

## Sındırgı Fayı ve Düvertepe Fay Zonu Yakın Çevresinin Kinematik ve Sismotektonik Özellikleri: Batı Anadolu (Türkiye)

Erdem Gündoğdu<sup>1\*</sup>, Süha Özden<sup>2</sup>, Tolga Bekler<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Çan Meslek Yüksekokulu, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, Türkiye

<sup>2</sup>Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, Türkiye

<sup>3</sup>Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, Türkiye

### Makale Tarihiçesi

Gönderim: 22.11.2019

Kabul: 09.10.2020

Yayın: 15.12.2020

### Araştırma Makalesi

**Öz** – Bu çalışmada; toplam 7 segmentten oluşan Simav Fay Zonu'nun Sındırgı Segmenti ile bu fayın kuzeyinde yer alan Düvertepe Fay Zonu ve çevresinin kinematik ve sismotektonik özellikleri incelenmiştir. 21 istasyondan, toplam 160 fay düzleminde oluşan kinematik analiz sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, belirlenen 4 farklı tektonik rejim yaşlıdan gence doğru sırasıyla; (i) transtansiyonel özellik sunan (SS1a), ( $\sigma_1$ )=231°/20°, ( $\sigma_3$ )=297°/24°, Rm=0.340 olarak hesaplanan ve sıkışmanın ( $\sigma_1$ )=K51°D olduğu, (ii) normal faylarla temsil edilen (SS1b), ( $\sigma_3$ )=312°/11° olarak hesaplanan ve genişleme yönünün ( $\sigma_3$ )=K48°B olduğu, (iii) transpresiyonel özellik sunan (SS2), ( $\sigma_1$ )=301°/15°, ( $\sigma_3$ )=237°/17°, Rm=0.612 olarak hesaplanan ve sıkışmanın ( $\sigma_1$ )=K59°B olduğu (iv) en genç tektonik rejim türü olan, normal faylarla temsil edilen (SS3), ( $\sigma_3$ )=233°/8° olarak hesaplanan ve genişleme yönünün ( $\sigma_3$ )=K53°D olduğu rejimdir. Bu rejim türleri (deformasyon evreleri) birbirinde ayırt edilirken; kinematik analiz sonucundan elde edilen asal gerilme eksenlerinin yönleri, asal gerilme eksenleri arasındaki oranlar, sahada birbirini üzerleyen fay düzlemi verileri, birbirini kesen fay-atım verileri, sahadaki orta-büyük ölçekli yapılar, benzer ve aynı yaştaki sahalarla yapılan karşılaştırmalar, Batı Anadolu'nun jeodinamik evrimi, bu konuda yapılmış olan benzer çalışmalarla yapılan karşılaştırmalar kullanılmıştır. En genç tektonik rejim türü olan SS3'ün, günümüzde etkin olduğunun bir diğer kanıtı ise, son yıllarda meydana gelen depremlerin odak (faylanma) mekanizması çözümleridir. Çalışma alanında meydana gelen 12 depremin odak mekanizması çözümlerine göre, ( $\sigma_3$ )=211°/2°, bölgedeki genişleme yönünün ( $\sigma_3$ )=K31°D olduğu şeklindedir. Bu veri, günümüzde KKD-GGB yönünde bir genişleme rejiminin baskın olduğunu göstermektedir. Bu durum, günümüzde Batı Anadolu'da etkin olan genişleme rejiminin yönleriyle de uyum içindedir.

**Anahtar Kelimeler** – Düvertepe fay zonu, genişleme rejimi, kinematik analiz, Batı Anadolu, odak mekanizma çözümü, Sındırgı fayı

## Kinematic and Seismotectonic Properties of Sındırgı Fault and Düvertepe Fault Zone Surroundings: West Anatolia (Turkey)

<sup>1</sup>Department of Mining and Mineral Extraction, Çan Vocational School, Çanakkale Onsekiz Mart University, Çanakkale, Turkey

<sup>2</sup>Department of Geological Engineering, Faculty of Engineering, Çanakkale Onsekiz Mart University, Çanakkale, Turkey

<sup>3</sup>Department of Geophysical Engineering, Faculty of Engineering, Çanakkale Onsekiz Mart University, Çanakkale, Turkey

### Article History

Received: 22.11.2019


Accepted: 09.10.2020

Published: 15.12.2020

### Research Article

**Abstract** - In this study; Sındırgı Segment of the Simav Fault Zone consisting of 7 segments and Düvertepe Fault Zone and its vicinity located to the north of this fault, Its kinematic and seismotectonic properties have been studied. From 21 stations, kinematic analysis results for a total of 160 fault planes were assessed together and 4 different tectonic regimes were determined from older to younger as; (i) (SS1a) with transtensional features, ( $\sigma_1$ )=231°/20°, ( $\sigma_3$ )=297°/24°, Rm=0.340 calculated and compression ( $\sigma_1$ )=N51°E regime; (ii) (SS1b) with normal faulting ( $\sigma_3$ )=312°/11° calculated and extensional direction ( $\sigma_3$ )=N48°W regime; (iii) (SS2) with transpressional features ( $\sigma_1$ )=301°/15°, ( $\sigma_3$ )=237°/17°, Rm=0.612 calculated and compression ( $\sigma_1$ )=N59°W regime; and (iv) the youngest tectonic regime observed in the study area represented by normal faulting (SS3), ( $\sigma_3$ )=233°/8° calculated and extension direction ( $\sigma_3$ )=N53°E regime. While these tectonic regime types (deformation phases) are distinguished from each other; the directions of the principal stress axes obtained from the kinematic analysis result, ratios between principal stress axes, fault plane data overlapping each other in the field, intersecting fault-slip data, medium to large scale structures on the field, comparisons with similar and same age fields, geodynamic evolution of Western Anatolia, comparisons made with similar studies on this subject used. Further evidence that the youngest tectonic regime of SS3 is currently effective is the focal mechanism solutions for earthquakes occurring in recent years. According to focal mechanism solutions for 12 earthquakes occurring in the study area ( $\sigma_3$ )=211°/2°, with the extensional direction in the region ( $\sigma_3$ )=N31°E. This data shows an extensional regime in NNE-SSW orientation is dominant currently. This situation complies with the extensional regime currently effective in W-SW Anatolia.

**Keywords** – Düvertepe Fault Zone, Extensional regime, kinematic analysis, West Anatolia, focal mechanism solutions, Sındırgı Fault

<sup>1</sup>Erdem Gündoğdu, e-posta: erdem@comu.edu.tr  <https://orcid.org/0000-0002-6836-2951>

<sup>2</sup>Süha Özden, e-posta: ozden@comu.edu.tr  <https://orcid.org/0000-0001-6321-0812>

<sup>3</sup>Tolga Bekler, e-posta: tbekler@comu.edu.tr  <https://orcid.org/0000-0002-9475-8626>

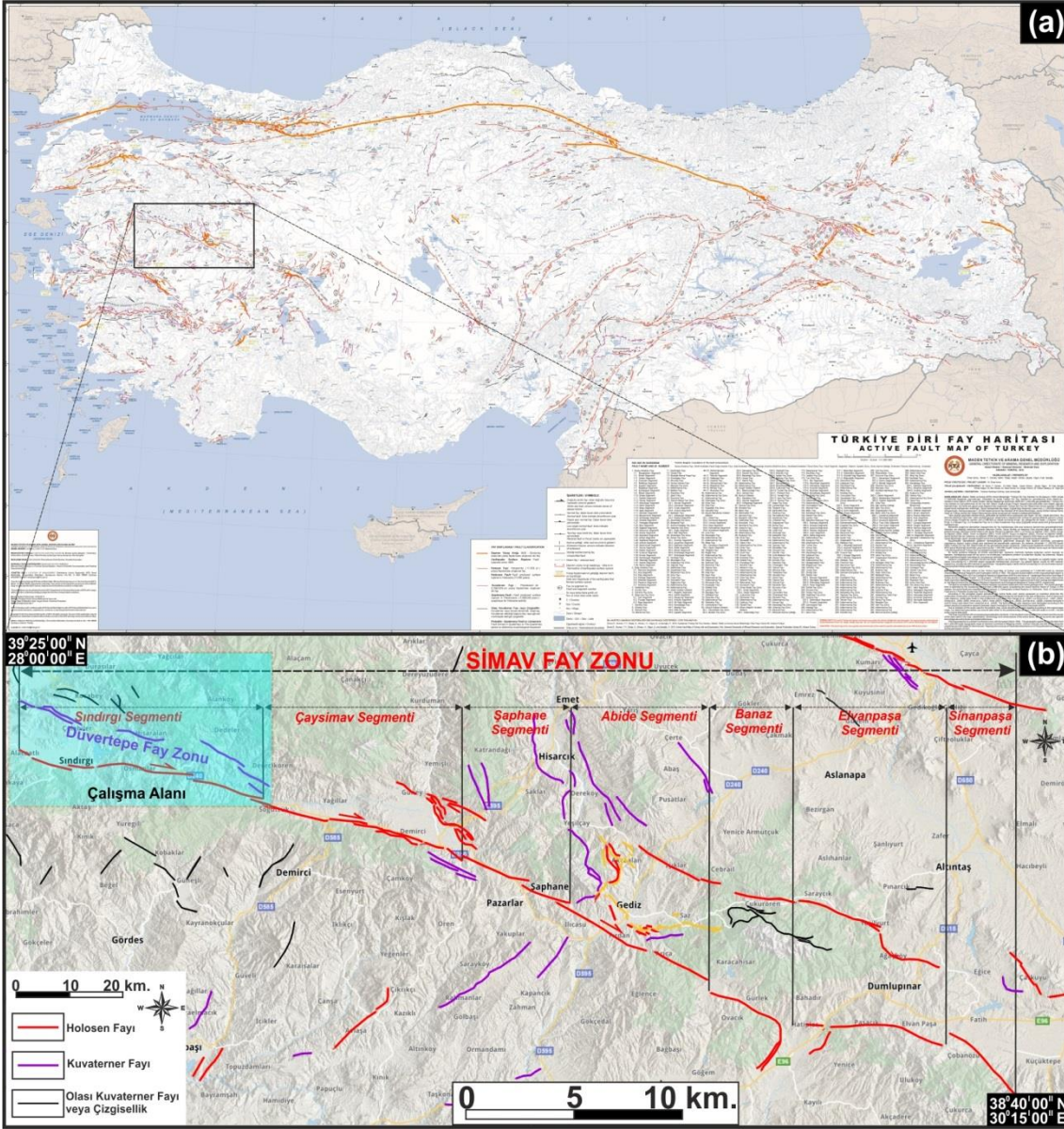
\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author

## 1. Giriş

Başta güneybatı Akdeniz bölgesi (Türkiye, Yunanistan ve Ege Denizi) olmak üzere, Batı Anadolu kıtasal genişleme alanlarının geç Senozoyik yaşlı evriminin anlaşılmasında önemli bir rol oynamakta olup (Seyitoğlu ve Işık, 2006), kıta kabuğu alanlarında en önemli genişleme tektonik ürünleri ise metamorfik çekirdek kompleksleridir (Lister ve Davis, 1989; Malavieille, 1993). Batı Anadolu'da, Tersiyer'den itibaren etkin olan genişleme rejimi, Menderes masifinin kuzey kesiminde Alaşehir ve Simav sıyrılma faylarını meydana getirmiştir (Işık, Seyitoğlu ve Çemen, 2003). Bu sebepten dolayı Menderes Masifi, genişleme rejiminin etkilerini yaygın bir şekilde taşır (Işık, 2004).

