



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

## 17 Kasım 2021 Merkez (Düzce) Depremi (Mw5.0) ve Artçı Şoklarının (Mw4.3 ve Mw3.9) Moment Tensör Çözümleri ve Ana Şok Coulomb Gerilme Analizi

 Nihan HOŞKAN<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul-Cerrahpaşa Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: nihan@iuc.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1112340

### Öz

Bu çalışmada 17 Kasım 2021 tarihinde yerel saat ile (YS) 15.40'da meydana gelen Mw5.0 büyüklüğündeki Merkez (Düzce) depremi ile Mw4.3 (YS 15.57) ve Mw3.9 (YS 21.35) büyüklüklerindeki iki artçı şokun kaynak mekanizma çözümleri moment tensör ters çözüm (MT) yöntemiyle bulunmuştur. Ana şokun KD-GB uzanımlı doğrultu atımlı kırık üzerinde meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen ana şok moment tensör çözümü, deprem veri merkezlerinden elde edilen fay çözümleri ile karşılaştırılmış ve bulunan sonucun uyumlu olduğu görülmüştür. Mw4.3 büyüklüğündeki artçı şokun kaynak mekanizmasının doğrultu atım bileşeni olan ters faylanma mekanizmasına, Mw3.9 büyüklüğündeki artçı şokun ise KD-GB uzanımlı doğrultu atımlı faylanma mekanizmasına sahip olduğu görülmüştür. Ana şokun neden olduğu Coulomb gerilme değişimi hesaplanmış ve K-G, KB-GD ve KD-GB yönlerinde kesitler alınarak yaklaşık 15 km derinlikteki gerilmenin değişimi incelenmiştir. Buna göre, Merkez (Düzce) depreminin ana şok ve artçı şoklarının bölgedeki KD-GB yönündeki gerilmeyi azalttığı, buna karşın K-G ve BKB-DGD yönündeki yakın faylar üzerine maksimum 1 bar gerilme yüklediği tespit edilmiştir. Gerilmenin arttığına işaret edilen bölgede 23 Kasım 2022 Gölyaka (Düzce) depremi (Mw5.9) meydana gelmiştir. Bu durum, çalışmadaki sonuçların doğruluğunu kanıtlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Düzce Depremleri, Coulomb Gerilme Analizi, Moment Tensör Çözümü

## Moment Tensor Solutions of November 17, 2021 Central (Duzce) Earthquake (Mw5.0) and its Aftershocks (Mw4.3 and Mw3.9) and Coulomb Stress Analysis of the Mainshock

### ABSTRACT

In this study, the source mechanism solutions of the November 17, 2021 Central (Düzce) earthquake occurred at 15.40 local time (LT) with magnitude Mw5.0 and its aftershocks occurred with magnitudes Mw4.3 (LT 15.57) and Mw3.9 (LT 21.35) were found by using the moment tensor inversion (MT) method. It was determined that the mainshock occurred on the NE-SW oriented strike-slip fracture. The mainshock source parameter solution obtained in this study was compared with the fault solution obtained from earthquake data centers and it was seen that the result was compatible. It was observed that the source mechanism of the Mw4.3 aftershock was reverse faulting with a strike-slip component, and the Mw3.9 aftershock has a NE-SW oriented strike-slip faulting mechanism. The Coulomb stress variation caused by the mainshock was calculated and the variation of the stress at a depth of 15 km was examined by taking cross-sections in N-S, NW-SE and NE-SW directions. Accordingly, it was determined that the mainshock and its aftershocks reduced the stress in the NE-SW direction, but loaded maximum of 1 bar on the nearby faults in the N-S and WNW-ESE directions. 23 November 2022 Gölyaka (Düzce) earthquake (Mw5.9) occurred in the region where the stress was indicated to increase. This proves the accuracy of the results in the study.

**Keywords:** Duzce Earthquakes, Coulomb Stress Analysis, Moment Tensor Solution

# I. GİRİŞ

Arabistan ve Afrika Levhalarının Avrasya Levhasına göre göreceli olarak kuzeye doğru hareketi, Anadolu Levhasının sağ yanal doğrultu atımlı Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ve sol yanal doğrultu atımlı Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) boyunca yaklaşık 24 mm/yıl hızla saatin tersi yönünde batıya doğru kaçmasına neden olur [1-10] (Şekil 1).

