

Afyon-Akşehir Grabeni Batı Kenarının Tektonik Özellikleri Üzerine Jeolojik ve Jeofizik Gözlemler: İki Evreli Genişleme Modeli Hakkındaki Tartışmalara Bir Katkı

Geological and Geophysical Observations on the Tectonic Features of Western Part of the Afyon-Akşehir Graben: A Contribution to the Arguments on the Two-stage Extension Model

SEVİL KAYA^{1,2}, KORHAN ESAT¹, BERKAN ECEVİTOĞLU³, VEYSEL İŞİK¹, BÜLENT KAYPAK⁴, GÜLSEV UYAR ALDAŞ⁴, ASLI ZEYNEP CAN⁵, ESRA EZGİ BAKSI⁶, İSMAİL AKKAYA⁷, GÜROL SEYİTOĞLU¹

¹ Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Tektonik Araştırma Grubu, 06100, Tandoğan, Ankara

² İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, 74100, Merkez, Bartın

³ Anadolu Üniversitesi, Yer ve Uzay Bilimleri Enstitüsü, İki Eylül Kampüsü, 26555, Eskişehir

⁴ Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 06100, Tandoğan, Ankara

⁵ Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Deniz ve Çevre Araştırmaları Daire Başkanlığı, 06800, Çankaya, Ankara

⁶ Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Mekânsal Planlama Genel Müdürlüğü, Yerbilimsel Etüt Daire Başkanlığı, 06510, Çankaya, Ankara

⁷ Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Zeve Kampüsü, 65080, Van

Geliş (*received*) : 28 Ağustos (*August*) 2013

Kabul (*accepted*) : 02 Nisan (*April*) 2014

ÖZ

Afyon-Akşehir Grabeni'nin batı kenarını oluşturan, başkalaşım temel kayalar ile Neojen çökel kayalar arasındaki KB-GD doğrultulu tektonik dokanak bir grup araştırmacı tarafından Sultandağı Fayı olarak isimlendirilmiş ve ters fay olarak yorumlanmış, diğer bir grup tarafından ise sınırın normal fay olduğu ileri sürülmüştür. Bazı araştırmacılar da Sultandağı Fayı'nı normal fay olarak kabul etmekle birlikte, bu fay tarafından kesilen daha eski Yakasenek Ters Fayı'nı tanımlamışlardır. Bu çalışmada söz konusu Yakasenek Ters Fayı üzerinde jeolojik ve jeofizik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Temel birimler ile Neojen birimler arasındaki dokanak üzerinde uygulanan 'Sismik Işın Yönlendirme' yöntemi ile Yakasenek Ters Fayı'na karşılık gelen tektonik hat kuzeydoğuya eğimli olarak belirlenmiştir. Buradaki fayın güneybatının aksine kuzeydoğuya eğimli olarak saptanması, bölgede Miyosen-Pliyosen'de sıkışmanın varlığını ortaya koyan ve iki evreli graben modelini destekleyen Yakasenek Ters Fayı'nın bulunmadığını göstermiştir. Bölgede yapılan arazi gözlemlerinde de ters faya yönelik herhangi bir veriye rastlanmamıştır.

Anahtar Kelimeler: Afyon, Graben, Neotektonik, Normal fay, Sultandağı fayı, Yakasenek

ABSTRACT

The NW-SE trending tectonic contact between the metamorphic basement and the Neogene sedimentary rocks, located at the western side of the Afyon-Akşehir Graben, is interpreted as a reverse fault and is named as the Sultandağı fault by some researchers. On the contrary, other workers claim that the Sultandağı fault is a normal fault. Some researchers define the Yakasenek reverse fault which is cut by the Sultandağı normal fault. In this study, the geological and geophysical studies have been performed on this tectonic contact. The tectonic contact that corresponds to the Yakasenek reverse fault was determined as a NE-dipping plane using with the 'Seismic Beam Steering' method. The identification of the NE-dipping plane instead of SW-dipping shows that the Yakasenek reverse fault, which is interpreted as a product of the Miocene-Pliocene contraction supporting two-stage graben model, does not exist. There is also no field evidence of reverse faulting in the area.

Keywords: Afyon, Graben, Neotectonics, Normal fault, Sultandağı fault, Yakasenek

GİRİŞ

Türkiye neotektoniği'nin esasları Şengör (1980) tarafından ortaya konmuştur. Bu klasik görüşe göre tektonik kaçma modeli (Şengör vd., 1985) neden-sonuç ilişkisine sahiptir. Modeli tetikleyen olay, GD Anadolu'da erken-Geç Miyosen'de Avrasya ve Arap Levhaları'nın çarpışması olarak tanımlanmakta ve Türkiye'de neotektonik dönemin başlangıcı olarak kabul edilmektedir. Tetikleme izleyen evrede, Küçük Anadolu ve Doğu Anadolu Fay Zonları'nın oluşumu ile Anadolu Levhası'nın batıya hareket ettiği ve sonuçta Ege'de K-G yönlü genişlemeli tektoniğin Geç Miyosen'i izleyen dönemde geliştiği belirtilmektedir (Şengör vd., 1985). Bu modele göre Türkiye'nin neotektonik alanları Doğu Anadolu Sıkışma Bölgesi, Orta Anadolu Ova Bölgesi ve Batı Anadolu Genişleme Bölgesi olarak tanımlanmıştır (Şengör, 1980; Şengör vd., 1985).

1990'dan sonra yapılan çalışmalar Ege'deki K-G genişlemenin zamanlamasının en Geç Oligosen-Erken Miyosen olduğunu ortaya koyarak Türkiye'nin neotektonik çerçevesinde tektonik kaçma modelinde öne sürülen neden-sonuç ilişkisinin kurulamayacağını belirtmiştir (Seyitoğlu ve Scott, 1991; 1996).

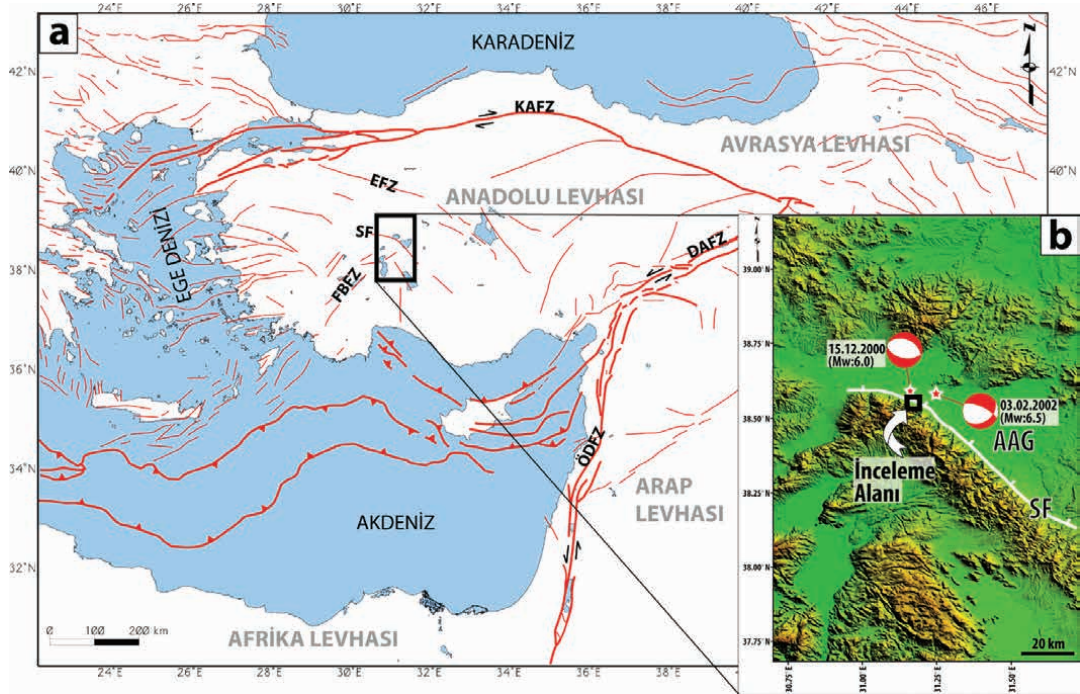
Yakın zamanda meydana gelen depremlerden elde edilen odak mekanizması çözümleri ve yapılan çalışmalar ışığında Batı Anadolu Genişleme Bölgesi ve Orta Anadolu Ova Bölgesi arasındaki geçiş zonunun (Şengör vd., 1985) ayrıca incelenmesi gerekmektedir.

