YERBİLİMLERİ
Bulletin for Earth Sciences

ISSN: 2687 - 2978

Yerbilimleri, 2021, 42 (2), 232-260, 10.17824/yerbilimleri.868411

Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni

Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University

Muğla Fayı, GB Türkiye: Morfometrik, Jeomorfolojik ve Paleosismolojik Yeni Bulgular

Muğla Fault, SW Turkey: New morphometric, Geomorphologic and Paleoseismologic Findings

H. Serdar AKYÜZ [1], Mehran BASMENJI [1], Erdem KIRKAN [1], M. Ersen AKSOY [2], Aynur DİKBAŞ [3], M. Korhan ERTURAÇ [4]

[1] İTÜ Maden Fakültesi, Jeoloji Müh. Bölümü, Sarıyer, İstanbul

[2] Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Mühendislik Fak., Jeoloji Müh. Bölümü, Muğla

[3] İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fak., Jeoloji Müh. Bölümü, İstanbul

[4] Sakarya Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Sakarya

Geliş (received):26 Ocak (January) 2021 Kabul (accepted): 7 Ağustos (August) 2021

ÖZ

Muğla Fayı, GB Anadolu'da yer alan aktif bir normal faydır. Muğla ve batısında BKB-DGD konumlu paralel fay kollarından oluşan yapı Muğla doğusunda daha basit bir geometri kazanarak KB-GD konuma döner. Çoğunlukla kristalize kireçtaşı ve mermerleri kesen fay Muğla Havzası'nın KD kenarını kontrol eder. 25 km uzunluğundaki fay boyunca yer yer fay şevleri açık olarak görülür. Yüksek eğimli ve GB'ya eğimli fay şevleri çoğunlukla kalın yamaç molozlarıyla örtülmüştür. Muğla Fayı'nın aktivitesini araştırmak için morfometrik ve paleosismolojik çalışmalar yapılmıştır. Hipsometrik integral (HI), vadi tabanı genişliğinin vadi yüksekliğine oranı

---

https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.868411

H. S. AKYÜZ, sakyuz24@gmail.com, akyuz@itu.edu.tr

[1] İTÜ Maden Fakültesi, Jeoloji Müh. Bölümü, Sarıyer, İstanbul ORCID 0000-0001-9485-2017

[1] İTÜ Maden Fakültesi, Jeoloji Müh. Bölümü, Sarıyer, İstanbul ORCID 0000-0001-9855-7533

[1] İTÜ Maden Fakültesi, Jeoloji Müh. Bölümü, Sarıyer, İstanbul ORCID 0000-0002-5229-1634

2 Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Mühendislik Fak., Jeoloji Müh. Bölümü, Muğla ORCID 0000-0002-7778-2018

3 İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fak., Jeoloji Müh. Bölümü, İstanbul ORCID 0000-0003-4614-9399

4 Sakarya Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Sakarya ORCID 0000-0002-6501-760X

(V_f) ve dağ cephesi eğriliği (S_{mf}) indisleri, Muğla Fayı'nın morfolojiyi kontrol ettiğini ve tektonik süreçlerin erozyonal süreçlere göre daha baskın olduğunu göstermiştir. Muğla il merkezinde yer alan bir inşaat yarması paleosismolojik açıdan incelenmiştir. Bu yarmada elde edilen veriler MÖ 6000 yılı civarında bir deprem olduğunu ortaya koymuştur. Bunun dışında MÖ 5200 yılından sonra en az bir (muhtemelen iki) önemli deprem daha meydana geldiği belirlenmiştir. Bu iki (veya üç) eski depremin yüzey kırığı oluşturacak büyüklükte olduğu ve en az M ≥ 6 olması gerektiği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Depremsellik, Morfometri, Muğla Fayı, Paleosismoloji.

ABSTRACT

Muğla Fault is an active normal fault located in southwest Anatolia. It is represented by WNW-ESE trending parallel fault segments in the vicinity of Muğla city while it has more simple geometry towards SE with a trend of NW-SE. The fault controls the northeastern boundary of the Muğla basin and cuts mainly through crystallized limestone and marble. Fault scarps are clearly visible in places along the 25 km long fault. The fault planes with a high dip angle to SW are generally covered by thick slope deposits. In this study, morphometric and paleoseismologic investigations were performed in order to investigate the tectonic activity of the Muğla Fault. The calculated morphometric indices; hypsometric integral (HI), ratio of valley floor width to valley height (V_f), mountain front sinuosity (S_{mf}), revealed that the Muğla Fault controls the morphology and tectonic processes are more dominant than erosional processes. An excavated surface in a construction area in the Muğla city center was studied for collecting paleoseismological data. The data from this surface suggest a historical earthquake that occurred around B.C. 6000 and at least one (possibly two) paleoearthquake(s) after B.C. 5200. We suggest that the two (possibly three) paleoevents, which are determined in this study, were able to rupture the surface and the magnitude of each event was M ≥ 6.

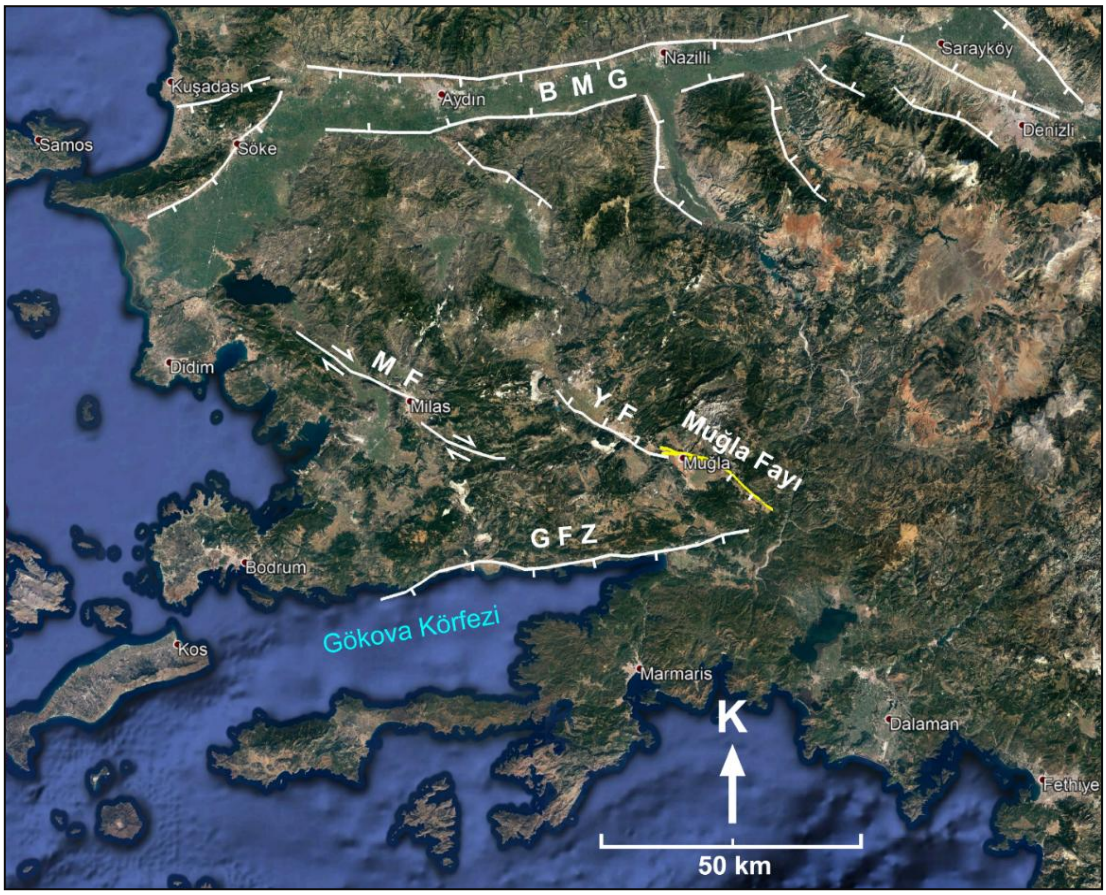
***Keywords**: Seismicity, Morphometry, Muğla Fault, Paleoseismology.*

GİRİŞ

Türkiye'nin ve dünyanın sismik olarak en aktif olan bölgelerinden biri olan Ege bölgesi, güneyinde Helenik yay boyunca gelişen bir dalma-batma zonu ve bunun kuzeyinde etkin olan açılma tektoniğine bağlı gelişmiş yapılar ile temsil edilir. Türkiye sınırları dâhilinde Batı Anadolu'nun aktif olarak deforme olduğu ve baskın yönü kuzey-güney olan açılma gerilmelerine maruz kaldığı bilinmektedir. Ege bölgesinde izlenen açılma tektoniğinin sebebi olarak farklı modeller ileri sürülmüştür. Bu modeller, "tektonik kaçma modeli", "yay-ardı havzası gerilme modeli", "orojenik çökme modeli" ve "iki aşamalı episodik" model olmak üzere dört başlık altında toplanabilir (Seyitoğlu and Scott, 1996; Bozkurt, 2001). Tektonik kaçma modeline göre Ege bölgesinde izlenen gerilme, Anadolu bloğunun Geç Serravaliyen'den (12 My) itibaren, sağ yanal Kuzey Anadolu ve sol yanal Doğu Anadolu fayları boyunca batıya doğru hareket etmesi ile ilişkilidir (örn: Dewey and Şengör, 1979; Şengör, 1979; 1980; 1982; 1987). Yay-ardı havzası gerilme modelinde Helenik yayın G-GB yönündeki göçünden kaynaklanan yay-ardı gerilmesi ve

dalan levhanın geriye doğru hareket etmesinin kuzeyde kalan kesimde gerilmeye neden olduğu ileri sürülür (örn: McKenzie, 1978a ve 1978b; Le Pichon and Angelier, 1979; 1981; Jackson and McKenzie, 1988). Orojenik çökme modeli, Geç Oligosen-Erken Miyosen'de Neotetis'de meydana gelen çarpışmanın ardından aşırı kalınlaşan kıta kabuğunun açılması ve incelmesi olarak açıklar (örn: Dewey, 1988; Seyitoğlu and Scott, 1991; 1994; 1996). İki aşamalı episodik model ise Ege bölgesindeki açılmalı tektonik rejimin gelişmesini Miyosen-Erken Pliyosen'de orojenik çökmeden kaynaklanan gerilme fazı ve buna Pliyo-Kuvaterner'de Anadolu bloğunun batıya kaçışından kaynaklanan K-G gerilme fazının eklenmesine bağlar (Koçyiğit et al., 1999).

Batı Anadolu'da görülen doğu-batı gidişli büyük horst ve grabenler, bölgedeki en belirgin morfotektonik unsurlardır (Şekil 1). Bunların en önemlileri kuzeyden güneye Edremit, Gediz, Büyük Menderes ve Gökova grabenleridir. Bu grabenlerin oluşum yaşı ile ilgili değişik görüşler vardır. İleri sürülen yaşlar Geç Oligosen'den Pliyosen'e kadar değişir (Şengör, 1979; Şengör and Yılmaz, 1981; Şengör et al., 1985; Seyitoğlu and Scott, 1991; Seyitoğlu et al., 1992; Barka, 1994; Barka et al.,1995).



Şekil 1. GB Türkiye'nin sadeleştirilmiş aktif fay haritası üzerinde Muğla Fayı'nın konumu. BMG: Büyük Menderes Grabeni, MF: Milas Fayı, YF: Yatağan Fayı, GFZ: Gökova Fay Zonu.

Figure 1. The location of the Muğla Fault on simplified active fault map of SW Turkey. BMG: Büyük Menderes Graben, MF: Milas Fault, YF: Yatağan Fault, GFZ: Gökova Fault Zone.

Batı Anadolu grabenlerini oluşturan faylara bağlı olarak yaygın bir sismik etkinlik söz konusudur (KOERI, ISC, EMSC). Tarihsel dönemlerde bu faylardan kaynaklanan pek çok önemli deprem meydana gelmiştir (örn: Ergin vd., 1967; Soysal vd., 1981; Ambraseys and Finkel, 1991; Guidoboni et al., 1994; Ambraseys and Jackson 1998; Guidoboni and Comastri, 2005; Ambraseys, 2009). Batı Anadolu'da sismotektonik çalışmalarda elde edilen fay düzlem çözümleri bölgedeki baskın faylanma tipinin normal faylanma olduğunu ve yer yer doğrultu-atım bileşeninin de eşlik ettiğini göstermektedir (örn: Jackson et al., 1982; Papazachos et al., 1984; McKenzie and Yılmaz, 1991; Taymaz et al., 1991; 2004; Yolsal-Çevikbilen et al., 2014, KOERI, NEIC).

