



## Moment Tensor Analysis and Stress Analysis of Microearthquakes Occurred Between Ganos Fault and Tekirdag Basin

Burcin Didem Tamtas<sup>1</sup>, Esref Yalcinkaya<sup>1</sup> and Ethem Gorgun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Istanbul University-Cerrahpasa, Engineering Faculty, Department of Geophysics, Istanbul, Turkey  
ORCID: 0000-0001-7713-5067, 0000-0003-0593-0656, 0000-0002-4563-3296

### Keywords

Microearthquakes, Moment Tensor Inversion, Stress Tensor Inversion, Ganos Fault, ISOLA

### Highlights

- \* Moment tensor inversions of the microearthquakes
- \* Moment tensor inversions of the seismograms of the seismic network with poor azimuthal coverage
- \* Effects of the crustal models on the moment tensor inversions of the near and microearthquakes

### Acknowledgements

--

### Aim

The effect of the poor azimuthal coverage on the moment tensor analysis of the microearthquakes

### Location

Ganos Offshore

### Methods

Moment tensor inversion and stress tensor inversion

### Results

Although the poor azimuthal coverage of the seismic network, moment tensor inversions of the microearthquakes can be successfully applied with an accurate crustal model

### Supporting Institutions

TUBITAK- Project number 118R019

### Manuscript

Research Article

Received: 25.10.2021

Revised: 27.11.2021

Accepted: 08.12.2021

Printed: 31.12.2021

### DOI

10.46464/tdad.1014479

### Corresponding Author

Burcin Didem Tamtas

Email: burcin.tamtas@iuc.edu.tr

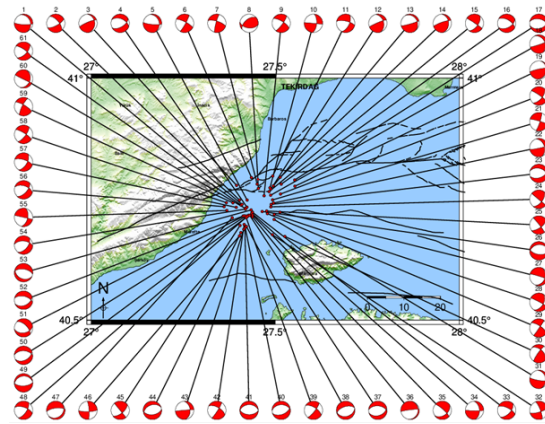


Figure  
Moment Tensor Inversion of Ganos Offshore  
Microearthquakes

### How to cite

Tamtas B.D., Yalcinkaya E., Gorgun E., 2021. Moment Tensor Analysis and Stress Analysis of Microearthquakes Occurred Between Ganos Fault and Tekirdağ Basin, Turk. J. Earthq. Res. 3 (2), 167-192, <https://doi.org/10.46464/tdad.1014479>



## Ganos Fayı ile Tekirdağ Baseni Arasında Meydana Gelen Mikro Depremlerin Moment Tensör ve Gerilme Analizleri

Burçin Didem Tamtaş<sup>1</sup>, Eşref Yalçınkaya<sup>1</sup> ve Ethem Görgün<sup>1</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye  
ORCID: 0000-0001-7713-5067, 0000-0003-0593-0656, 0000-0002-4563-3296

### ÖZET

Bu çalışmada Ganos Fayı üzerinde kurulu MONGAN-1 ve MONGAN-2 sismik ağları ile kaydedilen mikro depremlerin moment tensör ve gerilme analizleri yapılmıştır. MONGAN-1 sismik ağı yaklaşık 10 km<sup>2</sup>lik lokal bir alanda kurulu 40 adet kısa periyot deprem istasyonundan oluşur ve kullanılan depremlerin genel özelliği ağ dışı depremler olmalarıdır. Bu nedenle dar bir azimut aralığında adeta bir nokta alıcı gibi davranan sismik ağı ait kayıtlar kullanılarak azimutal dağılımın çözümler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Seçilen depremler Tekirdağ Baseni ile Ganos Fayı arasında kalan bölgede, Ekim 2017-Haziran 2020 tarihleri arasında meydana gelen, büyüklüğü  $1.5 \leq M_w \leq 3.7$  arasında değişen 61 adet mikro depremden oluşur. Depremlerden büyüklüğü  $2.8 \leq M_w \leq 3.7$  arasında değişen 10 tanesinin geniş bant ulusal ağ kayıtları kullanılarak hem moment tensör hem de P dalgası ilk hareket yönlerinden odak mekanizmaları belirlenerek MONGAN ağı çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen odak mekanizmalarının doğrultu, eğim ve atım açılarında küçük farklar olsa da genellikle her deprem için elde edilen üç odak mekanizmasının da birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Bölgedeki hız yapısını yüksek çözünürlüklü olarak temsil eden bir kabuk modeli ile azimutal dağılımın iyi olmadığı istasyon kayıtlarıyla mikro depremlerin moment tensör analizlerinin başarıyla uygulanabileceği görülmüştür. Gerilme analizi sonucunda  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  asal gerilme eksenlerinin konumu sırasıyla 277.2/42.8, 87.7/46.7 ve 182.9/4.7 (azimut/dalim) olarak bulunmuştur. Bölgedeki gerilme oranı ise 0.60 olarak hesaplanmıştır.

### Anahtar kelimeler

Mikro Deprem, Moment Tensör Analizi, Gerilme Analizi, Ganos Fayı, ISOLA

### Öne Çıkanlar

- \* Mikro depremlerin moment tensör analizi
- \* Azimutal dağılımı iyi olmayan sismik ağı ait kayıtların moment tensör analizi
- \* Kabuk modellerinin yakın ve mikro depremlerin moment tensör çözümlerine etkisi

### Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 25.10.2021  
Düzeltilme: 27.11.2021  
Kabul: 08.12.2021  
Basım: 31.12.2021

### DOI

10.46464/tdad.1014479

### Sorumlu yazar

Burçin Didem Tamtaş

Eposta:

burcin.tamtas@iuc.edu.tr

## Moment Tensor Analysis and Stress Analysis of Microearthquakes Occurred Between Ganos Fault and Tekirdag Basin

Burcin Didem Tamtaş<sup>1</sup>, Esref Yalcinkaya<sup>1</sup> and Ethem Gorgun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> İstanbul University-Cerrahpaşa, Engineering Faculty, Department of Geophysics, İstanbul, Turkey  
ORCID: 0000-0001-7713-5067, 0000-0003-0593-0656, 0000-0002-4563-3296

### ABSTRACT

In this study, moment tensor analyses of microearthquakes recorded with the MONGAN-1 and MONGAN-2 seismic networks deployed on the Ganos Fault are done. The MONGAN-1 seismic network consists of 40 short-period stations located in a local area of approximately 10 km<sup>2</sup>, and the general feature of the earthquakes used is that they are out of the network. The effect of the azimuthal coverage of the seismic network, behaving like a point receiver covering a narrow azimuthal range for moment tensor analysis of microearthquakes, is investigated. For this purpose, 61 microearthquakes with magnitudes varying between  $1.5 \leq M_w \leq 3.7$ , occurred between October 2017 and June 2020 in the region between Tekirdağ Basin and Ganos Fault, are analyzed. Broadband national network records of 10 earthquakes with magnitudes ranging between  $2.8 \leq M_w \leq 3.7$  are used to determine the focal mechanisms using both moment tensor inversion and P wave first motion polarities techniques and then are compared with the MONGAN network's solutions. Although there are minor differences in the strike, dip and rake angles of the focal mechanisms obtained, it is observed that the three focal mechanism analysis results are generally compatible with each other. Although the azimuthal coverage of the seismic network is not good, moment tensor inversions of the microearthquakes can be successfully applied with an accurate crustal model. As a result of the stress analysis, the principal stress axes orientations of  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  and  $\sigma_3$  are obtained as 277.2/42.8, 87.7/46.7 and 182.9/4.7 (azimuth/dip), respectively. The stress ratio in the region is calculated as 0.60.

### Keywords

Microearthquake, Moment Tensor Inversion, Stress Tensor Inversion, Ganos Fault, ISOLA CMT Software

### Highlights

- \* Moment tensor inversions of the microearthquakes
- \* Moment tensor inversions of the seismograms of the seismic network with poor azimuthal coverage
- \* Effects of the crustal models on the moment tensor inversions of the near and microearthquakes

### Manuscript

Research Article

Received: 25.10.2021  
Revised: 27.11.2021  
Accepted: 08.12.2021  
Printed: 31.12.2021

### DOI

10.46464/tdad.1014479

### Corresponding Author

Burçin Didem Tamtaş

Email:

burcin.tamtas@iuc.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Depremlerin odak mekanizması çözümleri kullanılarak depreme neden olan faylanmanın türü, fay düzleminin doğrultusu, eğimi ve fay düzlemi üzerindeki kaymanın yönü belirlenebilir. Faylanmayla ilgili elde edilen bu parametreler sayesinde bölgenin tektoniği ve gerilme rejimi hakkında bilgi sağlanır. Odak mekanizması çalışmalarında kullanılan depremlerin büyüklükleri, tüm dalga formu modellemesi yöntemi sayesinde mikro deprem büyüklüğüne kadar inmektedir. Deprem oluş sayısı ve deprem büyüklüğü açısından bir değerlendirme yapıldığında mikro deprem etkinliğinin çok fazla sayıda olması, odak mekanizması çalışmaları için mikro depremleri zengin bir veri kaynağı yapar. Literatürde küçük depremlerin odak mekanizmalarının moment tensör analizi yöntemiyle elde edildiği çalışma sayısı son yıllarda giderek artmaktadır (Ardeleanu ve diğ. 2005, Benetatos ve diğ. 2013, Carvalho ve diğ. 2016, Fojtikova ve diğ. 2010, Barros ve diğ. 2014, Villegas ve diğ. 2016). Ancak mikro depremlerin odak mekanizmalarını belirlemek için yaygın olarak kullanılan P dalgası ilk hareket yönleri ve tüm dalga formunu kullanan moment tensör çözüm yöntemlerinin başarısı koşullara bağlı olarak değişmektedir. İstasyon sayısının yetersiz olduğu bölgelerde ya da az sayıda kayda sahip mikro depremlere ait verilerle P dalgası ilk hareket yönlerinden odak mekanizmalarını belirlemek oldukça güçtür. Ayrıca bu yöntemde filtresiz veriden polarite okuması yapıldığı için verinin sinyal gürültü oranının yüksek olması çok önemlidir. Ancak deprem büyüklüğü küçüldükçe sismogramlarda sinyal gürültü oranı azalmakta ve polarite okumaları güç hale gelmektedir. Moment tensör analizi yöntemi ise tüm dalga formunu kullanan bir yöntem olduğu için azimutal dağılımın iyi olmadığı yerlerde, tek istasyon 3 bileşen kaydıyla bile mikro depremlerin odak mekanizmasının belirlenmesine imkan verir (Fojtikova ve Zahradnik 2014, Kumar ve diğ. 2015b). Mikro depremler yapıları gereği yüksek frekans içeriğine sahip sinyaller üretirler. Dolayısıyla bu depremlerin doğru modellenmesi, sentetik olarak üretilebilecek yüksek frekans içeriğine bağlıdır. Bu konuda en büyük etken yüksek çözünürlüklü kabuk modelinin varlığıdır. Moment tensör analizi yöntemi ile yüksek frekans içeriğine sahip mikro depremler modellenebilmektedir (Ardeleanu ve diğ. 2005, Fojtikova ve diğ. 2010).  $M_w=0.3$  büyüklüğündeki depremlerin bile yüksek frekanslarda moment tensör analizi başarılı bir şekilde yapılabilmektedir (Benetatos ve diğ. 2013). Ancak yüksek frekans içeriğine sahip depremler, sentetik dalga formlarınının üretilmesinde kullanılan kabuk hız yapısına büyük depremlere kıyasla daha duyarlıdır. Moment tensör analizlerinin başarısı esasen hız modelinin doğruluğuna bağlıdır (Robertson 2008). Bölgenin hız yapısını gerçeğe yakın bir şekilde temsil eden hız modelleri kullanılarak hesaplanan Green's fonksiyonları sayesinde deprem odağı ve alıcı istasyonlar arasındaki sismik dalgaların seyahat zamanları doğru şekilde hesaplanabilir. Böylece Green's fonksiyonları kullanılarak üretilen sentetik dalga formları da gözlemsel dalga formlarıyla uyumlu olarak üretilmiş olur ve moment tensör analizlerinin de başarıyla yapılmasını sağlar.

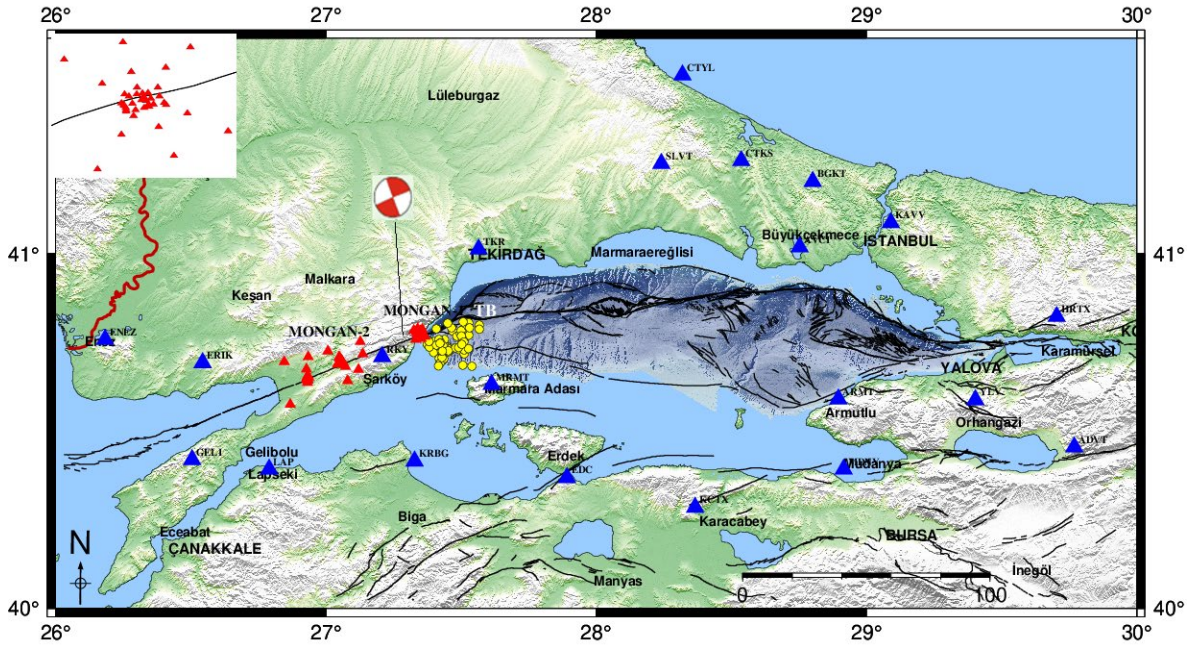
Mikro depremlerin odak mekanizması çözümleri sadece tektonik özelliklerin keşfedilmesi açısından değil, aynı zamanda gaz ve petrol sondajı sırasında rezarvuardaki sıkışma, jeotermal üretim çalışmaları, madencilik ve şeyl gazı çıkarma faaliyetleri sırasındaki hidrolik kırılma nedeniyle mevcut fayların harekete geçmesi sonucu indüklenen mikro depremselliğin araştırılması açısından da önemlidir (Chan ve Zoback 2007, Li ve diğ. 2011, Miyazawa ve diğ. 2008, Sarkar 2008). İndüklenen mikro depremlerin odak mekanizmalarının belirlenmesinde de benzer nedenlerle P dalgası ilk hareket yönleri yerine moment tensör analizi yöntemi tercih edilir (Abd el-aal ve diğ. 2021, Guilhem ve diğ. 2014, Li ve diğ. 2011, Yu ve diğ. 2018).