Batı ve Orta Anadolu'nun neotektonik özellikleri arasında bir ayırım da Barka ve Reilinger (1997;

Şek. 18) tarafından yapılmış olup, bu makalede iki bölgeyi birbirinden Eskişehir Fayı ve Fethiye-Burdur Fayı ayırmakta ve Orta Anadolu'nun K-G sıkışma rejimi altında olduğu düşünülmektedir. Daha önceki araştırmacıların (Şengör vd., 1985) Batı ve Orta Anadolu arasında bir geçiş zonu önermelerinin nedeni Boray vd. (1985) tarafından Afyon-Akşehir Grabeni'nin batı kenarında tanımlanan Sultandağı Ters Fayı'dır (Şekil 1). Sultandağı Ters Fayı ile birlikte Tuzgölü Fayı'nın ters bileşeni (Şaroğlu vd., 1987) araştırmacılara Orta Anadolu'nun sıkışmakta olduğu yönünde bilgi sağlamıştır (Şengör vd., 1985; Barka ve Reilinger, 1997). Diğer taraftan, Koçyiğit (1984)'in çalışmasında geçiş zonundan bahsedilmediği ve Batı Anadolu genişlemeli yapılarının doğru Orta Anadolu'da Akşehir ve Tuzgölü Fayları'nda olduğu gibi devam ettiği görülmektedir (Koçyiğit, 1984; Şek. 4).

Türkiye'nin neotektonik çerçevesi üzerine yukarıda sözü edilen farklı yaklaşımlar geçiş zonu olarak tanımlanan bölgede yer alan Afyon-Akşehir Grabeni'nde test edilebilir. Afyon-Akşehir Grabeni'nin batı kenarında yer alan Sultandağı Fayı bir ters fay olarak tanımlanmıştır (Boray vd., 1985; Şaroğlu vd., 1987; Ögdüm vd., 1989; 1991; Şaroğlu vd., 1992) ve Anadolu levhasının batıya hareketinin göstergesi olarak yorumlanmıştır. Bununla birlikte, başka araştırmacılar aynı fayı normal fay olarak tanımlamışlardır (Atalay, 1975; Demirkol vd., 1977; Koçyiğit, 1984).

Yakın zamanda ise Koçyiğit vd. (2000) melez bir model önererek ters ve normal fay gözlemlerini birleştirmiştir. Bu melez modele göre Afyon-Akşehir Grabeni'nin dolgulanması Erken Miyosen'de genişlemeli tektonik rejim altında



Şekil 1. a) Türkiye ve yakın çevresindeki ana neotektonik yapılar. Akdeniz'in jeodinamik haritasından yararlanılarak çizilmiştir (CCGM, 2013). DAFZ: Doğu Anadolu Fay Zonu, EFZ: Eskişehir Fay Zonu, FBFZ: Fethiye-Burdur Fay Zonu, KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu, ÖDFZ: Ölü Deniz Fay Zonu, SF: Sultandağı Fayı. b) Çalışma alanı ve yakın çevresinin SRTM sayısal yükseklik modeli. İnceleme alanı siyah çerçeve ile gösterilmiştir. 15.12.2000 (M_w 6.0) ve 03.02.2002 (M_w 6.5) depremlerinin odak mekanizması çözümleri sırasıyla Taymaz ve Tan (2001) ve Taymaz vd. (2002; Emre vd., 2003)'nden alınmıştır. AAG: Afyon-Akşehir Grabeni.

Figure 1. a) Major neotectonic structures in Turkey and surrounding regions. Redrawn using the geodynamic map of the Mediterranean (CCGM, 2013). DAFZ: East Anatolian Fault Zone, EFZ: Eskişehir Fault Zone, FBFZ: Fethiye-Burdur Fault Zone, KAFZ: North Anatolian Fault Zone, ÖDFZ: Dead Sea Fault Zone, SF: Sultandağı Fault. b) SRTM DEM image of the study area and its surroundings. Study area is indicated by black frame. Focal mechanism solutions of the 15.12.2000 (M_w 6.0) and the 03.02.2002 (M_w 6.5) earthquakes have been obtained by Taymaz and Tan (2001) and Taymaz et al. (2002; Emre et al. 2003), respectively. AAG: Afyon-Akşehir Graben.

gerçekleşmiştir. Geç Miyosen'de bir daralma fazı Yakasenek Ters Fayı'nı meydana getirmiş ve graben dolgusu deforme olmuştur. Kıvrımlanmış graben dolgusu, yeni bir genişlemeli tektonik rejimde yataya yakın konumda çökelen Pliyo-Kuvaterner dolgu tarafından uyumsuzluk ile örtülmektedir (Koçyiğit vd., 2000). Afyon-Akşehir Grabeni için önerilen bu melez model, Alaşehir Grabeni için önerilen iki evreli genişleme modeli ile benzerlik göstermektedir (Koçyiğit vd., 1999). Bazı çalışmalar iki evreli genişleme modeline karşı veriler sunarken (Seyitoğlu, 1999; Seyitoğlu vd., 2000; 2002; 2009; Seyitoğlu ve Işık, 2009; Şengör ve Bozkurt, 2013), diğer çalışmalar ise bu görüşü destekleyen veriler sunmuşlardır (Koçyiğit vd., 2000; Koçyiğit ve Özacar, 2003; Koçyiğit, 2005; Bozkurt ve Rojay,

2005; Emre ve Sözbilir, 2007; Kaya vd., 2007).

Sultandağı Fayı'nın Neojen'den günümüze karakterini ve ilişkili tektonik rejimi açıklayan yukarıda bahsedilen başlıca görüşler Şekil 2'de özetlenmiştir.

15.12.2000 Sultandağı (M_w 6.0) (Taymaz ve Tan, 2001; Özer vd., 2007) ve 03.02.2002 Çay (M_w 6.5) (Başokur vd., 2002; Emre vd., 2003; Yürür vd., 2003; Ulusay vd., 2004; Akyüz vd., 2006) depremlerine ait odak mekanizması çözümlerinin normal faylanma vermesi Afyon-Akşehir Grabeni'ni sınırlayan fayın bir ters fay olduğu görüşünü (Boray vd., 1985) geçersiz kılmaktadır (Şekil 1). Diğer taraftan bu normal faylı odak mekanizması çözümleri ikinci evrede de genişleme öneren Koçyiğit vd. (2000) modeli ile bir

Devir	Devre	Boray vd. (1985)	Öğdüm vd. (1989)	Koçyiğit vd. (2000)	Bu çalışma	
Kuv.	Pleyist.		Normal faylanmalar			
	Pliyosen	Geç	<i>Sıkışmalı faz</i>	<i>D-B doğrultulu sıkışma Sultandağı Ters Fayı</i>	<i>Genişlemeli rejimin ikinci fazı Akşehir Fayı</i>	
		Erken	<i>İkinci faz D-B doğrultulu sıkışma Sultandağı Ters Fayı</i>			
	Miyosen	Geç	<i>Birinci faz K-G doğrultulu sıkışma Sağ yanal doğrultu atımlı Sultandağı Fayı</i>	<i>Oblik özellik kazanan Sultandağı Fayı</i>	<i>Sıkışmalı faz Yakasenek Ters Fayı</i>	<i>Genişlemeli rejim Sultandağı Fayı</i>
		Orta				
	Erken		<i>K-G doğrultulu sıkışma Sağ yanal doğrultu atımlı Sultandağı Fayı</i>	<i>Genişlemeli rejimin birinci fazı</i>		
Paleojen	Oligosen					

Şekil 2. Sultandağı Fayı'nın tektonik gelişimiyle ilgili başlıca görüşler.
Figure 2. Main views on the tectonic development of the Sultandağı Fault.

çelişki oluşturmamaktadır. Bu aşamada önemli olan iki genişleme fazı arasında olduğu öne sürülen daralmalı fazın varlığının test edilmesidir. Bu nedenle Koçyiğit vd. (2000) çalışmasında gözlenen Yakasenek Ters Fayı'nın bulunduğu Yakasenek Köyü'nün güneydoğusu tekrar ha-

ritalanmıştır. Arazide yaptığımız jeolojik gözlemleri sınamak amacıyla aynı alanda bir sismik yansıma çalışması da yapılmıştır. Bu makalede verilerimiz sunulduktan sonra bunların Türkiye'nin neotektonik çerçevesi üzerindeki etkileri tartışılacaktır.