Ege bölgesindeki kıtasal deformasyonun tanımlanıp ölçülebilmesi amacıyla ülkemizden ve farklı ülkelerden araştırmacılar, bölgedeki levha hareketlerini GPS ölçümleri ile izlemişler ve blok modelleme çalışmaları yapmışlardır. (Jackson et al. 1982; Reilinger et al., 1997; Barka and Reilenger 1997; Kahle et al., 2000; Nyst and Thatcher 2004; Reilinger et al., 2006). Reilinger et al. (2006) tarafından yapılan blok modelleme çalışmasında Gökova Körfezi civarında kuzey-güney yönde 20 mm/yıl açılma hızı ile beraber yaklaşık 9 mm/yıl sol yanal hareket hızı hesaplanmıştır.

Muğla Fayı ilk defa Şaroğlu vd. (1987) tarafından sol-yanal doğrultu atım bileşeni olan normal fay karakterinde bir aktif fay olarak haritalanmış ve Yatağan Fayı ile beraber Muğla-Yatağan Fay Zonu olarak adlandırılmıştır. Barka et al. (1996) Muğla ili doğusunda fayın normal fay karakterinde olduğunu belirtmiştir. Karabacak (2016), Muğla Fayı boyunca yaptığı morfolojik gözlemlerde genç derelerin çarpıldığını ve fay kontrolünde gelişmiş Kuvaterner yaşlı çökeller bulunduğunu gözlemlemiştir. Yazar, bu birimler içerisinde yaptığı arazi çalışmalarına dayanarak fayın normal bileşenine sağ-yanal doğrultu atım bileşeninin de eşlik ettiğini belirtir. Gözlemlediği oblik bileşenin, Muğla Fayı'nın doğrultusunun bölgedeki ana fay sistemleri doğrultusuna yaptığı oblik açı neticesinde geliştiğini ileri sürmüştür.

Muğla Fayı GB Anadolu'da yer alan aktif bir yapıdır. BKB-DGD gidişli ve GB'ya eğimli bu normal fay Muğla il merkezi ile GD'da yer alan Gölcük köyü arasında yaklaşık 25 km uzunluktadır. İl merkezinin batısında yer alan Akçaova civarında yaklaşık D-B konumlu fay kolları ile KB-GD gidişli fakat KD'ya eğimli Yatağan Fayı ile birleşir. Büyük Menderes ve Gökova Fay Zonu gibi büyük ölçekli aktif yapılar arasında yer alan Yatağan ve Muğla çapraz fayları hakkında tarihsel deprem aktivitesine dair basılı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, TÜBİTAK Projesi (Proje no: 116Y179) çerçevesinde yapılan çalışmaların bir parçası olarak Muğla Fayı'nın jeolojik, morfometrik ve paleosismolojik özellikleri araştırılmıştır.

AMAÇ ve YÖNTEM

Muğla bölgesinde tarihsel dönemlerde önemli hasarlar yaratmış depremlerin varlığı bilinmektedir (örn: Pınar ve Lahn., 1952; Guidoboni et al., 1994; Guidoboni and Comastri, 2005; Ambraseys, 2009). Ancak tarihsel kaynaklardan derlenen bu kataloglarda, bu depremlerin hangi faylardan kaynaklandığına dair bilgiler muğlaktır. MTA tarafından güncellenen "Türkiye Diri Fay Haritası" Muğla ili ve civarında pek çok yerleşim alanının aktif fayların üzerinde veya yakınında olduğunu göstermiştir (Emre vd., 2013). Bu fay hatlarının jeolojik, morfolojik, kinematik ve paleosismik açıdan incelenmesi, bölgenin yaşamsal ve sosyo-ekonomik geleceği açısından önemlidir. Bu çalışmanın amacı ülkemizin büyükşehirlerinden biri olan Muğla ilini kuzeyden sınırlayan Muğla Fayı'nın güncel aktif tektonik yöntemlerle araştırılarak deprem zararlarını azaltmaya yönelik çalışmalarına altlık veri üretebilmektir.

Muğla Fayı üzerinde uydu (Landsat ETM, Google Earth) ve radar görüntüleri yardımıyla uzaktan algılama çalışmaları yapılmış ve yapılan analizler doğrultusunda arazi çalışmaları planlanmıştır. Arazi çalışmalarında uzaktan algılama çalışmaları ile oluşturulan fay haritası yerinde kontrol edilmiş, gerekli düzeltmeler yapılmış, fay civarındaki jeolojik birimler incelenmiş, fay düzlemlerinin görüldüğü mostralarda ölçümler alınmıştır. Muğla Fayı üzerinde bir lokasyonda paleosismolojik çalışma gerçekleştirilmiştir. Fay düzlemine dik yönde açılan bir inşaat yarması 1:20 ölçeğinde loglanmıştır. Bu yarmada belirlenen olay seviyelerinin tarihlendirilebilmesi için C-14 (Karbon-14) ve lüminesans yöntemleri ile analiz edilmek üzere örnekler toplanmıştır. Karbon-14 için toplanan numuneler Poznan Radyokarbon Laboratuvarı'nda tarihlendirilmiştir. Lüminesans tarihlendirme için ışık geçirmez tüplerde alınan numunelerin mineral ayırma işlemleri Sakarya Üniversitesi SARGEM/MALTA laboratuvarında kuvars ve K-feldspat mineralleri için yürütülmüştür. Eş değer doz (De; gray) dağılımları Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Lüminesans Tarihlendirme Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan Risø TL/OSL DA-20 okuyucusunda, Dr. Eren Şahiner tarafından kuvars mineralinden mavi ışık ile optik uyarımlı lüminesans (OSL) protokolü ile ölçülmüştür. Çevresel doz hızı (Dr; gray/binyıl) belirlenmesi için gerekli olan U ve Th ile Rb ve ^{40}K elementlerinin oranları örnek tüpünden elde edilen 50 gr ağırlığındaki çökelin ALS laboratuvarından (ICP-MS ve AES) hizmet alımı yöntemiyle belirlenmiştir. Örneklerin yaşları, De dağılımlarının istatistiksel analizi ve her örnek için hesaplanan Dr değerlerine bölünmesi ile elde edilmiştir. Muğla Fayı'nın morfoloji üzerindeki etkilerinin belirlenebilmesi için morfometrik analizler ve indis hesaplamaları yapılmıştır. Morfometrik analizlerin gerçekleştirilmesi için 1/25.000 ölçekli yükseklik eğrileri işlenerek sayısal yükseklik modeli (SYM) oluşturulmuş ve bu model, ESRI-ArcMap (v.10.5) yazılımı ve içerisindeki betikler yardımı ile analiz edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan morfometrik analizler

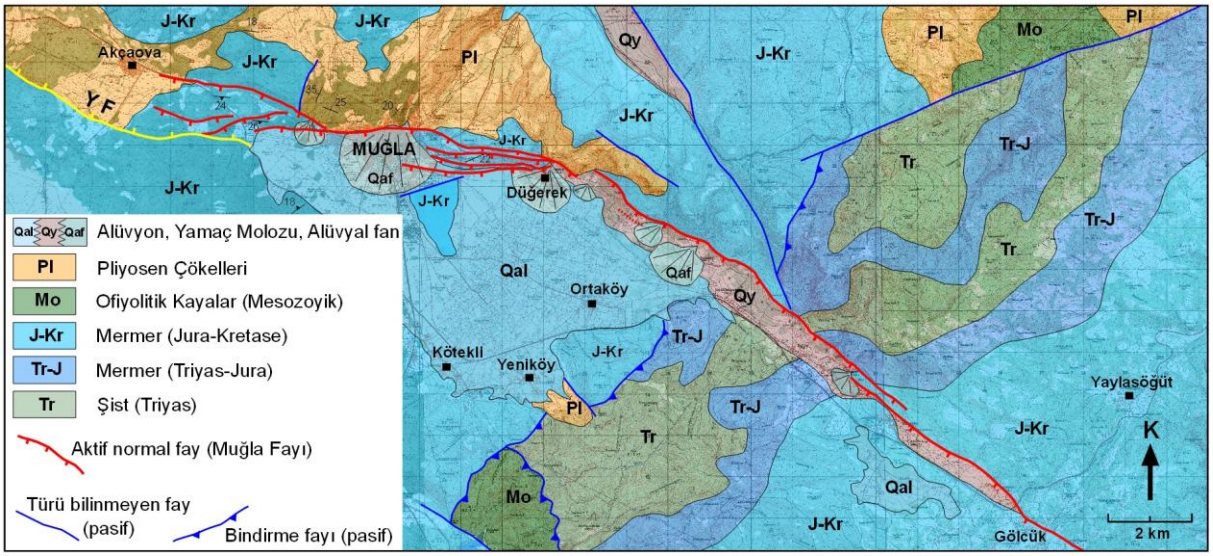
Hipsometrik Eğri ve Hipsometrik İntegral (HI), Vadi tabanı genişliğinin vadi yüksekliğine oranı (Vf) indisi, Dağ Önü Eğriliği (Smf) hesaplamalarını kapsamaktadır.

Tüm bu yöntemler ile elde edilen bilgiler arazi gözlemleri ile birlikte değerlendirilerek Muğla Fayı'nın genç tektonik özellikleri araştırılmıştır.

MUĞLA FAYI CİVARININ JEOLOJİSİ

Güneybatı Anadolu'da, K-KB uzanımlı sedimanter havzalar yer alır. Bunlar Geç Oligosen döneminde Kale-Tavas Havzası'nın gelişimiyle ortaya çıkmaktadır (Gürer and Yılmaz, 2002; Gürer et al., 2013). Kale-Tavas Havzası, Paleojen-Neojen yaşlı denizel bir havzadır. Gerilme öncesi tektonik dönemde Likya Napları'nın Menderes Masifi'ni aşarak güneye yerleşmesi sonrası, Kale-Tavas Havzası Geç Oligosen - Erken Miyosen' de bir domuz sırtı havza (piggyback basin) olarak Likya napları üzerinde gelişmiştir (Gürer and Yılmaz, 2002). Temel üzerinde uyumsuz olarak gelişen havza, Geç Oligosen - Erken Miyosen yaşlı karasal kırıntılar ve denizel çökeller ile temsil edilmektedir. Orta Miyosen'de bir çek-ayır havza olarak Eskihisar-Tınaz Havzası, Geç Miyosen'de ise Yatağan Havzası oluşmuştur (Gürer et al., 2013). Bu havzalara ait çökeller Muğla Grubu olarak tanımlanmaktadır (Hakyemez, 1989; Gürer et al., 2013). Muğla Grubu, Turgut, Sekköy, Yatağan ve Milet formasyonlarından oluşmaktadır (Atalay, 1980; Hakyemez, 1989; Gürer et al., 2013). Orta Miyosen yaşlı, kömür damarları içeren karasal kırıntılı çökeller üzerine, kireçtaşı ve marnlar uyumlu olarak gelir (Atalay, 1980; Hakyemez, 1989; Gürer et al., 2013). Geç Miyosen yaşlı, kırmızı renkli, çakıltaşı, kumtaşı ve çamurtaşları ve üste doğru kireçtaşları ile devam eden istif Pliyosen yaşlı gölsel karbonatlara geçer. Geç Miyosen'de başlayıp Erken Pliyosen'de kesintiye uğrayan K-G yönlü açılma, Geç Pliyosen'de yeniden aktif hale gelerek ve D-B uzanımlı yeni grabenlerin gelişmesine yol açmıştır (Gürer and Yılmaz, 2002). Bu dönemde, Paşapınarı, Muğla, Yeşilyurt, Ula ve Gökova havzaları gelişmiştir (Gürer et al., 2013). Bu havzalar, Gürer et al. (2013) tarafından yüksek açılı normal faylarla açılan ve kontrol edilen yarım grabenler olarak değerlendirilmiştir.