Yıllık 20 mm / yıl GPS hızı ile, Batı Anadolu horst-graben sistemi, dünyadaki en hızlı genişlemeli tektonik bölgelerden biri olup (Aktuğ vd., 2009), bu bölge kuzeyde sağ yanal doğrultu atımlı Simav fayı ve doğuda Burdur-Fethiye zonu ile sınırlıdır (Emre vd., 2018). Yaklaşık 215 km uzunluğundaki transtansiyonel sağ yanal doğrultu atımlı Simav fay zonu; genel olarak KB-GD yönünde bir uzanım sergilemekte olup (bkz. Şekil 1a), toplam 7 segmentten meydana gelmektedir (bkz. Şekil 1b). Bu segmentler, batıdan doğuya doğru sırasıyla; (i) Sındırgı Segmenti (35 km uzunluğunda, genel doğrultusu 267°-306°), (ii) Çaysimav Segmenti (54 km uzunluğunda, genel doğrultusu 277°-308°), (iii) Şaphane Segmenti (23 km uzunluğunda, genel doğrultusu 286°-312°), (iv) Abide Segmenti (33 km uzunluğunda, genel doğrultusu 287°-308°), (v) Banaz Segmenti (24 km uzunluğunda, genel doğrultuları 3°-359°), (vi) Elvanpaşa Segmenti (27 km uzunluğunda, genel doğrultusu 270°-298°) ve (vii) Sinanpaşa Segmenti (18 km uzunluğunda, genel doğrultusu 303°-323°)'dir (Emre vd., 2018).

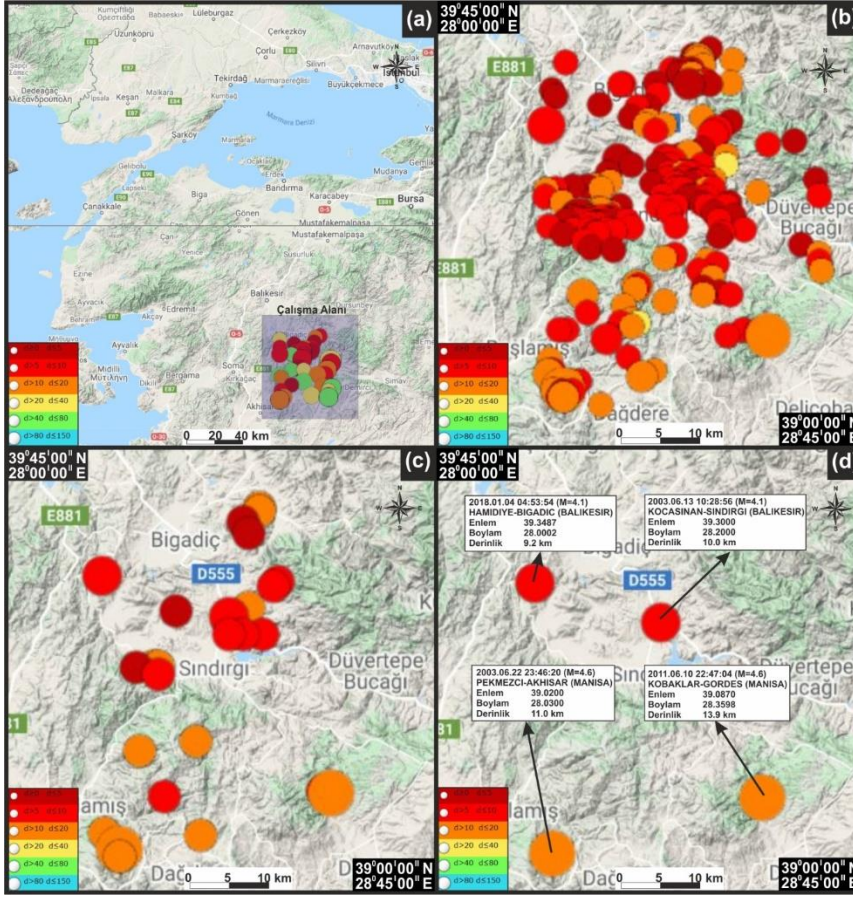
Simav Fayı, Erken Miyosen'de sıkışma rejimi altında bir doğrultu atımlı fay karakteri sergilemiş, Kuvaterner'de ise genişlemeli tektonik rejime geçmiştir. Genişlemeli tektonik rejimin günümüzde de etkin olduğu deprem odak mekanizma çözümleri ile desteklenmiştir (Gündoğdu vd., 2015). Bunun yanı sıra, Simav Fay Zonu'nda görülen gravite faylarının, doğrultu atım mekanizmasıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiği de savunulmuştur (Konak, 1982). Batı Anadolu'daki K-G genişleme rejimini en son ürünlerinden biri olan D-B gidişli Simav Grabeni, bir Pliyo-Kuvaterner yapı olup, genel gidişleri KD-GB olan Demirci, Selendi, Akdere havzalarını keser konumdadır ve grabenin güney kenarı aktif ve listrik şekilli bir fay olan Simav Fayı tarafından sınırlandırılmıştır (Seyitoğlu, 1997). Bu çalışmada, Simav Fay Zonu'nun Sındırgı segmenti ile bu fayın kuzeyinde yer alan Düvertepe Fay Zonu ve civarının kinematik ve sismotektonik özellikleri incelenmiştir.



Şekil 1. (a) Yenilenmiş Türkiye Diri Fay Haritası üzerinde çalışma alanının konumu (Emre vd., 2013). (b) Simay Fay Zonu'nun meydana getiren segmentler ve çalışma alanı oluşturan Sındırgı Segmenti ile Düvertepe Fay Zonu'nun konumu (Emre, Doğan, ve Özalp, 2011a; Emre, Özalp, ve Duman, 2011b; Emre, Duman, ve Özalp, 2011c; Emre, Duman, Özalp, Olgun, ve Elmacı, 2011d; Emre vd., 2013'den derlenmiştir)

Çalışma alanında yer alan Sındırgı Segmenti ile Düvertepe Fay Zonu'nun aktivitesi; M.T.A tarafından yayınlanan Yenilenmiş Türkiye Diri Fay Haritası'nda tanımlanmıştır. Buna göre, Simav Fay Zonu'nun en batı segmentini oluşturan Sındırgı Segmenti, aktivitesi bilinen Holosen Fayı olarak tanımlanmış olup, Holosen'de (son 11.000 yıl içerisinde) yüzey faylanması oluşturan fay olarak tanımlanmıştır (Emre vd., 2011a). Bu fayın kuzeyinde yer alan Düvertepe Fay Zonu ise, Holosen'deki etkinliği şüpheli olan Kuvaterner Fayı olarak tanımlanmış olup, Pleyistosen'de (son 1.600.000 yıl içerisinde) yüzey faylanması oluşturan, ancak Holosen etkinliği kuşkulu olan bir fay olarak tanımlanmıştır (Emre vd., 2011a). Çalışma alanı ve yakın civarı; tarihsel ve aletsel dönemde pek çok depreme maruz kalmıştır. 2003-2019 yılları arası  $M \geq 3.0$  olan depremler Şekil 2'de gösterilmiştir.





Şekil 2. (a) Çalışma alanının (39.00-39.45 enlemleri ile 28.00-28.45 boylamları arasında kalan bölge) konumu (b) Çalışma alanında 2003-2019 yılları arasında meydana gelmiş  $M \geq 4.0$  depremler ve bu depremlere ait bazı parametreler (c) Çalışma alanında 2003-2019 yılları arasında meydana gelmiş  $M \geq 3.0$  depremler (<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/> adresinden, bu çalışma için derlenmiştir)

## 2. Materyal ve Yöntem

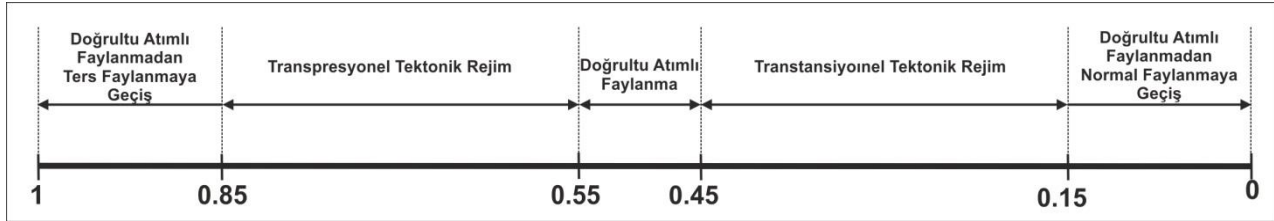
### 2.1. Fay Topluluklarının Kinematik Analizinde Kullanılan Yöntem

Fay topluluklarının kinematik analizi kısmında kullanılan sayısal analiz yöntemi, ilk kez Carey (1979) tarafından ortaya konmuş olup, Carey-Gailhardis ve Mercier (1987) tarafından ise geliştirilmiştir. Çalışma alanındaki jeolojik birimin türü ve mostra koşullarının elverişli olduğu yerlerde, hareketin biçimini belirten ve fay düzlemi üzerinde yer alan belirteçler (doğrultu, eğim yönü, eğim miktarı, kayma miktarı) kullanılır. Kullanılan bu belirteçler sonucunda elde edilen veri ve analizler (fayın doğrultusu, eğim yönü, eğim miktarı ve kayma çiziklerinin vektörü), çalışma sahasının genelinde yapıldığı için, tüm çalışma sahasının davranış ve deformasyon biçimini ortaya koymaktadır. Çalışma sahasının genelinden elde edilen sonuçlar ile birebir benzerlik sunmayan lokasyonlar sadece yerel olarak bir önem taşımaktadır.

