



**Yunak Fay Zonu'nun Aktif Tektoniği ve Kinematik Analizi, Afyon Akşehir Grabeni**  
*Active Tectonics and Kinematic Analysis of Yunak Fault Zone, Afyon Akşehir Graben*

**Doğukan Mert Özcan<sup>1,\*</sup> , Çağlar Özkaymak<sup>2</sup> **

<sup>1</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 03200, Afyonkarahisar

<sup>2</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 03200, Afyonkarahisar

• Geliş/Received: 24.05.2024 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 29.12.2024 • Kabul/Accepted: 31.12.2024  
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 15.01.2025 • Baskı/Printed: 31.01.2025

*Araştırma Makalesi/Research Article*

*Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey*

**Öz:** Yunak Fay Zonu, Batı Anadolu'nun sismik olarak aktif çöküntü alanlarından birisi olan Afyon Akşehir Grabeni (AAG)'nin kuzeydoğu bölümünde yer almaktadır. Bölgede gerçekleştirilen saha ağırlıklı çalışmalar sırasında Yunak Fay Zonu içerisinde kalan 4 segment ilk defa 1/25.000 ölçekli olarak haritalanmış, Cebrail, Üçkuyu, İncirli ve Ayrıtepe Segmentleri olarak ilk defa adlandırılmış, geometrik, kinematik ve aktif tektonik özellikleri ilk defa analiz edilmiştir. Saha çalışmaları ile elde edilen bulgular, çalışma alanında uzunlukları 3 km ile 18 km arasında, genişlikleri 300 m ile 3 km arasında değişen, KKD-GGB, KD-GB ve DB uzanımlı ve 5,6 ile 6,7 moment büyüklüklerine kadar deprem üretme potansiyellerine sahip fayların varlığına işaret etmektedir. Gerçekleştirilen paleogerilme analizleri, bölgede yer alan fayların Miyosen-Erken Pliyosen'de etkili olan genel olarak K-G yönlü çekme gerilmesi ile ilişkili D-B yönlü sıkışma gerilmeleri etkisi altında saf doğrultu atımlı faylanma ile oluştuklarını, Pliyo-Kuvaterner döneminde etkili olan çekme gerilmesi tektonizması sırasında ise D-B, KG ve KD-GB arasında değişen çok yönlü genişlemeli (multi-directional extension) tektonik ortam içerisinde eğim/oblik atımlı normal fay şeklinde çalışarak reaktive olduklarını ortaya çıkarmıştır. Bu çalışmada ilk defa tanımlanan Akşehir Alt Grabeni, eğim atımlı Yunak ve Mevlütlü Fay Zonları ile kontrol edilmektedir ve Sultandağı Fayı'nın düşen bloğu üzerinde çapraz graben niteliği sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Afyon Akşehir Grabeni, aktif tektonik, çapraz graben, kinematik analiz, Orta Anadolu, paleogerilme analizi, sismik etkinlik.

**Abstract:** The Yunak Fault Zone is located in the northeast part of the Afyon Akşehir Graben (AAG), which is a seismically active graben in Western Anatolia. During field-based studies, four segments within the Yunak Fault Zone were mapped for the first time at a scale of 1/25,000, and named as the Cebrail, Üçkuyu, İncirli, and Ayrıtepe Segments. Their geometric, kinematic, and active tectonic features were analyzed for the first time. The findings obtained from field studies indicate the presence of faults with lengths ranging from 3 km to 18 km and widths ranging from 300 m to 3 km, with orientations varying between NNE-SSW, NE-SW, and E-W, capable of producing earthquakes with magnitudes ranging from 5.6 to 6.7. Paleostress analyses of fault slip data reveal that the NE-SW trending faults in the region were formed by pure strike-slip faulting under the influence of a N-S directed tensional and E-W directed compressional stress regime during the Miocene-early Pliocene. However, during Plio-Quaternary extensional tectonics in western Anatolia, they were reactivated as dip/oblique-slip normal faults within multi-directional extensional tectonics in E-W, NE-SW, and NNE-SSW directions in the northeastern part of the AAG. In this study, the newly identified Akşehir Sub-Graben is controlled by the NE-SW trending dip-slip Yunak and Mevlütlü Fault Zones and exhibits characteristics of a cross-graben on the hanging wall block of the Sultandağı master fault.

**Keywords:** Afyon Akşehir Graben, active tectonics, cross graben, Central Anatolia, kinematic analysis, paleostress analysis, seismic activity.

## GİRİŞ

Batı Anadolu'nun önemli sismik kaynaklarından birisi olan Akşehir Simav Fay Sistemi (ASFS), kuzeybatıda Bigadiç (Balıkesir) ile güneydoğuda Ilgın (Konya) arasında yaklaşık 400 km boyunca uzanır ve çok sayıda süreksiz diri fay kollarından oluşur (Koçyiğit, 1985 ve 1987; Koçyiğit vd., 2000; Koçyiğit ve Deveci 2007; Özkaymak vd., 2017 ve 2019; Tiryakioğlu vd., 2018; Emre vd., 2018; Duman vd., 2018). ASFS boyunca aletsel dönemde meydana gelen 25.06.1944 Gediz (Mw:6,0), 25.03.1969 Demirci (Ms:6,1), 28.03.1970 Gediz (Mw:6,2), 19.05.2011 Simav (Mw:6,0), 15.12.2000 Sultandağı (Mw:6,0) ve 03.02.2002 Çay Depremleri (Mw: 6,0 ve 6,3) sistemin günümüzde aktif olduğunu kanıtlayan en önemli verilerdir (Ergin vd., 1967; Soysal vd., 1981; Ambraseys, 1988 ve 2009; Ambraseys ve Jackson, 1998; Özer, 2006; Tan vd., 2008; Tan, 2021, KOERI, 2024; AFAD, 2024; Duman vd., 2018). ASFS'nin güneydoğu bölümünü temsil eden Afyon Akşehir Grabeni (AAG), kuzeydoğuda yer alan Orta Anadolu ile güneybatıda yer alan Isparta Dirseğini (Blumenthal, 1963) birbirinden ayıran yaklaşık olarak 130 km uzunluğunda, KB-GD uzanımlı yaklaşık 4 ila 20 km genişliğinde, aktif olarak büyümekte olan kıtasal bir rift alanıdır (Koçyiğit, 1984; Koçyiğit vd., 2000; Koçyiğit ve Özacar, 2003; Emre vd., 2011; Özkaymak vd., 2017 ve 2019; Emre vd., 2018; Duman vd., 2018). AAG'nin güneydoğusunda yer alan KB-GD uzanımlı ve kuzeydoğuya eğimli yaklaşık 90 km uzunluğa ana fay özelliğindeki bölümü, günümüzde Dış Isparta Dirseği'nin kuzeydoğu kolunu temsil etmektedir. Bu fay, ilk defa Atalay (1975) tarafından normal fay olarak tanımlanmış ve ilk defa Koçyiğit (1984) tarafından Akşehir Fay Zonu (AFZ) olarak adlandırılmıştır. Bu zonun Doğanhisar ile Çay arasında kalan ve Sultandağlarının kuzey sınırını temsil eden bölümü birçok araştırmacı tarafından Sultandağı Fayı olarak nitelendirilmiştir (Boray vd., 1985; Şaroğlu vd., 1987; Barka vd., 1995; Demirtaş vd., 2002;

Yürür vd., 2003; Emre vd., 2011; Özkaymak vd., 2017; 2019). 2012 yılında güncellenen Türkiye Diri Fay Haritasında (Emre vd., 2012) "Sultandağı Fayı" adı altında, diri fay olarak haritalanmıştır. AAG'nin yer aldığı dış Isparta Dirseği'nin KD kenarının (Akşehir Fay Zonu ya da Sultandağı Fayı) kinematik özellikleri ve neotektonik rejimin niteliği hakkında iki farklı görüş yer almaktadır. İlk görüş, Isparta dirseği boyunca etkili olan neotektonik rejimin sıkışmalı olduğunu ve Isparta Dirseği'nin doğu kenarının KB-GD uzanımlı Sultandağı bindirmesi ile kontrol edildiğini ileri sürmektedirler (Boray vd., 1985; Barka vd., 1995; Altunel vd., 1999). Son yıllarda bölgede meydana gelen depremlerin (15 Aralık 2000 Sultandağı ve 3 Şubat 2002 Çay Depremleri, sırasıyla Mw: 6,0, 6,3 ve 6,0) odak mekanizma çözümleri ile de desteklenen ve kabul gören diğer görüşe göre, Isparta açısı üzerinde etkili olan neotektonik rejim genişlemelidir, bu zon erken Messiniyen yaşlı sıkışmalı deformasyon fazından sonra genişlemeli neotektonik rejim etkisi altında, eğim atımlı normal fay karakterinde çalışmaktadır. (Kocafe ve Ataman 1976; McKenzie, 1978; Koçyiğit, 1983, 1984; Price ve Scott, 1994; Yılmaztürk ve Burton, 1999; Koçyiğit vd., 2000; Demirtaş vd., 2002; Koçyiğit ve Özacar, 2003; Tiryakioğlu vd., 2015; Özkaymak 2015, 2019).

Afyonkarahisar ve Konya'daki yerleşim alanları için önemli deprem kaynaklarından birisi olan AAG boyunca uzunlukları 8 ile 29 km arasında değişen, 14 fay ve 28 fay segmenti tanımlanmıştır (Emre vd., 2011 ve 2018; Duman vd., 2018). Fay segmentlerinin uzunluğu ve üretebileceği maksimum deprem büyüklükleri arasındaki bağıntıya göre, AAG boyunca haritalanan fay segmentlerinin üretebilecekleri maksimum deprem büyüklüğü 6,8'dir (Pavlidis ve Caputo, 2004; Wells ve Coppersmith, 1994; Duman vd., 2018). Hesaplanan büyüklükler aynı depremlerle birden fazla fay segmentin kırıldığı durumlarda geçerli değildir. BÜ Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KOERİ, 2024; 9

Ekim 2024 tarihi itibarıyla) deprem kataloğuna göre Şekil 1b'de sunulan alan içerisinde moment büyüklükleri 0,4 ile 6,3 arasında toplam 5922 adet deprem kaydı vardır. Bu depremlerden 1568 adedinin büyüklüğü 3,0 ve üzerinde iken büyüklüğü 4,0 ve üzerinde olan deprem sayısı 99'dur. Son 10 yıllık verilere göre, maksimum deprem derinliği 29,8 km; ortalama deprem derinliği ise 8-10 km arasındadır. AAG içerisinde meydana gelen bu depremlerden odak mekanizma çözümleri hesaplanmış olan bazı depremlerin odak mekanizma çözümlenmeleri (Özkaymak vd., 2017; Kalafat ve Görgün, 2017; Tiryakioğlu vd., 2018) graben içerisinde genel olarak D-B, KB-GD ve KD-GB doğrultulu baskın olarak eğim/oblik atımlı normal fayların deprem ürettiğine işaret etmektedir. Grabenin doğusunda, Akşehir Gölü ile Yunak arasında KD-GB doğrultusunda uzanan ve çok sayıda eğim atımlı ve güneydoğuya eğimli normal fay kollarından oluşan Yunak Fay Zonu (YFZ), ilk defa 2011 yılında güncellenen Türkiye Diri Fay Haritası'nda (Emre vd., 2011) diri fay olarak tanımlanmıştır. Grabenin kuzeydoğu kenarını denetleyen aktif tektonik yapılardan birisi olarak kabul edilen zonun uzunluğu 30 km'yi bulmaktadır. AAG'nin içerisindeki sismik olarak aktif alanlardan birisi, YFZ'nun düşen bloğu üzerindedir. Son 20 yıl içerisinde meydana gelen ve günümüzde de devam eden mikrosismik aktivite YFZ'nun düşen bloğu üzerinde ve zona paralel bir dağılım sunmaktadır (Şekil 1b).

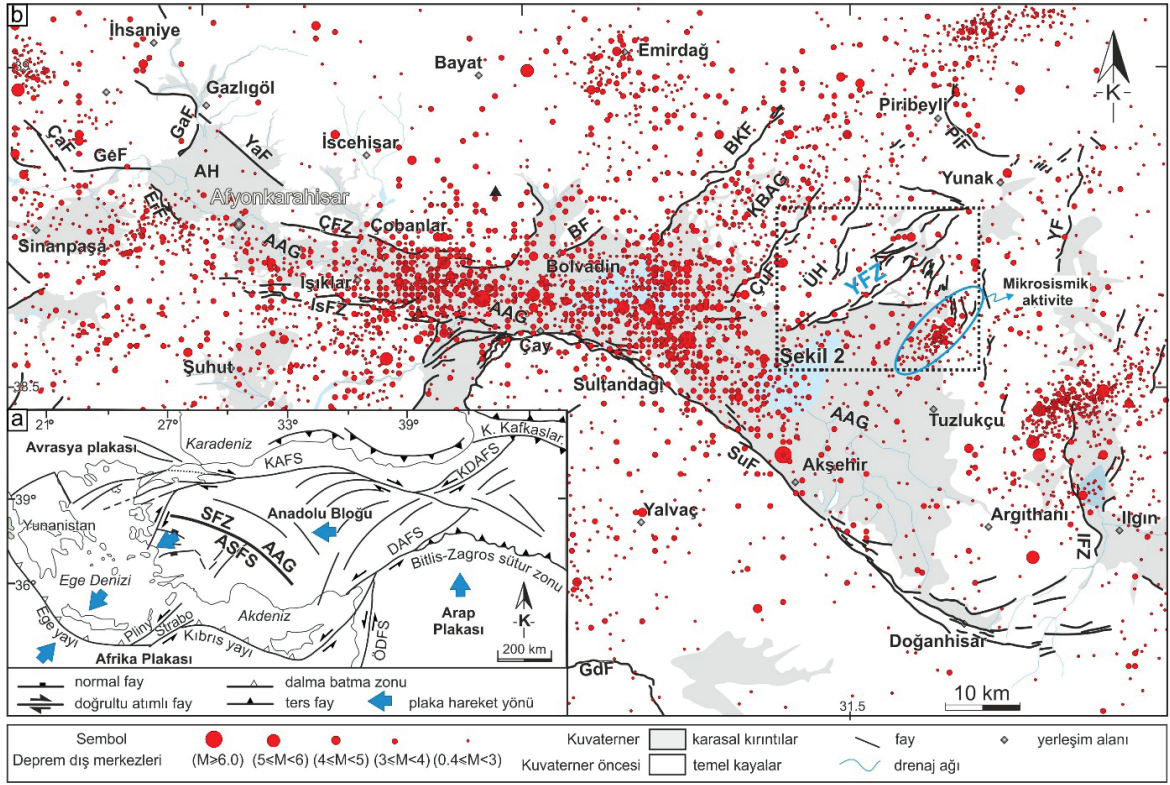
Aletsel ve tarihsel dönemlerde yıkıcı deprem ürettiği ve gelecekte deprem üretme potansiyeline sahip olduğu bilinen ASFS ve özellikle AAG boyunca çok sayıda diri fay haritalanmış olmasına rağmen, bu fayların büyük bir kısmının kinematik, geometrik, jeomorfolojik ve paleosismolojik özellikleri hakkında sınırlı bilimsel veriler yer almaktadır (Emre vd., 2003; Akyüz vd., 2006; Duman ve Emre, 2013; Gürboğa vd., 2013; Özkaymak vd., 2017 ve 2019; Tiryakioğlu vd., 2015 ve 2018). AAG içerisinde yer alan bu faylardan birisi olan YFZ'nun

geometrisi, kinematik analizi ve aktif tektonik ve sismotektonik özellikleri üzerine yayınlanmış bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma, Yunak Fay Zonu'na ait fay segmentlerinin 1/25.000 ölçeğinde haritalanmasını, zonun aktif tektonik, sismotektonik, geometrik ve kinematik özelliklerinin araştırılmasını konu almaktadır.

## **YÖNTEM**

Bu çalışmada bölgede yüzeyleyen jeolojik birimler saha çalışmaları sırasında jeolojik haritalama yöntemleri kullanılarak haritalanmıştır. Haritalama çalışmaları sırasında altlık olarak 1/25000 ölçekli Afyon K26b3, K27a4, K27a3, K26c2, K27d1, K27d2, K26c3, K27d4, K27d3, L26b2, L27a1, L27a2 topografik haritalar kullanılmıştır. Sahada gerçekleştirilen Jeolojik haritalama çalışmaları sırasında haritalanan fay segmentasyonu, fayların yüzey geometrilerine göre belirlenmiştir. Fayların kinematik özellikleri, doğrultuları, eğim yönleri, başlangıç bitiş alanları, genişlik zonları, sıçrayan segmentlerin bağlanma (soft linkage) ilişkileri ya da bağlı olmayan (hard-linkage) fayların sıçrama aralıkları, kesenkesilen ilişkileri göz önüne alınarak belirlenmiştir. Ayrıca, bölgenin tektonik jeomorfolojisinin analiz edilmesi amacıyla, NASA tarafından kullanıcılarına açık olan SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) görüntüleri kullanılmıştır. Bununla beraber diri fay haritalamaları sırasında, aktif tektonik çalışmalarda sıklıkla kullanılan dağ önü çizgiselliği, alüvyal yelpaze, üçgen yüzeyler, fay sarplıkları gibi jeomorfolojik göstergelerden yararlanılmıştır. Bu kapsamda, fayın deforme ettiği birimler ve deformasyon zonu, sahada faya dik bir doğrultu boyunca alınan enine jeolojik kesitler alınarak yorumlanmıştır. YFZ ve yakın çevresinde meydana gelen sismik aktiviteye ait tüm veriler, BÜ Kandilli Rasathanesi BDTİM Deprem Sorgulama Sistemi ve Fay Mekanizma Çözümleri arşivinden alınarak, çalışma alanı için aletsel dönem deprem kataloğu oluşturulmuştur.





**Şekil 1. a)** Doğu Akdeniz'in Neotektonik yapısı (Özkaymak, 2015'ten düzenlenmiştir). **b)** Afyon Akşehir Grabeni ve yakın çevresinin sismotektonik haritası (Faylar, Emre vd., 2011'den, deprem verileri KOERI, 2024'ten alınmıştır). Kısaltmalar: AAG: Afyon Akşehir Grabeni, AH: Afyon Havzası, ASFS: Akşehir Simav Fay Sistemi, BF: Bolvadin Fayı, BKF: Büyük Karabağ Fayı, ÇaF: Çatkuyu Fayı, ÇFZ: Çobanlar Fay Zonu, ÇuF: Çukurcak Fayı, DAFS: Doğu Anadolu Fay Sistemi, ErF: Erkmen Fayı, GaF: Gazlıgöl Fayı, GdF: Gelendost Fayı, GF: Gecek Fayı, IFZ: Ilgın Fay Zonu, IsFZ: Işıklar Fay Zonu, KAFS: Kuzey Anadolu Fay Sistemi, KBAG: Kızılboğaz Alt Grabeni, KDAFS: Kuzeydoğu Anadolu Fay Sistemi, ÖDFS: Ölü Deniz Fay Sistemi, PiF: Piribeyli Fayı, SFZ: Simav Fay Zonu, ÜH: Üçkuyu Horstu, YaF: Yarımca Fayı, YF: Yavaşlı Fayı, YFZ: Yunak Fay Zonu.