Bu çalışmada Ganos Fayı üzerinde kurulan, MONGAN sismik ağı ile kaydedilmiş yakın ve yüksek frekans içerikli mikro depremlerin moment tensör analizleri yapılmıştır. MONGAN-1 sismik ağı fay zonu üzerinde yaklaşık  $10\text{km}^2$ 'lik bir alan içinde 40 adet kısa periyot (1Hz ve 4.5Hz sensörler) istasyondan oluşur (Şekil 1). Kullanılan mikro depremler GF ile Tekirdağ Baseni arasında meydana gelen ve Batı Marmara Denizi'nin ağırlıklı depremselliğini oluşturan, büyüklüğü  $1.5 \leq M_w \leq 3.7$  arasında değişen depremlerdir. MONGAN istasyonlarının çok lokal bir alanda toplanması nedeniyle kullanılan depremlerin tamamı ağ dışı depremlerdir ve ağ

istasyonları çok dar bir azimut aralığı içinde kalarak adeta bir nokta alıcı gibi davranırlar. Buna karşın, çok sayıda istasyon yüksek sinyal/gürültü oranına sahip kayıt seçmeye imkan verir. Literatürde bu bölgede meydana gelen  $3.0 \leq M_w \leq 4.6$  arasında değişen küçük ve orta büyüklükteki depremlerin moment tensör analizlerinin yapıldığı ve bölgesel gerilme yönlerinin belirlendiği çalışmalar mevcuttur (Orgulu 2011, Pinar ve diğ. 2003). Aynı zamanda P dalgası ilk hareket yönlerinden faydalanarak bölgede meydana gelen büyüklüğü  $2.0 \leq M_w \leq 4.4$  arasında değişen küçük ve orta büyüklükteki depremlerin odak mekanizmalarının belirlendiği çalışmalar da bulunmaktadır (Coskun 2021, Korkusuz 2012). Çalışmada, literatürden farklı olarak bölgede meydana gelen  $M_w \leq 2.5$  büyüklüğündeki depremlerin de moment tensör çözümleri yapılmıştır. Böylece zengin veri kaynağı olan mikro depremlerin bölgedeki faylanma rejiminin belirlenmesine ek katkı sağlaması ve çok küçük büyüklüklerdeki mikro depremlerin moment tensör analizi çözümlerinin doğruluğunun denetlenmesi amaçlanmıştır. Farklı yöntemler ve farklı veri setleri kullanarak elde edilen odak mekanizması çözümlerinin karşılaştırılması, çözümlerde ve kaynak parametrelerinde bir değişiklik olup olmadığının denetlenmesi için; kısa periyod verilerin moment tensör analizleri ile elde edilen odak mekanizması çözümleri, ulusal ağ geniş bant verilerinin P dalgası ilk hareket yönlerinden ve moment tensör analizlerinden elde edilen odak mekanizmaları ile karşılaştırılmıştır.

## 2. BÖLGENİN SİSMOTEKTONİĞİ

Ganos Fayı, Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun (KAFZ) en batı ucunda yer alır. KAFZ'nin Ketin (1948) tarafından aktif sağ yanal doğrultu atımlı fay olarak tanımlanmasının ardından Pavoni (1961), Ganos fay sistemini (GF) KAFZ'nin kuzey kolu olarak tanımlamıştır. GF, Marmara Denizi'nin batısını ve Kuzey Ege Çukurunu kapsayan bir fay sistemidir. Bu faylar, genellikle karada doğrultu atım ve denizde oblik fay özelliği gösterirler (Yaltırak 1996, Yaltırak ve diğ. 1998). Ganos Bölgesi genellikle sağ yanal doğrultu atımlı hareketlerle karakterizedir (Başarı 2011). KAFZ'nin kuzey kolu ile Kuzey Ege Çukuru arasındaki bağlantıyı temsil eden GF'nin doğusunda, Marmara Denizi'nin altındaki en derin üç yapıdan biri olan Tekirdağ Baseni yer alır (Janssen ve diğ. 2009, Okay ve diğ. 2004). GF, doğuda Tekirdağ Havzası'ndan batıda Semadirek Adası'na kadar uzanır ve Gaziköy ilçesi ile Saros Çukuru'ndan geçer (Armijo 1999, Karabulut ve diğ. 2006, Seeber ve diğ. 2004). GF'nin önemine rağmen, Ganos Bölgesi'nin fay yapısı ve depremselliği hala iyi bir şekilde tanımlanmamıştır (Tuysuz ve diğ. 1998, Okay ve diğ. 1999, Okay ve diğ. 2004, Seeber ve diğ. 2004, Altunel ve diğ. 2004, Armijo ve diğ. 2005). 9 Ağustos 1912  $M_w=7.4$  (Şekil 1) Şarköy-Mürefte Depremi bu bölgede ve KAFZ'nin KAFZ'nin batı ucunda meydana gelen son büyük depremdir (Aksoy ve diğ. 2010, Ambraseys ve Jackson 1998; 2000, Janssen ve diğ. 2009). Armijo ve diğ. 2005, deniz tabanı gözlemlerine dayanarak 1912 deprem kırığının Marmara Denizi'ne kadar uzandığını ileri sürmüşlerdir. Batı Marmara Denizi'nin depremselliğine bakıldığında deprem aktivitesinin özellikle Marmara Adası'nın kuzeybatısı ve Tekirdağ Havzası'nda yoğunlaştığı görülür (Janssen ve diğ. 2009).



Şekil 1: MONGAN-1, MONGAN-2(kırmızı üçgenler), Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (KRDAE-BDTİM) sismik istasyonları (mavi üçgenler), Analizleri yapılan depremlerin lokasyonları (sarı daireler), 1912 Şarköy-Mürefte Depreminin odak mekanizması (kırmızı plaj topu, Tekirdağ Baseni (TB). (Emre ve diğ. 2013; 2018).

### 3. VERİ

Moment tensör ters çözüm analizlerinde TÜBİTAK Uluslararası İkili İş birliği projesi kapsamında “Ganos fayı üzerindeki 1912 depremi kırığının güncel etkinliğinin görüntülenmesi” amacıyla kurulan MONGAN-1 (Monitoring Ganos) ve MONGAN-2 sismik ağı tarafından kaydedilen kısa periyod deprem verileri kullanılmıştır (Şekil 1). Elde edilen sonuçların karşılaştırmasını yapmak için ise Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü sismik ağı tarafından kaydedilen geniş bant deprem verileri, moment tensör analizi ve P dalgası ilk hareket yönlerinden elde edilen odak mekanizması çözümlerinde kullanılmıştır (Şekil 1).

MONGAN-1 ve MONGAN-2 sismik ağı (Şekil 1) Ganos Fayı üzerine kurulan 10 adet 4.5 Hz’lik jeofon Cube kayıtcı ve 30 adet 1 Hz’lik sismometre EDL kayıtcıdan oluşmaktadır. Ekim 2017-Temmuz 2019 tarihleri arasında kayıt yapan MONGAN-1’de iki istasyon arasındaki en kısa mesafe yaklaşık 25 metre ve en uzak mesafe ise yaklaşık 4 km’dir. Fay zonu baş dalgalarını araştırmak amacıyla istasyonlar birbirlerine yakın mesafelerde konumlandırılmıştır. Temmuz 2019-Haziran 2020 tarihleri arasında kayıt yapan MONGAN-2 ağı ise daha geniş istasyon aralığı dağılımına sahiptir. MONGAN ağlarının özellikle ağı dışında meydana gelen depremler için azimutal dağılımları iyi değildir, ancak yüksek sinyal gürültü oranına sahip deprem kayıtları ile mikro depremlerin analizine olanak sağlamışlardır.

### 4. YÖNTEM

Depremlerin odak mekanizmalarını hesaplamak için deprem esnasında ortaya çıkan sismik dalgaların yayılım ve hareketlerinden yararlanarak geliştirilmiş birçok yöntem mevcuttur. Bu çalışmada odak mekanizmalarını belirlemek için deprem sırasında kaydedilen sismik dalga formlarının tamamını kullanan moment tensör analiz yöntemi kullanılmıştır. Farklı veri seti kullanılarak elde edilen çözümlerin karşılaştırmasını yapmak için P dalgalarının ilk hareket yönlerinden de odak mekanizması çözümü yapılmıştır.



#### 4.1) Moment Tensör Analizi

Moment tensör analizi yöntemi, depreme neden olan sismik kaynağın kuvvet çiftlerinden oluşan bir tensör ile temsil edilmesini sağlar (Stein ve Wysession 2003, Udias ve Buforn 1996). Gözlemsel sismogramların ters çözümü ile faylanma parametrelerinin hesaplanmasına olanak sağlar (Kılıç ve Utkucu 2012). Bu çalışmada, Sokos ve Zahradnik (2008) tarafından geliştirilen ISOLA programı kullanılmıştır. Program, Fortran programlama dilinde yazılmış olup Matlab üzerinde çalışmaktadır. Tüm dalga formunu kullanan ISOLA, Green fonksiyonlarını Bouchon (1981)'in ayırık dalga sayısı yöntemiyle hesaplayarak Kikuchi ve Kanamori (1991)'nin telesismik olaylar için geliştirdiği yöntemin bölgesel ve yerel olaylarda kullanılmasını sağlar (Kılıç ve Utkucu 2012). Kikuchi ve Kanamori (1991) algoritmasında yapay sismogramlar 6 tane temel moment tensör elemanı ile hesaplanır. Bunların 5 tanesi ikili kuvvet çiftinden (DC) oluşurken 6'ncısı da hacimsel değişimi ifade eder (Şekil 2). Kaynak-istasyon kombinasyonları (x,y) için temel moment tensör ve Green tensörün konvolüsyonundan oluşan 6 tane 3 bileşen temel sismogram hesaplanır (Denklem 1).

$$G_i(x, y, t), i = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

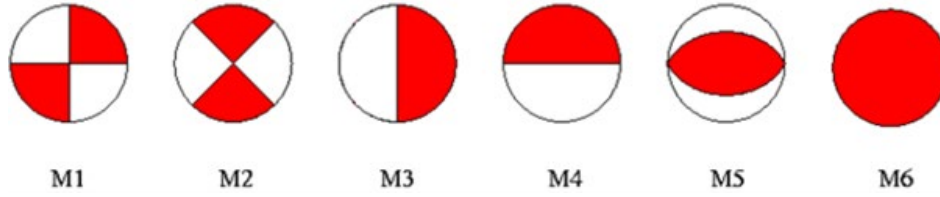
şeklinde gösterilir. Bir moment tensör nedeniyle oluşan sismogram, Denklem 2'deki gibi temel sismogramların ( $G_i$ ) lineer kombinasyonundan oluşur:

$$d(x, y, t) = \sum_{i=1}^6 a_i G_i(x, y, t) \quad (2)$$

Buraki  $a_i$ , moment tensör ve skaler moment ( $M_0$ ) ile ilişkilidir.

$$d = G \cdot a \quad (3)$$

şeklinde matris olarak gösterecek olursak burada  $d$ ,  $N$  tane istasyona ait dalga şekli matrisidir (Denklem 3). Matrisin her kolonu temel sismogramları içerir ve  $a$  ise katsayılarından oluşan bir kolon matristir. Özetle moment tensör analizi, bir lineer ters çözüm problemidir. Ters çözüm işleminde  $d$ : veri matrisini,  $G$ : hesaplanmış Green fonksiyonlarını ve  $a$ : parametre matrisini ifade eder. Hacimsel değişimin olmadığı durumlarda  $a_6=0$  olur ve parametre matrisi 5 elemana düşer. Bu durumda çözüm, "deviatorik moment tensör" olarak adlandırılır. Sonuçların ikili kuvvet çifti (DC) şeklinde verilmesi için moment tensör matrisinin determinantı sıfır olarak kabul edilir. Bu durumda çözüm, "sınırlandırılmış DC moment tensör" olarak adlandırılır. Eğer  $N \gg 6$  ise tek bir çözüm yoktur. Bu durumda en küçük kareler yaklaşımı ile çözüm yapılır. En küçük kareler yönteminin artık hatasının minimum olduğu kaynak pozisyonu ve zamanı aranır (Irmak ve diğ. 2020, Zahradnik ve Sokos 2018). Çeşitli derinlikler için ters çözüm yinelemesi yaparak moment tensör parametreleri hesaplanır. Gözlemsel ve sentetik sismogram arasındaki farkın minimum ve korelasyonun maksimum olduğu çözümler tercih edilir. ISOLA yazılımı, gözlemsel veriye en iyi uyumu veren nokta kaynak konum ve zamanının, kullanıcı tarafından tanımlanan değerleri için kareler araştırmasıyla bulunmasına da olanak tanımaktadır. Moment tensör analizi, çoklu kaynak tanımlamasına dayandığından her bir kaynak için ayrı çözüm bulunur (Kılıç 2009). Elde edilen çözümlerin güvenilirliği ve doğruluğu, Koşul Sayısı (CN), Varyans Azalımı (VR), odak mekanizması çözümünün kaynak konumu-zamana bağlı korelasyonunu gösteren odak mekanizması değişim indeksi (Focal Mechanism Variability Index-FMVAR), konum ve zaman korelasyonunun boyutunu veren Konum-Zaman değişim indeksi (Space-time variability index-STVAR) parametreleri ile denetlenir (Sokos ve Zahradnik 2013). Kararlı, güvenilir ve doğru bir çözüm için  $VR > 0.40$ ,  $CN < 10$ ,  $FMVAR < 30$ ,  $STVAR > 0.30$  olmalıdır.