KAFZ, doğuda DAFZ ile kesiştiği Karlıova üçlü birleşim noktasından başlar. Zon, orta kısım civarında dış bükey bir yay yaparak batıda Saros Körfezi'nin batısına kadar uzanır [11]. KAFZ yaklaşık 1200 km uzunluğunda olup, sismik olarak dünyanın en aktif sağ yanal atımlı fay zonlarından biridir. [10, 11, 13, 15]. KAFZ, 1939 Erzincan Depremi'nden itibaren doğudan batıya doğru göç eden depremler ( $M > 7$ ) ile kırılmıştır [11-12] (Şekil 1). 17 Ağustos 1999 İzmit depremi ( $M_w 7.4$ ), İzmit Körfezi ile Gölyaka (Düzce) arasında yaklaşık 150 km uzunluğundaki Hersek, Karamürsel-Gölcük, İzmit-Sapanca Gölü, Sapanca-Akyazı ve Karadere segmentlerinin kırılmasına neden olmuştur [13-17]. 17 Ağustos 1999 İzmit depreminden yaklaşık 3 ay sonra, KAFZ üzerinde bulunan Düzce havzasının güneyinde 12 Kasım 1999 Düzce depremi ( $M_w 7.2$ ) meydana gelmiştir. Deprem, Bolu'nun batısında; Kaynaşlı'nın doğusu ile Gölyaka arasında 41 km uzunluğunda yüzey kırığı oluşturmuştur [18]. İki büyük deprem sonrası Düzce ve Hendek faylarına büyük bir gerilme enerjisinin aktarıldığı ve bu faylar üzerinde deprem riskinin arttığı ileri sürülmüştür [19-20].



**Şekil 1.** Türkiye'nin sismotektonik haritası. KAFZ boyunca  $M > 7$  olan depremler. Kırmızı kare çalışma alanını; büyük oklar levhaların hareket yönünü göstermektedir (Faylar, Emre vd. 2013'den [21] değiştirilerek alınmıştır).

17 Kasım 2021 tarihinde YS ile 15.40'da Düzce Merkez'de; KAFZ üzerinde oluşan 1999 İzmit ve Düzce deprem kırıkları ile Çilimli Fayı arasında kalan alanda  $M_w 5.0$  büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir (Şekil 2). Deprem, Düzce ili ve ilçeleri ile çevre illerde hissedilmiştir. Deprem sonrası hazırlanan tahmini şiddet haritasında, depremin merkezinde şiddet değerinin VI olduğu belirtilmiştir [22]. 1999 İzmit ve Düzce depremlerinin postsismik gerilme değişimlerinin [23-24], depremlerin meydana geldiği zamandan itibaren etkisini azaltarak 17 Kasım 2021 Merkez (Düzce) depremi ( $M_w 5.0$ ) kırılma düzlemi üzerine 5 barlık gerilme yüklediği tespit edilmiştir [25]. 17 Kasım 2021 Merkez (Düzce) depremi ( $M_w 5.0$ ) sonrası aynı gün 15.57'de  $M_w 4.3$  ve 21.35'te  $M_w 3.9$  büyüklüklerinde iki artçı şok meydana gelmiştir.

Deprem kaynak parametrelerinin belirlenmesi, levha tektoniğinin, deprem süreçlerinin ve kabuksal gerilme dağılımlarının anlaşılması açısından önemlidir. Kaynak mekanizmasının belirlenmesinde iki

ana yaklaşım vardır: Bunlardan biri, sismogramlardaki cisim dalgası sinyallerinin ilk hareket polaritesinin ve/veya genliğinin kullanımı (örn; [26]), ikincisi ise dalga formu ters çözümü ile bölgesel veya daha büyük ölçekteki deprem kaynak parametrelerinin belirlenmesidir. Dalga formu ters çözümüne yönelik çeşitli yaklaşımlar, gözlemsel veriler ile yer kabuğu hız modelini kullanarak üretilmiş sentetik dalga formları arasındaki karşılaştırmaya dayanır (örn; [27-34]).

Sismik yerdeğiştirmenin neden olduğu statik Coulomb gerilme dağılımının depremi oluşturan fayın civarında bulunan diğer faylar üzerindeki kırılma gerilmesine olan etkisi, yoğun bir şekilde incelenmektedir [35-41]. Öncü depremler, ana şok, artçı depremler ve bölgede oluşan diğer depremler arasındaki etkileşimin varlığına dair çalışmalarda, ilk önceleri kayma gerilmesinin etkin olduğu ortaya atılmış [42], daha sonraları ise Coulomb kırılma kriterlerinin yer kabuğundaki kırıkları daha iyi bir şekilde açıklayabileceği ileri sürülmüştür [36, 43]. Coulomb gerilme dağılımı araştırmaları, meydana gelmiş depremin neden olduğu statik gerilme değişimlerinin aynı fay veya komşu faylar boyunca meydana gelecek depremlerin oluş zamanını etkileyebileceğinden, gelecekteki sismik tehlikenin ve deprem olasılıklarının yorumlanmasında etkili şekilde kullanılmıştır [44-48].