**Figure 1. a)** Neotectonic structure of the Eastern Mediterranean (adapted from Özkaymak, 2015). **b)** Seismotectonic map of the Afyon-Akşehir Graben and its immediate surroundings (faults taken from Emre et al., 2011 and seismic data taken from KOERI, 2024). Abbreviations: AAG: Afyon Akşehir Graben, AH: Afyon Basin, ASFS: Akşehir Simav Fault System, BF: Bolvadin Fault, BKF: Büyük Karabağ Fault, ÇaF: Çatkuyu Fault, ÇFZ: Çobanlar Fault Zone, ÇuF: Çukurcak Fault, DAFS: East Anatolian Fault System, ErF: Erkmen Fault, GaF: Gazlıgöl Fault, GdF: Gelendost Fault, GF: Gecek Fault, IFZ: Ilgın Fault Zone, IsFZ: Işıklar Fault Zone, KAFS: North Anatolian Fault System, KBAG: Kızılboğaz Sub Graben, KDAFS: Northeast Anatolian Fault System, ÖDFS: Dead Sea Fault System, PiF: Piribeyli Fault, SFZ: Simav Fault Zone, ÜH: Üçkuyu Horst, YaF: Yarımca Fault, YF: Yavaşlı Fault, YFZ: Yunak Fault Zone.

Çalışma alanında kinematik analiz çalışmaları kapsamında 17 farklı lokasyonda toplam 227 fay düzlemi ölçümü gerçekleştirilmiştir. Fay yüzeyi verileri Angelier'in gerilme terslenme yöntemi (Angelier 1984, 1991, 1994) ve Hardcastle ve Hills (1991) tarafından geliştirilen program ile

incelenmiştir. Ölçümler yapılırken, aynı fay düzleminde gözlenen fay olukları (corrugations), dalgalı yapılar, düzlemin doğrultu ve eğimindeki değişimler gibi gerilmenin değişiklik gösterebileceği fiziksel durumlar dikkate alınmıştır. Fayın reaktivasyonu ve fay yüzeyi üzerindeki

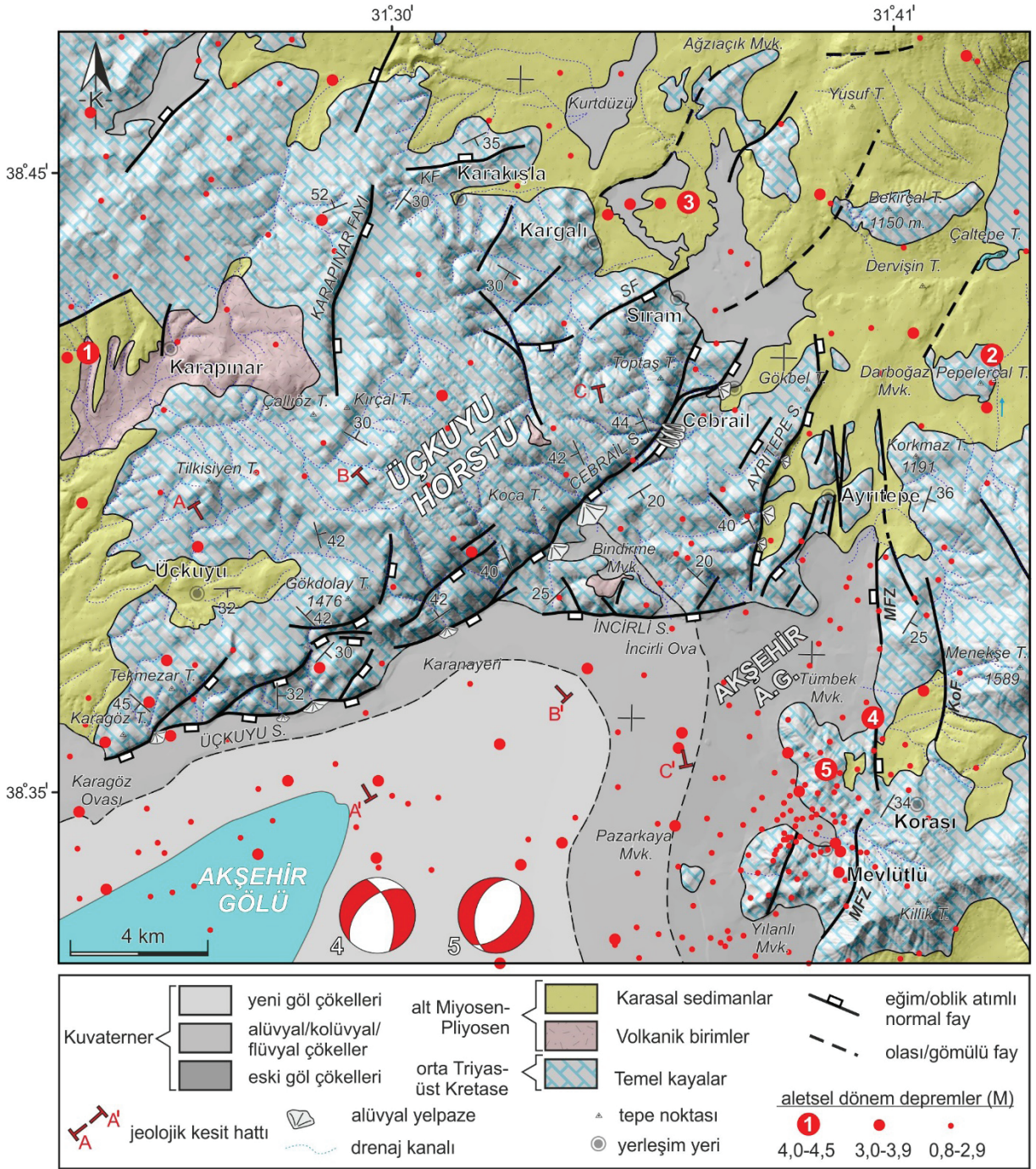


hareketin yönü, fay olukları (corrugations), Riedel makaslama ları, fay kertikleri ve fay çizikleri gibi kinematik göstergeler kullanılarak tespit edilmiştir. Çalışma alanında gözlemlenen farklı fay setleri aralarında kesen kesilen ilişkisine göre bağlı yaşları tanımlanmıştır. Paleogerilme analizlerinin doğruluğu, sürekli deformatsyona maruz kalan alanlarda fay düzlemlerinin hem düşey hem de yatay eksen de rotasyona uğrama olasılığından dolayı tartışmaya açıktır. Bu bakımdan, bu analizlere yönelik kinematik verilerin genç birimleri kesen ana fay düzlemlerinden toplanmasına özen gösterilmiştir. Ancak ölçülen yüzeylerin tarihlendirilmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen paleogerilme analizleri, verilerin toplandığı fay düzlemlerinin rotasyona uğramadığı kabul edilerek değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, fay boyunca gözlenen kayma yönü ile hesaplanan asal gerilim eksenlerinden belirlenen ana gerilme yönü arasındaki açıl sapmalar, özellikle kaymanın önceki bir süresizlik düzlemi üzerinde gerçekleşmesi, kaymanın gerçekleştiği kayanın dayanımının zayıf olması, depremin sığ veya derin olması, fay boyunca meydana gelen kırılmanın yayılımının S dalgası hızını aşması (supershear) gibi farklı dinamik koşullar sebebi ile hata verebilmektedir (McKenzie, 1969; Angelier, 1984; Gephart ve Forsyth, 1984; Arnold ve Townend, 2007). Bu çalışmada, bu hataları minimuma indirebilmek amacıyla, sahadaki fay yüzeyi ölçümlerinin hesaplanan paleogerilme analizi sonuçları bölgede mevcut olan jeodezik gerilim hesaplamaları (Tiryakioğlu vd., 2018) ve odak mekanizma çözümleri (Kalafat ve Görgün, 2017) çalışmalarındaki gerilme yönleri çıktıları ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Ayrıca bu hata payları, bu çalışmada kullanılan ve Angelier (1984;1991;1994) tarafından geliştirilen programın hesaplamalarında minimuma indirilmiş ve her ölçüm için sunulmuştur. Çizelge 1'de sunulan ANG'nin maksimum bireysel değerleri, her bir fay için gerçek kaymanın ve teorik

kesmenin tutumlarını göstermektedir ve düşük ANG değerleri hatanın minimuma yaklaştığına işaret etmektedir.

## **YUNAK FAY ZONU ve YAKIN CİVARININ GENEL JEOLJİK ve SİSMOTEKTONİK ÖZELLİKLERİ**

Afyon Akşehir Grabeni'nin güneydoğu bölümü, ana graben fayı niteliğindeki KB-GD uzanımlı Sultandağı Fayı ile bu zonun tavan bloğu üzerinde yer alan ve çapraz nitelik sunan KD-GB uzanımlı ikincil horst ve grabenleri kontrol eden diri faylar ile tipiktir. Uzunlukları 9 ile 29 km arasında değişen bu faylar, genel olarak Pliyo-Kuvaterner öncesi yaşlı temel kayalar ile modern havza dolgusu arasındaki yapısal dokanakları temsil etmektedir (Şekil 1). Bu alanda yer alan Kızılboğaz Alt Grabeni (KBAG), Büyük Karabağ Fayı ile Çukurcak Fayı arasında kalır. Bölgede son yıllarda gerçekleştirilen bir çalışmada, Kızılboğaz Alt Grabeni'ni kuzeybatıdan sınırlayan Büyük Karabağ Fayı'nın Kuvaterner öncesinde etkili olan sıkışmalı bir tektonik rejim etkisinde doğrultu atımlı karakterde oluştuğuna ve neotektonik dönemde ise çekme gerilmesi tektonik rejim etkisi altında eğim atımlı normal karakterde reaktif olduğu işaret etmektedir (Geçievi vd., 2019). Bununla beraber, bölgede meydana gelen depremlerin odak mekanizma çözümleri, faylar boyunca gerçekleştirilen GNSS analizleri, jeolojik, jeomorfolojik ve kinematik çalışmalar grabenin bu bölümünde günümüzde çok yönlü genişlemeli tektonik rejiminin varlığına işaret etmektedir (Koçyiğit ve Özacar, 2003; Özkaymak vd., 2017 ve 2019; Kalafat ve Görgün, 2017; Tiryakioğlu vd., 2018). BÜ Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KOERİ, 2024; 9 Ekim 2024 tarihi itibarıyla) tarafından sunulan aletsel dönem deprem verilerine göre, Şekil 2'de sunulan alan içerisinde büyüklükleri 0,8 ile 4,8 arasında değişen toplam 318 deprem kaydı vardır.



Şekil 2. Çalışma alanının jeoloji ve sismotektonik haritası (Odak mekanizma çözümleri EMSC'den alınmıştır).

Figure 2. Geological and seismotectonic map of the study area (Focus mechanism solutions taken from EMSC).

Bu depremlerin 270 adedinin büyüklükleri 0,8 ile 2,9 arasında iken; 3,0 ile 3,9 arasında 45; 4,0 ve üzerinde ise 5 adet deprem kaydı vardır. Bu

depremlerden 1, 2 ve 3 numaralı olanları (Şekil 2) sırasıyla 28.03.1970 (Md:4,8), 18.04.1970 (Md:4,0) ve 27.04.1978 (Ms: 4,0) tarihlerinde



meydana gelmiştir. 09.02.2021 tarihinde yaklaşık 2 dakika arayla (sırasıyla, 15:51:53 ve 15:53:56, UTC) meydana gelen iki depremden ilki (4 numara) 4,5 (Mw) diğer ise (5 numara) 4,2 (Mw) büyüklüğünde olup derinlikleri sırasıyla 13 ve 14 km olarak rapor edilmiştir (KOERİ, 2024). Dışmerkezleri, YFZ'na ait Cebrail ve İncirli segmentlerinin tavan bloklarında, Tümbek mevki civarında tanımlanan bu depremlerden 4 numaralı olana ait çözüm, depreme neden olan fayın oblik atımlı normal; 5 numaralı depreme ait odak mekanizma çözümü ise fayın baskın olarak eğim atımlı normal karakterine işaret etmektedir. 5 numaralı depreme ait çözüme göre KD-GB uzanımlı fay deprem üretmiştir. Bununla beraber, 2021 yılında meydana gelen bu depremlerin çevresinde özellikle, İncirli Ova, Koraşı, Yılanlı Mevki ve Pazarkaya Mevki arasında kalan bölgede, yoğun mikrosismik aktivitenin (1,0 < Mw < 3,9) varlığı dikkat çekmektedir (Şekil 2). Bu depremlerin derinlikleri 4 ile 24 km arasında değişmekte olup, 8-10 km derinliklerde yoğunlaştığı görülmektedir. Mikrosismik aktiviteye ait dış merkezler, KD-GB uzanımı boyunca çizgisel ve yaklaşık 10 km uzunluğunda bir dağılım sunmaktadır. Bu aktivite'nin zaman ve mekân içerisindeki dağılımları incelendiğinde, bu alandaki mikrosismik aktivitelerin 30.03.2004 tarihinde başladığı ve günümüzde de devam ettiği görülmektedir.

Yunak Fay Zonu (YFZ), Akşehir Gölü'nün kuzeyinde yer alan Üçkuyu ve kuzeydoğusundaki Yunak yerleşim alanları arasında yer alan birçok fay kolları ile temsil edilmektedir (Emre vd., 2011). Zonun kuzeybatı bloğunda yer alan Üçkuyu Horstu, Çukurcak ve YFZ'na ait fay kollarının kontrolünde yükselmektedir. Morfolojik olarak belirgin fay sarplıkları ve kayma düzlemleri sunan bu fay segmentleri Orta Triyas – Üst Kretase yaşlı baskın olarak denizel karbonatlı kayalar yer yer de ofiyolitik ve kırıntılı sedimanlardan oluşan temel kayaları ve bu kayalar üzerinde

uyumsuz olarak yer alan Miyosen-Pliyosen yaşlı volkanik ve sedimanter kayalardan oluşan karasal çökelleri keserek deforme etmektedir. Temel kayaların üzerinde uyumsuzlukla yer alan, görsel çökellerden oluşan Miyosen yaşlı birim Gebeciler Formasyonu olarak bilinmekte ve Afyon Volkanitleri olarak adlandırılan Miyosen yaşlı birim ile giriktir (Çevikbaş vd., 1988; Aydar vd., 2003; Kibici vd., 2012; Özkaymak vd., 2017; Özkaymak ve Sözbilir, 2020). Volkanik istif Aydar vd. (2003) tarafından Seydiler İgnimbiriti ve Karakaya bazaltı olarak iki üye olarak tanımlanmıştır. Neojen istifin en üstü ise Pliyosen yaşlı kıltaşı, kumtaşı ve konglomeralardan oluşan kırıntılı bir istif ile temsil edilmektedir. Kuvaterner yaşlı istifi ise, modern graben dolgusu birimleri temsil eder. Çalışma alanında gözlemlenen modern graben dolgusu genel olarak düzlük alanlar ile fay önlerinde gözlenirler. Özkaymak vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada iki ana fasiyes şeklinde tanımlanan istif, 1) iri taneli kenar fasiyesi (alüvyal yelpaze, kolüvyal sedimanlar/ yamaç döküntüleri), ve 2) ince taneli graben ortası fasiyesi olarak tanımlanmıştır (alüvyal yelpazelerin uç kesimleri, akarsu ve göl çökelleri). Genel uzanımları KD-GB gidişli olan fay segmentleri birbirine paralel/yarı paralel dizilimli çok sayıda fay kolundan oluşmaktadır ve güneydoğuya eğilimidir. Fay önleri genel olarak alüvyal yelpaze, kolüvyal ve flüvyal dağ önu birikintileri ile graben içerisindeki alüvyal düzlük alan, flüvyal ve görsel çökellerden oluşmaktadır.

## **BULGULAR**

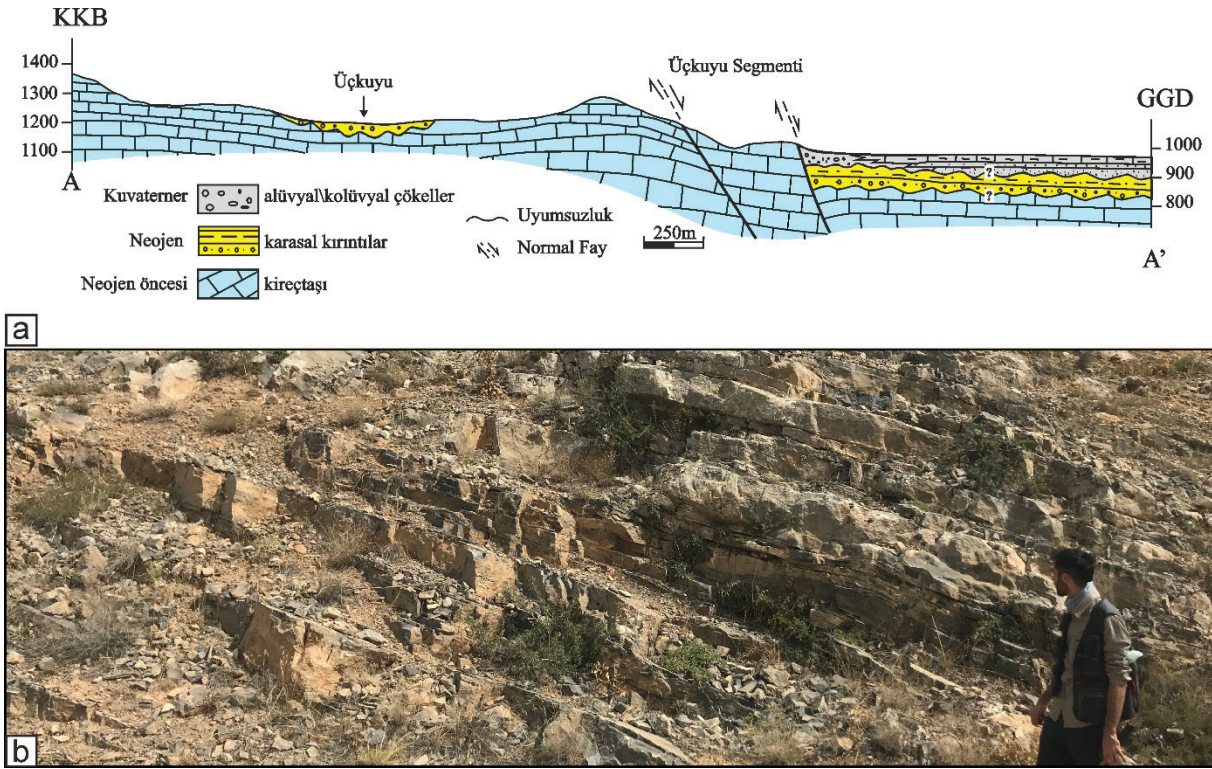
Bölgede gerçekleştirilen saha çalışmaları sırasında YFZ'na ait Üçkuyu, Cebrail, İncirli ve Ayrıtepe Segmentleri olmak üzere uzunlukları 9 ile 27 km arasında değişen başlıca 4 fay segmenti ilk kez bu çalışmada haritalanmıştır ve adlandırılmıştır (Şekil 2). Yapılan çalışmalar, bölgede haritalanan fayların Miyosen öncesi temel kayaları, Miyosen-Pliyosen yaşlı volkanik ve sedimanter kayaları ve



Kuvaterner yaşlı güncel havza dolgularını keserek deforme ettiğini ortaya koymuştur (Şekil 2).