Şekil 2: Yapay sismogramların hesaplandığı temel odak mekanizmaları (Kikuchi ve Kanamori 1991)

#### 4.2) P Dalgalarının İlk Hareket Yönünden Odak Mekanizmasının Belirlenmesi

P dalgalarının ilk hareketlerinden deprem odağındaki hareketin özellikleri belirlenebilir. Deprem odağından çıkıp sismik istasyonlara ulaşan P dalgalarının ilk hareket yönlerinin bazıları odaktan dışarı yani istasyona doğru bazıları ise istasyondan odağa doğrudur. Hareket yönlerinin yerküre yüzeyindeki yerleşimleri, biri odaktan geçen fay düzlemi ve diğeri yine odaktan geçip bu düzleme dik olan başka düzlemin oluşturduğu genişleme ve sıkışma kadranslarına göreir. İlk hareketin yönü odağa doğru ise genişleme, odaktan dışarı doğru ise sıkışma bölgesinde yer alır (Kalafat 1995). İki sıkışma ve iki genişleme bölgesinden oluşan kadransları birbirinden fay düzlemi ve yardımcı düzlem ayırır (Stein ve Wysession 2003). Çalışmada zSacWin Programı ile P dalgası ilk hareket yönlerinden odak mekanizmaları belirlenmiştir (Yilmazer 2003).

#### 4.3) Stres Tensörü Ters Çözüm Analizi

Depremlerin odak mekanizmalarından tektonik stres veya asal gerilme eksenlerinin yönelimlerini ve stres oranını belirlemek için birçok yöntem mevcuttur. Çalışmada bu yöntemlerden biri olan Michael metodu kullanılmıştır (Michael 1984;1987). Yöntem, üç ana gerilme eksenini ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$ ) ve odak mekanizmalarına en uygun gerilme tensörünü bulmaya yarar (Mutlu 2020). Gerilme tensörü, üç ana gerilme ekseninin kombinasyonudur. Bunlardan;  $\sigma_1$ , maksimum sıkışma eksenini,  $\sigma_2$  orta sıkışma eksenini ve  $\sigma_3$  ise minimum sıkışma eksenidir.  $\sigma_1$  düşey olduğu zaman açılma,  $\sigma_2$  düşey olduğu zaman doğrultu-atım ve  $\sigma_3$  düşey olduğu zaman ise sıkışma rejimleri görülmektedir. Bu üç ekseninin konumlanmasına göre stres oranı (R),

$$R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1) \quad (4)$$

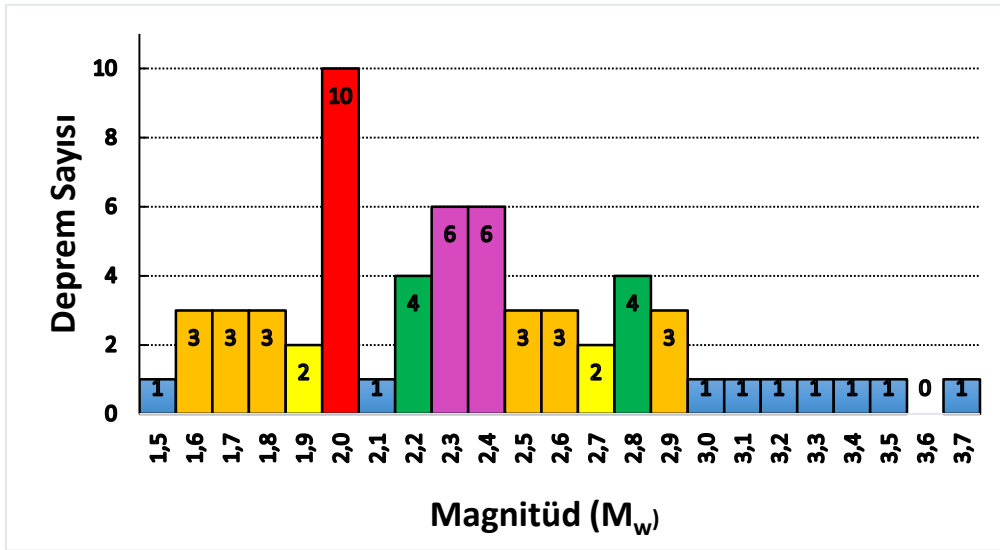
4 numaralı bağıntı ile hesaplanır ve değeri 0 ile 1 arasında değişir. R değeri, bölgede etkili olan baskın stres rejiminin bir göstergesidir.  $R=0$  ise  $\sigma_1=\sigma_2$ ,  $R=1$  ise  $\sigma_2=\sigma_3$  ve  $R=0.5$  ise  $\sigma_1>\sigma_2>\sigma_3$ 'tür (Christove ve Tspanos 2000).  $R=0.5$  ise doğrultu atımlı faylanma,  $R>0.5$  ters faylanma ve  $R<0.5$  ise normal faylanma söz konusudur. Michael Metodu, doğrusal bir ters çözüm yöntemidir. Fay düzleminin tanımlanması gerekmez. Düğüm düzlemlerinden fay düzlemini seçmek için bootstrap yeniden örnekleme yöntemini kullanır (Delvaux ve Barth 2010). Çalışmada stres ters çözüm analizi için Vavrycuk (2014) tarafından geliştirilen, Michael metoduna dayanan STRESSINVERSE programı kullanılmıştır. Matlab üzerinde çalışan ve yinelemeli stres ters çözümü yapan program ile ana gerilme eksenleri ve bölgesel stres oranı (R) belirlenmiştir.

## 5. BULGULAR

Azimutal dağılımı iyi olmayan bir sismik ağa ait kayıtlar kullanılarak azimutal boşlukların, yakın mikro depremlerin moment tensör çözümlerine etkisi değerlendirilmiştir. Çalışmada, Ekim 2017-Haziran 2020 tarihleri arasında Ganos Fayı'nın doğusunda, Tekirdağ Baseni ve Marmara Adası arasında meydana gelen mikro depremlerin ISOLA programı ile moment tensör çözümleri yapılmıştır. MONGAN-1 ve MONGAN-2 sismik ağları tarafından kaydedilen sinyal gürültü

oranı yüksek, 61 adet deprem kaydı kullanılmıştır. Büyüklüğü  $1.5 \leq M_w \leq 3.7$  arasında değişen depremlerin deprem büyüklüğü ve deprem sayısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik incelendiğinde %69'unun büyüklüğünün  $M_w \leq 2.5$  olduğu görülmektedir (Şekil 3).

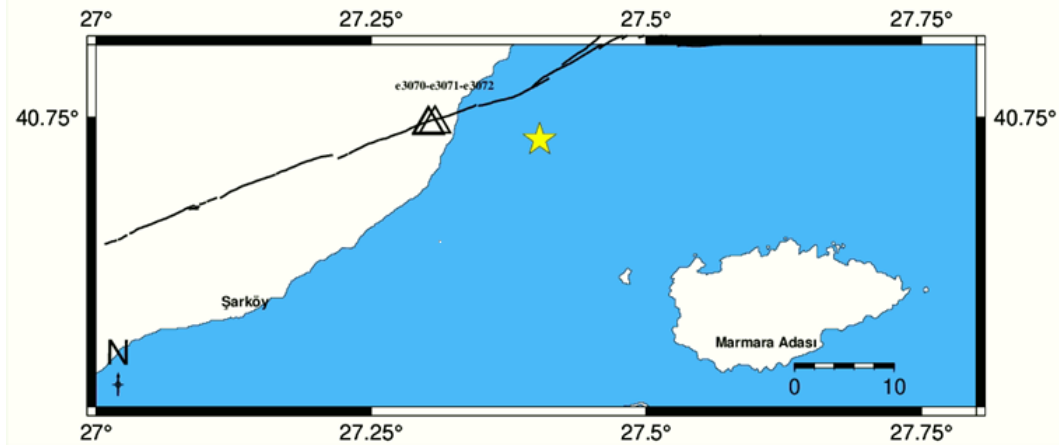
Analizde kullanılan depremlerin lokasyon, büyüklük ve derinlik bilgileri T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) ve KRDAE-BDTİM'e ait ulusal deprem kataloglarından elde edilmiştir. En az üç istasyonda kaydedilmiş, sinyal gürültü oranı yüksek kayıtlara sahip depremler seçilmiştir. Depremlerin Şekil 1'de yer alan episantr dağılımları incelendiğinde, MONGAN-1 ağı kayıtları için en yakın epicenter uzaklığı 4 km ve en uzak epicenter uzaklığı 20 km'dir. MONGAN-2 sismik ağı istasyonlarının deprem lokasyonlarına olan en yakın mesafesi ise yaklaşık 22 km'dir.



Şekil 3: Çalışma alanında Ekim 2017-Haziran 2020 tarihleri arasında meydana gelen depremlerin büyüklük ve sayı grafiği

Yakın episantr uzaklığındaki mikro ve küçük depremler kabuk modeline oldukça duyarlıdır (Zahradnik ve Sokos 2018). Bölgeyi temsil eden en iyi kabuk modelinin seçilmesi doğru çözümler elde etmek açısından çok önemlidir. Özellikle MONGAN-1 ağı gibi yoğun, azimutal dağılımı iyi olmayan ve deprem episantrlarına uzaklığı <20 km olan sismik ağlar için kabuk modelinin çözümler üzerindeki etkisinin araştırılması gerekir. Bu nedenle özellikle MONGAN-1 sismik ağıyla kaydedilen yakın, mikro depremlerin analizlerinde hangi kabuk modelinin kullanılacağını belirlemek için bölge çalışmalarında yoğun olarak kullanılan Kalafat ve diğ. (1987), Özalaybey ve diğ. (2002), Akyol ve diğ. (2006), Karabulut ve diğ. (2011) ve Yamamoto ve diğ. (2015) kabuk hız modelleri kullanılarak moment tensör analizleri test edilmiştir. Şekil 4'te kabuk modeli analizi için kullanılan depremlerden biri olan 25 Ekim 2017 tarihinde 40.7255 K enlemi ve 27.3911 D boylamında meydana gelen  $M_w=3.4$  büyüklüğündeki depremin episantrı görülmektedir.





Şekil 4: Deprem episantrı (sarı yıldız) ve analizde kullanılan istasyonlar (siyah üçgen)

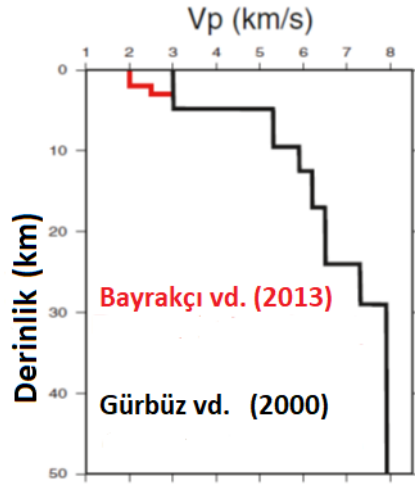
MONGAN-1 sismik ağı tarafından kaydedilen en az 3 istasyona ait sismogramlar kullanılarak beş farklı kabuk modeli ile ayrı ayrı moment tensör çözümü yapılmıştır. Ters çözüm frekans aralığı, sinyal gürültü oranının ve depremin enerjisinin yüksek olduğu 1.1-2.5 Hz'dir. Tüm kabuk modelleri için aynı frekans aralığı kullanılmıştır. Depremin beş farklı kabuk modeli ile yapılan moment tensör analizi sonuçlarından elde edilen çözüm parametreleri (Tablo 1) (VR, CN, FMVAR, STVAR) incelendiğinde tüm kabuk modellerinin CN parametresi hariç, güvenilir sonuç için gerekli olan  $VR > 0.40$ ,  $FMVAR < 30$ ,  $STVAR > 0.30$  koşullarını sağladığı görülmektedir.

Tablo 1: Kabuk modeli seçmek için yapılan analizlerden bir örnek (TÇFB: Ters Çözüm Frekans Bandı,  $\phi$ : Doğrultu Açısı-derece,  $\delta$ : Eğim Açısı-derece,  $\lambda$ : Kayma Açısı-derece)

Kabuk Modeli	$M_w$	TÇFB(Hz)	VR	CN	FMVAR	STVAR	DC (%)	CLVD (%)	$\phi$	$\delta$	$\lambda$
Kalafat ve diğ. (1987)	3.5	1.1-2.5	0.60	27.9	5±5	0.01	86.2	13.8	300/50	66/53	-41/-150
Ozalaybey ve diğ. (2002)	3.6	1.1-2.5	0.65	29.6	11±12	0.01	91.8	8.2	298/42	74/50	-42/-159
Akyol ve diğ. (2006)	3.6	1.1-2.5	0.66	37.6	7±7	0.01	94.9	5.1	298/45	72/48	-45/-155
Karabulut ve diğ. (2011)	3.8	1.1-2.5	0.60	34.0	1±1	0.01	92.4	7.6	297/37	78/49	-42/-164
Yamamoto ve diğ. (2015)	3.4	1.1-2.5	0.80	9.8	5±6	0.02	88.6	11.4	305/44	75/60	-31/-163

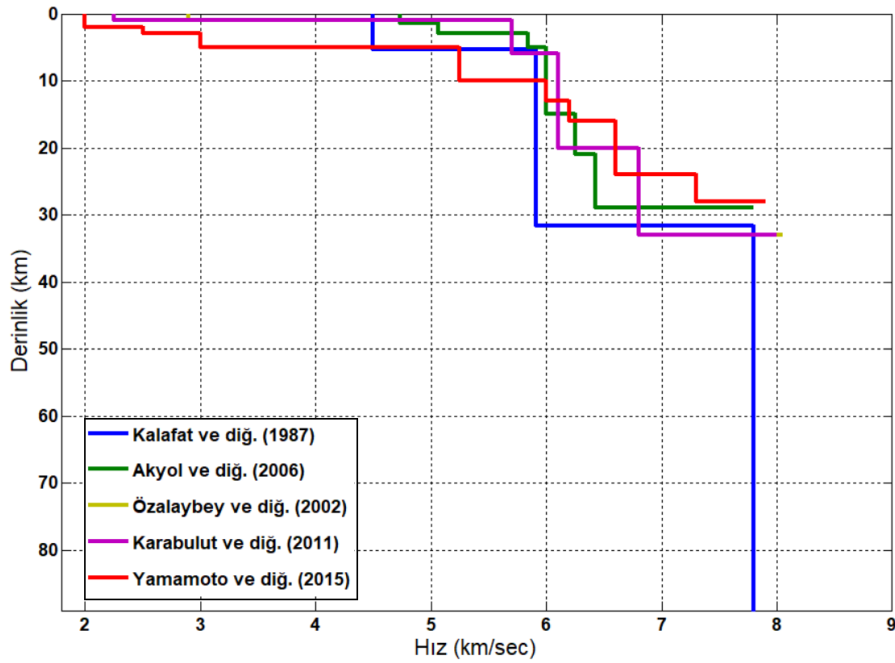
CN katsayısı, G (Green's fonksiyon) matrisine, dolayısıyla kaynak-istasyon konumları ve hız modeline bağlıdır (Stanek ve diğ. 2017). İstasyonların sismik ağıdaki konumları, hız modelindeki belirsizliklerin etkisini azalttığı için baskın bir öneme sahiptir (Sileny 2009). Ancak MONGAN-1 istasyon diziliminde olduğu gibi azimutal dağılımın iyi olmadığı ağlara ait kayıtlar analiz edilirken kabuk modelinin çözümler üzerindeki etkisi daha baskın hale gelmektedir. Bu nedenle kullanılan kabuk modelindeki hızların gerçeğe yakın, doğru hız değerleri olması çok önemlidir. Analiz edilen depremin episantr uzaklığının 8 km olduğu düşünülürse bu yüksek frekanslı depremin analizinden elde edilen CN değerlerinde kabuk modelinin etkisinin görülmesi olasıdır. Kararlı ve doğru moment tensör çözümü için  $CN < 10$  olmalıdır (Langston vd. 1982). İkili kuvvet çifti (DC) ve dengelenmiş lineer vektör dipolü (CLVD) değerleri incelendiğinde DC'in tüm kabuk modelleri için yüksek olduğu görülür. Doğrultu, eğim ve kayma açısının aksine DC% çok değişkendir (Kılıç 2009). Bu nedenle DC'in başta VR olmak üzere diğer parametrelerle birlikte değerlendirilmesi gerekir. Analizlerin sonucunda diğer koşulların yanısıra  $CN < 10$  koşulunu da sağlayan ve DC değeri de yüksek olan Yamamoto ve diğ. (2015) kabuk modeli analizlerde kullanılmak üzere seçilmiştir. Yamamoto ve diğ. (2015) kabuk

Tamtas et al. / Turkish Journal of Earthquake Research 3 (2), 167-192, December 2021  
modeli, Gürbüz ve diğ. (2000) ve Bayrakçı ve diğ. (2013) tarafından geliştirilen kabuk modellerinin kombinasyonundan oluşmaktadır (Şekil 5).