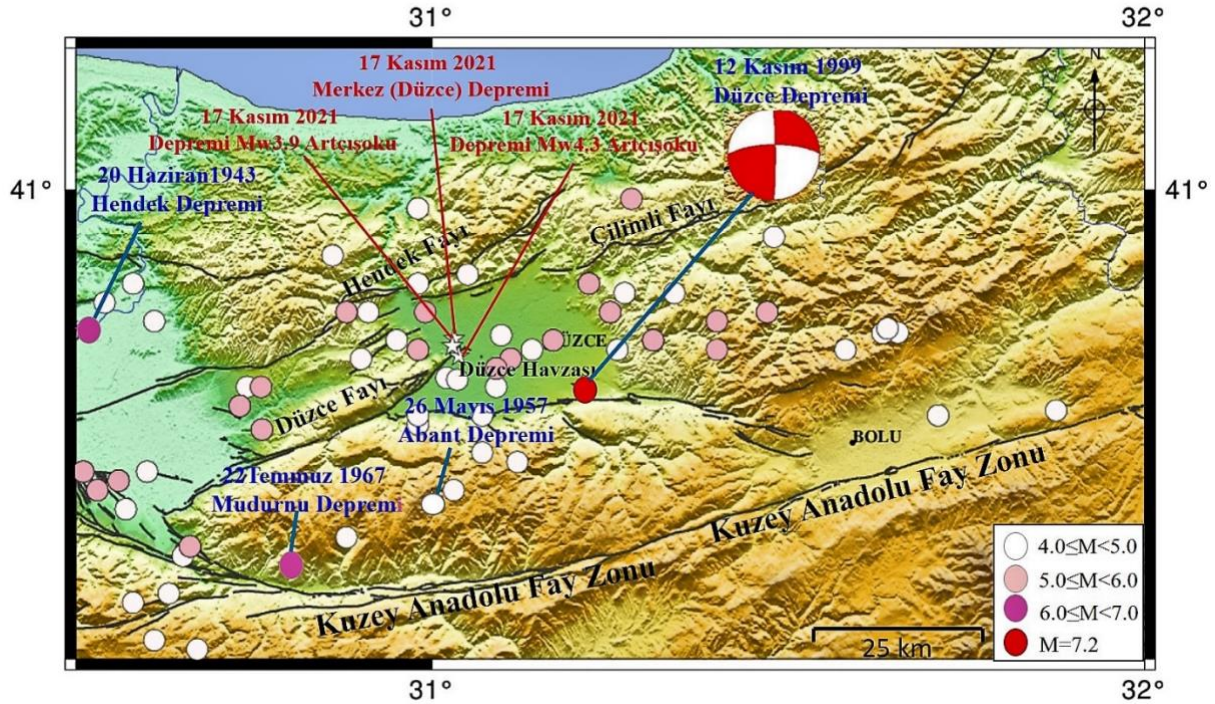
Bu çalışmanın amacı, 17 Kasım 2021 tarihinde (YS 15.40) 1999 İzmit ve Düzce deprem kırıkları ile Çilimli Fayı arasında kalan alanda meydana gelen depremin (Mw5.0) ve bu deprem sonrası meydana gelen iki artçı şokun kaynak mekanizmalarını hesaplayarak bölgesel tektonizmayı incelemek ve Merkez (Düzce) depreminin bölgedeki gerilme alanına etkisini tespit etmektir.

## **II. BÖLGENİN SİSMOTEKTONİK ÖZELLİKLERİ**

Sismik olarak dünyanın en aktif fay zonlarından biri olan KAFZ boyunca yer değiştirme, ana faydan Anadolu Levhasının içerisine doğru uzanarak ayrılan birçok yan kolun görünür ötelenmeleri nedeniyle doğudan batıya azalmaktadır [3-4, 49-64]. Yapılan araştırmalar sonucunda zonun doğusunda  $85\pm 5$  km, batısında ise yaklaşık  $25\pm 5$  km arasında toplam atım hesaplanmıştır [49, 63-65]. KAFZ üzerinde doğuda 1939 Erzincan Depremi (Ms7.9) ile başlayan ve batıya doğru ilerleyen  $M>7$  olan depremlerin son halkası 17 Ağustos 1999 İzmit depremi (Mw7.4) ve bu depremden yaklaşık üç ay sonra meydana gelen 12 Kasım 1999 Düzce (Mw7.2) depremidir (Şekil 1). Yapılan çalışmalar, bu depremler sonrası Düzce Havzası ve civarındaki faylara gerilme yüklendiğini ortaya koymuştur [19-20, 23-24]

