



**Büyük Menderes Grabeni'nin Rolling Hinge (Yuvarlanan Reze) Modelinde  
Supra-Detachment (Sıyrılma Üstü) Havzadan Rift Havzasına Evrimi**  
*Evolving from Supra-Detachment to Rift Basin in Rolling Hinge Model of the Büyük Menderes Graben*

**Ökmen Sümer<sup>1</sup> , Hasan Sözbilir<sup>1</sup> , Bora Uzel<sup>1</sup> **

<sup>1</sup> *Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Tınaztepe Kampüsü, İzmir/Türkiye*

• Geliş/Received: 09.05.2019 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 28.01.2020 • Kabul/Accepted: 13.04.2020  
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 25.04.2020 • Baskı/Printed: 20.06.2020

*Araştırma Makalesi/Research Article*

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

**Öz:** Batı Anadolu genişlemeli tektonik sistemi içinde Miyosen-Kuvaterner zaman aralığında iki tip havza gelişimi gözlenmektedir. Bunlar rolling-hinge (yuvarlanan reze) modelinde gelişen supra-detachment (sıyrılma üstü) ve rift havzaları olarak tanımlanmışlardır. Bu çalışmada Büyük Menderes Grabeni kuzey kenarı üzerindeki Buharkent-Buldan arasındaki bölgede yuvarlanan reze modelinin varlığına dair stratigrafik ve yapısal veriler ilk kez sunulacak ve bu verilere göre grabenin jeolojik evrimi tartışılacaktır. Elde edilen arazi verileri ışığında, havza istifi birbirlerinden açılacak ve/veya havza içi uyumsuzluklarla ayrılan 4 ana sedimanter paket altında değerlendirilmiştir. Bunlar; sıyrılma üstü (supra-detachment) havza istifini içeren alt-orta Miyosen yaşlı 1. Paket ve orta – üst Miyosen yaşlı 2. Paket ile rift havza istifini içeren Pliyo-Kuvaterner yaşlı 3. ve 4. Paketlerdir. Bölgedeki havza gelişimini ve deformasyonunu sağlayan yapısal elemanlar ise, Miyosen yaşlı Büyük Menderes Sıyrılma (Detachment) Fayı, Pliyo-Kuvaterner yaşlı Gökdere Fayı ve en genç graben dolgusunu kesen Holosen yaşlı Büyük Menderes Fay Sistemi'nin en doğu bölümünü oluşturan Buharkent Fay Segmenti'dir.

Miyosen dönemini simgeleyen sıyrılma üstü havzaların ana sınırları Menderes Masifi'nde Eosen – Oligosen'deki etkin sıkışma tektoniğinin ürünü olan süreksizliklere karşılık gelen gnayslar ile şistlerin yapısal dokanağı ile temsil edilir. Pliyosen sonuna kadar süren düşük açılı sıyrılma fayların etkinliği nedeniyle Menderes Masifi'nde yüksek oranda genişleme gerçekleşmiş ve bu durum, kabuk kalınlığını azaltmıştır.

Kuvaterner'de kabuğun inceliş ve soğuması sonucunda sıyrılma üstü havza sisteminin yerini rift havza sistemi olarak Menderes Masifi rift havzalarının yüksek-açılı sınır fayları boyunca bloklara bölünmüştür. Arazi gözlemleri ve kinematik analiz sonuçları, Büyük Menderes Grabeni kuzey kenarındaki yapısal elemanların düşük açıdan yüksek açılıya doğru ilerleyerek değiştiğini, havzanın ilerleme yönüne paralel olarak güneye doğru yuvarlanan reze modeli (rolling-hinge) şeklinde gençleştiğini, havza oluşumunun da sıyrılma üstü havzadan rift havzasına doğru evrildiğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Supra-detachment (Sıyrılma üstü) havza, Rift havzası, Rolling-hinge (yuvarlanan reze) modeli, Büyük Menderes Grabeni, Batı Anadolu.

**Abstract:** Two types of basins developed in the Western Anatolian extensional tectonic system during the Miocene-Quaternary interval, supra-detachment and rift basins, in the form of a rolling-hinge mechanism. In this study, stratigraphic and structural data on the presence of a rolling-hinge model in the area between Buharkent-Buldan on the northern edge of the Büyük Menderes Graben are presented for the first time and the geological evolution of the graben is discussed. In the light of obtained field data, the Miocene-Quaternary sequences deposited on the northern edge of the Büyük Menderes Graben were evaluated under 4 main sedimentary packages, which are separated from each other by angular and/or intrabasinal unconformities. These are the Lower-Middle Miocene (1st Package)

*and the Middle-Upper Miocene (2nd Package) which were deposited in the supra-detachment basin, and the Plio-Quaternary 3rd and 4th packages formed in the rift basin. The structural elements that provide the basin formation and deformation of the region are the Miocene Büyük Menderes Detachment Fault, the Plio-Quaternary Gökdere Fault, and the Holocene Buharkent Fault Segment that cuts the youngest graben basin-fill located in the most eastern part of the Büyük Menderes Fault System.*

*The main fault contacts of the supra-detachment basins characterizing the Miocene period are represented by a structural boundary of gneisses and schists belonging to the Menderes Massif, which is a relict of the effective compressional tectonic products of the Eocene–Oligocene interval.*

*Due to the effectiveness of low-angle faults in the Menderes Massif until the end of Pliocene, a high rate of extension occurred; because of this, the crust thickness was reduced. As a result of cooling of the crust during Quaternary, the supra-detachment basin system was replaced by a rift system and the Menderes Massif was divided into blocks along the high-angle boundary faults of the rift basin. Field observations and kinematic analysis reveal that tectonic structures on the northern margin of the Büyük Menderes Graben evolved from low-angle to high-angle normal faulting, and were rejuvenated southward parallel to the basin propagation in a rolling-hinge model. Thus, the basin formation also evolved from being supra-detachment to the rift type.*

**Keywords:** *Supra-detachment basin, Rift basin, Rolling-hinge model, Büyük Menderes Graben, Western Anatolia.*

## GİRİŞ

Dünya’da kıta içi genişleme alanlarını en iyi karakterize eden ve ilgili jeolojik yapıların en iyi gözlemlendiği bölgelerden biri olan Anadolu’nun batı bölümü, sismik olarak dünyanın en aktif alanlarından biridir ve Batı Anadolu Genişleme Bölgesi (BAGB) olarak tanımlanır (Şekil 1a), (Eyidoğan ve Jackson 1985; Şengör 1987; Jackson ve McKenzie 1988; Ambraseys 1988; Taymaz vd. 1991; Reilinger vd. 1997; Bozkurt 2001). Batı Anadolu, geçirdiği jeodinamik süreçlerin etkisinde gelişen jeolojik yapılar nedeniyle, morfolojik olarak çok belirgin yükselti (horst) ve çöküntü (graben) alanlarına sahiptir. BAGB içinde yaklaşık B–D uzanımlı ve en dikkat çekici olan 3 çöküntü ise kuzeyden güneye doğru Gediz-Alaşehir Grabeni (GAG), Küçük Menderes Grabeni (KMG) ve Büyük Menderes Grabeni’dir (BMG), (Şekil 1b). BAGB içinde yapılan ilk jeolojik araştırmalar 19. yy ortasından itibaren başlamış (örn. Hamilton ve Strickland, 1841; Spratt, 1845; Tchihatcheff, 1869), kesikli olarak 1950 ile 1970 arasında devam etmiş (örn. Zeschke, 1954; Akartuna, 1962; Arpat ve Bingöl, 1969) 1980-90’lı yıllarda hız kazanmış (örn. Angelier vd. 1982; Eyidoğan ve Jackson, 1985; Hancock ve Barka, 1987; Şengör 1987; Sözbilir ve Emre, 1990; Seyitoğlu ve Scott, 1992; Bozkurt vd. 1993; Cohen

vd. 1995; Hetzel vd. 1995; Koçyiğit vd. 1999) ve özellikle 2000’li yıllardan itibaren, bölgedeki kabuk ölçeğindeki yapıların daha iyi anlaşılması ile birlikte, kıtasal alanlardaki genişleme ile ilişkili havza gelişimine odaklanan çalışmalar aşırı derecede yoğunlaşmış ve günümüzde gelineen jeolojik perspektifte, özellikle bu alanın ve ilgili jeolojik yapıların Oligo-Miyosen’den günümüze hangi aşamalarda ve şekilde evrildiği, literatürde en çok tartışılan konu başlıklardan biri haline gelmiştir (örn. Bozkurt, 2000; Seyitoğlu vd. 2000 ve 2002; Yılmaz vd. 2000; Lips vd. 2001; Sözbilir, 2001 ve 2002; Bozkurt ve Sözbilir, 2004; Purvis ve Robertson, 2004; Bozkurt ve Rojay, 2005; Rojay vd. 2005; Kaymakçı, 2006; Bozkurt vd. 2008; Çiftçi ve Bozkurt, 2009 ve 2010; Gürer vd. 2009; Şen ve Seyitoğlu, 2009; Bozcu, 2010; Oner ve Dilek, 2011; Hetzel vd. 2013; Özkaymak vd. 2013; Sümer vd. 2013; Seyitoğlu vd. 2014; Seyitoğlu ve Işık, 2015; Sümer, 2015; Uzel, 2016; Rossetti vd. 2017; Asti vd. 2018 ve 2019; Nilius vd. 2019). GAG, KMG ve BMG ile ilgili yukarıda örnekleri verilmiş jeolojik çalışmalar değerlendirildiğinde, özellikle bölgedeki genişlemenin başlangıç zamanı, bu genişlemenin sürekli veya kesikli olması ve genişlemenin etkisinde oluşan havzaların stratigrafleri ile gelişim aşamaları hakkında önemli görüş ayrılıklarının bulunduğu görülmektedir.

Diğer yandan, bu üç graben özelinde, jeolojik araştırmaların ağırlıklı olarak GAG içinde yoğunlaştığı, fakat bunun yanında KMG ve BMG içinde bu jeolojik konu ile doğrudan ilişkili çalışmaların oldukça kısıtlı kaldığı görülmektedir. Metamorfik Çekirdek Kompleksi (MÇK) ve buna bağlı gelişmiş sıyrılma faylarının yüzleklerinin ilk ve en iyi tanımlandığı alanların GAG içinde olması dolayısıyla, bu normal bir durumdur. Bu çalışma kapsamında, BMG'nin kuzey kenarının en doğu ucundan elde edilen yapısal ve stratigrafik yeni arazi verileri sunulacak ve BAGB'nin güneyinde yer alan BMG'nin jeolojik evrimine ışık tutacak düşük ve yüksek açılı normal fayların birbirleri ile ilişkileri ve yapısal gelişimleri ile havza evrimine olan etkileri birlikte irdelenecektir. Bu noktada, literatürde de oldukça tartışılan grabenlerin jeolojik evrimine ışık tutacak yeni arazi gözlemleri ile kinematik veriler aktararak, BMG özelinde sıyrılma üstü (supra-detachment) havzadan rift havzasına nasıl evrildiğine dair veriler sunulacaktır.

## **BÜYÜK MENDERES GRABENİ'NİN STRATİGRAFİSİ**

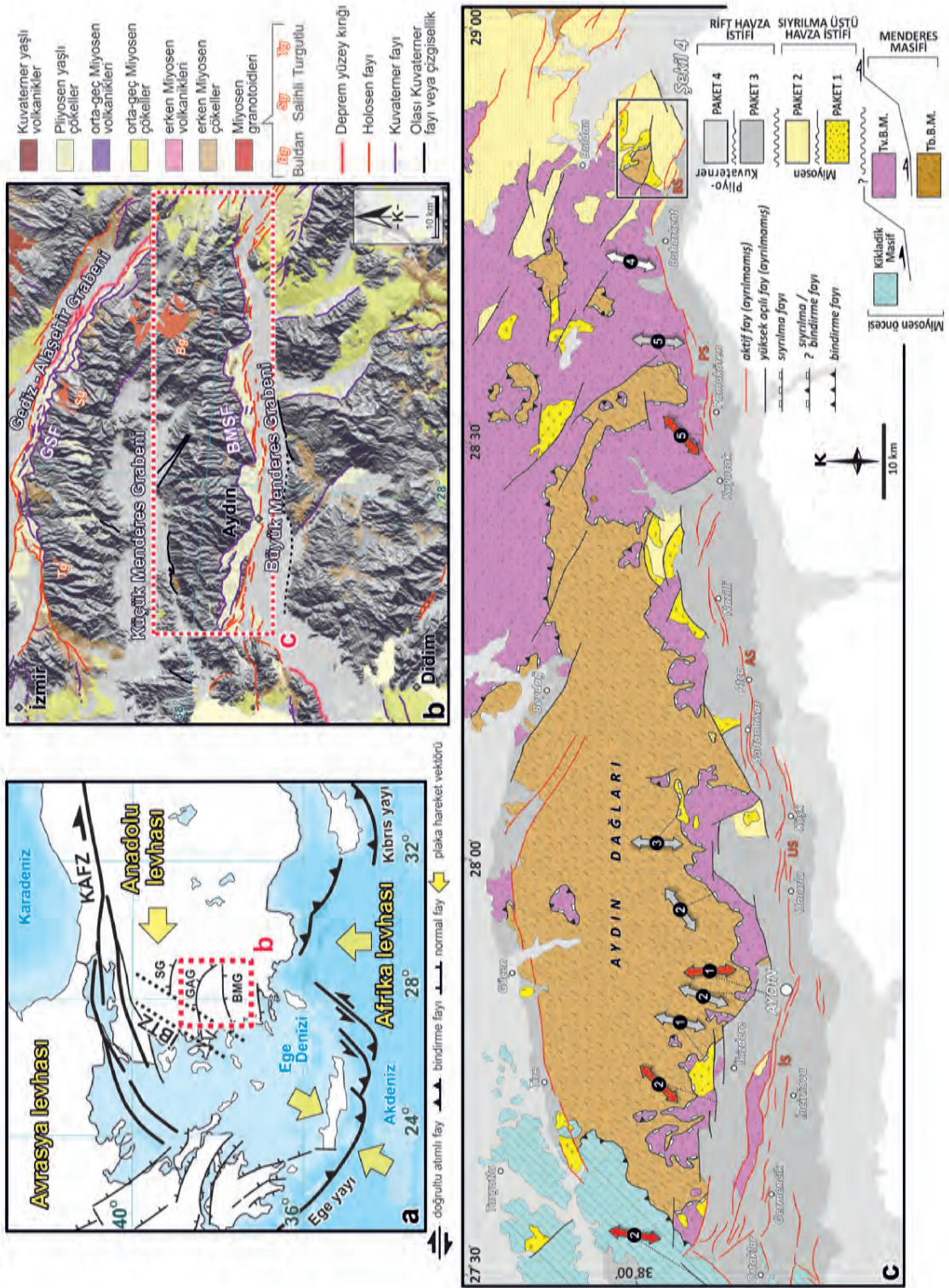
Bugüne kadar özellikle 80'li yılların başından itibaren BMG kuzey kenarı boyunca yapılan jeolojik araştırmalarda, stratigrafik olarak havza batıdan doğuya tamamen çalışılmadığı için, aynı birimler için farklı isimlendirmeler ve yaş verilerinin olduğu görülmektedir (Şekil 2).

Örneğin havzanın batısı ve ortasında Bozkurt (2000) ve Gürer vd. (2009) birimlere yönetsiz olarak "birim (unit)" şeklinde bir tanımlama yapmıştır. Orta bölümde ise Sözbilir ve Emre (1990), Şen ve Seyitoğlu (2009) ve Çifçi vd. (2011) genelde isimlendirmede aynı kalmışsa da birimlerin jeolojik yaşları farklı tanımlanmıştır. Orta ve doğu bölümlerinde ise genelde Alçiçek vd. (2007) ve Koçyiğit (2015) gibi çalışmalar Şimşek (1982)'nin tanımladığı formasyon isimlerine sadık kalsalar da, jeolojik yaşlar yine değişiklik

göstermiştir. Bozcu (2010) diğer çalışmacılardan farklı adlamalar yapmış, Kaymakçı (2006) ise daha çok Denizli bölgesinde kalan çalışmasında, jeolojik formasyonları kendi bulduğu yaş aralıklarını da gözeterek istifi yeniden tanımlamıştır. Bütün istifler yan yana yerleştirildiğinde, gerek birim isimleri gerekse jeolojik yaşlarında denestirmeye gitmenin mümkün olmadığı görülmektedir (Şekil 2). Böylece, BMG istifinin doğru ve yalın bir şekilde yorumlanması için tüm havzayı kapsayacak bir adlama yapılmasının gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında BMG'de yüzlek veren kaya birimleri, havzanın jeolojik evriminin daha anlaşılır olması açısından 3 ana başlık altında toplanmıştır. Bunlar; (1) havzanın üzerinde geliştiği temel kayalar, (2) havzanın oluşum aşamasının ilk evresini temsil eden sıyrılma üstü havza istifi ve (3) havzanın ilerleyen evresini temsil eden rift havza istifidir. Bu istifler birbirlerinden ana uyumsuzluk sınırları ile ayrılmaktadır (Şekil 3).

### **Temel Kayalar**

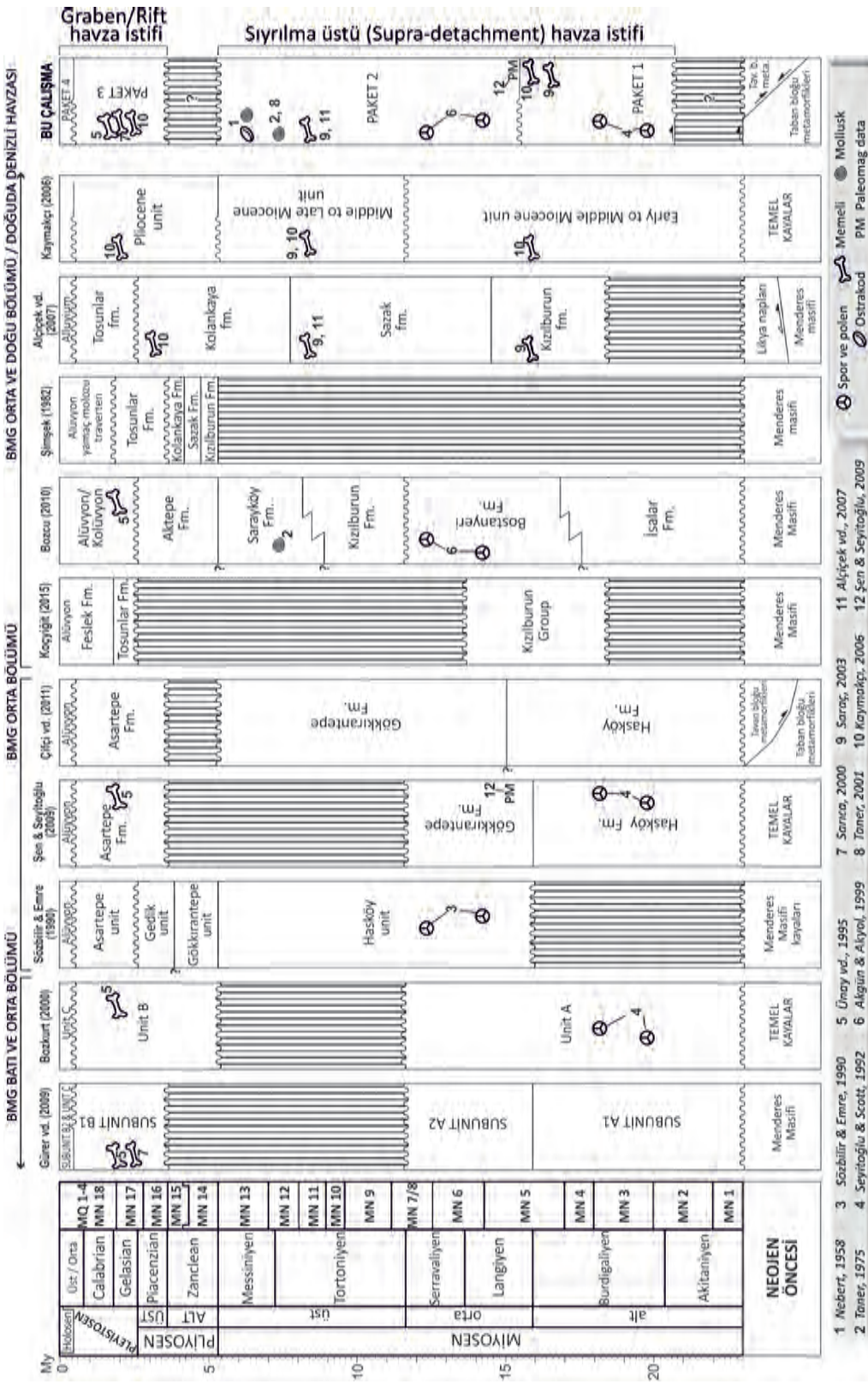
Alanda yüzlek veren Menderes Masifi'ne ait metamorfik kaya toplulukları, temel kayalar adı altında birleştirilmiştir. Bölgesel ölçekte, Batı Anadolu'nun orta bölümünde yüzlek veren Menderes Masifi Metamorfikleri (MMM) kapsamında yapılan çalışmalar oldukça yoğundur (örn. İzdar, 1971; Dora, 1976; Evirgen ve Ataman, 1982; Candan vd. 1992; Gessner vd. 1998; Okay, 2001). Fakat inceleme alanı özelinde, Buharkent'in kuzeyi ve doğusunda yüzlek veren metamorfik kayaların ayrıntılarına değinen çalışmalar sayıca oldukça kısıtlıdır. Koralay vd. (2001 ve 2004), inceleme alanının kuzeyinde, BMG'nin en doğu ucundaki Buharkent'ten kuzeye GAG'nin en doğu ucundaki Alaşehir'e kadar uzanan bir alandaki metamorfik kayaların baskın olarak çekirdek serisine ait gnays ve şistlerden oluştuğunu belirtir. İnceleme alanı sınırlarında MMM'ye ait kaya toplulukları Büyük Menderes Sıyrılma Fayı'nın (BMSF) ayırdığı taban bloğu metamorfikleri