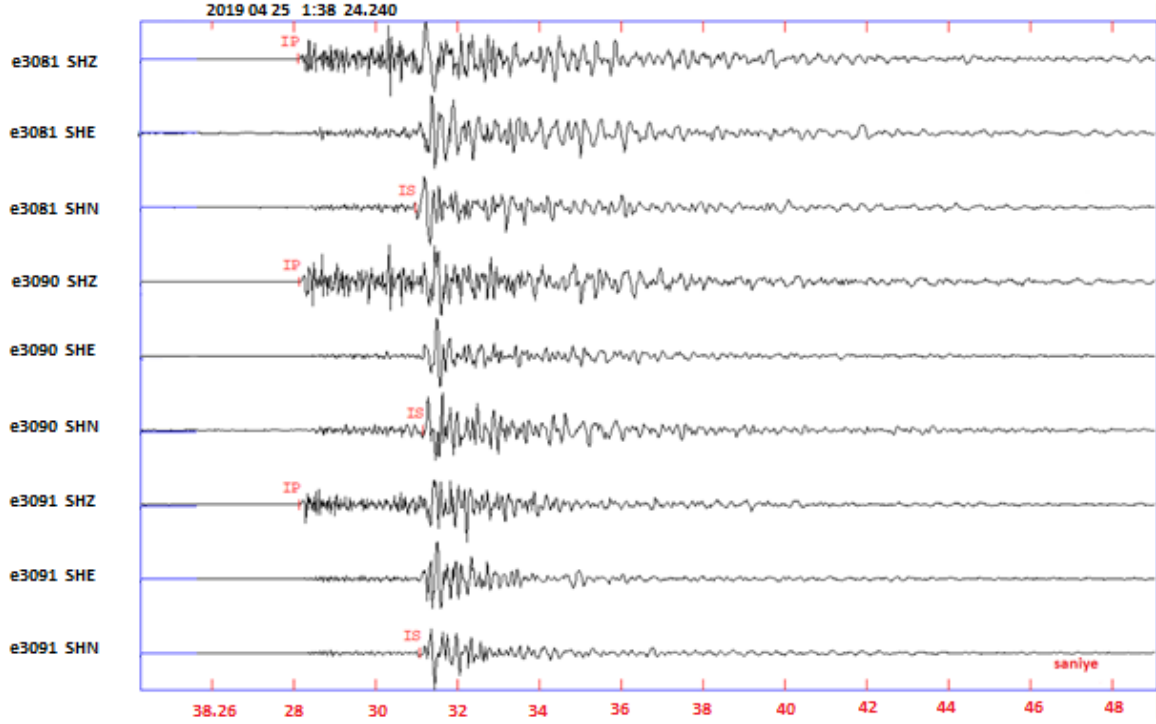
Şekil 5: Yamamoto (2015) kabuk modeli (Siyah çizgi Gürbüz vd. (2000) hız modeli ve kırmızı çizgi ise Gürbüz vd. (2000) modelinin Bayrakçı vd. (2013) modeline dayanarak modifiye edilmiş halidir.)

Yamamoto ve diğ. (2015) kabuk modeli diğer dört kabuk modeli ile karşılaştırıldığında özellikle ilk 10 km'deki sismik dalga hızlarının diğer kabuk modellerinden daha düşük olduğu görülür (Şekil 6).

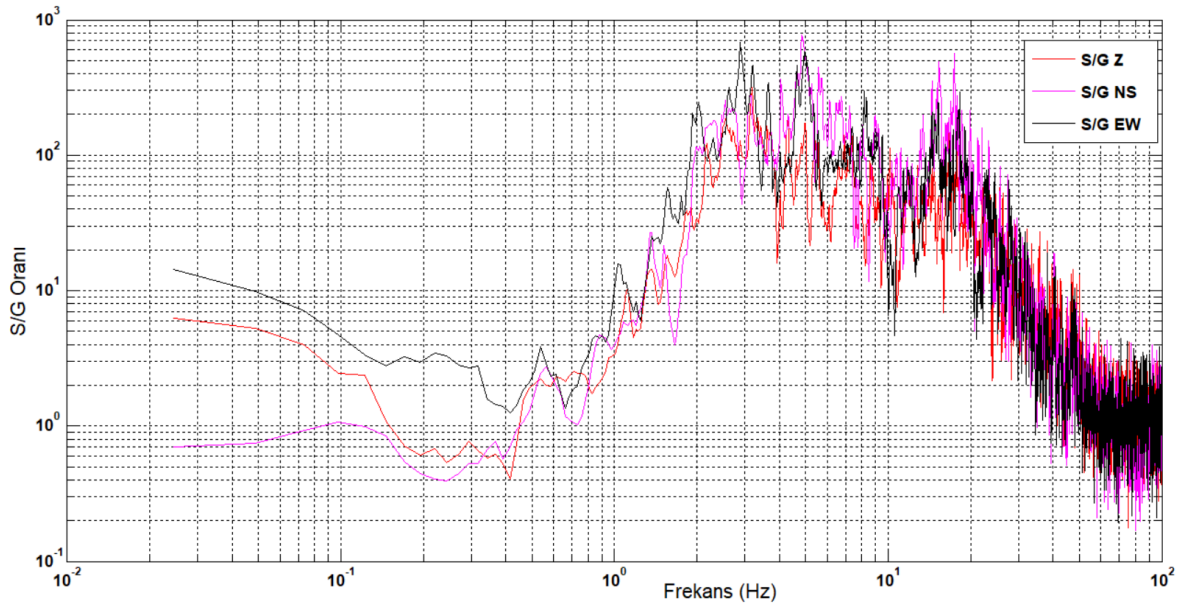


Şekil 6: Kabuk modelleri

Tüm analizlerde sinyal gürültü oranı yüksek, en az 3 istasyona ait, 3 bileşen veri kullanılmıştır. Şekil 7'de MONGAN-1 ağı ile kaydedilen, 25 Nisan 2019 tarihinde meydana gelen  $M_w=2.0$  büyüklüğündeki depremin 3 istasyon, 3 bileşen ham deprem kaydı yer almaktadır. Mikro deprem olmasına rağmen sinyal gürültü oranı yüksek bir kayıt görülmektedir (Şekil 8).

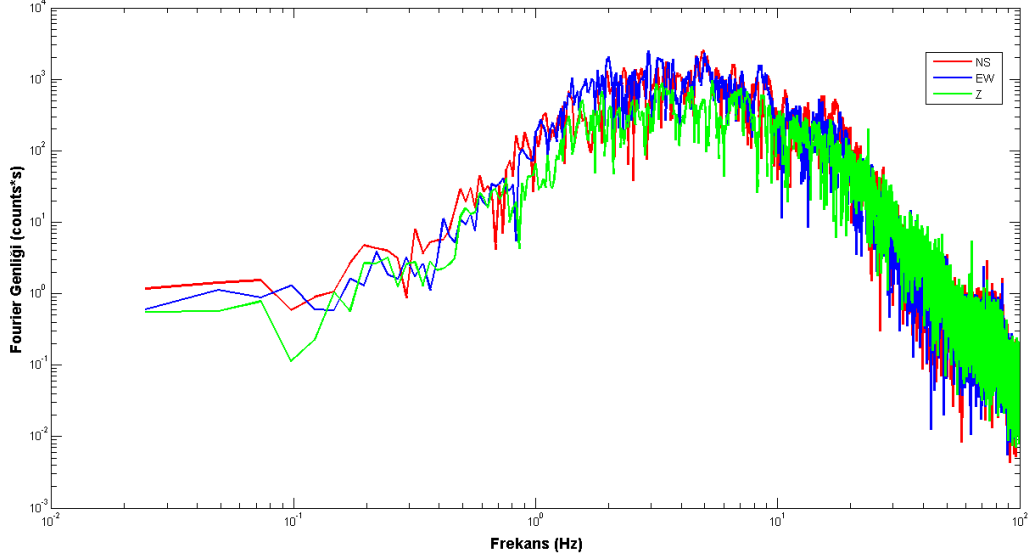


Şekil 7: 25 Nisan 2019 saat 01:38' de meydana gelen  $M_w=2.0$  büyüklüğündeki depremin 3 istasyon 3 bileşen kaydı



Şekil 8: e3091 istasyonu üç bileşen sinyal gürültü oranı

Şekil 9'da depremin moment tensör analizinde kullanılan e3091 istasyonunun üç bileşen ham verisinin hızlı Fourier transformu sonunda elde edilen frekans-genlik değerlerini gösteren grafik yer almaktadır. Bu grafik dikkate alınarak deprem enerjisinin ve sinyal gürültü oranının yüksek olduğu 2.3-3.8 Hz aralığında moment tensör çözümü yapılmış ve depremin odak mekanizması belirlenmiştir.



Şekil 9: e3091 istasyonu üç bileşen ham verisinin Fourier genliği-frekans grafiği.

ISOLA programı ile elde edilen çözüm parametreleri, gözlemsel ve sentetik sismogramların uyumu sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 11'de görülmektedir. Depremin merkez üssünün istasyonlara olan uzaklığı 15-16 km arasında ve istasyonların azimut değerleri 259 derecedir. İstasyonların birbirlerine olan uzaklıkları MONGAN-1 sismik ağının bir özelliği olarak oldukça yakındır. e3081 ile e3090 istasyonlarının arası 94 metre, e3081-e3091 arası 518 metre ve e3090-e3091 istasyonlarının arası ise 516 metredir. Bu kadar yakın konumlandırılmış ve azimutal dağılımı iyi olmayan istasyon ağının moment tensör çözümü üzerindeki etkisi denetlenmiştir. İstasyonlar arasındaki mesafenin az olması tek istasyon davranışı sergilemelerine ve Şekil 7'den de görülebileceği gibi sismik dalgaların istasyonlara hemen hemen aynı zamanda varmasına neden olmaktadır. Her ne kadar ISOLA tek istasyon ve azimutal dağılımın iyi olmadığı kayıtlarla moment tensör çözümü yapılabilse de çözüme katılan her istasyon ve bileşenin ağırlığı farklı olacağından çözümün kalitesi de artacaktır (Kumar ve diğ. 2015a; 2015b). Ayrıca ISOLA'nın üç bileşen veriden herhangi bir tanesini kullanarak da çözüm üretebildiği düşünülürse her bileşenin çözümlere katkı sağladığı söylenebilir (Irmak ve diğ. 2020). Bu nedenle moment tensör çözümleri yapılırken tek istasyon yerine en az üç istasyon kullanılmıştır.

## MOMENT TENSÖR ÇÖZÜMÜ

## İÇ MERKEZ LOKASYONU (IUC)

Oluş Zamanı: 20190425 01:38:24.00  
Enlem : 40.7653 Boylam : 27.4782 Derinlik : 12.8

## CENTROID

Denenen Kaynak Numarası: 2 ( Sabit Dış Merkez Ters Çözümü)  
Centroid Enlem (K): 40.7653 Boylam (D): 27.4782  
Centroid Derinlik (km) : 13  
Centroid Zamanı : +3.2 (s) oluş zamanına göre

Moment (Nm) : 4.820e+012

Mw= 2.06

Ters Çözüm Tipi : Deviatoric

VOL % : 0

DC %: 42

CLVD %: 58

Var. Red. ( Ters çözümde kullanılan tüm istasyonlar için ) : 0.8

SNR

CN

FMVAR

STVAR

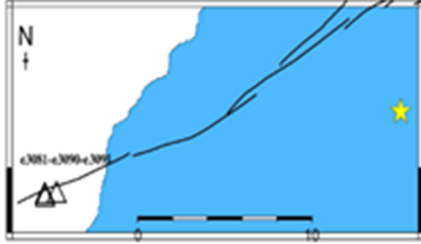
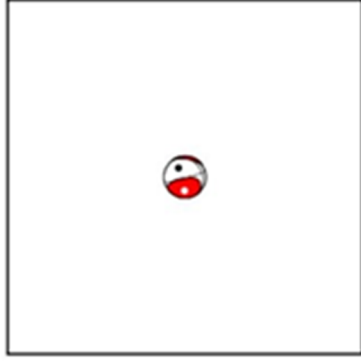
Var. Red. ( Tüm istasyonlar için ) :

NaN

7.4

5±3

0.02



Doğrultu Eğim Kayma Açısı

330 21 -15

Doğrultu Eğim Kayma Açısı

74 85 -110

P - Eksen Azimut Dalım

323 47

T - Eksen Azimut Dalım

182 36

Mrr Mtt Mpp

-0.318 2.272 -1.953

Mrt Mrp Mtp

-4.233 -0.575 -0.664

Exponent (Nm): 12

Ters çözümde kullanılan frekans bandı (Hz)

