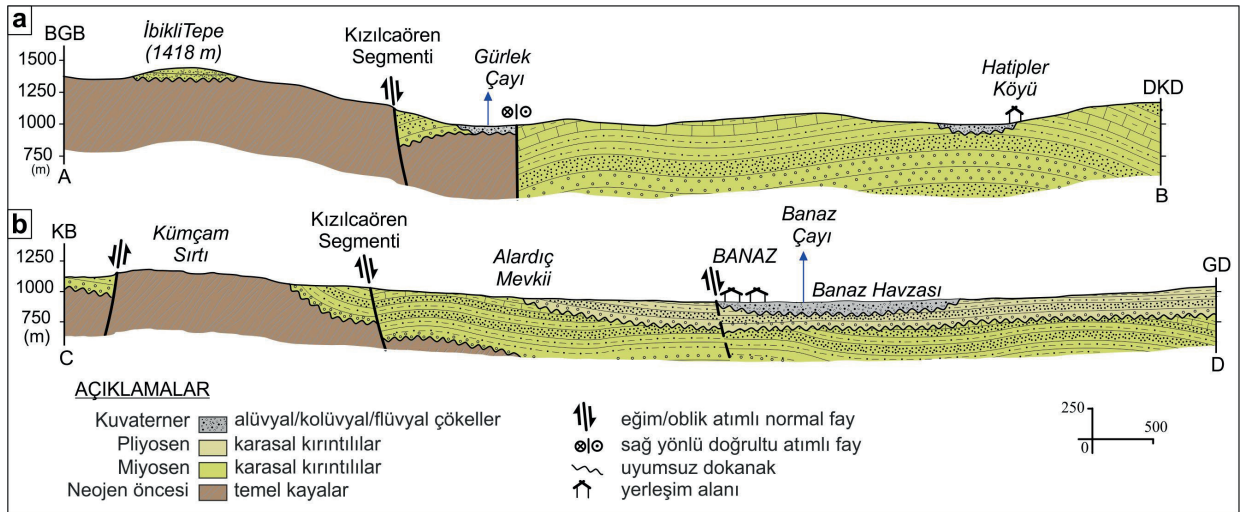
alanda gözlenen traverten çökelleri üzerinde ölçüm alınamamıştır. Ancak bu lokasyondaki traverten oluşumları Neojen öncesi temel kayalar ile Miyosen karasal kırıntılılar arasındaki fay üzerinde gözlenmiştir. T3 travertenleri, BFZ'nin yaklaşık K65°D uzanımı kolu ile fayın yükselen bloğunda haritalanan K30°B uzanımlı fayın kesiştiği alanda haritalanmıştır. Travertenlerin lokasyonları ile haritalanan fayların yeri ve geometrileri karşılaştırıldığında, travertenlerin tektonik kontrollü olduğu ve genellikle birden fazla fay kolunun birleştiği alanlarda olduğu gözlenmektedir. Travertenlerin tabaka kalınlıkları birkaç cm'yi geçmez ve ince kristalli bantlı travertenler şeklinde gözlenir. Travertenler üzerinde yapılan gözlemlere göre, merkezi çatlaklar bantlı travertenlerle doldurulmuş ve merkezleri boyunca açıklık görülmemektedir. Fay üzerinde oluşan bu travertenler ve bunların oluşum yaşları üzerine literatürde herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. Bununla beraber, Koçyiğit (2007) tarafından gerçekleştirilen saha çalışmalarında ilgili faylar üzerinde olmasa

da yakın çevrede sırtı tipi traverten oluşumu ve sıcak su kaynaklarından (örneğin: Banaz Havzası kuzeydoğusundaki Burak Kaplıcası gibi) bahsedilmektedir.

Segment Özellikleri ve Fay Geometrisi

Bu çalışmada haritalanan fayların yüzey geometrileri ve kinematik özellikleri dikkate alınarak, Emre vd. (2013; 2018) tarafından Banaz Segmenti olarak isimlendirilen yapı Banaz Fayı olarak adlandırılmış; Gürlek, Kızılcaören ve Derbent olarak isimlendirilen 3 farklı segmente ayrılmıştır (Şekil 2). Segment isimlendirmelerinde fayları ilk defa tanımlayan Koçyiğit (2007) çalışmasında verilen isimlere sadık kalınmıştır.

SFZ'ye ait yaklaşık D-B uzanımlı Abide Segmenti, çalışma alanının kuzeyindeki Ayrancı Havzası'nı kuzeyden sınırlayarak, Küçükler Köyü civarında benzer doğrultudaki Banaz Fayı'nın Gürlek Segmenti'ne sıçrama yapar. Bu sıçrama Ayrancı çek-ayır havzasının oluşumu ile de belirgindir. Saha çalışmaları



Şekil 3. a) A-B ve b) C-D kesit hatları boyunca jeolojik birimlerin stratigrafik ve yapısal ilişkisini gösteren enine jeolojik kesitler. (Kesit hatları için Şekil 2'ye bakınız)

Figure 3. Geological cross-sections along the A-B (a) and C-D (b) section lines showing the stratigraphic and structural relationships of geological units (See Figure 2 for section lines).



Şekil 4. Saha çalışmalarında ait arazi fotoğrafları: a) Comburt vadisi içerisinde gözlenen asılı kalmış genç flüviyal çökeller b) T1, c) T2 lokasyonunda gözlenen sırt tipi traverten çökelleri. Beyaz dolgulu oklar sırt doğrultularını göstermektedir. (Lokasyonlar için Şekil 2'ye bakınız)

Figure 4. Field photographs from geological fieldwork: a) Young fluvial deposits observed within the Comburt Valley, b) T1, and c) T2 sites showing ridge-type travertine deposits. White arrows indicate the orientations of the ridges (See Figure 2 for locations).

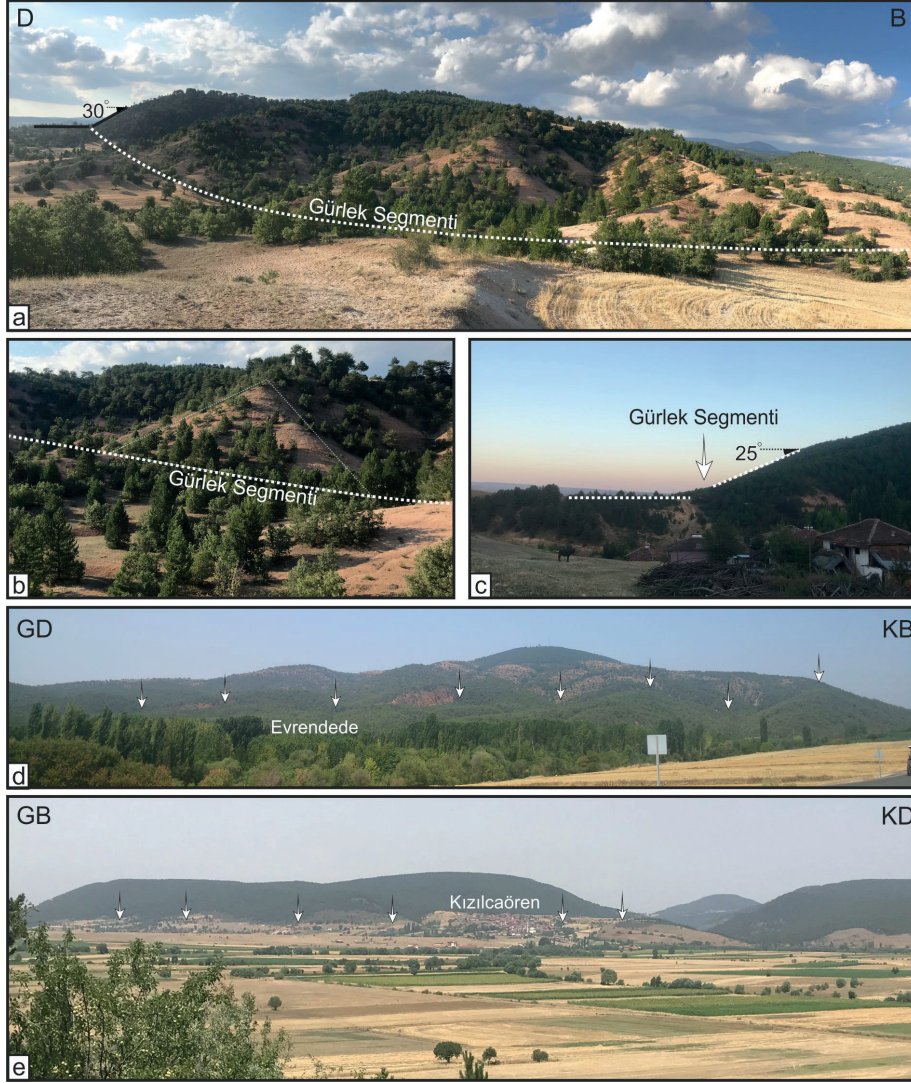
Ayrancı Havzası'nın doğu ve batı kenarlarının ana fay zonuna yaklaşık dik konumlu normal faylar ile kontrol edildiğine işaret etmektedir (Şekil 2).