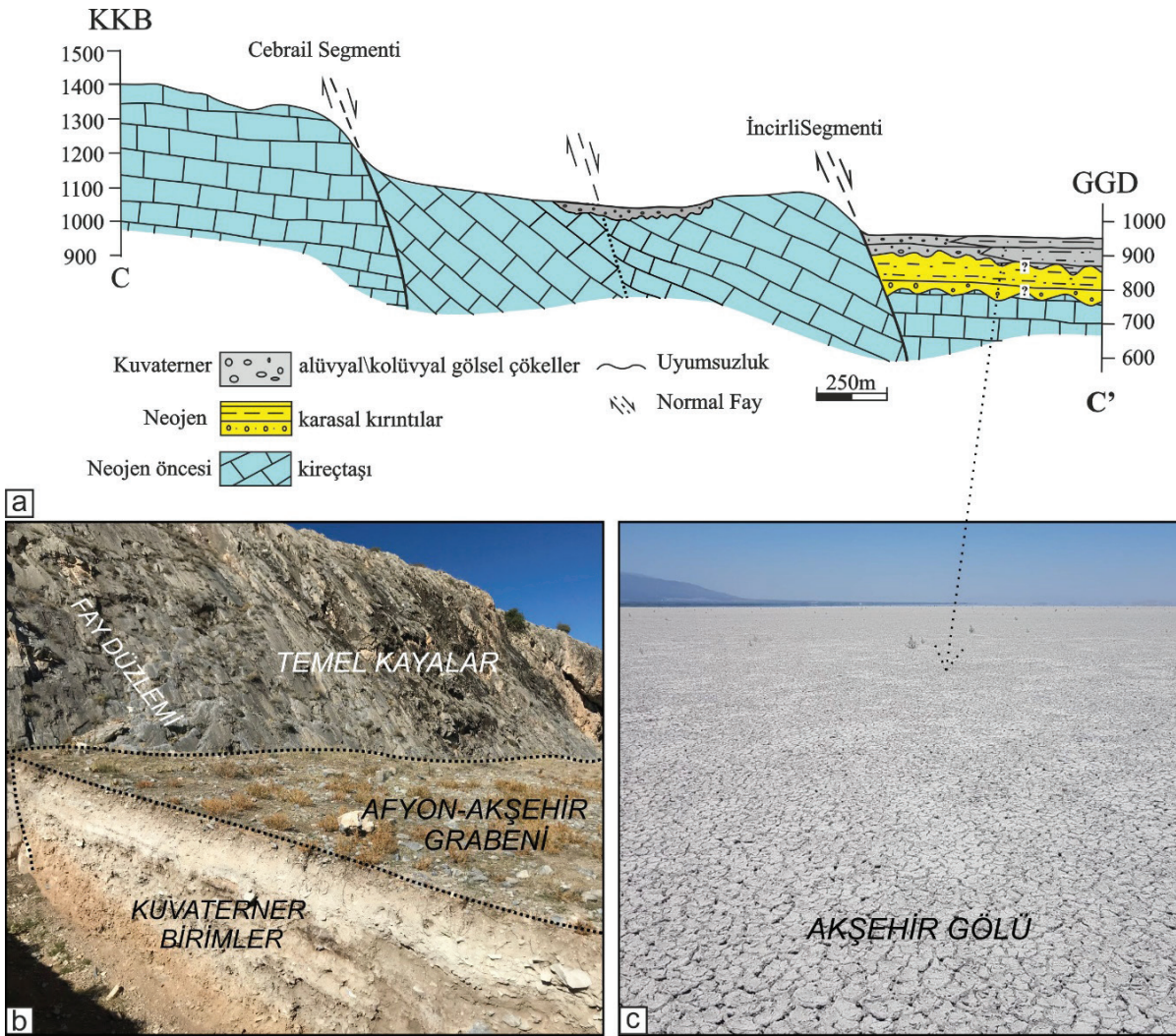
Jeolojik haritalama çalışmaları sırasında, YFZ'nu kesecek şekilde KB-GD doğrultusunda 3 hat boyunca yaklaşık 10'ar km uzunluğunda enine jeolojik kesit oluşturulmuştur. Tüm bu enine jeolojik kesitlerde, havzaya doğru olan basamaklı fay geometrisi belirgindir (Şekil 3, 4 ve 5). A-A' kesitinde temel kayaların Üçkuyu segmentine ait fay kolları tarafından kesilerek eğim yönünde düştüğü görülmektedir. Üçkuyu Horstu üzerinde yaklaşık 1200 metre kotlarında yüzlek veren Neojen yaşlı karasal kırıntılarının fayın güneydoğusundaki

graben içerisinde 1000 metre kotunun altında olduğu açıktır. B-B' kesitinde (Şekil 5) ise Cebrail segmentine ait sentetik özellikteki fay kolları tarafından kesilen temel kayalar güneydoğu kenarında tipik dağ önü sarplıkları göstermektedir. C-C' kesiti ise, kuzeybatıdan güneydoğuya doğru sırasıyla Cebrail ve İncirli segmentlerinin havzaya doğru oluşturduğu basamaklı fay geometrisini yansıtmaktadır. Segmentin güneydoğu kolu Neojen öncesi temel kayalar olarak adlandırılan kireçtaşı birimleri ile Kuvaterner yaşlı modern/güncel havza dolgusu arasındaki yapısal dokanağı oluşturur.



**Şekil 3. a)** Çalışma kapsamında oluşturulan A-A' jeolojik kesiti, **b)** Çalışma alanı içerisindeki Neojen öncesi temel kayalar (Kireçtaşları).

**Figure 3. a)** A-A' geological cross-section created within the scope of the study, **b)** Pre-Neogene basement rocks within the study area.



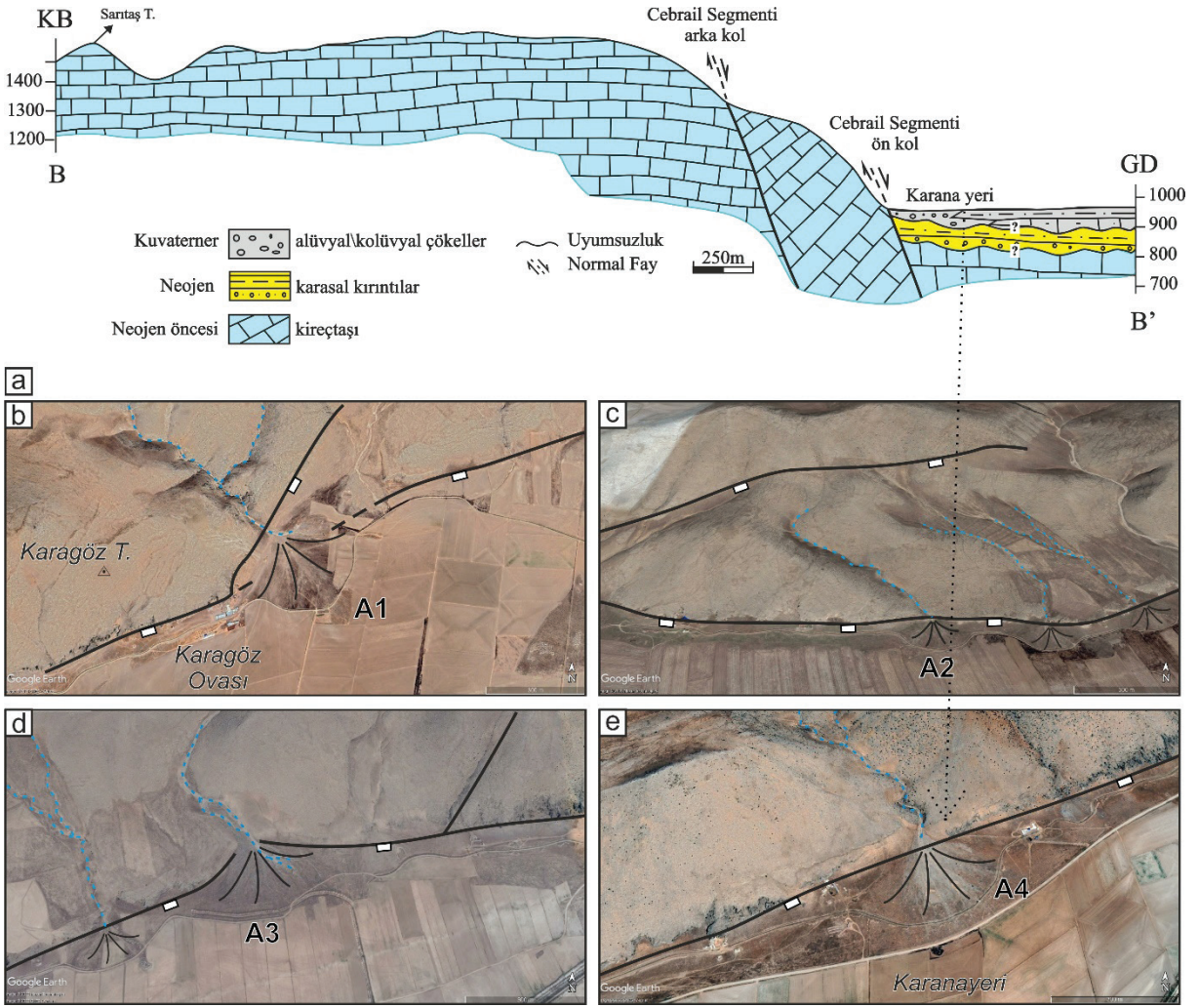
**Şekil 4. a)** Çalışma kapsamında oluşturulan C-C' jeolojik kesiti, **b)** Çalışma alanı içerisindeki temel kayalar (Kireçtaşları) ve Kuvaterner (kolüvyal ve yamaç döküntüsü) birimlerin arazideki ilişkisini gösteren fotoğraf, **c)** Çalışma alanında Akşehir Gölü'ndeki Kuvaterner güncel/modern çökel birimleri

**Figure 4. a)** C-C' geological cross-section created within the scope of the study, **b)** Photograph showing the relationship between the basement rocks (limestone) and Quaternary units (colluvial and slope debris) in the field within the study area, **c)** Photograph of Lake Akşehir as an example of Quaternary units present in the study area.

Akşehir Gölü'nün kuzeyinde yer alan graben kenarlarında yapılan çalışmalarda, çizgisel gidişli ve dağ önlerinde tipik ve belirgin fay sarplıkları gözlemlenmiştir. Bu fay sarplıklarının önleri genel olarak kolüvyal döküntüler ile temsil edilirken, faya dik doğrultuda havzaya doğru akan mevsimlik derelerin beslediği alüvyal yelpaze oluşumları ile

Akşehir Gölü'nün güncel çökelleri yer yer girik olarak gözlenir. Fayların yükselen bloğunda "v" şekilli vadiler içeren drenaj ağı oluşumları dikkat çekmektedir. Çalışmalar kapsamında yapılan sayısal yükseklik modelleri, uydu görüntüleri ve hava fotoğraflarında da bu morfolojik göstergeler takip edilebilmektedir.





**Şekil 5. a)** Çalışma kapsamında oluşturulan B-B' jeolojik kesiti, **b ve d)** Üçkuyu Segmenti içerisinde gözlemlenen alüvyal yelpazelerin (Kuvaterner birimler) uydu görüntüleri, **c ve e)** Cebrail Segmenti içerisinde gözlemlenen alüvyal yelpazelerin uydu görüntüleri (A1, 2, 3, 4 lokasyonları için Şekil 7'ye bakınız).

**Figure 5. a)** B-B' geological section created within the scope of the study, **b & d)** Satellite images of alluvial fans (Quaternary units) observed on the Üçkuyu Segment, **c & e)** Satellite images of alluvial fans observed on the Cebrail Segment (see Figure 7 for locations A1, 2, 3, 4).

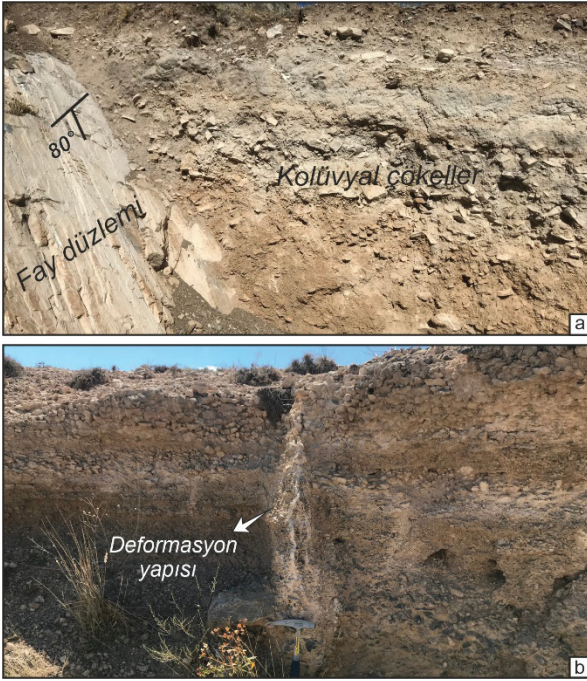
Yapılan çalışmalarda modern havza dolgusunu oluşturan alüvyal yelpaze çökellerinin fay kolları tarafından deformasyona uğradığı arazide gözlemlenmiştir. Yeşilyurt güneyinde Kasım Dağı'ndan grabene doğru akan ve baskın olarak Mesozoyik karbonatlardan beslenen derenin biriktirdiği dağ önünde gözlemlenen alüvyal yelpaze çökelleri içerisinde K25°D genel doğrultusuna ve düşeye yakın eğime

sahip olan genç bir deformasyon gözlenmiştir. Bu deformasyon baskın olarak kireçtaşı blok ve çakıllarından oluşan, çamur ve kum dolgulu alüvyal çökellerini kesen, olasılıkla Holosen dönemi içerisinde meydana gelen bir deprem sırasında gelişen yarık ve çatlaklardan oluşan bir deformasyon zonu özelliği taşımaktadır (Şekil 6b). Güncel toprağın altına kadar takip edilebilen ve içi beyazımsı krem renkli karbonat dolgulu bu



deformasyon, fayın Kuvaterner aktivitesine işaret etmesi bakımından önemli bir bulgudur.

Fayın aktif olduğuna işaret eden bir diğer bulgu ise Cebrail Segmenti üzerinde yapılan bir kazı alanında gözlenmiştir. Kayma düzlemi ve genç kolüvyal çökeller arasındaki yapısal ilişki ve genç birimlerin deformasyon özellikleri fayın Geç Kuvaterner aktivitesine ait izler taşımaktadır (Şekil 6a).



**Şekil 6. a)** L-14'e ait arazi fotoğrafı, **b)** Kuvaterner yaşlı alüvyal yelpaze çökelleri. Genç çökeller içerisinde gözlenen düşeye yakın açılı deformasyon yapısı (yarık ve çatlak zonu).

**Figure 6. a)** Field photograph of L-14, **b)** Quaternary alluvial fan deposits. Vertically inclined deformation structure observed within the younger deposits.

### Segment Geometrisi ve Kinematik Analiz

Çalışma alanı içerisinde haritalanan fay segmentleri genellikle çizgisel gidişli bir geometri sunmakla beraber, yer yer irili ufaklı çok sayıda fay kolları ile saçaklı bir yapı sunmaktadır. Faylar

tarafından kesilen temel kayalar üzerinde yer yer 30 metreye ulaşan KD-GB ve yaklaşık D-B uzanımlı çok belirgin fay sarplıkları gelişmiştir. Bölgede faylanmaya ait kayma çizikleri, fay breşleri, fay sarplıkları, fay kertikleri, karstik oluşumlar ve ani topografik eğim kırılmaları gibi göstergeler gözlemlenmiştir. Faylarda meydana gelen bu yapıların gelişimine neden olan gerilimin türü ve tektonik rejimin belirlenmesi için korunmuş kayma düzlemleri üzerinde kinematik analiz çalışmaları yapılmıştır.

### Üçkuyu Segmenti

Yaklaşık 9 km uzunluğunda ve 3 km genişliğinde olan Üçkuyu Fayı Yunak Fay Zonu'nun en güneybatı segmentidir. Çok sayıda birbirine paralel/yarı paralel ve birbirleri ile bağlantılı fay kolları ile temsil edilmektedir. En güneydeki bulunan kol, batıda Karagöz Ovası civarından başlayarak yaklaşık K70°D doğrultusu boyunca Karanayeri Mevki'ne kadar uzanmakta ve GD'ya eğimli belirgin fay düzlemleri ile tipiktir. Karanayeri mevkiinde sola sıçrama yaparak Cebrail Segmenti'ne geçiş gösterir (Şekil 7).

Fay düzlemleri boyunca gerçekleştirilen gözlemler bu segmentin eğim atımlı normal karakterinde olduğuna işaret etmektedir (Şekil 8). Faya yaklaşık dik yönde güneye doğru akan derelerin, fay önünde alüvyal yelpaze oluşumlarına neden olduğu gözlenmektedir. AAG'ni kuzeyden sınırlayan fay kollarından birisi olan yaklaşık K70°D uzanımlı bu fay kolları boyunca K50°D ve K60°D arası doğrultulara sahip birkaç kol dağ içine doğru gidiş sunmaktadır. Düzlemlerden alınan ölçümlere göre 51° ile 66° arasında değişen eğim derecelerine ve 73° ile 88° arasında kayma açalarına sahiptir. Dağ önünde birbirine yarı paralel şekilde bir gidiş sunan bu kolların basamaklı bir geometri oluşturduğu gözlemlenmiştir. Üçkuyu Segmenti'nin güney kolu ise Mesozoyik yaşlı temel kayalar ile Kuvaterner yaşlı modern havza dolgusu arasındaki sınırı oluşturmaktadır.

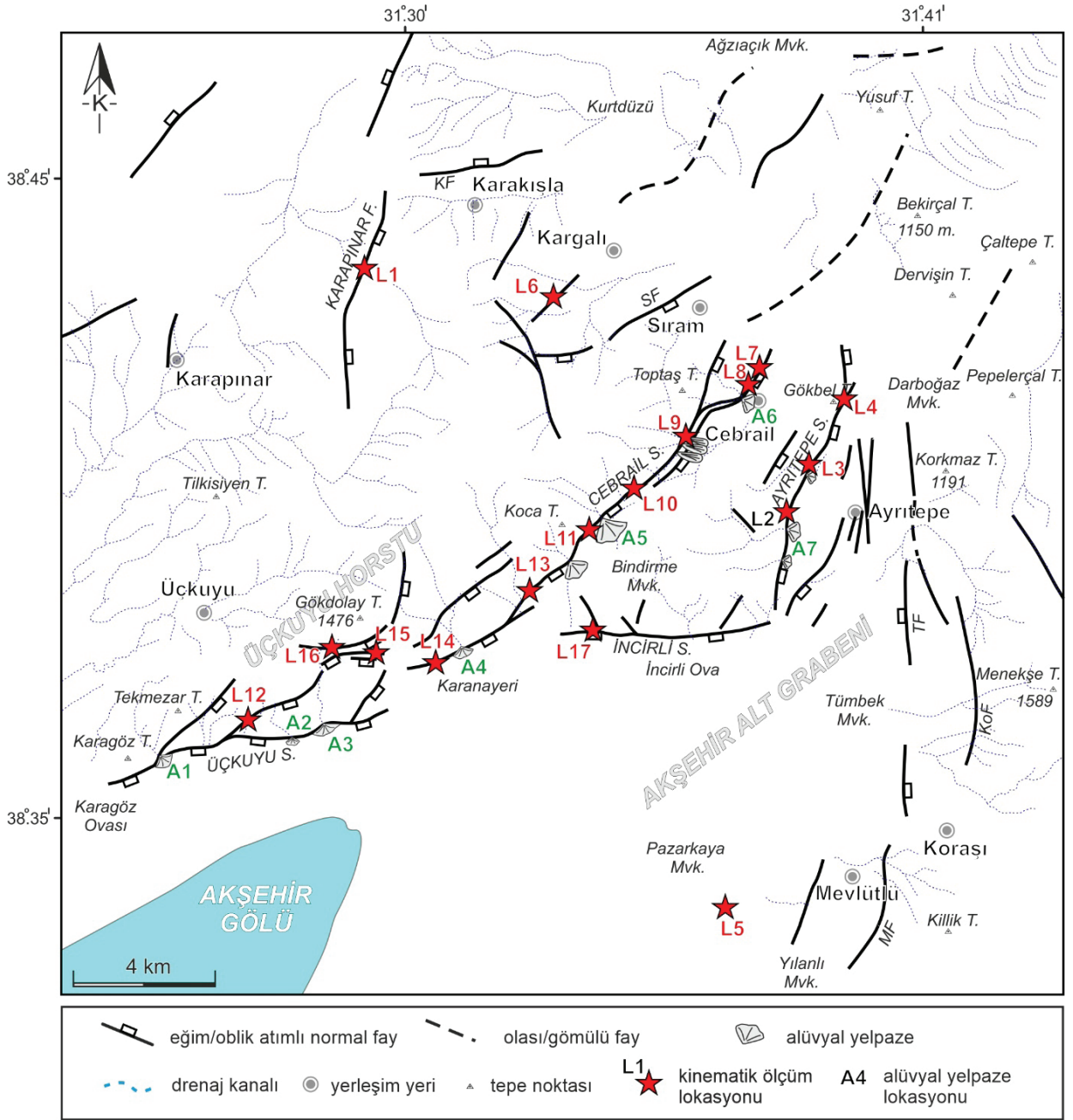
**Çizelge 1.** Çalışma alanı içerisinde alınan ölçümler ve kinematik hesaplamaları içermektedir. Kısaltmalar;  $\Phi$ : gerilme elipsoidi (eksenel oran), Max ANG; maksimum uyumsuzluk açısı.