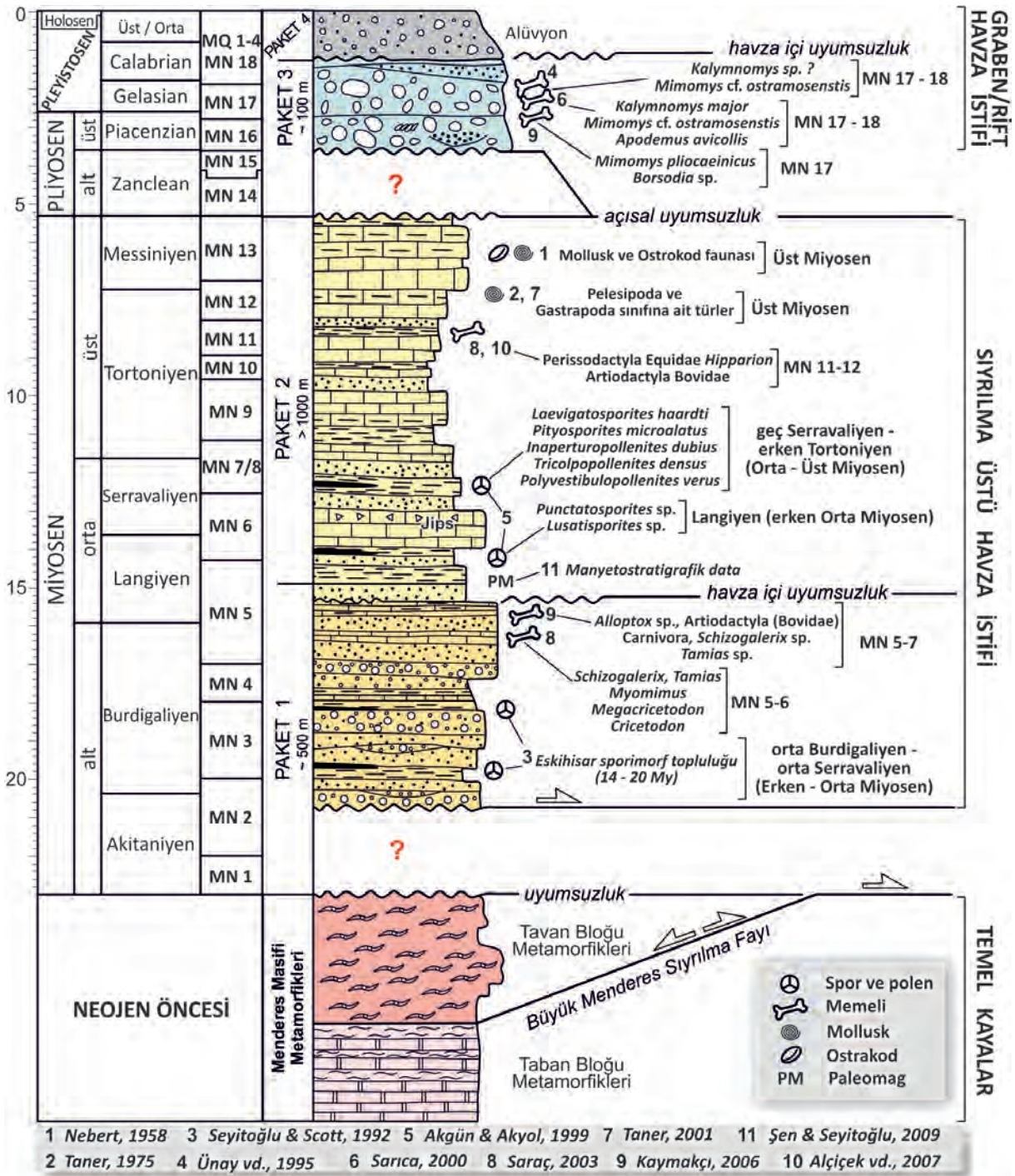
**Şekil 1.** İnceleme alanının bölgesel ölçekte jeolojik konumu. (a) Batı Anadolu'nun basitleştirilmiş ana tektonik yapıları (Taymaz vd. 2007; Koçyiğit ve Özaçar, 2003 ve Uzel vd. 2013'den basitleştirilmiştir). KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu, İBTZ: İzmir-Balıkesir Transfer Zonu, SG: Simav Grabeni, GAG: Gediz-Alaşehir Grabeni, BMG: Büyük Menderes Grabeni. (b) Batı Anadolu'nun orta bölümünü gösteren kabartma görüntüsü eklenmiş jeoloji haritası (Konak, 2002 ve Konak ve Şenel, 2002'den derlenmiştir). Tektonik hatlar Emre vd. (2011) ve Duman vd. (2011)'den birleştirilmiştir. (c) Büyük Menderes ve çevresinin jeoloji haritası (Sözbilir ve Emre, 1990; Emre ve Sözbilir, 1997; Bozkurt, 2000; Konak, 2002; Konak ve Şenel, 2002; Göğüş, 2004; Gürer vd. 2009; Şen ve Seyitoğlu, 2009; Koçyiğit, 2015 ve bu çalışma). Paleostress verileri (1) Bozkurt (2000), (2) Gürer vd. (2009), (3) Sümer vd. (2013), (4) Kaya (2015), (5) Koçyiğit (2015)'den alınmıştır. Gri renk Büyük Menderes Sıyrılma Fayı'nın, kırmızı renk yüksek açılı fayların ve beyaz renk ayrılmamış fayların verilerini göstermektedir (S: İncirliova Segmenti, US: Umurlu Segmenti, AS: Atça Segmenti, PS: Pamukören Segmenti, BS: Buharkent Segmenti).

**Figure 1.** Geological location of the study area on a regional scale. (a) Simplified main tectonic structures of Western Anatolia (simplified from Taymaz et al. 2007; Koçyiğit and Özaçar 2003; Uzel et al. 2013). KAFZ: North Anatolian Fault Zone, İBTZ: İzmir-Balıkesir Transfer Zone, SG: Simav Graben, GAG: Gediz-Alaşehir Graben, BMG: Büyük Menderes Graben. (b) Geological map with relief image showing the central part of Western Anatolia (compiled from Konak 2002 and Konak & Şenel 2002). Tectonic lines are taken from Emre et al. (2011) and Duman et al. (2011). (c) Geological map of Büyük Menderes Graben and its surroundings (compiled from Sözbilir & Emre, 1990; Emre & Sözbilir, 1997; Bozkurt, 2000; Konak, 2002; Konak & Şenel, 2002; Göğüş, 2004; Gürer et al. 2009; Şen & Seyitoğlu, 2009; Koçyiğit, 2015 and this study). Paleostress data from (1) Bozkurt (2000), (2) Gürer et al. (2009), (3) Sumer et al. (2013), (4) Kaya (2015), and (5) Koçyiğit (2015). Gray shows data of Büyük Menderes Detachment Fault, red indicates high angle faults, and white shows undifferentiated faults (İS: İncirliova Segment, US: Umurlu Segment, AS: Atça Segment, PS: Pamukören Segment, BS: Buharkent Segment).

[Tb.B.M (mermer ardalanmalı şist-fillat kaya topluluğu)] ve tavan bloğu metamorfikleri [Tv.B.M (gnays baskın kaya topluluğu)] şeklinde değerlendirilmiştir. Sıyrılma fayının ayırdığı bu iki metamorfik kaya topluluğu BMG'nin kuzey kenarında net bir şekilde takip edilmektedir (Şekil 1c). İnceleme alanında ise Kızıldere Deresi'nin ayırdığı yaklaşık K-G uzanımlı hat, bu metamorfik kayaları ayıran bir sınır niteliği ile çarpıcıdır (Şekil 4). Bu K-G hattın batısı, Kızıldere ile Savcılı arasında kalan alanda tavan bloğu metamorfiklerini oluşturan gnays baskın bir kaya topluluğu yüzlek verirken, hattın doğusu ve kuzeydoğusundaki alanlarda taban bloğu metamorfiklerini oluşturan şist, fillit ve mermer baskın litofasiyeler yer alır. Temel kayaların alt dokanağı inceleme alanında gözlenememekle beraber, MMM üzerinde düşük açılı bir yapısal süreksizlikle, havzanın ilk evresini temsil eden sıyrılma üstü havza istifini oluşturan tortullar oturur. İnceleme alanına en yakın bölgelerdeki metamorfik kayaların jeolojik yaşları ise çekirdekdeki paragnaylardan ve metagranitlerden yaklaşık 520 – 570 My olarak önerilirken (örn. Hetzel ve Reischmann 1996; Loos ve Reischmann 1999; Gessner vd. 2001a; Koralay vd. 2004), örtü serisi içindeki birimler Permian – Paleosen arası yaşlar ile değerlendirilir (örn. Çağlayan vd. 1980; Okay, 2001; Özer ve Sözbilir, 2003 ve Erdoğan ve Güngör, 2004). Menderes Masifi'nin ana metamorfizması olarak kabul edilen Barroviyen türü bölgesel metamorfizmasının yaşı ise Eosen olarak kabul edilmektedir (Şengör vd. 1984; Satır ve Friedrichsen, 1986; Hetzel ve Reischmann, 1996; Bozkurt ve Park, 1999; Bozkurt ve Satır, 2000; Lips vd. 2001). Bu çalışma kapsamında metamorfik kayaların belirtilen yaş aralıkları gözetilerek ve inceleme alanı sınırları içinde jeolojik yaşa özel ayrıntılı bir çalışma bulunmadığı için, temel kayaların jeolojik yaşı Neojen ve öncesi olarak kabul edilmiştir.

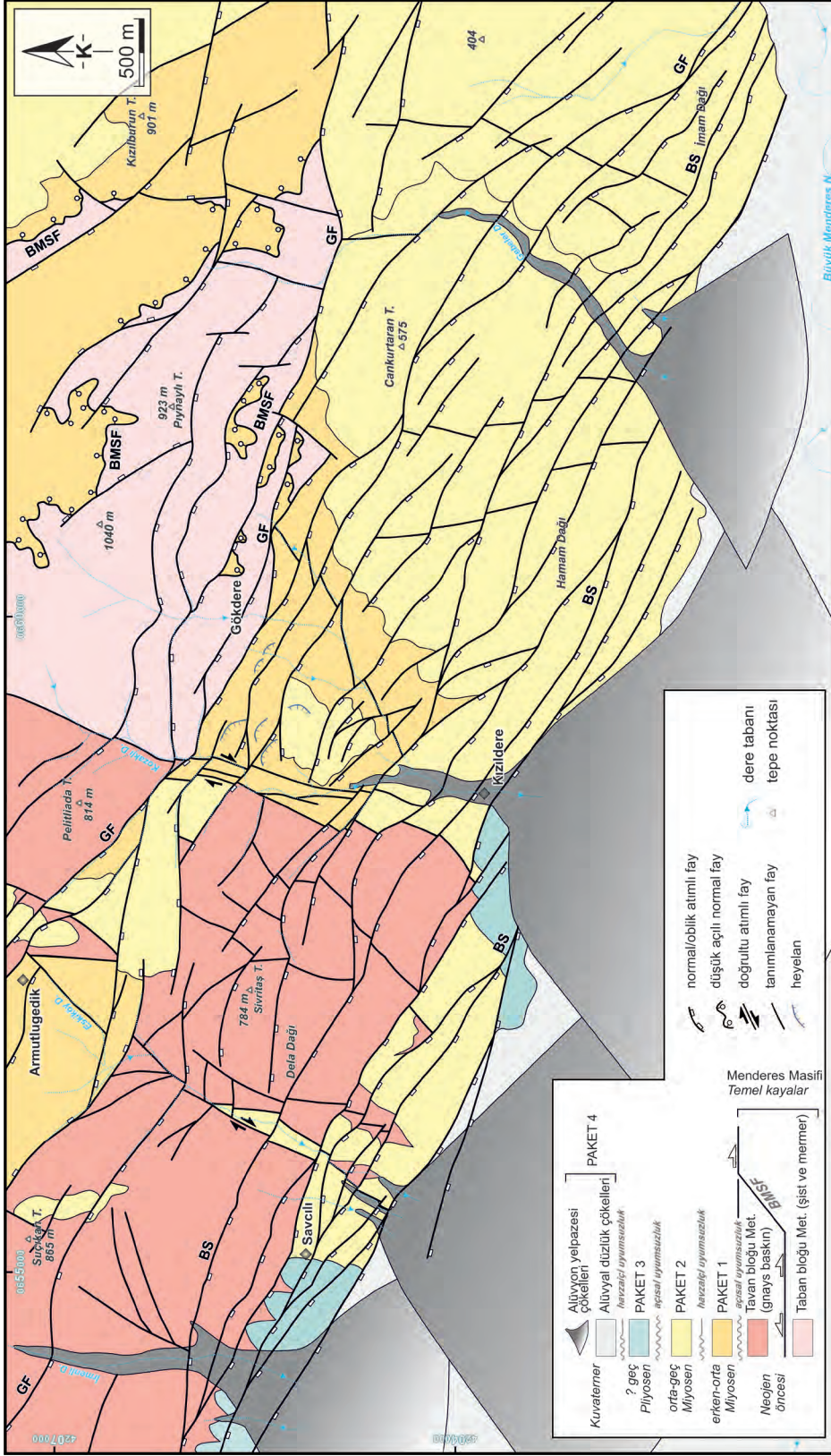


**Şekil 2.** Büyük Menderes Grabeni boyunca yapılan önceki çalışmalarda sunulan stratigrafik kolon kesitler ile bu çalışmada hazırlanan dikme kesitin karşılaştırılması. Jeolojik zaman çizelgesi ve Avrupa memeli zonları Hilgen vd. (2012) ve içinde değimilen referanslardan alınmıştır. **Figure 2.** Comparison of stratigraphic column sections in previous studies and this study along the Büyük Menderes Graben. Geological time scale and European mammal zones are taken from Hilgen et al. (2012) and references therein.



Şekil 3. İnceleme alanının litostratigrafik kolon kesiti. Önceki yapılan yaş verileri ile birlikte sunulmuştur. Jeolojik zaman çizelgesi ve Avrupa memeli zonları Hilgen vd. (2012) ve içindeki değinilen referanslardan alınmıştır.

Figure 3. Lithostratigraphic columnar section of study area together with previous age data. Geological time scale and European mammal zones are taken from Hilgen et al. (2012) and references therein.



**Şekil 4.** İnceleme alanının jeolojisi haritası. BMSF: Büyük Menderes Sıyırılma Fayı, GF: Gökdere Fayı, BS: Buharkent Segmenti. **Figure 4.** Geological map of study area. BMSF: Büyük Menderes Detachment Fault, GF: Gökdere Fault, BS: Buharkent Segment.



## Sıyrılma Üstü Havza İstifi

Havzanın ilk gelişim evresini temsil eden bu istif, birbirine litolojik ve stratigrafik açıdan çok benzeyen iki paketten oluşur. Altta bulunan Paket 1, Paket 2 den havza içi uyumsuzlukla ayrılır. Bu paketler kırıntılı ve karbonat kayalardan oluşmakta ve kömür ara katkılı seviyeler içermektedir (Şekil 3).

**Paket 1:** BMG'nin doğu kenarında gözlenen sıyrılma üstü havza istifinin tabanını temsil eden bu tortul pakete ait birimlerin en iyi yüzlekleri inceleme alanının kuzeydoğusunda bulunan Kızılburun Tepe ve çevresindedir (Şekil 4) Paket başlıca kıvımsız şarabi renkli kumtaşı, çamurtaşı ve kahverengimsi, grimsi yeşil renkli orta-ince çakıltaşından oluşur (Şekil 5a). Kumtaşları genelde ince ve orta taneli ve orta – iyi pekleşmiş, çamurtaşları ise dayanımı daha düşük şekilde gözlenirler. Kızılburun Formasyonu'na ait çakıltaşları Menderes Masifi'nden türeme şist, gnays ve kuvarsit gibi metamorfik kırıntılarca zengin ve diğer daha ince kırıntılı birimlerden daha iyi pekleşmiştir (Şekil 5b). Genelde aramade destekli bir dokuya sahip çakıltaşlarının, tane destekli bölümlerinin, boylanması ve küreselliği orta – orta iyi iken yuvarlaklığı orta - orta kötüdür. Paketin üst bölümleri yersel olarak kalınlığı 2-30 cm arasında değişen kömür arakatlıları ve ince orta katmanlı kireçtaşı seviyeleri de barındırır. Paket kendi içinde Kızılburun ve çevresinde düzenli ve orta yüksek eğimlenmelere sahipken (Şekil 5c), Kızıldere kuzeyindeki yüzleklerinde, karmaşık, düzensiz ve fosil heyelanlıdır (Şekil 4). Arazi gözlemlerinde ölçülen toplam kalınlığı yaklaşık 500 metre iken, bölgede MTA tarafından yapılmış sondaj verilerine göre yaklaşık 450 metredir (KB-1, Demirel vd. 2011). Paket 1, Menderes Masifi'ne ait metamorfik temel kayaların üzerinde gelişmiş düşük açılı sıyrılma (detachment) fay düzlemlerinde askıda kalmış biçimde ve genelde yamalar şeklinde gözlenir

(Şekil 4 ve 6). Bu dokanak ilişkisi inceleme alanı içinden alınan arazi kesitlerinde de net bir şekilde gözlenmektedir (Şekil 7a ve b).



**Şekil 5.** Sıyrılma üstü havza istifine ait Paket 1'i oluşturan jeolojik birimlerin arazi fotoğrafları. (a) kıvımsız şarabi renkte kumtaşı ve çamurtaşı aralanması (jeolog 177 cm), (b) dokusal olgunluğu orta – iyi, pekleşmiş çakıltaşı seviyesi (pusula 8 cm), (c) birimlerin orta yüksek eğimlenmeye sahip düzenli katmanlanma özellikleri.

**Figure 5.** Photographs of geological units in Package 1 belonging to the supra-detachment basin. (a) Reddish-wine colored sandstone and mudstone alternation (height of figure: 177 cm), (b) textural maturity, medium to good, lithified conglomerate level (compass: 8 cm diameter), and (c) regular-stratified and medium- to high-tilted geological unit characteristics

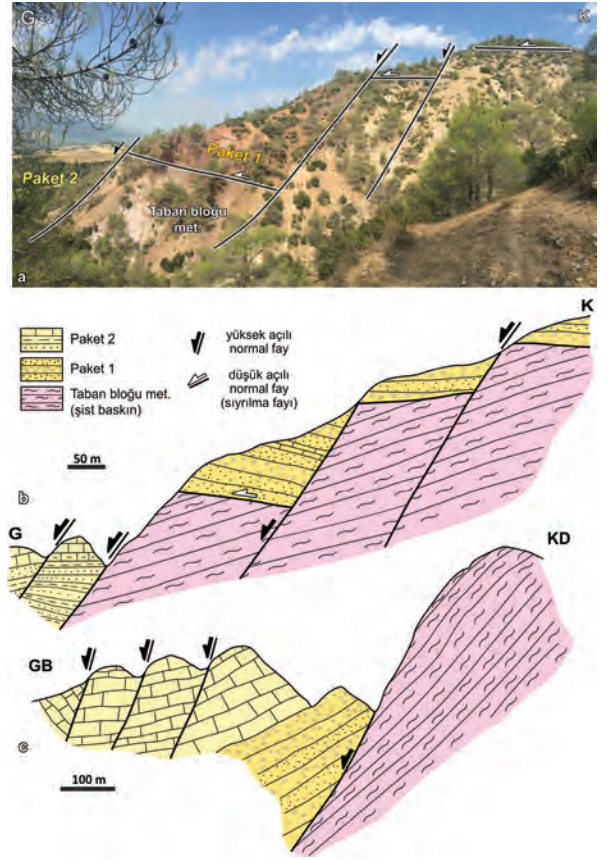
**Paket 2:** Supra-detachment havza istifinin üst bölümünü temsil eden Paket 2'ye ait tortulların en iyi yüzlekleri, Kızıldere'nin doğusunda bulunan Cankurtaran Tepe ve Hamam Dağı çevresinde bulunur (Şekil 4). Paketin inceleme alanı içinde ölçülebilen kalınlığı 1000 metreyi geçmektedir. Benzer şekilde bu pakete karşılık gelen tortullar sondaj verilerine göre yaklaşık 1050 metre kalınlıktadır (KD-9, Uysallı ve Keskin, 1971). Paket başlıca, orta ve ince taneli kumtaşı, kömür



**Şekil 6.** Paket 1 ile metamorfik temel kayalar arasındaki dokanak ilişkilerini gösteren arazi fotoğrafları. İnceleme alanı sınırlarında mermer baskın metamorfik kayalar BMSF'nin taban bloğunda, Paket 1 ise BMSF'nin tavan bloğunda yamalar şeklinde gözlenir.