Gürlek Segmenti, kuzeybatıdaki Baltalı köyü ile doğuda Eski Banaz köyü arasında, BKB-DGD genel uzanımında, yaklaşık 1,5 km genişliğinde ve 19 km uzunluğunda normal bileşene sahip sağ yönlü doğrultu atımlı bir fay segmentidir. Kuzeybatıda Ayrancı Havzası'nı K80°B uzanımında güneyden sınırlayan segment, doğuya

doğru dalgalı bir geometri sunarak Gürlek köyü güneyinde K60°B doğrultusuna dönüş yapar. Bu alanda yaklaşık 3 km boyunca birbirine paralel/yarı paralel iki fay kolu ile temsil edilir. En kuzeydeki kol Miyosen yaşlı gölsel kırıntılılar ile Comburt Vadisi'nin genç çökelleri arasındaki yapısal sınırı oluşturur. Güneydeki kol ile kuzeydeki kolun birleştiği alandan itibaren (T1 traverteni) batıya doğru yaklaşık D-B doğrultusunda devam eden segment, Yeşilyurt Köyü yakın batısında iki kola

ayrılarak birkaç km doğuda sonlanır. K60°B doğrultusuna dönen güney kol Yeşilyurt yerleşim alanı yakınından geçer. Bu kol boyunca üçgen yüzey oluşumları, dağ önündeki eğim kırılması ve

alüvyal yelpaze oluşumu belirgindir (Şekil 5a, b ve c). Kuzeydeki kol ise yaklaşık D-B uzanımında devam ederek Muratlı güneyinde sonlanır.



Şekil 5. Saha çalışmalarına ait arazi fotoğrafları: **a)** Comburt Vadisi boyunca haritalanan Gürlek Segmenti'nin genel görünüşü, **b-c)** Gürlek Segmenti boyunca üçgen yüzey oluşumu ve topografik eğim kırılmasını gösteren fotoğraflar, **d)** Kızılcaören Segmenti'nin Evrendede mevki civarında gözlenen büyük fay sarplıkları ve morfolojik izini gösteren panoramik arazi fotoğrafı, **e)** Kızılcaören Segmenti'nin Kızılcaören yerleşim alanı yakınından geçtiği çizgisel gidişli dağ önünü gösteren fotoğraf.

Figure 5. Field photographs from geological fieldwork: **a)** General view of the Gürlek Segment mapped along the Comburt Valley, **b-c)** Triangular facets and topographic slope breaks observed along the Gürlek Fault, **d)** Panoramic field photograph showing major fault scarps and morphological trace of the Kızılcaören Segment observed around the Evrendede locality, **e)** The linear mountain front where the Kızılcaören Segment passes beneath Kızılcaören settlement area.

Kızılcaören Segmenti, kuzeyde Yeşilyurt ile güneyde Gedikler köyleri arasında yaklaşık 10 km uzunluğunda KKD-GGB genel uzanıma ve genel olarak güneydoğuya eğimli oblik atımlı normal bir faydır (Şekil 2). Fayın yüzey geometrisi genel olarak doğuya bakan bir yay geometrisi sunar. En kuzeyde K20°B doğrultusuna sahip ve temel kayalar ile Miyosen kırıntılılar arasındaki sınırı oluşturan segment güneye doğru yaklaşık K-G doğrultusu kazanır. Kuşdemir ile Kızılcaören yerleşim alanları yakınlarında yaklaşık K30°D doğrultusunda devam eden segment morfolojik olarak sarpıklık ve çizgisel gidişli dağ önü ile belirlenir (Şekil 5d ve e). Daha güneybatıda, doğrultusunu değiştirmeden Gedikler Köyü kuzeydoğusundaki düzlük alan içerisine girer ve bu noktadan daha güneyde takip edilemez. Derbent Segmenti ise, Kızılcaören ile Tepeharman Mevki arasında 8 km uzunluğunda, yaklaşık K60°D uzanımlı doğrusal bir geometriye sahiptir ve eğim atımlı normal fay karakterindedir. Bu alanda Kızılhisar ve Derbent yerleşim alanları yakınlarından geçer ve morfolojik olarak belirgin

sarpıklık sunar. En güneybatıda, Miyosen ve Pliyosen yaşlı sedimanları birbirinden ayıran çizgisel bir geometri ile tipiktir.

Fay uzunluğu ile oluşturabileceği maksimum deprem büyüklüğü arasındaki Wells ve Coppersmith'in (1994) kuramsal formülüne göre, bu çalışmada haritalanan fay segmentlerinden Gürlek Fayı Mw: 6,56 Kızılcaören Fayı Mw: 6,24 ve Derbent Fayı Mw: 6,12 maksimum büyüklüğünde deprem üretme potansiyeline sahiptir. Tüm segmentlerin aynı anda kırılmasını içeren çoklu segment kırılması durumunda ise BFZ'nin toplam 37 km uzunluğunda olduğu esas alınarak, meydana gelebilecek maksimum deprem büyüklüğü Mw: 6,9 olarak hesaplanmıştır.

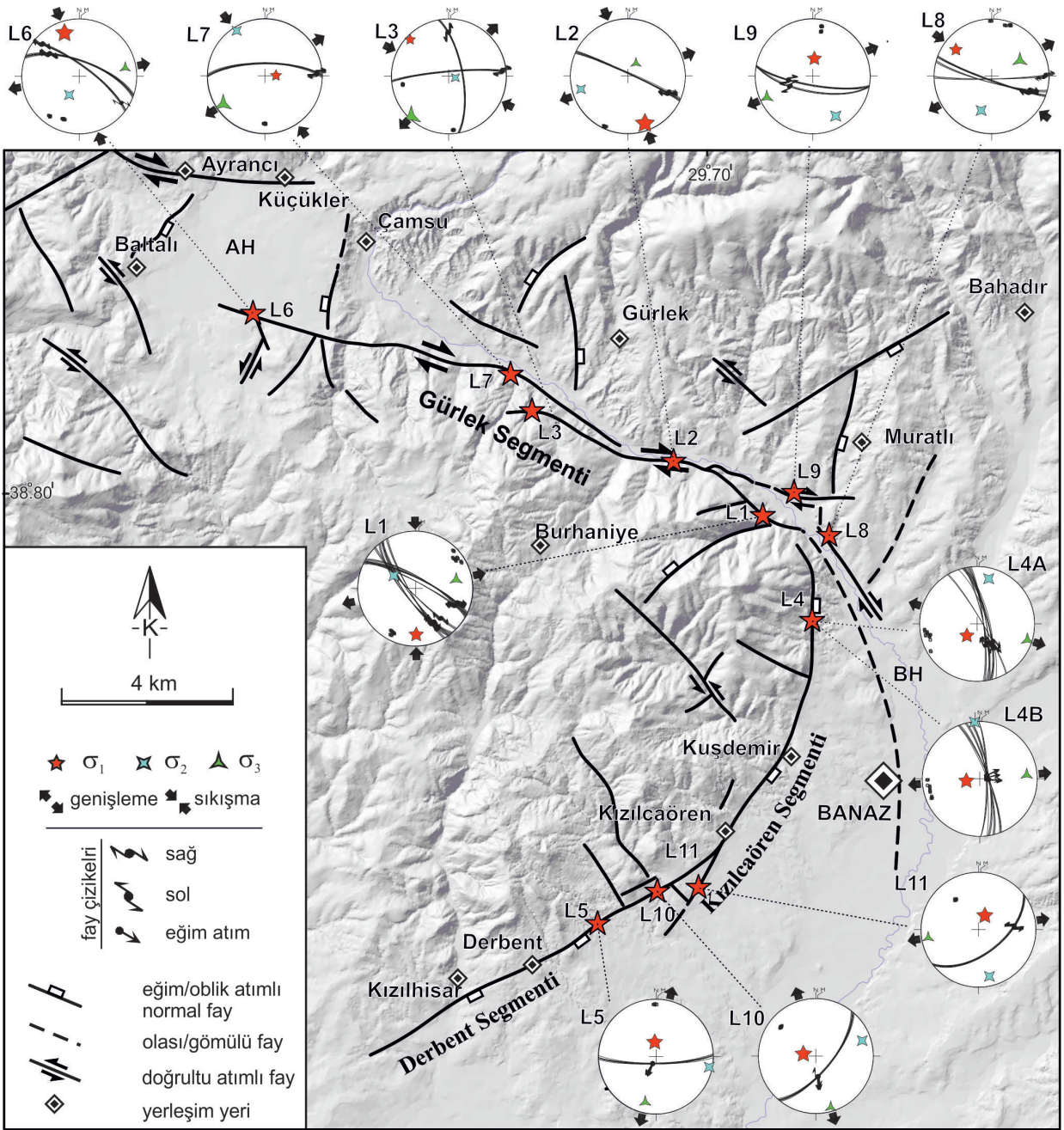
Paleogerilme Analiz Sonuçları

Banaz Fayı'nın paleogerilme analizinin yapılabilmesi ve gerilim yönlerinin hesaplanabilmesi amacıyla, çalışma alanında 11 farklı lokasyondan toplamda 155 adet kinematik veri toplanmıştır (Çizelge 1, Şekil 6).