**Table 1.** Measurements and kinematic calculations for the study area. Abbreviations  $\Phi$ : stress ellipsoid (axial ratio), Max ANG; maximum angle of misfit.

Segment/Fay	Lokasyon	Doğrultu	Fay Türü	Veri Sayısı	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\Phi$	Max ANG
Karapınar F.	L1	KD-GB	eğim atımlı normal	12	243/74	358/07	089/14	0,423	4
	L2	KD-GB	eğim atımlı normal	7	241/60	331/00	061/30	0,567	9
Ayritepe S.	L3	KD-GB	oblik atımlı normal	7	231/54	081/32	342/14	0,515	9
	L4	KD-GB	eğim atımlı normal	11	293/72	176/08	084/16	0,141	4
Karakışla F.	L6	KD-GB	eğim atımlı normal	7	176/72	077/03	346/18	0,162	2
	L7	KB-GD	eğim atımlı normal	7	271/65	076/24	169/06	0,126	8
Cebrail S.	L8	KD-GB	eğim atımlı normal	7	338/73	235/04	143/17	0,209	5
	L9	KD-GB	oblik atımlı normal	13	253/68	094/21	001/07	0,267	25
	L10	KD-GB	doğrultu atımlı	7	268/09	138/77	359/10	0,506	4
	L10	KD-GB	oblik atımlı normal	7	276/57	084/33	177/05	0,449	3
	L10	KD-GB	oblik atımlı normal	14	025/59	183/29	279/10	0,546	20
	L10	KD-GB	eğim atımlı normal	42	011/68	255/10	162/19	0,327	23
	L11	KD-GB	eğim atımlı normal	11	355/70	255/10	249/06	0,076	11
	L13	KD-GB	eğim atımlı normal	26	352/70	256/02	165/20	0,460	16
	L14	KD-GB	eğim atımlı normal	11	293/80	072/08	162/07	0,348	4
	L12	KD-GB	eğim atımlı normal	10	281/83	052/05	143/05	0,293	6
Üçkuyu S.	L15	KB-GD	eğim atımlı normal	7	031/66	170/18	265/14	0,057	7
	L16	KD-GB	eğim atımlı normal	7	294/77	045/05	136/12	0,198	4
İncirli S.	L17	KB-GD	doğrultu atımlı	7	067/24	272/64	162/10	0,335	2

Segment üzerinde 3 farklı lokasyonda belirgin fay düzlemleri üzerindeki fay çiziklerinden ölçümler alınarak arazi çalışmaları tamamlanıp kinematik analiz çalışmaları yapılmıştır. Arazi çalışmaları kapsamında eğim atımlı normal fay karakteri gösteren Üçkuyu Segmenti yapılan kinematik analiz çalışmaları sonucunda Lokasyon 12’de elde edilen kinematik verilerden hesaplanan sonuçlar  $\sigma_1$  (281°/83°),  $\sigma_2$  (52°/5°) ve  $\sigma_3$  (143°/5°) değerlerine sahiptir (Şekil 9). Lokasyon 15’te gözlemlenen düzlemlerden alınan ölçümlerden hesaplanan veriler ise  $\sigma_1$  (31°/66°)-değerinin yaklaşık düşeye dalımlı,  $\sigma_2$  (170°/18°) ve  $\sigma_3$  (265°/14°) değerlerini yataya yakın dalımlı olduğuna işaret etmektedir. Bununla birlikte bir diğer lokasyon Olan 16. lokasyondan elde edilen kinematik verilerden hesaplanan sonuçlarda  $\sigma_1$ (294°/77°) değerinin düşeye dalımlı,  $\sigma_2$  (45°/5°)

ve  $\sigma_3$  (136°/12°) değerlerini yataya yakın dalımlı olduğuna işaret etmektedir. Bu sonuçlar bölgede tanımlanan KB-GD uzanımlı fay segmentinin, 12. Lokasyonda  $\sigma_1$ ’in dalımı ve aksel oranının (gerilme elipsoidi) ( $\Phi$ ) 0,293 olması, yaklaşık KB-GD yönlü çekme gerilmesi rejimi etkisi ile geliştiğine, 15. Lokasyonda  $\sigma_1$ ’in yönelim, dalım ve aksel oranının ( $\Phi = 0,057$ ) 0 ile 0,25 arasında hesaplaması yaklaşık KG yönlü dairesel çekme gerilmesi tektonik rejim etkisi ile geliştiğine ve 16. Lokasyonda  $\sigma_1$ ’in yönelim, dalım ve aksel oranının ( $\Phi$ ) ,198 olması, yaklaşık KB-GD yönlü dairesel çekme gerilmesi etkisi ile geliştiğine işaret etmektedir. Elde edilen bulgulara göre Üçkuyu Segmentinin tüm lokasyonlarında gözlemlenen veriler en genç aktivite yani R4 fazına ait olduğu saptanmıştır.



Şekil 7. Yunak Fay Zonu'nun içerisinde yer aldığı çalışma alanının diri fay geometrisini ve lokasyonları gösteren harita.

Figure 7. Active fault geometry and locations within the study area, including the Yunak Fault Zone.





**Şekil 8.** Üçkuyu Segmenti'ne ait arazi fotoğrafları (**a**, 16. Lokasyondan, **b** ve **c** 12. Lokasyondan elde edilen fotoğraflar).

**Figure 8.** Field photographs of the Üçkuyu Segment (**a**, obtained from Location 16, **b** and **c** obtained from Location 12).

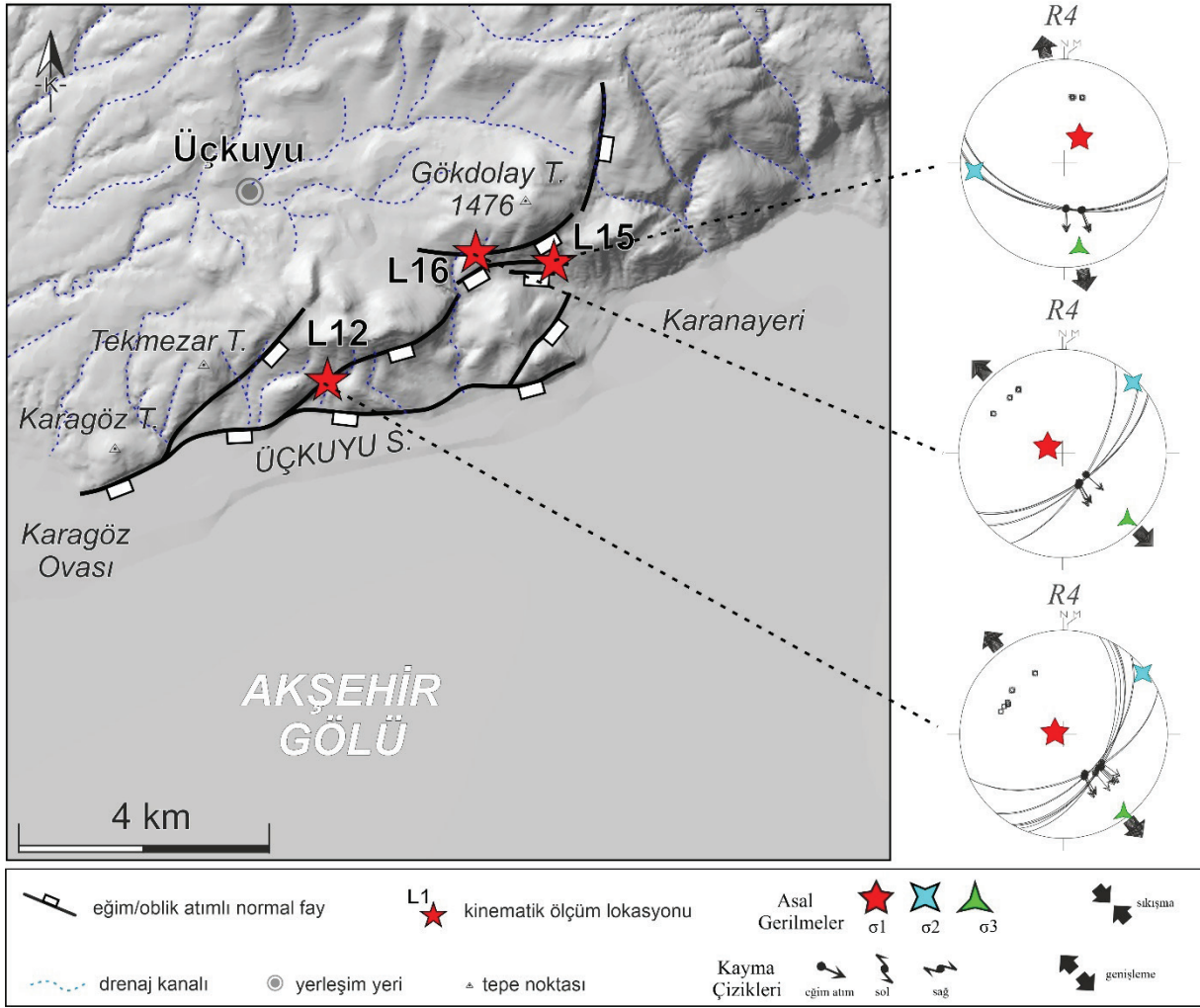
### Cebrail Segmenti

Yunak Fay Zonu'nun ana segmentlerinden birisi olan Cebrail Segmenti lokasyon olarak, kuzeydoğuda Kocatarla Mevki ile güneybatıda Karana yeri mevki arasında yer almaktadır (Şekil 7 ve 11). Ortalama  $K40^{\circ}D$  doğrultulu,  $GD$ 'ya eğimli, yaklaşık 15 km uzunluğunda ve 3 km genişliğindedir. Karana yeri kuzeydoğusunda temel kayaları parçalayarak doğrultusunu değiştirmeden takip edilebilen segment, Cebrail Köyü güneyinde çatallanarak iki kola ayrılır. Cebrail Segmenti morfolojik açıdan belirgin sarplıklar ile tipiktir ve iyi korunmuş fay düzlemlerine sahiptir (Şekil 10). C-C' jeolojik kesitinde fayın her iki bloğundaki temel kayaların aşınma yüzeylerinden elde edilen bulgulara göre, Cebrail Fayı boyunca güneydoğuda kalan tavan bloğun hemen hemen 300 metre düştüğü gözlenmektedir (Şekil 4). Cebrail köyünün güneyinde gözlemlenen fay morfolojik olarak oldukça belirgin sarplıklar meydana getirmiştir. Koca Tepe güneydoğu yamaçlarından  $GB$ 'ya doğru çizgisel ve tek gidişli uzanan segment boyunca yer yer iyi gelişmiş alüvyal yelpaze çökelleri

arazi çalışmalarında gözlemlenmiştir. Karanyeri kuzeyinde birden fazla kol ile temsil edilen bu segment,  $GD$ 'ya doğru ilerledikçe basamaklı bir geometri oluşturduğu gözlemlenmiştir. Cebrail Segmenti çalışma alanı içerisinde en yüksek fay sarplıklarına sahip olan fay segmentidir.

Cebrail Segmenti üzerinde 7 farklı lokasyonda toplam 145 ölçüm alınarak kinematik analiz çalışmaları yapılmıştır. Arazi çalışmaları sırasında segment üzerinde alınan ölçümlerde, doğrultu atımlı faylanma mekanizmasından sırası ile oblik ve eğim atımlı normal faylanmaya geçiş gösteren 4 farklı tektonik faz saptanmıştır (Şekil 11). Tüm fazların bir arada gözlemlendiği lokasyon  $10^{\circ}$ 'da, segment üzerindeki en genç aktivitenin  $60^{\circ}$  ile  $89^{\circ}$  arasında değişen kayma açılarında sahip eğim atımlı normal fay (R4) olduğu ve segment üzerindeki en eski aktivitenin ise  $1^{\circ}$  ile  $5^{\circ}$  arasında değişen kayma açılarında sahip doğrultu atımlı fay (R1) karakteri gösterdiği ve devam eden çalışmalarda da güneye doğru  $45^{\circ}$  ile  $46^{\circ}$  kayma açılarında sahip fay çiziklerini meydana getiren fayın (R2) doğrultu atımlı faydan daha genç, kuzeye doğru  $18^{\circ}$  ile  $50^{\circ}$  kayma açılarında sahip fay çiziklerini meydana getiren fayın (R3) ise ondan da genç olduğu yapılan arazi çalışmalarında ortaya konulmuştur. KD-GB uzanımlı Cebrail segmenti üzerinde 7. Lokasyonda gözlemlenen fay düzlemlerinden elde edilen kinematik verilerin sonuçlarında  $\sigma_1$ 'in  $271^{\circ}$  yönelime ve  $65^{\circ}$  düşeye yakın dalıma,  $\sigma_2$  ( $076^{\circ}/24^{\circ}$ ) ve  $\sigma_3$ 'ün ( $169^{\circ}/06^{\circ}$ ) ise yataya yakın dalımlı olduğuna işaret etmektedir. Segment üzerindeki 8. Lokasyonda ise hesaplanan  $\sigma_{1-2-3}$  değerleri sırasıyla  $338^{\circ}$ ,  $235^{\circ}$  ve  $143^{\circ}$  yönelime ve  $73^{\circ}$ ,  $04^{\circ}$  ve  $17^{\circ}$  dalıma sahip oldukları hesaplanmıştır. Segment üzerinde 9. Lokasyonda gözlemlenen fay düzlemlerinden elde edilen kinematik sonuçlar ise  $\sigma_1$ 'in  $253^{\circ}$  yönelime ve  $68^{\circ}$  düşeye yakın dalıma,  $\sigma_2$  ( $094^{\circ}/21^{\circ}$ ) ve  $\sigma_3$ 'ün ( $001^{\circ}/07^{\circ}$ ) ise yataya yakın dalıma sahip olduğuna işaret etmektedir. Cebrail segmenti üzerinde 4 farklı fazında aynı lokasyonda gözlemlendiği 10.

## Üçkuyu Segmenti

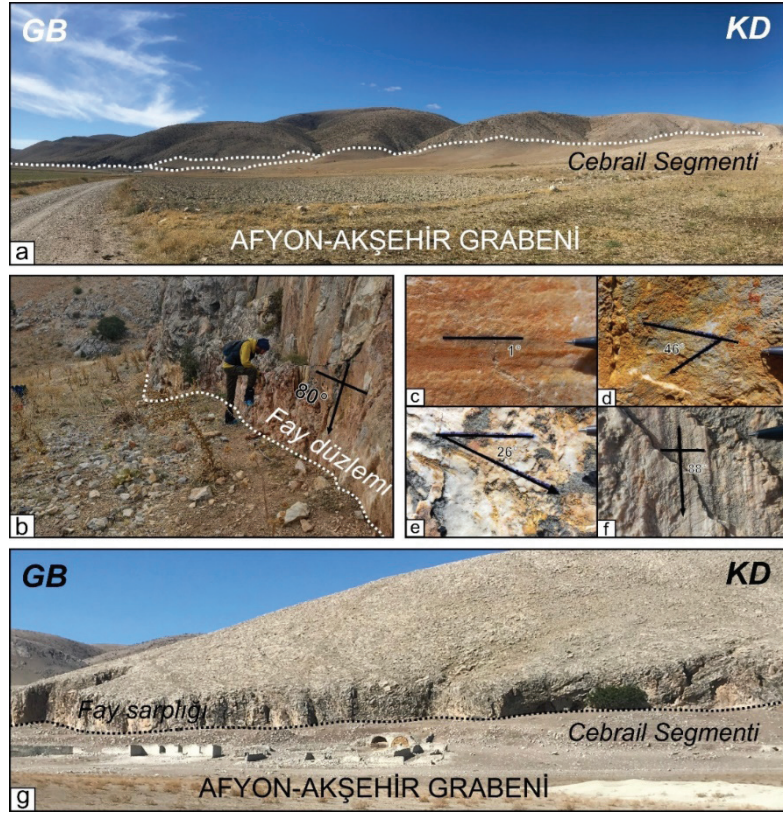


**Şekil 9.** Üçkuyu Segmenti'nde gözlemlenen fayların kinematik analiz sonuçları ve arazideki konumunu gösteren sayısal yükseklik modeli.

**Figure 9.** Kinematic analysis results of faults observed in the Üçkuyu Segment and digital elevation model showing their location in the field.

Lokasyonda ise R1 fazından hesaplanan kinematik analiz sonuçları  $\sigma_2$ 'nin  $138^\circ$  yönelime ve  $77^\circ$  düşeye yakın dalıma,  $\sigma_1$  ( $268^\circ/09^\circ$ ) ve  $\sigma_3$ 'ün ( $359^\circ/10^\circ$ ) ise yataya yakın dalıma sahip olduğuna işaret etmektedir. R2 fazından elde edilen  $\sigma_1$  değerinin düşeye yakın dalımlı ve yataya yakın dalımlı  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  değerleri sırasıyla  $276^\circ$ ,  $84^\circ$ ,  $177^\circ$  yönelime ve  $57^\circ$ ,  $33^\circ$ ,  $5^\circ$  dalıma sahip olduğu hesaplanmıştır. R3 fazından elde edilen

verilere baktığımızda ise  $\sigma_1$  değerinin  $25^\circ$  yönelim ve  $59^\circ$  düşeye yakın dalıma,  $\sigma_2$  ( $183^\circ/29^\circ$ ) ve  $\sigma_3$ 'ün ( $279^\circ/10^\circ$ ) ise yataya yakın dalıma sahip olduğuna işaret etmektedir. Tektonik fazlardan aralarında en genç olan R4 fazından elde edilen kinematik veriler ise  $\sigma_1$ 'in ( $321^\circ/72^\circ$ ) düşeye yakın dalıma,  $\sigma_2$  ( $223^\circ/03^\circ$ ) ve  $\sigma_3$ 'ün ( $132^\circ/18^\circ$ ) yataya yakın dalıma sahip olduğu hesaplanmıştır.



**Şekil 10.** Cebrail Segmenti'ne ait arazi fotoğrafları. Şekillerden c, d, e ve f sırasıyla r1, r2, r3 ve r4 tektonik fazlarına işaret eden fay çizigli setlerini göstermektedir.