Genel olarak, hareket düzlemlerinin kutup noktaları üç ana yön boyunca birbirine dik üç düzlem boyunca uzanmaktadır. Birbirine dik üç ana gerilme yönü, stres elipsoidinin eksenleri, en büyük sıkışma gerilmesi ( $\sigma_1$ ), orta gerilme eksenini ( $\sigma_2$ ) ve en küçük gerilme bileşeni ( $\sigma_3$ ), olmak üzere malzemenin süreksizliğine ve heterojenliğine bağlı olarak değişir. Bu durumun her bir fay için hareket yönünde ana gerilmelerden  $\sigma_1$ 'in sıkışma bölgesinde,  $\sigma_3$ 'ün ise açılma bölgesinde yer aldığını Angelier ve Mechler (1977) tarafından ortaya konmuştur.

Her bir ölçülmüş kayma çizgisi için, düzlem üzerindeki gerilme ( $\sigma_1$ ),  $\sigma_1 = \sigma_{ni} + \tau_i$  olarak belirlenir. Yukarıda belirtilen hipotezi öngörülen atım vektörü ( $\tau_i$ ) ile gözlenen atım vektörü ( $S_i$ ) arasındaki açının  $0^\circ$ 'a yaklaştığını gösterir. ( $\tau_i$ ) bileşenleri dört parametrenin fonksiyonudur. Bunlar bir coğrafik referans noktasına göre üç ana

gerilme doğrultusunu veren üç Euler açısı ve ana gerilemeleri arasındaki R oranıdır (Carey, 1976; 1979, Carey-Gailhardis ve Mercier, 1987).  $R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1)$ . Burada  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  sırasıyla sıkışma, orta ve genişleme olmak üzere üç ana gerilme değerini vermektedir. R değeri ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) ile ( $\sigma_1 = \sigma_2$ ) arasında değişir. R değeri, 0 ile 1 arasında değişmektedir. R değeri, faylanmanın türü ve bileşeni hakkında bilgi vermektedir. R değerinin 0 olduğu durumun genişleme rejimi ürünü olan normal faylanma olduğu; 1'e yakın olduğu durumun ise sıkışma rejimi ürünü olan ters faylanma olduğu kabul edilir. R değerinin 0'a yakın olması ( $0 < R < 0.15$ ); doğrultu atımlı faylanmadan normal faylanmaya geçişi; 1'e yakın olması ise ( $0.85 < R < 1$ ); doğrultu atımlı faylanmadan normal faylanmaya geçişi gösterir. R değerinin;  $0.45 < R < 0.55$  olması durumunda doğrultu atımlı faylanmadan söz edilebilir. Yine R değerinin 0.45'den ( $0.15 < R < 0.45$ ) küçük olduğu durumlar transtansiyonel rejimi; 0.55'ten büyük olması ( $0.55 < R < 0.85$ ) ise transpresiyonel rejimi ifade eder (Özden, Över, Kavak, ve İnal, 2008) (bkz. Şekil 3). Normal faylanma rejiminin üç eksenli gerilme durumunda olduğu da R oranına göre belirlenebilmektedir. Normal faylanma çözümü veren istasyonlarda R değerinin ( $0.15 < R < 0.85$ ) arasında kalması beklenir. Aksi takdirde normal faylanmanın iki eksenli ve radyal (yerçekimine bağlı) olarak geliştiği düşünülebilir (Carey, 1979; Carey-Gailhardis ve Mercier 1987).



Şekil 3. Ana gerilme eksenleri arasındaki R oranına göre doğrultu atımlı faylanmaların türü (Özden vd., 2008'den alınarak şematize edilmiştir).

## 2.2. Depremlerin Odak Mekanizma Çözümü İçin Kullanılan Yöntem

Çalışma sahası ve civarında meydana gelen yerel depremlerin, dalga formu moment tensör ters çözüm tekniği kullanılarak kaynak parametreleri ortaya çıkarılmıştır. Buna ek olarak özellikle 2003 sonrasında bu bölgede meydana gelmiş önemli depremlerin odak çözüm mekanizmaları derlenmiştir. Deprem dalga formları sayısal verisi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Tsunami ve Deprem İzleme Merkezi'nden temin edilmiştir. Dalga formu modellemesi ve ters çözümü ilk olarak elastik düz tabakalı ortamdaki makaslama dislokasyon nokta kaynakla tanımlanabilen üç temel faylanmadaki sekiz Green fonksiyonu bileşenlerinin karmaşık spektrumlarını hesaplamak amacıyla Frekans-Dalga sayısı (F-K) integrasyon metodu (Bouchon, 1981) kullanılmıştır.

Ters Çözüm iki farklı aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada deviatorik gerilmelerin  $M_{zz} = -(M_{xx} + M_{yy})$  sismik moment tensörün iz elementlerine eklenmesi ile çözülmektedir. Bu gerilmeler kaynağın hacimsel bileşene sahip olmadığı anlamına gelmektedir. Böylece bilinmeyen model parametreleri sayısı sismik moment tensörün bileşen sayısını 5'e düşürmektedir. İkinci aşamada, fay düzlemi yönelimi ve skaler sismik moment eşitlik 3'te tanımlanan sisteme dayanarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplama sırasında doğrultu (strike), eğim (dip), rake ve skaler sismik moment parametreleri için bir ters çözüm işlemi uygulanmaktadır. Bu hesaplama alternatif olarak fay düzlemi yönelimi ve skaler sismik momenti dalga formu verisinden doğrudan belirlemek doğrusal olmayan ters çözüm gerektirmektedir. Moment tensör bileşenlerinden fay düzlemi parametrelerinin (azimut, eğim ve dalım) 1. ve 3. eşitliklerden hesaplanması daha kullanışlı olmakla beraber daha güvenilir sonuçlar da üretmektedir.

Veri analizinde ayrıca moment tensör ters çözümü için bir pencereleme metodu da kullanılmaktadır. Bir tek istasyondaki her bir P ve S dalga formunu içerisine alan Hanning penceresi hesaplanmaktadır. Bu işlem sonrası tek bir istasyondaki bütün bileşenlere her bir pencere için eş zamanlı moment tensör ters çözüm işlemi uygulanmaktadır. Gözlemsel veri ile sentetik sismogramları hizalamak için çapraz ilişki işlemi uygulanarak ters çözüm uygun hale getirilmektedir. Her bileşen için üç temel fayın Green fonksiyonları sıralanmış veri ile

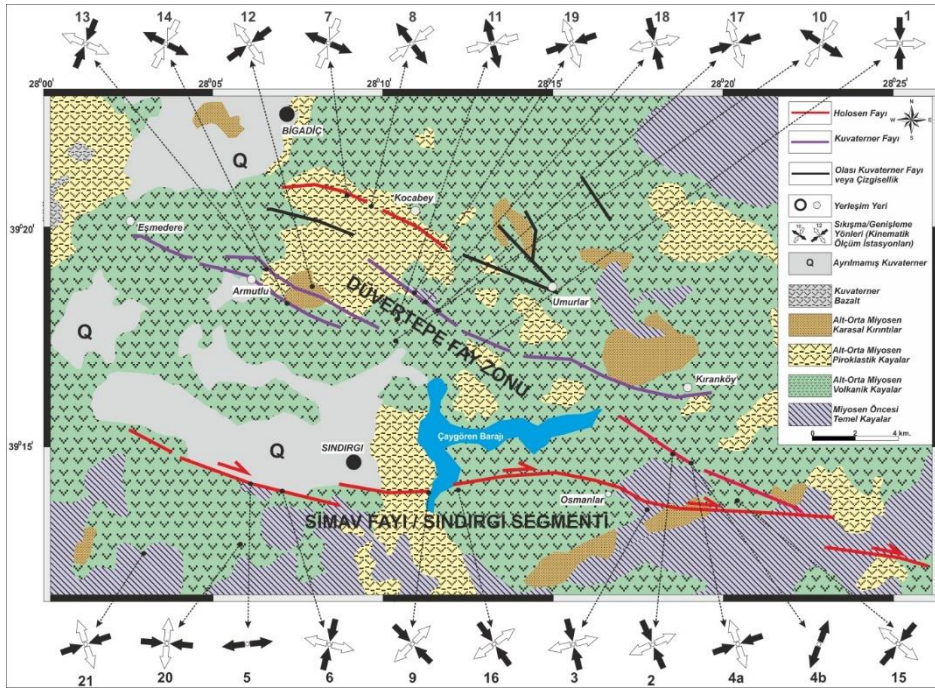
ilişkilendirilmektedir (Dreger ve Langston, 1995). Kinematik ve Sismolojik ters çözüm sonuçları dikkate alınarak tektonik rejim hakkında değerlendirme yapılması mümkün olmuştur.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Kinematik Analiz Bulguları

Fay topluluklarının ölçüldüğü gözlem yerleri, farklı yaşlardaki jeolojik birimlerden, toplam 21 adet istasyondan 160 adet fay düzleminden oluşmaktadır. Ancak 4 numaralı istasyonda 2 farklı tektonik faz görüldüğü için, farklı fazlar kendi içerisinde gruplara ayrılarak 2 farklı istasyon olarak değerlendirilerek, toplam 22 istasyon olacak şekilde kinematik analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kinematik ölçümlerin gerçekleştirildiği lokasyonların harita üzerindeki dağılımı Şekil 4'de, bu lokasyonların koordinat, yaş ve litoloji bilgileri ise Tablo 1'de verilmiştir.