JEOLOJİK VE JEOFİZİK ÇALIŞMALAR

Afyon-Akşehir Grabeni Batı Kenarı: Sultandağı Fayı

Sultandağı Fayı, Afyon-Akşehir Grabeni'nin güneybatı kenarında Kambriyen-Eosen yaşlı başkalaşım kayaçları (Güngör, 2013) ile Neojen-Kuvaterner birimlerini ayırır. Fay, egemen olarak KB-GD doğrultulu olup kuzeybatı ucunda dönerek yaklaşık D-B doğrultusunda uzanır (Şekil 1). Bu bölümde Sultandağı Fayı'nın çalışma alanında yer alan bölümü üzerindeki arazi gözlemleri anlatılacaktır.

Sultandağı Fayı inceleme alanında KB-GD ve BKB-DGD doğrultusunda ve normal fay geometrisindedir (Şekil 3). Yüksek açıda ve KD ile KKD eğimlidir. Belirgin bir kayma düzlemi görülememesine karşın fayın taban bloğunu Geç Devoniyen-Karbonifer yaşlı (Öcal vd., 2011) başkalaşım kayaçlar, tavan bloğunu ise Neojen-Kuvaterner havza çökelleri oluşturur (Şekil 3 ve 4). Bu birimler mikromemeli fosiller yardımı ile yaşlandırılmış olup, uyumsuz dokanaklı dört birime ayrılmıştır (Koçyiğit vd., 2000) (Şekil 5).

Başkalaşım kayaçları egemen olarak mermer/rekristalize kireçtaşları ile şist ve fillit litolojilerinden oluşur. Şist/fillit türü kayaçlarda foliyasyon belirgindir. Düşük dereceli metamorfizma sunan bu kayaçlar metamorfizma sonrası deformasyona bağlı yaygın kıvrımlanma ve eksen düzlemi klivajı da gösterir. Fayın tavan bloğunda yer alan Neojen birimleri ise konglomera ve konglomeratik kumtaşı ile daha kuzeydoğuda gölgesel kireçtaşı litolojileri ile temsil olur. Kırıntılı birimlerin egemen çakıl litolojisini mermer/rekristalize kireçtaşları oluşturur. Daha az oranda diğer başkalaşım kayaç taneleri gözlenir. Tanelerdeki yuvarlaklaşma köşeliden iyi yuvarlaklaşmaya kadar değişmektedir. Birim genelde iyi tutturulmuş olup kalın tabakalanma sunar. Kuvaterner birimlerini alüvyonlar oluşturur.

Fayın etkileri en belirgin olarak temel kayaçlarda izlenmektedir. Temel kayaçlar fay izinden itibaren bir kaç on metre genişliğinde bir zon boyunca yaygın kırılanma ve alterasyon gösterir. Kırılanmış/parçalanmış mermer ve şist/fillitler kohesif olmayan breşleşme gösterir. Bu breşleşmeler yersel kohesif özellikte de olabilmektedir. Zon içerisinde yüksek eğimli çatlak gelişimi yanında küçük ölçekli kayma sunan makaslama kırıkları da bulunmaktadır. Zon boyunca kırımı-

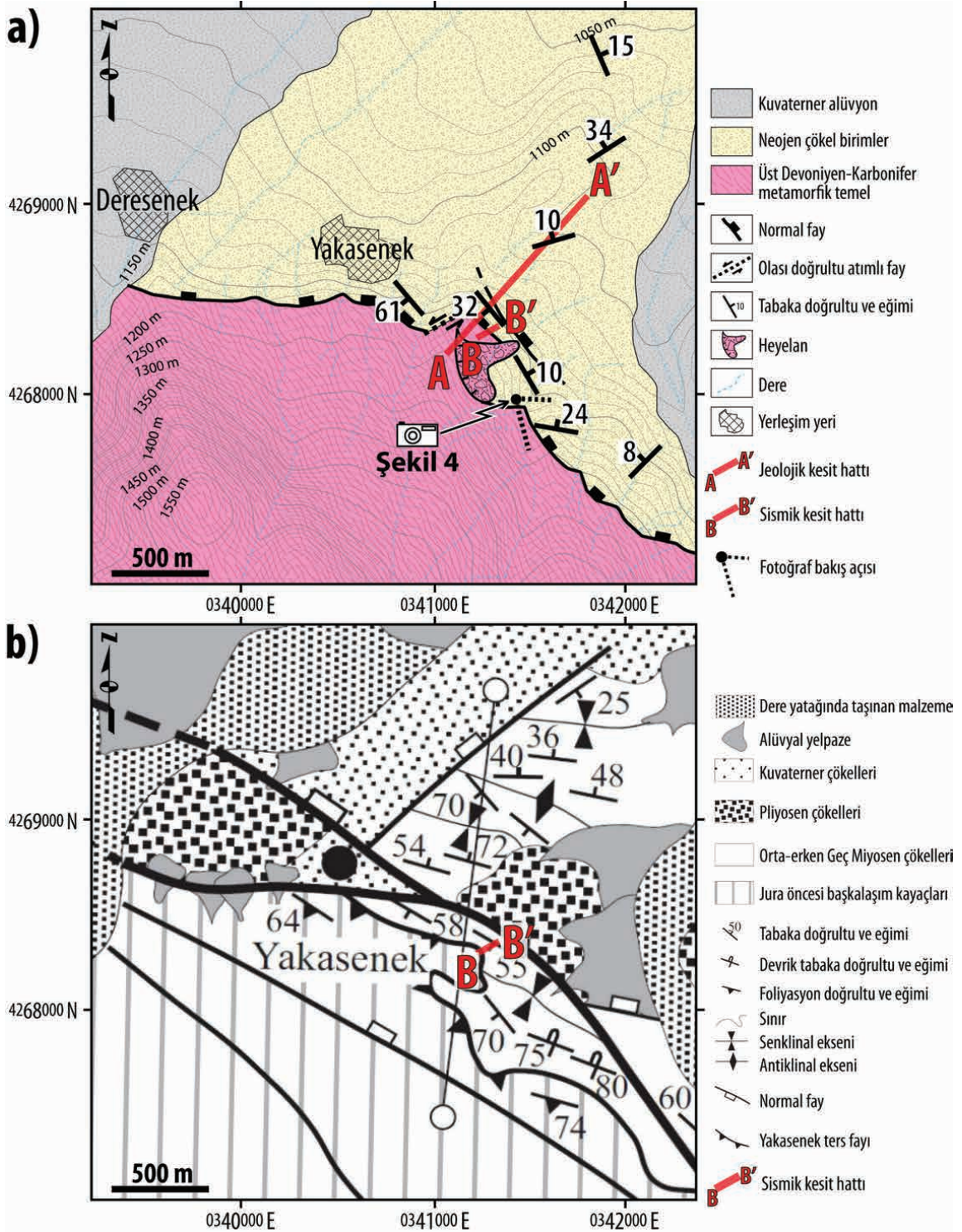
zımsı turuncu alterasyon rengi dikkat çekicidir. Fayın tavan bloğunda yer alan Neojen çökellerinde faylanmayı temsil eden deformasyon oluşumları da zon içerisinde gözlenir. Sıkı bağlanmalı konglomera birimi yersel gevşek/zayıf bağlanmalı karaktere dönüşmüştür. Ayrıca Neojen birimi içerisinde de ana faya paralel/yarı-paralel normal fay gözlenmektedir (Şekil 3a ve 6). Bu faylanmayla ilişkili yersel kayma düzlemi gelişimi de bulunmaktadır (Şekil 7). K25°B, 50°KD konumlu kayma düzlemi tipik kinematik belirteç göstermese de kuzeydoğuya eğimli bu fay, Sultandağı Fayı'nın genel karakteri de düşünüldüğünde normal fay olarak değerlendirilmiştir.