17 Kasım 2021 Merkez (Düzce) depremi (Mw5.0), Düzce Havzası'nda meydana gelmiştir (Şekil 2). Düzce Havzası, Kuzey Anadolu Fay Zonu'na bağlı olarak meydana geldiği ileri sürülen genç çöküntü bir havzadır [66]. Düzce Havzası'ndaki faylar, Düzce, Hendek ve Çilimli faylarıdır (Şekil 2) [19]. Yaklaşık 70 km uzunluğundaki Düzce fayı, D-B uzantılı sağ yönlü doğrultu atımlı aktif faydır (Şekil 2) [67-68]. 12 Kasım 1999 Düzce depremi (Mw7.1), Düzce Fayı üzerinde meydana gelmiş, 41 km'lik bir yüzey kırığı oluşturmuştur [18]. Düzce Havzası'nın batısında KD-GB uzanımlı sağ yönlü doğrultu atımlı olan Hendek Fayı, yaklaşık 50 km uzunluğundadır [19] (Şekil 2). Düzce Havzası'nın kuzeyinde bulunan ve yaklaşık olarak 13 km uzunluğunda olan Çilimli Fayı ise aktif fay olarak değerlendirilmiştir [19] (Şekil 2).

17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi (Mw7.4), yaklaşık 110 km uzunluğunda yüzey kırığı oluşturmuş ve maksimum 5 m yer değiştirmeye neden olmuştur [13, 15]. Bu kırığın doğuya doğru uzantısı 12 Kasım 1999 Düzce depremi (Mw7.2) olarak değerlendirilmiştir. 1957 Abant (Ms7.1) [69] ve 1967 Mudurnu (Ms6.8) [70] depremleri çalışma alanının güneyinde, 1943 Adapazarı (Ms6.6) [69] depremi ise çalışma alanının batısında meydana gelmiştir (Şekil 2). Hendek Fayı üzerinde 1943 Hendek depreminden başka son yüzyılda yıkıcı bir deprem olmamıştır [11, 71-72]. Düzce Fayı üzerinde tarihte meydana gelen en son ve yıkıcı deprem ise 25 Mayıs 1719 yılında meydana gelmiştir [72].



**Şekil 2.** 1990-2021 yılları arasında meydana gelmiş  $M \geq 4.0$  olan depremler ile bu çalışmada kullanılan 17 Kasım 2021 Merkez (Düzce) depremi ( $M_w 5.0$ ) ve iki artçı şokun ( $M_w 4.3$ , YS 15.57;  $M_w 3.9$ , YS 21.35) dış merkezleri ve bölgedeki faylar (Faylar, Emre vd., 2013' den [21] değiştirilmiştir) (12 Kasım 1999 Düzce depreminin ( $M_w 7.2$ ) kaynak mekanizma çözümü USGS'ten [73] alınmıştır.)

### III. YÖNTEM

Bu çalışmada, Merkez (Düzce) depremi ( $M_w 5.0$ ) ve artçı şoklarının kaynak parametrelerini hesaplamak için Herrmann (2013) [74] tarafından geliştirilen bölgesel moment tensor ters çözüm yöntemi (MT) uygulanmıştır.

MT yöntemi, gözlemsel sismogramların, sismik kaynak veya sismik kaynak yayılımının yönlerini hesaba katan bir dizi doğrusal filtrenin çıktısı olduğu temeline dayanır [75]. Buna göre, gözlenen sismogram  $u(t)$ ;

$$u(t) = s(t) * g(t) * i(t) \quad (1)$$

şeklinde yazılır. Burada  $s(t)$ : sismik kaynaktan gelen sinyal,  $g(t)$ : yer transfer fonksiyonu,  $i(t)$  ise sismometrenin yanıtıdır. \* konvolüsyonu temsil eder. (1) eşitliği geliştirilerek

$$u_n(x, t) = s(t) * i(t) \sum_{i=1}^5 (m_i \cdot G_{in}(t)) \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $m_1 = M_{11}$ ,  $m_2 = M_{22}$ ,  $m_3 = M_{12}$ ,  $m_4 = M_{13}$ ,  $m_5 = M_{23}$  ve  $u_n$ : düşey (Z), teğetsel (T) veya ışımsal (R) yer değiştirilmez. Bu durumda yer transfer fonksiyonunun yerine sismik moment tensörü  $m_i$  ve buna karşılık gelen Green fonksiyonların çarpımının toplamı alınır [76-75]. Belirli bir mesafede keyfi bir moment tensörü için sentetik dalga formu üretmek için beş temel Green fonksiyonunun hesaplanması gerekir [75]. Kaynak zaman fonksiyonunun, kaynak derinliğinin, alet yanıtı olan  $i(t)$ 'nin bilindiğini varsayılırsa,  $s(t)$  ve  $i(t)$  doğrudan Green fonksiyonları ile evrişerek

$$u = G m \quad (3)$$

şeklinde yazılır. Burada  $G$ : konvolüsyon sonrası Green fonksiyonu içeren matrix,  $u$ : gözlemsel sismogramı içeren vektör,  $m$  ise moment tensör vektörüdür.