Çalışma alanının jeolojik kaya birimlerine bakıldığında, ağırlıklı olarak Alt-Orta Miyosen yaşlı birimler görülmektedir (M.T.A, 2002). Alt-Orta Miyosen yaşlı jeolojik birimler, bu çalışma için volkanik kayalar, piroklastik kayalar ve karasal kırıntılar olarak 3 farklı litoloji halinde gruplandırılmıştır. Miyosen öncesi birimler için jeolojik harita sadeleştirilmiş olup, bu birimler kendi içinde gruplandırılmamıştır ve temel birimler olarak değerlendirilmiştir. Toplam 21 istasyonda gerçekleştirilen kinematik analiz ölçümlerinin 17 tanesi Miyosen yaşlı birimlerde, 4 tanesi de Miyosen öncesi temel birimlerde ölçülmüştür (bkz. Şekil 4).



Şekil 4. Çalışma alanında kinematik ölçüm analizi gerçekleştirilen lokasyonlar ve her bir istasyona ait stres yönleri (fay haritası Emre vd., 2011a'dan, jeoloji haritası M.T.A., 2002'den sadeleştirilerek alınmıştır).

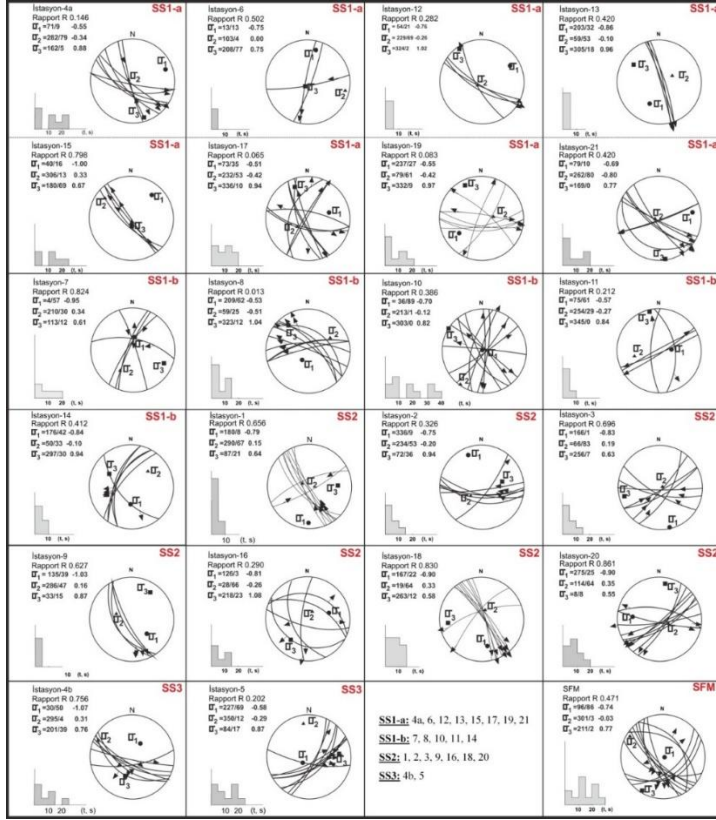


Tablo 1

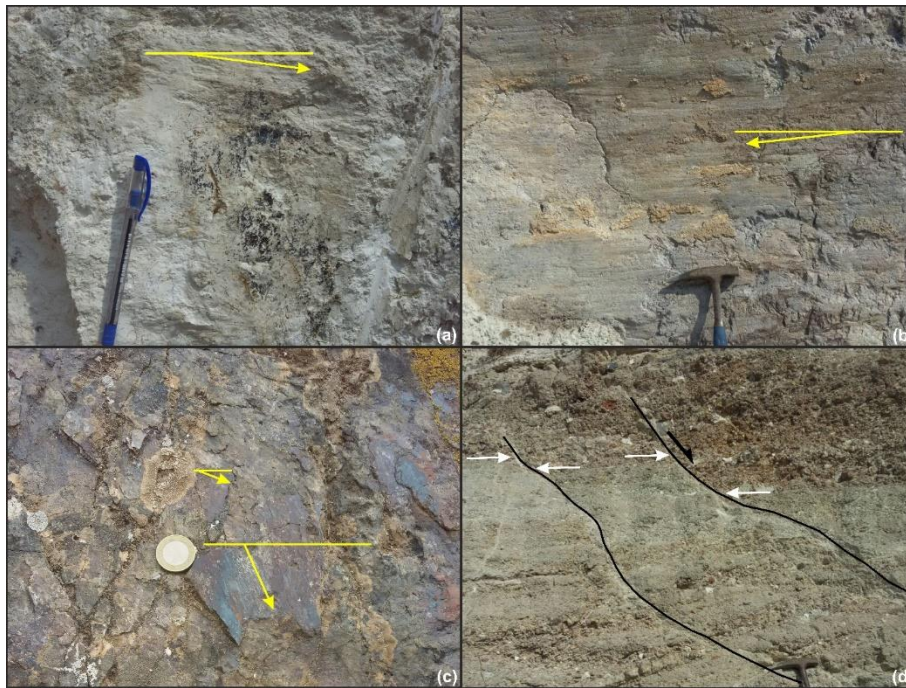
Fay ölçüm istasyonlarının koordinat, yaş ve litoloji bilgileri

İstasyon	UTM (Boylam)	UTM (Enlem)	Yaş	Litoloji	Ölçüm Sayısı
1	35S 0606671	4349155	Miyosen	Volkanik Kaya	10
2	35S 0615259	4345831	Miyosen	Aglomera	7
3	35S 0614421	4343445	Miyosen Öncesi	Kireçtaşı	7
4	35S 0616818	4344394	Miyosen Öncesi	Kireçtaşı	15
5	35S 4341920	596687	Miyosen Öncesi	Ofiyolitik Melanj	10
6	35S 0597906	4342918	Miyosen	Andezitik Tüf	3
7	35S 0602412	4357157	Miyosen	Pirkolastik	5
8	35S 0601218	4356744	Miyosen	Andezitik Tüf	9
9	35S 0601681	4355555	Miyosen	Volkanik Kaya	4
10	35S 0602750	4350007	Miyosen	Altere Volkanit	11
11	35S 0602865	4350660	Miyosen	Altere Volkanit	5
12	35S 0598409	4353501	Miyosen	Kiltaşı	4
13	35S 0596620	4352997	Miyosen	Kiltaşı	5
14	35S 0597119	4351538	Miyosen	Kiltaşı	6
15	35S 0616982	4344048	Miyosen	Volkanik Kaya	6
16	35S 0613479	4347072	Miyosen	Altere Volkanit	6
17	35S 0605792	4350692	Miyosen	Altere Volkanit	10
18	35S 0607458	4351595	Miyosen	Metamorfik Kaya	11
19	35S 0609054	4352451	Miyosen	Metamorfik Kaya	8
20	35S 0594525	4339957	Miyosen	Granit	10
21	35S 0591985	4338764	Miyosen Öncesi	Altere Volkanit - Dasit	8

Toplam 21 istasyondan, 22 gözlem noktasından ölçülen fay düzlemlerine ait kinematik veriler ile 4 farklı tektonik rejimin varlığı tespit edilmiştir. Bu tektonik rejimler, yaşlıdan gence doğru sırasıyla; KD-GB Sıkışma Rejimi (SS1-a), KB-GD Genişleme Rejimi (SS1-b), KB-GD Sıkışma Rejimi (SS2) ve KD-GB Genişleme Rejimi (SS3) dir. Tüm tektonik rejim türlerine (deformasyon evrelerine) ait kinematik analiz sonuçları Şekil 5’de, farklı faylanma türlerine ait saha gözlemlerine dayalı bir şekil ise, Şekil 6’da verilmiştir. Bu tektonik rejim türleri (deformasyon evreleri) birbirlerinden ayırt edilirken birden çok parametre göz önünde bulundurulmuştur ve son tektonik rejimden başlanarak geriye doğru gidilmiştir. Tektonik rejimler, kinematik analiz sonucu elde edilen asal gerilme eksenlerinin yönleri ve asal gerilme eksenleri arasındaki oranlar dikkate alınarak belirlenmiştir. Ayrıca, yine sahada birbirini üzerleyen fay düzlemi verileri, birbirini kesen fay-atım verileri, sahadaki orta-büyük ölçekli yapılar da bu kronolojik sıranın oluşturulmasında göz önünde bulundurulmuştur. Bu konuda özellikle Batı Anadolu’da deformasyon evrelerini birbirinden ayırt etmeye yönelik yapılan önceki çalışmalar, benzer ve aynı yaştaki sahalarda yapılan karşılaştırmalar ve Batı Anadolu’nun jeodinamik evrimi bu kronolojik kurgunun oluşturulmasında büyük etken olmuştur.



Şekil 5. Çalışma alanında toplam 21 istasyondan, toplam 160 adet fay düzlemine ait kinematik analiz sonuçları eşit açılı projeksiyon alt yarımküresi (Wulf) üzerinde (öngörülen kayma vektörü ( $\tau$ ) ile hesaplanan kayma vektörü ( $s$ ) arasındaki sapma açısının dağılımı histogramlarda verilmiştir) görülmektedir.



Şekil 6. Çalışma alanında görülen faylanma türleri (a) sol yanal doğrultu atımlı faylanma (istasyon-12) (b) sağ yanal doğrultu atımlı faylanma (istasyon-13) (c) Süller Köyü güneydoğusunda görülen, doğrultu atım bileşeni olan, normal faylanmaya yakın verrev atımlı faylanma (d) Armutlu Köyü civarında genç birimlerde görülen normal bileşenli deformasyon



### 3.1.1. KD-GB Sıkışma Rejimi (SS1-a)

Bu tür faylanma, çalışma alanında Sındırgı Segmenti haricinde diğer alanlarda (Holosen etkinliği kuşkulu olan özellikle Düvertepe Fay Zonu ve civarında) görülmektedir. Bu rejimi temsil eden; 4a, 6, 12, 13, 15, 17, 19, 21 numaralı istasyonlardan, toplam 52 tane fay düzlemi ölçülmüştür. Burada en büyük ana gerilme eksenini ( $\sigma_1$ ) ve en küçük ana gerilme eksenini ( $\sigma_3$ ) yatayda iken; ortaç gerilme eksenini ( $\sigma_2$ ) düşeydedir. Bundan dolayı ise, buradaki tektonik rejim türü doğrultu atımlı faylanmadır. Ölçülen bu veriler birlikte değerlendirildiğinde, en büyük ana gerilme eksenini ( $\sigma_1$ )= $231^\circ/20^\circ$ ; en küçük ana gerilme eksenini ( $\sigma_3$ )= $297^\circ/24^\circ$ 'dir. Rm oranı ise 0.340 olarak bulunmuştur (bkz. Tablo 2). Bu sonuçlar, bölgedeki sıkışmanın ( $\sigma_1$ )= $K51^\circ D$  olduğunu göstermektedir. R oranı, 0.45'den küçük olduğu için ( $R_m=0.340$ ) buradaki doğrultu atımlı faylanma, transtansiyonel karakterdedir.