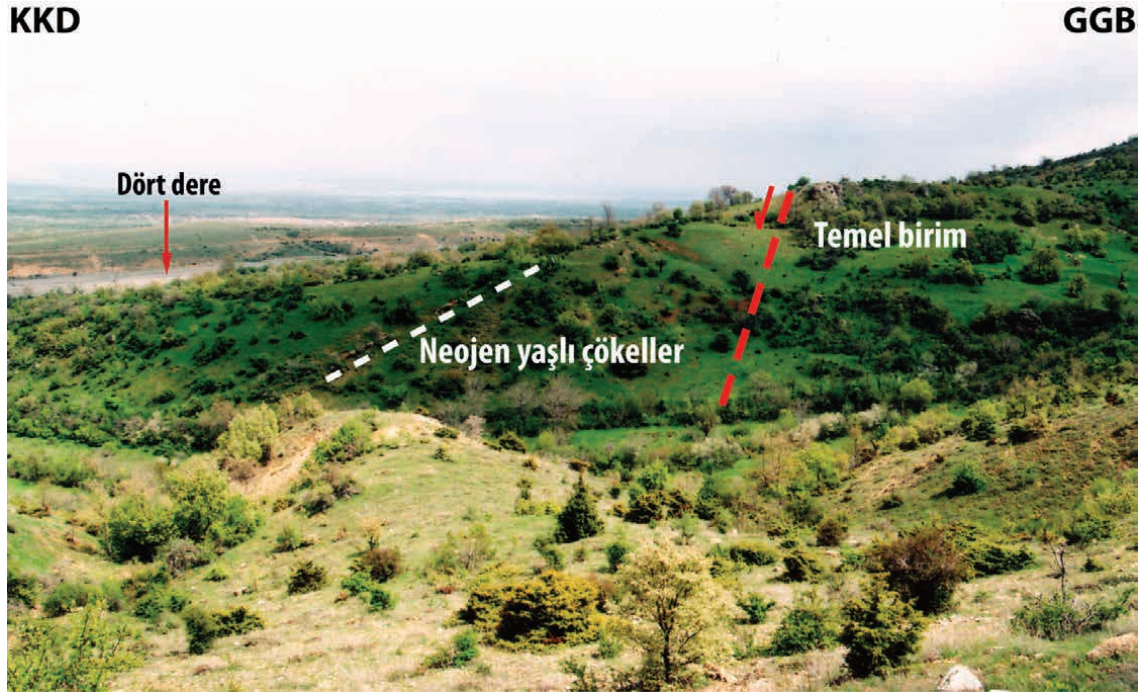
Ayrıntılı sedimantolojik çalışmalar bulunmamasıyla birlikte Sultandağı Fayı'nın Neojen yaşlı birimleri kontrol ettiği veya hemen sonrasında geliştiği düşünülmektedir. Şekil 6'da A-A' hattı boyunca GB-KD doğrultusunda alınmış jeolojik kesit görülmektedir. Sultandağı Fayı, Yakasenek Kasabası'nın batı tarafında KD-GB doğrultusunda bir miktar yer değiştirmeye uğrayarak KB yönündeki gidişine devam eder. Ayrıca, kuzeye eğimli olan Neojen tabakaları çalışma alanının bu kesiminde güneye doğru eğimlenmiş ve tabakaların eğim miktarları artmıştır. Bu verilerden hareketle bölgede olası bir sol yanal transfer fay haritalanmıştır (Şekil 3a).

Çalışma alanında başkalaşım kayaçlarından kopuk gelen rekristalize kireçtaşı bloklarının oluşturduğu oldukça geniş bir heyelan alanı tespit edilmiştir (Şekil 3a). Temele ait rekristalize kireçtaşı blokları yamaç boyunca vadi içerisine kadar ilerlemiştir (Şekil 8). Heyelan alanının üzerinde yetişkin çam ağaçlarının düşey doğrultuda olması heyelanın oldukça eski olduğuna işaret eder. Bununla birlikte heyelanın taç kısmı bugünkü topoğrafya değişikliği ile kolayca izlenebilmektedir. Bu heyelanlı alanın topuk bölümünün, temel kayalarının Neojen birimler üzerinde yer alması nedeniyle önceki araştırmacılar tarafından Yakasenek Ters Fayı olarak haritalanmış olabileceği düşünülmektedir (Şekil 3b, Koçyiğit vd., 2000; Koçyiğit ve Özacar, 2003).

Yakasenek Ters Fayı Olarak Tanımlanmış Bölgede Gerçekleştirilen Sismik Yansıma Çalışması

Daha önceki araştırmacıların Yakasenek Ters Fayı olarak tanımladığı, başkalaşım kayaçları



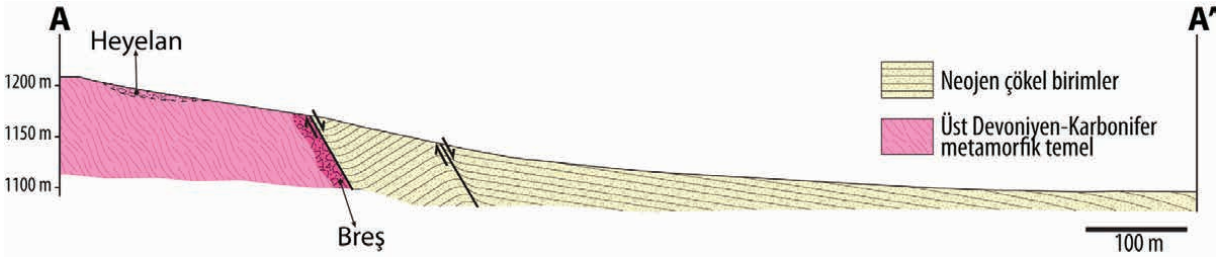


Şekil 4. Temel birim ile Neojen yaşlı çökeller arasındaki normal faylı sınıır (Kesikli kırmızı çizgi normal faylı sınıırı, kesikli beyaz çizgi ise kuzeye eğimli Neojen tabakalarını göstermektedir). Lokasyon için Şekil 3a'ya bakınız.
 Figure 4. Normal fault boundary between the basement and the Neogene sedimentary rocks (Dashed red and white lines represent the normal fault boundary and the N-dipping Neogene strata, respectively). See Figure 3a for location.

Üst Sistem	Sistem	Seri	Atalay (1973)	Demirkol vd. (1977)	Koçyiğit vd. (2000)	
SENOZOYİK	KUVATERNER	HOLOSEN	Yeni alüvyon	Yeni alüvyon	Alüvyon	
		PLEYİSTOSEN	Eski alüvyon	Eski alüvyon	Taşköprü formasyonu	
	TERSİYER	NEOJEN	PLİYOSEN	Kil,silt, kum,çakıl	Yarıkkaya formasyonu Kireçtaşı üyesi	Doğancık formasyonu
		MİYOSEN	Sarı gölsel kireçtaşı		Köstere formasyonu	
	PALEOJEN					
MESOZOYİK	KRETASE					
	JURA					
	TRİYAS		Temel Metamorfik birim		Temel Metamorfik birim	
PALEOZOYİK			Temel Metamorfik birim	Temel Metamorfik birim		

Şekil 5. Çalışma alanı ve yakın çevresinde değişik araştırmacılar tarafından belirlenmiş stratigrafik birimlerin karşılaştırması.

Figure 5. Comparison of the stratigraphic units in the study area and its surroundings determined by various researchers.



Şekil 6. A-A' kesit hattından alınmış jeolojik kesit. Lokasyon için Şekil 3a'ya bakınız.
Figure 6. Geological cross-section from the A-A' line. See Figure 3a for location.



Şekil 7. Neojen yaşlı birim içerisinde gelişmiş normal faylanmanın kayma düzleminde yakın görünüm. Her ne kadar düzlem üzerindeki fay çizikleri belirgin olarak gözlenmese de ok tavan bloğun hareket yönünü göstermektedir.

Figure 7. A close view from the slickenside of the normal fault in the Neogene unit. Although the slickenlines on the fault surface are not clearly observed, the arrow indicates the movement direction of the hanging wall.

ile Neojen çökeliler arasındaki sınırdaki düzlemin eğim yönünü belirlemek için bir sismik yansıma çalışması gerçekleştirilmiştir. Şekil 3a'da görülen B-B' hattı boyunca 'sismik ışın yönlendirme' yöntemiyle sismik kesit elde edilmiştir.

En genel anlamıyla sismik yöntem, yapay sarsıntılarla oluşturulan sismik dalgaların yer içerisinde ilerleyerek farklı derinliklerdeki tabakalardan

yansıyıp yeryüzüne geri dönmesi ve belli bir hat boyunca dizilmiş jeofon adı verilen alıcılarla bu dalgaların kaydedilmesidir. Günümüzde sismik yöntemler yerin stratigrafik ve tektonik özelliklerinin belirlenmesi, jeotermal aramalar, petrol ve kömür araştırmaları, tuz ve su araştırmaları, jeolojik yatakların araştırılması, arkeolojik yapıların araştırılması, mühendislik çalışmaları amacıyla kullanılmaktadır.

Bir sismik yansıma yöntemi için gereken aletler, sismik dalgaları üreten bir enerji kaynağı, sismik dalgaları yüzeyde algılayan jeofonlar ve bu alıcılara gelen bilgileri kaydeden bir sismik kayıtçıdan ibarettir.