Bu çalışmada, Merkez (Düzce) depremi ( $M_w5.0$ ) ve artçı şoklarının kaynak parametreleri Herrmann (2013) [74] tarafından geliştirilen MT yöntemi grid arama tekniği ile bulunmaktadır [74]. Grid arama tekniğinde, deprem doğrultu ve kayma açısı ile karakterize edilen en uygun dislokasyonu elde etme amaçlanır. Bunun için veri seti olarak filtrelenmiş zemin hız bilgisi kullanılır. Kaynak derinliğinin tespiti için,  $10^\circ$ lik artışlarla tüm doğrultu, eğim ve atım açısı değerleri üzerinde arama gerçekleştirilir, ardından en uygun olarak görülen yaklaşık  $20^\circ$ lik bir bölgede  $5^\circ$ lik daha detaylı arama yapılır. Her bir sinyal, dış merkez uzaklığına bağlı olarak ağırlıklandırılır. Grid arama algoritması, dalga şeklini daha uyumlu hale getirmek için çalışır. Bu nedenle her istasyon doğrultusunda Green fonksiyonlarının sismogramlarla uyumsuzluğunu en aza indirir. Uyumsuzluğun en aza indirgenebilmesi için zaman kayması uygular. Bu durumda en uyumlu sentetik ve gözlemsel veriler hizalanır.

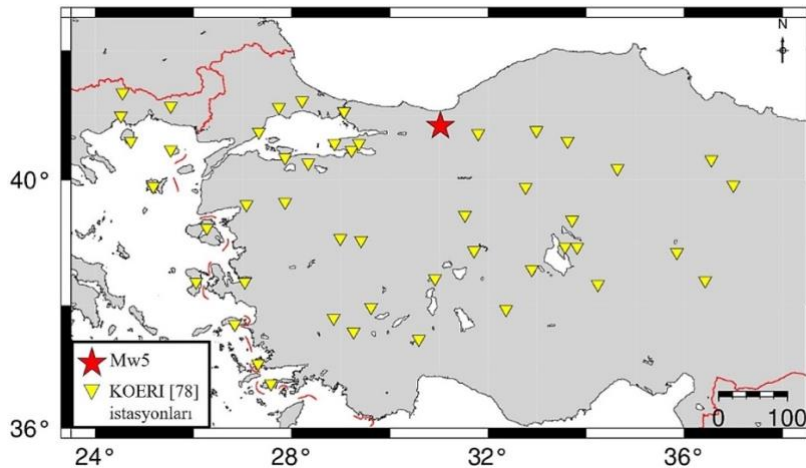
Kaynak parametrelerinin hesaplanmasından sonra bu çalışmada Merkez (Düzce) depreminin bölgedeki gerilme değişimine etkisi [77] araştırılmıştır. Coulomb gerilme değişiminde [77] statik yer değiştirmeler, faylarda meydana gelen gerilme ve deformasyonları hesaplamak için kullanılır. Kayma geriliminin artması veya azalması; kaynak fayın konumu, geometrisi, eğimi ve atımı da dahil olmak üzere alıcı fayın konumu ve geometrisine bağlıdır [77]. Faylarda meydana gelen yer değiştirmeler, gerilmeler ve deformasyon, herhangi bir yüzeyde veya herhangi bir derinliğe göre hesaplanabilir. Elde edilen olan Coulomb statik gerilme değişimi, artçı şok ve fay haritaları ile uyumlu olmalıdır [48]. Bütün hesaplamalar, üniform izotrop ortamlar ile yarı sonsuz yüzey düşünülerek yapılabilmektedir. Coulomb gerilme değişimi,

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau - \mu'\Delta\sigma_n \quad (4)$$

formülü ile hesaplanır. Burada  $\Delta\tau$ ; hedeflenen fay düzlemindeki kesme gerilmesindeki değişim,  $\Delta\sigma_n$  hedef fay düzlemine dik yöndeki normal gerilmedeki değişim,  $\mu'$  ise etkin sürtünme katsayısıdır. Laboratuvar deneylerinden  $\mu'$  sürtünme katsayısının 0 ile 0.8 arasında değiştiği bilinmektedir [77].