Muğla Fayı, yukarıda özetlenen tektonik evrim sonucunda Muğla Havzası'nın kuzeydoğu sınır fayı olarak çalışmaktadır. Fayın kuzeyinde, Menteşe, Muğla, Düğerek ve Yaraş civarında Jura yaşlı karbonat çökelleri yer almaktadır. Birim genellikle gri-bej renkli mikritik, rudistli kireçtaşları ve dolomitik kireçtaşlarından oluşmaktadır (Şekil 2). Aktimur vd. (1996), bu birimi Menderes Masifi'ne ait Marçal grubu olarak adlandırmışken, Gül vd. (2014) birimi Gereme Formasyonu olarak tanımlamıştır. Muğla'nın kuzeybatısında ise Muğla Fayı, karasal çökelleri kesmektedir (Şekil 2). Aktimur vd. (1996) birimi Geç Miyosen yaşlı Yatağan Formasyonu olarak adlarken, Gül vd. (2014) birimi Pliyosen yaşlı Milet Formasyonu olarak yorumlamıştır.



Şekil 2. Muğla ili ve çevresinin jeoloji haritası (Gül vd., 2014 ve Konak ve Şenel, 2002'den derlenmiştir) (YF: Yatağan Fayı).

Figure 2. Geological map of Mugla city and surroundings (compiled from Gül et al., 2014 and Konak ve Şenel, 2002) (YF: Yatağan Fault).

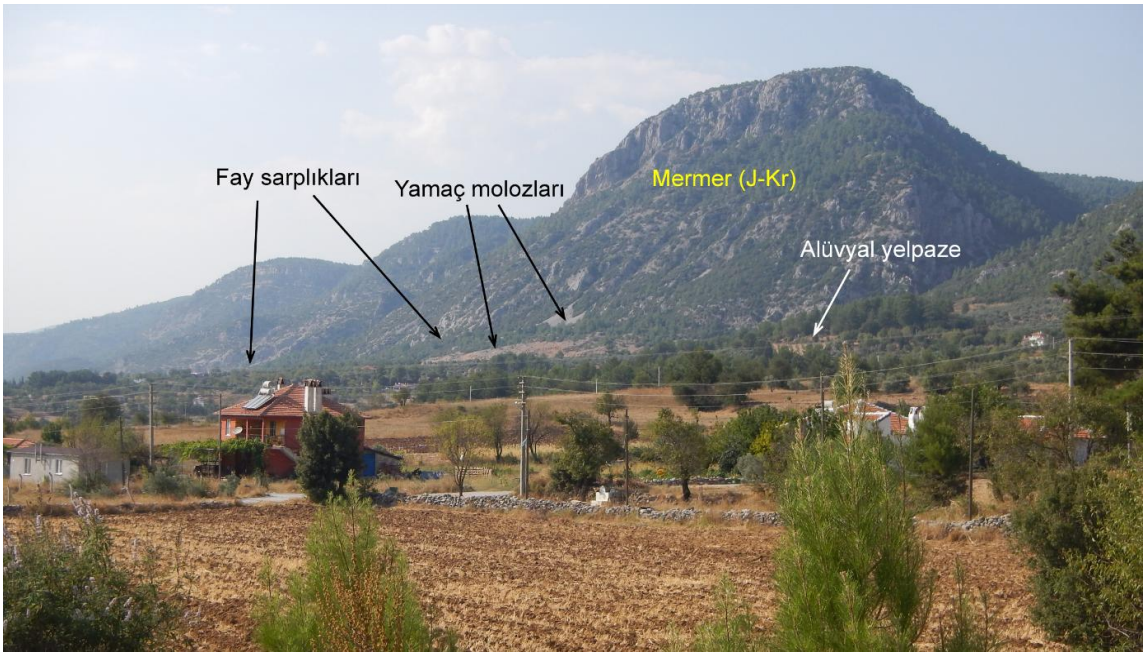
Muğla Fayı, yukarıda söz edilen kireçtaşları ve konglomeralardan türeyen Kuvaterner çökelleriyle örtülürken bir yandan da faylanmalar sonucu onları kesmektedir. Bölgedeki Kuvaterner çökellerini üç grupta incelemek mümkündür; 1) yamaç molozları (kolüvyum), 2) alüvyal yelpaze çökelleri, 3) alüvyon çökelleri (Gül vd., 2014; Gül, 2015). Yamaç molozları genellikle fay şevi üzerinde kama şeklindeki birikimlerden oluşmaktadır. Litolojik olarak genellikle köşeli, yarı köşeli tanelerden oluşup kristalize kireçtaşlarından türemiştir. Muğla Fayı boyunca görülen tüm dikliklerin önünde yamaç molozları yer almaktadır. Alüvyal yelpazeler daha düşük engebeli alanlarda görülmektedir. Muğla kent merkezi, Düğerek ve Yaraş civarında yelpaze şeklindeki morfolojisiyle kendini göstermektedir. Birim gevşek-sıkı tutturulmuş çakıl, çakıllı/kumlu kil ve kil ardalanmalarından oluşmaktadır. Genellikle yarı-köşeli, yarı-yuvarlak tanelerden oluşmaktadır. Alüvyon çökelleri ise Muğla Havzası'nı dolduran çökellerdir. Yamaç molozları ve alüvyal yelpazelerin önünde, tüm havza içinde yer alırlar (Şekil 2 ve 3). Litolojik olarak kum, silt, kil ve konglomera paketlerinden oluşmaktadır. Havza genelinde ince taneli birimler hâkim iken dere yatakları boyunca orta-iyi yuvarlanmış konglomeralara rastlanır.

MUĞLA FAYI'NIN GEOMETRİSİ VE MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Muğla batısındaki Akçaova civarında yaklaşık D-B konumlu fay kolları ile başlayan Muğla Fayı, il merkezini kuzey kesimden keserek geçer. Muğla ili civarında yaklaşık D-B konumlu olan kademeli faylar D ve GD'ya doğru dönerek KB gidişli, GB'ya eğimli, yer yer kademeli faylar halinde devam eder (Şekil 3 ve 4). İl merkezi ile Düğerek beldesi arasında birbirine paralel bir kaç kol halinde izlenen fay, Düğerek'ten sonra güneydoğuya dönerek Gölcük'e kadar daha sade

bir geometri ile izlenir. Muğla Fayı Gölcük köyünden sonra takip edilememiştir. Bunun nedeni Gökova Fay Zonu'nun Ula üzerinden devam ederek Muğla Fayı'nı kesmesi olabilir. 13.04.2017 Ula-Kavakçalı (Mw: 5.0) ve 24.11.2017 Ula-Arıcılar (Mw: 5.1) depremlerinin yaklaşık D-B konumlu Gökova Fay Zonu'nun doğuya devamı niteliğinde olması bu yaklaşımı destekler niteliktedir (Eskiköy et al., 2019).

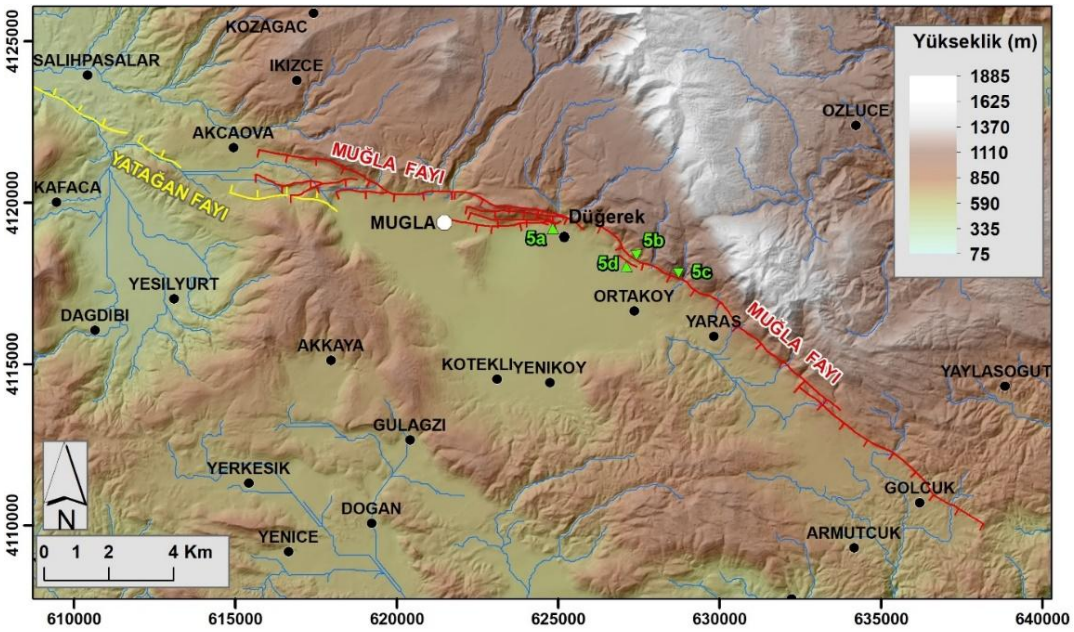
Toplam uzunluğu 25 km olan Muğla Fayı, kuzeyindeki Doğu Menteşe dağlarının güney kesimini denetler ve morfolojik olarak belirgin veriler sunar (Şekil 3). Faylanma ile denetlenen dağ önü dikliği nedeniyle fay çoğu zaman kalın bir yamaç molozu ile örtülmüştür (Şekil 2 ve 3). Bu yamaç döküntülerinin kalınlıkları morfolojik konuma göre yamaç eteklerinde 35-40 metreye ulaşabilir. Bu alanlarda daha ince taneli ve iyi boylanmış kireçtaşı çakıl ve blokları mıcır olarak kullanılır. Düğerek doğusunda fay düzleminin tek kola döndüğü ve havza kenarından ziyade



Şekil 3. Muğla Fayı'nın Düğerek civarındaki görünümü. Fay şevleri yamaç molozu veya alüvyal yelpazelerle örtülmektedir (bakış yönü K'e).

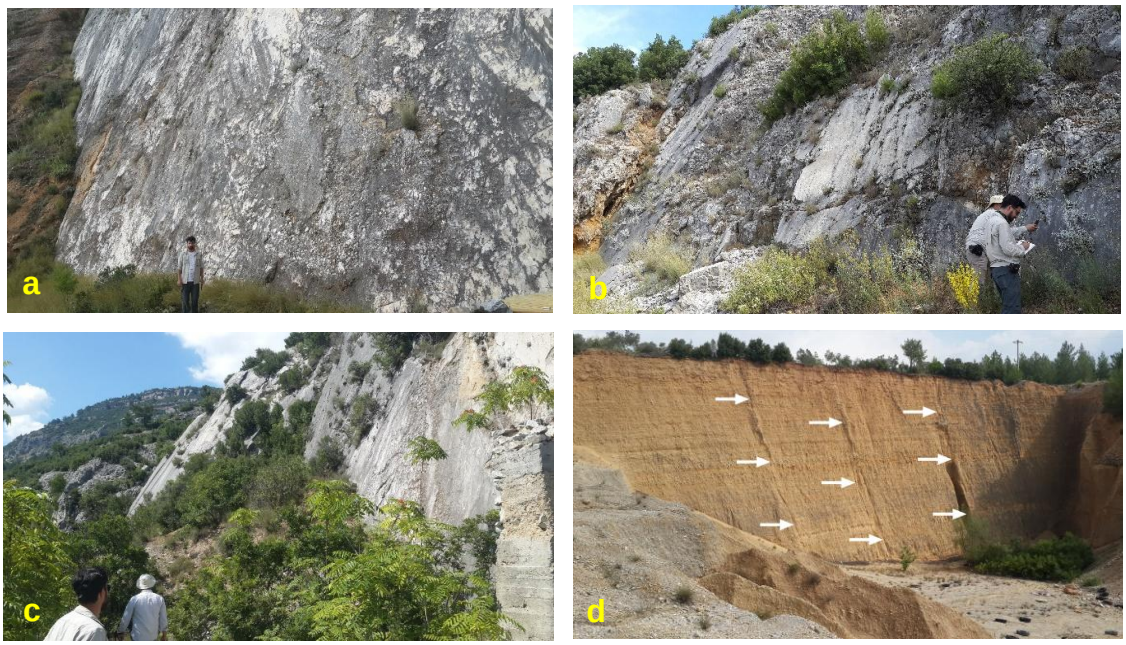
Figure 3. General view of the Muğla Fault around Düğerek. Fault scarps are covered by scree and alluvial fan (looking to N).

yamaçta yer aldığı gözlenmiştir. Tavan bloğu üzerinde, çok kalın bir yamaç molozu örtüsünde açılan çakıl ocağında, ana faya paralel, düşey konumlu kırıklar görülmüştür (Şekil 5d). Ana fayın 200 metre güneyinde yer alan bu kırıklar üzerinde herhangi bir yer değiştirme görülmemiştir ve ikincil yapılar olarak değerlendirilmiştir. Fay GD'ya doğru basit bir kol halinde devam eder ve Yaraş civarında üzerlemeli bir sağ-sıçrama ile Gölcük köyüne kadar izlenir. Özellikle Muğla doğusu ile Yaraş arasında mermerleri kesen açık fay şevi mostraları mevcuttur (Şekil 5 ve 6).