**Figure 6.** Photographs showing contact relationship between Package 1 and metamorphic basement rocks. In the study area, marble-dominant metamorphic rocks are observed on the foot wall of the Büyük Menderes Detachment Fault, while Package 1 is located as patches on the hanging wall.

ara katkılı kilitaşı ve killi kireçtaşıdan oluşmasına karşın az miktarda çakiltası ara seviyeleri de ve üste doğru killi kireçtaşı ve kireçtaşı baskın bir litoloji ile temsil edilmektedir. İyi tabakalanmış orta ve ince kalık gösteren bölümleri genelde ince ve orta taneli kırıntılı tortullardan ve karbonat kayalardan oluşmuştur (Şekil 8a). Kumtaşları orta-iyi boylanmış ve ince taneli, beyazımsı sarı ve kirli gri renklerde, bol mollusk fosilli, yersel olarak düzlemsel çapraz katmanlanma gösteren ve dalga/akıntı kırışıklıkları gibi sedimanter yapılar içerir (Şekil 8b-d). Paket içerisinde gözlenen çakiltaları, temelden türeme metamorfik kırıntılardan yapıllı çok tane bileşenli ve genelde aramadde destekli



**Şekil 7.** Paket 1, Paket 2 ve metamorfik temel kayalar arasındaki jeolojik ilişkileri gösteren arazi fotoğrafı ve arazi kesitleri. (a ve b) Gökdere'nin 1 km GD'sinden, (c) ise Cankurtaran Tepe'nin yaklaşık 500 metre KB'sinden alınmıştır.

**Figure 7.** Photographs and cross-sections showing the geological relationship between Packages 1 and 2 and the metamorphic basement rocks. (a) and (b) are located 1 km SE of Gökdere and (c) is taken from approximately 500 m NW of Cankurtaran Hill.

bir dokuya sahiptir. Kumtaşları taze yüzeylerinde grimsi beyaz ve kirli beyaz, ayrışma yüzeylerinde çok açık sütlü kahve renkli, iyi- çok iyi boylanmış ve ince tanelidir. Paket içinde daha önce işletilmeye çalışılmış kömürlü seviyeler de yaygındır. Paketin alt-orta bölümleri bitümlü şeyller ile dereceli geçişli iyi boylanmış kumtaşları ve ince orta çakiltalarından yapıllı kırıntılı baskın bir istif sunarken, yanal ve düşey yönde üst kesimlerine doğru bu kırıntılı istif, karbonat baskın bir fasiyese dönüşür (Şekil 8f). Paketin üst bölümlerindeki

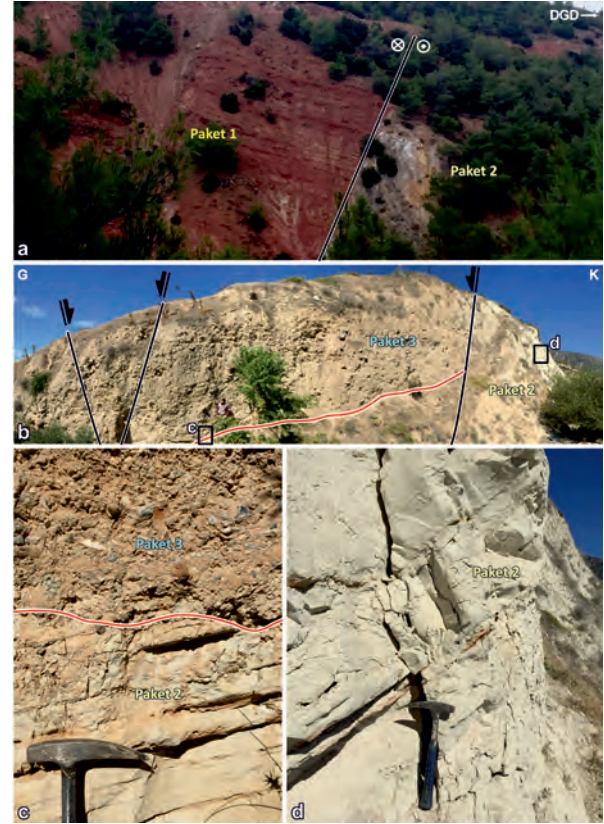
kırıntılı karbonat geçişlerinde jips ve anhidrit oluşumları yaygın olarak gözlenir (Şekil 8e). Paket 2, Paket 1'e ait tortullarla havza içi bir uyumsuzluk tipi olan allostratigrafik uyumsuzlukla ayrılır. Her iki pakete ait tortulların arasındaki açı farkı kuzeyde daha fazla iken, güneye doğru bir azalma eğilimine gider. Bu dokanak güneye doğru gidildikçe uyumsuzluk niteliğinden kurtularak uyumlu bir dokanağa dönüşür. Fakat inceleme alanı sınırlarında bu iki paketin dokanağı genelde yüksek açılı yapısal süreksizliklerle temsil edilir. Her iki paket bu yapısal süreksizlikler boyunca yan yana gelmektedir (Şekil 9a).



**Şekil 8.** Paket 2'ye ait jeolojik birimlerin arazi fotoğrafları. (a) ince, orta katmanlanma sunan ince kırıntılı tortullar ve karbonat kayalar (jeolog 177 cm), (b) Paketin üst seviyelerinde gözlenen ince kumtaşları içindeki mollusk kavkıları, (c) kumtaşlarında gözlenen düzlemsel çapraz katmanlanma, (d) kumtaşlarının katman üstünde gözlenen akıntı kırışıkları. Paket 2'nin orta bölümlerindeki kırıntılı-karbonat geçişinde (kırmızı ok) gözlenen (e) anhidrit (kalem 14 cm), (f) jips kristalleri.

**Figure 8.** Photographs of geological units belonging to Package 2. (a) Thin to medium bedded fine clastic

sediments and carbonate rocks (height of figure: 177 cm), (b) mollusk shells in fine sandstones observed at upper levels of the package, (c) planar cross-bedded sandstones, (d) current ripples observed on top of sandstone bed in clastic-carbonate transition (red arrow) in middle part of Package 2, (e) anhydrite (pencil length: 14 cm), (f) gypsum crystals.



**Şekil 9.** (a) İnceleme alanının kuzeydoğusunda gözlenen Paket 1 ile Paket 2 arasında gelişmiş K-KD uzanımlı sağ doğrultu atım karakterli faylı dokanak, (b) Paket 2 ve Paket 3 arasındaki açılal uyumsuz dokanağı gösteren panoramik arazi fotoğrafı, (c ve d) panoramik arazi fotoğrafındaki yakın plan görüntüler (beyaz gölgeli siyah çizgiler fayları, beyaz gölgeli kırmızı çizgi ise açılal uyumsuzluğu gösterir, çekiç 30 cm'dir).

**Figure 9.** (a) Fault contact showing strike-slip character between Package 1 and 2 observed northeast of study area, (b) panoramic photograph showing angular unconformity contact between package 2 and 3, (c, d) close-up views in panoramic photograph (white-shaded black lines show faults, and white-shaded red line shows angular unconformity, hammer length: 30 cm).

**Sıyrılma üstü havza istifinin jeolojik yaşı ve çökelim ortamı:** Sıyrılma üstü havza istifinin tabanını temsil eden Paket 1'in, BMG'nin orta bölümlerindeki yanal yöndeki eşleniği olan Hasköy Formasyonu'nda Seyitoğlu ve Scott (1992), Eskişehir sporimorf topluluğunu (orta Burdigaliyen – orta Serravaliyen) tanımlamış ve birimin jeolojik yaşının erken-orta Miyosen olması gerektiğini belirtmiştir. Diğer yandan Akgün ve Akyol (1999), BMG'nin kuzey kenarındaki kömürlü Neojen istifinde yaptıkları palinolojik çalışmalarda, Aydın Başçayır'da gözlenen istifin spor ve polen topluluğu açısından Langiyen (erken orta Miyosen), Hasköy ve Sazak çevresindekilerin ise geç Serravaliyen – erken Tortoniyen (orta –üst Miyosen) yaşlı olması gerektiğini savunmuşlardır. Özellikle Akgün ve Akyol (1999)'un Sazak örneklerinin lokasyonları, inceleme alanı içerisinde bulunmakla beraber istifsel anlamda Paket 2'ye karşılık gelmektedir. Saraç (2003), tam GPS lokasyonlarını vermesede, çalışma alanının kuzeyinde yer alan Bostanyeri mevkiindeki gölsel çökellerin mikromemeli faunasının MN 5 – 6 zonlarına karşılık geldiğini belirterek yaşının orta Miyosen olduğunu belirtmektedir. Benzer şekilde Kaymakçı (2006), Pamukkale'nin kuzeyinde yayılım gösteren kömürlü istifin yaşını MN 5 – 7 zonuna karşılık gelen mikromemeli faunasına dayanarak erken – orta Miyosen olarak önermektedir.

Sıyrılma üstü havza istifinin üst bölümünü temsil eden ve Paket 2'ye karşılık gelen karbonat kayaların, Sarayköy güneyindeki yüzleklerinde Nebert (1958), daha önce Tchihatcheff (1866-1869), Philippson (1914) ve Oppenheim (1918)'in de dikkatini çekmiş mollusk ve ostrokod faunalarına dayanarak o dönemde alt Pliyosen'i ifade eden fakat günümüzde üst Miyosen olarak değerlendirilen Ponsiyen yaşını önermiştir. Bu kırıntılı karbonat kayaların inceleme alanı sınırları içindeki yüzleklerinde, Taner (1975) mollusk faunasına dayanarak benzer şekilde Meosiyen – Ponsiyen yaş aralığını önermiş, sonrasında Taner (2001) istif içerisinde günümüz Neojen kronostratigrafisine göre yeni bir düzenleme

yaparak birimin üst Miyosen yaşlı olduğunu vurgulamıştır. Alçiçek vd. (2007)'ise Paket 2'nin üst bölümlerine karşılık gelen doğudaki yanal eşleniklerinin Mahmutgazi'deki yüzleklerinde, Saraç (2003)'ün sunduğu MN 11–12 zonlarına karşılık gelen mikromemeli faunalarını kullanarak birimlerin Üst Miyosen yaşlı olması gerektiğini vurgulamıştır. Diğer yandan Şen ve Seyitoğlu (2009) Nazilli ve çevresinde yaptıkları çalışmada Paket 1 ile Paket 2'nin arasındaki sınıra karşılık gelen dokanağın manyetik polerite terslenmesine karşılık geldiğini ve bu sınırın 14,6 My – 16,6 My arasında bir zaman dilimiyle temsil edildiğini belirtmişlerdir. Bütün satratigrafik paleomanyetik ve paleontolojik veriler değerlendirildiğine, sıyrılma üstü havza istifinin tabanını temsil eden Paket 1'in alt Miyosen – alt orta Miyosen'e (alt Langiyen) uzanan bir yaş aralığına sahip olduğu, üstteki Paket 2'nin ise Langiyen'den olası Miyosen'nin sonuna kadar bir yaş aralığı sunan fosil topluluğu içerdiği görülmektedir.

Sıyrılma üstü havza istifini oluşturan formasyonların özellikle 70'li yılların sonlarına kadar yapılmış çalışmalarda, istifin üst bölümlerinin faunal içeriği gözetilerek az tuzlu ve/veya acı su ortamı ya da denizel olarak yorumlandığı görülmektedir (örn. Philippson, 1914; Nebert, 1958; Akarsu, 1969; Taner, 1975). Akgün ve Akyol (1999), istifin Paket 2'ye karşılık gelen bölümünün bataklık ve sığ göl ortamını işaret eden bir flora taksasına karşılık geldiğini vurgular. İstifin detaylı çökelim ortamı özellikleri bugüne kadar en kapsamlı şekilde Alçiçek vd. (2007)'de verilmektedir. Çalışmacılar, istifin tamamını 10 adet fasiyes topluluğu altında değerlendirirken Paket 1'e karşılık gelen ve kendilerinin Kızılburun Formasyonu olarak tanımladığı bölümün alüviyal yelpaze, Paket 2'ye karşılık gelen ve kendilerinin Sazak ve Kolonkaya formasyonları olarak tanımladıkları birimlerin baskın olarak gölsel ortamda çökeldiğini belirtirler.

Bu çalışmada yapılan arazi gözlemleri ve birimlerin sedimantolojik özellikleri önceki çalışmalarda sunulan verilerle harmanlandığında,

çökel paketinin alüviyal yelpaze, akarsu ve gölsel ortamlarda çökelmiş tortullardan oluştuğu yorumuna ulaşılmıştır. Bunun yanında Paket 2'nin orta ve orta üst bölümlerinin deltaik çökel topluluğuna işaret edebilecek kum setleri gibi fasiyeslerden oluştuğu da belirtilmelidir. Bu gözlemleri doğrulayacak şekilde, sedimentolojik ayrıntıları verilmesi de Alçiçek vd. (2007) Paket 2'nin orta ve üst seviyelerine karşılık gelen bölümünün flüviyo-deltaik bir ortamda çökeldiğini belirtmektedir. Bütün veriler birleştirildiğinde, sıyrıлма üstü havza istifinin tektonik olarak düşük açılı normal fay-kontrollü bir karasal havzada gelişebilecek hemen hemen tüm fasiyes ve alt fasiyeleri içerdiği yorumuna ulaşılmaktadır.

### Rift Havza İstifi

Havzanın jeolojik olarak ikinci evresini temsil eden bu tortul istif alta, Paket 3 olarak tanımlanmış kaba kırıntılı baskın bir istifle temsil edilirken üstte Paket 4 olarak tanımlanmış BMG'nin güncel tortul dolgusunu oluşturan ve hali hazırda çökeline devam eden tortullardan oluşur (Şekil 3).

**Paket 3:** Bu tortul paket BMG'nin kuzey kenarı boyunca özellikle havzanın orta ve batı bölümlerinde geniş bir alan kaplamaktadır (Şekil 1c). Paket BMG'nin en doğu sınırında Şimşek (1982) tarafından Tosunlar Formasyonu, havza boyunca batı yöndeki eşlenikleri ise Asartepe Formasyonu olarak tanımlanmıştır (Sözbilir ve Emre 1990; Şen ve Seyitoğlu 2009). Bu tortul pakete ait birimlerin inceleme alanı ve çevresindeki en iyi yüzlekleri Savcı ve Kızıldere'nin güneyinde bulunur (Şekil 4). Paketin alan içindeki kalınlığı arazi verilerine göre 75 – 100 metre arasında değişir. Paket başlıca çakıltaşı ve kumtaşı gibi kırıntılı tortul kayalardan oluşmaktadır. Kumtaşları genelde grimsi krem ve yeşilimsi gri renklerde, çakıltaşları ise açık sütlü kahve ve grimsi yeşil renktedir. Çakıltaşları baskın olarak temel kayalardan türeme metamorfik kaya kırıntıları ile Paket 2'in üst bölümünü temsil eden killi kireçtaşı ve kireçtaşlarından türeme taneler

içeren çok tane bileşenli, genelde kötü dokusal olgunluğa sahip, normal ve ters derecelenme gösteren ve güney – güneybatıya akıntı yönlerine işaret eden kiremitvari çakıl dizilimleri ile temsil edilir. Bu paket özellikle BMG'nin kuzey kenarını şekillendiren yaklaşık DKD –BGB gidişli havza kenar faylarının tavan bloklarında, faylara bitişik ve bu yapısal hatlar kontrolünde gelişmiş bir fasiyes geometrisine sahiptir. Genellikle yatay ve yataya yakın katmanlanma özelliği gösteren birimler, net bir açılal uyumsuzlukla Paket 2 üzerine gelir (Şekil 9b-d).

**Paket 4:** Bu çalışma kapsamında BMG içinde çökeline halen devam eden ve baskın olarak kırıntılı tortullardan oluşan jeolojik birimler Paket 4 adı altında toplanmıştır. Bu birimler, inceleme alanı içerisinde batıda Savcı'dan doğuda Karakırana kadar gözlenen ve Büyük Menderes Nehri'nin (BMN) ve havzanın gidişine paralel olarak DKD-BGB doğrultusunda uzanım gösteren bir çöküntü alanında yüzlek verirler. Bu çökel topluluklarını, ana hatları ile iki başlık altında değerlendirmek mümkündür. Bunlar; BMN'nin ana kolu içinde çökelmiş taşkın ve kanal çökellerinden oluşan akarsu çökellerinden ve havzaya yaklaşık dik gelişmiş ve kuzeyden güneye doğru akan İrmenli, Eskiköy, Gebeler ve özellikle Kızıldere'nin havzaya açıldığı alanlarda ve DKD uzanımlı havza kenar fayları önünde depolanmış ve hala çökeline devam eden alüvyon yelpazelerinden oluşur. Alüvyon yelpazesi fasiyesinde çökelen tortullar, blok ve kil arası tanelerden, boylanması kötü - çok kötü, kötü - orta yuvarlaklık ve küresellik gösteren, polimiktik bileşimde kırıntılı tortullardan yapıldır. Blok ve çakıllar egemen olarak MMM'den türeme gnays, şist ve mermer gibi metamorfik kaya kırıntılarından ve az miktarda kumtaşı, çakıltaşı, kireçtaşı ve killi kireçtaşı bileşenlerinden yapıldır. Bu çökellerin, kaba-orta kırıntılı ve örgütlenmiş bölümlerinde gözlenen sedimanter yapılar, egemen akıntı yönünün GGB'ye olduğunu göstermektedir. Sınırlı alanlarda gözlenebilen BMN'nin kanal çökelleri kahverengimsi ve gri renkli, bloklu

kaba çakıltaşı ve çakıllı kumtaşlarından oluşur ve bileşimsel olarak metamorfik kaya kırıntıları ağırlıktadır. İnce taneli taşkın tortulları, inceleme alanının güneyinde nehrin terkedilmiş kanallarının üst bölümlerinde, yamalar şeklinde kısıtlı yüzleklerde görülebilmektedir. Bu çökeller genelde ince/çok ince taneli kum ve çamur baskın fasiyeslerde izlenirler. İnceleme alanının orta ve güney bölümünde ise alüvyon yelpaze düzlükleri, BMN'nin fluvial kırıntılı çökelleri ile yanal ve düşey geçişli bir dokanak özelliği gösterirler.

**Rift havza istifinin jeolojik yaşı ve çökelim ortamı:** Rift havza istifini oluşturan tortullarda günümüze kadar yapılmış jeolojik yaşa hizmet edecek çalışmalar bu paketin en alt bölümünü temsil eden Paket 3'e karşılık gelebilecek jeolojik birimlerden elde edilmiş mikromemeli bulgularına dayanır. Ünay vd. (1995), Paket 3'ün batıya doğru yanal eşleniği olan ve Sözbilir ve Emre (1990) ile Şen ve Seyitoğlu (2009)'un Asartepe Formasyonu olarak tanımladığı tortullarda Şevketin Dağı lokalitesinde tanımladığı mikromemeli faunasının geç Villaniyen ya da erken Bihariyen yaşlı olduğunu belirtir. Bu yaş aralığı günümüzde MN 17 – 18 zonuna karşılık gelmektedir. Benzer şekilde bu tortulların daha batıdaki İkizdere'deki yüzleklerinde Sarıca (2000) benzer bir mikromemeli faunasının 1,4 – 2,0 My. aralığında bir yaşa sahip olduğunu belirtir ki buda günümüzde MN 17 – 18 zonuna karşılık gelmektedir. İnceleme alanına en yakın paleontolojik bulgu ise Kaymakçı (2006)'da verilen Tosunlar lokalitesidir. Çalışmacı bu lokasyondaki kırıntılı çökeller içindeki mikromemeli bulgularının MN 17 zonuna karşılık gelen bir faunal içeriği olduğunu belirtir. Rift havza istifinin üst bölümünü temsil eden alüvyon içinde bugüne kadar karakteristik bir yaş bulgusu veren çalışma yapılmamıştır. Bütün paleontolojik çalışmalar değerlendirildiğinde, Paket 3'e ait tortulların üst Pliyosen – alt Pleyistosen yaş aralığında bir faunal içerik barındırdığı görülmekte, istifin üst bölümündeki tortulların ise üst Pleyistosen – Holosen yaşta olması olasıdır. Bütün bu veriler

ışığında iki olasılık ortaya çıkmaktadır. (1) Paket 3'ün tabanında erken Pliyosen'e ait bir çökelim yoktur ve bu dönem iki havza istifi arasındaki uyumsuzluğa denk gelmektedir, (2) Paketin tabanındaki tortullarda, ayrıntılı paleontolojik bulgu eksikliği bulunmaktadır. Bu karmaşıklığı basitleştirmek adına en azından jeolojik yaş olarak Rift havza istifine kabaca Pliyo-Kuvaterner şeklinde bir tanımlama yapmak yerinde olacaktır.

Paket 3 özellikle BMG'nin kuzey kenarını şekillendiren yaklaşık DKD –BGB gidişli havza kenar faylarının tavan bloklarında, faylara bitişik ve bu yapısal hatlar kontrolünde gelişmiş havza kenarı geometrisine uygun olarak çökelmiş baskın olarak döküntü akması tipindeki alüvyon yelpazesi fasiyeslerinde gözlenirler. Formasyonun içindeki bazı seviyeler ise yüksek akma düzeninde örgütlenmiştir. Paket 4 ise baskın olarak güncel morfolojileri belirgin alüvyon yelpazelerinden ve BMN'nin aktif ve terk edilmiş kanal ve taşkınlarından oluşan bir tortul grubu ile temsil edilmektedir.