2.3 - 3.8

İstasyonlar - Kullanılan Bileşenler - Uzaklık

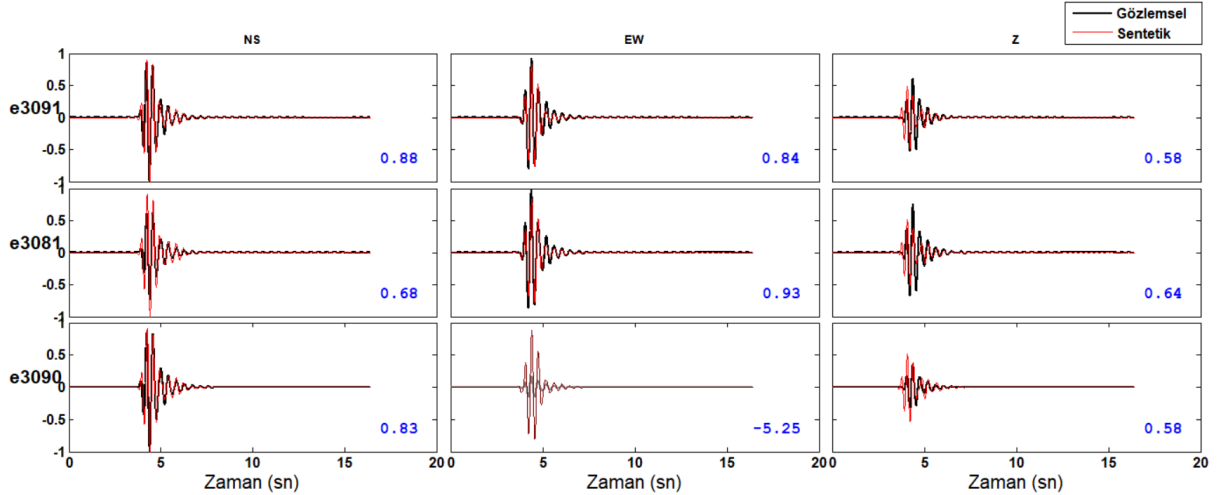
	KG	DB	Düşey	U(km)
e3091	+	+	+	15
e3081	+	+	+	16
e3090	+	-	+	16

Şekil 10: 25.04.2019 tarihinde meydana gelen  $M_w=2.0$  büyüklüğündeki depremin moment tensör çözümü parametreleri

Deprem Tarih-saat: 190425\_01\_38\_24.00 Yerdeğiştirme (m). Ters Çözüm Frekans Bandı (Hz) 2.3 - 3.8

Gri dalga formları ters çözümde kullanılmadı.

VR değerleri, mavi sayılarla gösterilmiştir.



Şekil 11: Gözlemsel ve sentetik dalga formu uyumları



Moment tensör analizlerinin kararlı, güvenilir ve doğru çözümler için  $VR > 0.40$ ,  $CN < 10$ ,  $FMVAR < 30$ ,  $STVAR > 0.30$  koşullarını sağlaması gerekir. Tablo 2'de yer alan 61 adet depreme ait moment tensör analizi sonuçları bu koşullar açısından değerlendirilmiştir. Gözlemsel ve sentetik dalga formu uyumlarını gösteren VR değerleri 0.40 ile 0.85 arasında değişmektedir. Bu değerler, güvenilir bir sonuç elde etmek için gerekli olan  $VR > 0.40$  koşulunu sağlamaktadır. Kabuk modeli ve istasyon dizilimine bağlı olan CN parametresinin  $CN < 10$  olması gerekmektedir. Çözümlerden elde edilen CN parametrelerinin 2.6 ile 9.9 arasında değişen değerler aldığı görülmektedir. Gerek sentetik ve gözlemsel dalga formlarının uyumunu gösteren VR değerlerinin yüksek olması gerekse istasyon-kaynak arasındaki mesafeye ve kabuk modeline bağlı olan CN değerlerinin istenilen aralıklarda olması azimutal dağılımın çözümler üzerinde olumsuz etkisinin kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığını göstermektedir. Aynı zamanda analizler için seçilen kabuk modelinin de bölgesel hız yapısını yüksek doğrulukla temsil ettiğinin göstergesi olarak düşünülebilir. Odak mekanizması çözümünün kaynak konumu-zamana bağlı korelasyonunu gösteren odak mekanizması değişim indeksi (FMVAR) değerlerinin hepsi 30'dan küçüktür. Konum ve zaman korelasyonunun boyutunu veren Konum-Zaman değişim indeksi (STVAR) değerleri de kararlı ve doğru bir çözüm elde etmek için gerekli olan  $STVAR \leq 0.30$  koşulunu sağlamaktadır.

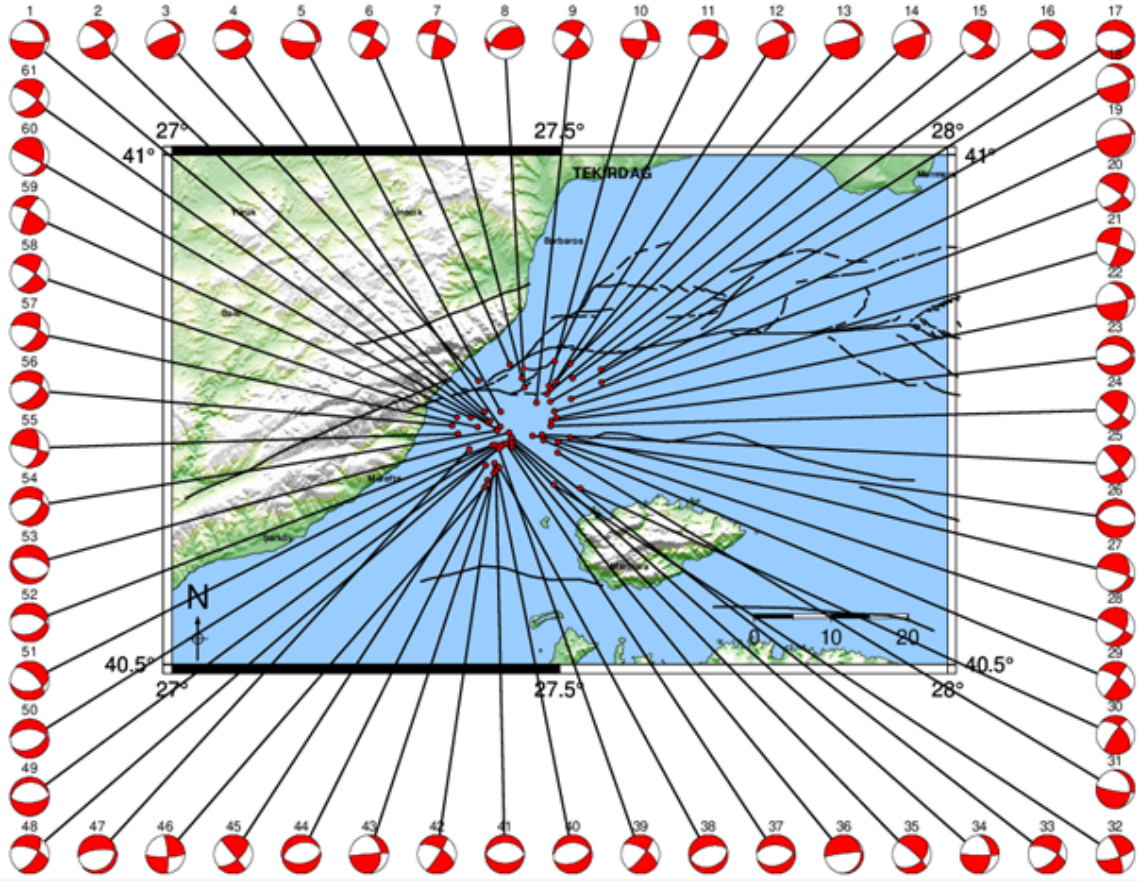
Tablo 2: MONGAN sismik ağları ile kaydedilen 61 adet depremin moment tensör analizi sonuçları ( $h$ =Centroid derinliği-km)

No	Tarih	Oluş Zamanı	Enlem	Boylam	Mw	h	TÇFB(Hz)	VR	CN	FMVAR	STVAR	$\phi$	$\delta$	$\lambda$
1	03.11.2017	04:38:29	40.7270	27.3935	1.8	7.0	1.6-3.3	0.74	3.8	16±25	0.02	339/93	26/79	-26/-114
2	21.05.2019	13:17:37	40.7360	27.3868	3.7	7.0	1.0-3.2	0.54	4.2	6±12	0.02	61/319	70/62	-150/-23
3	22.10.2017	21:15:36	40.7663	27.3786	2.0	9.0	2.0-3.5	0.48	6.1	17±25	0.01	247/356	80/27	116/21
4	29.10.2019	15:38:41	40.7210	27.4071	3.3	7.0	1.2-2.0	0.65	4.7	3±4	0.01	293/60	48/56	-48/-126
5	27.05.2019	13:14:14	40.7360	27.4075	2.2	9.0	1.4-3.6	0.58	4.5	17±24	0.02	345/94	27/80	-22/-115
6	27.10.2019	02:01:37	40.7823	27.4193	2.9	7.0	1.6-2.5	0.51	7.5	5±7	0.02	29/297	82/77	-166/-8
7	23.02.2020	23:16:23	40.7688	27.4346	2.6	9.0	1.4-2.4	0.50	7.1	1±1	0.01	195/161	82/71	161/8
8	01.04.2020	19:03:24	40.7598	27.4381	3.5	8.0	1.0-2.1	0.41	4.7	5±5	0.01	230/97	53/47	57/126
9	16.12.2018	15:37:25	40.7448	27.4533	2.3	8.0	1.0-2.0	0.43	3.0	8±10	0.02	36/302	78/70	-160/-13
10	07.10.2018	20:32:46	40.7611	27.4693	2.5	15.0	1.4-2.4	0.46	6.7	10±9	0.02	5/95	61/90	0/-151
11	09.09.2018	10:42:07	40.7856	27.4770	2.3	10.0	1.8-3.6	0.42	6.5	3±4	0.01	26/283	58/70	-156/-34
12	01.06.2019	18:52:02	40.7585	27.4718	2.6	11.0	1.3-1.8	0.71	3.6	25±25	0.03	247/346	84/36	126/11
13	25.04.2019	01:38:24	40.7653	27.4782	2.0	13.0	2.3-3.8	0.80	7.4	5±3	0.02	330/74	21/85	-15/-110
14	19.12.2018	14:02:00	40.7830	27.4973	2.8	18.0	1.4-2.4	0.47	8.3	14±25	0.02	251/357	80/32	120/18
15	09.10.2018	23:19:02	40.7535	27.4673	2.4	9.0	1.2-3.9	0.66	4.8	6±7	0.01	304/35	87/57	-33/-177
16	09.09.2018	10:05:35	40.7686	27.5000	3.0	9.0	2.4-3.9	0.65	7.6	2±3	0.01	300/63	57/50	-50/-134
17	13.05.2020	15:45:34	40.7772	27.5368	2.2	9.0	1.8-3.9	0.55	8.8	8±10	0.01	282/75	51/42	-72/-111
18	17.04.2018	02:08:25	40.7458	27.4711	2.4	15.0	1.4-3.6	0.50	7.4	3±3	0.02	333/72	33/85	-10/-123
19	07.01.2018	02:29:35	40.7646	27.5371	2.4	9.0	1.0-2.4	0.60	3.9	2±2	0.01	13/258	18/82	26/107
20	23.11.2019	21:27:34	40.7483	27.4983	2.3	9.0	1.2-3.4	0.41	7.8	1±1	0.01	305/40	82/60	-31/-171
21	16.12.2018	18:32:00	40.7361	27.4763	2.3	8.0	1.0-1.9	0.42	3.0	3±4	0.02	18/287	81/83	-173/-9
22	25.03.2018	06:26:24	40.7297	27.4795	2.5	13.0	1.4-3.0	0.53	5.7	6±5	0.02	78/342	85/40	-129/-8
23	01.12.2019	10:09:31	40.7270	27.4728	2.3	9.0	1.0-2.8	0.79	6.1	3±4	0.01	286/72	44/51	-64/-113
24	11.03.2018	07:09:41	40.7220	27.4717	2.8	10.0	1.0-1.7	0.48	4.2	7±5	0.01	129/38	88/58	32/178
25	13.05.2018	18:01:13	40.7133	27.4607	3.1	4.0	1.4-2.4	0.52	5.0	28±29	0.02	54/322	65/85	-175/-25
26	01.12.2019	03:05:04	40.7122	27.4482	2.7	9.0	1.4-2.9	0.56	8.5	1±1	0.01	262/98	33/58	-104/-81
27	21.03.2018	16:23:49	40.7107	27.4965	2.4	18.0	1.4-3.0	0.57	9.1	4±3	0.02	23/287	33/86	-173/-57
28	12.09.2018	23:53:51	40.7063	27.481	2.6	12.0	1.6-2.9	0.70	6.5	6±5	0.01	298/32	85/50	-41/-174