Şekil 4. Sayısal yükseklik modeli üzerinde Muğla Fayı'nın konumu. Yeşil üçgenler Şekil 5'teki fotoğrafların konumlarını göstermektedir.

Figure 4. The location of the Muğla Fault on Digital Elevation Model. Green triangles show the locations of photographs in Figure 5.



Şekil 5. Mermerlerde gelişmiş fay şevleri; yerleri Şekil 4'te verilmiştir. a) Düğerek köyü (bakış yönü KB'ya); b) Düğerek doğusu (bakış yönü K'e); c) Ortaköy doğusu (bakış yönü KB'ya); d) Ortaköy kuzeyindeki mıcır ocaklarında ana faya paralel gelişmiş kırıklar (bakış yönü G'e).

Figure 5. Fault scarps on marble, with locations in Figure 4; a) Düğerek village (looking to NW), b) East of Düğerek (looking to N) and c) East of Ortaköy (looking to NW). d) Some cracks parallel to main fault in debris pit (looking to S).



Şekil 6. Muğla Fayı üzerinde alınan ölçümlere ait bazı örnekler; A) Düğerek doğusu (627170.05 D / 4118220.65 K), B) Düğerek (624785.92 D / 4119246.89 K), C) Orta Yaraş (61540.67 D / 4115200.81 K).

Figure 6. Some examples of measurement taken from Muğla Fault; A) East of Düğerek (627170.05 E / 4118220.65 N), B) Düğerek (624785.92 E / 4119246.89 N), C) Orta Yaraş (61540.67 E / 4115200.81 N).

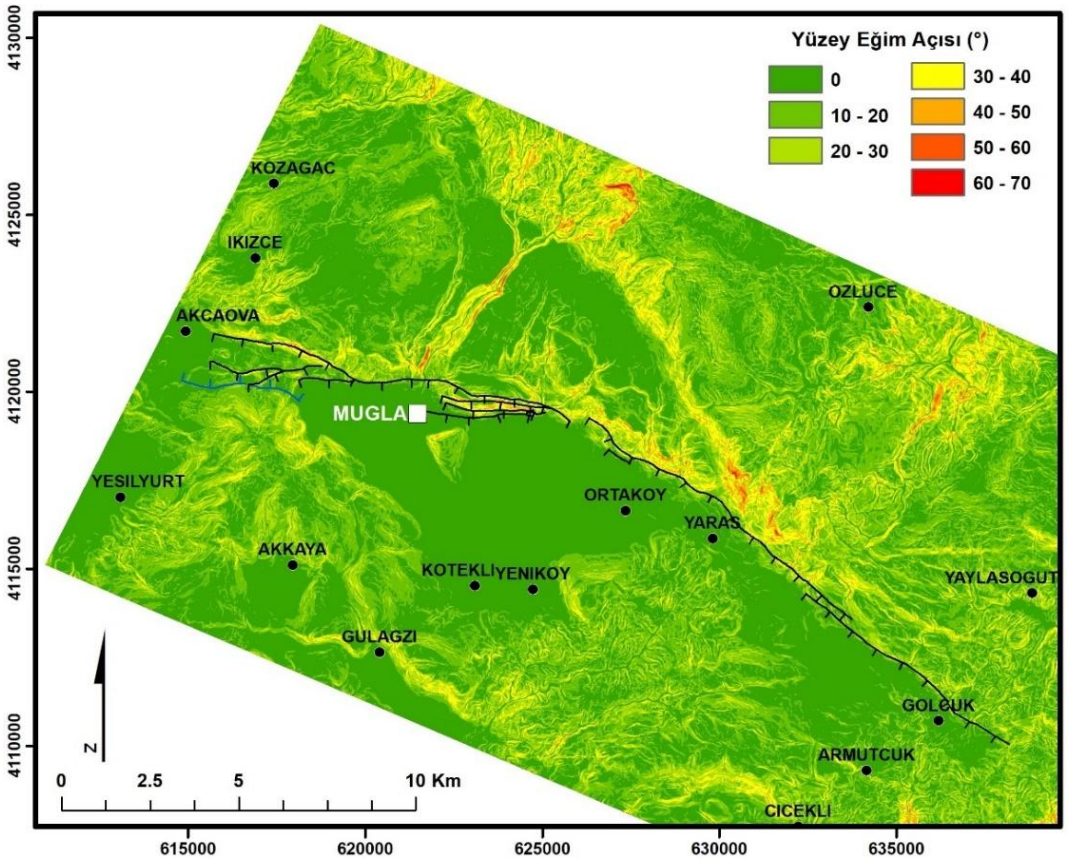
MUĞLA FAYI'NIN MORFOMETRİK ÖZELLİKLERİ

Muğla Fayı'nın bölgenin morfolojik gelişimine etkisinin incelenmesi ve nicel veri üretilebilmesi için morfometrik analiz çalışmaları yapılmıştır. Hipsometrik integral (HI), vadi tabanı genişliğinin vadi yüksekliğine oranı (V_f) ve dağ cephesi eğriliği (S_{mf}) indisleri kullanılarak bölgedeki morfolojik unsurlar üzerindeki aktif tektonik etkinin hesaplanması amaçlanmıştır.

Muğla Havzası kuzey sınırında Muğla Fayı ile sınırlanan ve uzun ekseni faya paralel olarak KB-GD yönünde gelişmiş genç bir havzadır. Havzanın uzun ekseni yaklaşık 12 km, kısa ekseni maksimum 5 km'dir ve toplam yüzölçümü 40 km^2 civarındadır. Havzanın taban yüksekliği 600-650 m arasında değişir. Muğla Fayı tarafından sınırlanan kuzey kesimlerde ise, eğimi 70º'ye ulaşan topoğrafik sarplıklar ile fayın taban bloğunda 1000-1100 m yüksekliğe ulaşılmaktadır. Taban blok üzerinde faya hemen hemen dik gelişmiş genç drenaj ağı Muğla Havzası'na bağlanmaktadır. Muğla ili ve Düğerek civarında bu drenajlar önünde alüvyal fanlar gelişmiştir (Şekil 2).

Muğla Havzası'nda topoğrafik yüzey eğim değerleri 0°-10° arasında olup hemen hemen yatay yüzeyler izlenir (Şekil 7). Havzanın kuzey sınırında, Muğla Fayı boyunca eğim değerleri genellikle 35°-40° civarı olup doğuya doğru bu değerler 50°-70°'lere ulaşır. Yaraş-Gölcük

arasında Muğla Fayı kuzeyindeki 20°-40° eğimli yüzeyler ile güneyindeki daha düşük eğimli yüzeyler arasında keskin bir sınır oluşturur.

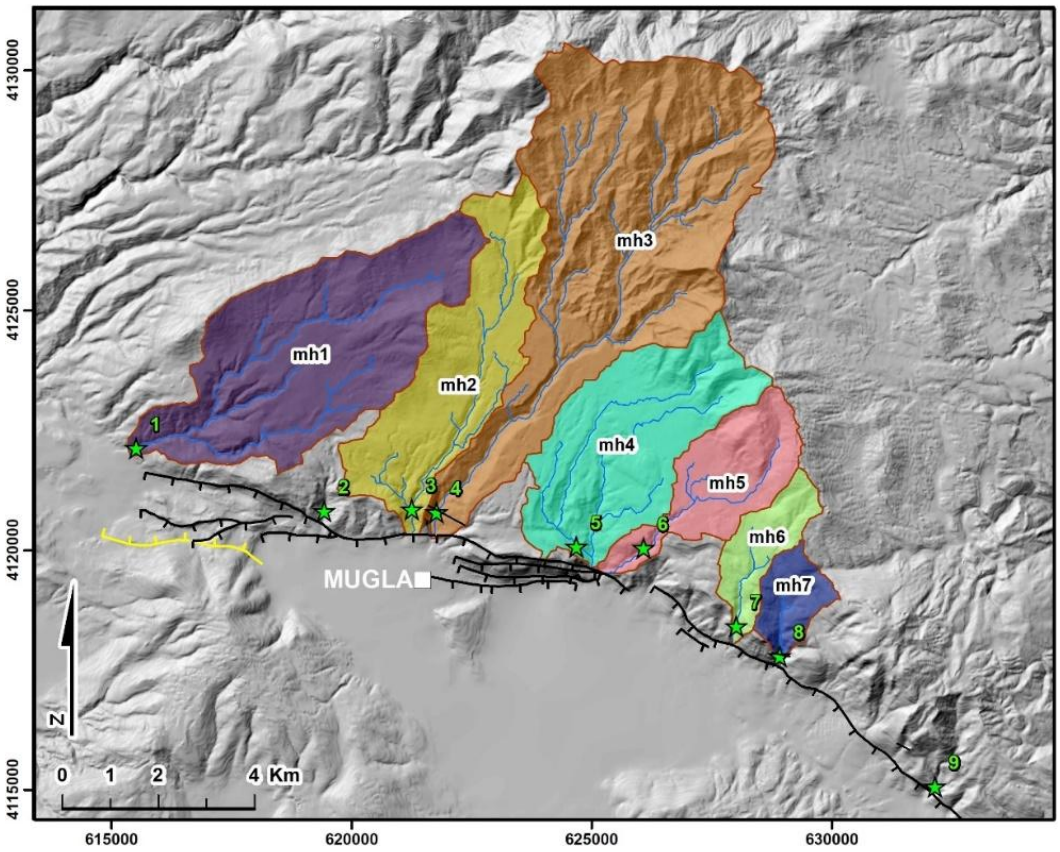


Şekil 7. Muğla Fayı boyunca oluşturulan topoğrafik yüzey eğim haritası.

Figure 7. Topographic slope map along the Muğla Fault.

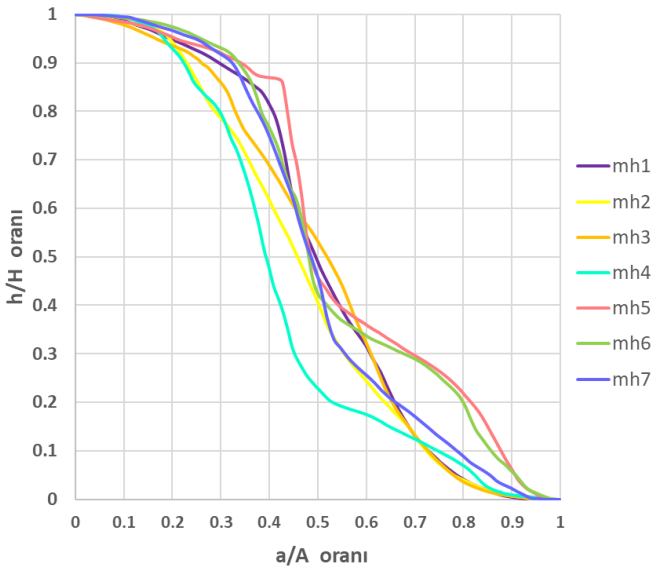
Hipsometrik Analiz

Muğla Fayı taban bloğu üzerinde, Muğla Havzası'na drene olan 7 farklı akaçlama ağı ArcMap Hydrotools aracı kullanılarak ayırtlanmış ve bu havzaların hipsometrik eğrileri ve integral değerleri hesaplanmıştır (Şekil 8). Elde edilen hipsometrik eğriler dışbükeye yakın şekiller sunar (Şekil 9). Hesaplanan hipsometrik intergral değerleri ise 0.43 ila 0.56 arasında değişmektedir (Şekil 9, Çizelge 1). Bu eğriler bir arada değerlendirildiğinde, Muğla Fayı taban bloğu üzerindeki bu havzalar ağırlıklı olarak erken olgunluk evresinde, tektonik kuvvetler etkisinde ve nispeten genç havzalardır (Şekil 9).



Şekil 8. Muğla Havzası'na drene olan, Muğla Fayı taban bloğu üzerinde kalan akaçlama ağları ve havza sınırları. Yeşil yıldızlar V_f indisi hesaplanan noktaları gösterir.

Figure 8. The drainage basins located on the footwall of the Muğla Fault which are draining into the Muğla basin. Green stars mark the locations that the V_f calculations were made.