Sismik yöntemlerde kullanılan enerji kaynakları dinamit, ağırlık düşürme, sismik vibratör vb. olabilir. Bir profil boyunca titreşim ya da yapay sarsıntıların oluşturulabilmesi için bu enerji kaynaklarından herhangi birinin kullanılması işlemi 'atış' olarak adlandırılır. Bu çalışmada sismik atışlar balyozun, madeni bir levhaya vurulmasıyla elde edilmiştir. Bu atışlar ile yer içerisine gönderilen ve fay yüzeyinden yansıyan dalgalar yüzeyde bir hat boyunca dizilen jeofonlar tarafından algılanırlar (Şekil 9). Yeraltındaki yapıların yanal çözünürlüğünü arttırmak için jeofon ve atış aralıkları genellikle kısa tutulmaktadır. Çünkü atış aralığının kısa mesafeli olması yer altından daha fazla bilgi alınması demektir. Jeofonların sayısı 24, 48 ya da 96 olabileceğinden kullanılan sismik cihaz da 24, 48 ya da 96 kanallı olabilmektedir.

Sahada toplanan sismik veri daha sonra bir dizi veri-işlem aşamasından geçirilmekte ve böylece veri kalitesi yüksek bir sismik kesit elde edilmektedir.

Jeofizik çalışmalar Şekil 3a üzerindeki B-B' hattı boyunca temel metamorfik birim ile Neojen yaşlı çökeller arasında önceki araştırmacılar tarafından Yakasenek Ters Fayı olarak tanımlanmış dokanak üzerinde uygulanmıştır (Şekil 10).

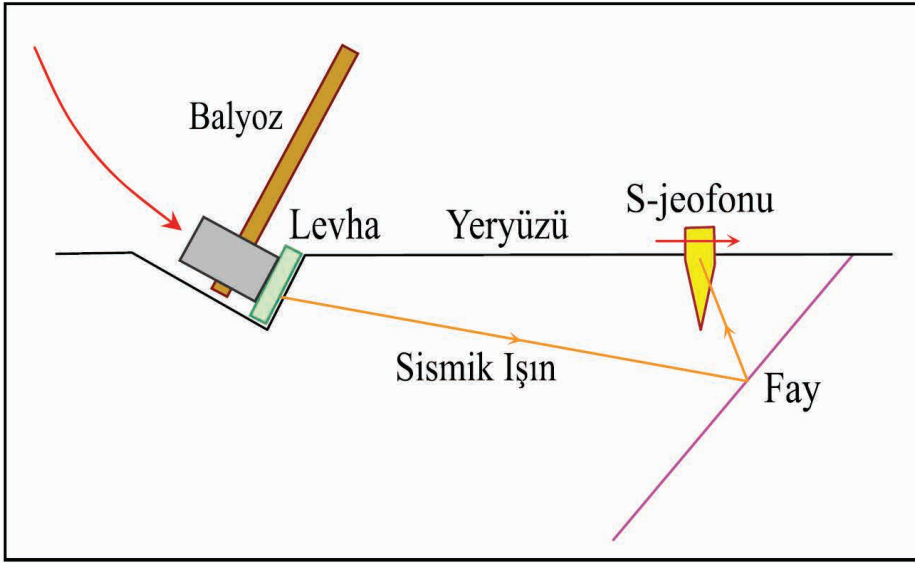
Fay eğim açısının belirlenmesinde 'sismik ışın yönlendirme' tekniğine ait arazi düzeni ve ilgili zaman-uzaklık grafikleri Şekil 11'de gösterilmiştir. Atışlar serimlerin fay mostrasına uzak uçlarında yapılmıştır. Fay yüzeyinden yansıyarak gelen ve fayla ilgili bilgi içeren sismik sinyalleri güçlendirmek için, her serimde, araları 1'er m mesafeli 8 atış yapılmıştır. Alıcılar arasındaki uzaklıklar değişken olup, fay mostrasına yaklaştıkça bu aralıklar 4 m' den başlayarak 2 m, 1 m ve 0.5 m'ye kadar azalmaktadır. Böylece faya yakın yerlerden daha yoğun bilgi alınmıştır. Sismik enerjinin ilk atış noktasından son jeofona kadar ulaşabilmesi için, ilk atışla fay mostrası arasındaki uzaklık 50 metre ile sınırlı tutulmuştur.

Ölçümlerde 24 adet 26 Hz'lik S-jeofonu kullanılmıştır. Örnekleme aralığı 0.5 milisaniye, kayıt uzunluğu 1 saniyedir. Kayıt sırasında herhangi bir süzgeç kullanılmamıştır. Fay mostrasına dik doğrultuda ve fayın her iki bloğunda ayrı ölçümler alacak şekilde, biri diğerinin uzantısı iki sismik profil tasarlanmıştır (Şekil 11). Her iki profilde S-jeofonları fay mostrasına doğru yönlendirilmiştir.

Sismik atışlar 12 kg'lık bir balyozla, düşeyle yaklaşık 20-30 derece açı yapan bir madeni levhaya vurularak gerçekleştirilmiştir (Şekil 9). Sismik atışlar için asimetrik V biçimli çukurlar açılmıştır. Her sismik atış için, sinyali güçlendirmek amacıyla, levha üzerine aynı şekilde 3 kez vurularak 3 düşey yığma yapılmıştır. Eğik bal-



Şekil 8. Heyelanlı bölgede Neojen çökelleri üzerindeki metamorfik kayaç blokları.
Figure 8. Metamorphic rock blocks on the Neogene sediments in the landslide area.



Şekil 9. 'Sismik ışın yönlendirme' yöntemiyle bir sismik atışın gerçekleştirilmesi. S-jeofonları faya doğru yönlendirilmiştir.

Figure 9. Performing a seismic shot using the 'seismic beam steering' method. S-geophones are oriented towards the fault.

yoğ vuruşları, sismik enerjinin yönlendirilmesini sağlamaktadır. Bu yöntemle aşırı eğimli jeolojik yapılardan sismik sinyal alınması mümkündür. Sismik yansıma verilerinin işlenmesi aşamasında rüzgâr gürültüsünü bir miktar bastırmak için 5-10-140-150 Hz aralıklı band-geçişli bir sayısal süzgeç kullanılmıştır.

Şekil 11'de kırmızı ile gösterilen zaman-uzaklık eğrisi (hiperbol), fay yüzeyinden gelen yansıma-ya aittir. Sismik ışın geometrisi ve ilgili bağlantılar EK'te verilmiştir.