Çizelge 1. Çalışma alanı içerisindeki segmentler boyunca ölçülen kinematik verilerin paleogerilme analiz sonuçları. Kısaltmalar: L: Lokasyon.

Table 1. Paleostress analysis results for kinematic data measured along the segments in the study area. Abbreviations: L: Location.

L	Segment	Fay Türü	Veri Sayısı	σ_1	σ_2 (Derece)	σ_3	Φ	Max ANG
1	Gürlek	sağ doğrultu atımlı	27	179/21	301/54	78/29	0,439	6
2	Gürlek	sağ doğrultu atımlı	9	160/13	254/16	033/69	0,259	7
3	Gürlek	sağ doğrultu atımlı	14	314/08	101/80	223/05	0,707	10
4B	Kızılcaören	eğim atımlı normal	14	262/71	355/01	085/19	0,175	9
4A	Kızılcaören	oblik atımlı normal	16	221/68	014/20	108/09	0,407	6
5	Derbent	eğim atımlı normal	8	355/70	101/06	193/19	0,132	6
6	Gürlek	sağ doğrultu atımlı	16	341/21	206/60	079/20	0,236	35
7	Gürlek	oblik atımlı normal	9	088/74	328/08	236/13	0,669	10
8	Gürlek	sağ doğrultu atımlı	13	307/24	197/38	061/43	0,576	10
9	Gürlek	eğim atımlı normal	11	005/65	150/21	245/13	0,508	4
10	Derbent	eğim atımlı normal	9	280/72	071/16	164/08	0,221	3
11	Kızılcaören	eğim atımlı normal	9	024/68	167/18	261/12	0,316	2



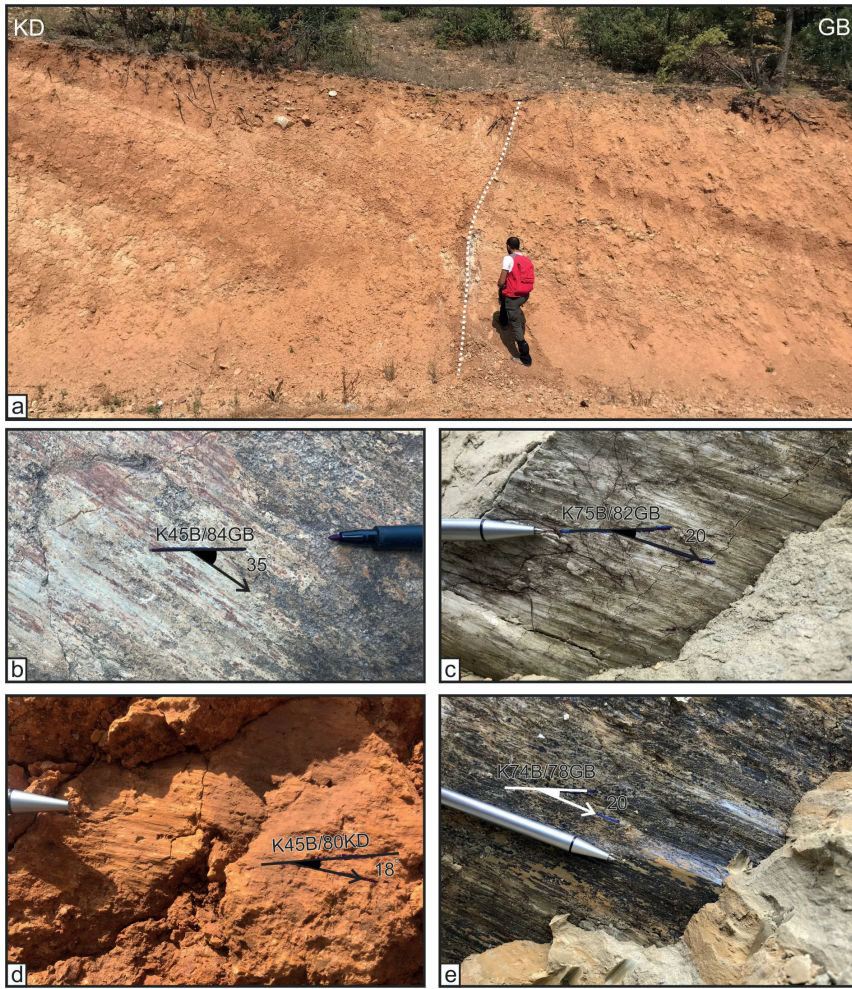
Şekil 6. İncelenen fay segmentleri üzerinde gerçekleştirilen paleogerilme analizleri. Eşit alanlı alt yarı küre stereografik izdüşümleri; fay kayma yüzeyi, kayma yönü ve asal gerilme eksen yönleri verileri ile asal gerilme eksenlerinin konumunu göstermektedir. Büyük daireler fay yüzeylerini, oklar ise kayma çiziklerini temsil etmektedir (detaylar için Çizelge 1'e bakınız).

Figure 6. Palaeostress analyses carried out on the studied fault segments. Equal area lower hemisphere stereoplots illustrate fault-slip surface, slip direction and principal stress axis orientation data and position of principal stress axes. Great circles are fault surfaces, the arrows are striations (see Table 1 for details).

Gürlek Segmenti

Fayın Baltalı ile Muratlı arasında uzanan Gürlek Segmenti boyunca gözlenen fay düzlemlerinden toplanan kinematik ölçümler baskın olarak sağ yönlü doğrultu atımlı karakter sunmaktadır. Bu bölümde gözlenen KB-GD genel uzanımlı ve düşeye yakın eğimli fay düzlemleri üzerinde baskın olarak 15-24° arası rake açıları ölçülmüştür (Şekil 7a, b, c ve d). Bu segment üzerinde ve yakınlarındaki (Lokasyonlar: 1, 2, 3, 6, 7, 8 ve 9) paleogerilme analizleri, fayın bu bölümünün

yaklaşık KB-GD doğrultulu sıkışma ve KD-GB doğrultulu genişleme kuvvetleri etkisi altında sağ yönlü doğrultu atımlı çalıştığına işaret etmektedir. İlgili lokasyonlardan toplanan kayma verilerinin paleogerilme analizlerine göre, en büyük asal gerilme eksenini olan σ_1 baskın olarak yataya yakın dalıma sahip iken (08° ila 24° arasında) en küçük asal gerilme eksenini σ_3 dalımları genel olarak yataya yakın olup 05° ila 29° arasında değişmektedir. Ortaç asal gerilim eksenini σ_2 dalımları ise baskın olarak düşeye yakındır (21 ila 80° arasında, Çizelge 1).



Şekil 7. Gürlek Segmenti boyunca kinematik verilerin toplandığı fay düzlemlerinin saha fotoğrafları. **a)** Lokasyon 8; **b)** Lokasyon 1; **c** ve **e)** Lokasyon 9; **d)** Lokasyon 6.

Figure 7. Field photographs showing fault planes measured along the Gürlek Segment. **a)** Location 8; **b)** Location 1; **c** & **e)** Location 9; **d)** Location 6).

Bununla beraber, L7’de hesaplanan σ_1 dalım açısı (74°) ile Lokasyon 8 ve 2’de hesaplanan σ_3 dalım açıları (sırasıyla 43° ve 69°) nispeten yüksek iken L2 ve 7’de hesaplanan σ_2 değerleri nispeten küçüktür (sırasıyla 16° ve 08°). Bu lokasyonlardan elde edilen ϕ değerleri, 0,236 ila 0,707 arasında hesaplanmıştır. Segment üzerinde elde edilen kinematik verilerin paleogerilme analizleri (Delvaux vd. (1997) tarafından önerilen sınıflamaya göre), Gürlek Segmenti boyunca saf doğrultu atımın (σ_2 düşeyde, $0,75 > \phi > 0,25$) baskın olduğuna işaret etmektedir.