Tablo 2

Çalışma alanında, KD-GB Doğrultulu sıkışma rejimini (SS1-a) temsil eden fay topluluklarının; [Carey-Gailhardis \(1987\)](#)'in sayısal analiz yöntemi ile değerlendirilmesi sonucu hesaplanan asal gerilme eksenlerinin [( $\sigma_1$ ), ( $\sigma_2$ ), ( $\sigma_3$ )] durumları, R oranı  $\{(\sigma_2-\sigma_1) / (\sigma_3-\sigma_1)\}$ , Ölçü sayısı (N), fay ölçüm istasyonları

İstasyon	$\sigma_1$ (Az / dip)	$\sigma_2$ (Az / dip)	$\sigma_3$ (Az / dip)	R Oranı	N
4a	71/9	282/79	162/5	0.146	8
6	13/13	103/4	208/77	0.502	3
12	54/21	229/69	324/2	0.282	4
13	203/32	59/53	305/18	0.420	5
15	40/16	306/13	180/69	0.798	6
17	73/35	232/53	336/10	0.065	10
19	237/27	79/61	332/9	0.083	8
21	79/10	262/80	169/0	0.420	8
<b>SS1a</b>	<b><math>\sigma_1=231^\circ/20^\circ</math> ve <math>\sigma_3=297^\circ/24^\circ</math></b>			<b>Rm=0.340</b>	<b>52</b>

### 3.1.2. KB-GD Genişleme Rejimi (SS1-b)

Bu tür faylanma da SS1-a rejiminde olduğu gibi, çalışma alanında Sındırgı Segmenti haricinde diğer alanlarda (Holosen etkinliği kuşkulu olan özellikle Düvertepe Fay Zonu ve civarında) görülmektedir. Bu rejimi temsil eden; 7, 8, 10, 11, 14 numaralı istasyonlardan, toplam 36 tane fay düzlemi ölçülmüştür. Burada ortaç gerilme eksenini ( $\sigma_2$ ) ve en küçük ana gerilme eksenini ( $\sigma_3$ ) yatayda iken; en büyük asal gerilme eksenini ( $\sigma_1$ ) düşeydedir. Bundan dolayı ise, buradaki tektonik rejim türü normal faylanmadır. Ölçülen bu veriler birlikte değerlendirildiğinde en küçük ana gerilme eksenini ( $\sigma_3$ )= $312^\circ/11^\circ$ 'dir. Rm oranı ise 0.369 olarak bulunmuştur (bkz. Tablo 3). Bu sonuçlar, bölgedeki açılma (genişleme) yönünün ( $\sigma_3$ )= $K48^\circ B$ ; olduğunu göstermektedir.

Tablo 3

Çalışma alanında, KB-GD Genişleme Rejimini (SS1-b) temsil eden fay topluluklarının; Carey-Gailhardis (1987)'in sayısal analiz yöntemi ile değerlendirilmesi sonucu hesaplanan asal gerilme eksenlerinin  $[(\sigma_1), (\sigma_2), (\sigma_3)]$  durumları, R oranı  $\{(\sigma_2-\sigma_1) / (\sigma_3-\sigma_1)\}$ , Ölçü sayısı (N), fay ölçüm istasyonları

İstasyon	$\sigma_1$ (Az / dip)	$\sigma_2$ (Az / dip)	$\sigma_3$ (Az / dip)	R Oranı	N
7	4/57	210/30	113/12	0.824	5
8	209/63	59/25	323/12	0.013	9
10	36/89	213/1	303/0	0.386	11
11	75/61	254/29	345/0	0.212	5
14	176/42	50/33	297/30	0.412	6
<b>SS1b</b>	<b><math>\sigma_1=80/62</math> ve <math>\sigma_3=312/11^\circ</math></b>			<b>Rm=0.369</b>	<b>36</b>

### 3.1.3. KB-GD Sıkışma Rejimi (SS2)

Bu tür faylanma, çalışma alanında özellikle Sındırgı Segmenti'nde görülmektedir. Bu rejimi temsil eden; 1, 2, 3, 9, 16, 18, 20 numaralı istasyonlardan, toplam 55 tane fay düzlemi ölçülmüştür. Ölçülen bu veriler birlikte değerlendirildiğinde, en büyük ana gerilme eksenini  $(\sigma_1)=301^\circ/15^\circ$ ; en küçük ana gerilme eksenini  $(\sigma_3)=237^\circ/17^\circ$  'dir. Rm oranı ise 0.612 olarak bulunmuştur (bkz. Tablo 4). Bu sonuçlar, bölgedeki sıkışmanın  $(\sigma_1)=K59^\circ B$  olduğunu göstermektedir. R oranı, 0.55'den büyük olduğu için (Rm=0.612) doğrultu atımlı faylanma, transpresyonel karakterdedir.

Tablo 4

Çalışma alanında, KB-GD Sıkışma Rejimini (SS2) temsil eden fay topluluklarının; Carey-Gailhardis (1987)'in sayısal analiz yöntemi ile değerlendirilmesi sonucu hesaplanan asal gerilme eksenlerinin  $[(\sigma_1), (\sigma_2), (\sigma_3)]$  durumları, R oranı  $\{(\sigma_2-\sigma_1) / (\sigma_3-\sigma_1)\}$ , Ölçü sayısı (N), fay ölçüm istasyonları

İstasyon	$\sigma_1$ (Az / dip)	$\sigma_2$ (Az / dip)	$\sigma_3$ (Az / dip)	R Oranı	N
1	180/8	290/67	87/21	0.656	10
2	336/9	234/53	72/36	0.326	7
3	166/1	66/83	256/7	0.696	7
9	135/39	286/47	33/15	0.627	4
16	126/3	28/66	218/23	0.290	6
18	167/22	19/64	263/12	0.830	11
20	275/25	114/64	8/8	0.861	10
<b>SS2</b>	<b><math>\sigma_1=301^\circ/15^\circ</math> ve <math>\sigma_3=237^\circ/17^\circ</math></b>			<b>Rm=0.612</b>	<b>55</b>

### 3.1.4. KD-GB Genişleme Rejimi (SS3)

Bu tür faylanma, çalışma alanında gözlenen en genç tektonik rejim olup, Sındırgı Segmenti'nde görülmektedir. Bu rejimi temsil eden; 4b ve 5 numaralı istasyonlardan, toplam 17 tane fay düzlemi ölçülmüştür. Burada ortaç gerilme eksenini  $(\sigma_2)$  ve en küçük ana gerilme eksenini  $(\sigma_3)$  yatayda iken; en büyük asal gerilme eksenini  $(\sigma_1)$  düşeydedir. Bundan dolayı ise, buradaki tektonik rejim türü normal faylanmadır. Ölçülen bu veriler birlikte değerlendirildiğinde en küçük ana gerilme eksenini  $(\sigma_3)=233^\circ/8^\circ$  'dir. Rm oranı ise 0.479 olarak bulunmuştur (bkz. Tablo 5). Bu sonuçlar, bölgedeki açılma (genişleme) yönünün  $(\sigma_3)=K53^\circ D$ ; olduğunu göstermektedir.

Tablo 5

Çalışma alanında, KD-GB genişleme rejimini (SS3) temsil eden fay topluluklarının; Carey-Gailhardis (1987)'in sayısal analiz yöntemi ile değerlendirilmesi sonucu hesaplanan asal gerilme eksenlerinin  $[(\sigma_1), (\sigma_2), (\sigma_3)]$  durumları, R oranı  $\{(\sigma_2-\sigma_1) / (\sigma_3-\sigma_1)\}$ , Ölçü sayısı (N), fay ölçüm istasyonları

İstasyon	$\sigma_1$ (Az / dip)	$\sigma_2$ (Az / dip)	$\sigma_3$ (Az / dip)	R Oranı	N
4b	30/50	295/4	201/39	0.756	7
5	227/69	350/12	84/17	0.202	10
<b>SS3</b>	<b><math>\sigma_2=323^\circ/8^\circ</math> ve <math>\sigma_3=233^\circ/28^\circ</math> <math>R_m=0.479</math></b>				<b>17</b>

### 3.2. Depremlerin Odak Mekanizma ve Ters Çözümleri

Çalışma alanının genelinde, sayısal kayıtlarına ulaşılabilecek durumda olan ve 2003-2016 yılları arasında meydana gelen depremlerden,  $M \geq 3.5$  olan; parametreleri Tablo 6'da sunulan 12 adet depremin çözümü yapılmıştır. Bu depremlerin dinamik ve kinematik parametreleri, moment tensör ters çözüm tekniği (Dahm, 1996; Shomali ve Slunga, 2000; Dreger 2002) uygulanarak belirlenmiştir.