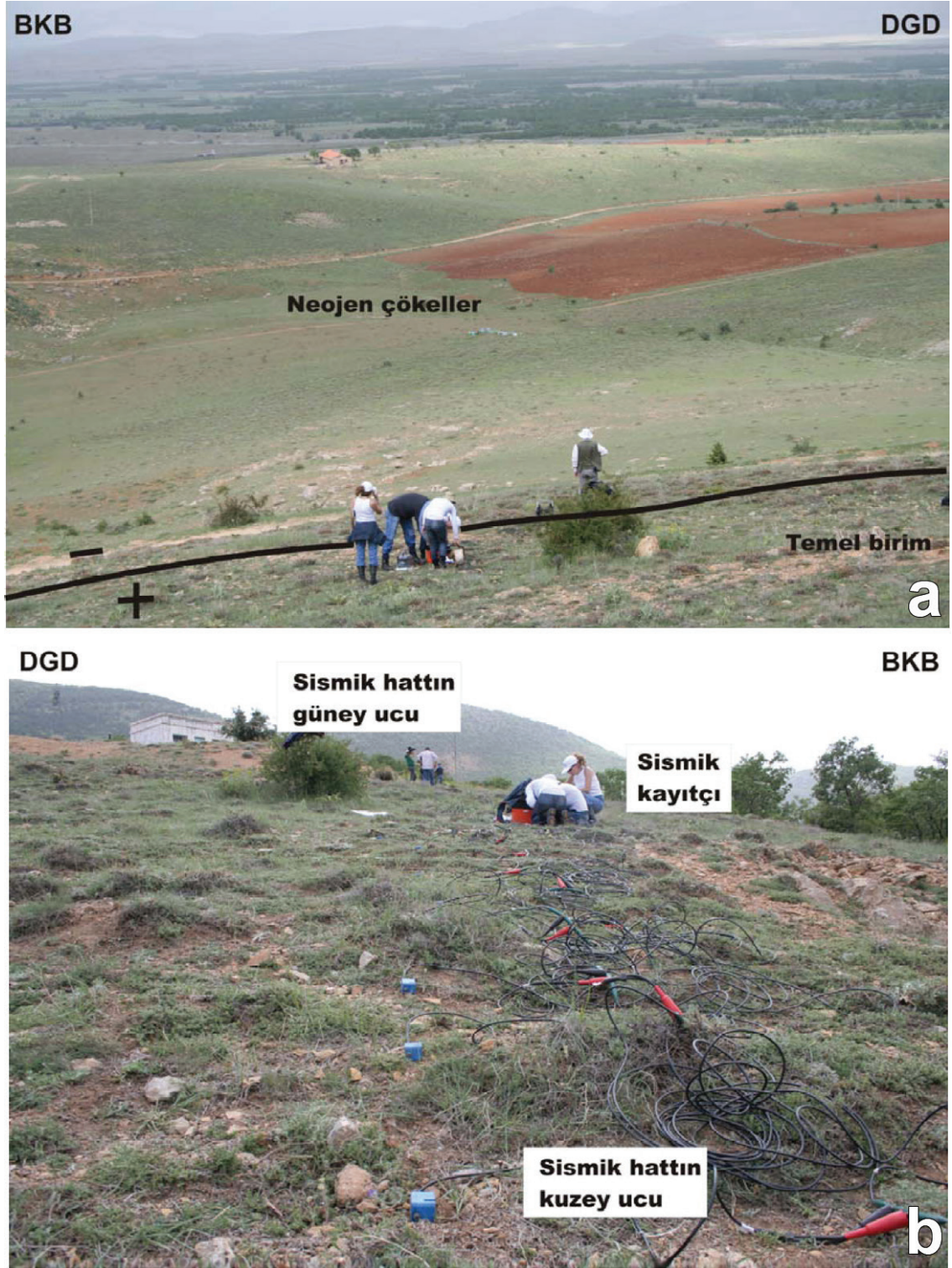
Sismik hattın güneybatı ucundan fay yüzeyine gönderilen ışın demeti yolculuğu boyunca herhangi bir yüzeye rastlamadığı için yoluna devam etmektedir. Bu durumda sismik atışlara ait sismik profil ayrıntılarına bakıldığında fayın güneybatı bloğunda yer alan S-jeofonlarının herhangi bir yansıma ve saçılma kaydetmediği görülür (Şekil 12).

Diğer taraftan sismik hattın kuzeydoğu ucundan fay yüzeyine gönderilen ışınların bir yüzeye çarparak geri döndükleri ve böylece kuzeydoğu bloktaki S-jeofonlarının fay yüzeyinden yansıyan saçılmaları kaydettiği görülür (Şekil 12). Sağ sismik kesitler incelendiğinde, fay yüzeyine gönderilen her ışın demetinin yüzeyden yansıyıp dönerken diğer ışın demetini etkilediği görülür. Oysaki ışınlar arasındaki bu sismik olay sol sismik yansıma kesitinde gözlenmemektedir. Dola-

yısıyla fayın kuzeydoğuya eğimli olduğu belirgin-dir. Ayrıca sismik profil ayrıntılarına bakıldığında fay açısı yaklaşık 60°'lik bir değer sunmaktadır.

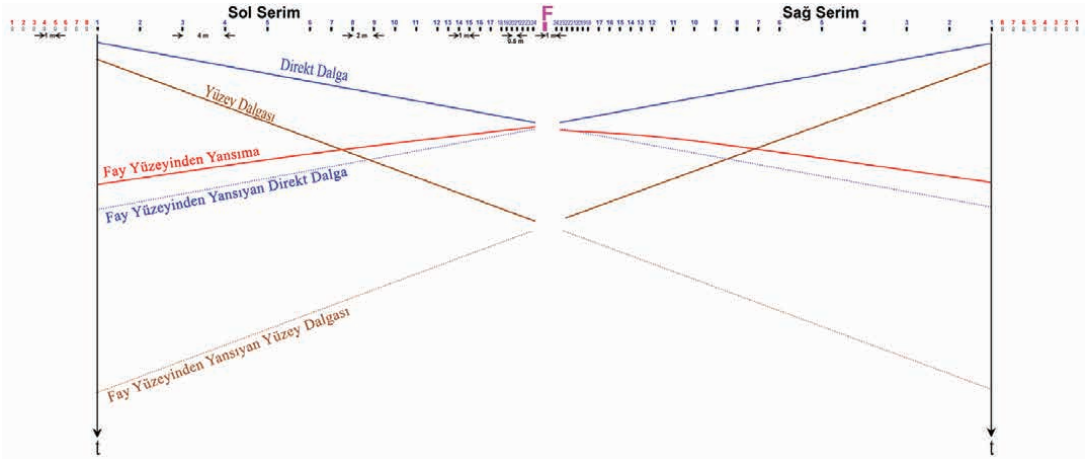
TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Yakasenek Ters Fayı'nın varolduğu ileri sürülen bölgede gerçekleştirilen arazi çalışmaları ve uygulanan 'sismik ışın yönlendirme' yöntemi ile buradaki tektonik hat 60° kuzeydoğuya eğimli olarak belirlenmiştir. Sismik profil ayrıntılarına bakıldığında sismik olayların sağ sismik kesitlerde yani fayın kuzeydoğu bloğunda gözlenmesi buradaki fayın kuzeydoğuya eğimli olduğunu göstermektedir. Fayın güneybatının aksine kuzeydoğuya eğimli olarak saptanması, bölgede Miyosen-Pliyosen'de sıkışmanın varlığını ortaya koyan ve iki evreli genişleme modelini destekleyen Yakasenek Ters Fayı'nın bulunmadığını göstermiştir. Bölgede yapılan arazi gözlemlerinde de ters faya yönelik herhangi bir veriye rastlanmamıştır; ancak geniş bir alanda yanlış bir yorumla ters faylanma olarak değerlendirilebilecek heyelanlı bir bölge tespit edilmiştir (Karşılaştırma için Şekil 3'e bakınız). Varlığı jeofizik veri ile de desteklenen kuzeydoğuya eğimli fay düzlemi olasılıkla normal fay bileşenli Sultandağı Fayı'na aittir ve bu bölgedeki genişlemeli tektonik rejimin sıkışmalı bir dönemle bölünmediğini göstermektedir.



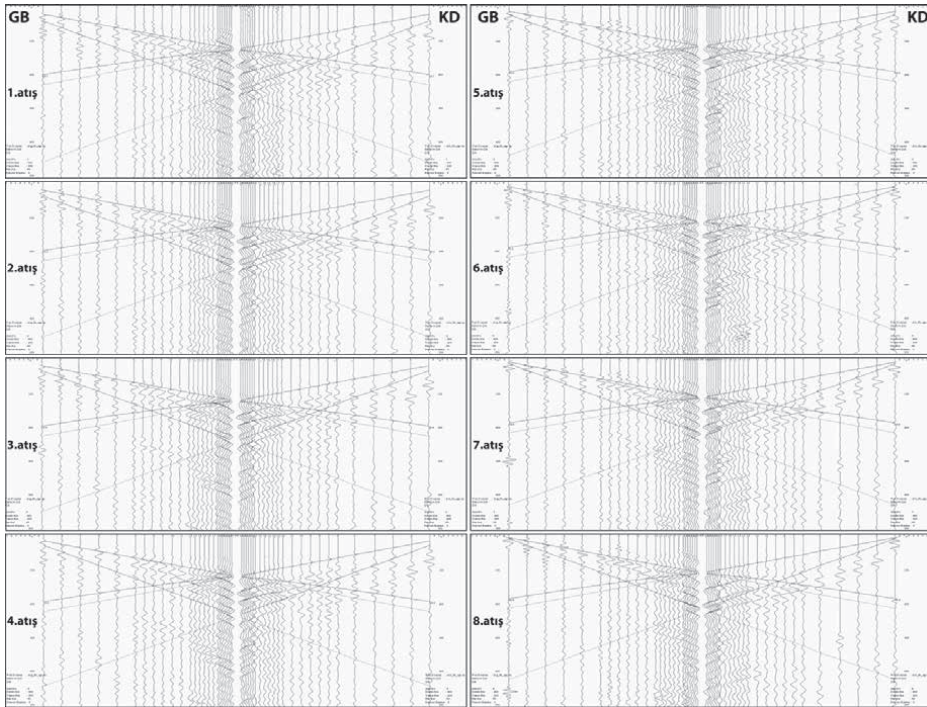
Şekil 10. a) 'Sismik ışın yönlendirme' yönteminin uygulandığı, temel başkalaşım kayaları ile Neojen çökel birimleri arasındaki kuzeydoğuya eğimli tektonik sınırın arazi görüntüsü. b) Sismik profil hattının arazideki görüntüsü.