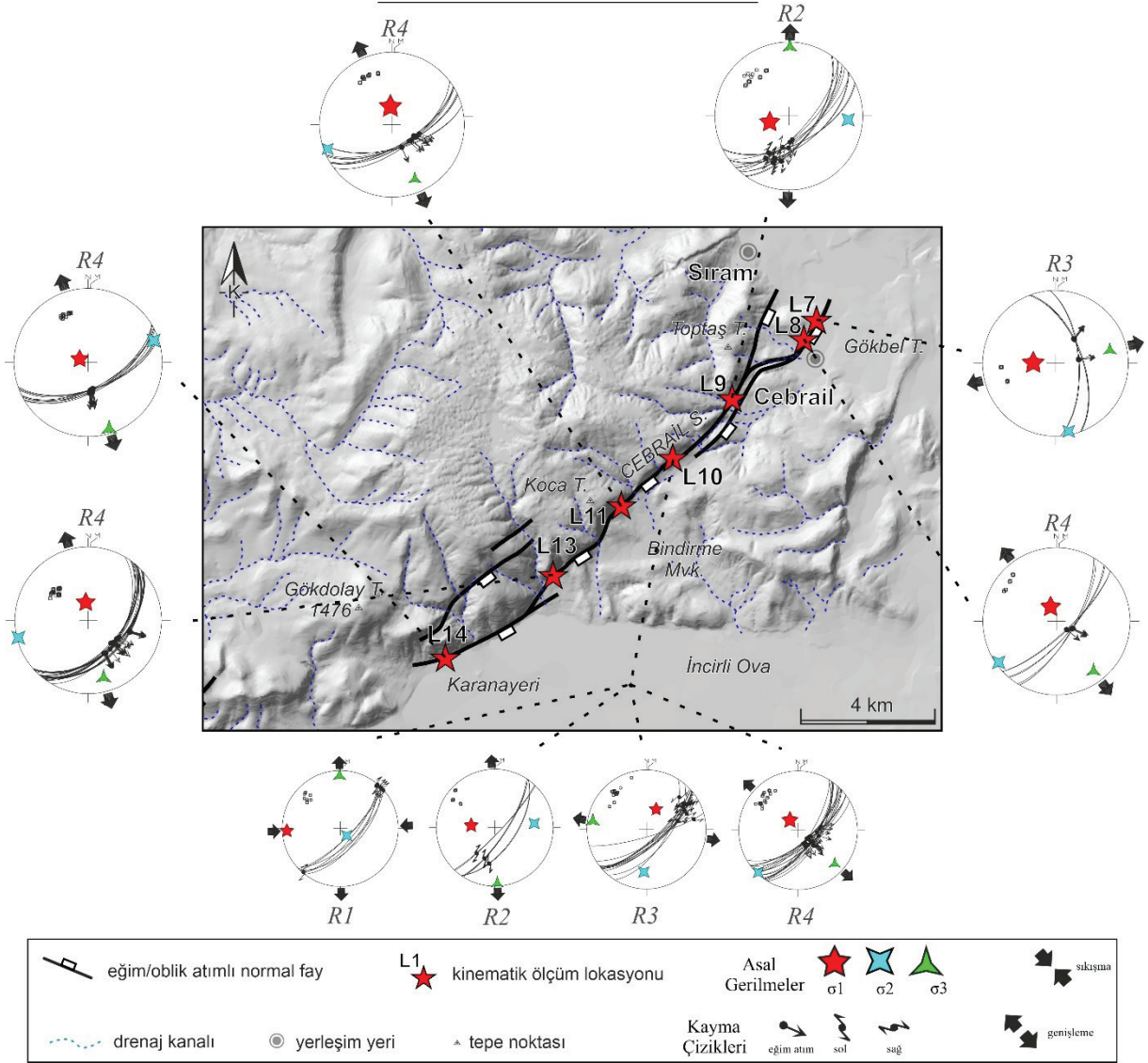
**Figure 10.** Field photographs of the Cebrail Segment. c, d, e, & f) fault trace sets indicating the r1, r2, r3, and r4 tectonic phases, respectively.

Segmentin GB bölümlerine doğru devam eden lokasyonlardan bir diğeri ise 11. Lokasyondur ve burada elde edilen kinematik veriler,  $\sigma_1$ 'in  $355^\circ$  yönelim ve  $70^\circ$  düşeye yakın dalımlı,  $\sigma_2$ ( $255^\circ/10^\circ$ ) ve  $\sigma_3$ 'ün ( $249^\circ/06^\circ$ ) ise yataya yakın dalımlı olduğuna işaret etmektedir. 13. Lokasyonda gözlemlenen düzlemlerin kinematik sonuçları ise  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  değerlerinin sırasıyla,  $352^\circ$ ,  $256^\circ$  ve  $165^\circ$  yönelime ve  $70^\circ$ ,  $2^\circ$  ve  $20^\circ$  dalıma sahip oldukları hesaplanmıştır. Segment üzerindeki son lokasyon olan 14. Lokasyonda gözlemlenen düzlemlerden alınan verilerin kinematik analiz sonuçları ise  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  değerlerinin sırasıyla  $293^\circ$ ,  $72^\circ$  ve  $162^\circ$  yönelime ve  $80^\circ$ ,  $8^\circ$  ve  $7^\circ$  dalıma sahip olduğuna işaret

eder. Tüm veriler sonucunda KD-GB uzanımlı Cebrail Segmenti üzerinde, 7. Lokasyonda  $\sigma_1$ 'in düşey ekseninde ve gerilme elipsoidi ( $\phi$ ) 0.126 hesaplaması sonucunda segmentin KD-GB yönlü dairesel çekme gerilmesi etkisi altında geliştiğine, Lokasyon 8'den hesaplanan veriler ise  $\sigma_1$ 'in düşeye dalımlı ve 0 ile 0.25 aralığında aksenal orana ( $\phi=0.209$ ) sahip olması, bölgede KD-GB olarak tanımlanan bu fay segmentinin yaklaşık KB-GD yönlü dairesel çekme gerilmesi etkisi ile geliştiğine, 9. Lokasyondan hesaplanan veriler  $\sigma_1$ 'in düşey ekseninde ve 0,25 ile 0,75 arasında aksenal orana ( $\phi=0.267$ ) sahip olması sonucunda segmentin KG yönlü saf çekme gerilmesi etkisi altında geliştiğine işaret etmektedir. 10.



## Cebrail Segmenti



Şekil 11. Cebrail Segmenti'nde gözlemlenen fayların ait kinematik analiz sonuçları ve arazideki konumu gösteren sayısal yükseklik modeli.

Figure 11. Kinematic analysis results for fault movement observed on the Cebrail Segment and digital elevation model showing its location in the field.

Lokasyondan hesaplanan verilere göre R1 fazı için  $\sigma_2$ 'nin sağ yönlü saf doğrultu atımlı ( $\phi=0.506$ ) tektonik rejim etkisi ile geliştiğine, KD-GB uzanımlı eğim/verev atımlı normal faylanmalardan R2 fazının yaklaşık KG yönlü saf çekme gerilmesi ( $\phi=0.449$ ), R3 fazının KB-GD yönlü saf çekme

gerilmesi ( $\phi=0.546$ ) ve R4 fazının ise KB-GD yönlü dairesel çekme gerilmesi ( $\phi=0.033$ ) etkisi ile geliştiğine işaret etmektedir. Cebrail Segmentinin yaklaşık orta kısımlarında yer alan 11. Lokasyonda elde edilen hesaplamalarda  $\sigma_1$ 'in düşeyde ve 0 ile 0,25 arasında eksenel orana ( $\phi=0.076$ ) sahip

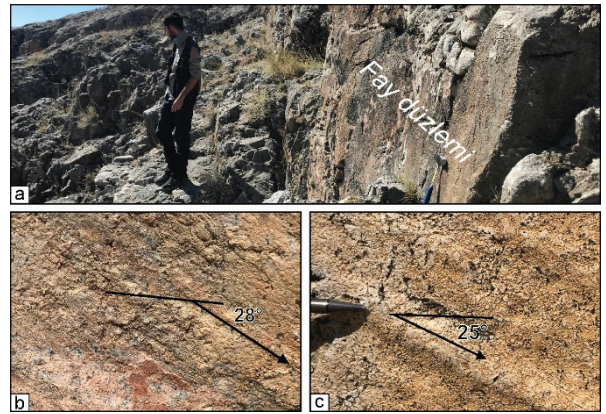
olması sonucunda bölgede KD-GB uzanımlı fayın KB-GD yönlü dairesel çekme gerilmesi etkisi altında geliştiğine işaret etmektedir. Cebrail Segmentinin güneybatı bölümünde bulunan 13. Lokasyonda ise  $\sigma_1$  değerinin düşeye yakın dalımlı ve aksenal oranın ( $\phi=0.460$ ) 0.25 ile 0.75 aralığında bir değerde olması, segmentinin yaklaşık KB-GD yönlü saf çekme gerilmesi etkisi altında geliştiğine işaret etmektedir. Segment üzerindeki son lokasyon olan 14. Lokasyondan elde edilen hesaplamalar sonucunda ise  $\sigma_1$ 'in düşeye dalıma ve aksenal oranın ( $\phi=0.348$ ) 0.25 ile 0.75 aralığında olması sonucunda bölgede KD-GB olarak tanımlanan fay segmentinin yaklaşık KB-GD yönlü saf çekme gerilmesi etkisi altında geliştiğine işaret ettiği sonuçlarına ulaşılmıştır.

### İncirli Segmenti

Güneyde, Cebrail ile Ayrıtepe segmentleri arasında uzanan İncirli Segmenti yaklaşık D-B uzanımlı olup çizgisel gidişli ve toplamda yaklaşık 7 km uzunluğa sahiptir. Bu segment çalışma alanındaki Neojen öncesi temel kayalar ile Kuvaterner yaşlı modern havza dolgusu çökelleri arasındaki sınırı oluşturmaktadır. Doğu kesimde, Muslukburnu Sırtı'nı güneyden sınırlayacak şekilde gelişen İncirli Segmenti, İncirli Ova kuzeyinde yaklaşık olarak DB doğrultusu boyunca çizgisel bir gidişe sahiptir ve dağ önünde fay sarplıkları sunar. Batı kesimde ise Karanyeri kuzeyinde, KD-GB uzanımlı Cebrail Segmenti'ne ait fay kolları ile birleşme eğilimi sunmaktadır. İncirli Segmenti AAG düzlüğünü kuzeyden sınırlar ve grabenin kuzeyinde belirgin olarak yaklaşık DB uzanımlı normal fay segmentlerinden birisidir.

İncirli Ova kuzeyindeki dağ önlerinde yapılan arazi çalışmalarında fay düzlemleri ve bu düzlemlerde kayma çizikleri gözlenmiştir (Şekil 12). Gözlenen fay düzlemlerinden alınan ölçümlere göre K60°B ile K74°B arasında doğrultulara, 80° ile 89° arasında değişen eğim derecelerine ve 25° ile 28° arasında değişen kayma açlarına

sahiptir. Yüksek eğim derecelerine ve düşük rake açlarına sahip kayma yüzeylerinden alınan ölçümler ve kinematik analiz çalışmaları  $\sigma_2$ 'nin (272°/64°) düşeye yakın dalımlı,  $\sigma_1$  (067°/24°) ve  $\sigma_3$ 'ün (162°/10°) ise yataya yakın dalımlı olduğuna işaret etmektedir (Şekil 13). Hesaplanan veriler,  $\sigma_2$ 'nin düşeyde ve aksenal oranın ( $\phi=0.335$ ) 0.25 ile 0.75 arasında hesaplaması sonucunda sol yönlü doğrultu atımlı bir tektonik rejimin etkisi altında geliştiğine işaret etmektedir.



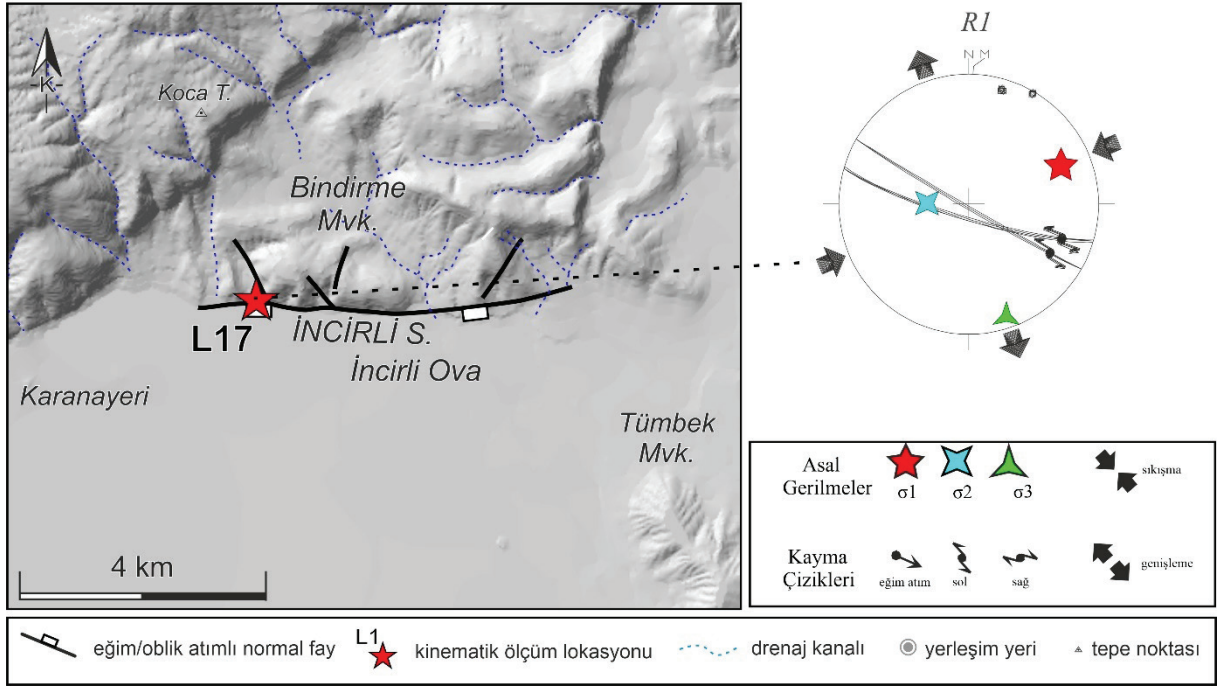
Şekil 12. İncirli Segmenti'ne ait arazi fotoğrafları.

Figure 12. Field photographs of the İncirli Segment.

### Ayrıtepe Segmenti

Yunak Fay Zonu'nun doğu bölümünde yer alan Ayrıtepe Segmenti, genel itibarıyla K20°D gidişli olup yaklaşık 8 km uzunluğundadır ve Mesozoyik yaşlı temel kayalar ile Miyosen-Pliyosen yaşlı karasal kırıntılı çökeller arasındaki sınırı oluşturur (Şekil 2). Çizgisel bir geometriye sahip olan segment boyunca iyi gelişmiş alüvyal yelpaze çökelleri gözlenmektedir. Fay boyunca iyi gelişmiş alüvyal yelpaze çökelleri Neojen yaşlı birimler üzerinde uyumsuz olarak gözlenir. Birbirine paralel gidişli fay kolları 3 km'ye yakın bir genişlik zonu oluşturmaktadır. DGD'ya eğimli fay düzlemlerine sahip segment boyunca yapılan jeomorfolojik ve jeolojik gözlemler fayın eğim atımlı normal karakterinde olduğuna işaret etmektedir (Şekil 14).

## İncirli Segmenti



**Şekil 13.** İncirli Segmenti'nde gözlemlenen fayların kinematik analiz sonuçları ve arazideki konumunu gösteren sayısal yükseklik modeli.

**Figure 13.** Kinematic analysis results for fault movement observed on the İncirli Segment and digital elevation model showing its location in the field.

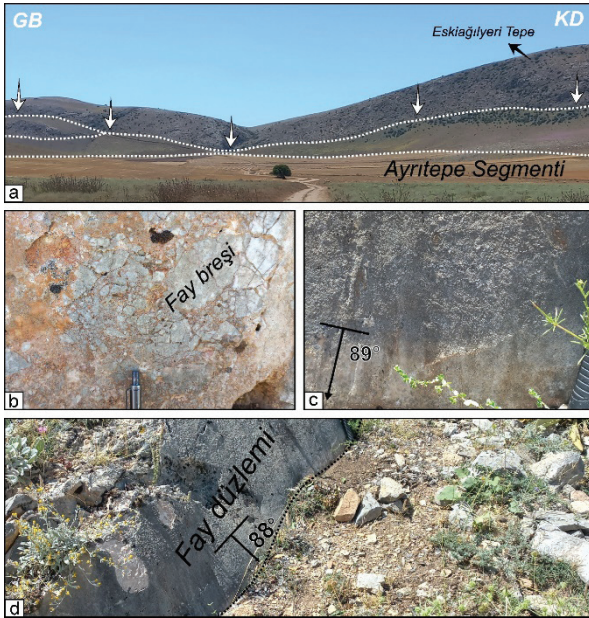
Segment kuzey tarafta, Gökbel Tepe doğu yamaçlarında belirgin fay sarplıkları ile kolayca tanınabilir. Gökbel Tepe güneyine bakıldığında K30°D genel doğrultusunda dağ önü boyunca güneydeki İncirli Segmenti'ne kadar morfolojik olarak belirgin fay düzlemleri gözlenir. Daha doğu tarafta ise bazıları Ayırtepe köyünden geçen uzunlukları 2-3 km'ye varan fay kolları haritalanmıştır.

Ayırtepe Segmenti'ne ait kayma düzlemleri üzerinde 3 farklı lokasyonda toplamda 25 ölçüm alınmıştır. Yapılan analizlerde segment üzerinde 2 farklı tektonik faza işaret eden ve birbirini üzerleyen fay çizdiği setleri saptanmıştır. Aynı lokasyonda gözlenen 2 farklı fay çizdiği seti, kesen-kesilen ilişkisine göre analiz edilmiş, sağ yönlü

doğrultu atımlı faylanma karakterine işaret eden setin, eğim atımlı normal faylanmaya işaret eden fay çizdiği seti tarafından üzerlendiği gözlenmiştir. R2 fazına ait düzlemlerden alınan ölçümlere göre K15°D ile K24°D arasında doğrultulara, 84° ile 87° arasında değişen eğim derecelerine ve 9° ile 20° arasında değişen kayma açalarına sahiptir. R3 fazına ait düzlemlerden alınan ölçümlere göre K5°D ile K40°D arasında doğrultulara, 59° ile 79° arasında değişen eğim derecelerine ve 80° ile 89° arasında değişen kayma açalarına sahiptir. Ayırtepe segmenti üzerinde Lokasyon 2'de yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen kinematik veriler,  $\sigma_1$ 'in 241° yönelim ve 60° düşeye yakın dalıma,  $\sigma_2$  (331°/00°) ve  $\sigma_3$ 'ün (061°/30°) ise yataya yakın dalımlı olduğuna işaret etmektedir (Şekil 15). Lokasyon 3'te yapılan çalışmalarda ise



R2 fazı gözlemlenmiştir ve kinematik çalışmaları yapılmıştır. R2 fazına işaret eden kinematik veriler,  $\sigma_2$ 'nin  $81^\circ$  yönelim ve  $32^\circ$  dalıma,  $\sigma_1$  ( $231^\circ/54^\circ$ ) ve  $\sigma_3$ 'ün ( $342^\circ/14^\circ$ ) ise dalımlı olduğuna işaret etmektedir. Segment üzerindeki son lokasyon olan 4. Lokasyonda yapılan kinematik çalışmalarda ise  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  sırasıyla,  $293^\circ$ ,  $176^\circ$  ve  $084^\circ$  yönelim ve  $72^\circ$ ,  $08^\circ$  ve  $16^\circ$  dalımlı olarak hesaplanmıştır. Tüm bu çalışmalar sonucunda elde edilen kinematik verilere göre bölgede gözlemlenen fay segmentinin, Lokasyon 2'de KD-GB yönlü saf çekme gerilmesi ( $\phi = 0,567$ ) etkisi altında geliştiğine, Lokasyon 3'teki veriler R2 fazının  $\sigma_1$  ve  $\sigma_2$ 'nin dalımlı ve eksenel oranının ( $\phi = 0,515$ ) 0,25 ile 0,75 arasında olması sonucunda geliştiğine işaret etmektedir. 4. Lokasyondaki kinematik verilere göre ise  $\sigma_1$ 'in düşeye dalımlı ve eksenel oranının ( $\phi=0,141$ ) 0 ile 0,25 aralığında olması, bölgede KD-GB olarak tanımlanan fay segmentinin yaklaşık D-B yönlü dairesel çekme gerilmesi etkisi altında geliştiğine işaret etmektedir.