Şekil 9. Muğla Fayı taban bloğu üzerinde yer alan havzaların hipsometrik eğrilerinin birlikte gösterimi.

Figure 9. Combined graphical display of hypsometric curves of basins located on the footwall of the Muğla Fault.

Çizelge 1. Muğla Fayı taban bloğu üzerinde yer alan havzaların hesaplanan hipsometrik integral (HI) değerleri.
Table 1. Calculated hypsometric integral (HI) values of basins located on footwall of the Muğla Fault.

Havza	HI değeri
mh1	0,51
mh2	0,46
mh3	0,49
mh4	0,43
mh5	0,56
mh6	0,55
mh7	0,51

Vadi Genişlik/Yükseklik Oranı (V_f)

Muğla Fayı boyunca, taban blok üzerinde faya yakın alanlarda 9 farklı vadi içerisinde V_f indisi hesaplamaya yönelik ölçümler yapılmıştır (Şekil 8 ve Çizelge 2). Hesaplanan V_f değerleri 0.16 ile 0.46 arasında değişmektedir. Değerlerin 1'den küçük olması, çoğunun 0.2 civarında hesaplanması taban bloğun hızlı bir şekilde yükseldiğini ve akarsuların buna tepki olarak bloğu derinlemesine kazdığını göstermektedir. Bu şekilde hızlı yükselim akarsuyun vadi tabanını genişletmesine imkân vermemektedir ve V-şekilli veya kanyon tipi vadiler oluşmaktadır.

Çizelge 2. Muğla Fayı boyunca seçilen 9 adet vadide profil ölçümleri ve V_f indisi sonuçları (vadilerin coğrafi konumları için Şekil 8'e bakınız).

Table 2. Profile measurements and results of Vf indices of 9 valleys chosen along Muğla Fault (look Figure 8 for valley locations).

Vadi	**Litoloji**	**E_{ld}**	**E_{rd}**	**E_{sc}**	**V_{wf}**	**V_f**
1	Karasal kırıntılı (Miyosen)	710	730	657	29	0,46
2	Karasal kırıntılı (Miyosen)	842	835	708	22	0,16
3	Karasal kırıntılı (Miyosen)	862	892	741	25	0,18
4	Karasal kırıntılı (Miyosen)	861	870	695	32	0,18
5	Mermer (Jura-Kretase)	842	878	777	27	0,32
6	Karasal kırıntılı (Miyosen)	1022	1034	917	24	0,21
7	Mermer (Jura-Kretase)	1097	932	874	23	0,16
8	Mermer (Jura-Kretase)	871	952	829	15	0,18
9	Mermer (Jura-Kretase)	928	936	801	22	0,16

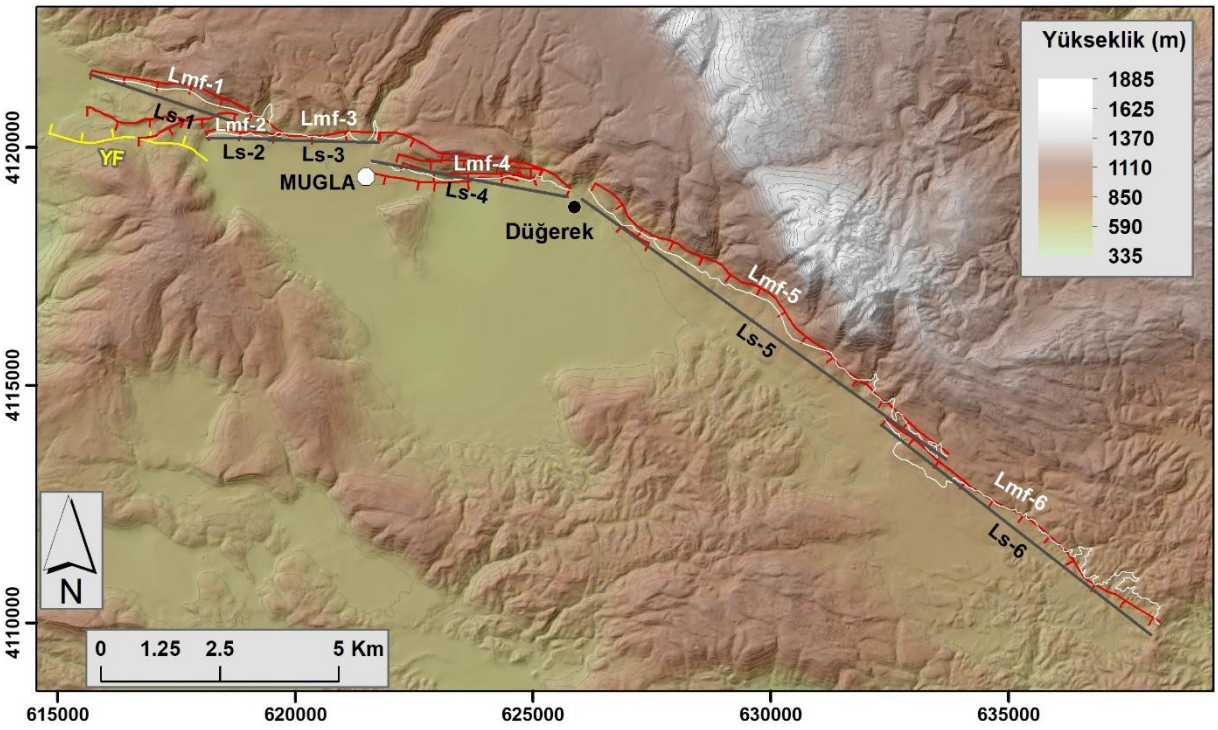
Dağ Önü Eğriliği (S_{mf})

Muğla Havzası'nın kuzey sınırı boyunca, Muğla Fayı'nı takip edecek şekilde dağ önü eğriliği (S_{mf}) indisi hesaplanmıştır (Çizelge 3, Şekil 10). Elde edilen S_{mf} indisi değerleri 1,05 ila 1,67 arasında değişir. S_{mf} değerleri Muğla Havzası kuzey sınırındaki fay kontrolünün güney kesimlere göre daha fazla olduğunu göstermektedir.

Çizelge 3. Muğla Fayı boyunca dağ önü eğriliği (S_{mf}) indisi değerleri.

Table 3. Mountain front sinuosity (Smf) indices along Muğla Fault.

Segment	Lmf	Ls	Smf
Ls-1	4649.24	3940.46	1.18
Ls-2	1638.15	1561.19	1.05
Ls-3	3301.68	2324.09	1.42
Ls-4	4513.75	4186.59	1.08
Ls-5	4614.23	4185.97	1.10
Ls-6	12135.86	9408.55	1.29



Şekil 10. Muğla Fayı boyunca dağ önü eğriliği (S_{mf}) indisi hesaplaması.

Figure 10. Mountain front sinuosity (Smf) indice computation along the Muğla Fault.

MUĞLA CİVARININ DEPREMSELLİĞİ

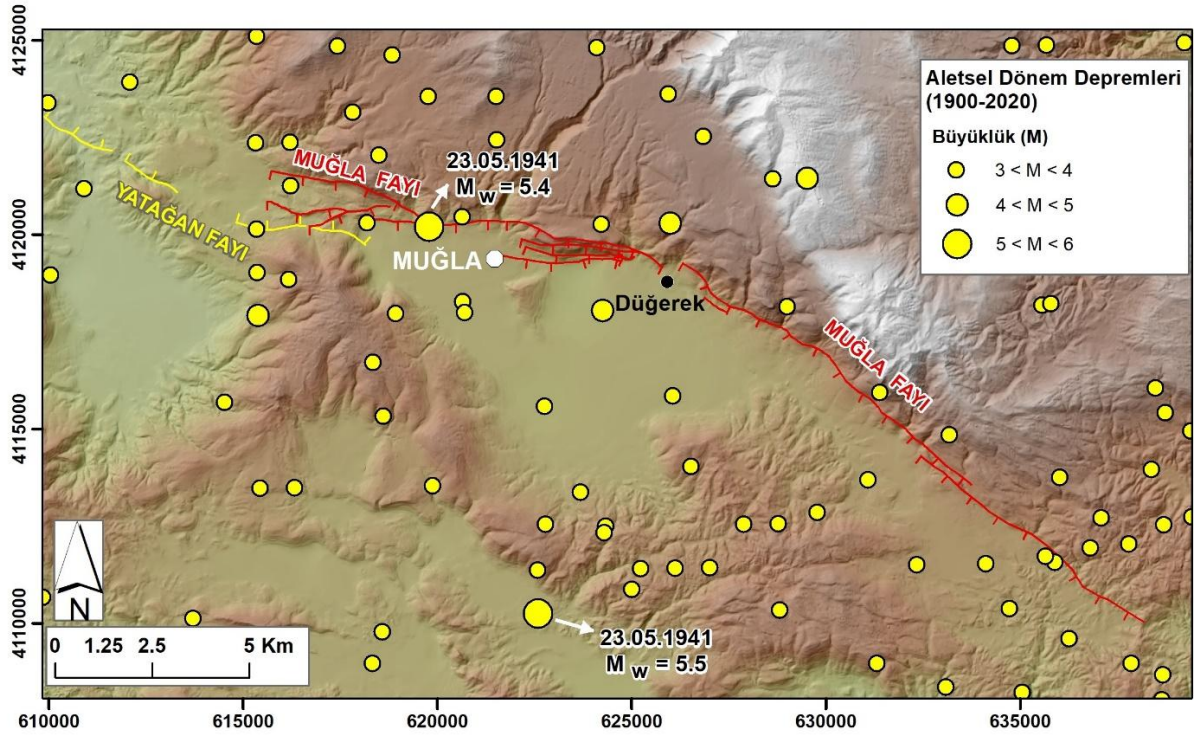
Muğla Fayı üzerinde meydana gelmiş muhtemel depremler tarihsel kataloglardan ve belgelerden yararlanarak araştırılmıştır. Bu kaynaklar incelendiğinde Muğla ili ve civarının depremlerden değişik şiddetlerde etkilendiği, ancak bu depremlerin önemli bir kısmının kaynağının Helenik yay veya Gökova Fay Zonu olduğu anlaşılmaktadır. Bunun güncel örneği 1957 Rodos-Fethiye depreminde de görülür. Deprem Helenik yay üzerinde olmasına rağmen Muğla batısındaki Bayır beldesinde önemli hasarlara yol açmış ve muhtemelen zemin kaynaklı bu hasar sonrasında Bayır beldesi bugünkü yerine taşınmıştır. Benzer şekilde 1 Aralık 1869 yılında meydana gelen bir deprem Menteşe yöresinde ciddi hasarlara yol açmıştır. Ula büyük ölçüde tahrip olmuştur. Fakat depremde asıl tahribat Gökova Körfezi civarında meydana gelmiş, Samos, Makri, Rodos, Bodrum ve İzmir'de de hissedilmiştir (Ambraseys, 2009).

Muğla Fayı kaynaklı olabilecek depremlerden biri 19 Nisan 1896 yılında meydana gelen depremdir. Muğla ve Milas'ta şiddetli hasara yol açan bu deprem, Bayır'da hafif hasara neden olmuştur. Deprem Yüksekkum, Köyceğiz, Aydın'da da hissedilmiştir. Artçı depremler 29 Nisan'a kadar devam etmiştir (Ambraseys, 2009). 1896 depreminin kaynağı şüpheli de olsa Muğla Fayı üzerinde tarihsel kayıtlara geçmiş sık ve büyük depremler olmadığı anlaşılmaktadır.

Muğla Fayı ve civarında 1900 yılı sonrası depremler (aletsel dönem öncesi ve aletsel dönem depremleri) incelendiğinde 1941 yılında büyüklüğü 5'ten büyük olan iki deprem dikkati çekmektedir (Şekil 11). 23 Mayıs 1941 tarihinde öncü sarsıntılarla birlikte Muğla ve civarını etkileyen, Denizli'de de hissedilmiş olan iki deprem meydana gelmiştir. KOERI ve AFAD deprem kataloğuna göre 23 Mayıs günü saat 22:34 ve saat 23:00'de olmak üzere iki büyük şok gerçekleşmiştir. Bu depremlerin büyüklüğü sırasıyla M_w= 5.5 (KOERI) ve M_w= 5.4 (KOERI) olarak hesaplanmıştır. Bu depremlerden iki hafta sonra, 7 Haziran tarihinde de bölgede hasar yapan depremler meydana gelmiş ve bunlar Ersoy vd. (2000) tarafından 23 Mayıs tarihinde meydana gelen depremin artçı sarsıntıları olarak değerlendirilmiştir.