Figure 10. a) A field view from the 'seismic beam steering' method applied to the N-dipping tectonic boundary between the basement metamorphic rocks and the Neogene sedimentary units. b) Field view of the seismic profile line.



Şekil 11. Fay eğim açısının belirlenmesinde 'sismik ışın yönlendirme' yönteminin uygulanışı. En üstte arazi düzeni görülmektedir. İçi boş kutucuklar atış istasyonlarını, siyah kutucuklar alıcı istasyonlarını göstermektedir. Ortadaki 'F' harfi fayın mostra verdiği noktadır. Birbirlerine bakan siyah oklar aralık uzaklıklarını belirtmektedir. Alt bölümde sol ve sağ serimlere ait zaman-uzaklık grafikleri görülmektedir. Değişik renklerle çizilen eğriler üzerine, aynı renklerle ilgili sismik dalga fazları yazılmıştır. Fay Yüzeyinden Yansıma bir hiperboldur. Öte yandan, Direkt Dalga, Fay Yüzeyinden Yansıyan Direkt Dalga, Yüze Dalgası, Fay Yüzeyinden Yansıyan Yüze Dalgası birer doğru parçalarıdır.

Figure 11. Applying the 'seismic beam steering' method for determine the fault dip angle. Field arrangement is seen at the top. Empty and filled boxes represent shot and receiver stations, respectively. 'F' in the middle represents the fault outcrop. Black arrows indicate distances. Time-distance graphics of the left (sol serim) and right (sağ serim) seismic lines are seen at the lower part. Names of seismic wave phases are written on the various coloured curves with the same colours. Reflection from the Fault Plane (Fay Yüzeyinden Yansıma) is a hyperbole. On the other hand, Direct Wave (Direkt Dalga), Reflected Direct Wave from the Fault Plane (Fay Yüzeyinden Yansıyan Direkt Dalga), Surface Wave (Yüze Dalgası), Reflected Surface Wave from the Fault Plane (Fay Yüzeyinden Yansıyan Yüze Dalgası) are straight lines.



Şekil 12. Atışlara ait sismik profil ayrıntısı (Soldaki ortak-uzaklık sismik yansıma kesiti fayın güneybatı bloğundan, sağdaki ortak-uzaklık sismik yansıma kesiti fayın kuzeydoğu bloğundan elde edilmiştir).

Figure 12. Seismic profile details of the shots (Common-distance seismic reflection profiles in the left side and the right side are obtained from the southern block and the northern block of the fault, respectively).

KATKI BELİRTME

Yazarlar yapıcı katkıları ve olumlu görüşleri nedeniyle Mehmet Tekin Yürür ve adı belirtilmemiş diğer hakeme teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Akyüz, H.S., Uçarkuş, G., Şatır, D., Dikbaş, A. ve Kozacı, Ö., 2006. 3 Şubat 2002 Çay depreminde meydana gelen yüzey kırığı üzerinde paleosismolojik araştırmalar. *Yerbilimleri*, 27(1), 41-52.
- Atalay, İ., 1973. Sultandağları ile Akşehir ve Eber Gölleri havzalarının strüktürel, jeomorfolojik ve toprak erozyonu etüdü. Doktora tezi (basılmış), Yeni Desen Mat., Ankara.
- Atalay, İ., 1975. Tektonik hareketlerin Sultandağları'nın jeomorfolojisine olan etkileri. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 18, 21-26.
- Barka, A. and Reilinger, R., 1997. Active tectonics of the Eastern Mediterranean region: deduced from GPS, neotectonic and seismicity data. *Annali di Geofisica*, 40, 587-610.
- Başokur, A.T., Gökten, E., Seyitoğlu, G., Varol, B., Uluggerli, E.U., Işık, V., Candansayar, E. ve Tokgöz, E., 2002. Jeoloji ve jeofizik çalışmalar ışığında 03.02.2002 Çay (Afyon) depremi'nin mekanizması, hasarın nedenleri ve bölgenin deprem etkinliği. *Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayını*, 56s.
- Boray, A., Şaroğlu, F. ve Emre, Ö., 1985. Isparta bölüğü'nün kuzey kesiminde Doğu-Batı daralma için bazı veriler. *Jeoloji Mühendisliği*, 23, 9-20.
- Bozkurt, E. and 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, 299-316.
- CCGM, 2013. Akdeniz'in jeodinamik haritası, <http://ccgm.free.fr>, 07/2013'te ulaşılmıştır.
- Demirkol, C., Sipahi, H., Çiçek, S., Barka, A. ve Sönmez, Ş., 1977. Sultandağının stratigrafisi ve jeoloji evrimi. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Raporu*, No: 6305, Ankara.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Doğan A., Özalp, S., Tokay, F. and Kuşçu, İ., 2003. Surface faulting associated with the Sultandağ earthquake (Mw 6.5) of 3 February 2002, southwestern Turkey. *Seismological Research Letters*, 74(4), 382-392.
- Emre, T. and 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, 441-470.
- Güngör, T., 2013. Kinematics of the Central Taurides during Neotethys closure and collision, the nappes in the Sultan Mountains, Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, DOI 10.1007/s00531-012-0854-4.
- Kaya, O., Ünay, E., Göktaş, F. and Saraç, G., 2007. Early Miocene stratigraphy of central west Anatolia, Turkey: implications for the tectonic evolution of the eastern Aegean area. *Geological Journal*, 42, 85-109.
- Kaya, S., 2008. Sultandağ Fayı'nın Neojen devrindeki evrimi. Yüksek Lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara (yayımlanmamış), 68s.
- Kaya, S., Can, A.Z., Esat, K., Ekincioglu, E.E., Akkaya, İ., Işık, V., Kaypak, B., Aldaş, G.U., Ecevitoğlu, B. ve Seyitoğlu, G., 2009. Afyon-Akşehir grabeninde Yakasenek ters fayı olarak tanımlanan yapı üzerinde jeolojik ve jeofiziksel gözlemler: İki evreli graben modeli için bir test. 62. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özlemleri Kitabı, Ankara, s.206-207.
- Koçyiğit, A., 1984. Güneybatı Türkiye ve yakın dolayında levha içi yeni tektonik gelişim. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 27, 1-16.
- Koçyiğit, A., Yusufoglu, H. and Bozkurt, E., 1999. Evidence from the Gediz graben for episodic two-stage extension in western Turkey. *Journal of the Geological Society*, London, 156, 605-16.