Kızılcaören Segmenti

Kızılcaören segmenti boyunca iki farklı lokasyonda (L4 ve L11) ölçümler toplanmıştır (Şekil 6). Bu segmentin en iyi korunmuş fay sarplıkları ve kayma düzlemlerinin gözlemlendiği Evrendede mevkinde birbirini üzerleyen fay çizdiği setleri ve fayın hareket yönünü açıkça gösteren fay olukları ve basamak yapıları gibi kinematik göstergeler analiz edilmiştir. Bu lokasyondaki onlarca metre yüksekliğindeki dik fay düzlemleri morfolojik olarak oldukça belirgin sarplıklar sunmaktadır. Bu sarplıklarda gözlenen iyi korunmuş kayma çizikleri ve birbirlerini üzerleyen farklı fay çizdiği setleri, Banaz Fayı’nın kinematik evrimindeki zamansal değişimi anlamak açısından anahtar rol oynamaktadır (L4, Şekil 8a, b ve c). K20°B doğrultulu ve 75° kuzeydoğuya eğimli kayma düzlemi üzerinde 59° rake açısında sahip oblik atımlı normal kayma çiziklerinin 88° rake açısına sahip eğim atımlı normal fay çiziklerini keserek üzerledikleri açık olarak gözlenmektedir (Şekil 8d).

Bununla beraber bu sarplığa ait ölçülen tüm düzlemlerdeki ilk harekete ait rake açıları 76° ila 89° arasında değişmektedir. Bu lokasyonda, birbirini üzerleyen iki farklı fay çizdiği setinden genç olanı (L4A, Şekil 6) bu segmentin BKB-DGD doğrultulu genişleme kuvvetleri etkisi altında oblik atımlı normal fay olarak çalıştığına

işaret etmektedir. 16 farklı ölçümün gerçekleştiği bu lokasyonda hesaplanan σ_1 yönlem ve dalımı sırasıyla, 221° ve 68° iken σ_2 ve σ_3 dalım açıları yataya yakındır (sırasıyla, 20° ve 09°). Bu lokasyondan elde edilen ϕ değeri 0,407 olarak hesaplanmıştır. Segment üzerinde elde edilen kinematik verilerin paleogerilme analizleri (Delvaux vd. (1997) tarafından önerilen sınıflamaya göre) segment boyunca baskın olarak saf genişleme (σ_1 düşeyde, $0,75 > \phi > 0,25$) olduğuna işaret etmektedir. Bu lokasyondaki bir önceki hareket (L4B) ise D-B doğrultulu genişleme kuvvetleri etkisi altında eğim atımlı normal faylanmaya işaret eden yüksek rake açılı kayma çizikleri seti ile hesaplanmıştır. 11 adet kayma yüzeyi ölçümünün paleogerilme analizleri σ_1 ’in 71° ile düşeye yakın dalımına işaret eder. Hesaplanan σ_2 ve σ_3 dalım açıları yataya yakındır (sırasıyla, 01° ve 19°). 4 numaralı lokasyonda gözlenen kesen-kesilen ilişkisi bu fay üzerindeki σ_3 ’ün zaman içerisinde saat yönünün tersine doğru hareket ettiğine işaret etmektedir.

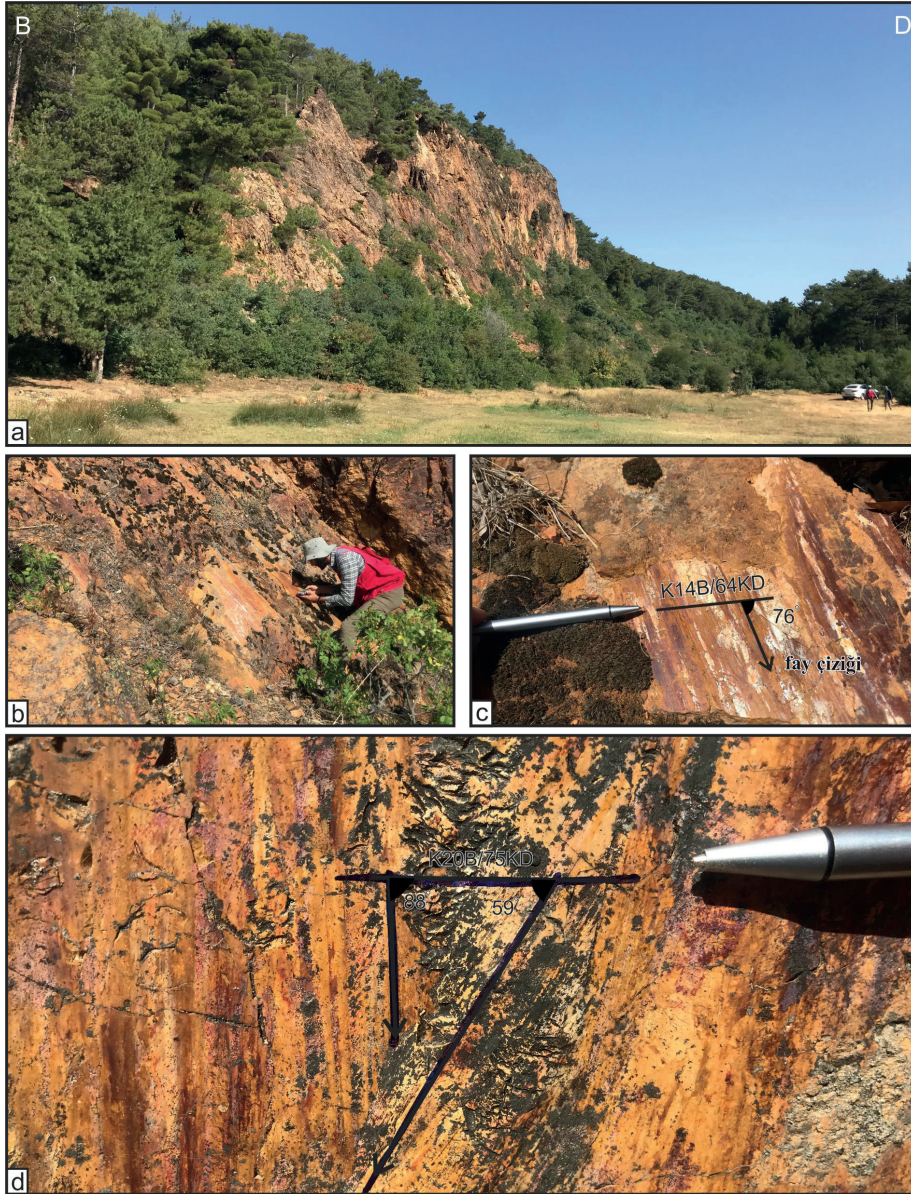
Kızılcaören segmenti üzerindeki diğer ölçüm lokasyonu (L11) segmentin güneybatı ucuna yakın yerdedir (Şekil 6). Hesaplanan yaklaşık D-B doğrultulu saf genişleme kuvvetleri etkisi 4 numaralı lokasyondaki ölçümlerin paleogerilme analizleri ile uyumlu olarak sonuç vermiştir. 9 adet kayma yüzeyi ölçümünün paleogerilme analizleri σ_1 ’in 68° ile düşeye yakın dalımına işaret eder. Hesaplanan σ_2 ve σ_3 dalım açıları yataya yakındır (sırasıyla, 18° ve 12°).

Derbent Segmenti

Derbent Segmenti üzerinde 2 farklı lokasyonda (L5 ve L10, Şekil 6) toplanan ölçümler baskın olarak σ_1 ’in düşeyde olduğu (sırasıyla, 70° ve 72°) σ_2 ve σ_3 ’ün ise yataya yakın olduğu (06° - 19° arasında, Çizelge 1) hesaplanmıştır. Bu durum Derbent Segmenti’nin baskın olarak genişlemeli kuvvetler etkisi altında şekillendiğine işaret etmektedir. Elde edilen paleogerilme sonuçlarına göre,

genişleme doğrultuları KKB-GGD ile KKD-GGB arasında değişmektedir (Şekil 6). Bu lokasyondan elde edilen ϕ değeri 0,25 altında hesaplanmıştır (sırasıyla, 0,132 ve 0,221) olarak hesaplanmıştır. Segment üzerinde elde edilen kinematik verilerin

paleogerilme analizleri (Delvaux vd. (1997) tarafından önerilen sınıflamaya göre) segment boyunca baskın olarak dairesel genişleme (σ_1 düşeyde, $0 < \phi < 0,25$) olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 8. Kızılcaören Segmenti üzerindeki Evrendede mevkiinde (L4, Şekil 6) gözlenen fay düzlemlerini gösteren saha fotoğrafları.