**Şekil 14.** Ayrıtepe Segmenti'ne ait arazi fotoğrafları.  
**Figure 14.** Field photographs of the Ayrıtepe Segment.

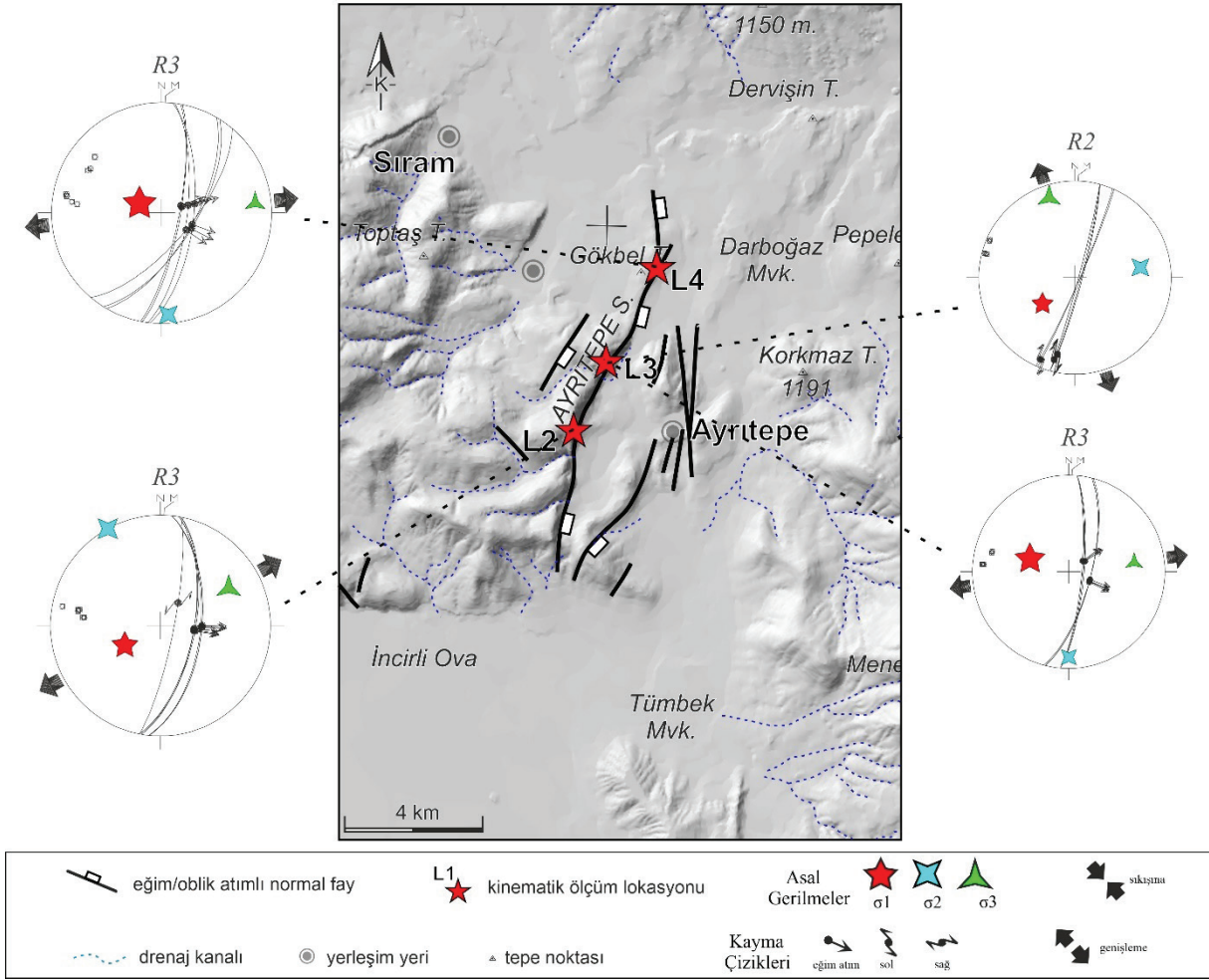
## Çalışma Alanında Haritalanan Diğer Faylar

### Karapınar Fayı

Bölgede yapılan çalışmalar sonucunda haritalanan diğer bir fay Karapınar fayıdır. Üçkuyu Horstu üzerinde haritalanan Karapınar Fayı yaklaşık  $K10^\circ D$  genel gidişlidir.  $66^\circ$  ile  $76^\circ$  arasında değişen eğim derecelerine ve  $85^\circ$  ile  $89^\circ$  arasında değişen kayma açlarına sahiptir. Kuzey tarafta Karakışla Fayı (KF) ile güney kısımda Kırçal Tepe arasında çizgisel ve tek gidişe sahip yaklaşık 8 km uzunluğa ve 300 metre genişliğe sahip olup, D-GD'ya eğimlidir (Şekil 16 ve 17). Kinematik ölçümler ve morfolojik saha gözlemleri fayın eğim atımlı normal karakterinde olduğuna işaret etmektedir. Segment geometrisine bakıldığında, Karakışla ile Çallıöz Tepe kuzeydoğusunda ortalama olarak  $K25^\circ D$  doğrultulu ve çizgisel gidişlidir. Daha güney tarafta sonlandığı bölüme doğru yaklaşık olarak KG doğrultusuna dönen segment Kırçal Tepe kuzeyinde sonlanmaktadır. Karapınar Fayı'na ait iyi korunmuş kayma yüzeyleri üzerinde yapılan çalışmalarda 8 fay yüzeyi ölçümü alınabilmiştir.

Karapınar Fayı üzerinde gerçekleştirilen saha çalışmalarında iyi korunmuş fay düzlemleri yer yer çok net olarak kendini göstermektedir. Bu fay düzlemlerinde yapılan çalışmalarında yüksek sapma açlarına sahip kayma yüzeyleri üzerindeki kinematik göstergeler eğim atımlı normal fayı işaret etmektedir (Şekil 17). Karapınar Fayı üzerindeki fay düzlemleri üzerinde yapılan kinematik analiz çalışmaları sonucunda elde edilen veriler  $\sigma_1$ 'in  $243^\circ$  yönelim ve  $74^\circ$  düşeye yakın dalımlı,  $\sigma_2$  ( $358^\circ/07^\circ$ ) ve  $\sigma_3$ 'ün ( $089^\circ/14^\circ$ ) ise yataya yakın dalımlı olduğuna işaret etmektedir. Hesaplanan veriler,  $\sigma_1$ 'in düşeyde ve eksenel oranının ( $\phi = 0,423$ ) 0,25 ile 0,75 arasında olması sonucunda bölgede KD-GB uzanımlı fayların D-B yönlü saf çekme gerilmesi etkisi altında geliştiğine işaret etmektedir.

## Ayrıtepe Segmenti



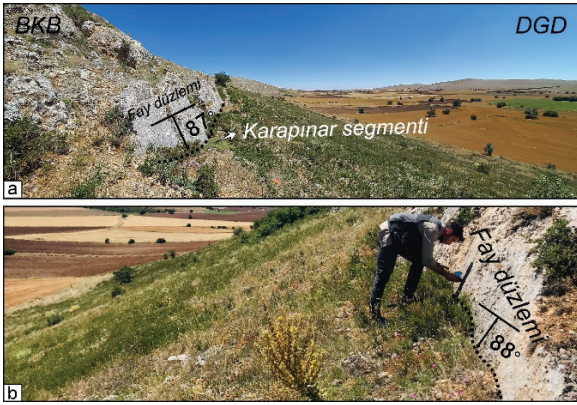
Şekil 15. Ayrıtepe Segmenti'nde gözlemlenen fayların kinematik analiz sonuçları ve arazideki konumunu gösteren sayısal yükseklik modeli.

Figure 15. Kinematic analysis results for fault movement observed on the Karapınar Segment and digital elevation model showing its location in the field.

Karakışla Fayı (KF), yaklaşık olarak 3 km uzunluğa ve 300 metre genişliğe sahip  $K80^{\circ}D$  genel gidişli, kuzeye eğimli eğim atımlı normal faydır. Morfolojik olarak Karakışla köyü kuzeyinde temel kayalar içerisinde belirgindir. Düşen kuzey blok içerisindeki katmanlar faya doğru eğimli yapıdadır. Fayın batı ve doğusundaki yanal devamlılıkları olası olmakla beraber sahada çalışmalarında takip edilememiştir. Sıram Fayı

(SF), Temel kayalar içerisinde belirgin derin yarmalar şeklinde tipiktir.  $K50^{\circ}-70^{\circ}D$  arasında değişen yaklaşık 6 km uzunluğa ve 50 metre genişliğe sahiptir. Kuzeydoğuda Kumludere bölgesinde Neojen yaşlı birimleri güneydoğudan sınırlandırarak alüvyal birimler ile yan yana getirir. Sıram köyünün yakın doğusundan dağlık alan içerisine doğru giren Sıram Fayı, sırt içerisinde morfolojik olarak belirgin ve büyük yarıklar sunar.



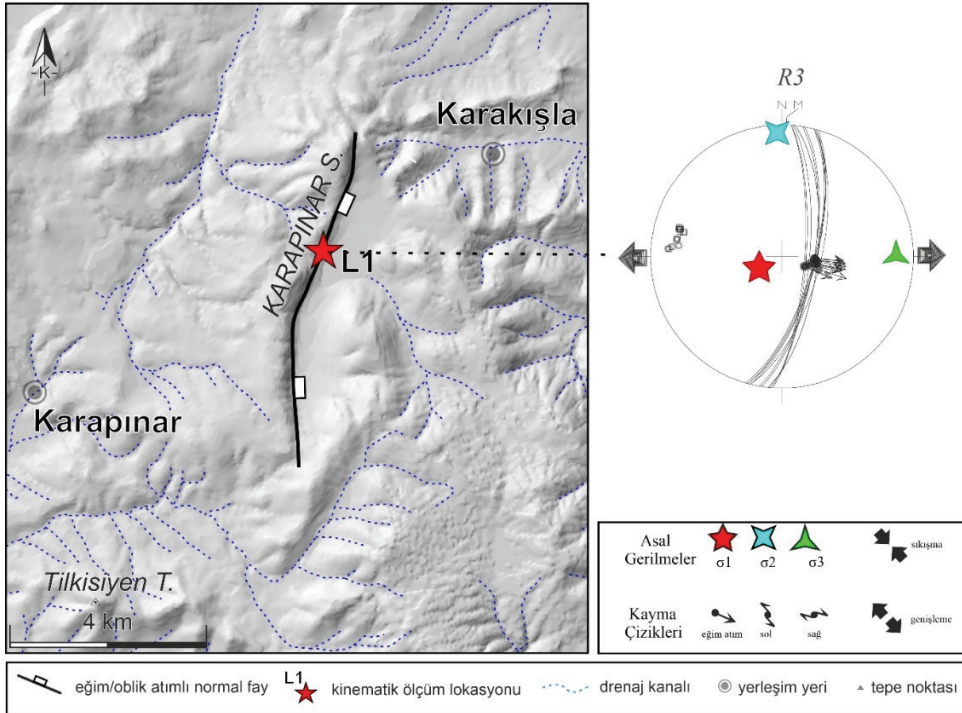


Şekil 16. Karapınar Fayına ait arazi fotoğrafları.

Figure 16. Field photographs of the Karapınar Segment.

İlk kez bu çalışmada 1/25.000 ölçeğinde haritalanan ve tanımlanan Mevlütlü Fay Zonu (MFZ), çalışma alanının güneyinde Yılanlı mevki ile kuzeyindeki darboğaz mevki arasında yaklaşık olarak KG doğrultusunda uzanan, toplam uzunluğu yaklaşık olarak 18 km olan birden fazla fay kollarından oluşmaktadır (Şekil 2). Batıya eğimli fay kolları eğim atımlı normal fay özelliği sunmakta olup, genellikle Neojen öncesi temel kayalar ile Neojen birimleri ve Neojen öncesi temel kayalar ile Kuvaterner yaşlı güncel havza dolgusu arasındaki yapısal sınırı temsil etmektedir. MFZ, AAG düzlüğünü doğudan sınırlayan önemli yapılardan birisidir. MFZ kuzeyde Neojen yaşlı birimler içerisindeki devamı gözlemlenmemiştir. Güneyde ise Tuzlukçu'ya doğru devamlılığı olasıdır.

### Karapınar Fayı



Şekil 17. Karapınar Fayı'nda gözlemlenen fayların kinematik analiz sonuçları ve arazideki konumunu gösteren sayısal yükseklik modeli.

Figure 17. Kinematic analysis results for fault movement observed on the Karapınar Segment and digital elevation model showing its location in the field.



## **TARTIŞMA ve SONUÇLAR**

Yunak Fay Zonu üzerinde saha ağırlıklı bu çalışma kapsamında Yunak Fay Zonu boyunca Üçkuyu, Cebrail, Ayrıtepe ve İncirli Segmentleri ilk kez 1/25.000 ölçekli olarak haritalanarak, adlandırılmış ve geometrik, kinematik, aktif tektonik ve sismotektonik özellikleri analiz edilmiştir. Saha çalışmaları ile elde edilen bulgular, bu fayların uzunlukları 3 km ile 18 km arasında ve genişlikleri 300 m ile 4 km arasında değişen DB, KG ve KD-GB uzanımlı normal faylar olduğunu göstermektedir. Wells ve Coppersmith (1994) ve Pavlides ve Caputo (2004) tarafından verilen segment uzunluğuna göre üretebileceği maksimum deprem büyüklüğü arasındaki ampirik ilişkilere göre, Yunak Fay Zonu ve yakın civarındaki fay segmentlerinin bireysel değerlendirmesi ile maksimum 5,6 ile 6,5 moment büyüklüklerine kadar deprem üretebilme potansiyelinde olduğunu göstermektedir (Çizelge 2). Bununla beraber son yıllarda meydana gelen bazı depremler (örn. 27 Aralık 1939 Erzincan Depremi Mw:7,9; 14 Kasım 2016 Kaikōura Depremi Mw: 7,8 ve 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri, Mw:7,7 ve 7,6) tek bir deprem ile hem geometrik hem yapısal hem de jeolojik olarak farklı fay parçalarının bir arada kırılabilmesine (çoklu segment kırılması) kanıt oluşturmaktadır. Bu kapsamda, Cebrail ve Üçkuyu segmentlerinin beraber kırılması halinde, maksimum 6,7 moment büyüklüklerine kadar deprem üretebilme potansiyelinden bahsedilebilir (Çizelge 2).

Günümüze değin yapılan çalışmalar, deprem sırasına (kosismik) iç merkezde meydana gelen kırılmanın yüzeye ulaşip ulaşmayacağına, depremin büyüklüğü, derinliği, depremi üreten fayların yüzey ve derinlerdeki geometrisi, karakteri ve kırılan kayaların reolojisi ile bağlantılı olduğuna işaret etmekle birlikte orta şiddetli ancak sık depremlerin yüzey kırığı oluşturabileceğini göstermektedir (Tocher,1958; Bonilla vd., 1984; Bonilla, 1988; Wells ve Coppersmith, 1994; Michetti vd., 2000;

McCalpin, 2009; Champenois vd., 2017; Sümer vd., 2018). Bonilla (1988) tarafından Dünya'nın farklı bölgelerinde meydana gelen büyüklükleri 6'dan küçük olan 53 yüzey faylanması ilişkili depremlerin istatistiksel analizi üzerine yapılan bir çalışma, kosismik yüzey faylanması oluşturan en küçük depremlerin minimum yaklaşık 5 büyüklüğüne sahip olduklarına ve sıklıkla (%50 oranında) eğim atımlı normal faylar üzerinde geliştiklerine işaret etmektedir. Yüzey kırığı oluşturabilecek minimum deprem büyüklüğü Tocher (1958) tarafından 5,2; McCalpin (2009) tarafından ise 5,5 olarak tanımlanmıştır. Bununla beraber, son yıllarda Güney Amerika'da yapılan bir çalışma, 2010 yılında 3 km derinlikte meydana gelen 5.0 (Mw) büyüklüğündeki bir depremin Laguna Pisayambo Fayı üzerinde yaklaşık 9 km uzunluğunda yüzey kırığı ve 45 cm sağ yanal yer değiştirmeye sebep olduğunu saha verileri ile kanıtlamıştır (Champenois vd., 2017). 2012 yılında güncellenen Türkiye Diri Fay Haritası'nda diri fay olarak tanımlanan Yunak Fay Zonu boyunca, bu çalışmada haritalanan tüm fayların yüzey kırığı oluşturabilecek deprem üretme potansiyellerinin olduğu değerlendirilmiştir.

Yapılan saha çalışmaları, grabenin kuzey tarafında, fay kolları ile kesilen dayanımı yüksek temel kayalar üzerinde, dağ önlerinde yükseklikleri yer yer 30 metreye ulaşan KD-GB ve yaklaşık D-B uzanımlı belirgin fay sarplıkları oluşmuştur. Bu sarplıklarda ise yer yer iyi korunmuş kayma yüzeyleri ve ani topografik eğim kırılmaları gözlemlenmiştir. Bu bölgedeki faylar, baskın olarak orta-üst Triyas yaşlı karbonatlı kayaçlardan oluşmuş temel kayaçlar ile alüvyal yelpaze, flüvyal, kolüvyal ve gölsel çökellerden oluşan güncel havza dolgusu arasındaki yapısal dokanağı oluşturmaktadır. Çalışma alanı içerisindeki dağlık alanı oluşturan temel kayaçlar içerisinde yer alan birbirine paralel ve yarı paralel fay kolları, grabene doğru basamaklı bir yapı oluşturmaktadır.