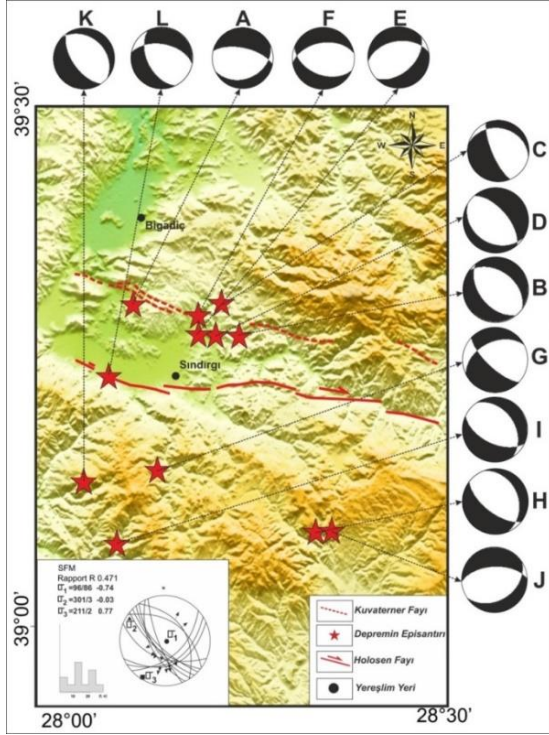
Tablo 6

Çalışma alanı ve civarında 2003-2016 yılları arasında meydana gelmiş,  $M \geq 3.5$  olan 12 adet depreme ait parametreler (Koyu renkle ifade edilen düzlemler ana düzlem, diğerleri yardımcı düzlem olup, SFM bu depremlere ait ortak odak mekanizma çözüm sonuçlarını ifade etmektedir. MD: süreye bağlı büyüklük, ML: yerel büyüklük)

No	Tarih	Saat (UTM)	Enlem	Boylam	Düzlem-1 (Strike/Dip/Rake)	Düzlem-1 (Strike/Dip/Rake)	Büyüklük	Derinlik (km)
<b>A</b>	04.02.2016	04:14	39.31	28.12	<b>66/32/-122</b>	282/63/-72	3.5 (ML)	5.0
<b>B</b>	09.08.2003	16:14	39.28	28.25	142/49/-79	<b>305/43/-102</b>	3.5 (MD)	8.0
<b>C</b>	15.06.2003	08:26	39.31	28.23	<b>157/74/-68</b>	280/27/-144	3.8 (MD)	12.0
<b>D</b>	14.06.2003	09:39	39.28	28.22	122/30/-105	<b>319/61/-82</b>	3.8 (ML)	9.0
<b>E</b>	13.06.2003	19:38	39.28	28.20	<b>48/49/-113</b>	261/46/-66	3.7 (ML)	9.0
<b>F</b>	13.06.2003	10:28	39.30	28.20	<b>112/46/-67</b>	261/49/-112	4.1 (ML)	10.0
<b>G</b>	02.12.2015	15:52	39.15	28.15	<b>133/71/-49</b>	243/45/-153	3.9 (ML)	15.9
<b>H</b>	12.11.2013	21:04	39.09	28.35	<b>128/63/-105</b>	339/30/-63	3.6 (ML)	6.8
<b>I</b>	27.06.2012	03:43	39.08	28.10	116/55/-108	<b>326/39/-66</b>	3.7 (ML)	5.4
<b>J</b>	10.06.2011	22:47	39.09	28.36	<b>58/37/-114</b>	268/57/-73	4.6 (ML)	13.9
<b>K</b>	03.07.2006	05:59	39.14	28.06	<b>145/60/-84</b>	313/31/-100	3.7 (MD)	11.3
<b>L</b>	05.01.2003	00:46	39.24	28.09	<b>153/52/-51</b>	280/52/-129	3.5 (MD)	15.0
<b>SFM <math>\sigma_2=301^\circ/3^\circ</math> and <math>\sigma_3=211^\circ/2^\circ</math> <math>R_m=0.471</math></b>								

Bu 12 adet deprem, ayrı ayrı değerlendirildiğinde normal faylanma ürünü olan depremler olduğu görülmektedir. Bu depremlerin ortak çözümleri (SFM ortak çözümü), Şekil 7'de sunulmuştur.





Şekil 7. Çalışma alanı ve civarında 2003-2016 yılları arasında meydana gelmiş.  $M \geq 3.5$  olan 12 adet depreme ait odak mekanizma çözümleri

Bu depremlerin ortak çözümlerine bakıldığında, ortaç gerilme eksenini ( $\sigma_2$ ) ve en küçük ana gerilme ekseninin ( $\sigma_3$ ) yatayda; en büyük asal gerilme ekseninin ( $\sigma_1$ ) ise düşeyde olduğu görülmektedir. Ölçülen bu veriler birlikte değerlendirildiğinde en küçük ana gerilme eksenini ( $\sigma_3$ )= $211^\circ/2^\circ$ 'dir. Rm oranı ise 0.471 olarak bulunmuştur.

Depremlerin odak mekanizma ortak çözüm sonuçlarına göre, bölgedeki açılma (genişleme) yönünün ( $\sigma_3$ )= $K31^\circ D$  olduğunu; günümüzde KKD-GGB yönünde bir genişleme rejiminin baskın olduğunu göstermektedir.

### 3.3. Kinematik Analiz Bulguları ile Depremlerin Odak Mekanizma ve Ters Çözümlerine Ait Bulguların Birlikte Değerlendirilmesi

Bünyesinde birçok yapısal unsuru ve yapısal sınırı barındıran Ege Graben Sistemi içerisinde yer alan Simav Fay Zonu, neotektonik döneme ait önemli yapıların başında gelir. Bu çalışmada; Ege genişlemeli tektonik rejimi ile Kuzeybatı Anadolu geçiş tektonik rejimi arasında yapısal bir sınır olarak (Doğan ve Emre, 2006) değerlendirilen Simav Fay Zonu'nun; Sındırgı Segmenti ile bu fayın kuzeyinde yer alan Düvertepe Fay Zonu ve civarının kinematik ve sismotektonik özellikleri incelenmiştir.

Simav Fay zonu ve civarında Neotektonik dönemin başlangıç yaşının Pliyo-Kuvaterner olduğu, graben dolgularının yaşları ve deformasyon biçimi ile kanıtlanmıştır ve Simav Fay Zonu'nun, GB Türkiye' de güncel KKD yönlü kabuk gelişmesine, D-B ve KD-GB gidişli graben-horst sistemleri kadar katkıda bulunduğu ifade edilmiştir (Koçyiğit ve Deveci, 2005). Bu durum kayma düzlemi verilerinin stereografik izdüşümü, açılma sırtı travertenleri ve güncel yıkıcı depremlerin odak mekanizması çözümleriyle de kanıtlanmıştır (Eyidoğan, Güçlü, Utku, ve Değirmenci, 1991; Eyidoğan ve Jackson 1985; Taymaz, Tan, Özalaybey, ve Karabulut, 2002; Koçyiğit ve Deveci, 2005).

Batı Anadolu'da, özellikle Havran-Balıkesir Fay Zonu'nda (Havran-Balya Fay Zonu ve Balıkesir Fayı) ile İzmir-Balıkesir transfer zonunda yapılan önceki çalışmalarda, bölgenin kinematik gelişimi ve Batı Anadolu tektoniğindeki yeri ortaya konmuştur. Sümer, Uzel, Özkaymak, ve Sözbilir, (2018), Havran-Balıkesir Fay Zonu'nda yaptıkları çalışmada fay atım verileri ile 3 evreli bir deformasyonun varlığını saptamışlardır. Bunlar

sırasıyla (i) Miyosen öncesi döneme ait olan, genellikle sol yanal ters bileşenli faylarla temsil edilen KB-GD genişleme / KD-GB sıkışma rejimi, (ii) Pliyo-Kuvaterner’de, doğrultu atımlı faylarla ve ters faylarla temsil edilen D-B genişleme / K-G sıkışmanın hakim olduğu rejim, (iii) en genç evre ise, Kuvaterner’den günümüze kadar etkin olan KD-GB genişleme / KB-GD sıkışma evresidir. [Uzel, Sözbilir, Özkaymak, Kaymakçı, ve Langereis, \(2013\)](#), İzmir-Balıkesir Transfer Zonundaki deformasyonları belirlemeye yönelik yaptıkları çalışmada; bu transfer zonu üzerinde Geç Senozoyik’te meydana gelen 3 farklı deformasyon evresi belirlemiştir. Bu deformasyon evreleri yaşlıdan gence doğru sırasıyla, (i) Doğrultu atımlı faylanmanın baskın olduğu ve Miyosen dönemine denk gelen K-G genişleme ve D-B sıkışma rejimi, (ii) Erken Pliyosen döneminde doğrultu atımlı faylanmanın baskın olduğu transtansiyon rejimden, genişlemenin baskın olduğu transtansiyon rejime geçiş evresi, (iii) İzmir-Balıkesir Transfer Zonunun parçalanarak daha dar bir makaslama zonuna dönüştüğü; KD-GB sağ yönlü doğrultu atımlı faylar, KB-GD sol yönlü doğrultu atımlı faylar ve D-B doğrultulu normal fayların birlikte çalıştığı deformasyon evresidir. Yine Batı Anadolu’da İzmir ve civarında Cumaovası Havzası’nda [Uzel ve Sözbilir \(2008\)](#) tarafından yapılan çalışmada Orhanlı Fay Zonu boyunca transpresyon rejim ve sol yönlü doğrultu atımlı faylanmanın KB-GD sıkışma ve KD-GB açılma gerilmeleri ile ilgili olduğu, havzadaki genç veriler ile yaklaşık K-G yönlü genişleme ve D-B yönlü sıkışma ile ilişki transtansiyonal bir rejimin etkin olduğu ve günümüzde de bu rejimin devam ettiğini deprem odak mekanizma çözümleri ile desteklemiştir. Yine benzer şekilde, Orta-Batı Anadolu’da yer alan Eskişehir Fayı üzerinde [Özden, Gündoğdu ve Bekler, \(2015\)](#) tarafından yapılan çalışmada, transpresyonal rejimle ilişkili KB-GD sıkışma ve KD-GB açılmadan, transtansiyonal tektonik rejimle ilişkili KD-GB sıkışma ve KB-GD açılmaya geçişin muhtemelen Kuvaterner zaman diliminde olduğunu belirtmişler ve günümüzde de bu rejimin devam ettiğini deprem odak mekanizma çözümleri ile desteklemiştir.

Bu çalışmada, çalışma sahasında mostra koşullarının uygun olduğu yerlerde toplam 21 istasyonda 160 adet, üzerinde kinematik belirteçleri taşıyan fay düzlemleri ölçülerek derlenmiş ve sayısal analizi yapılmıştır. Bu analiz sonucunda bölgede Neotektonik dönemi temsil ettiği düşünülen dört evreli bir tektonik rejimin varlığı saptanmıştır.