Figure 8. Field photographs showing fault planes observed at the Evrendede location (L4) on the Kızılcaören Segment.

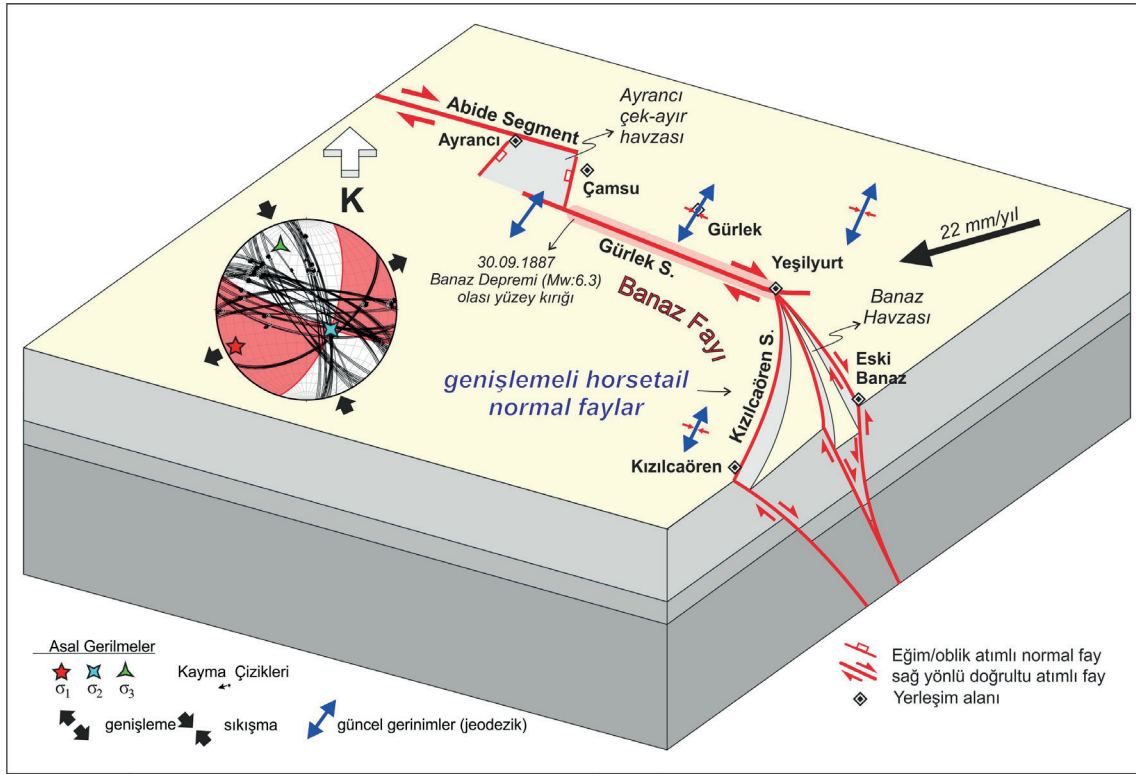
SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışma, Banaz Fayı'nın (BF) geometrik ve kinematik özelliklerini detaylandırarak, genişleme sistemlerinde gelişen at kuyruğu yapısına (horsetail structure) ait yeni veriler sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında 11 farklı lokasyondan elde edilen 155 adet fay düzlemi ölçümü, fayın tek bir mekanizma ile açıklanamayacak kadar karmaşık bir segmentasyon sunduğunu kanıtlamaktadır. Emre vd. (2013, 2018) tarafından tek bir segment olarak tanımlanan yapı, bu çalışmada sunulan saha verileri ışığında; Gürlek, Kızılcaören ve Derbent olmak üzere üç farklı segmentten oluşan bir fay olarak tanımlanmıştır.

Paleogerilme analizlerinde Gürlek Segmenti'nin kuzeybatı kesiminde saptanan yataya yakın σ_1 ve düşeye yakın σ_2 eksenleri, fayın bu kesiminde sağ yanal saf doğrultu atımlı karakterin baskın olduğunu göstermekte olup, bu bulgu Emre vd. (2013) tarafından önerilen sağ yanal hareket modeli ile örtüşmektedir. Ancak, fayın güneydoğuya doğru kavis yaparak Kızılcaören ve Derbent segmentlerine geçiş yaptığı alanlarda, σ_1 ekseninin düşey konuma geçmesi ve kayma verilerinin normal/oblik karakter sunması, Koçyiğit (2007) tarafından öne sürülen normal faylanma görüşünü destekler niteliktedir. Evrendede mevkiinde (L4) saptanan birbirini üzerleyen farklı fay çizdiği setleri, bölgedeki σ_3 gerilme ekseninin zaman içerisinde saat yönünün tersine doğru bir rotasyona uğradığını kanıtlamaktadır. Bununla beraber, kesme ilişkilerine göre belirlenen yaşlı hareketin (L4B) saf normal faylanma, genç hareketin (L4A) ise sağ yanal bileşenli normal faylanma olması, bölgedeki gerilme alanının statik olmadığını göstermektedir. σ_3 ekseninin zaman içerisinde saat yönünün tersine (counter-clockwise) rotasyonu, Batı Anadolu'daki genişlemeli rejimin yerel tektonik blok rotasyonları veya ASFS'nin doğu ve batı kesimleri arasındaki gerilme transferi ile ilişkili olabilir.

Bu çalışmada elde edilen bulgulara göre, Banaz Fayı'nın Kızılcaören Segmenti üzerindeki

Pliyo-Kuvaterner dönem düşey kayma hızı kabaca 0,1 mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu değer, fay boyunca jeodezik yöntemlerle hesaplanan güncel deformasyon hızı ile uyum göstermektedir. Tiryakioğlu vd. (2024) tarafından sunulan GNSS verileri ve yamulma analizleri, bölgede yıllık yaklaşık 1–2 mm mertebesinde bir deformasyonun varlığını ve KD-GB doğrultulu bir açılmanın hakim olduğunu göstermektedir. Ancak bu sonuçlar, 2017–2023 yılları arasındaki yaklaşık altı yıllık dönemde gerçekleştirilen yıllık kampanya tipi GNSS ölçülerine dayanmaktadır. Kampanya tipi GNSS ağlarında gözlem süresinin sınırlı olması ve ölçü periyotlarının seyrekliği nedeniyle düşey hız bileşenlerine ait standart sapmaların genellikle 2–3 mm/yıl düzeyinde olduğu görülmektedir. Bu nedenle hesaplanan 1–2 mm/yıl büyüklüğündeki düşey hızlar, hata sınırları içerisinde değerlendirilmekte olup istatistiksel açıdan anlamlı bir deformasyona işaret etmemektedir. Bölgedeki düşey hareketlerin güvenilir biçimde ortaya konulabilmesi için daha uzun süreli jeodezik gözlemlere ihtiyaç bulunmaktadır. Benzer şekilde Dönmez ve Tiryakioğlu (2018) çalışmasında SFZ üzerinde yanal atımla birlikte normal faylanmalara işaret edebilecek faya dik yönde gerinim birikimleri olduğundan bahsedilmektedir. Bu çalışmada, paleogerilme analizi ile elde edilen KB-GD doğrultulu sıkışmayla ilişkili KD-GB doğrultulu genişleme, Banaz Fayı ve yakın civarındaki güncel jeodezik çalışmalarda (Tiryakioğlu vd., 2024) elde edilen gerinim yönleri ile uyum göstermektedir (Şekil 9). Bu durum, fayın sadece paleotektonik bir yapı olmadığını, güncel gerilme rejimi altında aktif olarak deformasyon biriktirmeye devam ettiğini kanıtlamaktadır. Bununla beraber, fayın kuzeybatısındaki Ayrancı Havzası'nın kenarları ile fayın güneydoğu bölümündeki Kızılcaören Segmenti üzerindeki yaklaşık D-B doğrultulu genişlemeler sırasıyla, zonun sağa sıçrama yaptığı alandaki çek-ayır etkisi ve horsetail gelişimine bağlı lokal stress değişimleri ile açıklanabilir.



Şekil 9. Simav Fay Zonu içerisindeki Abide ve Banaz Fayları'nın genel sağ yanal geometrisini, oluşan çek ayır havzası ve genişlemeli horsetail yapılarının geometrisini gösteren şematik blok diyagram. Bölgede jeodezik çalışmalarda elde edilen güncel gerinimler (Tiryakioğlu vd., 2024) ve bu çalışmadaki Gürelek ve Kızılcaören segmentleri üzerinden toplanan tüm kinematik verilerin bütüncül fay düzlemi çözümü ve paleogerilme analiz sonucu tek stereonet üzerinde gösterilmiştir.