**Çizelge 2.** Çalışma alanı içerisindeki fay segmentlerinin özellikleri ve üretebilecekleri deprem büyüklükleri.

**Table 2.** Characteristics of fault segments within the study area and potential earthquake magnitudes.

Adı	Doğrultu	Uzunluk	Genişlik	Fayın Karakteri	Maks. Deprem Büyüklüğü
Cebrail S.	K40°D	15 km	2 km	Eğim Atımlı normal	6,4
Üçkuyu S.	K70°D	9 km	2,5 km	Eğim Atımlı normal	6,2
İncirli S.	D-B	9 km	500 m	Oblik Atımlı normal	6,2
Ayrıtepe S.	K20°D	8 km	2,5 km	Eğim Atımlı normal	6,1
Karapınar F.	K10°D	8 km	300 m	Eğim Atımlı normal	6,1
Mevlütü F.Z.	K-G	18 km	4 km	Oblik atımlı normal	6,5
Karakışla F.	K80°D	3 km	300 m	Eğim Atımlı normal	5,6
Sıram F.	K50°-70°D	9 km	500 m	Eğim Atımlı normal	6,2

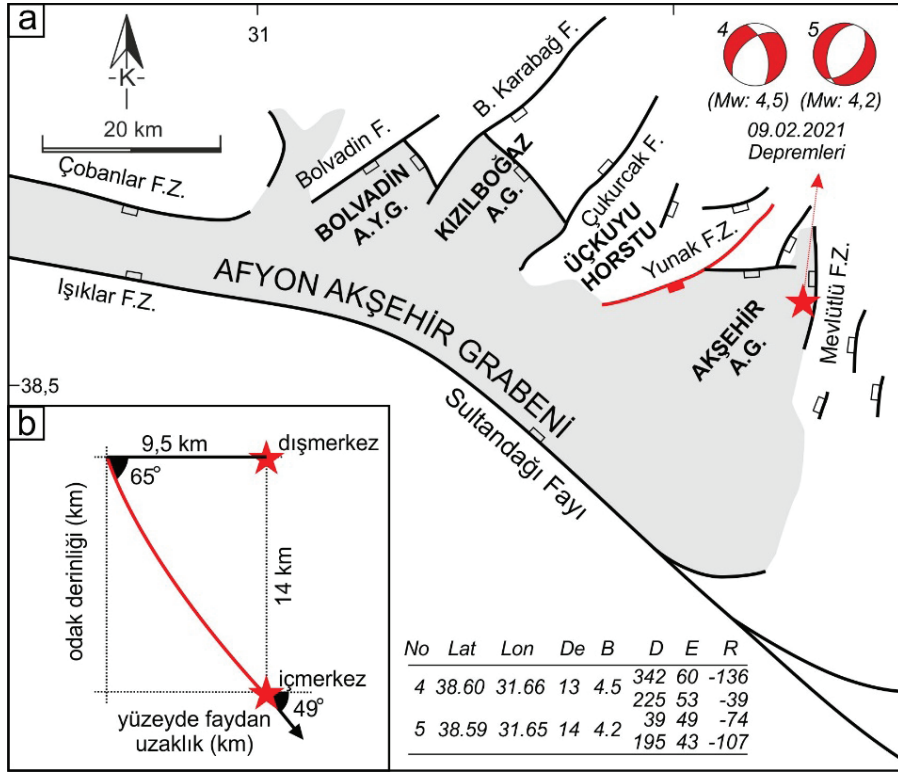
Batı Anadolu'nun geç Miyosen'den beri hem sıkışmalı (Miyosen-Erken Pliyosen'de etkili olan yaklaşık D-B yönlü sıkışma) hem de açılmalı (Batı Anadolu'da Pliyo-Kuvaterner zamanında etkili olan KG yönlü genişlemeli tektonik) tektonik modelden etkilendiği görüşü kabul görmektedir (Angelier vd., 1981; Arpat ve Bingöl, 1969; Bozkurt ve Rojay, 2005; Bozkurt ve Sözbilir 2006; Dumont vd., 1979; Kaya, 1979; Kaya vd., 2004, 2007; Koçyiğit vd, 2000; Koçyiğit ve Özacar, 2003; McKenzie, 1978; Uzel ve Sözbilir 2008; Özkaymak ve Sözbilir, 2008; Özkaymak vd., 2013). Çalışma kapsamında Cebrail ve İncirli segmentleri üzerinde sıkışma ilişkili ( $\sigma_1$  yataya yakın, sırasıyla  $\sigma_1$  dalımı  $09^\circ$  ve  $24^\circ$  hesaplanmıştır) fay çiziği seti ölçülmüştür. Cebrail segmenti üzerinde aynı fay düzlemi üzerinde birbirini üzerleyen 4 farklı fay çiziği seti gözlemlenmiş ve ölçülebilmştir (Şekil 10, c,d,e,f; Şekil 11, Lokasyon 10, R1, R2, R3, R4 fazları). R1 sıkışma fazı en alttaki doğrultu atım ilişkili fay çiziği seti ile ilişkilidir. Fay düzlemleri üzerindeki kayma çiziği setlerinin ölçümü ile edilen verilerden oluşturulan paleogerilme analizlerine göre, bölgede yer alan bu fayların yaklaşık K-G yönlü çekme gerilmesi kuvvetleri ilişkili D-B yönlü sıkışma kuvvetleri etkisi altında saf doğrultu atımlı faylanma ile oluştuğu söylenebilir. Isparta Dirseği'nin kuzeydoğu kolu üzerinde Sultandağı Bindirmesi olarak tanımlanan (Boray vd., 1985; Şaroğlu vd., 1987; Barka vd., 1995) D-B yönlü

sıkışma verileri olasılıkla bu faz ile ilişkilidir. Yunak Fay Zonu'na ait segmentleri oluşturan bu ilk fazın Batı Anadolu'daki Miyosen-Erken Pliyosen'de etkili olan yaklaşık D-B yönlü sıkışmalı tektonik ortam ile ilişkili olması muhtemeldir. Pliyo-Kuvaterner döneminde etkili olan çekme gerilmesi ilişkili tektonik rejim sırasında ise K-G, D-B ve KD-GB arasında değişen çok yönlü genişlemeli (multi-directional extension) tektonik ortam içerisinde eğim/oblik atımlı normal fay şeklinde çalışarak reaktive oldukları ortaya çıkarılmıştır. Günümüzde Sultandağı Fayı olarak tanımlanan, Isparta Dirseği'nin kuzeydoğu kolunun da sıkışmalı bir tektonik ortamdaki genişlemeli bir tektonik ortama dönüşmesi de olasılıkla bu döneme denk gelmektedir. Sultan Dağları'nın kuzey ve doğu sınırının sıkışmalı bir tektonik rejim ile şekillendiği ancak, Neotektonik dönemde açılmalı bir tektonik rejim etkisinde geliştiği Koçyiğit vd. (2000) tarafından da vurgulanmıştır. Bununla beraber, bu çalışmada KD-GB uzanımlı ve güneydoğuya eğimli Cebrail Segmenti'ne ait aynı kayma düzlemi üzerinde kesen kesilen ilişkisine göre ölçülerek analiz edilen fay çiziği verileri (Lokasyon 10) Kuvaterner dönemi içerisinde önce KKB-GGD, daha sonra BKB-DGD ve son olarak da KB-GD yönlü genişlemenin varlığına işaret etmektedir. Bu durum çalışma alanında Kuvaterner boyunca  $\sigma_1$  genel olarak düşeyde iken,  $\sigma_3$ 'ün saat yönünde rotasyonuna karşılık gelmektedir.

Batı Anadolu'daki çok yönlü genişleme rejimi birçok çalışmaya konu olmuştur (örn. Bozkurt ve Mittwede, 2005; Bozkurt ve Sözbilir, 2006; Özkaymak vd., 2017; Tiryakioğlu vd., 2018; Özkaptan vd., 2018; Özkaymak ve Sözbilir, 2020). Bozkurt ve Sözbilir (2006) Batı Anadolu'da gözlenen bu tip bir gerilme rejiminin  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  asal gerilim eksenleri arasındaki gerilme değişimlerine bağlı olduğunu ileri sürmektedir. Bu çalışmada hesaplanan sonuçlara göre de eğim atımlı normal faylanmalarda  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  değerlerinde dağınık desenler ile dalım ve yönlemlerdeki değişimler dikkat çekmektedir (Çizelge 1). Bu tip bir genişleme rejiminin bir diğer sebebi, bölgede mevcut olan çapraz grabenlerin varlığı ile ilişkilidir. Yapılan kinematik analiz ve jeolojik haritalama çalışmaları, Afyon Akşehir Grabeni'nin kuzeydoğu kesiminde haritalanan KD-GB uzanımlı ve GD'ya eğimli olan Yunak Fay Zonu ile yaklaşık KG uzanımlı ve batıya eğimli olan Mevlütlü Fay Zonunun normal hareketleri sonucu arada kalan KD-GB uzanımlı bloğun çökmekte olduğunu ortaya çıkarmıştır. Yapılan bu çalışma kapsamında ilk kez Akşehir Alt Grabeni olarak tanımlanan tektonik blok Afyon Akşehir Grabeni'nin KB-GD uzanımlı ana ayrılma fayı olan Sultandağı ana fayına ve genel graben doğrultusuna çapraz bir konumdadır. Bu tip yapılara da güzel bir örnek olarak, Geçievi vd. (2019) tarafından Afyon-Akşehir Grabeni'nin güney kenarını morfolojik olarak belirgin dağ önü sarplıkları ile sınırlayan kuzeye eğimli ana graben fayı niteliğindeki Sultandağı Fayı'nın tavan bloğunda çapraz fay niteliğinde gelişen Büyük Karabağ Fayı boyunca tanımlanmıştır. Geçievi vd. (2019) Büyük Karabağ Fayı'nın Miyosen zamanında sağ yönlü doğrultu atımlı bir fay olarak oluştuğunu ve Pliyo-Kuvaterner zamanında ise normal fay olarak reaktif olduğunu ifade etmektedir. Önceki çalışmalarda, KD uzanımlı Bolvadin fayı ile kontrol edilen Bolvadin Alt Yarı Grabeni, KD-GB uzanımlı B. Karabağ ve Çukurcak Fayları ile kontrol edilen Kızılboğaz Alt Grabeni

(Özkaymak vd. 2017, 2019, Geçievi vd. 2019) ile beraber bu çalışmada ilk defa tanımlanan Akşehir Alt Grabeni, eğim atımlı Yunak ve Mevlütlü Fay Zonları ile kontrol edilmektedir ve çapraz graben niteliği sunmaktadır. Batı Anadolu'da çapraz grabenlerin varlığı ve tektonik evrimi üzerine birçok çalışma yapılmıştır (örn. Şengör, 1987; Koçyiğit vd., 1999; Yılmaz vd., 2000; Açıkalın ve Ocaoğlu, 2006; Gürbüz vd., 2012; Geçievi vd., 2019; Özkaymak ve Sözbilir, 2020; Özsayın vd., 2023). Batı Anadolu'daki çapraz graben modeli ilk defa Şengör (1987) tarafından tanımlanmıştır. Şengör (1987)'e göre Batı Anadolu'daki büyük ölçekli normal fayların tavan bloğunda yer alan ve bu normal fayların doğrultularına yüksek açılarda (çapraz) gelişen fayların arasında çapraz bloklar oluşur. Bu blokların kenarları farklı iç uzantılar sergileyebilir, genellikle ilişkili oldukları normal faylara doğru artan değişken yer değiştirmeler sunar ve yer yer düşey eksenler etrafında farklı dönüş sergileyebilirler. Şengör (1987), rotasyona sahip olmayan çapraz fayların ana graben fayına çapraz yönde horst ve graben komplekslerine yol açabileceğini, bu şekilde en az iki yönde genişleme, düzensiz çökme ve karmaşık bir yapısal ilişki gibi lokal etkilere neden olabileceğine dikkat çekerek, bu çapraz fayların doğrultularının ana bölgesel genişlemenin yönelimine paralel olduğunu ifade etmektedir. Isparta Dirseği'nin KB kolunu temsil eden ve varlığı sorgulanan, kinematik özellikleri tartışılmakta olan (örn. Alçiçek vd., 2005; Alçiçek, 2015; Elitez ve Yaltrak, 2016; Kaymakçı vd., 2017;) Fethiye Burdur Fay Zonu'nun yakın batısında Gürbüz vd. (2012) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, KD-GB uzanımlı Baklan Grabeni'nin Pliyo-Kuvaterner zamanında, KB-GD uzanımlı ana Dinar Grabeni önünde çapraz graben olarak geliştiği ileri sürülmüştür. Bu çalışmaya göre, Baklan-Dinar grabeninden elde edilen morfolojik, yapısal, sondaj ve jeofizik verileri, güneybatı Türkiye'de Pliyo-Kuvaterner zamanında, KD yönlü genişleme sırasında gelişen bir çapraz graben yapısını tanımlamaktadır.





**Şekil 18. a)** Afyon Akşehir Grabeni kuzeyindeki KD-GB uzanımlı çapraz grabenleri gösteren basitleştirilmiş tektonik harita. Kısaltmalar: A.G: Alt Graben, AYG: Alt Yarım Graben, F: Fay, F.Z: Fay Zonu. **b)** YFZ Cebraill segmentini gösteren enine kesit, 09.02.2021 depreminin (Mw:4,2) iç merkez ve dış merkezini göstermektedir. Depremin iç merkez ve dış merkez verileri KOERİ, (2024)'ten alınmıştır. Fayın yüzeyde saha çalışmaları sırasında ölçülen eğimi  $65^\circ$  ve eğim yönü güneydoğudur. İç merkezdeki kayma düzleminin eğimi ise ( $49^\circ$ ) 5 numaralı depremin fay düzlemi çözümünden alınmıştır. Fay düzlemi çözümü parametreleri şekil üzerinde verilmiştir. Kısaltmalar; De: derinlik, B: Büyüklük, D: Doğrultu, E: Eğim, R: rake açısıdır.

**Figure 18. a)** Simplified tectonic map showing cross grabens extending in NE-SW direction north of the Afyon Akşehir Grabeni. Abbreviations: AG: Lower Graben, AYG: Lower Half Graben, F: Fault, FZ: Fault Zone. **b)** Cross section across the YFZ Cebraill segment, showing the hypocenter and epicenter of the 09.02.2021 earthquake (Mw:4.2) (earthquake data taken from KOERİ, 2024). The dip of the surface-slip vector ( $65^\circ$ ) was measured during field studies, while the dip of the fault at the hypocenter ( $49^\circ$ ) was taken from the fault-plane solution which is given in the figure. Abbreviations: De: depth, B: magnitude, D: strike, E: dip, R: rake.

Benzer şekilde, yaklaşık K-G uzanımlı Bozdoğan ve Karacasu grabenleri ile yaklaşık D-B uzanımı Menderes Ana Grabeni arasındaki çaprazkesme ilişkisi birçok çalışmaya konu olmuştur (Açıkalm, 2005; Alçıçek, 2010; Yılmaz vd., 2000; Özsayın vd. 2023). Tüm bu veriler, Afyon Akşehir Grabeni doğusundaki Sultandağı Fayı (Isparta Dirseği'nin KD kolu) ve çalışma alanında hesaplanan gerilme yönleri ile uyumludur.

Çalışma alanı ve yakın civarında, aletsel dönemde meydana gelen depremlerin sismotektonik analizine göre, özellikle grabenin orta ve doğu bölümünde meydana gelen yoğun sismik aktivite, graben kenar faylarının güncel aktivitesi için en önemli kanıtlardır. YFZ tavan bloğunda 09.02.2021 tarihinde meydana gelen depremlerin (Mw: 4,5 ve 4,2) odak mekanizma çözümleri ve deprem parametreleri (KOERİ, 2024),

bu depremlerin YFZ'na ait Cebrail segmentinden kaynaklanmış olabileceğine işaret etmektedir (Şekil 18). Depremler fay yüzeyinden yaklaşık 9,5 km güneydoğuda ve 13-14 km derinliklerde meydana gelmiştir. 1) Odak mekanizma çözümüne göre 5 numaralı depremin K39°D doğrultulu ve 49° eğime sahip bir kayma düzleminde meydana geldiği 2) Cebrail Fay düzleminin yüzeyde ölçülen 65°'lik eğim açısı ve eğimin güneydoğuya doğru olduğu düşünüldüğünde, çizilen enine kesitte bu depremin Cebrail Segmentinin üzerinde meydana geldiği görülmektedir (Şekil 18). Fay düzleminin yüzeyde daha yüksek açılı, iç merkezde ise daha düşük açılı olması fayın listrik geometrisine işaret etmektedir.

Sonuç olarak, elde edilen tüm bu veriler, Afyon Akşehir Grabeni kuzeyindeki KD-GB uzanımlı bu fayların

- 1) Miyosen'den beri en az iki farklı harekete sahip reaktive faylar olduğuna, önceki doğrultu atımlı karakterin Batı Anadolu'da Pliyo-Kuvaterner'de etkin olan genişlemeli tektonik rejim etkisinde, eğim/oblik atımlı normal fay karakterinde reaktive olduğuna,
- 2) Bölgedeki ana graben fayı niteliğindeki Sultandağı Fayı'nın tavan bloğundaki çapraz alt graben bloklarını sınırlayan enine faylar olduğuna,
- 3) bölgesel genişleme yönüne paralel/yarı-paralel uzanımına sahip olduklarına,
- 4) Graben içerisinde çok yönlü genişleme (multi-directional extension) kuvvetleri etkisi altında geliştiklerini göstermektedir.

### **EXTENDED SUMMARY**

*The Yunak Fault Zone is located in the northeastern part of the Afyon Akşehir Graben, one of the seismically active depression areas in Western Anatolia. During field studies in the region, four segments within the Yunak Fault were mapped*

*for the first time at 1:25.000 scale. These were named the Cebrail, Üçkuyu, İncirli, and Ayrıtepe Segments. Their geometric, kinematic, active tectonics and seismotectonic characteristics were analyzed for the first time in this study.*

*Field-based findings indicate the presence of normal faults oriented NW-SE, E-W, and NE-SW, with lengths ranging from 3 km to 18 km and widths from 300 m to 4 km. According to empirical relationships between segment length and maximum earthquake magnitude provided by Wells and Coppersmith (1994) and Pavlides and Caputo (2004), they could generate earthquakes with moment magnitudes ranging from 5.6 to 6.7 (Table 2).*

*Paleostress analyses revealed that the faults in the region formed under pure strike-slip faulting associated with a general N-S extensional and E-W compressional tectonic regime before the Quaternary. During the Plio-Quaternary period, these faults were reactivated as dip/oblique-slip normal faults within a multi-directional extensional tectonic regime in E-W, NW-SE, and NE-SW directions under the influence of extensional tectonism.*

*Geological mapping and kinematic analysis studies indicate that normal movements of the NE-SW trending and SE-dipping Yunak Fault Zone and the approximately N-S trending and west-dipping Mevlütlü Fault Zone, located in the northeastern part of the Afyon Akşehir Graben, caused the formation of a NE-SW trending graben block between them. This tectonic block, identified and named for the first time in this study as the Akşehir Sub-Graben, exhibits characteristics of a cross-graben in the hanging wall block of the Sultandağı master fault.*

*All these data demonstrate that the NW-SE trending faults mapped in the northern part of the Afyon Akşehir Graben were reactivated as dip/oblique-slip normal faults under the extensional tectonic regime in Western Anatolia during the*


*Plio-Quaternary period. These faults, which control the cross-sub-graben blocks within the hanging wall block of the Sultandağı master fault, are influenced by a multi-directional extension stress field in the region.*

## KATKI BELİRTME

Bu çalışma birinci yazarın ikinci yazar danışmanlığında Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yürüttüğü Yüksek Lisans tezi kapsamında oluşturulmuştur; Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon (AKÜ BAPK) Birimi tarafından 22.FEN.BİL.06 numaralı proje ile desteklenmiştir. Yapılan bu çalışma aynı zamanda, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 121Y021 Numaralı proje ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız. Yazarlar, makaleye yapıcı katkı sağlayan Halil GÜRSOY'a (Sivas Cumhuriyet Üniversitesi), Erman ÖZSAYIN'a (Hacettepe Üniversitesi) ve ismini açıklamayan diğer hakeme teşekkürü bir borç bilir.