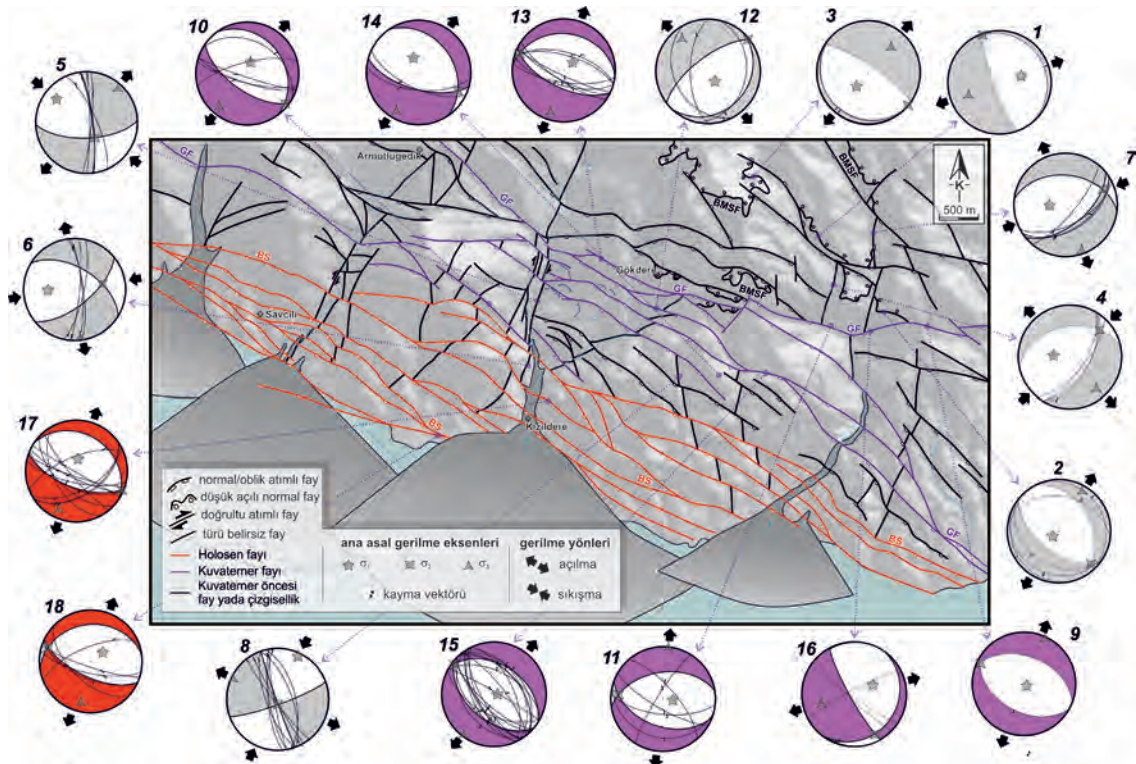
## HAVZAYI ŞEKİLLENDİREN ANA YAPISAL UNSURLAR

Bu çalışmada Buharkent ve çevresindeki BMG'nin kuzey kenarının oluşumunu denetleyen ve havzayı deforme eden faylar belirlenirken; genç fay şevleri ve fay aynaları, ötelenen dere tabanları, üçgen fay düzlemi yapıları, morfolojideki çizgisellikler, fay kayaçları (milonit, fay breşi vb.) gibi veriler incelenmiştir. Bu yapılar arazide izlenerek faylar haritalanmış ve saptanan fay düzlemlerindeki kinematik veriler değerlendirilmiştir. Fay türleri tanımlamasında fay düzlemleri üzerinde gelişen ve kinematik gösterge olarak hareket yönünü saptamada kullanılan yapılar Hancock ve Barka (1987), Petit (1987), Woodcock (1987) ve Doblas (1998) gibi çalışmalarda standartlar temel alınmıştır. Metamorfik kayalar üzerindeki deformasyon yapıları Hanmer ve Passchier (1991) ve Passchier ve Coelho (2006)'da sunulan tanımlama ve terminolojiye sadık kalınarak belirlenmiştir. Haritalanan fayların görece yaş

kurgusu birbirleri ile olan kesen/kesilen ilişkileri, (varsa) çökelişini kontrol ettiği kaya biriminin ve/veya deforme ettiği en genç kaya biriminin yaşı kullanılarak yapılmıştır. Bu bilgiler ışığında BMG'nin en doğu ucunda yer alan Buharkent ve çevresinde 4 farklı yapısal eleman haritalanmıştır (Şekil 10). Bunlar yaşlıdan gence doğru:

- (i) BMG kuzey kenarının Miyosen'deki havza sınırını oluşturan yaklaşık D-B uzanımlı düşük açılı *Büyük Menderes Sıyrılma Fayı*,
- (ii) Havza çökellerini deforme eden Miyosen yaşlı *K-KD uzanımlı faylar*,

- (iii) Grabenin yükselen bloğunda asılı kalmış, BKB-DGD uzanımlı yüksek açılı fay parçalarını içeren Kuvaterner yaşlı *Gökdere Fayı*,
- (iv) Graben içerisindeki en genç çökellerin oluşumlarını denetleyerek günümüz havza sınırını oluşturan ve bu çökellerin güncel deformasyonundan sorumlu olan, BKB-DGD uzanımlı yüksek açılı fay parçalarından yapılmış Holosen yaşlı *Buharkent Segmenti* olarak sıralanır.



Şekil 10. Kızıldere yakın çevresinin fay haritası ve faylardan alınan kinematik ölçülerden elde edilmiş stereografik projeksiyonlar. Projeksiyonlar fay düzlem çözümleri, paleostres yönleri ve ana asal gerilme vektör konumlarını içermektedir. Ölçülerden elde edilen analizlerin ayrıntıları Çizelge 1'de sunulmuştur. Gri renkli çözümler Büyük Menderes Sıyrılma Fayı (BMSF) ve K-KD uzanımlı fayları, eflatun renkli çözümler Gökdere Fayı'nı (GF), kırmızı renkli çözümler ise Büyük Menderes Fay Sistemi içindeki Buharkent Segmenti (BS) üzerinden alınan ölçüleri göstermektedir.

**Figure 10.** Fault map of Kızıldere and surroundings and stereographic projections obtained from kinematic measurements taken from faults. Projections include fault plane solutions, paleostress directions, and main principal stress vector positions. Details obtained from the measurements are presented in Table 1. Gray-colored solutions show the Büyük Menderes Detachment Fault (BMSF) and N-NE trending faults, magenta-colored solutions show Gökdere Fault (GF), and red solutions show measurements taken from the Buharkent Segment (BS) belonging to the Büyük Menderes Fault System.

### Büyük Menderes Sıyrılma Fayı (BMSF)

BMG'nin kuzey kenarı boyunca yaklaşık D-B doğrultulu olarak uzanan BMSF, Menderes Masifine ait metamorfik kayalar ile Neojen yaşlı birimleri birbirlerinden ayıran kabuk ölçeğindeki bir ana sıyrılma fayıdır (Şekil 1; Sözbilir ve Emre, 1990; Emre ve Sözbilir, 1997; Lips vd. 2001). Genelde güneye eğimli olan fayın taban bloğunda mermer ve şist baskın bir istif söz konusu iken, tavan bloğunda ise gnays baskın metamorfik kayalar ile Miyosen yaşlı sedimanter kayalar gözlenir (Emre ve Sözbilir, 1997; Lips vd. 2001; Gessner 2001b; Göğüş, 2004; Çemen vd. 2006; Gürer vd. 2009).

BMG'ye ait ilk havza ürünleri olarak tanımlanan Miyosen yaşlı çökeller (Paket 1), Menderes Masifi'ne ait gnayslardan oluşan kaya birimleri üzerine uyumsuzlukla otururken, rudist fosilleri içeren kalın katmanlı mermerler üzerinde ise BMSF ile simgelenen tektonik bir dokanak ile bulunur (Emre ve Sözbilir, 1997). BMSF ilk olarak Emre ve Sözbilir 1997 tarafından haritalanmış ve Başçayır Detachment Fayı olarak adlanmıştır. Daha sonra yapılan çalışmalarda Güney Detachment (Ring vd 1999) ve BMSF (Lips vd. 2001; Göğüş, 2004; Seyitoğlu vd. 2004; vd. 2004; Çemen vd. 2006; Gürer vd. 2009; Koçyiğit, 2015) olarak isimlendirilmiştir.

BMSF'nin jeolojik yaşı ve sınırladığı/kontrol ettiği birimlerle olan ilişkisi tartışmalıdır. Temelde iki ana görüş bulunur: (1) Havza dolgununun tabanı D-B gidişli ana sıyrılma fayı ile ilişkilidir ve fay Miyosen'den itibaren oluşmaya başlamış ve çökellerin oluşumunu kontrol etmiştir (Sözbilir ve Emre, 1990; Cohen vd. 1995; Emre ve Sözbilir, 1997; Lips vd. 2001; Çemen vd. 2006; Şen ve Seyitoğlu, 2009 ve Koçyiğit, 2015). (2) erken – orta Miyosen yaşlı çökeller yaklaşık K-G uzanımlı bir havza içinde sıkışmalı bir rejim kontrolünde oluşmuş, Ege tipi çapraz grabenlerden kalıtsaldır ve genişleme ile ilişkili sıyrılma fayı ise Miyosen

sonrası olasılıkla Pliyo-Kuvaterner döneminde gelişmeye başlamıştır (Yılmaz vd. 2000 ve Gürer vd. 2009). İlk görüş kendi içinde havza evrimi açısından ufak bir görüş ayrılığı da sunmaktadır. Havza Miyosen'den beri aynı rejim altında çökel paketi üretmeye devam etmiş bir havzadır (Cohen vd. 1995; Çemen vd. 2006; Şen ve Seyitoğlu, 2009). Havza, Miyosen yaşlı paleotektonik ve Kuvaterner yaşlı neotektonik graben şeklinde iki konfigürasyona sahiptir (Koçyiğit, 2015). Diğer yandan Emre vd. (2011) ile Duman vd. (2011) tarafından yayımlanan diri fay haritalarında BMSF Kuvaterner fayı altında değerlendirilmiştir.

Literatürde, BMSF'nin yapısal niteliğini yansıtan yüzlelerde yapılmış ve kinematik analiz verisi sunan 4 adet çalışma mevcuttur (Şekil 1c). Bozkurt (2000), Aydın kuzeyinden aldığı 13 adet fay verisi üzerinde eğimlerin yaklaşık güney-güneydoğuya 22–36°lik açılarda değiştiğini, normal hareketin doğudan 72–86° arasında değişen rake (yan yatım) açılına sahip olduğunu ve ana açılma paleostres vektörlerinin KKD-GGB ile temsil edildiğini belirtir. Gürer vd. (2009) ise iki lokasyon üzerinden bir değerlendirmeye gider. Bunlardan ilki Aydın'ın yaklaşık 1 km kuzeybatısında yer alır. BMSF bu alanda K70–75°B doğrultulu ve 15–20° GB'ye eğimli bir konuma sahiptir. Fay düzlemlerinde gözlenen hareket vektörleri 10–15° arasında batıdan yan yatım açısı yapmaktadır ve normal bir hareketle temsil edilir. Gürer vd. (2009)'da sunulan diğer lokasyon ise Umurlu'nun kuzeybatısındadır. Araştırmacılar, bu bölgeden elde edilen fay verilerinin K70–75°D doğrultulu ve 10°GB eğimli olduğunu, yan yatım açılarının ise 10–15°D arasında değişiklik gösterdiğini vurgular. BMSF'nin kinematik olarak değerlendirildiği diğer lokasyon ise Sümer vd. (2013)'de sunulan Başçayır'dır. Araştırmacıların sunduğu kinematik verilere göre fay düşük açılı eğim atımlı normal fay karakterinde, K80–85°B gidişli ve yaklaşık 20°G eğimlidir. Fay düzlemlerinde izlenen



fay çizikleri yaklaşık  $85^{\circ}$ B ile  $84^{\circ}$ D arasında yan yatım açlarına sahiptir (Sümer vd. 2013). Literatürde BMSF'nin yapısal niteliğini yansıtan kinematik analizlerin verildiği son çalışma Koçyiğit (2015)'dir. Araştırmacı, Nazilli'nin kuzeyinde Hasköy-Künepe detachment (sıyrılma) fayı olarak tanımladığı yapısal öge üzerinden aldığı fay kayma verilerini değerlendirmiş ve paleostres vektörlerinin KKD-GGB bir genişleme ile temsil edildiğini belirtmiştir.

Bu çalışmada havzanın en doğu ucunda konumlu olan Buharkent ve çevresinde, BMSF'ye ait bazı fay parçaları ilk kez detaylı bir şekilde haritalanmıştır (Şekil 4). Bu fay parçaları özellikle Pıyrıaylı ve Cankurtaran tepeler arasında net yüzleklere sahiptir ve bölgedeki daha genç KB-GD uzanımlı faylar tarafından kesilerek basamaklar şeklinde yükseltilmiş, yer yer bu faylar ile kuzeye doğru eğimlenmiştir (Şekil 4 ve Şekil 7a,b). İnceleme alanı sınırlarında BMSF'nin fay düzlemi, Menderes Masifi'ne ait mermer ve şist baskın istifi, Pakete 1'e ait tortul kayaların kaba kırıntılı bölümünden ayırır. Bu düzlem, kalınlığı yer yer 1 metreyi geçen kataklastik bir zonla temsil edilir (Şekil 11a). Düşük açılı fay düzlemi üzerinde,  $85^{\circ}$ 'ye ulaşan yüksek yan yatım açılı fay çizikleri, açılma çatlaklarının uzun eksenine dik ve kayma çiziklerine paralel dalgalanma eksenleri (Şekil 11b ve c), fay düzleminin hemen altında, taban bloğundaki milonitik kayalar üzerindeki asimetrik yapılar (Şekil 11e ve f), tavan bloğunun eğim yönünde hareket ettiğini vurgular. Arazi çalışmalarında saptanarak haritalanan düşük açılı normal fay düzlemlerinin hemen hepsi, yüksek açılı normal faylanma ile ilişkili yüksek açılı düzlemler tarafından kesilir (Şekil 11d ve g). Özellikle inceleme alanının KD'sunda haritalanan BMSF'ye ait düşük açılı normal faylanma ile ilişkili düzlemler yaklaşık K  $21^{\circ}$ - $80^{\circ}$  B arasında değişen doğrultulara ve genelde GB'ye  $07^{\circ}$ - $34^{\circ}$ , KD'ye ise  $10^{\circ}$ - $32^{\circ}$  arasında değişen eğim açlarına sahiptir (Şekil 10'da 1, 2 ve 3 nolu çözümler).

### **K-KD Uzanımlı Faylar**

BMG'nin hem kuzey hem de güney kenarları boyunca gözlenen bu yapısal ögeler, bölgesel ölçekte, çalışma alanının güneybatısında bulunan Bozdoğan Çapraz Grabeni'nin oluşumu ile bağlantılıdır (Ocakoglu vd. 2014). Miyosen sırasında gelişen bu çapraz grabenin havza dolgusu olarak daha çok yelpaze, delta ve akarsu çökelleri tanımlanmış (Yılmaz vd. 2000) ve bu çökellerde geç Miyosen'e ait mikromemeli fosillerine rastlanılmıştır (Sarica-Filoreau, 2002). Bu bilgiler ışığında söz konusu KD/KB faylanma evresinin yaşı Miyosen sonu olmalıdır. Yenilenmiş Türkiye Diri Fay Haritasına (Emre vd. 2011; Duman vd. 2011) göre KD ve KB uzanımlı bu faylar diri fay sınıfı içinde yer almaz ve Kuvaterner ve/veya sonrası evrede aktif değildir. Gürer vd. (2009) tarafından Ortaklar kuzeyinde bulunan bir lokasyonda yapılan kinematik analiz çalışması, bu alandaki KD uzanımlı fayların genel olarak  $K45-50^{\circ}$ D doğrultulu ve  $80^{\circ}$  GD'ye eğimli olduğunu gösterir. Bu fay düzlemleri üzerindeki hareket vektörleri  $70-75^{\circ}$  doğudan yan yatım açısı yapmaktadır. Sözbilir ve Emre (1990), bu yapıların Neojen öncesinden kalıtsal olduğunu ve grabenleşme evresinde reaktivasyona uğrayarak K-G blokların bölümlenmesini kontrol ettiklerini savunur.

Çalışma alanı içerisinde haritalanan K-KD uzanımlı faylar özellikle, Savcılı ve Kızıldere'ye doğru dökülen Eskiköy ve Kozaklı dereleri boyunca gözlenir (Şekil 4). Eskiköy Dere boyunca haritalanan faya ait en net yüzleklere Armutlugedik güneyindedir. Bu alanda fay Pakete 1'e ait çökelleri keserek Menderes Masifi'ne ait metamorfik kayalar içerisinde güneye doğru ilerler. Elde edilen fay düzlemi verilerine göre fay yaklaşık  $K35^{\circ}$ D doğrultulu ve  $65-78^{\circ}$  KB'ye eğimlidir. Gözlenen fay çizikleri kuzeyden  $5$  ile  $25^{\circ}$  arasında açı yapmaktadır (Şekil 12a ve b).



**Şekil 11.** İnceleme alanında gözlenen yapısal öğelere ait arazi fotoğrafları. (a) Büyük Menderes Sıyrılma Fayı'na ait düşük açılı fay düzlemi altındaki taban bloğunda gözlenen kataklastik kayalar, (b) BMSF'nin fay düzlemi üzerindeki ondülasyonlar (kırmızı gölgeli beyaz kalın çizgiler ondülasyonun geometrisini yansıtır), (c) yüksek yan yatım açısına sahip fay çizikleri, (d) düşük açılı fayı kesen yüksek açılı eğim atımlı normal fay, (e, f) BMSF'nin taban bloğundaki milonitik kayalarda gözlenen asimetric yapılar, (g) yüksek açılı fay düzlemi üzerindeki fay çizikleri. Jeolog 177cm, çekiç 30 cm, kalem 14 cm'dir.

**Figure 11.** Photographs of structural elements observed in study area. (a) Cataclastic rocks observed in foot wall block of low-angle fault plane of Büyük Menderes Detachment Fault, (b) corrugations on the fault plane of BMSF (red-shaded thick white lines reflect the geometry of the undulation), (c) slickensides showing high rake angle, (d) high-angle slope-slip normal fault cutting the low-angle fault, (e, f) asymmetric structures observed in the mylonitic rocks in the foot wall block of BMSF, (g) slickensides on the high-angle fault plane. Height of figure is 177cm, length of hammer is 30 cm, pencil is 14 cm long.

Çalışma alanı içerisinde gözlenen KD uzanımlı faylara ait diğer bir yüzlek ise Kızıldere Köyü KD'sinde, Kozaklı Deresi'nin doğu yamacında bulunur (Şekil 4). Bu noktada fay Paket 1'e ait birimler içerisindeki kireçtaşlarında net kinematik veriler sunar (Şekil 12c). Bu alanda ölçülen fay düzlemleri  $K5-15^{\circ}D$  doğrultulu ve  $75-82^{\circ}GD$ 'ye eğimli düzlemlerle simgelenir. Bu düzlemler üzerindeki kayma çizikleri kuzeyden  $<25^{\circ}$  açı yapar. Bölgedeki KD uzanımlı faylanma evresine ışık tutacak diğer lokasyonlar ise Hamam Dağı Cankurtaran Tepe ve İmam Dağı çevresinde bulunur. Bu alanda faylanmaya ait deformasyon düzlemleri Paket 2 içindeki karbonatlar üzerinde gözlenir (Şekil 12d). Bu noktada fay düzlemi  $K10-15^{\circ}D$  gidişli ve  $70-85^{\circ}KB$ 'ye eğimlidir. Saptanan yan yatım açıları  $15$  ile  $30^{\circ}$  arasında değişir ve genelde kuzeyden dar açı yapar. Bu lokasyonlardaki haritalanan faylar, Buharkent Segmenti ve Gökdere Fayı'na ait daha genç fay parçaları tarafından defalarca kesilip ötelenirken, Pıyrıly Tepe civarında haritalanan KD uzanımlı faylar BMSF'ye ait düzlemleri keser ve yanal/düşey yönde ötelir (Şekil 4). Bu çalışmada elde edilen arazi gözlemleri, önceki çalışmalarda verilerle birlikte değerlendirildiğinde, KD uzanımlı ve yanal bileşeni baskın olan bu fayların genişlemeli deformasyon içerisinde transfer faylar olarak geliştiğini göstermektedir. Miyosen sırasında gelişen bu süreksizliklerin, daha sonraki deformasyon evrelerinde tekrar aktif olmaları ve özellikle Kızıldere boyunca haritalanan K-KD uzanımlı fay zonunun iki farklı metamorfik fasiyesin tektonik sınırını oluşturması, bu yapıların çok eski süreksizlik zonlarının parçaları olduğuna işaret etmektedir.