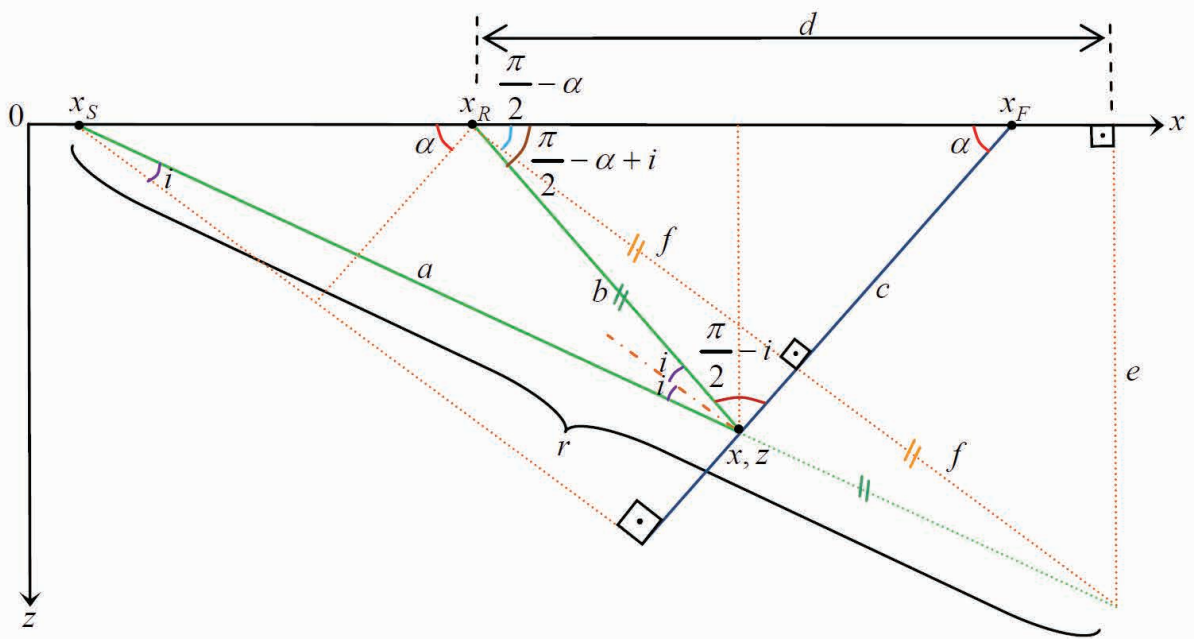
- Koçyiğit, A., Ünay, E. and Saraç, G., 2000. Episodic graben formation and extensional neotectonic regime in west central Anatolia and the Isparta Angle: a case study in the Akşehir-Afyon graben, Turkey. In: Bozkurt, E., Winchester, J.A. and Piper, J.D.A. (eds), *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area*. Geological Society, London, Special Publications, 173, 405-421.
- Koçyiğit, A. and Özacar, A.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., 2005. The Denizli graben-horst system and the eastern limit of western Anatolian continental extension: basin fill, structure, deformational mode, throw amount and episodic evolutionary history, SW Turkey. *Geodinamica Acta*, 18(3-4), 167-168.
- Öcal, H., Alan, İ., Balcı, V. ve Keskin, H., 2011. 1/100.000 ölçekli jeoloji haritası: Afyon-K26 paftası. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Öğdüm, F., Kozan, T., Bircan, A. ve Bozbay, E., 1989. Sultandağları'nın tektonik jeomorfolojisi. *Jeomorfoloji Dergisi*, 17, 21-34.
- Öğdüm, F., Kozan, T., Bircan, A., Bozbay, E. ve Tüfekçi, K., 1991. Sultandağları ve çevresindeki havzaların jeomorfolojisi ve genç tektoniği. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Raporu, No: 9123, Ankara.
- Özer, N., Altınok, Y. and Ceylan, S., 2007. Properties of the aftershocks sequences of the 2000 and 2002 earthquakes in Akşehir-Afyon graben, west-central Anatolia, Turkey. *Natural Hazards*, 40(3), 553-562.
- Seyitoğlu, G. and Scott, B.C., 1991. Late Cenozoic crustal extension and basin formation in west Turkey. *Geological Magazine*, 128, 155-176.
- Seyitoğlu, G. and Scott, B.C., 1996. The cause of N-S extensional tectonics in western Turkey: tectonic escape vs. back-arc spreading vs. orogenic collapse. *Journal of Geodynamics*, 22, 145-153.
- Seyitoğlu, G., 1999. Discussion on evidence from the Gediz Graben for episodic two stage extension in western Turkey. *Journal of the Geological Society, London*, 156, 1240.
- Seyitoğlu, G., Çemen, İ. and Tekeli, O., 2000. Extensional folding in the Alaşehir (Gediz) graben, western Turkey. *Journal of the Geological Society London*, 157, 1097-1100.
- Seyitoğlu, G., Tekeli, O., Çemen, İ., Şen, Ş. and 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, 15-26.
- Seyitoğlu, G., Alçiçek, M.C., Işık, V., Alçiçek, H., Mayda, S., Varol, B., Yılmaz, İ. and Esat, K., 2009. The stratigraphical position of Kemiklitepe fossil locality (Eşme, Uşak) revised: Implications for the Late Cenozoic sedimentary basin development and extensional tectonics in western Turkey. *Neues Jahrbuch für Geologie und Palaeontologie*, 251, 1-15.
- Seyitoğlu, G. and Işık, V., 2009. Meaning of the Küçük Menderes graben in the tectonic framework of the central Menderes metamorphic core complex (western Turkey). *Geologica Acta*, 7(3), 323-331.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Boray, A., 1987. Türkiye'nin diri fayları ve depremselliği. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Raporu, No: 8174, Ankara.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Kuşçu, İ., 1992. Türkiye diri fay haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, ölçek: 1/1 000 000.
- Şengör, A.M.C., 1980. Türkiye'nin neotektoniğinin esasları. Türkiye Jeoloji Kurumu yayını, 40 s.
- Şengör, A.M.C., Görür, N. and Şaroğlu, F., 1985. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. *The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication*, 37, 227-264.

- Şengör, A.M.C. and Bozkurt, E., 2013. Layer-parallel shortening and related structures in zones undergoing active regional horizontal extension. *International Journal of Earth Sciences*, 102(1), 101-119.
- Taymaz, T. and Tan, O., 2001. Source parameters of June 6, 2000 Orta-Çankırı (Mw=6.0) and December 15, 2000 Sultandağ-Akşehir (Mw=6.0) earthquakes obtained from inversion of teleseismic P- and SH-body-waveforms. *Symposia on seismotectonics of the north-western Anatolia-Aegean and recent Turkish earthquakes*, 96-107.
- Ulusay, R., Aydan, Ö., Erken, A., Tuncay, E., Kumsar, H. and Kaya, Z., 2004. An overview of geotechnical aspects of the Çay-Eber (Turkey) earthquake. *Engineering Geology*, 73, 51-70.
- Yürür, T., Köse, O., Demirbağ, H., Özkaymak, Ç. and Selçuk, L., 2003. Could the coseismic fractures of a lake ice reflect the earthquake mechanism? (Afyon earthquakes of 2 March 2002, Central Anatolia, Turkey). *Geodinamica Acta*, 16, 83-87.

EK

Sismik ışın geometrisi ve ilgili bağıntılar:

- x_F : Fay mostrasının x koordinatı
 x_S : Kaynağın x koordinatı
 x_R : Alıcının x koordinatı
 α : Fayın eğim açısı
 i : Geliş açısı
 x : Yansıma noktasının x koordinatı
 z : Yansıma noktasının z koordinatı
 r : Yolculuk mesafesi
 a, b, c, d, e, f : Diğer yardımcı değişkenler



Fay düzleminde gelen yansıma için sismik ışın geometrisi.

Sismik ışının kaynaktan çıkıp alıcıya ulaşmasına kadar kat ettiği yolculuk mesafesine ait sayısal değer,

$$r = \sqrt{(x_R - x_S + d)^2 + e^2} =$$

$$\sqrt{[x_R - x_S + 2(x_F - x_R) \sin^2 \alpha]^2 + [(x_F - x_R) \sin 2\alpha]^2}$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Bu denklemde “ r ” değerine ulaşabilmek için “ d ” ve “ e ” yardımcı değişkenlerinin bilinmesi gerekmektedir. Burada “ d ” değeri,

$$d = 2f \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = 2(x_F - x_R) \sin^2 \alpha$$

bağıntısı ile hesaplanırken, “ e ” değeri de,

$$e = 2f \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = (x_F - x_R) \sin 2\alpha$$

bağıntısı ile belirlenmektedir. Bu bağıntılarda yer alan “ f ” yardımcı değişkeninin değerine ise,

$$f = (x_F - x_R) \sin \alpha$$

bağıntısından ulaşılmaktadır.

Yansıma noktasının sayısal değerlerini belirleyebilmek için ise “ a ”, “ b ” ve “ c ” yardımcı değişkenlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için,

$$a \sin i + b \sin i = (x_R - x_S) \cos \alpha = (a + b) \sin i = r \sin i$$

bağıntısından,

$$\sin i = \frac{(x_R - x_S)}{r} \cos \alpha \quad \text{ve}$$

$$\tan i = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{r}{(x_R - x_S) \cos \alpha}\right]^2 - 1}}$$

değeri belirlenmektedir. “ c ” değerine ise,

$$\frac{c}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha + i\right)} = \frac{x_F - x_R}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - i\right)}$$

bağıntısından,

$$c = (x_F - x_R) \frac{\cos(\alpha - i)}{\cos i}$$

olarak ulaşılmaktadır.

Bu değişkenler yardımıyla yansıma noktasının “ x ” ve “ z ” koordinat değerlerine,

$$x = x_F - c \cos \alpha =$$

$$x_F - (x_F - x_R) \left[\cos^2 \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2 \sqrt{\left[\frac{r}{(x_R - x_S) \cos \alpha}\right]^2 - 1}} \right]$$

ve

$$z = c \sin \alpha =$$

$$(x_F - x_R) \left[\frac{\sin 2\alpha}{2} + \frac{1 - \cos^2 \alpha}{\sqrt{\left[\frac{r}{(x_R - x_S) \cos \alpha}\right]^2 - 1}} \right]$$

bağıntıları hesaplanarak ulaşılabilmektedir.