Çalışma alanındaki en eski tektonik rejim türü, Pliyo-Kuvaterner öncesi (?) bir dönemde başlayan KD-GB doğrultulu sıkışma rejimi (SS1-a) altında gelişen ve özellikle doğrultu atımlı faylanmalar ile temsil olunan bir rejim türüdür. Bu rejim,  $K51^{\circ}D$  doğrultulu bir sıkışma altında gelişmiş olup; R oranının 0.340 olması doğrultu atımlı faylanmanın transtansiyonel bir karakterde olduğunu gösterir. Yine Pliyo-Kuvaterner (?) bir döneme ait olan KB-GD Genişleme Rejimi (SS1-b) altında gelişen ve genellikle normal bileşenin baskın olduğu verev atımlı faylanmalar ile temsil olunan bir rejim türüdür. Bu rejim,  $K48^{\circ}B$  doğrultulu bir genişleme altında gelişmiştir. Bu deformasyon evreleri (SS1a ve SS1b); özellikle Holosen etkinliği kuşkulu olan ve [Emre vd. \(2011a\)](#) tarafından Kuvaterner Fayı olarak nitelendirilen Düvertepe Fay Zonu ve civarında görülmüştür. Bu deformasyon evresi [Sümer vd. \(2018\)](#) tarafından, çalışma alanının kuzeyinde yer alan Havran-Balıkesir Fay Zonu için önerilen, Miyosen öncesi döneme ait KB-GD genişleme / KD-GB sıkışma rejimi ile uyumludur. Yine belirlenen bu rejim türü, [Uzel vd. \(2013\)](#) tarafından İzmir-Balıkesir Transfer Zonu ve çevresi için öngörülen ve doğrultu atımlı faylanmanın baskın olduğu Miyosen dönemine karşılık gelen deformasyon ile nispeten uyumludur.

Pliyo-Kuvaterner döneminde ise, KB-GD doğrultulu sıkışma rejimi (SS2) altında gelişen ve özellikle doğrultu atımlı faylanmalar ile temsil olunan bir rejim baskındır. Bu rejim,  $K57^{\circ}D$  doğrultulu bir sıkışma altında gelişmiş olup; R oranının 0.612 olması doğrultu atımlı faylanmanın transpresyonel bir karakterde olduğunu gösterir. Bu tektonik rejim türü, [Emre vd. \(2011a\)](#) tarafından Holosen Fayı olarak tanımlanan Sındırgı Segmenti ve civarında görülmüştür. Bu deformasyon evresi, [Sümer vd. \(2018\)](#) tarafından Pliyo-Kuvaterner’de dönemi için Balıkesir-Havran Fay Zonu ve çevresi için öngörülen, doğrultu atımlı faylarla ve ters faylarla temsil edilen D-B genişleme / K-G sıkışma evresiyle nispeten uyumludur. Bu dönemde (Erken Pliyosen); doğrultu atımlı faylanmanın baskın olduğu transtansiyon rejimden, genişlemenin baskın olduğu transtansiyon rejime geçiş evresinin varlığı, İzmir-Balıkesir Transfer Zonu’nda yapılan çalışmalar ile ortaya konmuştur ([Uzel vd., 2013](#)).

Çalışma alanındaki en genç tektonik rejim türü ise, günümüzde de etkin olan, normal bileşeni baskın oblik faylarla temsil olunan KD-GB Genişleme Rejimi (SS3) altında gelişen ve genellikle normal faylarla temsil olunan bir rejim türüdür. Bu rejim ise, K53°B doğrultulu bir genişleme altında gelişmiştir. Bu tektonik rejim türü, Emre vd. (2011a) tarafından Holosen Fayı olarak tanımlanan Sındırgı Segmenti ve civarında görülmüştür (bkz. Tablo 7 ve Şekil 8). Bu tektonik rejim türü Sümer vd. (2018) tarafından, çalışma alanının kuzeyinde yer alan Havran-Balıkesir Fay Zonu için önerilen ve Kuvaterner'den günümüze kadar etkin olan KD-GB genişleme / KB-GD sıkışma evresi ile uyumludur.

Tablo 7

Çalışma alanında 21 istasyondan derlenen fayların kinematik analiz sonuçlarının tablosal dağılımı.  $[(\sigma_1), (\sigma_2), (\sigma_3)]$  asal gerilme eksenlerinin durumları, R oranı  $\{(\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1)\}$ , Ölçü sayısı (N), fay ölçüm istasyonları. (SS1a, SS1b, SS2, SS3: farklı tektonik rejim türlerine ait ortak çözümler, SFM: 12 adet depreme ait ortak odak çözüm mekanizması)

İstasyon	$\sigma_1$ (Az / dip)	$\sigma_2$ (Az / dip)	$\sigma_3$ (Az / dip)	R Oranı	N
4a	71/9	282/79	162/5	0.146	8
6	13/13	103/4	208/77	0.502	3
12	54/21	229/69	324/2	0.282	4
13	203/32	59/53	305/18	0.420	5
15	40/16	306/13	180/69	0.798	6
17	73/35	232/53	336/10	0.065	10
19	237/27	79/61	332/9	0.083	8
21	79/10	262/80	169/0	0.420	8
<b>SS1a</b>	<b><math>\sigma_1=231/20^\circ</math> and <math>\sigma_3=297/24^\circ</math> Rm=0.340</b>				<b>52</b>
7	4/57	210/30	113/12	0.824	5
8	209/63	59/25	323/12	0.013	9
10	36/89	213/1	303/0	0.386	11
11	75/61	254/29	345/0	0.212	5
14	176/42	50/33	297/30	0.412	6
<b>SS1b</b>	<b><math>\sigma_1=80/62^\circ</math> and <math>\sigma_3=312/11^\circ</math> Rm=0.369</b>				<b>36</b>
1	180/8	290/67	87/21	0.656	10
2	336/9	234/53	72/36	0.326	7
3	166/1	66/83	256/7	0.696	7
9	135/39	286/47	33/15	0.627	4
16	126/3	28/66	218/23	0.290	6
18	167/22	19/64	263/12	0.830	11
20	275/25	114/64	8/8	0.861	10
<b>SS2</b>	<b><math>\sigma_1=301/15^\circ</math> and <math>\sigma_3=237/17^\circ</math> Rm=0.612</b>				<b>55</b>
4b	30/50	295/4	201/39	0.756	7
5	227/69	350/12	84/17	0.202	10
<b>SS3</b>	<b><math>\sigma_2=323/8^\circ</math> and <math>\sigma_3=233/28^\circ</math> Rm=0.479</b>				<b>17</b>
<b>SFM</b>	<b><math>\sigma_2=301/3^\circ</math> and <math>\sigma_3=211/2^\circ</math> Rm=0.471</b>				<b>12</b>



Çalışma alanındaki en genç tektonik rejim türü olan ise, normal bileşeni baskın oblik faylarla temsil olunan KD-GB Genişleme Rejiminin (SS3) günümüzde de etkin olduğunun bir diğer kanıtı ise, bölgede meydana gelen depremlerin odak mekanizma çözümü sonuçları da desteklemektedir. Depremlerin odak mekanizma ortak çözüm sonuçlarına göre, bölgedeki açılma (genişleme) yönünün ( $\sigma_3$ )= $K31^\circ D$  olduğunu; günümüzde KKD-GGB yönünde bir genişleme rejiminin daha baskın olduğunu göstermektedir (bkz. Şekil 8). Gerek kinematik analiz sonuçlarından en genç tektonik rejim türünü temsil eden SS3'ün sonuçları, gerekse depremlerin odak mekanizma ortak çözüm sonuçlarından elde edilen genişleme yönleri, günümüzde Batı-Güneybatı Anadolu'da etkin olan genişleme yönüyle uyumluluk göstermektedir.

Yaş	Gerilme Durumları	Kinematik Ölçüm İstasyonları
Pliyo-Kuvaterner		SS3 4b, 5
		SS2 1, 2, 3, 9, 16, 18, 20
Pliyo-Kuvaterner Öncesi		SS1-b 7, 8, 10, 11, 14 SS1-a 4a, 6, 12, 13, 15, 17, 19, 21

Şekil 8. Çalışma alanı ve çevresinin, Geç Senozoyik yaşlı gerilme durumlarının dağılımı

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada Simav Fay Zonu'nun Sındırgı Segmenti ile, Düvertepe Fay Zonu ve civarının kinematik/sismotektonik özellikleri incelenmiştir. 21 istasyonda 160 adet üzerinde kinematik belirteçleri taşıyan fay veya faylar ölçülerek derlenmiş ve sayısal analizi yapılmış; bölgede Neotektonik dönemi temsil eden dört evreli bir tektonik rejimin varlığı saptanmıştır. Bunlar, KD-GB sıkışma (SS1a), KB-GD genişleme (SS1b), KB-GD sıkışma (SS2) ve KKD-GGB genişleme (SS3) evreleridir. Bu rejim türleri (deformasyon evreleri) birbirinde ayırt edilirken; kinematik analiz sonucundan elde edilen asal gerilme eksenlerinin yönleri, asal gerilme eksenleri arasındaki oranlar, sahada birbirini üzerleyen fay düzlemi verileri, birbirini kesen fay-atım verileri, sahadaki orta-büyük ölçekli yapılar, benzer ve aynı yaştaki sahalarla yapılan karşılaştırmalar, Batı Anadolu'nun jeodinamik evrimi, bu konuda yapılmış olan benzer çalışmalarla yapılan karşılaştırmalar kullanılmıştır. Pliyo-Kuvaterner öncesi döneme ait olan SS1-a ve SS1-b rejimleri Düvertepe Fay Zonu ve civarında; Pliyo-Kuvaterner döneme ait olan SS2 ve SS3 rejimleri ise Sındırgı Segmenti ve civarında görülmüştür. Çalışma alanındaki en genç tektonik rejim türü; günümüzde de etkin olan, KD-GB Genişleme Rejimi (SS3) altında gelişen bir rejim türüdür. Bu rejim,  $K53^\circ B$  doğrultulu bir genişleme altında gelişmiştir. Bu rejim türünün, günümüzde de etkin olduğu sonucunu, bölgede meydana gelen depremlerin odak mekanizma çözümü sonuçları da desteklemektedir. Depremlerin odak mekanizma ortak çözüm sonuçlarına göre, bölgedeki açılma (genişleme) yönünün ( $\sigma_3$ )= $K31^\circ D$  olduğunu; günümüzde KKD-GGB yönünde bir genişleme rejiminin daha baskın olduğunu göstermektedir. Gerek kinematik analiz sonuçlarından en genç tektonik rejim türünü temsil eden SS3'ün sonuçları, gerekse depremlerin odak mekanizma ortak çözüm sonuçlarından elde edilen genişleme yönleri, günümüzde B-GB Anadolu'da etkin olan genişleme yönüyle uyumluluk göstermektedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, FHD-2016-982 ve FBA-2016-809 numaralı ÇOMÜ-BAP projeleri ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederiz.