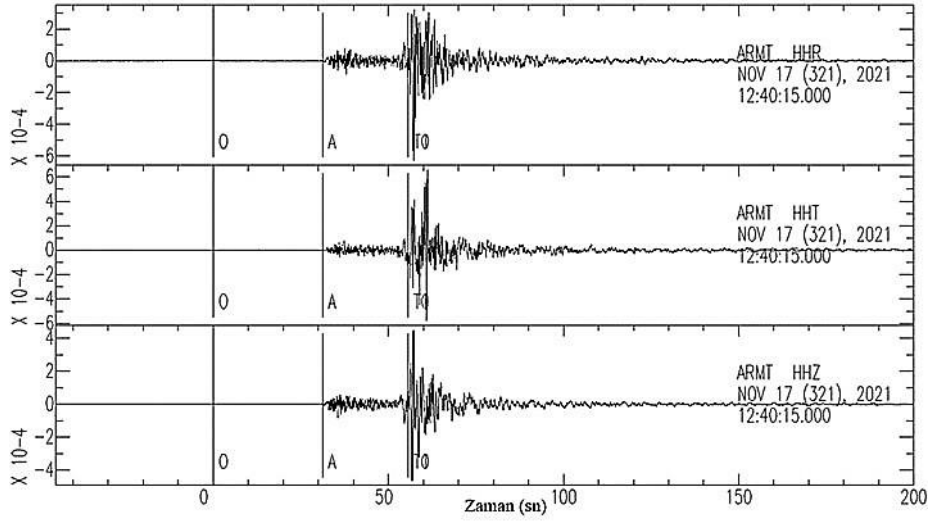
## **IV. VERİLER ve BULGULAR**

Merkez (Düzce)'de meydana gelen deprem ( $M_w5.0$ ) ve bu depremin iki artçı şokunun ( $M_w4.3$  ve  $M_w3.9$ ) odak mekanizma çözümleri, Herrmann (2013) [74] tarafından geliştirilen MT yöntemi ile hesaplanmıştır. Çözüm için, 400 km yarıçaplı alandaki Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü [78] tarafından sağlanan yüksek kazançlı (HH) sismometreler ile kaydedilen üç bileşenli dalga formu verileri kullanılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Merkez (Düzce) depremi ( $M_w5$ ) dalga formu ters çözümü için kullanılan istasyonlar.

KOERI [78] tarafından sağlanan yüksek-kazanç (HH) ve geniş-bant (BH) üç bileşenli deprem kayıtlarına alet düzeltmesi yapılmış, rotasyona tabii tutularak, R (radial=ışınsal) ve T (transverse=teğetsel) bileşenleri elde edilmiştir. Burada Z bileşeni ise düşey bileşendir. Şekil 4'te buna ilişkin KOERI-ARMT örneği verilmiştir.



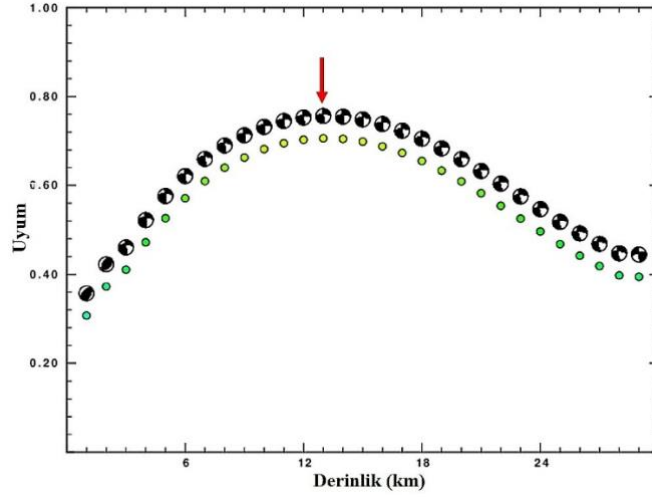
**Şekil 4.** Bölgesel moment tensor ters çözümü için kullanılan KOERI-ARMT istasyonu dalga formu verisi R-T-Z bileşeni (0'daki düşey çizgi depremin başlangıç zamanını, A'daki düşey çizgi P dalgasının; T0'daki ise S dalgasının varış zamanlarını gösterir).

Yüzey dalgalarına daha iyi odaklanabilmek için verilerin örnekleme aralığı 0.025 sn'ye çıkarılmıştır. Verilerin kalite kontrolü yapılarak gürültülü sinyaller ayıklanmış ve kalan sinyaller ters çözüm işlemine tabii tutulmuştur.