Figure 9. Schematic block diagram showing general right-lateral geometry of the Abide and Banaz Faults within the Simav Fault Zone, the resulting pull-apart basin, and the geometry of the extensional horsetail structures. The current strain obtained from geodetic studies in the region (red arrows: compression, blue arrows: extension) (Tiryakioğlu et al., 2024) and the holistic fault plane solution and paleostress analysis results for all kinematic data collected along the Gürelek and Kızılcaören segments in this study are shown on a single stereonet.

1887 Banaz Depremi'nin (M_s : 6,3) Comburt Vadisi boyunca 10 km'lik bir yüzey kırığı oluşturmuş olabileceği ifade edilmektedir (Ambraseys ve Jackson, 1998). Bu çalışmada hesaplanan segment uzunlukları (M_w : 6,12 - 6,56) bu tarihsel veriyi doğrular niteliktedir. Ancak, tüm zonun (37 km) tek seferde kırılması durumunda ortaya çıkabilecek M_w : 6,9 büyüklüğündeki deprem potansiyeli teorik olarak üst sınır (maksimum) büyüklük değeridir ve bölgedeki sismik tehlikenin ciddiyetini ortaya koymaktadır. 1973'ten bu

yana 4,0 üzerindeki deprem aktivitesinin durmuş olması ve Tiryakioğlu vd. (2024) tarafından Banaz Fayı üzerinde ve yakın civarında saptanan 22 ± 1 mm/yıl hızındaki güneybatı yönlü hareket (Avrasya plakası sabit iken, Şekil 9), bölgede daha önce Koçyiğit vd. (2002), Koçyiğit (2007) ve Tiryakioğlu vd., (2024) tarafından tanımlanmış olan bir "sismik boşluk" (seismic gap) olasılığını güçlendirmektedir. 1887 yılında meydana gelen ve 6,3 büyüklüğünde olduğu hesaplanan yıkıcı depremin Comburt Vadisi boyunca bir yüzey

kırığı oluşturduğu varsayıldığında; faylanma ile boşalan enerjinin, fay kırılma mekanizması gereği fayın uç kısımlarına aktarıldığı ve bu doğrultuda güncel gerilim birikiminin özellikle vadinin doğu ve batı uçlarında yoğunlaşmasının beklendiği dikkate alınmalıdır.

Bu çalışmada ilk defa saptanan sırt tipi travertenler (T1, T2, T3), fayın güncel aktivitesinin ve derin kökenli akışkan dolaşımının somut kanıtları olarak değerlendirilmiştir. Özellikle traverten sırtlarının fay doğrultularına (K55°B ve K40°D) paralellığı, bu oluşumların doğrudan tektonik kontrol altında geliştiğini göstermektedir. Banaz Fayı yakın doğusunda, çalışma alanı dışındaki faylar üzerinde gelişen sırt tipi traverten oluşumları Koçyiğit (2007) tarafından da tanımlanmıştır.

Bu çalışmada sunulan veriler ışığında, “at kuyruğu” (horsetail) fay yapılarının oluşma şartları ve geometrik özelliklerini şu şekilde açıklanmaktadır: Bu yapılar, (1) tek bir genişleme evresi yerine, iki farklı doğrultuda gerçekleşen genişlemenin üst üste binmesi sonucu oluşmuştur. Başlangıç evresinde oluşan faylar (preexisting faults) ikinci evredeki gerilme ile yeniden aktifleşerek horsetail yapısının ana mekanizmasını meydana getirmektedir. (2) Ana fayın segmentlere ayrılması horsetail yapısının tam olarak nerede konumlanacağını doğrudan kontrol etmektedir. (3) Ana faya mekansal olarak bağlanan eğim/oblik atımlı faylar, asimetrik bir “at kuyruğu” geometrisini sonuçlamıştır. (4) Ana fayın uzunluğu ve üzerindeki atım miktarı, horsetail yapısını oluşturan ikincil faylara göre çok daha büyüktür. Bu karakteristik özelliklerin anlaşılması, özellikle jeotermal sistemlerin göç yollarının ve birikim alanlarının belirlenmesinde kritik öneme sahiptir.

Banaz Fay Zonu’nun sismik riskini ve tektonik evrimini tam olarak anlayabilmek adına gelecekte aşağıdaki çalışmaların yapılmasının öncelikli olduğu düşünülmektedir. Mevcut bilinenler (Ambraseys ve Jackson, 1998; Satılmış,

2016) 1887 Banaz Depremi’nin (Ms: 6,3) Comburt vadisini kontrol eden Gürlek segmentinden kaynaklandığına ve bu segmentin Comburt vadisi boyunca yaklaşık 10 km uzunluğunda bir parçasının kırılmış olabileceğine işaret etmektedir. Bununla beraber fayın diğer segmentleri üzerinde meydana gelen son yüzey kırığı oluşturan depremler henüz bilinmemektedir. Banaz Fayı’nın, özellikle geç Pleyistosen-Holosen dönemi uzun dönem kayma hızını, geçmiş deprem tekrarlanma periyotlarını ve en son yüzey kırılması tarihini netleştirmek amacıyla uygun lokasyonlarda (özellikle Comburt Vadisi ve Kızılcaören civarı) mutlak tarihlendirme yöntemleri ile paleosismolojik hendek çalışmaları yapılmalıdır. Bölgedeki yamulma (strain) birikimi, fay kilitlenme derinliği ve düşey deformasyonun zamansal-mekânsal davranışının güvenilir biçimde ortaya konulabilmesi için sabit GNSS istasyonlarından oluşan sürekli bir izleme ağının kurulması veya mevcut kampanya tipi GNSS gözlemlerinin daha uzun süreli veri setleri oluşturacak şekilde sürdürülmesi gerekmektedir. 1,0 – 3,0 büyüklüğündeki mikrosismik aktivitenin odak mekanizması çözümleriyle fayın derinlikteki geometrisi ve güncel kinematiği sürekli izlenmelidir. Fay üzerinde ve fayların kesişim alanlarında ilk defa bu çalışmada saptanan sırt tipi travertenler, fayın güncel aktivitesini ve bölgedeki hidrotermal akışkan dolaşımını doğrudan belgeleyen morfotektonik unsurlar olarak göz önüne alındığında, bu travertenlerin oluşum yaşlarının tarihlendirilmesi ve kırık sistemleri ile ilişkilerinin ortaya konması, BFZ’nin evrimi ve aktif tektonik yapısının daha iyi anlaşılmasına katkılar sağlayacaktır.

EXTENDED SUMMARY

Western Anatolia is recognized as one of the most rapidly extending continental regions globally, with the Akşehir-Simav Fault System (ASFS) serving as a major seismically active structure within this regime. The Banaz Fault (BF), which

constitutes one of the southeastern segments of the Simav Fault Zone (SFZ) forming the northwestern part of the ASFS, represents a critical structures whose geometric evolution, segmentation, and kinematic history remain a subject of debate. While previous studies either generalized the fault zone as a single structural segment or debated its dominant slip mechanism, this study provides a comprehensive re-evaluation of the BF. By integrating structural mapping, paleostress inversion, and geodetic data, this paper details the geometric and kinematic characteristics of the BF, offering a refined model for horsetail fault development within overprinted extensional tectonic regimes

The structural architecture of the BF was investigated through detailed (1/25.000 scale) field mapping and the collection of 155 kinematic data points across 11 distinct structural localities (L1 to L11). Paleostress inversion techniques were applied to fault-slip vectors to reconstruct the temporal and spatial evolution of the local stress fields ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$). Additionally, long-term geological slip rates calculated from Plio-Quaternary vertical offsets were integrated with modern regional geodetic velocities derived from recent Global Navigation Satellite System (GNSS) campaign measurements and strain analyses to evaluate contemporary deformation accumulation along the zone.

Field data demonstrate that the BF exhibits a complex, multi-segmented structural framework rather than a uniform fault line. Honoring the fundamental nomenclature of Koçyiğit (2007), the BF is herein redefined as a composite structure consisting of three distinct segments: the Gürlek, Kızılcaören, and Derbent segments. The Gürlek Segment, located in the northwestern sector of the fault zone, is characterized by sub-horizontal maximum principal stress (σ_1) and sub-vertical intermediate principal stress (σ_2) axes. This configuration confirms a dominant right-lateral

strike-slip character, aligning with the kinematic model proposed by Emre et al. (2013). As the fault zone traces toward the southeast (Kızılcaören and Derbent Segments), it exhibits a distinct map-view curvature. Concurrently, the stress regime transitions markedly; the σ_1 axis rotates to a sub-vertical position, and fault-slip indicators display normal to oblique-slip characteristics. This kinematic shift supports the normal-faulting model originally proposed by Koçyiğit (2007).