### Gökdere Fayı

BMG'nin kuzey kenarı boyunca gelişmiş basamaklı faylar birçok yapısal blok oluşturur ve genel olarak grabenin merkezine doğru bu fayların gençleştiği bilinmektedir (Emre ve Sözbilir, 1997; Koçyiğit, 2015). Gürer vd. (2009) tarafından

Germencik kuzeyinde yapılan kinematik analiz çalışmalarında Büyük Menderes Fay Sistemi (BMF Sistemi) boyunca gelişen yüksek açılı faylanmalara ait yaklaşık  $K80-85^{\circ}B/80^{\circ}GB$  konumlu düzlemler  $70-85^{\circ}$  B'den yan yatım açısı gösterirler. Duman vd. (2011) ve Emre vd. (2011)'de haritalanan ve graben boyunca uzanan yaklaşık D-B uzanımlı yapısal süreksizlikler Emre vd. (2013)'de BMF Sistemi olarak ele alınmıştır. Buharkent civarındaki BMF Sistemi'ne ait yüksek açılı fay parçaları, bu çalışma kapsamında iki ana gruba ayrılarak haritalanmıştır. Bunlar, fay zonunun Holosen'de aktivitesini yitiren parçalarını içeren Gökdere Fayı ile Holosen aktivitesini sürdüren ve aktif fay sınıflamasında değerlendirilmiş Buharkent Segmenti'dir (Şekil 4 ve Şekil 10). Arazi verilerine göre, BMF Sistemi'nin kuzeydeki parçalarına karşılık gelen Gökdere Fayı, bu çalışma kapsamında Kuvaterner fayı sınıfında değerlendirilmiştir.

Gökdere Fayı, Suçkan Tepe'nin güneyi ile Armutlugedik kuzeyindeki iki ana kol ile çalışma alanına kuzeybatıdan girer (Şekil 10). Paket 1 ile Menderes Masifi'ne ait gnayslar arasındaki yüksek açılı tektonik dokanağı oluşturan bu kolların, Kozaklı Deresi'ne kadar, güney batısında Menderes Masifi, kuzey doğusunda ise Paket 1'e ait tortullar bulunur (Şekil 4). Kozaklı Deresi'nde bu iki kol birleşerek 5 adet fay parçası şeklinde doğuya doğru ilerler (Şekil 10). Bu noktada en kuzeyden geçen fay parçası Cankurtaran Tepe'nin kuzeyinde Menderes Masifi'nin şist ve mermerleri ile Paket 1 ve 2 arasındaki yapısal sınırı oluştururken, Cankurtaran Tepe'nin güneyindeki kollar Paket 2'ye ait birimler içerisinde ilerleyerek İmam Dağı'nın hemen kuzeyinden inceleme alanı dışına devam eder. Gökdere Fayı'nın kinematik özelliklerine dair en net yüzlekler Kozaklı Deresi ile Cankurtaran Tepe'nin kuzeydoğusu arasında gözlenir. Bu alanda fay Menderes Masifi'ne ait mermer ve şistler ile Paket 1'e ait tortul kayalar arasındaki yapısal sınır oldukça belirgin bir topoğrafik sarplık oluşturur (Şekil 13a). Saptanan

fay düzlemlerinin doğrultusu  $K60^{\circ}B$  ile  $K75^{\circ}B$  arasında değişmekte ve yaklaşık  $70-75^{\circ}$  ile GB'ye eğimlidir. Bu düzlemler üzerindeki hareket vektörleri  $>75^{\circ}$  yan yatım açılına sahiptir (Şekil 13b ve c). Arazi gözlemlerine göre, BMSF ve K-KD uzanımlı faylar Gökdere Fayı boyunca kesilip ötelenir.



**Şekil 12.** İnceleme alanında gözlenen KKD-uzanımlı faylara ait arazi fotoğrafları. (a) Gnays litolojisindeki metamorfik temel kayalar üzerindeki yüksek açılı fay düzlemi, (b) doğrultu atımlı fay çizikleri, (c ve d) Paket 2'ye ait ince kırıntılı tortullar içinde gözlenen doğrultu atımlı fay düzlemleri. Jeolog 177cm, çekiç 30cm, açıölçer 10 cm'dir.

**Figure 12.** Photographs of N-NE-trending faults observed in the study area. (a) High-angle fault plane on metamorphic basement rocks in gneiss lithology, (b) slickenlines on strike-slip fault, and (c, d) strike-slip fault planes observed in fine clastic sediments of Package 2. Figure is 177 cm tall, hammer is 30 cm long, and protractor is 10 cm long

### Buharkent Segmenti

Geniş ölçekte bakıldığında yaklaşık  $K70^{\circ}B$  doğrultulu olan Buharkent Segmenti, graben oluşumundaki en genç faylanma evresinin ürünü olarak göze çarpar (Şekil 4 ve 10). BMG Sistemi'nin en batı ucundaki segmente ait fay parçaları birbirlerine paralel ve basamaklı bir geometride Savcılı Köyü ile İmam Dağı arasında yaklaşık 13–15 km uzunluğunda güneye eğimli 8 adet sentetik fay parçasından oluşur. Fay zonunun genişliği yanal yönde 1 ile 2 km arasında değişmektedir. Bu yapısal sınır boyunca Menderes Masifi ve Miyosen yaşlı kaya birimleri ile Kuvaterner yaşlı alüvyal çökeller yan yana gelmekte, kuzeyden güneye doğru akaçlanan İmenli, Eskiköy, Kozaklı ve Gebeler vadilerinin denetiminde büyük alüvyon yelpazeleri gelişmektedir (Şekil 4). Buharkent Segmenti'nin faylanma karakterini yansıtan en net yüzlekler Kızıldere ile Savcılı köyleri arasındaki fay basamaklarında gözlenir. Haritalama alanı içerisinde Buharkent Segmenti'ne ait fay parçaları Savcılı Köyü güneydoğusunda genel olarak  $K60-70^{\circ}B$  doğrultulu ve  $65^{\circ}GB$ 'ye eğimli düzlemler ile Paket 2'ye ait tortul kayaçlar üzerinde belgelenir (Şekil 13d). Bu düzlemler boyunca ana hareket eğim yönündedir ve saptanan yan yatım açıları  $>70^{\circ}$  olarak gözlenmektedir. Kızıldere Köyü'nün hemen güneyindeki fay düzlemlerinde yapılan gözlemler, segmentin bu alanda yaklaşık  $K70^{\circ}B$  uzanımlı ve yaklaşık  $65^{\circ}GB$ 'ye eğimli olduğunu gösterir. Bu noktada, Buharkent Segmenti'ne ait fay düzlemleri üzerindeki fay çizikleri  $>75^{\circ}$  olarak eğim atımlı karakterindedir (Şekil 13e).

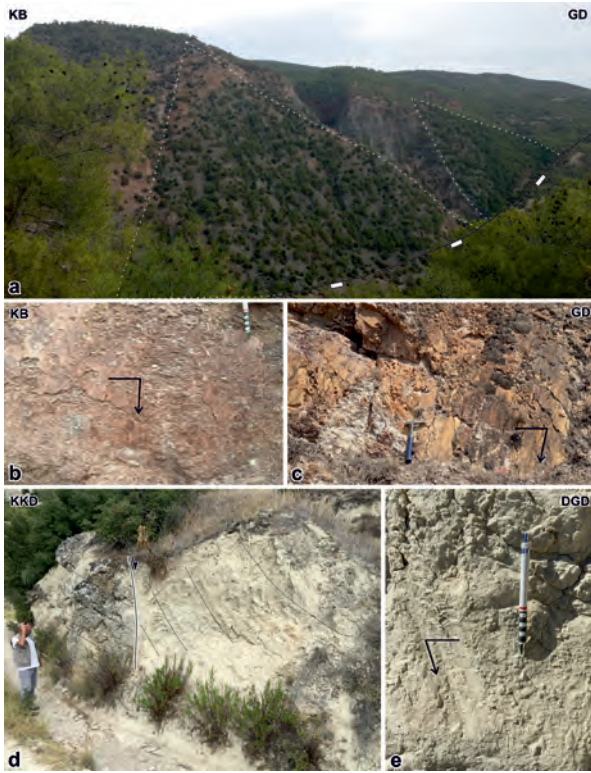
### Havzaya Ait Yapısal Öğelerin Kinematik Analizi

Bu çalışmada gerçekleştirilen fay kinematiği analizi çalışmaları, arazide saptanan/ölçülen fay düzlemi verilerinin ters çözüm (inversion) ile yersel gerilme tensörünün saptanmasını temel alır. Fay verileri arazide Hippolyte vd. (2012) tarafından

tanımlanan kıstaslara uygun bir şekilde toplanmış, analizler sırasında karmaşık deformasyona uğramış alanlardaki uygulanabilirliği sebebi ile Allmendinger vd. (1989 ve 2012) tarafından geliştirilen bir stereonet programı olan "FaultKin 8" programı kullanılmıştır. Bu bağlamda kinematik analiz çalışmalarında kullanılmak üzere, inceleme alanı içindeki 18 lokasyondan 100'e yakın fay düzlem verisi toplanmış ve analiz edilmiştir. Analiz sonuçları ve arazi gözlemleri (kesenkesilen ilişkileri, deforme edilen en genç kaya biriminin yaşı, vb.) birlikte değerlendirildiğinde, 3 farklı deformasyon fazının varlığı ortaya çıkmaktadır. Bu fazları temsil eden veriler, o lokasyon için hesaplanan yersel gerilme alanlarını temsil etmektedir. Bu kapsamda, her deformasyon fazının içerisinde farklı yönlerde gerilmeler bulunmaktadır. Örneğin, BMFZ içerisinde ana faydan ve aktarım rampasından elde edilen yersel gerilmeler farklı olacağından her lokasyon ayrı ayrı değerlendirilmiş, bunların yapısal/tektonik yorumlamaları ve bölgesel anlamları makalenin "Tartışma" bölümünde sunulmuştur.

### Deformasyon fazı I ( $D_1$ )

Havzanın Miyosen dönemi aktivitesi ile ilişkili olan bu ilk faz, düşük açılı normal faylanma (BMSF) ve K-KD uzanımlı olan doğrultu atımlı transfer faylarının birlikte çalıştığı bir evreyi temsil eder. BMSF üzerinden alınan yapısal veriler çalışma alanının kuzey doğusunda haritalanan yüzleklerinden elde edilmiştir. 3 lokasyonda (1 – 3 arası) yapılan ölçümlerde de düşük eğimli fay düzlemlerinde yüksek açılı  $67-87^{\circ}$ 'lik kayma çizikleri karakteristiktir. Bu lokasyonlarda, düzlemler üzerinde gözlenen gerek asimetric yapılar (fay kertikleri), gerekse kayma çizikleri ve fay oluklarının eksenlerine yaklaşık dik gelişmiş açılma çatlaklarının varlığı, eğim atımlı normal faylanmaya işaret eder (Şekil 11b ve c). Kinematik analiz sonuçlarından hesaplanan en büyük asal gerilme ( $\sigma_1$ ) vektörleri düşeye yakın sonuçlar gösterirken, en düşük gerilme ( $\sigma_3$ ) vektörlerinin



**Şekil 13.** Çalışma alanı çevresinde gözlenen Gökdere Fayı (a–c) ile Buharkent Segmenti'ne ait (d–e) yüksek açılı normal faylara ait arazi fotoğrafları (gölgeli alanlar faya ait üçgen yüzeyleri, siyah kalın çizgi fay izini, beyaz dikdörtgenler tavan bloğunu, ince siyah çizgiler fay çiziklerine ait yan yatım açılarını, kesikli çizgiler katmanlanmayı, beyaz gölgeli siyah kalın çizgi fayı gösterir. Jeolog 177 cm, çekiç 30 cm, kalem 14 cm'dir.

**Figure 13.** Photographs of high-angle normal faults observed in study area. (a – c) Gökdere Fault, (d – e) Buharkent Segment. (Shaded areas show triangular facets of the fault, black thick line indicates a fault trace, white rectangles represent hanging wall block, thin black lines indicate rake angles of slickenlines, dashed lines show bedding, and white-shaded thick black line indicates a fault. The figure is 177 cm tall, hammer is 30 cm long, and pencil is 14 cm long.

konumu KD-GB yönelimli ve  $6,5 - 35,5^\circ$  arasında değişen dalım açılarına sahiptir (Çizelge 1). Her 3 lokasyondaki hesaplama sonuçları paleostres yönlerinin yaklaşık KD-GB genleşme ile temsil edildiğini gösterir (Şekil 10). Bu fazda gelişmiş olan diğer yapısal unsurlar ise KKD-uzanımlı faylardır.

Bu faylar üzerindeki en net kinematik veriler 4, 7 ve 8 nolu gözlem lokasyonlarıdır. Gökdere'nin doğusunda bulunan 4 nolu lokasyonda, fay düzlem doğrultuları  $K28-47^\circ D$  eğim açıları ise baskın olarak GD'ye  $60-70^\circ$ 'dir. Bu lokasyondaki yan yatım açıları genelde kuzeyden ve  $10-30^\circ$  arasında değişmektedir. Kızıldere köyünün girişinde yer alan 7 nolu lokasyonda ise fay doğrultuları  $K40-60^\circ D$ 'dir. Fay düzlemleri genel olarak  $>60^\circ$  GD'ye eğimlidir. Bu düzlemler üzerinde saptanan kayma çizikleri doğudan ve batıdan  $50-60^\circ$ 'lik yan yatım açılarında sahiptir. Bu lokasyonda gözlenen asimetrik yapılar ve kayma çizikleri faylanmanın oblik atımlı normal faylanma karakterinde olduğuna işaret eder. Hesaplamalar  $\sigma_1$  için düşeye yakın sonuçlar gösterirken, sırasıyla  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  eksenlerinin konumları  $67^\circ/24^\circ$  ve  $161^\circ/9^\circ$  olarak tespit edilmiştir (Çizelge 1). Bu lokasyondaki faylanmayı oluşturan paleostres KD-GB sıkışma ve KB-GD açılmaya ilişkilidir (Şekil 10). Kızıldere köyünün KD'sinde bulunan 8 nolu lokasyondan elde edilen kinematik veriler, Paket 2 içinde yer alan sedimenter kayalarda gözlenen yüksek açılı fay düzlemleri ile karakterize olur. Saptanan fay düzlemleri  $K10-30^\circ B$  doğrultulu ve eğim yönleri  $71^\circ GB$  ile  $68^\circ KD$  arasında değişmektedir. Fay düzlemleri üzerinde saptanan fay çiziklerinin  $<18^\circ$  yan yatım açısına sahip olması faylanmanın doğrultu-atım karakterli olduğu gösterir. Fay düzlemi verilerinin ters çözümü KD-GB yönlü sıkışma ve KB-GD yönlü genişleme kuvvetleri ile temsil edilen bir yersel gerilmeyi ortaya koyar (Şekil 10). 5 nolu lokasyon BMG'ye dik gelişmiş Kızıldere'nin kuzeyindeki en derin vadi içinde bulunur. Bu lokasyondaki Kuvaterner ve Holosen aktivitesi saptanan faylar tarafından kesilmiş fay düzlemlerinin uzanımları yaklaşık K-G'dir. Paket 1 ve 2'ye ait kaya birimlerini deforme ettiği gözlenen fay düzlemleri  $74^\circ-85^\circ$  arasında değişen eğim açılarıyla KD ve GD ya eğimlidir. Fay düzlemleri üzerindeki kayma çizikleri kuzeyden  $12-42^\circ$  arasında değişen yan yatım açısı yapmaktadır. Toplanan kinematik verilerin hesaplama sonuçları, sırasıyla  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve

$\sigma_3$  eksenlerinin konumlarının  $308/25^\circ$ ,  $152/63^\circ$  ve  $43/10^\circ$  olduğunu gösterir (Çizelge 1). Bu lokasyondaki fay düzlem çözümleri dikkate alındığında KB-GD yönlü bir sıkışma ve KD-GB yönlü bir genişleme ile ilişkili doğrultu atımlı faylanmanın gerçekleştiği gözlenir (Şekil 10). 6 nolu lokasyonda ise doğrultuları  $K8^\circ B$  ile  $K12^\circ D$  arasında değişen faylar  $75-82^\circ$  lik açılarla doğuya eğimlidir. Kuzeyden ve güneyden  $12^\circ-22^\circ$  arasında değişen yan yatım açıları bu noktadaki faylanmanın doğrultu atımlı karakterini yansıtmakla beraber, fay düzlemindeki asimetric yapılar hareketin sağ yönlü olduğunu gösterir. Fay düzlemi verilerinin ters çözümüne göre bu faylanma KKB-GGD yönlü genişleme ve buna dik yönlü sıkışma kuvvetleri ile ilişkilidir (Şekil 10). Özellikle K-KD uzanımlı faylardan alınan ölçülerden elde edilen paleostres sonuçları 5 nolu lokasyon dışında, 4, 6, 7 ve 8 nolu lokasyonlar için birbirine yakın sonuçlar içermektedir ve birbirleri ile tutarlıdır. Bu lokasyonlar içinde özellikle  $\sigma_3$ 'ün az miktarda düşey eksen üzerinde yer değiştirmesi ve 5 nolu lokasyondaki farklılık ise büyük bir olasılıkla yersel olarak rotasyon ile ilişkili olmalıdır. Bütün bu lokasyonlar dışında, 12 nolu lokasyonda ölçülen fay düzlemleri ise  $40$  ile  $65^\circ$  arasında değişen eğim açlarına sahiptir. Fayın doğrultu çizgisi ile kayma çiziklerinin arasında kalan açılar  $40^\circ$  civarında ölçülmüş ve elde edilen analiz sonuçları ise KB-GD yönlü açılmaya işaret etmiştir. Bu lokasyonda gözlenen düşük açılı kayma düzlemleri Paket 1 olarak adlandırılan tortul istif içerisindeki tortullaşma ile yaşıt heyelan düzlemleri olarak ölçülmüştür. Bu sebeple, tanımlanan deformasyon yapıları D1 fazı içerisinde değerlendirilmiş, ancak hesaplanan yersel gerilme alanı bölgesel gerilme ile ilişkili olmadığından, ilerleyen yorumlarda heyelandan alınan bu veri değerlendirilmeye katılmamıştır.

### ***Deformasyon fazı II (D<sub>2</sub>)***

Çalışma alanında bu deformasyonla ilgili en önemli yapısal öge Gökdere Fayıdır (GF). Bu fay

ile ilişkili normal faylanma morfolojisini yansıtan fay basamakları Gökdere ve güneyinde net olarak gözlenmektedir (Şekil 10). Bu fay boyunca ölçülen yüksek açılı fay düzlemleri genellikle KB-GD doğrultulu olup güneybatıya doğru eğimlidir. Kinematik analizlerde kullanılmak üzere GF boyunca toplamda 8 lokasyonda 44 adet fay verisi değerlendirilmiştir. 9 nolu lokasyonda  $K60^\circ B$  doğrultulu ve  $50^\circ GB$ 'ye eğimli fay düzlemi üzerinde doğudan  $83^\circ$  yan yatım açısına sahip sadece tek bir ölçü değerlendirilebilmiştir. 10 nolu lokasyona ait analizlerde, fay düzlemlerinin eğim açıları  $75-84^\circ$  arasında değişir. Bu düzlemler üzerindeki kayma çizikleri genelde batı yönlü ve  $42$  ile  $81^\circ$  arasında değişen değerlere sahiptir. Hesaplanan paleostres yönleri fayın bu noktada KD-GB yönlü genişleme ile ilişkili geliştiğini gösterir (Şekil 10). Saptanan fay düzlemleri  $K84^\circ B$  ve  $K32^\circ D$  değerleri arasında doğrultulara sahip olan 11 nolu lokasyonda ölçülen eğim açıları ise kuzey ve güneye baskın olarak  $70^\circ$ 'den yüksek eğimlenmeler sunar. Düzlemler üzerindeki fay çizikleri  $75$  ile  $80^\circ$  arasında değişiklik gösterirken genel karakter eğim atımlı bir normal faylanmaya işaret eder. Analiz sonuçları bu lokasyondaki faylanmanın KKD-GGB yönlü açılma ile ilişkili olduğunu vurgular. 13 nolu lokasyonda ölçülen ve analizde kullanılan fay düzlemleri ise  $K56-82^\circ B$  doğrultuludur. Bu noktada fayın  $60-82^\circ$  arasında değişen güneye eğimli düzlemlerinin yanında antitetik olarak gelişmiş kuzeye eğimli düzlemleri de mevcuttur. Kayma çiziklerinin doğudan ve batıdan yapmış olduğu  $85^\circ$ 'lik yüksek yan yatım açıları faylanmanın eğim atımlı normal karakterde gerçekleştiğini göstermektedir. Buna paralel en büyük asal gerilme ( $\sigma_1$ ) vektörünün dalımı  $70^\circ$ 'den yüksek ve düşeye yakın sonuçlar verirken, diğer gerilmelerin ( $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$ ) konumları sırasıyla  $9^\circ$  ve  $65^\circ$ 'dir (Çizelge 1). Hesaplanan paleostres yönleri KD-GB yönlü genişlemeye işaret etmektedir (Şekil 10). Arazide saptanan fay düzlemleri genel olarak  $K78-84^\circ B/62-65^\circ GB$  konumlu olan 14 nolu lokasyonda not edilen fay çizikleri, batıdan  $65$  ile

72° arasında değişen yan yatım açılarına sahiptir. Bu veriler ile düzlem üzerindeki asimetrik yapılar, bölgedeki faylanmanın sağ yanal oblik bileşene sahip olan normal faylanma ile karakterize olduğu gösterir. Kinematik analiz sonucuna göre gerilme KD-GB yönlü genişleme ile karakterize olur. Üzerinde en çok veri toplanabilen lokasyon 15 nolu istasyondur. Bu noktada fay düzlemleri K25-62°B doğrultulu ve baskın olarak güneye 86°'ye ulaşan eğim açılarına sahiptir. Kayma çiziklerine ait yan yatım açıları ise 50 ile 83° arasında değişen değerler sunar. Toplanan kinematik verilerin analiz sonuçları, sırasıyla  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  eksenlerinin konumlarının 25/8°, 179/81° ve 295/4° olduğunu gösterir (Çizelge 1). Fay düzlemi verilerinin ters çözümü KD-GB yönlü genişleme kuvvetleri ile temsil edilen bir gerilmeyi ortaya koyar (Şekil 10).