29	01.12.2019	02:52:32	40.7078	27.4622	3.2	9.0	1.4-2.8	0.52	8.5	2±2	0.01	35/304	88/70	-160/-2
30	15.09.2019	09:48:57	40.6605	27.5100	2.5	8.00	1.2-2.2	0.60	6.6	3±5	0.01	313/215	51/80	12/140
31	18.01.2019	11:18:02	40.6957	27.4807	2.9	13.00	1.8-3.5	0.42	6.6	1±1	0.01	350/101	26/80	-22/-114
32	11.03.2018	11:35:35	40.6641	27.4761	1.9	5.00	2.5-3.5	0.43	5.9	3±5	0.04	73/339	74/76	-166/-16
33	11.01.2020	06:34:30	40.7107	27.4218	1.6	6.00	1.1-2.1	0.51	5.0	8±9	0.01	43/296	56/67	-151/-37
34	14.01.2020	15:02:51	40.7088	27.4201	2.0	8.00	1.2-3.8	0.47	6.8	4±4	0.01	357/91	45/87	-5/-134
35	26.03.2018	13:36:20	40.7050	27.4220	1.9	9.00	1.2-3.9	0.59	3.9	3±2	0.01	312/55	79/42	-49/-163
36	11.01.2020	03:40:27	40.7012	27.4220	1.5	7.00	1.8-3.8	0.59	9.8	2±2	0.02	272/35	68/36	-60/-141
37	11.01.2020	06:57:31	40.7045	27.4145	1.8	9.00	1.2-2.8	0.85	7.6	2±2	0.02	274/73	50/42	-76/-106
38	11.01.2020	09:24:00	40.6815	27.4055	2.2	9.00	1.0-2.4	0.42	5.4	3±3	0.01	78/254	34/56	-86/-93
39	11.01.2020	04:38:18	40.6993	27.4048	2.0	9.00	1.0-2.8	0.43	6.1	5±4	0.01	302/39	63/78	-14/-152
40	11.01.2020	09:56:41	40.6795	27.4021	2.8	9.00	2.5-3.9	0.64	9.8	3±2	0.01	268/71	39/53	-76/-101
41	11.01.2020	05:33:57	40.6780	27.4011	2.8	5.00	1.0-2.4	0.77	6.8	4±3	0.01	92/268	52/38	-87/-93
42	11.01.2020	03:45:49	40.6855	27.3993	1.6	9.00	1.4-3.8	0.40	6.9	3±4	0.01	299/32	62/83	-8/-152
43	11.01.2020	05:12:17	40.6755	27.3985	2.4	8.00	1.6-3.6	0.84	9.3	5±7	0.02	265/356	89/40	130/1
44	11.01.2020	03:36:07	40.6685	27.3906	2.1	8.00	2.1-3.9	0.69	9.9	3±2	0.02	251/84	40/51	-100/-82
45	12.01.2020	12:51:20	40.6831	27.3880	2.0	9.00	1.6-3.9	0.40	8.8	4±6	0.01	141/51	90/62	28/180
46	09.10.2017	07:26:29	40.6617	27.3865	1.7	9.00	1.4-2.2	0.48	3.6	4±5	0.01	88/356	78/80	-170/-12
47	15.01.2020	03:03:19	40.6993	27.3671	2.4	9.00	2.1-3.9	0.43	9.9	4±4	0.01	263/51	70/23	-78/-119
48	11.01.2020	04:39:19	40.7043	27.4110	2.2	7.00	1.4-3.4	0.43	8.7	3±5	0.01	34/289	64/62	-149/-30
49	11.01.2020	04:42:50	40.7023	27.4087	1.7	8.00	1.4-3.4	0.57	8.6	6±5	0.01	87/263	63/27	-88/-94
50	11.01.2020	06:31:15	40.7028	27.4046	2.0	5.00	1.4-3.4	0.44	9.6	12±9	0.01	272/63	49/44	-71/-111
51	10.03.2018	09:37:23	40.7033	27.4000	1.6	6.00	1.4-2.4	0.52	2.6	14±25	0.03	314/80	60/44	-56/-135
52	11.12.2019	21:06:24	40.7031	27.3965	2.0	10.00	1.6-3.9	0.41	8.2	6±5	0.02	283/66	54/43	-66/-119
53	11.01.2020	07:49:49	40.7153	27.4183	1.7	9.00	1.1-3.9	0.52	6.6	15±18	0.02	279/114	58/33	-98/-77
54	26.11.2019	17:48:55	40.7171	27.4025	1.8	9.00	1.2-3.4	0.48	6.7	3±5	0.01	275/38	54/53	-49/-133
55	04.02.2019	18:03:49	40.7143	27.3525	2.0	7.00	2.4-3.9	0.75	5.3	8±13	0.02	283/14	89/53	-37/-178
56	11.01.2020	03:33:16	40.7223	27.3448	2.9	9.00	1.5-3.9	0.50	7.1	1±1	0.01	288/42	54/60	-38/-138
57	14.04.2018	11:45:26	40.7208	27.3775	2.7	9.00	1.4-3.0	0.45	6.9	1±1	0.01	288/31	69/60	-33/-156
58	17.02.2018	18:52:48	40.7305	27.3508	2.0	5.00	2.9-3.9	0.41	7.0	14±20	0.01	37/303	71/77	-166/-20
59	25.03.2020	19:15:07	40.7300	27.3686	2.3	9.00	1.8-3.9	0.69	9.6	6±8	0.01	207/301	77/75	165/13
60	25.12.2018	11:14:41	40.7186	27.4023	2.0	16.00	1.4-2.9	0.57	8.3	6±4	0.02	21/116	30/87	174/60
61	25.10.2017	11:05:09	40.7255	27.3911	3.4	14.00	1.1-2.5	0.80	9.9	5±6	0.02	305/44	75/60	-31/-163

Tablo 2’de yer alan depremlerin odak mekanizma topları ile gösterimi şekil 12’de görülmektedir. Depremlerin faylanma mekanizmaları incelendiğinde her üç faylanma türüne ait özellikler sundukları görülür. Aslında bu durum çalışma alanı için beklenmedik bir durum değildir. Korkusuz (2012), Ganos Fayı ile Tekirdağ Baseni arasında kalan bölgede meydana gelen depremlerin normal, ters ve doğrultu atımlı faylanma özellikleri gösterdiğini ve bölgedeki normal faylanmadan ters faylanmaya geçiş nedeniyle meydana gelen sağ yanal atımlı deformasyon sisteminde meydana geldiğini belirtmiştir. Çalışma bölgesinde KD-GB doğrultulu ters faylanma bileşenine sahip oblik faylanma özelliği gösteren odak mekanizmaları elde edilmiştir. Pınar ve diğ. (2003), bölgede yaptıkları çalışmada KD-GB doğrultulu ters bileşene sahip oblik faylanma özelliği gösteren odak mekanizmaları belirlemişlerdir. Analizlerden elde edilen KD-GB doğrultulu ters faylanma özelliğine sahip odak mekanizmaları Coskun (2021)’in aynı bölgede yaptığı odak mekanizması sonuçlarıyla da tutarlıdır. Coskun (2021), Ganos Fayı ve Tekirdağ Baseni arasında meydana gelen depremlerin sağ yönlü doğrultu atım ve normal faylanma mekanizması ile KB doğrultulu sıkışma gerilmesi ile ters faylanma mekanizmasına sahip olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca ters faylanma özelliği gösteren odak mekanizmalarının

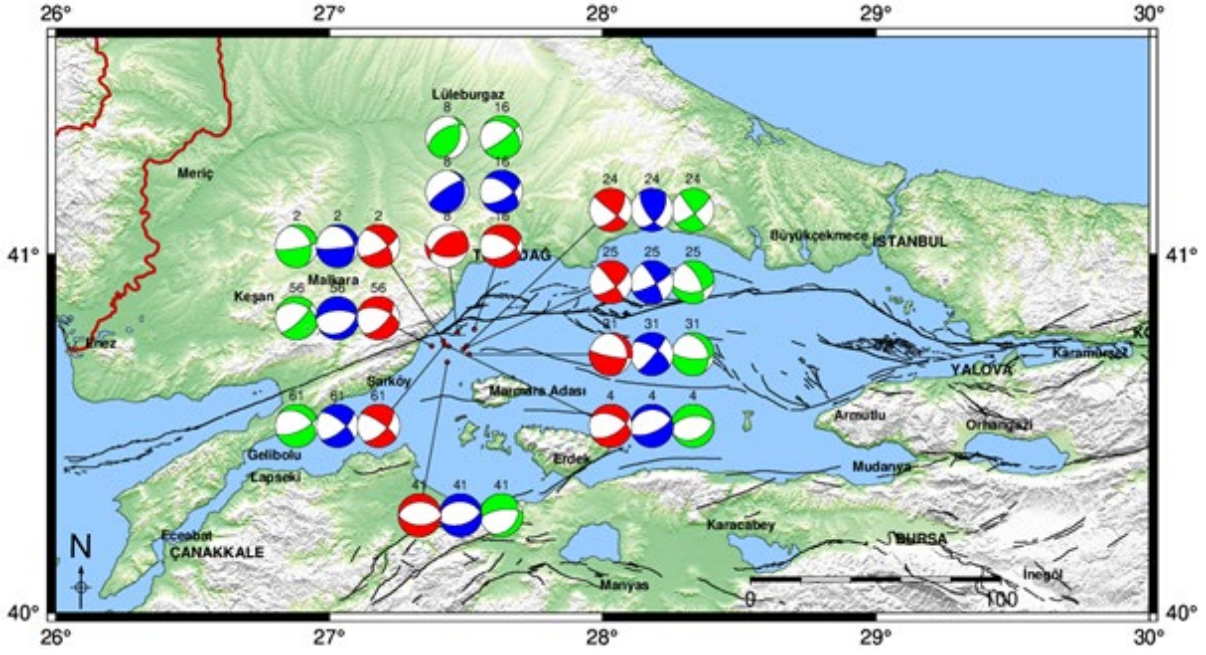
27 Nisan 1985 yılında meydana gelen  $M_w=4.4$  büyüklüğündeki Mürefte Depreminin faylanma mekanizması ile tutarlı olduğunu belirtmiştir.



Şekil 12: MONGAN sismik ağlarına ait veriler kullanılarak yapılan moment tensör analizlerinden elde edilen odak mekanizmaları

MONGAN ağı kayıtları ile yapılan moment tensör analizlerinden elde edilen odak mekanizmaları, iyi bir azimutal dağılıma sahip KRDAE-BDTİM sismik ağı geniş bant kayıtları kullanılarak yapılan moment tensör çözümü ve P dalgası ilk hareket yönlerinden belirlenen odak mekanizmaları ile karşılaştırılmıştır. Böylece farklı yöntemler ve farklı veri seti kullanarak elde edilen odak mekanizması çözümlerinin karşılaştırması yapılmış, çözümlerde ve kaynak parametrelerinde bir değişiklik olup olmadığı denetlenmiştir.

KRDAE-BDTİM sismik ağı tarafından kaydedilmiş büyüklükleri  $2.8 \leq M_w \leq 3.7$  arasında değişen Tablo 2'de yer alan depremlerden 10 tanesinin odak mekanizmaları iki farklı yöntemle belirlenmiştir. Seçilen depremler ve çözüm parametreleri Tablo 3'te listelenmektedir. Bu depremler, P dalgası ilk varışlarının filtresiz veriden okunabilmesi için sinyal gürültü oranlarının yüksek ve yöntemin başarılı olabilmesi için azimutal dağılımları iyi olan istasyonlarla kaydedilmiş olması koşullarına göre seçilmiştir. P dalgası ilk hareket yönlerinden odak mekanizması belirlenirken en az 10 istasyondan polarite okuması yapılmıştır. İki farklı sismik ağına ait kayıtlar ve iki farklı yöntemle elde edilen odak mekanizmaları Şekil 13'te görülmektedir.



Şekil 13: Moment tensör analizlerinden elde edilen odak mekanizmaları (MONGAN verileri (kırmızı plaj topu), KRDAE-BDTİM verileri (mavi plaj topu) ve KRDAE-BDTİM verileri ile P dalgası ilk hareket yönlerinden elde edilen odak mekanizmaları (yeşil plaj topu), mavi üçgenler KRDAE-BDTİM istasyonlarını, kırmızı üçgenler MONGAN istasyonlarını göstermektedir.)

Tablo 3'te yer alan depremlere ait çözümler incelendiğinde her iki veri seti için moment tensör analizlerinden elde edilen gözlemsel ve sentetik dalga formu uyumlarının  $VR > 0.40$  koşulunu sağladığı görülmektedir. Ancak güvenilir bir sonuç için tek başına bu uyum yeterli olmadığından diğer parametrelerin de koşulları sağlayıp sağlamadığına bakıldığında  $CN < 10$ ,  $FMVAR < 30$ ,  $STVAR > 0.30$  koşullarını sağladığı görülmektedir. KRDAE-BDTİM geniş bant kayıtları ile yapılan ters çözüm frekans aralığı 0.08-0.14 Hz arasında değişirken, kısa periyod kayıtlardan oluşan MONGAN ağı kayıtlarının ters çözümü, bu kayıtlarda deprem enerjisinin yüksek olduğu 1.0-3.9 Hz arasında değişen yüksek frekanslarda yapılmıştır. Kısa periyod kayıtlar  $> 1$  Hz üzerine duyarlı olduğundan yüksek frekanslarda kaydettikleri verilerin analizi ile özellikle küçük depremlerin kaynak parametrelerine dair daha çok bilgi edinilmesini sağlarlar.

Doğrultu, eğim ve atım açılarında küçük farklar olsa da genellikle her deprem için elde edilen üç odak mekanizmasının da birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. P dalgası ilk hareket yaklaşımı, faydaki kırılma hareketinin başlangıcına ve istasyonlara gelen ilk dalga varışlarına odaklanır. Dolayısıyla P dalgası ilk hareket yönlerinden odak mekanizması hesaplanırken fay düzleminin doğrultusu başlangıç momentinden hesaplanmış olur. Moment tensör analizinde ise faydaki kırılma sürecinin tamamına ait bilgiler taşıyan tam dalga formu kullanılır. Fay düzleminin bir bütün olarak kabul edildiği centroid modele dayanarak hesaplamalar yapılır.

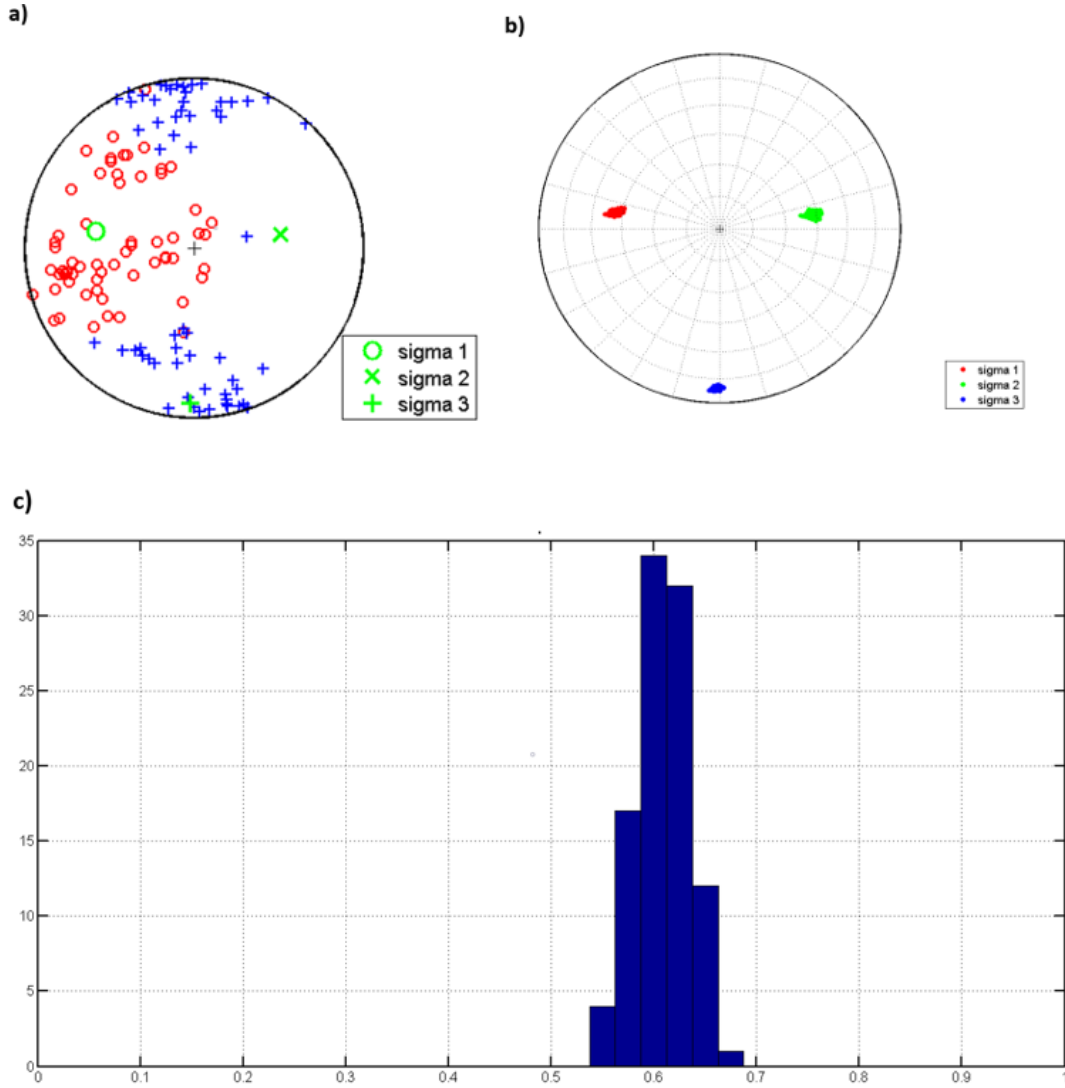
Tablo 3: İki farklı veri seti ve iki farklı yöntemle yapılan analizlerin sonuç parametreleri (MTA: Moment Tensör Analizi)