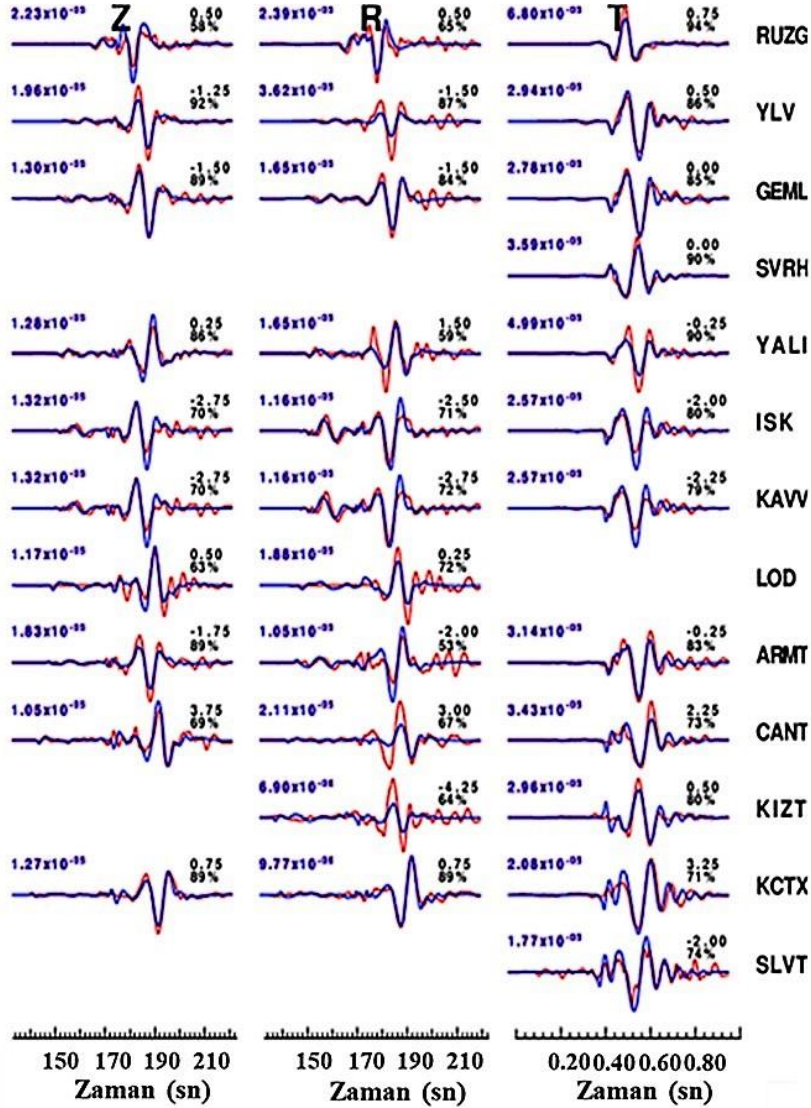
Herrmann (2013) [74] tarafından geliştirilen MT yönteminde, çalışılan depremlerin büyüklüklerinin  $M_w \leq 5.0$  olması nedeniyle 0.02–0.10 Hz frekans bandında band geçişli filtre kullanılmıştır [74]. Sentetik Green fonksiyonları elde edebilmek için 1-Boyutlu hız modeli kullanılmıştır [79] (Tablo 1). Sentetik Green fonksiyonlar, hız modeli, kaynak lokasyonu ve alıcı pozisyonuna bağlı olarak 1 ila 29 km arasındaki derinliklerde (1 km'lik artışlarla) hesaplanmıştır. Her bir kaynak derinliği ile ilişkili en uyumlu mekanizma, kaynak derinliğinin fonksiyonu olarak grid arama (ters çözüm) yöntemiyle [74] hesaplanmıştır. Merkez (Düzce) depremi ( $M_w 5$ ) için en iyi uyumun 13 km derinlikte olduğu görülmüştür (Şekil 5). En iyi çözüm için tahmin edilen ve filtrelenmiş gözlemlenen dalga formları Şekil 6'da verilmiş ve 13 km derinlikteki doğrultu, eğim ve atım değerleri grid arama yöntemindeki en iyi çözüm olarak kabul edilmiştir.