### Deformasyon fazı III (D<sub>3</sub>)

Bölgede gözlenen en son deformasyon fazı ise BMF Sistemi'nin en doğu bölümünü temsil eden Buharkent Segmenti ile ilişkilidir. Bu yapısal öge üzerindeki lokasyon sayısı, üzerinde geliştiği kaya türlerinin pekleşme derecesinin düşük olması nedeniyle oldukça nadir olarak gözlenir. Bu bağlamda, Buharkent Segmenti üzerinde kinematik veri elde edilebilecek sadece 2 lokasyonda gözlemler yapılabilmektedir. Daha kuzeydeki 17 nolu gözlem istasyonunda fay düzlemi doğrultuları batı ve doğu ile 78° ile 68° arasında değişen açı yapar. Bu noktadaki düzlem eğim açıları ise 51-88° güneybatı ve güneydoğu yönlüdür. Fay düzlemleri üzerindeki kayma çizikleri 50 ile 80° arasında değişen yan yatım açılarına sahiptir.

**Çizelge 1.** Büyük Menderes Grabeni doğu ucunda yer alan faylardan alınan kinematik verilerin hesaplanmış paleostres analizi sonuçlarına ait ana asal gerilme konumları, fay türleri ve tektonik fazları (N: ölçü sayısı,  $\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3$ : büyükten küçüğe asal gerilmeleri, DF<sub>1</sub> - DF<sub>2</sub> - DF<sub>3</sub>: Deformasyon Fazlarını gösterir. Ölçüm lokasyonları için Şekil 10'a bakınız).

**Table 1.** The principal stress positions, fault types and tectonic phases of the calculated paleostress analysis results of kinematic data taken from the faults at the eastern termination of Büyük Menderes Graben (N: number of measurements,  $\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3$ : maximum to minimum principal stresses, DF<sub>1</sub> - DF<sub>2</sub> - DF<sub>3</sub>: Indicates Deformation Phases (see Figure 10 for measurement locations).

Lokasyon	Fay İsmi	N	$\sigma_1$ ★		$\sigma_2$ ★		$\sigma_3$ ▲		Tektonik Faz	Fay türü/ Hareket
			Yönlem	Dalım	Yönlem	Dalım	Yönlem	Dalım		
1	Büyük Menderes	1	84,5	54,3	349,7	3,4	257,3	35,5	DF <sub>1</sub>	Eğim atımlı/ Normal
2	Detachment	5	233,1	83,2	125,9	2	35,7	6,5		
3	(Sıyrıлма) Fayı	2	232,6	57,3	139,8	1,8	48,7	32,6		
4		3	268,9	62,1	46,5	21,3	143,4	17,1	DF <sub>1</sub>	Doğrultu atımlı/ Verev atımlı/ Sol/Sağ yanal
5		4	307,8	25,2	152,4	62,7	42,5	10		
6	K-KD uzanımlı	4	269,9	45,5	78,5	44	174	5,8		
7	Faylar	4	269,2	64,7	66,9	23,7	160,7	8,6		
8		8	25,4	7,7	178,9	81,4	294,9	3,8		
9		1	117,5	85,1	295	4,9	25,1	0,2	DF <sub>2</sub>	Eğim/verev atımlı/ Normal
10		5	15,8	70,9	129,1	7,8	221,5	17,3		
11		5	97,2	74,9	275,4	15,1	5,5	0,5		
12		3	148,3	66,2	51,2	3,1	319,9	23,6		
13	Gökdere Fayı	7	47,1	71,1	291,1	8,6	198,5	16,8		
14		2	331,6	64,8	108,8	19	204,5	15,9		
15		18	80,3	85,5	306,7	3,1	216,5	3,3		
16		3	65,6	55,7	159,5	2,7	251,3	34,2	DF <sub>3</sub>	
17	Buharkent	12	354,4	68,6	116,9	11,9	210,8	17,5		
18	Segmenti	5	52,3	66,4	288,6	13,7	193,8	18,9		

Bu lokasyonda gözlenen asimetrik yapılar ve kayma çizikleri, faylanmanın baskın olarak eğim atımlı normal faylanma karakterinde olduğuna işaret eder. Analiz sonuçları  $\sigma_1$  için  $354^\circ/69^\circ$  gibi düşeye yakın bir sonuç gösterirken, sırasıyla  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  eksenlerinin konumları  $117^\circ/12^\circ$  ve  $211^\circ/18^\circ$  olarak hesaplanmıştır (Çizelge 1). Buharkent Segmenti'nin en güneydeki bölümü üzerinde bulunan 18 nolu lokasyondaki fay düzlemleri  $60-78^\circ$  arasında değişen doğrultu açıları ile KB-GD yönünde uzanır. Bu düzlemler GGB'ye doğru  $60-80^\circ$  eğim açlarına sahiptir. Fay düzlemleri üzerinde belirlenen kayma çizikleri genel olarak doğudan  $70-75^\circ$  yan yatım açısı yapmaktadır. Her iki lokasyon içinde analiz sonuçları, faylanmanın KD-GB yönlü genişleme ile ilişkili gerçekleştiğini göstermektedir (Şekil 10).

## TARTIŞMA

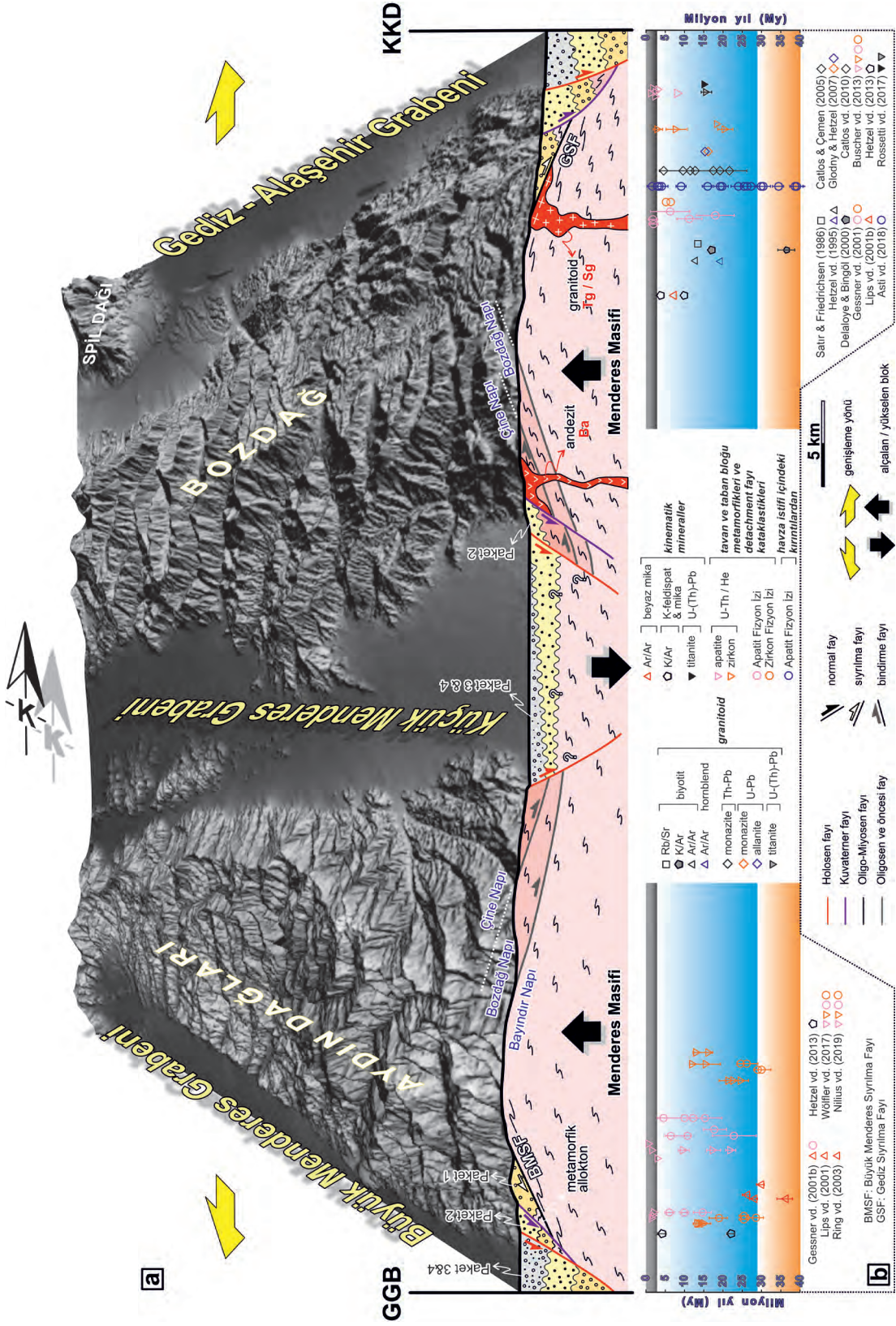
BAGB'nin jeolojik evrimi ve havza gelişimi ağırlıklı olarak 70'li yılların ortasından itibaren tartışılmaya başlanmış ve günümüzde tam bir fikir birliğine varılabilmemiş değildir. Bazı çalışmalarda genişlemenin yaşı üst Miyosen (yaklaşık Tortoniyen) ya da daha genç olarak sunulmuş (örn. Berckhemer, 1977; Dumont vd. 1979; Dewey ve Şengör, 1979; Angelier vd. 1981; Şengör, 1979 ve 1987; Yılmaz vd. 2000; Gürer vd. 2009), diğer yandan bazı çalışmalarda ise genişlemenin yaşı Oligosen sonu - alt Miyosen şeklinde savunulmuştur (örn. Seyitoğlu ve Scott, 1992; Emre ve Sözbilir, 1997; Sözbilir, 2005). Bu bağlamda, bölgenin jeodinamik ve jeolojik tarihçesinin ortaya çıkarılması için birçok mutlak yaş çalışması 1980'lerin ortasından itibaren başlamış ve günümüze doğru hızla artarak devam etmiştir. Bu çalışmalarda birçok farklı yöntemle metamorfik ve plütonik kayalar ile faylanma mekanizması ektisinde gelişmiş mineraller tarihlendirilerek, bölgenin jeolojik/jeodinamik evrimi yorumlanmaya çalışılmış, bölgenin genişleme ile ilişkili plütonik kaya yerleşimi, yükselim hızı ve zamanlaması tartışılmıştır. Bütün bu yaş verileri Şekil 14b'de birleştirilerek

sunulmuştur. Bölgede çalışma konusu ile doğrudan ilişkili olmasa da, yapılan ilk radyometrik çalışma Satır ve Friedrichsen (1986)'dır. Bu çalışmada GAG'de aldıkları sokulum kayası örneğindeki biyotit Rb/Sr yaşı olan  $13 \pm 1$  My genişleme ile ilişkilendirilmiştir. Jeolojik olarak en yaşlı veriler ise, BMG'de Lips vd. (2001)'de sunulan  $36 \pm 2$  My'lık sıkışma ile ilişkili ve kuzeye taşınma ile eş yaşlı beyaz mikadan elde edilen Ar/Ar yaşı iken, GAG'de Delaloye ve Bingöl (2000)'ün Salihli granodiyoritinin biyotitlerinden elde ederek önerdiği  $36,4 \pm 2,2$  My'lık K/Ar soğuma yaşıdır. Özellikle GAG'deki Salihli ve Turgutlu granitoidlerinde jeokronolojik yaş çalışmaları yoğundur (örn. Satır ve Friedrichsen, 1986; Hetzel vd. 1995; Catlos ve Çemen, 2005, Glodny ve Hetzel, 2007; Catlos vd. 2010). Bu çalışmalardaki yaş verileri farklı metodlarda ve farklı minerallerde gerçekleştirilmiş olmakla beraber,  $21,7 \pm 4,5$  ile  $4,5 \pm 1,0$  My arasında çeşitlilik gösterir (Şekil 14b). Diğer yandan Gessner vd. (2001b) ve Ring vd. (2003), BMG'deki metamorfik kayaların beyaz mikalarında elde ettikleri  $27,9 \pm 1,0$  My ile geniş bir dağılım gösteren apatit ve zirkon füzyon izi yaşlarını beraber değerlendirerek iki evreli bir soğuma yanında sıyrılmaya ile ilişkili yüzeyleme modeli önermişlerdir. Erken soğuma döneminde Gördes ve Çine ast-masiflerinin yaklaşık 25 My aralığında yüzeye yakın bir sıcaklığa geldiği ve Orta Masif'te ise MÇK'nin Pliyosen'den itibaren düşük açılı faylanma mekanizması ile gerçekleşen bir sıyrılmaya üstü havza gelişimi ile sonuçlandığı savunulmuştur. Fakat bu çalışmalarda, soğuma yaşları ile belirlenen hipotetik olarak kurulmuş jeolojik örgü, saha verileri ile desteklenememektedir. Bu bağlamda, gerek GAG gerek BMG'deki Miyosen yaşlı çökellerin depolandığı havzaların hangi evrede, geometride ve tektonik modelde oluşmuş olabileceği tam olarak açıklanamamıştır. Lips vd. (2001) BMSF'nin, yarı sünümlü bir ortama ait yapısal bir ögenin sık koşullarda yeniden normal fay olarak çalıştığını belirterek, GAG'de söz konusu düşük açılı normal faylanma ile ilişkili deformasyon yapılarından elde edilen beyaz



mikayı  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  yöntemiyle  $7\pm 1$  My olarak tarihlendirmiş ve yüzeyleme mekanizmasının çok evreli olabileceğine işaret etmiştir. Özellikle son yıllarda Menderes Masifi'nde Buscher vd. (2013), Rossetti vd. (2017) ve Wölfler vd. (2017) tarafından yapılan titanit, zirkon ve apatit gibi mineraller üzerinden elde edilen yaşlar ise  $29,0 \pm 1,9$  ile  $0,8 \pm 0,2$  My arasında değişen oldukça geniş bir yaş aralığı sunmaktadır (Şekil 14b). Bu yaş verilerinde, nispeten alındıkları kaya litolojisi ve lokasyonları farklı olsada, apatitlerin (genelde 5 My ve daha genç) zirkonlardan (genelde 5 – 25 My arası) daha geç yaşlar sunduğu görülmekle beraber bu ilişki yüzeyleme mekanizmasıyla da uyumludur. GAG özelinde yapılmış Asti vd. (2018)'in sunduğu detritik apatitlerden yapılan füzyon izi yaşları da, stratigrafik istifte uyumlu bir şekilde Oligosen sonundan itibaren en az üç evreli bir yüzeyleme mekanizmasına işaret etmektedir. Son dönemde BMG'de yapılmış Nilius vd. (2019), zirkon/apatit füzyon izi ve U-Th/He yaşlarına dayanarak, genişlemenin erken Miyosen'de başladığını, Miyosen-Pliyosen de düşük açılı normal faylanma evresi ile devam ettiğini, yüksek açılı faylanma evresinin ise Kuvaterner'den itibaren oluştuğunu belirtir. Bütün kronolojik yaş verileri değerlendirildiğinde, Eosen sonu – Oligosen ortası sıkışma evresi, üst Oligosen - erken Miyosen'de genişleme ile ilişkili yapıların oluşumuyla devam etmiş ve erken – orta Miyosen'den itibaren granitoid yerleşimleri (Salihli ve Turgutlu granitoidleri) bu genişlemeye eşlik etmiştir. Bu genişleme, hızını Pliyosen sonu Pleyistosen başı gibi arttırmış ve Masif'in hızlı yükselimini sağlamıştır. Özellikle Şekil 14b'de birleştirilen ve literatürdeki 2,5 My ve sonrası U-Th/He ve füzyon izi yaşları da bu hızlı yükselmeyi desteklemektedir. Bu kronolojik evreler Şekil 14b'de turuncu renkte sıkışma, mavi renkte genişleme ve gri renkte genişlemenin hızlandığı seviyelerle gösterilmiştir. Jeolojik olaylarla ilişkili olan bu renklerin anlamları, bu çalışma sonucunda elde edilen verilerle de tutarlıdır. Mavi kısım sıyrılma üstü havza evresini, gri kısım ise genişlemenin hızlanması ile geçilen

rift havza dönemini göstermektedir. Diğer yandan, literatürde hali hazırda sıyrılma üstü havza evresini denetleyen sıyrılma fayının, Candan vd. (1992)'nin haritaladığı eski bindirme sınırlarına karşılık geldiği de bilinmektedir. Lips vd. (2001) BMSF'yi Oligosen öncesi naplaşma sırasında gelişmiş olan eski bir ters fayın tekrar aktif hale gelmesi şeklinde yorumlar. Tüm bu bulgulara göre, BMG'deki düşük açılı fay düzleminin daha önce kuzeye doğru olan ve ters faylanma ile ilişkili hareketinin, daha sonra Miyosen'deki genişleme ile güneye doğru düşük açılı bir normal fay şeklinde çalışmış olma olasılığı da kuvvetle muhtemeldir. BMG içindeki Miyosen yaşlı formasyonlar Gürer vd. (2009) dışında daima genişleme temelli havzalarla ilişkilendirilmiştir (örn. Sözbilir ve Emre, 1990; Seyitoğlu ve Scott, 1991 ve 1992; Seyitoğlu vd. 1992, Emre ve Sözbilir, 1997; Koçyiğit, 2015). Çifçi vd. (2011), Gürer vd. (2009)'un Miyosen yaşlı istifleri denetlediğini belirttiği ve transpresyonel karakterli K-G uzanımlı fayların Sözbilir ve Emre (1990)'da belirtilen genişleme kontrolünde gelişmiş olan transfer fayları olması gerektiğine vurgu yapar. Diğer yandan, arazi çalışmalarında haritalanan bu K-KD uzanımlı fayların, Anadolu levhasının saatin tersi yönündeki dönmesi (Rotstein, 1984; Kissel ve Laj, 1988; Oral vd. 1995; Reilinger vd. 1997; McClusky vd. 2000; Doglioni vd. 2002) ile ilişkili olabilecek bağdaştırma (accomodation) fayları ya da genişleme öncesi evredeki naplaşma döneminden kalıtsal yırtılma (tear) fayları olması ihtimali de göz ardı edilmemelidir. Özellikle grabenleri batıdan sınırlayan İzmir – Balıkesir Transfer Zonu içinde ve yakın çevresinde aynı fay düzlemi üzerinde farklı evrelere ait doğrultu atım ve eğim atımlı normal faylanmayı belgeleyen veriler olduğu bilinmektedir (örn. Dumot vd. 1981; Sözbilir, 2002; Sözbilir vd. 2011; Uzel vd. 2013, Sümer, 2015). Fakat, BMG içindeki gerek literatürde sunulan gerekse bu çalışmadaki veriler, Paket 1'den başlamak üzere havzadaki tüm birimlerin dolgu geometrileri ve geçirdikleri deformasyon tipi açısından doğrudan genişleme ürünü bir havzada çökeldiklerine işaret etmektedir. Diğer yandan, Alçıçek vd. (2007) ve Seyitoğlu ve



**Şekil 14.** (a) Sayısallaştırılmış 3 boyutlu dijital yükseklik modeli ile Batı Anadolu grabenlerinin enine jeoloji kesitinin birleştirilmiş görüntüsü. Kesitin oluşturulmasında, GAG için Sözbilir (1986); Çiftçi ve Bozkurt (2010), KMG için Erinç (1955); Bozkurt ve Rojay (2005); Rojay vd. (2005); Emre ve Sözbilir (2007), BMG için ise bu çalışmadaki veriler harmanlanarak kullanılmıştır. Tg: Turgutlu; Sg: Salihli, granitleri, Ba: Başova andeziti. Menderes Masifi içindeki nap paketlerinin sınırları ve isimleri Gessner vd. (2001b)'den alınmıştır. (b) Literatürde sunulmuş Menderes Masifin'in yüzeylemesine ilişkin jeokronolojik veriler. Turuncu renk granitoidlerin ilk kristalizasyon evresini, mavi olan bölüm genişlemenin başlangıcından itibaren gelişen sıyrıлма üstü havza evresini, koyu gri bölüm ise rift havzası evresine geçişi yansıtmaktadır.

**Figure 14.** (a) Combined view of geological section of the Western Anatolian grabens and 3D digital elevation model of the region compiled from Sözbilir (1986); Çiftçi and Bozkurt (2010) for GAG, Erinç (1955) and Bozkurt and Rojay (2005); Rojay et al. (2005); Emre and Sözbilir (2007) for KMG, and data from this study for BMG. Tg: Turgutlu (Tg) and Salihli (Sg) granites and Basova andesite (Ba). The tectonic contacts and names of nappe packages within the Menderes Massif are taken from Gessner et al. (2001b). (b) Geochronological data on the uplifting mechanism of the Menderes Massif are presented in the literature. Orange shows the first crystallization phase of the granitoids, blue reflects the supra-detachment basin phase that developed from the beginning of the extension, and dark-gray represents the transition phase to rift basin.