Deprem No	VERİ-YÖNTEM	TÇFB (Hz)	VR	FMVAR	STVAR	$\phi$	$\delta$	$\lambda$	$\phi$	$\delta$	$\lambda$
8	MONGAN-MTA	1.0-2.1	0.41	5±5	0.01	230	53	57	97	47	126
	KRDAE-MTA	0.08-0.11	0.41	5±4	0.02	236	77	103	11	18	47
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	239	55	114	21	42	60
61	MONGAN-MTA	1.1-2.5	0.80	5±6	0.02	305	75	-31	44	60	-163
	KRDAE-MTA	0.10-0.14	0.41	2±2	0.03	310	68	-26	50	66	-156
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	302	37	-41	67	67	-120
4	MONGAN-MTA	1.2-2.0	0.65	3±4	0.01	293	48	-48	60	56	-126
	KRDAE-MTA	0.09-0.12	0.45	8±8	0.02	267	26	-72	67	65	-99
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	264	53	-80	67	38	-103
25	MONGAN-MTA	1.4-2.4	0.52	28±29	0.02	322	85	-25	54	65	-175
	KRDAE-MTA	0.10-0.13	0.40	12±14	0.02	330	78	-13	63	77	-168
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	333	65	-45	86	50	-147
16	MONGAN-MTA	2.4-3.9	0.65	2±3	0.01	300	57	-50	63	50	-134
	KRDAE-MTA	0.10-0.12	0.51	14±23	0.02	309	57	-35	60	61	-141
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	307	33	-19	53	80	-122
56	MONGAN-MTA	1.5-3.9	0.50	1±1	0.01	288	54	-38	42	60	-138
	KRDAE-MTA	0.10-0.13	0.40	16±16	0.03	267	61	-75	57	32	-116
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	290	33	-30	46	74	-119
2	MONGAN-MTA	1.0-3.2	0.54	6±12	0.02	319	62	-23	61	70	-150
	KRDAE-MTA	0.05-0.07	0.52	12±10	0.01	334	25	-22	84	81	-114
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	337	35	-16	80	81	-124
31	MONGAN-MTA	1.8-3.5	0.42	1±1	0.01	350	26	-22	101	80	-114
	KRDAE-MTA	0.10-0.14	0.42	2±3	0.01	304	65	-10	39	81	-155
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	333	32	-35	94	72	-118
41	MONGAN-MTA	1.0-2.4	0.77	4±3	0.01	268	38	-93	92	52	-87
	KRDAE-MTA	0.08-0.11	0.56	2±3	0.01	272	37	-76	75	54	-100
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	262	69	-68	34	30	-134
24	MONGAN-MTA	1.0-1.7	0.48	7±5	0.01	129	88	32	38	58	178
	KRDAE-MTA	0.08-0.12	0.41	16±11	0.03	147	67	43	37	51	150
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	143	87	15	52	75	177

MONGAN ağı kayıtlarını kullanarak yapılan moment tensör analizlerinden elde edilen odak mekanizmaları bölgesel gerilme eksenlerinin, yönlerinin ve gerilme oranının belirlenmesinde kullanılmıştır. STRESSINVERSE programı ile elde edilen sonuçlar 3 ana gerilme eksenini gösterilmiştir. Şekil 14a'da basınç (P) ve gerilme (T) eksenlerinin dağılımı, Şekil 14b'de ana gerilme eksenlerinin yönelimi ve Şekil 14c'de ise gerilme oranının histogramı görülmektedir. Gerilme ters çözüm analizinden elde edilen sonuçlara göre  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  asal gerilme eksenlerinin konumları sırasıyla  $277.2^\circ/42.8^\circ$ ,  $87.7^\circ/46.7^\circ$  ve  $182.9^\circ/4.7^\circ$  (azimut/dalım) olarak bulunmuştur. En küçük gerilme eksenini  $\sigma_3$ 'ün doğrultusu hemen hemen K-G'dir. Bölgede yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak asal gerilme eksenlerinin yönü yaklaşık doğu-batı doğrultusunda elde edilmiştir. Bu önemli farklılık, analizlerde nispeten daha küçük hatta mikro depremlerin kullanılmasından kaynaklanabilir. Bölgesel kabuk modeline çok daha duyarlı olan bu depremlerin yüksek frekanslardaki moment tensör ters çözümleri kırılma sürecine dair daha hassas bilgiler içermektedir (Zahradnik ve Sokos 2018). Bu durum, mikro depremlerin bölgesel gerilme ters çözüm analizlerindeki önemini de ortaya koymaktadır.



Stres oranını ifade eden R değeri 0.60'tır. Bu değer bölgedeki baskın tektonik rejimin sıkışma olduğunu ifade etmektedir. Korkusuz (2012), Ganos deniz depremleriyle yaptığı çalışmada  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  R değerlerini sırasıyla  $315^\circ-35^\circ$ ,  $141^\circ-50^\circ$ ,  $221^\circ-7^\circ$  olarak hesaplamıştır. Bölge için seçilen gerilme oranını 0.66 bulmuştur. Coskun (2021) de R değerini benzer şekilde 0.60 olarak hesaplamıştır.



Şekil 14: Stres tensörü ters çözüm sonuçları; a) P(kırmızı daireler) ve T (mavi artılar) eksenleri, b) Ana gerilme eksenlerinin yönleri, c) Gerilme oranı (R)

## 6. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Ganos Fayı üzerinde kurulan, azimutal dağılımı iyi olmayan, yoğun bir sismik ağ ile kaydedilen yakın ve yüksek frekanslı sismogramların moment tensör analizleri yapılmıştır. İstasyon dizilimlerinin bu depremlerin moment tensör analizleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Farklı veri seti ve farklı yöntemler kullanılarak elde edilen odak mekanizmaları karşılaştırılmış, çözümlerde ve kaynak parametrelerinde bir değişiklik olup olmadığı denetlenmiştir. Analizlerde, Ganos Fayı'nın doğu ucunda Tekirdağ Baseni ile Marmara Adası arasında kalan bölgede meydana gelen mikro depremlere ait kayıtlar kullanılmıştır.

Mikro depremlerin büyük depremlere kıyasla kabuk modeline daha duyarlı olmasından dolayı analizlere başlamadan önce kullanılacak kabuk modeli belirlenmiştir. Bunun için MONGAN-1 sismik ağı tarafından kaydedilen depremlerin en az 3 istasyona ait sismogramları kullanılarak beş farklı kabuk modeli ile ayrı ayrı moment tensör çözümleri yapılmıştır. Ters çözüm için, sinyal gürültü oranlarının ve depremlerin enerjilerinin yüksek olduğu frekans aralıkları seçilmiştir. Tüm kabuk modelleri için aynı frekans aralığı kullanılmıştır. Depremin beş farklı kabuk modeli ile yapılan moment tensör analizi çözüm parametreleri (Tablo 1) (VR, CN, FMVAR, STVAR) incelendiğinde tüm kabuk modellerinin CN parametresi hariç, güvenilir sonuç için gerekli olan  $VR > 0.40$ ,  $FMVAR < 30$ ,  $STVAR > 0.30$  koşullarını sağladığı görülmektedir. Aynı zamanda tüm kabuk modelleri için yüksek DC değerleri elde edilmiştir. Analizlerde kullanılmak üzere  $CN < 10$  koşulunu da sağlayan Yamamoto ve diğ. (2015) kabuk modeli seçilmiştir.

Bu kabuk modeli ile yapılan 61 adet depremin moment tensör analizinden elde edilen parametreler incelendiğinde kararlı, güvenilir ve doğru çözümler için gerekli olan  $VR > 0.40$ ,  $CN < 10$ ,  $FMVAR < 30$ ,  $STVAR > 0.30$  koşullarını sağladığı görülmüştür.

MONGAN-1 ve MONGAN-2 sismik ağı kısa periyot kayıtları ile moment tensör analizi yapılan 61 adet depremin, büyüklüğü  $2.8 M_w \leq 3.7$  arasında değişen 10 tanesinin odak mekanizması çözümleri farklı yöntem ve farklı veri setleri kullanarak elde edilen odak mekanizması çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen odak mekanizmalarının doğrultu, eğim ve atım açılarında küçük farklar olsa da genellikle her deprem için elde edilen üç odak mekanizmasının da birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Depremlerin odak mekanizmaları incelendiğinde KB-GD sıkışma gerilmesiyle ters bileşenli oblik ve doğrultu atım mekanizmasına sahip depremlerin olduğu görülür. Elde edilen KD-GB doğrultulu ters faylanma bileşenine sahip oblik faylanma özelliği gösteren odak mekanizmaları, Pinar ve diğ. (2003)'in bölgede yaptıkları çalışmada elde ettikleri ters bileşene sahip oblik faylanma özelliği gösteren odak mekanizmaları ile tutarlıdır. Episantr dağılımlarına göre veri setinin güneybatısında yer alan depremlerin K-G açılma etkisindeki normal faylanma mekanizmasına sahip olduğu görülür. KD-GB doğrultulu ters faylanma özelliğine sahip odak mekanizmaları ise Coskun (2021)'in aynı bölgede yaptığı odak mekanizması sonuçlarıyla tutarlıdır. Coskun (2021), Ganos Fayı ve Tekirdağ Baseni arasında meydana gelen depremlerin sağ yönlü doğrultu atım ve normal faylanma mekanizması ile KB doğrultulu sıkışma gerilmesi ile ters faylanma mekanizmasına sahip olduğunu tespit etmiştir.

Moment tensör çözümlerinden elde edilen odak mekanizmaları ile gerilme ters çözüm analizi yapılmıştır.  $\sigma_1$  asal gerilme ekseninin konumu  $277.2/42.8$  (azimut/dalım),  $\sigma_2$  ekseninin konumu  $87.7/46.7$  (azimut/dalım) ve  $\sigma_3$  asal gerilme ekseninin konumu ise  $182.9/4.7$  (azimut/dalım) olarak bulunmuştur. Bölgede yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak asal gerilme eksenlerinin yönü yaklaşık doğu-batı doğrultusunda elde edilmiştir. Analizlerde, bölgesel çalışmalarda kullanılan depremlerden nispeten daha küçük hatta mikro depremlerin kullanılması ve yüksek frekanslarda moment tensör ters çözümü yapılması gerilme eksenlerinin yönlerindeki farklılığın nedeni olabilir. Bu durum, mikro depremlerin bölgesel gerilme ters çözüm analizlerindeki önemini de ortaya koymaktadır. 0.60 gerilme oranı bölgenin sıkışma rejiminin etkisi altında olduğunu göstermektedir. Bölgede, Korkusuz (2012) ve Coskun (2021) tarafından yapılan çalışmalarda da benzer şekilde gerilme oranları sırasıyla 0.66 ve 0.60 olarak hesaplanmıştır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, TÜBİTAK tarafından desteklenen 118R019 numaralı "Ganos Fayı Üzerindeki 1912 Depremi Kırığının Güncel Etkinliğinin Görüntülenmesi" başlıklı proje kapsamında kurulan MONGAN sismik ağı tarafından kaydedilen deprem verileri kullanılmıştır. Yazarlar, verileri paylaştıkları için projede görev alan; Marco Bohnhoff, Hakan Alp, Stephan Bentz, Ali Pinar,

Fatih Alver, Ömer Kılıçarslan ve Burçak Görgün'e teşekkür ederler. Şekillerdeki haritalar GMT programı (Wessel ve diğ. 2013) kullanılarak hazırlanmıştır.

## KAYNAKLAR

Abd el-aal A.K., Al-Enezi A., Saadalla H., Al-Jeri F., 2021. Tectonic and Anthropogenic Characteristics of the November 15, 2019 Micro Earthquakes Sequence, Kuwait, *Geotectonics* 55(1), 112-127.

Aksoy M.E., Meghraoui M., Vallee M., Cakir Z., 2010. Rupture characteristics of the A.D. 1912 Mürefte (Ganos) earthquake segment of the North Anatolian fault (western Turkey), *Geology* 38(11), 991-994.

Akyol N., Zhu L.P., Mitchell B.J., Sozbilir H., Kekovali K., 2006. Crustal structure and local seismicity in Western Anatolia, *Geophysical Journal International* 166,(3), 1259-1269.

Altunel E., Meghraoui, M., Akyuz H.S., Dikbas A., 2004. Characteristics of the 1912 co-seismic rupture along the North Anatolian Fault Zone (Turkey): implications for the expected Marmara earthquake, *Terra Nova* (16), 198-204.

Ambraseys N.N., Jackson J.A., 1998, Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region, *Geophysical Journal International* 133(2), 390-406.

Ambraseys N.N., Jackson J.A., 2000. Seismicity of the Sea of Marmara (Turkey) since 1500, Erişim adresi: <https://academic.oup.com/gji/article/141/3/F1/613019>

Ardeleanu L., Radulian M., Sileny J., Panza G.F., 2005. Source parameters of weak crustal earthquakes of the Vrancea region from short-period waveform inversion, *Pure and Applied Geophysics* 162(3), 495-513.

Armijo R., Meyer B., Hubert A., Barka A., 1999. Westward propagation of the North Anatolian fault into the northern Aegean: Timing and kinematic, *Geology* 27(3), 267-270.

Armijo R., Pondard N., Meyer B., Uçarkus G., Lepinay B.M., Malavieille J., Dominguez S., Gustcher M., Schmidt S., Beck C., Çagatay N., Cakir Z., Imren C., Eris K., Natalin B., Ozalaybey S., Tolun L., Lefevre I., Seeber L., Gasperini L., Rangin C., Emre O. and Sarikavak K., 2005. Submarine fault scarps in the Sea of Marmara pull-apart (North Anatolian Fault): Implications for seismic hazard in İstanbul, *Geochemistry Geophysics Geosystems* 6 Q06009, doi:10.1029/2004GC000896.