## ORCID

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

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

## KAYNAKLAR / REFERENCES

- Açıkalın, S. (2005). *Sedimentary evolution of the Karacasu cross-graben (Aydın, West Anatolia)*, [MSc]. Eskişehir Osmangazi University, Eskişehir, Turkey (in Turkish with English abstract).
- Açıkalın, S. & Ocağolu, F. (2006). Karacasu çapraz grabeni (Bati Anadolu) Pliyo-Kuvaterner çökellerinin sedimantolojisi. In *59th Turkish Geological Congress of Turkey, Abstracts* (pp. 68-69). Ankara, Turkey.
- AFAD (2024). *Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) Deprem Dairesi, 2024*. <http://www.deprem.gov.tr/sarbis/Shared/Default.aspx>, 2024
- Alçıçek, H. (2010). Stratigraphic correlation of the Neogene basins in southwestern Anatolia: regional palaeogeographical, palaeoclimatic and tectonic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 291(3-4), 297-318. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.03.002>
- Alçıçek, M. C. (2015). Comment on “The Fethiye-Burdur Fault Zone: A component of upper plate extension of the subduction transform edge propagator fault linking Hellenic and Cyprus Arcs, Eastern Mediterranean. *Tectonophysics* 635, 80-99” by J. Hall, A.E. Aksu, İ. Elitez, C. Yaltrak, G. Çiftçi, *Tectonophysics*, 664, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.01.025>
- Alçıçek, M. C., Kazancı, N. & Özkul, M. (2005). Multiple rifting pulses and sedimentation pattern in the Çameli Basin, southwestern Anatolia, Turkey. *Sedimentary Geology*, 173(1-4), 409-431. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2003.12.012>
- Altunel, E., Barka, A. & Akyüz, S. (1999). Palaeoseismicity of the Dinar fault, SW Turkey. *Terra Nova*, 11(6), 297-302.
- Akyüz, S., Uçarkuş, G., Şatır, D., Dikbaş, A. ve Kozacı, Ö. (2006). 3 Şubat 2002 Çay depreminde meydana gelen yüzey kırığı üzerinde palaeosismolojik araştırmalar. *Yerbilimleri*, 27(1), 41-52.
- Ambraseys, N. N. (1988). Engineering Seismology. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 17, 1-105.
- Ambraseys, N. (2009). *Earthquakes in the Mediterranean and Middle East: a multidisciplinary study of seismicity up to 1900*. New York, United States of America: 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, 390-406.
- Angelier, J. (1984). Tectonic Analysis of Fault Slip Data Sets. *Journal of Geophysical Research*, 80, 5835-48.
- 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, 363-76.
- Angelier, J. (1994). *Fault Slip Analysis and Paleostress Reconstruction*, In P.L. Hancock, (Ed), *Continental Deformation* (p.: 53-100). Pergamon Press, Oxford.



- Angelier, J., Dumont, J. F., Karamanderesi, H., Poisson, A., Şimşek, Ş., & Uysal, Ş. (1981). Analyses of fault mechanisms and expansion of southwestern Anatolia since the late Miocene. *Tectonophysics*, 75(3-4), T1-T9.
- Arnold, R. & Townend J. (2007). A Bayesian approach to estimating tectonic stress from seismological data. *Geophysical Journal International*, 170, 1336–1356. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03485.x>
- Arpat, E., & Bingöl, E. (1969). Ege Bölgesi graben sisteminin gelişimi üzerine düşünceler. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration (MTA Dergi)*, 73, 1-9. [https://dergi.mta.gov.tr/dosyalar/images/mtadergi/makaleler/tr/20151009144032\\_774\\_2274f3b5.pdf](https://dergi.mta.gov.tr/dosyalar/images/mtadergi/makaleler/tr/20151009144032_774_2274f3b5.pdf)
- Atalay, (1975). Quaternary deposits and the geomorphology of Akşehir, Eber and Karamuk basins. *50<sup>th</sup> Anniversary of Turkish Rep. Cong. of Earth Science. Puby by Mineral Res. and Explatation Inst.*, 335-365.
- Aydar, E., Bayhan, H. & Gourgaud, A. (2003). The lamprophyres of Afyon stratovolcano, western Anatolia, Turkey: description and genesis. *Comptes Rendus Geoscience*, 335(3), 279-288.
- Barka, A. A., Reilinger, R., Şaroğlu, F. & Şengör, A. M. C. (1995). The Isparta Angle: Its importance in the Neotectonics of the Eastern Mediterranean Region. *IESCA Proceedings*, 1, 3-18.
- Blumenthal, M., (1963). Le systeme structural du Taurus sud-Anatolien. In *Livre a memoire du Proffesseur P. Fallot. Memoire de la Societe Geologique de France*, 2, 611-662.
- Bonilla, M. G. (1988). Minimum earthquake magnitude associated with coseismic surface faulting. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists (Environmental & Engineering Geoscience)*, 25(1), 17–29. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.xxv.1.17>
- Bonilla, M. G., Mark, R. K. & Lienkaemper, J. J. (1984). Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length, and surface fault displacement: *Seismological Society of America Bulletin*, 74(6), 2379 - 2411.
- Boray, A., Şaroğlu, F. ve Emre, Ö. (1985). Isparta büklümünün kuzey kesiminde Doğu-Batı daralma için bazı veriler. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 23, 9-20. [https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/eb13cb69b6e20dd\\_ek.pdf](https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/eb13cb69b6e20dd_ek.pdf)
- Bozkurt, E. & Mittweide, S. K. (2005). Introduction: Evolution of continental extensional tectonics of western Turkey. *Geodinamica Acta*, 18(3-4), 153-165.
- Bozkurt, E. & Rojay, B. (2005). Episodic, two-stage Neogene extension and short-term intervening compression in western Anatolia: field evidence from the Kiraz basin and Bozdağ horst. *Geodinamica Acta*, 18(3-4), 295-312.
- Bozkurt, E. & Sözbilir, H. (2006). Evolution of the large-scale active Manisa Fault, Southwest Turkey: implications on fault development and regional tectonics. *Geodinamica Acta*, 19(6), 427-453.
- Champenois, J. Baize, S., Vallee, M., Jomard, H., Alvarado, A., Espin, P., Ekström, G. & Audin, L. (2017). Evidences of Surface Rupture Associated With a Low-Magnitude ( $M_w$  5.0) Shallow Earthquake in the Ecuadorian Andes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(10), 8446–8458. <https://doi.org/10.1002/2017JB013928>
- Çevikbaş, A., Ercan, T. ve Metin, S. (1988). Geology and Regional Distribution of Neogene Volcanics Between Afyon-Şuhut. *Journal of Pure and Applied Sciences, METU*, 21(1-3), 479–499.
- Duman, T. Y. & Emre, Ö. (2013). The East Anatolian Fault: geometry, segmentation and jog characteristics. *Geological Society, London, Special Publications*, 372(1), 495-529. <https://doi.org/10.1144/SP372.14>
- Duman, T. Y., Çan, T., Emre, Ö., Kadirioglu, F. T., Baştürk, NB., Kılıç, T., Arslan, S., Özalp, S., Kartal, R. F., Kalafat, D., Karakaya, F., Azak T. E., Özel, N. M. Ergintav, S., Akkar, S., Altınok, Y., Tekin, S., Cingöz, A. & Kurt, A. İ. (2018). Seismotectonics Database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8), 3277–3316. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9965-9>
- Elitez, İ. & Yaltrak, C. (2016). Miocene to Quaternary tectonostratigraphic evolution of the middle section of the Burdur-Fethiye Shear Zone, southwestern Turkey: Implications for the wide inter-plate shear zones. *Tectonophysics*, 690(Part B), 336-354. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.10.003>
- EMSC (2024). *European-Mediterranean Seismological Centre*. <http://www.emsc-csem.org>, Erişim Tarihi: 9 Eylül 2024.

- Emre, O., Duman, T. Y., Doğan, A., Özalp, S., Tokay, F. & Kuşçu, I. (2003). Surface faulting associated with the Sultandagi earthquake (Mw 6.5) of 3 February 2002, Southwestern Turkey. *Seismological Research Letters*, 74(4), 382-392.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Olgun, Ş., Elmacı, H. (2011). 1:250.000 Scale Active Fault Map Series of Turkey, Afyon (NJ 36-5) Quadrangle, Serial number: 16. General Directorate of Mineral Research and Exploration, Ankara, Turkey.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Olgun, Ş., Elmacı, H., & Özalp, S. (2012). 1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi. Antakya (NJ 37-13) Paftası Serisi: 39. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2>
- Ergin, K., Güçlü, U. ve Uz, Z. (1967). A catalogue of earthquakes for Turkey and surrounding area (11AD to 1964AD). *İstanbul Technical University, Publications*, no. 24, 189.
- Demirtaş, R., İravul, Y., ve Yaman M. (2002). 3 Şubat 2002 Eber ve Çay depremleri ön raporu. *Jeoloji Mühendisliği Haber Bülteni*, 1-2, 58-63.
- Dumont, J. F., Uysal, Ş., Şimşek, Ş., Karamenderesi, İ. H. ve Letouzey, J., (1979). Güneybatı Anadoludaki grabenlerin oluşumu. *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Dergisi*, 92, 7-17.
- Geçievi, M O., Özkaymak, Ç. & Sözbilir, H. (2019). Evidence for Reactivated Cross-Fault and Normal Fault Linkage in Extensional Tectonic Settings: An Example From Büyük Karabağ Fault, Afyon Akşehir Graben. 72. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri ve Tam Metin Bildiriler Kitabı*, (s. 156-157). Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları. [https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/174e0f6fa731893\\_ek.pdf](https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/174e0f6fa731893_ek.pdf)
- Gephart, J. W. & D. W. Forsyth (1984). An improved method for determining the regional stress Sensör using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando earthquake sequence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89, 9305-9320. <https://doi.org/10.1029/JB089iB11p09305>
- Gürboğa, Ş. D., Koçyiğit, A. & Ruffet, G. (2013). Episodic two-stage extensional evolutionary model for southwestern Anatolian graben–horst system: new field data from the Erdoğan–Yenigediz graben (Kütahya). *Journal of Geodynamics*, 65, 176-198.
- Gürbüz, A., Boyraz, S. & Ismael, M. T. (2012). Plio-Quaternary development of the Baklan–Dinar graben: implications for cross-graben formation in SW Turkey. *International Geology Review*, 54(1), 33-50.
- Hardcastle, KC., Hills, LS. (1991). BRUTE3 and SELECT: Quick Basic 4 Programmes for Determination of Stress Tensor Configurations and Separation of Heterogenous Populations of Fault Slip Data. *Computer Geoscience*, 17, 23–43.
- Kalafat, D. & Görgün, E. (2017). An example of triggered earthquakes in western Turkey: 2000–2015 Afyon-Akşehir Graben earthquake sequences. *Journal of Asian Earth Sciences*, 146, 103-113.
- Kaymakçı, N., Cornelis L., Özkaptan, M., Özacar, A., Gülyüz, E., Uzel, B., Sözbilir, H. (2017). Fethiye-Burdur Fault Zone (SW Turkey): a myth?. *19th EGU General Assembly*, 23-28 April, 2017, Vienna, Austria, p. 5443.
- Kibici, Y., Dinç, D., Uçar, A. (2012). Afyonkarahisar Yöresi Volkanik Kayaçlarının Mineralojik ve Petrografik Özellikleri. *Dumlupınar Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 29, 53–70.
- Kocafe, S., & Ataman, G. (1976). Anadolu'da sismotektonik olaylar-I, Antalya-Fethiye-Denizli üçgeni içinde yeralan bölgenin incelenmesi. *Yerbilimleri*, 11, 55–70
- Koçyiğit, A. (1983). Hoyran gölü (Isparta bükümü) dolayının tektoniği. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 26(1), 1-10. [https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/134f7cebfbdb21fe\\_ek.pdf](https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/134f7cebfbdb21fe_ek.pdf)
- Koçyiğit, A. (1984). Güneybatı Türkiye ve Yakın Dolayında Levha İçi Yeni Tektonik Gelişim. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 27(1), 1–15. [https://jmo.org.tr/resimler/ekler/84b98aac2ddd59\\_ek.pdf](https://jmo.org.tr/resimler/ekler/84b98aac2ddd59_ek.pdf)
- Koçyiğit, A. (1985). Muratbağı–Balabantaş (Horasan) arasında Çobandede fay kuşağının jeo-tektonik özellikleri ve Horasan-Narman depremi yüzey kırıkları. *Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yer Bilimleri Dergisi*, 2, 17-33.
- Koçyigit, A. (1987). Hasanoğlan (Ankara) yöresinin tektono-stratigrafisi: Karakaya orojenik kuşağının

- evrimi (Tectono-stratigraphy of the Hasanoğlan region: Evolution of the Karakaya Orogeny). *Hacettepe University Earth Sciences Special Publication*, 14, 269-293.
- Koçyiğit, A., Yusufoglu, H. & Bozkurt, E. (1999). Evidence from the Gediz graben for episodic two-stage extension in western Turkey. *Journal of Geological Society of London*, 56(3), 605-616. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.156.3.0605>
- Koçyiğit, A., Ünay, E. & Saraç, G. (2000). Episodic graben formation and extensional neotectonic regime in west Central Anatolia and the Isparta Angle: a case study in the Akşehir-Afyon Graben, Turkey. *Geological Society, London, Special Publications*, 173(1), 405-421.
- Koçyiğit, A. & Özacar, A. (2003). Extensional Neotectonic Regime through the NE Edge of Outer Isparta Angle, SW Turkey: New Field and Seismic Data. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 12: 67-90.
- Koçyiğit, A. & Devci, Ş. (2007). A NS-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(4), 391-416.
- Kaya, O., (1979). Orta Doğu Ege çöküntüsünün (Neojen) stratigrafisi ve tektoniği. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni (Türkiye Jeoloji Bülteni)*, 22(1), 35-58. [https://jmo.org.tr/resimler/ekler/96a754649af389e\\_ek.pdf](https://jmo.org.tr/resimler/ekler/96a754649af389e_ek.pdf)
- Kaya, O., Ünay, E., Saraç, G., Eichhorn, S., Hassenrück, S., Knappe, A., ... & Mayda, S. (2004). Halitpaşa transpressive zone: implications for an Early Pliocene compressional phase in central western Anatolia, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 13(1), 1-13.
- Kaya, O., Ünay, E., Göktaş, F. & Saraç, G., (2007). Early Miocene stratigraphy of central west Anatolia, Turkey: implications for the tectonic evolution of the eastern Aegean area. *Geological Journal*, 42, 85-109.
- KOERI (2024). Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Recent Earthquakes in Turkey [online]. Website <http://www.koeri.boun.edu.tr/scripts/1st5.asp> (Erişim Tarihi: 09.10.2024).
- McCalpin, J-P. (2009). *Paleoseismology, 2nd Edition*. Intern. Geophys. Ser., Academic Press, London, 613 pp.
- McKenzie, D. (1969). The relation between fault plane solutions for earthquakes and the directions of the principal stresses. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 59(2), 591-601. <https://doi.org/10.1785/BSSA0590020591>
- McKenzie, D. (1978). Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth and Planetary science letters*, 40(1), 25-32.
- Michetti, A. M., Ferreli, L., Esposito, E., Porfido, S., Blumetti, A. M., Vittori, E., ... & Roberts, G. P. (2000). Ground effects during the 9 September 1998, Mw= 5.6 Lauria earthquake and the seismic potential of the "aseismic" Pollino region in southern Italy. *Seismological Research Letters*, 71(1), 31-46.
- Özer, N. (2006). New information on earthquake history of the Akşehir-Afyon Graben System, Turkey, since the second half of 18th century. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(6), 1017-1023.
- 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.
- Özkaymak, Ç. & Sözbilir, H. (2008). Stratigraphic and structural evidence for fault reactivation: the active Manisa fault zone, western Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17(3), 615-635.
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H. & Uzel, B. (2013). Neogene-Quaternary evolution of the Manisa Basin: Evidence for variation in the stress pattern of the İzmir-Balıkesir Transfer Zone, western Anatolia. *Journal of Geodynamics*, 65, 117-135.
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Tiryakioğlu, İ. & Baybura, T. (2017). Geologic, Geomorphologic and Geodetic Analyses of Surface Deformations Observed in Bolvadin (Afyon-Akşehir Graben, Afyon). *Geological Bulletin of Turkey (Türkiye Jeoloji Bülteni)*, 60(2), 169-188. <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 Science*, 28(6), 787-804. <https://doi.org/10.3906/yer-1906-13>
- Özkaymak, Ç. & Sözbilir, H. (2020). Structural Evidence for Extensional Domain-Type Geothermal Play



- in Western Anatolia: A Case Study from Afyon-Akşehir Graben. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20, 693-702. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.704433>
- Özkaptan, M., Kaymakçı, N., Langereis, C. G., Gülyüz, E., Özacar, A. A., Uzel, B. & Sözbilir, H. (2018). Age and kinematics of the Burdur Basin: Inferences for the existence of the Fethiye Burdur Fault Zone in SW Anatolia (Turkey). *Tectonophysics*, 744, 256-274. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.009>
- Özsayın, E., Dirik, K., Ocakoğlu, F., Cartigny, S. A., & Selçuk, A. S. (2023). Tectonic geomorphology of Bozdoğan and Karacasu grabens, western Anatolia. *Geologica Acta*, 21, 1-14. <https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2023.21.1>
- Pavlidis, S. & Caputo, R. (2004). Magnitude Versus Faults' Surface Parameters: Quantitative Relationships from the Aegean. *Tectonophysics*, 380, 159-188.
- Price, S. P. & Scott, B. (1994). Fault-block rotations at the edge of a zone of continental extension; southwest Turkey. *Journal of Structural Geology*, 16(3), 381-392.
- Soysal, H., Sipahioğlu, S., Kolçak, D. ve Altınok, Y. (1981). *Türkiye ve Çevresinin Tarihsel Deprem Kataloğu (2100 B.C.-1900 A.D.)* (Rapor no: TBAG-341) TÜBİTAK.
- Sümer, Ö., Karagöz, O. ve Alak, A. (2018). Fay Parametreleri ve Deprem Büyüklüğü Arasındaki İlişkiler İçin Yeni Bir Program: FaultStat. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18, Makale: 015803, 1089-1101. <https://doi.org/10.35414/10.5578/fmbd.67650>
- Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Boray, A. (1987). *Türkiye'nin diri fayları ve depremsellikleri*. Maden Tatki ve Arama Genel Müdürlüğü Raporu.
- Şengör, A. M. C. (1987). Cross-faults and differential stretching of hanging walls in regions of low-angle normal faulting: examples from western Turkey. *Geological Society, London, Special Publications*, 28, 575 - 589.
- Tan, O. (2021). A homogeneous earthquake catalogue for Turkey. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(7), 2059-2073.
- Tan, O., Tapirdamaz, M. C. & Yörük, A. (2008). The earthquake catalogues for Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17, 405-418.
- Tiryakioğlu, İ., Baybura, T., Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Sandıkçioğlu, A., Erdoğan, S., Yılmaz, İ., Uysal, M., Yılmaz, M., Yıldız, A., Dereli, M., 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), Article GD335. <https://doi.org/10.4401/ag-7591>
- Tocher, D. (1958). Earthquake energy and ground breakage. *Seismological Society of America Bulletin*, 48(2), 147-153.
- Uzel, B., & Sözbilir, H. (2008). A first record of a strike-slip basin in western Anatolia and its tectonic implication: the Cumaovası Basin. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17(3), 559-591.
- Yılmaz, Y., Genç, Ş. C., Gürer, F., Bozcu, M., Yılmaz, K., Karacık, Z., Altunkaynak, S. & Elmas, A. (2000). When Did the Western Anatolian Grabens Begin to Develop?. *Journal of the Geological Society of London*, s. 173(1), 353-384. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.173.01.17>
- Yilmaztürk, A., & Burton, P. W. (1999). An evaluation of seismic hazard parameters in southern Turkey. *Journal of Seismology*, 3, 61-81.
- Yürür, T., Köse, O., Demirbağ, H., Özkaymak, Ç. & Selçuk, L. (2003). Could the coseismic fractures of a lake ice reflect the earthquake mechanism? (Afyon earthquakes of 2 March 2002, Central Anatolia, Turkey). *Geodinamica Acta*, 16, 83-87.
- Wells, D. L. & Coppersmith, K. J. (1994). New Empirical Relationship among Magnitude, Rupture Length, Rupture width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974-1002.