MUĞLA FAYI'NIN PALEOSİSMOLOJİSİ

Muğla Fayı başta Muğla il merkezi olmak üzere Düğerek, Yaraş, Gölcük yerleşimlerinin içinden ya da çok yakınından geçmektedir. Bu çalışmada fay zonu ayrıntılı olarak incelenmiş, önceki çalışmalardan da yararlanılarak haritalanmıştır. Haritalama çalışmaları esnasında uygun hendek lokasyonları da araştırılmıştır. Fay düzleminin yüksek kotlarda yer aldığı kesimlerde önünde birikmiş kalın yamaç molozu nedeniyle uygun hendek alanları bulmak mümkün



Şekil 11. 1900-2020 yılları arasında Muğla Fayı üzerinde ve civarında meydana gelen (M>3) depremler (KOERI).

Figure 11. Seismic activity (M>3) between 1900-2020 on and around the Muğla Fault (KOERI).

olmamıştır. Havza düzlüğündeki kesimlerde ise yoğun yerleşim ve zirai faaliyet nedeniyle uygun hendek alanı bulma konusunda zorluklar mevcuttur. Ancak fay boyunca yaptığımız gözlemler esnasında fay üzerine denk gelen bir inşaat alanındaki yarmada, genç çökeller içerisinde belirlenen yapılar ayrıntılı olarak incelenmiş ve loglanmıştır.

Kışla Yarması

Muğla yerleşim alanı içinde, Zihni Derin Caddesi'nin batı ucuna yakın bir alanda Kışla mevkii olarak bilinen bölgede büyük bir inşaat yarmasında genç çökeller olduğu ve bu çökellerin faylar tarafından kesildiği görülmüştür (Şekil 12 ve 13). Önemli erozyonal yüzeyler ve büyükçe bir kanal geometrisi net olarak görülür. Büyük çoğunluğu kireçtaşı/mermer kırıntı ve bloklarından oluşan gevşek tutturulmuş malzeme alüvyal bir fanı yansıtır. Açılmış yarmanın, aynı zamanda doğudan itibaren izlenen çizgisel bir yükselimin hizasında olması lokasyonun önemini daha da artırmıştır. Havza sınırlayan normal faylarda fayın havza içine göç etme eğilimi sıkça rastlanan bir durumdur (Dart et al., 1995; Cohen et al., 1995). Muğla doğusunda haritalanan ve 4 basamaktan oluşan fay parçalarının en güneyinde yer alan bu bölge, muhtemelen en aktif olan fay kolunu yansıtmaktadır. Bu nedenle bu yarmanın önemli veriler sağlayacağı düşünülmüştür.



Şekil 12. Muğla Fayı üzerinde paleosismoloji çalışması yapılan Kışla yarmasının yeri.

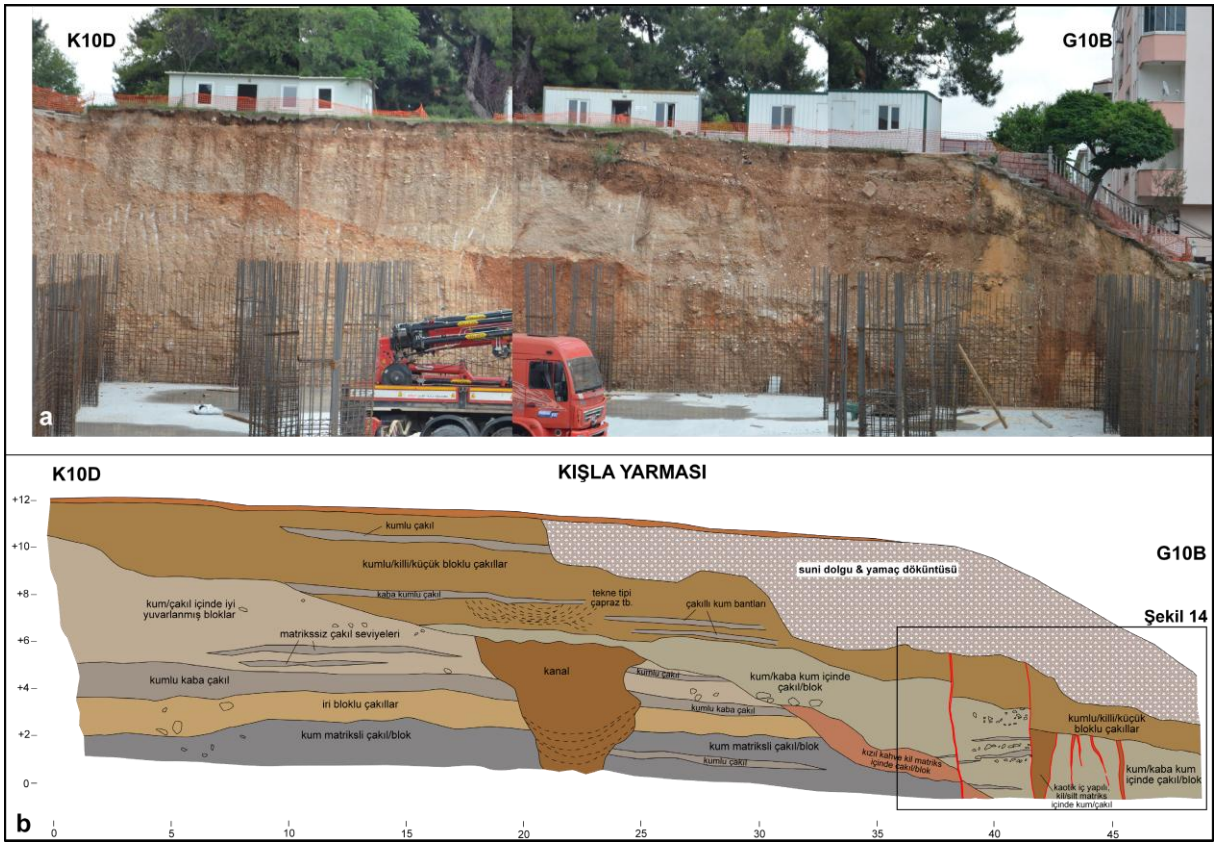
Figure 12. Location of Kışla cut where paleoseismological study was performed on the Muğla Fault.

Yarma stratigrafisi

Kışla Yarması, K10D konumlu, 50 metre uzunluğunda, 12 metre yüksekliğindedir. Yarma duvarında gevşek/orta tutturulmuş çakıl ve bloklar hâkimdir. Matriks kil, silt ve yer yer kumludur. Bu genç çökel seviyeleri yataya yakın konumludur. Yarma stratigrafisinde belirgin bir erozyonal dönem izi görülür. Yarmanın 20 ila 25. metreleri arasında büyükçe ve derin bir eski kanal mevcuttur. Erozyonal yüzey üzerine gelen malzeme bu kanalı da örtmüştür (Şekil 13a ve b). Erozyonal yüzeyin altında kalan eski sedimanter paket ile üstünde depolanan daha genç birimler arasında önemli farklılıklar bulunmamaktadır. Ortam olarak her iki sedimanter paket de alüvyal yelpaze çökellerini yansıtmaktadır. Muğla il merkezinin kuzeyinde, KD'dan GB'ya akan Değirmen Dere'nin taşıyıp serdiği kırıntılı malzeme yarmadaki stratigrafinin ana kaynağıdır.

Yarmanın güney ucuna bakıldığında bir kaç fay kolunun genç çökelleri kestiği görülmüştür. Bu kesim ayrıntılı olarak incelenmiş ve loglanmıştır (Şekil 14). Bu kesimde, yarmanın en altında, erozyonal yüzeyin altında kalan pakete ait kum matriks içinde çakıl ve bloklar ve onun üstüne gelen kızıl kahve kil içinde çakıl ve bloklar görülür. Erozyonal yüzeyin üzerinde, kum ağırlıklı matriks içinde iyi yuvarlanmış çakıl ve bloklardan oluşan kalın bir seviye yer alır. Bu seviyenin içerisinde gevşek tutturulmuş kum/kabakum/çakıl bant ve ara seviyeleri ve mercekleri mevcuttur. Bu seviyelerin üstüne kumlu kil ve siltten oluşan bir matriks içinde küçük çakıl ve

bloklar çökelmiştir. Yarmanın bu kesiminin üst kısımları, kalın bir suni dolgu malzemesi ile örtülmüştür.

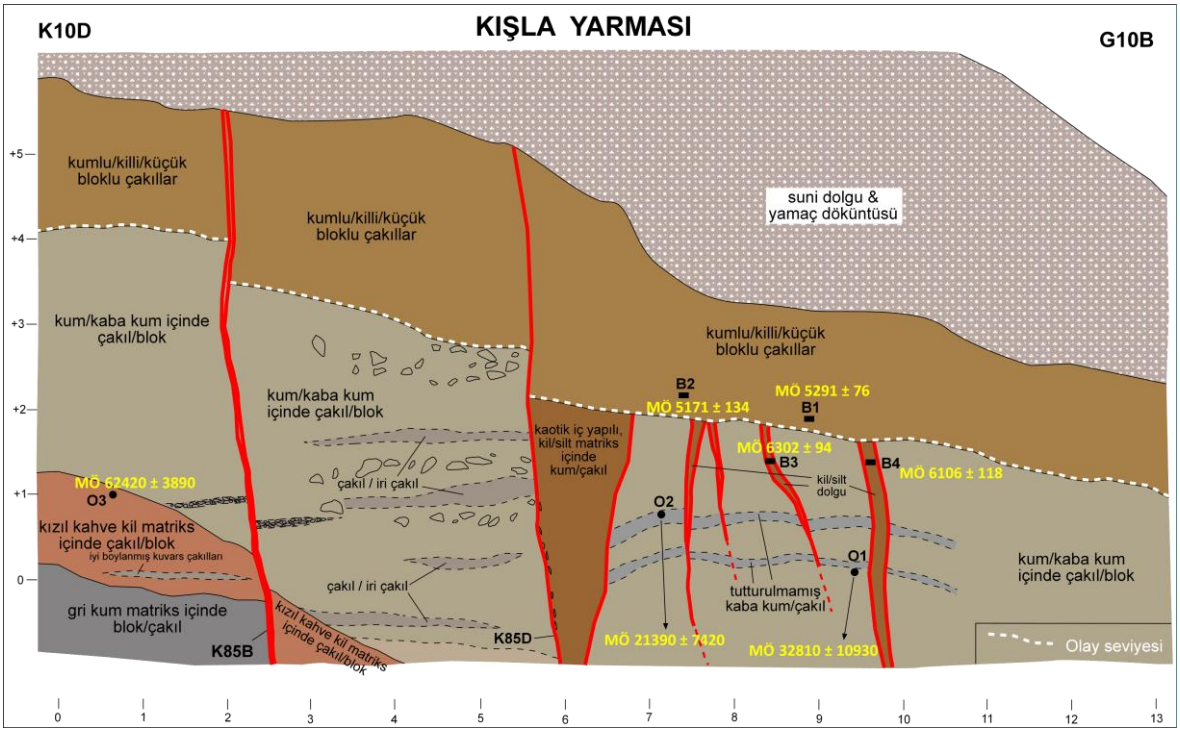


Şekil 13. a) Kışla yarmasının genel görünümü (bakış yönü D'ya). Fay kolları yarmanın güney kesimindedir ve morfolojiyi denetler (621777 D/4119299 K). b) Kışla yarmasının logu.

Figure 13. a) General view of Kışla cut (looking to E). Fault branches are on the southern part of the cut and controls morphology (621777 E/4119299 N). b) Log of the Kışla cut.

Yarmada gözlenen yapısal unsurlar

Yarmanın güney kesiminde yer alan faylar genç (Geç Kuvaterner) çökelleri kesmektedir. Logun 2. ve 3. metreleri arasında düşeye yakın güneye eğimli bir fay kolu belirlenmiştir. Bu fay kolu üzerinde, erozyonal yüzeyin 35 cm düşey olarak yerdeğiştirdiği ölçülmüştür (Şekil 15). Fay kolunun üst kesimleri dolgu malzemesi ile örtüldüğünden, faylanmanın neden olduğu depremi üstten sınırlayacak gözlem yapılamamıştır.



Şekil 14. Kışla yarmasının güney kesiminin ayrıntılı logu.

Figure 14. Detailed log of the southern part of the Kışla cut.