## Yazar Katkıları

Erdem Gündoğdu: Saha çalışmalarında veri toplamış; kinematik analiz çalışmaları, sismolojik çalışmalarda yer almış ve makaleyi yazmıştır.

Süha Özden: Saha çalışmalarında veri toplamış; kinematik analiz çalışmaları, sismolojik çalışmalarda yer almıştır.

Tolga Bekler: Sismolojik çalışmalarda yer almıştır.

## Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

## Kaynaklar

- Akтуğ, B., Nocquet, J. M., Cingöz, A., Parsons, B., Erkan, Y., England, P., Lenk, O., Gürdal, M. A., Kılıçoğlu A., Akdeniz, H. ve Tekgül, A. (2009). Deformation of western Turkey from a combination of permanent and campaign GPS data: Limits to block-like behavior. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114, 1978–2012. <https://doi.org/10.1029/2008JB006000>
- Angelier, J. ve Mechler, P. (1977). Sur Methode Graphique de Recherche des Contraintes Princ. Egalement Utilisable en Tectonique et en Sismologie: la Methode Diédre Droit, *Bulletin de la Société Géologique de France*, 19, 1309-1318.
- Bouchon, M., (1981). A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71, 959-971. <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/71/4/959/102036/A-simple-method-to-calculate-Green-s-functions-for?redirected>
- Carey, E. (1976). Analyse Numérique d'un Modèle Mécanique Élémentaire Appliqué a L'étuded'une Population de Failles: Calcul d'un Tenseur Moyen des Contraintes a Partir des Stries de Glissement. *Thèse de 3<sup>o</sup> cycle*, Université de Paris-Sud, Orsay, 138.
- Carey, E. (1979). Recherche des Directions Principales de Contraintes Associées au jeu d'une Population de Failles, *Revue Geological Dynamic and Géography physic*, 21, 57-66.
- Carey-Gailhardis, E. ve Mercier, J. L. (1987). A numerical Method for Determining the State of Stress Using Focal Mech. of Earthquake Populations: application to Tibetan teleseisms and microseismicity of Southern Peru. *Earth and Planetary Science Letters*, 82, 165-179. [http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X\(87\)90117-8](http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X(87)90117-8)
- Dahm, T. (1996). Relative moment tensor inversion based on ray theory: theory and synthetic tests. *Geophysical Journal International*, 124, 245-257. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06368.x>
- Doğan, A. ve Emre Ö. (2006). Ege Graben Sistemi'nin Kuzey Sınırı: Sındırgı-Sincanlı Fay Zonu, 59. *Türkiye Jeoloji Kurultayı, Bildiri Özleri Kitabı*, 83-84.
- Dreger, D. S. ve Langston, C. A. (1995). Moment Tensor Inversion Workshop, an IRIS DMS short course, USA.
- Dreger, D. S. ve Woods, B. (2002). Regional distance seismic moment tensors of nuclear explosion, *Tectonophysics*, 356, 139–156. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00381-5](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00381-5)
- Emre, Ö. ve Duman, T. Y. (2011). 19 Mayıs 2011 Simav (Kütahya) Depremi Ön Değerlendirmesi Raporu, *MTA Jeoloji Etütleri Dairesi Yer Dinamikler Araştırma ve Değerlendirme Koordinatörlüğü Aktif Tektonik Araştırmaları Birimi*.
- Emre, Ö., Doğan, A. ve Özalp, S. (2011a). Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, 1:250.000 Ölçekli Balıkesir (NJ 35-3) Paftası, Seri No:4, *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü*, Ankara-Türkiye.
- Emre, Ö., Özalp, S. ve Duman, T. Y. (2011b). Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, 1:250.000 Ölçekli Uşak (NJ 35-8) Paftası, Seri No:11, *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü*, Ankara-Türkiye.
- Emre, Ö., Duman, T. Y. ve Özalp, S. (2011c). Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, 1:250.000 Ölçekli Kütahya (NJ 35-4) Paftası, Seri No:10, *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü*, Ankara-Türkiye.

- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Olgun, Ş. ve Elmacı, H. (2011d). Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, 1:250.000 Ölçekli Afyon (NJ 36-5) Paftası, Seri No:16, *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü*, Ankara-Türkiye.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. ve Şaroğlu, F. (2013). 1/1.250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası, *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayınlar Serisi*, Ankara, Türkiye.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Şaroğlu, F., Olgun, Ş., Elmacı, H. ve Can, T. (2018). Active fault database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8), 3229-3275. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2>
- Eyidoğan, H. ve Jackson, J. A. (1985). A seismological study of normal faulting in the Demirci, Alaşehir and Gediz earthquakes of 1969 - 70 in western Turkey: implications for the nature and geometry of deformation in the continental crust, *Journal of Geophysical*, 81, 569-607. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1985.tb06423.x>
- Eyidoğan, H., Güçlü, U., Utku, Z. ve Değirmenci, E. (1991). *Türkiye büyük depremleri makro sismik rehberi*. (1900-1988). İTÜ. Maden Fak., Jeofizik Müh. Bölümü Yay., 198s. İstanbul.
- Gündoğdu, E., Özden, S. ve Güngör, T. (2015). Simav (Kütahya) ve Yakın Çevresinin Geç Senozoyik Yaşlı Jeodinamik Evrimi, *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 58(1), 23-37. [https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/ce9245cbc5d2c11\\_ek.pdf?dergi](https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/ce9245cbc5d2c11_ek.pdf?dergi)
- Gürer, A. ve Bayrak, M. (2007). Relation Between Electrical Resistivity and Earthquake Generation in the Crust of West Anatolia, Turkey, *Tectonophysics*, 445, 49-65. <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/>
- Işık, V. (2004). Kuzey Menderes Masifinde Simav Makaslama Zonunun Mikrotektonik Özellikleri, Batı Anadolu, Türkiye. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 47(2), 49-91. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/293510>
- Işık, V., Seyitoğlu, G. ve Çemen, İ. (2003). Ductilebrittle transition along the Alaşehir shear zone and its structural relationship with the Simav detachment, Menderes massif, western Turkey. *Tectonophysics*, 374, 1-18. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00275-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00275-0)
- Koçyigit, A. ve Deveci, Ş. (2005). Akşehir-Simav fay sistemi: Güneybatı Türkiye’de neotektonik rejimin başlama yaşı ve depremsellik. *Deprem Sempozyumu Kocaeli, Bildiri özleri kitabı*, 26.
- Konak, N. (1982). Simav dolayının jeolojisi ve metamorf kayaçlarının evrimi. *İstanbul Yerbilimleri*, 3, 313-337. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/iuyerbilim/issue/18576/196120>
- Lister, G. S. ve Davis, G. A. (1989). The origin of metamorphic core complexes and detachment faults formed during Tertiary continental extension in the northern Colorado River region, U.S.A. *Journal of Structural Geology*, 11, 65-94. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90036-9](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90036-9)
- Malavieille, J. (1993). Late orogenic extension in mountain belts: insights from the Basin and Range and the Late Paleozoic Variscan belt. *Tectonics*, 12, 1115-1130. <https://doi.org/10.1029/93TC01129>
- M.T.A., 2002. *Türkiye Jeoloji Haritası*. 1/500.000 ölçekli İzmir Paftası.
- Özden, S., Över, S., Kavak, K. Ş. ve İnal, S. S. (2008). Late Cenozoic stress states around the Bolu Basin along the North Anatolian Fault, NW Turkey. *Journal of Geodynamics*, 46, 48-62. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2008.04.004>
- Özden, S., Gündoğdu, E. ve Bekler, T. (2015). Interactions between Eurasian/African and Arabian plates: Eskişehir Fault, NW Turkey, *Journal of African Earth Sciences*, 111, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.08.014>
- Seyitoğlu, G. (1997). The Simav graben: An example of young E-W trending structures in the Late Cenozoic extensional system of western Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 6, 135-141. <https://journals.tubitak.gov.tr/earth/abstract.htm?id=1311>
- Seyitoğlu, G. ve Işık, V. (2006). Batı Anadolu’nun Geç Tersiyer Jeolojik evrimi: Menderes masifinin yüzeyleme mekanizması ve ilişkili sedimanter havza oluşumu hakkında yeni bir tektonik model [Late Tertiary geological evolution of western Anatolia: A new tectonic model about the exhumation



- mechanism of Menderes massif and related basin formation]. 59. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri*, 18-20. [https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/dedb42b34e50082\\_ek.pdf](https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/dedb42b34e50082_ek.pdf)
- Shomali, Z. H. ve Slunga, R. (2000). Body wave moment tensor inversion of local earthquakes: an application to the South Iceland Seismic Zone. *Geophysical Journal International*, 140, 63-70. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2000.00989.x>
- Sümer, Ö., Uzel, B., Özkaymak, Ç. ve Sözbilir, H. (2018). Kinematics of the Havran-Balıkesir Fault Zone and its implication on geodynamic evolution of the Southern Marmara Region, NW Anatolia. *Geodinamica Acta*, 30(1), 306-323. <https://doi.org/10.1080/09853111.2018.1540145>
- Taymaz, T., Tan, O., Özalaybey, S. ve Karabulut, H. (2002). Source characteristics of February 3, 2002 Çay-Sultandağı Earthquake (Mw 6.5) sequence in SW-Turkey: a synthesis of Seismological Observations of BodyWaveforms, Strong Motions, and Aftershock Seismicity Survey Data. *1st International Symposium of Istanbul Technical University, the Faculty of Mines on Earth Sciences and Engineering*. Istanbul-Turkey, Abstracts, 60.
- Uzel, B. ve Sözbilir, H. (2008). A first record of a strike-slip basin in western Anatolia and its tectonic implication: the Cumaovası Basin. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17(3), 559-591. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tbtkearth/issue/12006/143683>
- Uzel, B., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç., Kaymakçı, N. ve Langereis, C. G. (2013). Structural evidence for strike-slip deformation in the İzmir-Balıkesir transfer zone and consequences for late Cenozoic evolution of western Anatolia (Turkey). *Journal of Geodynamics*, 65, 94-116. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.06.009>