At the Evrendede locality (L4), superimposed sets of slickenlines preserve a record of transient stress fields. Cross-cutting relationships reveal that an older, pure normal faulting phase (L4B) was overprinted by a younger, right-lateral oblique normal faulting event (L4A). This temporal variation proves that the local stress field is dynamic, characterized by counter-clockwise rotation of the least principal stress (σ_3) axis over time. This rotation is interpreted as a manifestation of localized tectonic block rotations or stress transfer mechanisms between the eastern and western segments of the SFZ.

Geological and morphotectonic evaluations along the Kızılcaören Segment yield a long-term vertical slip rate of approximately 0.1 mm/yr since the Plio-Quaternary. This geological rate is consistent with modern geodetic deformation rates. Recent GNSS data (e.g., Tiryakioğlu et al., 2024) indicate general NE-SW extension with strain accumulation of about 1-2 mm/yr in the region. However, because these data are derived from campaign-type measurements spanning 2017–2023, the vertical velocity uncertainties 2-3 mm/yr fall within the margin of error. Thus, while the horizontal NE-SW extension vector is robust, the geodetic vertical rates are not yet statistically significant on their own, highlighting the need for continuous geodetic monitoring. Furthermore, localized E-W extensional fields observed near the Ayrancı basin (northwest) and the Kızılcaören Segment (southeast) are effectively explained

by pull-apart basin mechanics at right-stepping steps and localized stress perturbations within the developing horsetail termination, respectively. The spatial orientation of newly-documented ridge-type travertines (T1, T2, T3), which run parallel or sub-parallel to the fault trends (N55°W and N40°E), confirms that the BF may act as an active conduit for deep hydrothermal fluid circulation within the contemporary stress field.

Empirical scaling relationships based on individual segment lengths yield potential earthquake magnitudes ranging from $M_w = 6.12$ to 6.56, consistent with historical reports of the 1887 Banaz Earthquake (estimated $M_s = 6.3$ by Ambraseys and Jackson, 1998), which may generate 10 km surface rupture along the Comburt Valley (Gürlek Segment). However, full-segment rupture encompassing the entire 37 km length of the zone could generate a catastrophic event of maximum $M_w = 6.9$.

Given that seismic quiescence has persisted along the fault for moderate ($M > 4.0$ since 1973) and strong ($M > 6.0$ since 1887) events and considering the region exhibits a southwestward geodetic motion of 22 ± 1 mm/yr relative to the stable Eurasian plate, our findings strongly corroborate the existence of a seismic gap along the BF. Stress accumulation and transfer are likely concentrated at the tips of the 1887 rupture zone within the Comburt Valley.

Based on integrated datasets, this study establishes four primary criteria governing the development of asymmetric horsetail structures at fault terminations within extensional regimes:

1. *Superimposed Extension:* They develop by overprinting of two distinct extensional phases rather than a single event, where pre-existing faults are selectively reactivated under the younger stress field.
2. *Segmental Control:* Structural segmentation along the master fault controls the exact spatial nucleation of the horsetail geometry.

3. *Kinematic Asymmetry:* Spatial linkage of normal and oblique-slip faults to the master strike-slip component results in an asymmetric map-view “horsetail” geometry.
4. *Displacement Partitioning:* The master fault retains significantly greater cumulative length and slip magnitude compared to the secondary branching faults. Understanding these criteria provides critical insight into defining migration pathways and reservoirs for geothermal fluids

The Banaz Fault is an active, highly segmented structure that accommodates complex oblique extension in Western Anatolia. To mitigate regional seismic hazards and refine the evolutionary model of the zone, future research should prioritize: (1) *Paleoseismological Trenching:* Trenches should be dug across the Comburt Valley and Kızılcaören sectors to constrain the recurrence intervals, late Quaternary slip rate and exact dates of historical surface-rupturing events. (2) *Continuous Geodetic Monitoring:* A permanent, continuous GNSS network should be established to accurately isolate vertical velocity components from error margins and map fault locking depths. (3) *Microseismic Networks:* High-resolution seismic arrays should be employed to resolve 1.0-3.0 magnitude micro-earthquakes and clarify the deep focal mechanisms. (4) *U-Series/AFT Dating:* Ridge-type travertines should be dated to establish an absolute chronological framework for the fault's fluid-flow history and morphotectonic evolution.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (Proje No: AKÜ BAP 21TEMATİK02) tarafından desteklenmiştir. Aynı zamanda bu makalenin bazı verileri, proje ekibinde görev alan makale yazarlarından Muammer Can Ünsal'ın Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde

yürüttüğü yüksek lisans tezi kapsamında oluşturulmuştur.

ORCID

Çağlar Özkaymak  <https://orcid.org/0000-0002-0377-1324>

Muammer Can Ünsal  <https://orcid.org/0000-0002-7914-9865>

Hasan Sözbilir  <https://orcid.org/0000-0002-3777-4830>

Doğukan Mert Özcan  <https://orcid.org/0000-0002-2693-0789>

İbrahim Tiryakioğlu  <https://orcid.org/0000-0002-4954-7109>

Halil İbrahim Solak  <https://orcid.org/0000-0001-5286-0369>

KAYNAKLAR / REFERENCES

AFAD, (2026, 01 Haziran). T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı. *Deprem Kataloğu*. <https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog>

Akdeniz, N. ve Konak, P. N. (1979). *Simav-Emet-Taşvanlı-Dursunbey-Demirci yöresinin jeolojisi* (Rapor No: 6547). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara (yayınlanmamış).

Aktuğ, B., Nocquet, J. M., Cingöz, A., Parsons, B., Erkan, Y., England, P., Lenk, O., Gürdal, M. A., Kılıçoğlu, A., Akdeniz, H. & Tekgöl, A. (2009). Deformation of western Turkey from a combination of permanent and campaign GPS data: Limits to block-like behavior. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B110), Article B10404. <https://doi.org/10.1029/2008JB006000>

Ambraseys, N. N. (2009). *Earthquakes in the Mediterranean and Middle East: A Multidisciplinary Study of Seismicity up to 1900*. Cambridge University Press.

Ambraseys, N. N. & Jackson, J. A. (1998). Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region. *Geophysical Journal International*, 133(2), 390–406. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1998.00508.x>

Angelier, J. (1984). Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B7), 5835–5848. <https://doi.org/10.1029/JB089iB07p05835>

Angelier, J. (1991). Inversion of field data in fault tectonics to obtain regional stress III: A new rapid direct inversion method by analytical means. *Geophysical Journal International*, 103(2), 363–376. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb01777.x>

Angelier, J. (1994). Fault slip analysis and paleostress reconstruction. In P. L. Hancock (Ed.), *Continental Deformation*, (pp. 53–100). Pergamon Press.

Bingöl, E. (1974). *Muratdağı merkezi kesiminin jeolojisi, magmatik ve metamorfik kayaların petrolojisi ve jeokronolojisi* [Yayınlanmamış Tez], İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 105 s.

Bingöl, E. (1977). Murat Dağı jeolojisi ve ana kayaç birimlerinin petrolojisi. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni (Türkiye Jeoloji Bülteni)*, 20(2), 13–66. https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/e2265684fe2d0d6_ek.pdf

Cabrera, L., Roca, E. & Santanach, P. (1988). Basin formation at the end of a strike-slip fault: The Cerdanya Basin (eastern Pyrenees). *Journal of the Geological Society*, 145, 261–268. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.145.2.0261>

Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Petit, C., Levi, K., Miroshnichenko, A., Ruzhich, V. & Sankov, V. (1997). Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part II: Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 282(1–4), 1–38. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00090-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00090-9)

Demirci, A., Özden, S., Bekler, T., Kalafat, D. & Pınar, A. (2015). An active extensional deformation example: 19 May 2011 Simav earthquake (Mw = 5.8), Western Anatolia, Turkey. *Journal of Geophysics and Engineering*, 12(4), 552–565. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/12/4/552>

Dönmez, E. ve Tiryakioğlu, İ. (2018). Gediz Fayı Yerkabuğu Hareketlerinin GNSS Gözlemleri ile İzlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(3), 1110–1117. <https://izlik.org/JA68XL59XM>

Duman, T. Y., Elmacı, H., Özalp, S., Olgun, Ş. ve Emre, Ö. (2013). Simav Fay Zonu'nda ilk