Logun 6. metresinde, yine düşeye yakın güneye eğimli bir fay kolunun genç çökelleri kestiği çok net bir şekilde görülmüştür (Şekil 16). Bu fay üzerinde 35 cm'ye yakın düşey ötelenme ölçülmüştür. 6 ila 7. metreler arasında yer alan bir diğer fay kolu kum matriksli çakıl blok seviyesini kesmiş, kumlu/killi küçük bloklu çakıllar ile örtülmüştür. Bu fay kolunun hareketi ile aynı zamanda meydana gelmiş açılma çatlakları üzerinde çok küçük düşey yer değiştirmeler belirlenmiştir. Bu açılma çatlaklarının içine kil dolgu malzemesinin yerleştiği görülmüştür. Bu fay kolunun ve açılma yapılarının örtülmüş olması, eski bir depremi yaşlandırmak için önemlidir.

Örnek alımı ve yaşlandırma

Yarmada belirgin bir şekilde genç çökellerin faylarla kesildiği görülmektedir. Ancak bu yarmanın üst kesiminin erozyonal olması ve suni dolgu malzemesi ile örtülmüş olması fay kollarının tarihçesini muğlak hale getirmektedir. 6. metredeki ana fay kolunun güneyinde görülen fay kollarının kumlu/killi/küçük bloklu çakıllarla örtülmüş olması, eski bir depremin tarihini üstten sınırlamamıza imkân sağlar. Fay kollarını örten seviyenin alt kesimlerinden alınan iki C14 örneği, MÖ 5200 civarında birbiri ile uyumlu yaşlar vermiştir. Bu veri, yaklaşık olarak MÖ 5200 tarihinden önce bir deprem olduğunu gösterir. Fay kollarına giren dolgu malzemelerinden alınan iki C14 örneği ise MÖ 6100-6300 civarında yaşlar vermiştir (Çizelge 4). Birbirini tamamlayan bu veriler, MÖ 6000 civarında Muğla Fayı üzerinde önemli bir deprem olduğunu gösterir.



Şekil 15. Logun 2. ve 3. metreleri arasında yer alan fayın ve üzerindeki düşey yerdeğiştirmenin görünümü (Bakış yönü D'ya).

Figure 15. Fault seen between 2nd and 3rd meters of the log and vertical offset on it (looking to E).



Şekil 16. Logun 6. metresinde görülen ana fay kolu ve güneyindeki diğer fay ve açılma yapıları.

Figure 16. Main fault branch seen at the 6th m of the log and other branches and extensional structures on the south.

Olay seviyesinin altında yer alan ve aynı ortam ürünü olan kırıntılı paketten alınan yaşlar MÖ 20000-30000 civarında yaşlar verir (Çizelge 5). Bu yaş farkı alttaki paket ile deprem sonrası çökelmiş paket arasında erozyonal bir dönem olduğuna işaret eder. Belirlenen deprem seviyesinin üzerinde yer alan birimlerin 2.5. ve 6. metrelerdeki faylarla kesilmesi MÖ 5200 (örnek no B1 ve B2) sonrasında da bir veya iki deprem ile olay seviyesinin kesilip yerdeğiştirdiğini göstermektedir. Bu iki fay kolunda da ayrı ayrı 35'er cm düşey yerdeğiştirme mevcuttur. Bunlar farklı depremlerde gelişmiş olabileceği gibi aynı depremde de meydana gelmiş olabilir. İstifin üst kesimlerinin görülememesi nedeniyle bu konuda bir veri elde edilememiştir.

Çizelge 4. Kışla yarmasına ait C14 yaşlandırma sonuçları.

Table 4. C14 dating results from Kışla cut.

Örnek No	Koordinat	Organik Malzeme	C14 Yaşı	Kalibre yaş (Takvim yaşı)
KIS-B1	621770 D / 4119299 K	0.5mgC	6310 ± 40 BP	M.Ö. 5291 ± 76
KIS-B2	621770 D / 4119299 K	0.7mgC	6210 ± 50 BP	MÖ 5171 ± 134
KIS-B3	621770 D / 4119299 K	0.2mgC	7395 ± 60 BP	MÖ 6302 ± 94
KIS-B4	621770 D / 4119299 K	0.4mgC	7215 ± 60 BP	MÖ 6106 ± 118

Çizelge 5. Kışla yarmasına ait OSL yaşlandırma sonuçları. * ile işaretlenen De değerleri En Düşük Yaş Modeli (MAM), diğeri ise Merkezi Yaş Modeli (CAM) kullanılarak belirlenmiştir.

*Table 5. OSL dating results of Kışla cut. De values with * were defined using Minimum Age Model (MAM), while the other one was Central Age Model (CAM).*

Örnek	OD (%)	De (Gray)	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Rb (ppm)	Dr (Gray/by)	OSL YAŞI (by/GÖ)	Kalibre Yaş
KIŞ-01	44	6.6±1.8*	0.33	0.19	0.01	1.00	0.16	34.8±10.9	MÖ 32810 ± 10930
KIŞ-02	51	4.5±1.4*	0.43	0.38	0.01	1.00	0.19	23.4±7.4	MÖ 21390 ± 7420
KIŞ-03	24.2	14.6±0.9	0.40	1.32	0.08	6.20	0.23	62.4±3.9	MÖ 60420 ± 3890

Bu yarmada birden fazla deprem verisi olsa da, yarmanın üstünün aşınmış ve suni dolgu ile dolmuş olması nedeniyle sadece bir deprem yaşlandırılmıştır. Olay seviyesinin üstündeki çökellerin alt kesiminden alınan örnekler ve fay dolgusundan alınan örnekler birbiri ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Bu yaş verilerine göre MÖ 6000 yılı civarında yüzey kırığı oluşturan bir deprem meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bu depreme ait olay seviyesinin altındaki çökellerin

oldukça yaşlı olması, bölgenin önemli bir erozyonal dönemin etkisinde kaldığını ve bu dönemde çökelme olmadığını göstermektedir.

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Muğla Fayı aktif bir normal faydır. Muğla ili batısından başlayan ve GD'ya dönerek devam eden bu fayın morfolojiyi denetlediği açıkça görülmektedir. Bu çalışmada da, hem morfolojik/morfometrik veriler, hem de paleosismolojik hendek çalışmaları ile Muğla Fayı'nın aktif bir yapı olduğu belgelenmiştir.

Muğla Fayı'nın Morfolojik/Morfometrik Özellikleri

Muğla Havzası kuzeydoğu sınırı boyunca Muğla Fayı tarafından sınırlanır. Muğla Fayı boyunca, yüksekliği 600-650 m civarında olan havza tabanından eğimi 70º'ye ulaşan topoğrafik sarplıklar ile taban blokta 1000-1100 m yüksekliğe ulaşılmaktadır. Taban blok üzerinde faya hemen hemen dik yönde gelişmiş genç drenaj ağı Muğla Havzası'na bağlanır ve bu drenajlar önünde alüvyal fanlar gelişmiştir. Topoğrafik yüzey eğimleri fay boyunca 60°'ye kadar yükselir. Taban blok üzerinde, Muğla Havzası'na drene olan 7 farklı havzadan elde edilen hipsometrik eğriler dış bükeydir. Hipsometrik eğri analizi ve hipsometrik integral hesaplamaların bir arada değerlendirilmesi bu havzaların henüz olgunlaşmamış olduğunu, nispeten genç aşamada olduğunu işaret eder (Çizelge 6). Taban blok üzerinde, faya yakın kesimlerde hesaplanan V_f indislerinde çok düşük değerler elde edilmiştir (Çizelge 6). Bu değerler taban bloğun hızlı yükselmesi nedeniyle üzerinde derinlemesine kazan V-tipi akarsu vadilerinin geliştiğini gösterir. Muğla Havzası'nın kuzeydoğu kenarında hesaplanan dağ önü eğriliği (S_{mf}) değerlerine göre bu kesimler fay kontrolünde gelişmektedir (Çizelge 6). Morfometrik analizler Muğla Fayı'nın morfolojiyi kontrol ettiğini ve tektonik süreçlerin erozyonal süreçlere göre daha baskın olduğunu göstermiştir.

Muğla Fayı'nın Paleosismolojik Özellikleri

Muğla Fayı üzerinde eski depremleri araştırmak amacıyla uygun hendek yeri belirlemek oldukça güç olmuştur. Yoğun yerleşim, yoğun zirai/tarımsal faaliyetler ve çoğu kesimde fayın yamaçlarda yer alması ve kalın yamaç molozları ile örtülmüş olması, uygun hendek yeri seçimini zorlaştıran faktörler olmuştur. Buna rağmen bir inşaat çalışmasında gözlenen genç çökeller ve bunları kesen faylar, Muğla Fayı'nın depremselliği hakkında bazı bilgiler edinmemize fırsat vermiştir. Bu yarmanın çalışılması ile MÖ 6000 yılı civarında bir deprem tarihlendirilmiştir.

Bunu dışında, erozyon ve suni dolgu nedeniyle tarihlendirme mümkün olmasa da bu deprem kırıklarını örten ve yaklaşık MÖ 5200 olarak tarihlenen genç çökelleri kesen bir veya muhtemelen iki deprem verisi daha belirlenmiştir. Bu genç çökellerin iki fay kolu ile kesilmiş olmasının iki açıklaması olabilir. Birincisi, her iki fay kolunun da aynı depremde meydana geldiği, ikincisi de bu fay kollarının iki ayrı depremde kırıldığıdır. Bir depremde kırıldığı düşünülürse toplam 70 cm'lik bir yerdeğiştirme olduğu anlaşılır.

Çizelge 6- Muğla Fayı üzerinde hesaplanan morfometrik indislerin sonuçları.

Table 6- Morphometric indices results of Muğla Fault.

Morfometrik İndis	*Değer*		***Tektonik Yorum***
HI	mh1	0,51	Havzalar erken olgunluk evresinde (0.35>HI>0.6)
	mh2	0,46	
	mh3	0,49	
	mh4	0,43	
	mh5	0,56	
	mh6	0,55	
	mh7	0,51	
V_f	V_f1	0,46	Vadiler V-şekilli, genç evrede
	V_f2	0,17	
	V_f3	0,18	
	V_f4	0,19	
	V_f5	0,33	
	V_f6	0,22	
	V_f7	0,16	
	V_{f8}8	0,18	
	V_f9	0,17	
S_{mf}	S_{mf}1	1.18	Dağ önü fay kontrollü
	S_{mf}2	1.05	
	S_{mf}3	1.42	
	S_{mf}4	1.08	
	S_{mf}5	1.10	
	S_{mf}6	1.29	

Eğer iki fay kolunun MÖ 5200 sonrasında iki ayrı depreme ait kırıklar olduğu düşünülürse, kollar üzerinde 35'er cm düşey yerdeğiştirme olduğu için, birbirine benzer büyüklükte iki depremden söz edilebilir.

GB Anadolu'da meydana gelen güncel depremlerde meydana gelen düşey yerdeğiştirmeler gözönüne alındığında; 1991 Dinar depreminde (M=6.1) 50 cm ve 2002 Çay (Afyon) depreminde (M=6.3) 30 cm düşey atımlar meydana geldiği bilinmektedir (Altunel et al., 1999; Eyidoğan and Barka, 1996; Akyüz vd., 2006; Koral, 2000; Emre et al., 2003; Özden vd., 2003). Aynı gerilme

sistemi içinde olmasa da, yakın bölgelerdeki bu güncel depremlerle karşılaştırıldığında, bu iki fay kolunun aynı depremde kırılması, yani toplam 70 cm'lik bir düşey yerdeğiştirme meydana gelmesi için 6.5'tan daha büyük bir deprem olması gerekir. Fay kollarının MÖ 5200 sonrasında iki farklı depremde kırıldığı kabul edilirse, bu depremlerin büyüklüğünün 6'dan fazla olması gerektiği açıktır.

Bu veriler Muğla Fayı üzerinde geçmişte yüzey kırığına yol açmış 6'dan büyük depremler meydana geldiğini, gelecekte de benzer depremler üretme potansiyelinin olduğunu göstermektedir.

Katkı Belirtme

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen 116Y179 nolu proje çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Makaleyi kontrol ederek değerli fikirleriyle yön veren Cengiz Zabcı'ya (İTÜ), OSL yaşlandırması konusunda desteklerini esirgemeyen Eren Şahiner ve Niyazi Meriç'e (Ankara Ün. Nükleer Bil. Ens.) teşekkür ederiz. Önerileriyle makalenin gelişmesine katkı sağlayan hakemlere şükranlarımızı sunarız.