Barros L.V., Carvalho J., Ferreira V.M., Albuquerque D.F., Von Huelsen M.G., Caixeta D.F., Fontenele D.P., 2014. Determination of source seismic parameters of micro-earthquakes with epicenter in the south of Minas Gerais State-Brazil, *Sociedade Brasileira de Geofísica Este* 1-3.

Başarır N., 2011. Reassessment of the Seismic Parameters from Historical Seismograms of 1912- Mürefte-Sarkoy, 1935-Erdek-Marmara Island and 1963-Cinarcik Earthquakes, Master Thesis, Boğaziçi University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Graduate Program in Geophysics, İstanbul, 226 p.

Bayrakci G., Laigle M., Becel A., Hirn A., Taymaz T., Yolsal-Cevikbilen S., SEISMARMARA team, 2013. 3-D sediment-basement tomography of the Northern Marmara trough by a dense OBS network at the nodes of a grid of controlled source profiles along the North Anatolian fault, *Geophysical Journal International* 194, 1335-1357.

Benetatos C., Malek J., Verga F., 2013. Moment tensor inversion for two micro-earthquakes occurring inside the Haje gas storage facilities, Czech Republic, *Journal of Seismology* 17(2), 557-577.

Bouchon M., 1981. A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, *Bulletin of the Seismological Society of America* 71(4), 959-971.

Carvalho J., Barros L.V., Zahradnik J., 2016. Focal mechanisms and moment magnitudes of micro-earthquakes in central Brazil by waveform inversion with quality assessment and inference of the local stress field, *Journal of South American Earth Sciences* 71, 333-343.

Chan A., Zoback M., 2007. The Role of Hydrocarbon Production on Land Subsidence and Fault Reactivation in the Louisiana Coastal Zone, *Journal of Coastal Research* 23, 771-786.

Christova C., Tsapanos T., 2000. Depth distribution of stresses in the Hokkaido Wadati-Benioff zone as deduced by inversion of earthquake focal mechanisms, *Journal of Geodynamics* 30(5), 557-573.

Coskun Z., 2021. Deformation Styles and Rates Along the North Anatolian Fault Zone in the Sea of Marmara Based on Onshore-Offshore Seismic, Geodetic and Geologic Data, PhD Thesis, Boğaziçi University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Graduate Program in Earthquake Engineering, İstanbul, 162 p.

Delvaux D., Barth A., 2010. African stress pattern from formal inversion of focal mechanism data, *Tectonophysics* 482 (1-4), 105-128.

Emre O., Duman T.Y., Ozalp S., Elmaci H., Olgun S., Saroglu F., 2013. 1/1.250.000 scaled Turkey active fault map, *General Directorate of Mineral Research and Exploration Special Publication*. Erişim adresi: <http://www.mta.gov.tr>

Emre O., Duman T.Y., Ozalp S., Saroglu F., Olgun S., Elmaci H., Çan T., 2018. Active fault database of Turkey, *Bulletin of Earthquake Engineering* 16 (8), 3229-3275.

Gurbuz C., Aktar M., Eyidogan H., Cisternas A., Haessler H., Barka A., Ergin M., Turkelli N., Polat O., Ucer B., Kuleli S., Baris S., Kaypak B., Bekler T., Zor E., Bicmen F., Yoruk A., 2000. The seismotectonics of the Marmara Region (Turkey): Results from a microseismic experiment, *Tectonophysics* 316, 1-17.

Fojtikova L., Vavrycuk V., Cipciar A., Madaras J., 2010. Focal mechanisms of micro-earthquakes in the Dobrá Voda seismoactive area in the Malé Karpaty Mts. (Little Carpathians), Slovakia, *Tectonophysics* 492(1-4), 213-229.

Fojtikova L., Zahradnik J., 2014. A New Strategy for Weak Events in Sparse Networks: The First-Motion Polarity Solutions Constrained by Single-Station Waveform Inversion, *Seismological Research Letters* 85(6), 1265-1274.

Guilhem A., Hutchings L., Dreger D.S., Johnson L.R., 2014. Moment tensor inversions of  $M \sim 3$  earthquakes in the Geysers geothermal fields, California, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 119(3), 2121-2137.

Irmak T. S., Doğan B., Yavuz E., Livaoglu H., Sertçelik F., 2020. 22.01.2020 Akhisar-Manisa Depremi (Mw 5.5) ve Artçıların Sismotektonik Analizi, *Türk Deprem Araştırma Dergisi* 2, 27-46.

Janssen C., Bohnhoff M., Vapnik Y., Gorgun E., Bulut F., Plessen B., Dresen G., 2009. Tectonic evolution of the Ganos segment of the North Anatolian Fault (NW Turkey), *Journal of Structural Geology* 31(1), 11-28.

Kalafat D., Gurbuz C., Ucer S.B., 1987. Batı Türkiye'de Kabuk ve Üst Manto Yapısının Araştırılması, *Deprem Araştırma Bülteni* (59), 43-64.

Kalafat D., 1995. Anadolu'nun Tektonik Yapılarının Deprem Mekanizmaları Açısından İrdelenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü, Deniz Jeolojisi ve Jeofiziği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 412 s.

Karabulut H., Roumelioti Z., Benetatos C., Mutlu A. K., Ozalaybey S., Aktar M., Kiratzi A., 2006. A source study of the 6 July 2003 (Mw 5.7) earthquake sequence in the Gulf of Saros (Northern Aegean Sea): Seismological evidence for the western continuation of the Ganos fault, *Tectonophysics* 412(3-4), 195-216.

Karabulut H., Schmittbuhl J., Ozalaybey S., Lengliné O., Komec-Mutlu A., Durand V., Bouchon M., Daniel G., Bouin M.P., 2011. Evolution of the seismicity in the eastern Marmara Sea a decade before and after the 17 August 1999 Izmit earthquake, *Tectonophysics* 510, 17-27.

Ketin İ., 1948. Ü ber die tektonisch-mechanischen Folgerungen aus den grossen anadoluischen Erdbeben des letzten Dezenniums, *Geol. Rund.* 36:77-83.

Kilic T., Utkucu M., 2012. Türkiye'deki  $M \geq 4.0$  Depremler için 2007 ve 2008 Yıllarını Kapsayan Sismik Moment Tensör Katalogu, *Yerbilimleri* 33(3), 219-238.

Kilic T., 2009. Sismik Moment Tensör Analizi İle 2007-2008 Yıllarındaki  $M \geq 4,0$  Türkiye Depremlerinin Kaynak Parametrelerinin Bulunması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 80 s.

Kikuchi M., Kanamori H., 1991. Inversion of complex body waves-III, *Bulletin of the Seismological Society of America* 81(6), 2335-2350.

Korkusuz Y., 2012. The Present-Day Stress States in The Marmara Region, Master Thesis, Boğaziçi University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Graduate Program in Geophysics, İstanbul, 245 p.

Kumar R., Gupta S.C., Kumar A., 2015a. Determination and identification of focal mechanism solutions for Himalayan earthquakes from waveform inversion employing ISOLA software, *Natural Hazards* 76(2), 1163-1181.

Kumar R., Gupta S.C., Kumar A., 2015b. Effect of azimuthal coverage of an earthquake on moment tensor solutions estimated by waveform inversion, *Arabian Journal of Geosciences* 8(8), 5713-5726.

Langston C.A., Barker J.S., Pavlin G.B., 1982. Point-source inversion techniques, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 30(2-3), 228-241.

Li J., Kuleli H., Zhang H., Toksoz M., 2011. Focal Mechanism Determination of Induced Microearthquakes in an Oil Field Using Full Waveforms from Shallow and Deep Seismic Networks, *Geophysics* 76, 87.

Michael A.J., 1984. Determination of stress from slip data: Faults and folds, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 89(B13), 11517-11526.



- Michael A.J., 1987. Use of focal mechanisms to determine stress: A control study, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 92(B1), 357-368.
- Miyazawa M., Venkataraman A., Snieder R., Payne M.A., 2008. Analysis of microearthquake data at Cold Lake and its applications to reservoir monitoring, *Geophysics* 73(3), 15-21.
- Mutlu A.K., 2020. Seismicity, focal mechanism, and stress tensor analysis of the Simav region, western Turkey, *Open Geoscience* 12(1), 479-490.
- Okay A., Demirbag E., Kur H., Okay N., Kucsu İ., 1999. An active, deep marine strike-slip basin along the North Anatolian fault in Turkey, *Tectonics* 18(1), 129-147.
- Okay A.I., Tuysuz O., Kaya S., 2004. From transpression to transtension: changes in morphology and structure around a bend on the North Anatolian Fault in the Marmara region, *Tectonophysics* 391(1-4), 259-282.
- Orgulu G., 2011. Seismicity and source parameters for small-scale earthquakes along the splays of the North Anatolian Fault (NAF) in the Marmara Sea, *Geophysical Journal International* 184, 385-404.
- Ozalaybey S., Ergin M., Aktar M., Tapirdamaz C., Bigmen F., and Yoruk A., 2002, The 1999 Izmit Earthquake Sequence in Turkey: Seismological and Tectonic Aspects, *Bull. Seism. Soc. Am.* 92, 316-386.
- Pavoni N., 1961. Die Nordanatolische Horizontalverschiebung, *Geol. Rund.* 51,122-39.
- Pinar A., Kuge K., Honkura Y., 2003. Moment tensor inversion of recent small to moderate sized earthquakes: implications for seismic hazard and active tectonics beneath the Sea of Marmara, *Geophysical Journal International* 153, 133-145.
- Robertson E., 2008. Seismic Moment Tensor Solutions from GeoNet Data to Provide a Moment Magnitude Scale for New Zealand, Master Thesis, Victoria University of Wellington, School of Geography, Environment and Earth Sciences, Wellington, 186 p.
- Sarkar S., 2008. Reservoir Monitoring Using Induced Seismicity at a Petroleum Field in Oman, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, 261 p.
- Seeber L., Emre O., Cormier M.H., Sorlien C.C., McHugh C.M.G., Polonia, A., Cagatay N., 2004. Uplift and subsidence from oblique slip: The Ganos-Marmara bend of the North Anatolian Transform, Western Turkey, *Tectonophysics* 391(1-4 SPEC.ISS.), 239-258.
- Stein S., Wysession M., 2003. Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure, Blackwell Publishing, *Geological Magazine* 140(6), 733-734.
- Sileny J., 2009. Resolution of non-double-couple mechanisms; simulation of hypocenter mislocation and velocity structure mismodeling, *Bulletin of the Seismological Society of America* 99, 2265-2272.
- Sokos E., Zahradnik J., 2008. ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data, *Computers & Geosciences* 34(8), 967-977.
- Sokos E., Zahradnik J., 2013. Evaluating centroid-moment-tensor uncertainty in the new version of ISOLA software, *Seismological Research Letters* 84(4), 656-665.

Stanek F., Eisner L., Vesnaver A., 2017. Theoretical assessment of the full-moment-tensor resolvability for receiver arrays used in microseismic monitoring, *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 14(2), 235-240.

Tuysuz O., Barka A., Yigitbas E. 1998. Geology of the Saros Graben: its implications on the evolution of the North Anatolian Fault in the Ganos-Saros region, NW Turkey, *Tectonophysics* 293, 105-126.

Udias A., Buforn E., 1996. Source mechanism of earthquakes from seismic waves. Third workshop on 3D modelling of seismic wave generation, propagation and their inversion, Trieste Italy.

Vavrycuk V., 2014. Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms, *Geophysical Journal International* 199(1), 69-77.

Villegas A.R.J., Zahradnik J., Nacif S., Spagnotto S., Winocur D., Leiva M.F., 2016. Waveform inversion and focal mechanisms of two weak earthquakes in Cordillera Principal (Argentina) between 35° and 35.5° S, *Journal of South American Earth Sciences* 71, 359-369.

Wessel P., Smith W.H.F., Scharroo R., Luis J.F., Wobbe F., 2013. Generic Mapping Tools: Improved version released, *EOS Transactions American Geophysical Union* 94, 409-410.

Yaltirak C., 1996. Ganos Fay Sistemi'nin tektonik tarihi, *Türk. Petrol Jeol. Dern. Bül.* 8,137-56.

Yaltirak C., Alpar, B., Yüce, H., 1998. Tectonic elements controlling the evolution of the Gulf of Saros (Northeastern Aegean Sea) *Tectonophysics* 300(1-4), 227-248.

Yamamoto Y., Takahashi N., Cıtak S., Kalafat D., Pinar A., Gurbuz C., Kaneda Y., 2015. Offshore seismicity in the western Marmara Sea, Turkey, revealed by ocean bottom observation, *Earth Planets Space* 67, 147.

Yilmazer M., 2003. Deprem Kaynak Parametrelerinin Online Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 57 s.

Yu C., Vavrycuk V., Adamova P., Bohnhoff M., 2018. Moment Tensors of Induced Microearthquakes in The Geysers Geothermal Reservoir from Broadband Seismic Recordings: Implications for Faulting Regime, Stress Tensor, and Fluid Pressure, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 123(10), 8748-8766.

Zahradnik J., Sokos E., 2018. ISOLA Code for Multiple-Point Source Modeling-Review (In: Moment Tensor Solutions-A Useful Tool for Seismotectonics, Editor: Sebastiano D'Amico, Springer, 763 p.), 1-28

URL-1; KRDAE-BDTİM, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem ve Tsunami İnceleme Merkezi,  
Erişim adresi: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprem-verileri/sayisal-veriler>

URL-2; AFAD, T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı, Erişim adresi: <http://tdvm.afad.gov.tr>

## ARAŞTIRMA VERİSİ

Çalışma kapsamında kullanılan deprem verileri, TÜBİTAK tarafından desteklenen 118R019 numaralı “Ganos Fayı Üzerindeki 1912 Depremi Kırığının Güncel Etkinliğinin Görüntülenmesi” başlıklı proje kapsamında kurulan MONGAN sismik ağı ve Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem ve Tsunami İnceleme Merkezi (KRDAE-BDTİM) ulusal sismik ağlarından elde edilmiştir. Depremlere ait katalog bilgileri, T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) ve KRDAE-BDTİM’e ait ulusal deprem kataloglarından elde edilmiştir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ

Araştırma kapsamında herhangi bir kişiyle ve/veya kurumla çıkar çatışması/ilişkisi bulunmamaktadır.

## YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI

Katkı Türü	Yazarlar
Çalışmanın tasarlanması	B.D.T., E.Y., E.G.
Literatür araştırma	B.D.T.
Saha çalışması, veri temini/derleme	E.Y., E.G.
Verilerin işlenmesi/analiz edilmesi	B.D.T.
Şekil/Tablo/Yazılım hazırlanması	B.D.T.
Bulguların yorumlanması	B.D.T.
Makale yazımı, düzenleme, kontrol	B.D.T., E.Y.