- paleosismolojik bulgular. Özmen, B. (Ed.), 66. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı*, = (s.: 28-29), 01-05 Nisan 2013, ODTÜ Kültür ve Kongre Merkezi, Ankara.
- Duman, T. Y., Çan, T., Emre, Ö., Kadıroğlu, F. T., Başarır Baştürk, N., Kılıç, T., Arslan, S., Özalp, S., Kartal, R. F., Kalafat, D., Karakaya, F., Eroğlu Azak, T., Özel, N. M., Ergintav, S. A., Akkar, S., Altınok, Y., Tekin, S., Cingöz, A. & Kurt, A. İ. (2018). Seismotectonic database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8), 3277–3316. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9965-9>
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. ve Şaroğlu, F. (2013). *Türkiye Diri Fay Haritası*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30. Ankara-Türkiye.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Şaroğlu, F. & Olgun, Ş. (2018). Active fault database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8), 3229–3275. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2>
- Ercan, T., Dinçel, A., Metin, S., Türkecan, A. ve Günay, E. (1978). Uşak yöresindeki Neojen havzaların jeolojisi. *Türkiye Jeoloji Bülteni (Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni)*, 21(2), 97–106. https://jmo.org.tr/resimler/ekler/be2561d497flea9_ek.pdf
- Gürboğa, Ş. (2013). 28 March 1970 Gediz earthquake fault, western Turkey: Palaeoseismology and tectonic significance. *International Geology Review*, 55(10), 1191–1201. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.771420>
- Hardcastle, K. C. & Hills, L. S. (1991). BRUTE3 and SELECT: Quick Basic 4 programmes for determination of stress tensor configurations and separation of heterogeneous populations of fault slip data. *Computers & Geosciences*, 17(1), 23–43. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(91\)90078-R](https://doi.org/10.1016/0098-3004(91)90078-R)
- Kim, Y.-S. & Sanderson, D. J. (2006). Structural similarity and variety at the tips in a wide range of strike-slip faults: A review. *Terra Nova*, 18(5), 330–344. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2006.00697.x>
- Koçyiğit, A. (2007). *Çukuroren-Çobanlar (Afyon) arasındaki deprem kaynaklarının (aktif fayların) belirlenmesi* (Proje No: ÇAYDAĞ-106Y209). TÜBİTAK Final Raporu, Ankara, 71 s.
- Koçyiğit, A. ve Deveci, Ş. (2005). Akşehir-Simav Fay Sistemi: Güneybatı Türkiye’de neotektonik rejimin başlama yaşı ve depremsellik. *Deprem Sempozyumu Kocaeli 2005, Bildiri Özleri Kitabı*, Kocaeli, s.: 26.
- Koçyiğit, A. & Deveci, Ş. (2007). A N-S-trending active extensional structure, the Şuhut (Afyon) Graben: Commencement age of the extensional neotectonic period in the Isparta Angle, SW Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 16, 391–416.
- Koçyiğit, A., Bozkurt, E., Kaymakçı, N. ve Şaroğlu, F. (2002). Şubat 2002 Çay (Afyon) Depreminin kaynağı ve ağır hasarın nedenleri: Akşehir Fay Zonu. *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Tektonik Araştırma Birimi Jeolojik Ön Raporu*, Ankara.
- Koçyiğit, A., Yusufoglu, H. & Bozkurt, E. (1999). Evidence from the Gediz graben for episodic two-stage extension in western Turkey. *Journal of the Geological Society of London*, 156(3), 605–616. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.156.3.0605>
- KRDAE, (2026, 1 Haziran). *Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi*. Deprem Kataloğu. <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/>
- Le Pichon, X. & Angelier, J. (1979). The Hellenic arc and trench system: A key to the neotectonic evolution of the Eastern Mediterranean area. *Tectonophysics*, 60(1–2), 1–42. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(79\)90131-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(79)90131-8)
- Leflef, D. (1980). *Muratdağı güneyi Neojen havzasının çökel ortamları ve paleocoğrafik evrimi* (Rapor No: 6812). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara (Yayınlanmamış).
- McKenzie, D. P. (1978). Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt: The Aegean Sea and surrounding regions. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 55(1), 217–254. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1978.tb04759.x>

- Özkaymak, Ç. (2013). *Manisa Havzası'nın Aktif Tektoniği ve Depremselliği, Batı Anadolu, Türkiye* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 251 s.
- Özkaymak, Ç. (2015). Tectonic analysis of the Honaz Fault (western Anatolia) using geomorphic indices and the regional implications. *Geodinamica Acta*, 27(2–3), 110–129.
<https://doi.org/10.1080/09853111.2014.957504>
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Tiryakioğlu, İ. ve Baybura, T. (2017). Bolvadin'de (Afyon-Akşehir Grabeni, Afyon) gözlenen yüzey deformasyonlarının jeolojik, jeomorfolojik ve jeodezik analizi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 60(2), 169–189.
<https://doi.org/10.25288/tjb.302914>
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Geçievi, M. O. & Tiryakioğlu, İ. (2019). Late Holocene coseismic rupture and aseismic creep on the Bolvadin Fault, Afyon Akşehir Graben, Western Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 28, 787–804.
<https://doi.org/10.3906/yer-1906-13>
- Satılmış, S. (2016). 30 Eylül 1887 Banaz Depremi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi, 38, 79–96.
- Seyitoğlu, G. & Scott, B. C. (1991). Late Cenozoic crustal extension and basin formation in west Turkey. *Geological Magazine*, 128(2), 155–166.
<https://doi.org/10.1017/S0016756800018343>
- Sözbilir, H., Eytemiz, C., Bayık, Ç., Arca, D., Utku, M., Özel Füzün, S., Bakak, Ö., Özdağ, Ö. C., Aksaz, M., Tatar, O., Türkoğlu, M., Kılıçarslan, Ö. & Kaplan, M. (2026). Seismic Source Analysis of the 10 August 2025 M_w 6.1 Sındırgı and the 27 October 2025 M_w 6.1 Sındırgı Earthquakes (Western Anatolia Extensional Province, Türkiye) Based on Geological, Seismological, and InSAR Data. *Seismological Research Letters*,
<https://doi.org/10.1785/0220250346>
- Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Boray, A. (1992). *1:1.000.000 ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Şengör, A. M. C., Görür, N. & Şaroğlu, F. (1985). Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. In K. Biddle & N. Christie-Blick (Eds.), *Strike-slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation*, (pp. 227–264). Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication 37.
<https://doi.org/10.2110/pec.85.37.0211>
- Tiryakioğlu, İ., Baybura, T., Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Sandıkçioğlu, A., Erdoğan, S., Yılmaz, İ., Uysal, M., Yılmaz, M., Yıldız, A., Dereli, M. A., Yalçın, M., Dumlupınar, İ., Yalım, H. A. ve Ertuğrul, O. (2015). Sultandağı Fayı Batı Kısmı Fay Aktivitelerinin Multidisipliner Çalışmalarla Belirlenmesi. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1), 7–16.
- Tiryakioğlu, İ., Özkaymak, Ç., Baybura, T., Sözbilir, H. & Uysal, M. (2018). Comparison of palaeostress analysis, geodetic strain rates and seismic data in the western part of the Sultandağı Fault in Turkey. *Annals of Geophysics*, 61(3), GD335.
<https://doi.org/10.4401/ag-7591>
- Tiryakioğlu, İ., Özkaymak, Ç., Solak, H. İ., Öztürk, M., Akyar, B. E., Eyübagil, E. E. ve Çakanşimşek, E. B. (2024). Jeodezik ölçülerle Banaz Fayı'nın güncel tektonik deformasyonu, Akşehir-Simav Fay Sistemi, Batı Anadolu. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(3), 873–881.
<https://doi.org/10.28948/ngumuh.1448674>
- Tiryakioğlu, İ., Gezgın, C., Aktuğ, B., Solak, H.İ., Özkaymak, Ç., Şafak Yaşar, Ş., Şahiner, F., Yıldırım, M. C., Aladoğan, K., Çakanşimşek Ünlükaya, E.B., Özcan, D.M., Bezcioglu, M., Şentürk, M. D. & Akgül, M. F. (2026). Revealing the source mechanism of the August 10, 2025 Sındırgı Earthquake (Mw 6.3) with geological and geodetic evidence. *Advances in Space Research*, 78(2), 580–598.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2026.04.047>
- Wells, D. L. & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 974–1002.
<https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>

- Xu, H., Lao, H., Li, G., Dong, G. & Xia, S. (2024). Origin of horsetail faults in an extensional regime using physical experiments for the Linnan Sag. *Interpretation*, 12(3), T289–T301. <https://doi.org/10.1190/INT-2023-0033.1>
- Yılmaz, Y. & Gürer Ö. F. (2024). Tectonic development of western Anatolian extensional province. *International Geology Review*. 66(3) 755-785. <https://doi.org/10.1080/00206814.2023.2209865>