Işık (2015), çalışma alanındaki kaya topluluklarını BMG içindeki diğer jeolojik birimlerden ayrı tutarak, oluşumlarının Babadağ Fayı kontrolünde geliştiğini savunur. Alçıçek vd. (2007) MÇK ve sıyrıлма fayı ile ilişkili jeolojik evrim tartışmalarına girmeyerek bu çalışmanın da sınırlarını oluşturan alanda sıyrıлма fayı ile ilgili herhangi bir arazi verisi sunmamaktadır. Oysaki gerek yaş verileri gerekse tortul fasiyes özellikleri, çalışma alanında ayırtılmış Paket 1'in Sözbilir ve Emre (1990)'da tanımlanmış Hasköy Formasyonu ile benzer olduğunu göstermektedir. Hatta Şen ve Seyitoğlu (2009), aynı formasyonun yaşını erken-orta

Miyosen şeklinde revize etmiştir. Bu bağlamda, Seyitoğlu vd. (2004)'de önerilen erken Miyosen'de orta MÇK'nin başlangıcına karşılık gelen ve dolayısıyla BMSF kontrolünde gelişmiş olması gereken tortul istif bu alanda yüzlek veren Paket 1'e karşılık gelmektedir. Tarafımızca yapılan arazi gözlemlerine göre, Seyitoğlu ve Işık (2015)'te sunulan ve erken Miyosen'deki Batı Anadolu paleocoğrafyasını gösteren blok diyagramda bulunan Babadağ Fayı'nın erken Miyosen'deki aktivitesi ile ilgili herhangi bir veri gözlenmemiş, BMG'nin kuzeyine karşılık gelen alandaki çökel topluluğunun bu fay tarafından denetlendiğine dair bir stratigrafik/sedimentolojik ilişki saptanamamıştır. Yaptığımız çalışmada elde edilen stratigrafik ilişkiler, tortul geometrileri ve bunların graben içerisinde yanal yöndeki korelasyonları, Paket 1'in batıya doğru Sözbilir ve Emre (1990) ile Şen ve Seyitoğlu (2009)'da tanımlanmış Hasköy Formasyonu ile denestirilebileceğine ve doğrudan BMSF kontrolünde geliştiğine işaret eder. Diğer yandan, son yıllarda yapılan çalışmalarda en azından BMSF'nin erken Miyosen'de aktif olduğu kabul edilmektedir (örn. Hetzel vd. 2013; Koçyiğit, 2015; Seyitoğlu ve Işık, 2015; Wölfler vd. 2017). Bu veriler ile Ring vd. (2003)'ün yaklaşık 25 My aralığında masifin yüzeye yakın bir sıcaklığa geldiği bilgisi birleştirildiğinde, Batı Anadolu'da genişlemenin başlangıç yaşının Oligosen sonu olması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmadaki arazi verileri de erken Miyosen'in sonundan itibaren Paket 1'in doğrudan BMSF kontrolünde geliştiğini göstermektedir. Dolayısıyla genişlemenin başlangıç yaşının daha erken bir dönemde olması mümkün görünmemektedir. Diğer yandan GAG ve BMG'de yapılmış stratigrafik, sedimentolojik, termokronolojik ve jeomorfolojik tabanlı çalışmalar yükselimin iki ya da daha çok evrede olduğuna işaret eder (örn. Lips vd. 2001; Purvis ve Robertson, 2004; Çiftçi ve Bozkurt, 2010; Kent vd. 2016; Rossetti vd. 2017; Wölfler vd. 2017). Bu çalışmadaki gerek stratigrafik gerekse

yapısal jeolojik arazi verileri de benzer şekilde bu yöndedir. Arazide toplanan fay verilerinden elde edilen paleostres sonuçları, erken Miyosen'in sonundan itibaren günümüze genişlemanın KB ve KD ekseninde salındığını, halihazırda, en yaşlı (BMSF), orta yaşlı (GF) ve en genç (BS) yapısal elemanları için en küçük asal gerilmenin yatay düzlem üzerinde olduğu fay mekanizmalarıyla ilişkili oluştuğunu gösterir. Paket 1 ve Paket 2 arasındaki havza içi uyumsuzluk ise, dalan Afrika levhasındaki geri çekilme (roll-back) hızı ile doğru orantılı olarak, bölgenin orta Miyosen'de yükselim hızının göreceli olarak artması ve buna bağlı tortul girdinin fazlaşmasına bağlı gelişen bir jeolojik olayla ilişkili olmalıdır (Gessner vd. 2013; Brun vd. 2016; Uzel vd. 2017). Bu küresel ölçekte Shackleton ve Kennett (1975)'de ilk verileri ile ortaya konan ve sonradan "Orta Miyosen İklimsel Isınması (Middle Miocene Climatic Optimum)" (Zachos vd. 2001) olarak tanımlanan olayla bağlantılı gelişen ve Raymo ve Ruddiman (1992)'nin önerdiği orta Miyosen'de Alp-Himalaya kuşağındaki yükselim ve buna bağlı aşınımın hızının arttığı yönündeki görüşle paralel şekilde Batı Anadolu'yu da kapsayarak etkileyen jeolojik olaylarla ilişkili olmalıdır. Bu konu henüz ülkemizde çok az araştırmaya konu olsa da, gelecekte tartışılması ve çok disiplinli çalışmalar ile araştırılması gereken önemli bir jeolojik problemdir.

## SONUÇLAR

BMG'nin en doğu sınırında yapılan arazi tabanlı jeolojik çalışmaların sonuçlarının daha iyi anlaşılması adına, bu çalışmada ve literatürde sunulmuş diğer jeolojik/jeokronolojik veriler yardımıyla genelleştirilmiş bir jeolojik kesit oluşturulmuş ve bu kesite dijital yükseklik modeli giydirilerek 3 boyutlu hale getirilmiştir (Şekil 14a). Bu jeolojik blok diyagram kesitin de ifade ettiği gibi;

- Çalışma alanında yüzlek veren Miyosen-Kuvaterner yaşlı istif, birbirlerinden uyumsuzluklarla ayrılan 4 ana paket altında değerlendirilmiştir. Bunlar yaşlıdan gence doğru; sıyrılma üstü havza istifini içeren alt-orta Miyosen yaşlı Paket 1, orta – üst Miyosen yaşlı Paket 2 ve rift havza istifini içeren Pliyo-Kuvaterner yaşlı Paket 3 ve 4'tür.
- Bölgedeki havza gelişimini ve deformasyonunu sağlayan yapısal elemanlar ise, yine yaşlıdan gence doğru; Miyosen yaşlı BMSF, Pliyo-Kuvaterner yaşlı GF ve en genç graben dolgusunu kesen Holosen yaşlı BMF Sistemi'nin en doğu bölümünü oluşturan Buharkent Segmenti'dir.
- Arazi gözlemleri ve kinematik analiz sonuçları, BMG kuzey kenarındaki yapısal elemanların düşük açıdan yüksek açılıya doğru ilerleyerek, havzanın gelişim yönüne paralel olarak güneye doğru yuvarlanan reze modeli (rolling-hinge) şeklinde gençleştiğini, havza oluşumunun da sıyrılma üstü havzadan rift havzasına doğru evrildiğini göstermektedir.

## KATKI BELİRTME

Bu çalışma kapsamında elde edilen fay verilerinin analizleri için kullanılan FaultKin 8 yazılımı için Rick Allmendinger ve yazılımın sağlandığı bağlantı için Cornell Üniversitesi'ne, makalenin çok dikkatli okumalarıyla bilimsel açıdan yükseltilmesini sağlayan Bora Rojay, Şule Gürboğa ve diğer hakeme teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca, yazarlar olarak yapılan arazi çalışmalarının bir bölümüne katılan Dokuz Eylül ve Utrecht Üniversitesi öğrencileri İsmail Duran, Emre Kırhan ve Jannah De Roos'a teşekkür ederiz.

## EXTENDED SUMMARY




*Western Anatolia, described as one of the best examples of a continental extensional region in*

the world, has been subject to much geological research since the middle of the 19<sup>th</sup> century. Especially in the 1950-60s, geological studies accelerated after the horst-graben structures were defined in this region. Subsequently, in the middle of the 1980s, metamorphic core complex mechanisms were first adapted to the Cyclades island group and then to Western Anatolia. In this context, the Gediz Detachment Fault, one of the best examples of a low-angle detachment fault in the world, was propounded in geological maps during the 1990s, and thus studies on the crustal-scale extensional deformation and related structures of Western Anatolia became quite numerous. Nowadays, although this topic has lost some of its popularity, the subject of extension in Western Anatolia and its geodynamic processes is still an important geological issue in the scientific community. When we look at the published studies, the focus has often been on the Gediz-Alaşehir Graben in terms of both basin development and tectonics; on the other hand, research on the Büyük Menderes Graben is scarce.

In this study, new geological data and field observations along the eastern termination of the Büyük Menderes Graben are presented. Miocene-Quaternary successions exposed in the study area were evaluated under 4 main packages, which are separated from each other by angular and intra-basinal unconformities. These packages are, in chronological order from older to younger, the lower-middle Miocene (Package 1) and middle-upper Miocene (Package 2) together with supra-detachment basin-fill units; then packages 3 and 4 which comprise the rift basin sequence in Plio-Quaternary. Structural elements providing the basin formation and deformation in the region are defined as, from older to younger, the Büyük Menderes Detachment Fault in Miocene, the Gökdere Fault in Plio-Quaternary, and the Holocene Büyük Menderes Fault Zone that cuts and displays the youngest graben fill deposits.

Supra-detachment basins are characterized by (1) low-angle normal faults, (2) a thick and hot crust, (3) calc-alkaline volcanism, (4) coeval extensional granodioritic intrusions, (5) a back-arc volcanic environment, and (6) alluvial fan to braided fluvial and lacustrine sedimentary basin fill up to 2000 m in thickness. However, EW-orienting rift basins are represented by (1) high-angle normal faults, (2) a thin and cold crust, (3) alkaline-tholeiitic volcanism, (4) high-heat-flux (geothermal energy), and (5) dominant alluvial fan and meandering to braided fluvial basin-fill deposits. Field observations and kinematic analysis reveal that tectonic structures on the northern margin of the Büyük Menderes Graben evolved from low-angle to high-angle normal faulting, and rejuvenated south parallel to the basin propagation with a rolling-hinge model. Thus, the basin formation evolved from a supra-detachment type to a rift type.

## ORCID

Ökmen Sümer  <https://orcid.org/0000-0003-3168-8728>  
Hasan Sözbilir  <https://orcid.org/0000-0002-3777-4830>  
Bora Uzel  <https://orcid.org/0000-0003-1703-5026>

## DEĞİNİLEN BELGELER/ REFERENCES

- Akarsu, İ., 1969. Ege Bölgesinin (Babadağ ve civarı) jeolojisi. Türkiye Jeoloji Bülteni, 12 (1-2), 1-9.
- Akartuna, M. 1962. İzmir-Torbalı-Seferihisar-Urla bölgesi jeolojisi hakkında. Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 59, 1-18.
- Akgün, F., Akyol, E., 1999. Palynostratigraphy of the coal-bearing Neogene deposits graben in Büyük Menderes Western Anatolia. Geobios, 32 (3), 367-383.
- Alçipek, H., Varol, B., Özkul, M., 2007. Sedimentary facies, depositional environments and palaeogeographic evolution of the Neogene Denizli Basin, SW Anatolia, Turkey. Sedimentary Geology, 202 (4), 596-637.
- Allmendinger, R.W., Gephardt, J.W., Marrett, R.A., 1989. Notes on fault slip analysis. Notes to the

- Geological Society of America short course on "Quantitative interpretation of joints and faults". Cornell University, Ithaca, New York, 56 s.
- Allmendinger, R.W., Cardozo, N., Fisher, D., 2012. Structural geology algorithms: Vectors and tensors. Cambridge University Press, Cambridge, 302 s.
- Ambraseys, N.N. 1988. Engineering seismology: Part I. Earthquake engineering & structural dynamics, 17 (1), 1-50.
- Angelier, J., Dumont, J.F., Karamandersi, 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.
- Angelier, J., Lyberis, N., Le Pichon, X., Barrier, E., Huchon, P., 1982. The tectonic development of the Hellenic arc and the Sea of Crete: a synthesis. Tectonophysics, 86 (1-3), 159-196.
- Arpat, E., Bingöl, E., 1969. Ege Bölgesi graben sisteminin gelişimi üzerine düşünceler. Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 73, 1-9.
- Asti, R., Malusà, M.G., Faccenna, C., 2018. Supradetachment basin evolution unravelled by detrital apatite fission track analysis: the Gediz Graben (Menderes Massif, Western Turkey). Basin Research, 30 (3), 502-521.
- Asti, R., Faccenna, C., Rossetti, F., Malusà, M.G., Gliozzi, E., Faranda, C., Lirer, F., Cosentino, D. 2019. The Gediz supradetachment system (SW Turkey): magmatism, tectonics, and sedimentation during crustal extension. Tectonics, 38 (4), 1414-1440.
- Berckhemer, H., 1977. Some aspects of the evolution of marginal seas deduced from observations in the Aegean region. In: Proceedings of the International Symposium on the Structural History of the Mediterranean Basins, Split, Yugoslavia, 303-314.
- Bozcu, M., 2010. Geology of Neogene basins of Buldan-Sarıcaova region and their importance in Western Anatolia neotectonics. International Journal of Earth Sciences, 99 (4), 851-861.
- Bozkurt, E., 2000. Timing of extension on the Büyük Menderes Graben, western Turkey, and its tectonic implications, (Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area, Editörler: E. Bozkurt, E., Winchester, J.A., Piper, J.D.A.). Geological Society, London, Special Publications 173, 385-403.
- Bozkurt, E. 2001. Neotectonics of Turkey—a synthesis. Geodinamica Acta, 14 (1-3), 3-30.
- Bozkurt, E., Park, R.G., 1994. Southern Menderes Massif: an incipient metamorphic core complex in western Anatolia, Turkey. Journal of the Geological Society, 151 (2), 213-216.
- Bozkurt, E., Park, R.G., 1999. The structure of the Palaeozoic schists in the southern Menderes Massif, western Turkey: a new approach to the origin of the Main Menderes Metamorphism and its relation to the Lycian Nappes. Geodinamica Acta, 12 (1), 25-42.
- Bozkurt, E., Satır, M., 2000. The southern Menderes Massif (western Turkey): geochronology and exhumation history. Geological Journal, 35 (3-4), 285-296.
- Bozkurt, E., Sözbilir, H., 2004. Tectonic evolution of the Gediz Graben: field evidence for an episodic, two-stage extension in western Turkey. Geological Magazine, 141 (1), 63-79.
- Bozkurt, E., Rojay, B., 2005. Episodic, two-stage Neogene extension and short-term intervening compression in Western Turkey: field evidence from the Kiraz Basin and Bozdağ Horst. Geodinamica Acta, 18 (3-4), 299-316.
- Bozkurt, E., Park, R.G., Winchester, J.A., 1993. Evidence against the core/cover interpretation of the southern sector of the Menderes Massif, west Turkey. Terra Nova, 5 (5), 445-451.
- Bozkurt, E., Winchester, J.A., Ruffet, G., Rojay, B. 2008. Age and Chemistry of Miocene Volcanic Rocks from the Kiraz Basin of the Küçük Menderes Graben: Its Significance for the Extensional Tectonics of Southwestern Anatolia, Turkey. Geodinamica Acta, 21 (5-6), 239-257.
- Brun, J.P., Faccenna, C., Gueydan, F., Sokoutis, D., Philippon, M., Kydonakis, K., Gorini, C. 2016. The two-stage Aegean extension, from localized to distributed, a result of slab rollback acceleration. Canadian Journal of Earth Sciences, 53 (11), 1142-1157.
- Buscher, J.T., Hampel, A., Hetzel, R., Dunkl, I., Glotzbach, C., Struffert, A., Akal, C., Rätz, M., 2013. Quantifying rates of detachment faulting and erosion in the central Menderes Massif (western

- Turkey) by thermochronology and cosmogenic <sup>10</sup>Be. *Journal of the Geological Society*, 170 (4), 669-683.
- Candan, O., Dora, O.Ö., Kun, N., Akal, C., Koray, E., 1992. Aydın Dağları (Menderes Masifi) güney kesimindeki allokon metamorfik birimler. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni*, 4 (1), 93-110.
- Catlos, E.J., Çemen, İ., 2005. Monazite ages and the evolution of the Menderes Massif, western Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 94 (2), 204-217.
- Catlos, E.J., Baker, C., Sorensen, S.S., Çemen, İ., Hançer, M., 2010. Geochemistry, geochronology, and cathodoluminescence imagery of the Salihli and Turgutlu granites (central Menderes Massif, western Turkey): Implications for Aegean tectonics. *Tectonophysics*, 488 (1-4), 110-130.
- Cohen, H.A., Dart, C.J., Akyüz, H.S., Barka, A., 1995. Syn-rift sedimentation and structural development of the Gediz and Büyük Menderes graben, western Turkey. *Journal of the Geological Society*, 152 (4), 629-638.
- Çağlayan, M.A., Öztürk, E.M., Öztürk, Z., Sav, H., Akat, U., 1980. Menderes Masifi güneyine ait bulgular ve yapısal yorum. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 10, 9-17.
- Çemen, İ., Catlos, E.J., Göğüş, O., Özerdem, C., Dilek, Y., Pavlides, S., 2006. Postcollisional extensional tectonics and exhumation of the Menderes massif in the Western Anatolia extended terrane, Turkey. *Geological Society of America, Special Papers*, 409, 353-379.
- Çifçi, G., Pamukçu, O., Çoruh, C., Çopur, S., Sözbilir, H., 2011. Shallow and deep structure of a supra-detachment basin based on geological, conventional deep seismic reflection sections and gravity data in the Buyuk Menderes Graben, western Anatolia. *Surveys in Geophysics*, 32 (3), 271-290.
- Çiftçi, N.B., Bozkurt, E., 2009. Evolution of the Miocene sedimentary fill of the Gediz Graben, SW Turkey. *Sedimentary Geology*, 216 (3-4), 49-79.
- Çiftçi, N.B., Bozkurt, E., 2010. Structural evolution of the Gediz Graben, SW Turkey: temporal and spatial variation of the graben basin. *Basin Research*, 22 (6), 846-873.
- Delaloye, M., Bingöl, E., 2000. Granitoids from western and northwestern Anatolia: geochemistry and modeling of geodynamic evolution. *International Geology Review*, 42 (3), 241-268.
- Demirel, V., Azıtepe A.M., Güven, A., 2011. Denizli-Buharkent KB-1 Sıcak Su Sondajı Kuyu Bitirme Raporu, MTA Rapor, No: 11461, Ankara, Türkiye.
- Dewey, J.F., Şengör, A.M.C., 1979. Aegean and surrounding regions: complex multiplate and continuum tectonics in a convergent zone. *Geological Society of America Bulletin*, 90 (1), 84-92.
- Doblas, M., 1998. Slickenside kinematic indicators. *Tectonophysics*, 295, 187-197.
- Doglioni, C., Agostini, S., Crespi, M., Innocenti, F., Manetti, P., Riguzzi, F., Savascin, Y., 2002. On the extension in western Anatolia and the Aegean Sea. *Journal of the Virtual Explorer*, 8, 169-183.
- Dora, Ö., 1976. Die Feldspäte als petrogenetischer indikator im Menderes Massiv/Westanatolien. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*, 127 (3), 289-310.
- Duman, T.Y., Emre, Ö., Özalp, S., Elmacı, H., 2011. 1:250000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası, Aydın (NJ35-11) Paftası, Seri No:7, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.
- Dumont, J.F., Uysal, Ş., Şimşek, Ş., Karamanderesi, I.H., Letouzey, J., 1979. Güneybatı Anadolu'daki Grabenlerin Oluşumu. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 92, 7-17.
- Dumont, J.F., Uysal, Ş., Şimşek, Ş., 1981. Superposition des jeux sur une faille et succession des événements néotectoniques. L'exemple d'Éphese (Turquie). *C.R. somm. Soc. géol. Fr.*, 1, 22-24.
- Emre, T., Sözbilir, H., 1997. Field evidence for metamorphic core complex, detachment faulting and accommodation faults in the Gediz and Büyük Menderes grabens, western Anatolia. In: Ö. Pişkin, M. Ergün, M.Y. Savaşçın, G. Tarcan, (eds.). *Proceedings of International Earth Sciences Colloquium on the Aegean Region*, vol. 2, 73-93.
- Emre, T., Sözbilir, H., 2007. Tectonic evolution of the Kiraz Basin, Küçük Menderes Graben: evidence for compression/uplift-related basin formation overprinted by extensional tectonics in West Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 16 (4), 441-470.

- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., 2011. 1:250000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası, Denizli (NJ35-12) Paftası, Seri No:12, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş., Şaroğlu, F., 2013. Active fault map of Turkey with explanatory text. Publications of the Mineral Research and Exploration, Special Publication Series 30, Ankara.
- Erdoğan, B., Güngör, T., 2004. The problem of the core-cover boundary of the Menderes Masif and an emplacement mechanism for regionally extensive gneissic granite, Western Anatolia Turkey. *Turkish Journal of Earth Science*, 13, 15-36.
- Erinç, S., 1955. Die morphologischen Entwicklungstadien der Küçük Menderes-Masse. Review of the Geographical Institute of the University of Istanbul, 2, 93-95.
- Evirgen, M.M., Ataman, G., 1982. Étude du métamorphisme de la zone centrale du Massif du Menderes. Isogrades, pressions et température. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 24 (7), 309-319.
- Eyidoğan, H., Jackson, J., 1985. A seismological study of normal faulting in the Demirci, Alaşehir and Gediz earthquakes of 1969–70 in western Turkey: Implications for the nature and geometry of deformation in the continental crust. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 81 (3), 569-607.
- Gessner, K., Ring, U., Lackmann, W., Passchier, C.W., Güngör, T., 1998. Structure and crystal thickening of the Menderes massif, southwest Turkey, and consequences for large-scale correlations between Greece and Turkey. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 32 (1), 145-152.
- Gessner, K., Piazzolo, S., Güngör, T., Ring, U., Kröner, A., Passchier, C.W., 2001a. Tectonic significance of deformation patterns in granitoid rocks of the Menderes nappes, Anatolide belt, southwest Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 89 (4), 766-780.
- Gessner, K., Ring, U., Johnson, C., Hetzel, R., Passchier, C.W., Güngör, T., 2001b. An active bivergent rolling-hinge detachment system: Central Menderes metamorphic core complex in western Turkey. *Geology*, 29 (7), 611-614.
- Gessner, K., Gallardo, L.A., Markwitz, V., Ring, U., Thomson, S.N., 2013. What caused the denudation of the Menderes Massif: Review of crustal evolution, lithosphere structure, and dynamic topography in southwest Turkey. *Gondwana Research*, 24 (1), 243-274.
- Glodny, J., Hetzel, R., 2007. Precise U–Pb ages of syn-extensional Miocene intrusions in the central Menderes Massif, western Turkey. *Geological Magazine*, 144 (2), 235-246.
- Göğüş, O., 2004. Geometry and tectonic significance of the Büyük Menderes detachment in the Başçayır area, Büyük Menderes graben, western Turkey Oklahoma State University, Yüksek Lisans tezi, 81 s.
- Gürer, Ö.F., Sarica-Filoreau, N., Özburan, M., Sangu, E., Doğan, B., 2009. Progressive development of the Büyük Menderes Graben based on new data, western Turkey. *Geological Magazine*, 146 (5), 652-673.
- Hamilton, W.J., Strickland, H. E., 1841. On the Geology of the Western Part of Asia Minor. *Transactions of the Geological Society of London*, 6, Second series, 1-39.
- Hancock, P.L., Barka, A., 1987. Kinematic indicators on active normal faults in western Turkey. *Journal of Structural Geology*, 9, 573–584.
- Hanmer, S., Passchier, C.W., 1991. Shear-sense indicators: a review. *Geological Survey of Canada Paper*, 90-17, 70 s.
- Hetzel, R., Ring, U., Akal, C., Troesch, M., 1995. Miocene NNE-directed extensional unroofing in the Menderes Massif, southwestern Turkey. *Journal of the Geological Society*, 152 (4), 639-654.
- Hetzel, R., Reischmann, T., 1996. Intrusion age of Pan-African augen gneisses in the southern Menderes Massif and the age of cooling after Alpine ductile extensional deformation. *Geological Magazine*, 133, 565-572.
- Hetzel, R., Zwingmann, H., Mulch, A., Gessner, K., Akal, C., Hampel, A., Güngör, T., Petschick, R., Mikes, T., Wedin, F., 2013. Spatiotemporal evolution of brittle normal faulting and fluid infiltration in detachment fault systems: A case study from the Menderes Massif, western Turkey. *Tectonics*, 32 (3), 364-376.



- Hilgen, F.J., Lourens, L.J., van Dam, J.A., 2012. The Neogene Period, (The Geologic Time Scale, Editörler: Gradstein, F.M. Ogg, J.G., Schmitz, M., Ogg, G.). Elsevier, Oxford, 923-978.
- Hippolyte, J.C., Bergerat, F., Gordon, M.B., Bellier, O., Esput, N., 2012. Keys and pitfalls in mesoscale fault analysis and paleostress reconstructions, the use of Angelier's methods. *Tectonophysics*, 581, 144-162.
- İzdar, E., 1971. Introduction to geology and metamorphism of the Menderes massif of western Turkey. *Geology and history of Turkey. The Petroleum Exploration Society of Libya, Tripoli, Libya*, 495-500.
- Jackson, J., McKenzie, D., 1988. The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East. *Geophysical Journal International*, 93 (1), 45-73.
- Kaya, A., 2015. The effects of extensional structures on the heat transport mechanism: an example from the Ortakçı geothermal field (Büyük Menderes Graben, SW Turkey). *Journal of African Earth Sciences*, 108, 74-88.
- Kaymakçı, N., 2006. Kinematic development and paleostress analysis of the Denizli Basin (Western Turkey): implications of spatial variation of relative paleostress magnitudes and orientations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27 (2), 207-222.
- Kent, E., Boulton, S.J., Stewart, I.S., Whittaker, A.C., Alçiçek, M.C., 2016. Geomorphic and geological constraints on the active normal faulting of the Gediz (Alaşehir) Graben, Western Turkey. *Journal of the Geological Society*, 173 (4), 666-678.
- Kissel, C., Laj, C., 1988. The Tertiary geodynamical evolution of the Aegean arc: a paleomagnetic reconstruction. *Tectonophysics*, 146 (1-4), 183-201.
- Koçyiğit, A., Özacar, A., 2003. Extensional neotectonic regime through the NE edge of the outer Isparta Angle, SW Turkey: new field and seismic data. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 12, 67-90.
- Koçyiğit, A., Yusufoglu, H., Bozkurt, E., 1999. Evidence from the Gediz graben for episodic two-stage extension in western Turkey. *Journal of the Geological Society*, 156 (3), 605-616.
- Koçyiğit, A., 2015. An overview on the main stratigraphic and structural features of a geothermal area: the case of Nazilli-Buharkent section of the Büyük Menderes Graben, SW Turkey. *Geodinamica Acta*, 27 (2-3), 85-109.
- Konak, N., 2002. 1/500.000 Türkiye Jeoloji Haritası İzmir Paftası, (Şenel, M., (ed.)) Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.
- Konak, N., Şenel, M., 2002. 1/500.000 Türkiye Jeoloji Haritası Denizli Paftası, (Şenel, M., (ed.)) Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.
- Koralay, O.E., Satir, M., Dora, O.Ö., 2001. Geochemical and geochronological evidence for Early Triassic calc-alkaline magmatism in the Menderes Massif, western Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 89 (4), 822-835.
- Koralay, E., Dora, O.Ö., Chen, F., Satir, M., Candan, O., 2004. Geochemistry and geochronology of orthogneisses in the Derbent (Alaşehir) area, eastern part of the Ödemiş-Kiraz submassif, Menderes Massif: Pan-African magmatic activity. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 13 (1), 37-61.
- Lips, A.L., Cassard, D., Sözbilir, H., Yılmaz, H., Wijbrans, J.R., 2001. Multistage exhumation of the Menderes massif, western Anatolia (Turkey). *International Journal of Earth Sciences*, 89 (4), 781-792.
- Loos, S., Reischmann, T., 1999. The evolution of the southern Menderes Massif in SW Turkey as revealed by zircon dating. *Journal of the Geological Society*, 156 (5), 1021-1030.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Kastens, K., 2000. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*, 105 (B3), 5695-5719.
- Nebert, K., 1958. Denizli Pliyosen teressübâtı ve bunların Batı Anadolu tatlı su Neojen stratigrafisi için ehemmiyeti. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 51, 7-19.
- Nilius, N.P., Glotzbach, C., Wölfler, A., Hampel, A., Dunkl, I., Akal, C., Heineke, C., Hetzel, R., 2019. Exhumation history of the Aydın range and the role of the Büyük Menderes detachment system during bivergent extension of the central Menderes Massif, western Turkey. *Journal of the Geological Society*, 176, 704-726.

- Ocakoglu, F., Acıkalın, S., Özsayın, E., Dirik, R.K., 2014. Tectonosedimentary evolution of the Karacasu and Bozdoğan basins in the Central Menderes Massif, W Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 23, 361-385.
- Okay, A.I., 2001. Stratigraphic and metamorphic inversions in the central Menderes massif. A new structural model. *International Journal of Earth Sciences*, 91 (1), 173-178.
- Oner, Z., Dilek, Y. 2011. Supradetachment basin evolution during continental extension: The Aegean province of western Anatolia, Turkey. *Geological Society of America Bulletin*, 123 (11-12), 2115-2141.
- Oppenheim, P., 1918. Das Neogen in Kleinasien. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 70, 1-210.
- Oral, M.B, Reilinger, R.E., Toksöz, N.M., King, R.W., Barka, A., Kinik, İ., Lenk, O., 1995. Global positioning system offers evidence of plate motions in eastern Mediterranean. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 76 (2), 9-11.
- Özer, S., Sözbilir, S., 2003. Presence and tectonic significance of Cretaceous rudist species in the so-called Permo-Carboniferous Göktepe Formation, central Menderes metamorphic massif, western Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 92, 397-404.
- 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.
- Passchier, C., Coelho, S., 2006. An outline of shear-sense analysis in high-grade rocks. *Gondwana Research*, 10 (1-2), 66-76.
- Petit, J.P., 1987. Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *Journal of Structural Geology*, 9 (5-6), 597-608.
- Philippon, A., 1914. Reisen und Forschungen im Ewestlichen Kleinasien. Gotha: Justus Perthes, IV. Heft, Nr. 180, 107 s.
- Purvis, M., Robertson, A., 2004. A pulsed extension model for the Neogene-Recent E-W-trending Alaşehir Graben and the NE-SW-trending Selendi and Gördes Basins, western Turkey. *Tectonophysics*, 391 (1), 171-201.
- Raymo, M.E., Ruddiman, W.F., 1992. Tectonic forcing of late Cenozoic climate. *Nature*, 359 (6391), 117-122.
- Reilinger, R.E., McClusky, S.C., Oral, M.B., King, R.W., Toksoz, M.N., Barka, A.A., Kinik, I., Lenk, O., Sanli, I., 1997. Global Positioning System measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone. *Journal of Geophysical Research*, 102 (B5), 9983-9999.
- Ring, U., Gessner, K., Güngör, T., Passchier, C.W., 1999. The Menderes Massif of western Turkey and the Cycladic Massif in the Aegean—do they really correlate?. *Journal of the Geological Society*, 156 (1), 3-6.
- Ring, U., Johnson, C., Hetzel, R., Gessner, K., 2003. Tectonic denudation of a Late Cretaceous-Tertiary collisional belt: regionally symmetric cooling patterns and their relation to extensional faults in the Anatolide belt of western Turkey. *Geological Magazine*, 140 (4), 421-441.
- Rojay, B., Toprak, V., Demirci, C., Süzen, L., 2005. Plio-Quaternary evolution of the Küçük Menderes Graben Southwestern Anatolia, Turkey. *Geodinamica Acta*, 18 (3-4), 317-331.
- Rossetti, F., Asti, R., Faccenna, C., Gerdes, A., Lucci, F., Theye, T., 2017. Magmatism and crustal extension: Constraining activation of the ductile shearing along the Gediz detachment, Menderes Massif (western Turkey). *Lithos*, 282, 145-162.
- Rotstein, Y., 1984. Counterclockwise rotation of the Anatolian block. *Tectonophysics*, 108 (1-2), 71-91.
- Saraç, G., 2003. Türkiye Omurgalı Fosil Yatakları. Maden Tetkik Arama Müdürlüğü (MTA), Bilimsel Rapor 10609, 208 s.
- Sarıca, N., 2000. The Plio-Pleistocene age of Büyük Menderes and Gediz Grabens and their tectonic significance on N-S extensional tectonics in West Anatolia: mammalian evidence from the continental deposits. *Geological Journal*, 35, 1-24.
- Sarıca-Filoreau, N., 2002. Faunes de rongeurs néogènes et quaternaires des grabens d'Anatolie occidentale: Systematique, biochronologie et implications tectoniques. Doctoral dissertation, Paris, Muséum national d'histoire Naturelle. 346 s.

- Satir, M., Friedrichsen, H., 1986. The origin and evolution of the Menderes Massif, W-Turkey: a rubidium/strontium and oxygen isotope study. *Geologische Rundschau*, 75 (3), 703-714.
- Seyitoğlu, G., Scott, B., 1991. Late Cenozoic crustal extension and basin formation in west Turkey. *Geological Magazine*, 128 (2), 155-166.
- Seyitoğlu, G., Scott, B., 1992. The age of the Büyük Menderes Graben (western Turkey) and its tectonic implications. *Geological Magazine*, 129 (2), 239-242.
- Seyitoğlu, G., Scott, B.C., Rundle, C.C. 1992. Timing of Cenozoic extensional tectonics in west Turkey. *Journal of the Geological Society*, 149 (4), 533-538.
- Seyitoğlu, G., Çemen, İ., Tekeli, O., 2000. Extensional folding in the Alaşehir (Gediz) graben, western Turkey. *Journal of the Geological Society*, 157 (6), 1097-1100.
- Seyitoğlu, G., Tekeli, O., Çemen, İ., Şen, Ş., Işık, V., 2002. The role of the flexural rotation/rolling hinge model in the tectonic evolution of the Alaşehir graben, western Turkey. *Geological Magazine*, 139 (1), 15-26.
- Seyitoğlu, G., Işık, V., Çemen, İ., 2004. Complete Tertiary exhumation history of the Menderes massif, western Turkey: an alternative working hypothesis. *Terra Nova*, 16 (6), 358-364.
- Seyitoğlu, G., Işık, V., Esat, K. 2014. A 3D model for the formation of turtleback surfaces: the Horzum Turtleback of western Turkey as a case study. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 23 (5), 479-494.
- Seyitoğlu, G., Işık, V., 2015. Batı Anadolu'da Geç Senozoyik Genişleme Tektoniği: Menderes Çekirdek Kompleksinin Yüzeylemesi ve İlişkili Havza Oluşumu. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 151, 49-109.
- Shackleton, N.J., Kennett, J.P., 1975. Paleotemperature history of the Cenozoic and the initiation of Antarctic glaciation: oxygen and carbon isotope analyses in DSDP Sites 277, 279, and 281. *Initial Reports of Deep Sea Drilling Project*, 29, 743-755.
- Sözbilir, H., 1986. Acıdere Mahallesi (Salihli-Manisa) çevresinin jeolojisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi, Lisans Bitirme Tezi*, 35 s.
- Sözbilir, H., 2001. Extensional tectonics and the geometry of related macroscopic structures: field evidence from the Gediz detachment, western Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 10 (2), 51-67.
- Sözbilir, H., 2002. Geometry and origin of folding in the Neogene sediments of the Gediz Graben, western Anatolia, Turkey. *Geodinamica Acta*, 15 (5-6), 277-288.
- Sözbilir, H., 2005. Oligo-Miocene extension in the Lycian orogen: evidence from the Lycian molasse basin, SW Turkey. *Geodinamica Acta*, 18 (3-4), 255-282.
- Sözbilir, H., Emre, T., 1990. Neogene stratigraphy and structure of the northern rim of the Büyük Menderes graben. *Proceedings of International Earth Science Colloquium on the Aegean Region*, 2, 314-322.
- Sözbilir, H., Sarı, B., Uzel, B., Sümer, Ö., Akkiraz, S., 2011. Tectonic implications of transtensional supradetachment basin development in an extension-parallel transfer zone: the Kocaçay Basin, western Anatolia, Turkey. *Basin Research*, 23 (4), 423-448.
- Spratt, T., 1845. Observations on the Geology of the Southern Part of the Gulf of Smyrna and the Promontory of Karabournou. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 1 (1), 156-162.
- Sümer, Ö., 2015. Evidence for the reactivation of a pre-existing zone of weakness and its contributions to the evolution of the Küçük Menderes Graben: a study on the Ephesus Fault, Western Anatolia, Turkey. *Geodinamica Acta*, 27 (2-3), 130-154.
- Sümer, Ö., İnci, U., Sözbilir, H., 2013. Tectonic evolution of the Söke Basin: extension-dominated transtensional basin formation in western part of the Büyük Menderes Graben, Western Anatolia, Turkey. *Journal of Geodynamics*, 65, 148-175.
- Şen, S., Seyitoğlu, G., 2009. Magnetostratigraphy of early-middle Miocene deposits from east-west trending Alaşehir and Büyük Menderes grabens in western Turkey, and its tectonic implications. *Geological Society, London, Special Publications*, 311, 321-342.
- Sengör, A.M.C., 1979. The North Anatolian transform fault: its age, offset and tectonic significance. *Journal of the Geological Society*, 136 (3), 269-282.

- 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 (1), 575-589.
- Şengör, A.M.C., Satir, M., Akkök, R., 1984. Timing of tectonic events in the Menderes Massif, western Turkey: Implications for tectonic evolution and evidence for Pan-African basement in Turkey. Tectonics, 3 (7), 693-707.
- Şimşek, Ş., 1982. Denizli-Sarayköy-Buldan alanının jeolojisi ve jeotermal enerji olanakları. İstanbul Üniversitesi Yer Bilimleri Fakültesi yayın organı, 3 (1-2), 145-162.
- Taner, G., 1975. Denizli bölgesi Neojen'inin paleontolojik ve stratigrafik etüdü. Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 85, 45-66.
- Taner, G., 2001. Denizli bölgesi Neojen'ine ait katların stratigrafik konumlarında yeni düzenleme. 54. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı, 21.
- Taymaz, T., Jackson, J., McKenzie, D., 1991. Active tectonics of the north and central Aegean Sea. Geophysical Journal International, 106 (2), 433-490.
- Taymaz, T., Yılmaz, Y., Dilek, Y., 2007. The geodynamics of the Aegean and Anatolia: Introduction, (The geodynamics of the Aegean and Anatolia, Editörler: Taymaz, T., Yılmaz, Y. Dilek, Y.). Geological Society, London, Special Publications 291, 1-16.
- Tchihatcheff, P. De., 1866-1869. Asie Mineure, Description Physique de cette contrée, Paléontologie, Librairie Théodore Morgand, Paris, 591 s.
- Tchihatcheff, P. De., 1869. Asie Mineure, Description Physique de cette contrée, Géologie, Quatrième partie, Librairie Théodore Morgand, Paris, 528 s.
- Uysallı, H., Keskin, B., 1971. Denizli Sarayköy Kızıldere Jeotermal Sahası KD-1, KD-2, TH-1, KD-1/A, KD-3, KD-4, KD-111, KD-6, KD-9, KD-12, KD-8, KD-7, KD-14 ve KD-15 Derin Jeotermik Enerji Sondajları Bitirme Raporu. MTA Rapor No: 4441, Ankara, Türkiye.
- Uzel, B., 2016. Field evidence for normal fault linkage and relay ramp evolution: the Kırkağaç Fault Zone, western Anatolia (Turkey). Geodinamica Acta, 28 (4), 311-327.
- Uzel, B., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç., Kaymakçı, N., Langereis, C.G., 2013. Structural evidence for strike-slip deformation in the İzmir-Balıkesir transfer zone and consequences for late Cenozoic evolution of western Anatolia (Turkey). Journal of Geodynamics, 65, 94-116.
- Uzel, B., Sümer, Ö., Özkaptan, M., Özkaymak, Ç., Kuiper, K., Sözbilir, H., Kaymakçı, N., İnci, U., Langereis, C.G., 2017. Palaeomagnetic and geochronological evidence for a major middle Miocene unconformity in Söke Basin (western Anatolia) and its tectonic implications for the Aegean region. Journal of the Geological Society, 174 (4), 721-740.
- Ünay, E., Göktaş, F., Hakyemez, H.Y., Avşar, M., Şan, Ö., 1995. Büyük Menderes Grabeni'nin kuzey kenarındaki çökellerin Arvicolidae (Rodentia, Mammalia) faunasına dayalı olarak yaşlandırılması. Türkiye Jeoloji Bülteni, 38, 75-80.
- Woodcock, N.H., 1987. Kinematics of strike-slip faulting, built Inlier, mid-Wales. Journal of Structural Geology, 9, 353-363.
- Wölfler, A., Glotzbach, C., Heineke, C., Nilius, N.P., Hetzel, R., Hampel, A., Akal, C., Dunkl, I., Christl, M., 2017. Late Cenozoic cooling history of the central Menderes Massif: Timing of the Büyük Menderes detachment and the relative contribution of normal faulting and erosion to rock exhumation. Tectonophysics, 717, 585-598.
- Yılmaz, Y., Genç, Ş.C., Gürer, F., Bozcu, M., Yılmaz, K., Karacık, Z., Altunkaynak, Ş., Elmas, A., 2000. When did the western Anatolian grabens begin to develop?, (Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area, Editörler: Bozkurt, E., Winchester, J.A., Piper, J.D.A.). Geological Society, London, Special Publications 173 (1), 353-384.
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K., 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. Science, 292 (5517), 686-693.
- Zeschke, G., 1954. Der Simav-Graben und seine Gestein. Türkiye Jeoloji Bülteni, 5, 179-189.