KAYNAKLAR

AFAD (TC Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi, Deprem Dairesi Başkanlığı), 2020 http://www.deprem.gov.tr, Son erişim tarihi: 01.12.2020.

Aktimur, H.T., Sarıarslan, M.M., Sönmez, M., Keçer, M., Uysal, Ş. ve Özmutaf, M., 1996. Muğla ilinin (Merkez İlçe) Arazi Kullanım Potansiyeli. Maden ve Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, (Ankara), MTA Raporu: 48

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.

Altunel, E., Barka, A. and Akyüz, H.S., 1999. Palaeoseismicity of the Dinar Fault, SW Turkey. Terra Nova, 11 (6), 297-302.

Ambraseys, N.N. 2009. Earthquakes in the Mediterranean and Middle East: a multidisciplinary study of seismicity up to 1900. London: Cambridge University Press.

Ambraseys, N.N. and Finkel, C.F., 1991. Long-term seismicity of Istanbul and the Marmara Sea region. Terra Nova, 3, 527-539.

Ambraseys, N.N. and Jackson, J.A., 1998. Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region. Geophysical Journal International, 133, 390-406.

Atalay, Z. 1980. Muğla - Yatağan ve Yakın Dolayı Karasal Neojeninin Stratigrafi Araştırması. JMO Bülteni, 23, 3-99.

Barka, A.A., 1994. Gökova Körfezi'nin Tektonik özellikleri ve deprem potansiyeli. Gökova Körfezi çevre sorunları ve çevre yönetimi sempozyumu, 28-30 Haziran. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü Yayını. 30-38.

Barka, A.A., Reilinger, R., Şaroğlu, F. and Şengör, A.M.C., 1995. The Isparta Angle: Its importance in the Eastern Mediterranean region. IESCA-1995. 1-17.

Barka, A.A., Altunel, E., Akyuz, S., Şaroğlu, F., Emre, Ö. and Kuşçu, İ., 1996. Study of active faults and limestone fault scarps in SW Anatolia. National Marine Geological and Geophysical Programme. Coordinator Naci Görür, Workshop 1. 8-9 Feb. 1996. 61-67.

Barka, A.A. and Reilinger, R., 1997. Active tectonics of the Eastern Mediterranean region deduced from GPS, neotectonic and seismicity data. Annali di Geofisica, XL, 587-610.

Bozkurt, E. 2001., Neotectonics of Turkey – a synthesis. Geodinamica Acta, 14, 3- 30.

Cohen, H., Dart, C., Akyüz, H.S. and Barka, A., 1995. Syn-rift sedimentation and structural development of the Gediz and Buyuk Menderes Graben, western Turkey. Journal of the Geological Society of London, 152, 629-638.

Dart, C., Cohen, H., Akyüz, H.S. and Barka, A., 1995. Basinward migration of rift-border faults: Implications for facies distribution and preservation potential. Geology, 23 (1), 69-72.

Dewey, J..F., 1988. Extensional collapse of orogens. Tectonics, 7, 1123–1139.

Dewey, J.F. and Şengör, A.M.C. 1979. Aegean and surrounding regions: complex multi-plate and continuum tectonics in a convergent zone. Geological Society of America Bulletin, 90 (1), 84-92.

Emre, Ö., Duman, T.Y., Doğan, A., Özalp, S., Tokay, F. and Kuşcu, 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, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. and Şaroğlu, F., 2013. Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası, Ölçek 1:1.250.000. MTA Genel Müdürlüğü. Özel Yayın Serisi-30, Ankara.

Ergin, K., Güçlü, U. ve Uz, Z., 1967. Türkiye ve civarının deprem kataloğu (Milattan Sonra 11 yılından 1964 sonuna kadar). İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fak., Yer Fiziği Ens., Teknik Rapor No: 24.

Ersoy, Ş., Altınok, Y. ve Yalçıner, A.C., 2000. Güneybatı Anadolu'nun Neotektonik Yapılarına Genel bir bakış ve bölgenin deprem etkinliği. III. Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu. Özler, 5-7 Ekim 2000, Çanakkale.

Eskiköy, F., Ergintav, S., Konca, A.Ö., Akoğlu, A., Akyüz, H.S. and Karabulut, H., 2019. Small Scale Fault Interactions: The 2017 Ula (Mugla) Earthquake sequence. Geophysical Research Abstracts, Vol. 21, EGU2019-12840-4.

Eyidoğan, H. and Barka, A., 1996. The 1 October 1995 Dinar earthquake, SW Turkey. Terra Nova, 8, 479-485.

Guidoboni, E., Comastri, A. and Triana, G., 1994. Catalogue of Ancient Earthquakes in the Mediterranean Area up to the10th Century. Rome: Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Guidoboni, E. and Comastri, A., 2005. Catalogue of Earthquakes and Tsunamis in the Mediterranean area from. the 11th to the 15th century. Rome: Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Gül, M., 2015. Lithological properties and environmental importance of the Quaternary colluviums (Muğla, SW Turkey). Environmental Earth Sciences, 74, 4089-4108.

Gül, M., Karacan, E., ve Aksoy, M.E., 2014. Muğla kenti yerleşim alanı ve yakın çevresinin genel jeolojik ve mühendislik özelliklerinin araştırılması. Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, (Muğla), Proje No: 12/54, 39.

Gürer, F.Ö. and Yılmaz, Y., 2002. Geology of the Oren and Surrounding Areas, SW Anatolia. Turkish Journal of Earth Sciences, 11, 1-13.

Gürer, Ö.F., Sanğu, E., Özburan, M., Gürbüz, A. and Sarica-Filoreau, N., 2013. Complex basin evolution in the Gökova Gulf region: implications on the Late Cenozoic tectonics of southwest Turkey. International Journal of Earth Sciences, 102, 2199-2221.

Hakyemez, H.Y., 1989. Kale-Kurbalık (GB Denizli) bölgesindeki senozoyik yaşlı çökel kayalarının jeolojisi ve stratigrafisi. MTA Dergisi, 109, 9-21.

Jackson, J., A., King, G. and Vita-Finzi, C., 1982. The neotectonics of Aegean: an alternative view. Earth and Planetary Sciences Letters, 61, 303-318

Jackson, J.A. and McKenzie, D.P., 1988. The relationship between plate motions and seismic moment tensors and rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East. Geophysical Journal, 93, 45–73.

Kahle, H.G., Cocard, M., Peter, Y., Geiger, A., Reilinger, R., Barka, A. and Veis, G., 2000. GPS-derived strain rate field within the boundary zones of the Eurasian, African and Arabian Plates. Journal of Geophysical Research, 105 (B10), 23353-23370.

Karabacak, V., 2016. Seismic damage in the Lagina sacred area on the Mugla Fault: a key point for the understanding of the obliquely situated faults of western Anatolia. Journal of Seismology, 1-13. doi: 10.1007/s10950-015-9526-8

Koçyiğit, A., Yusufoğlu, H. and Bozkurt, E., 1999. Evidence from the Gediz Graben for episodic two-stage extension in western Turkey. Journal of Geological Society of London, 156, 605–616.

KOERİ (Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü), 2020. http://www.koeri.boun.edu.tr, 01.12.2020.

Konak, N. ve Şenel, M., 2002, 1/500.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Denizli Paftası. MTA yayınları, Ankara.

Koral, H., 2000. Surface Rupture and Rupture Mechanism of the October 1, 1995 (Mw=6.2) Dinar Earthquake, SW Turkey November 2000. Tectonophysics 327(1-2), 15-24.

Le Pichon, X. and Angelier, J., 1979. The Aegean arc and trench system: a key to the neotectonic evolution of the Eastern Mediterranean area. Tectonophysics, 60, 1–42.

Le Pichon, X. and Angelier, J., 1981. The Aegean Sea. Phil. Trans. Royal Soc. London, A: 300, 357–372.

McKenzie, D.P., 1978a. Some remarks on the development of sedimentary basins. Earth Plane. Sci. Lett., 40, 25–32.

McKenzie, D.P., 1978b. Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions. Geophys. J. Royal Astronom. Soc., 55, 217–254.

McKenzie, D.P. and Yılmaz, Y., 1991. Deformation and volcanism in western Turkey and the Aegean. Bulletin of the Technical University of Istanbul, 44 (1-2), 345-373.

NEIC (The National Earthquake Information Center), 2020. https://earthquake.usgs.gov/ contactus/golden/neic.php, 01.12.2020.

Nyst, M. and Thatcher, W., 2004. New constraints on the active tectonic deformation of the Aegean. J. Geophys. Res., 109, B11406.

Özden, S., Kavak, K.Ş., Koçbulut, F., Över, S. ve Temiz, H., 2003. 3 Şubat 2002 Çay (Afyon) Depremleri. Türkiye Jeoloji Bülteni, 45/2, 49-56.

Papazachos, B., Kiratzi, A., Hatzidimitriou, P., and Rocca, A., 1984. Seismic faults in Aegean area. Tectonophysics, 106, 71-85

Pınar, N., ve Lahn. E., 1952. Türkiye Depremleri İzahlı Kataloğu. Ankara: Bayındırlık Bakanlığı, Yapı & İmar İşleri Reisliği Yayınları.

Reilinger, R., McClusky, S., Oral, B., King, R., Toksöz, M.N., Barka, A.A., Kinik, I., Lenk, O. and Şanlı, I., 1997. Global positioning system measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa- Eurasia plate collision zone. J. Geophys. Res., 102, 9983-9999.

Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrotsa, A., Filikov, S. V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R. and Karam, G., 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia, Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. Journ. Geophys. Res., 111, doi:10.1029/2005JB004051.

Seyitoğlu, G. and Scott, B.C., 1991. Late Cenozoic crustal extension and basin formation in West Turkey. Geological Magazine, 128, 155-166.

Seyitoğlu, G. and Scott, B.C., 1994. Late Cenozoic basin development in West Turkey: Gördes basin: tectonics and sedimentation. Geological Magazine, 131, 631-637

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., Scott, B.C. and Rundle, C.C., 1992. Timing of Cenozoic extensional tectonics in west Turkey. Journal of the Geological Society, London, 149, 533-38.

Soysal, H., Sipahioğlu, S., Kolçak, D. ve Altınok,Y., 1981. Türkiye ve Çevresinin Tarihsel Deprem Kataloğu. TÜBİTAK Proje No: TBAG 341, Istanbul.

Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Boray, A., 1987. Türkiye'nin diri fayları ve depremsellikleri, Rapor No: 8174 (yayınlanmamış), MTA, Ankara.

Şengör, A.M.C., 1979. The North Anatolian Transform Fault: its age, offset and tectonic significance, J. Geol. Soc. London, 136, 269–282.

Şengör, A.M.C., 1980. Türkiye'nin neotektoniğinin esasları. Ankara: TJK yayını.

Şengör, A.M.C., 1982. Ege'nin neotektonik evrimini yöneten etkenler. O. Erol,V. Oygür (Ed.), Batı Anadolu'nun Genç Tektoniği ve Volkanizması Paneli, TJK Yayını, 59–72.

Şengör, A.M.C., 1987. Cross-faults and differential stretching of hanging walls in regions of low-angle normal faulting: examples from western Turkey. Continental Extensional Tectonics. Editors: Coward M.P., Dewey J.F., Hancock P.L. London, Geological Society.

Şengör, A.M.C. and Yılmaz, Y., 1981. Tethyan evolution of Turkey; a plate tectonic approach,.Tectonophysics, 75, 181-241.

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. Strike-slip Faulting and Basin Formation. Editors: Biddle K.T., Christie-Blick N. Oklohoma: SEPM.

Taymaz, T., Jackson, J. and McKenzie, D., 1991. Active tectonics of the north and central Aegean Sea. Geophysical Journal International, Vol. 106, No. 2, s. 433-490, ISSN: 0956540X

Taymaz, T., Tan, O. and Yolsal, S., 2004. Seismotectonics of western Turkey: a synthesis of source parameters and rupture histories of recent earthquakes. EOS Trans. Am. Geophys. Union 85 (47) (Fall Meeting Suppl., p.408, Moscone Convention Center, San Fransisco-California, USA, December 13–17, 2004).

Yolsal-Çevikbilen, S., Taymaz, T. and Helvacı, C., 2014. Earthquake Mechanisms in the Gulfs of Gökova, Sığacık, Kuşadası, and the Simav Region (western Turkey): Neotectonics, seismotectonics and geodynamic implications. Tectonophysics, 635, 100-124.