**Tablo 1.** Kullanılan Hız Modeli [79].

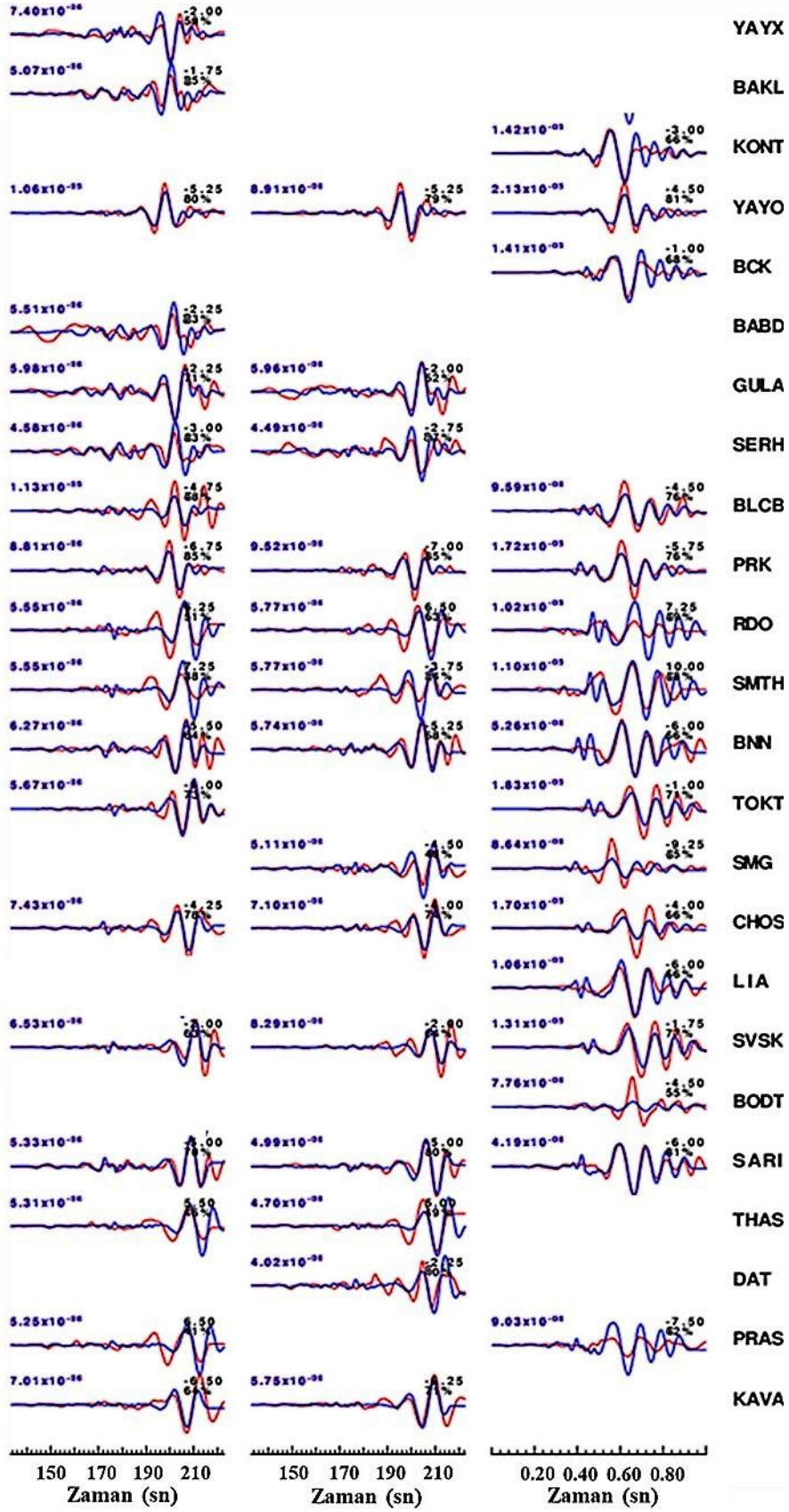
$V_p$ (m/sn)	$V_s$ (m/sn)	Derinlik (km)
3.55	1.99	0.0
3.57	2.01	0.5
3.70	2.08	1.0
5.35	3.01	2.0
5.67	3.19	3.0
5.90	3.31	5.0
6.02	3.38	7.0
6.07	3.41	10
6.10	3.43	14
6.18	3.47	18
6.67	3.75	30
8.00	4.49	50



Şekil 5. 17 Kasım 2021 Merkez (Düzce) depremi ( $M_w 5.0$ ) dalgı formu mekanizmaları için derinlik-uyum grafiği (Kırmızı ok, en iyi uyumu veren derinliği göstermektedir).



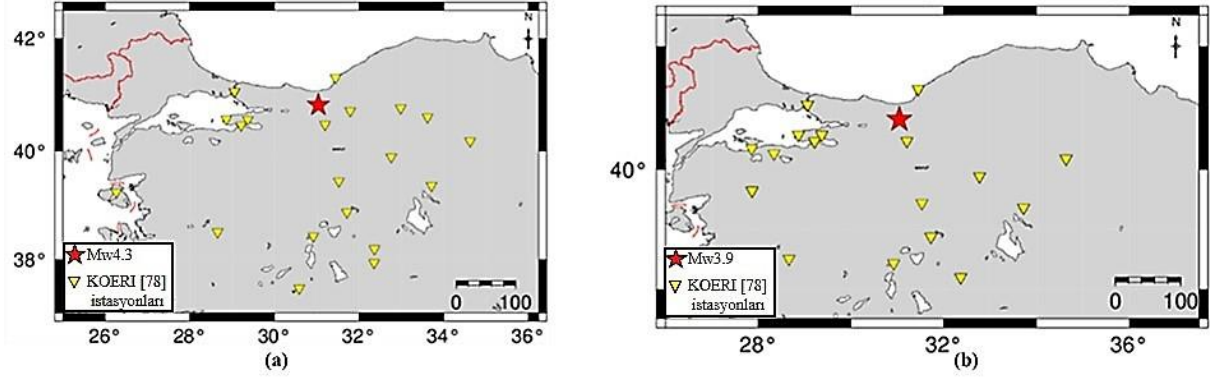
Şekil 6. (Devamı arka sayfada)



Şekil 6. Merkez (Düzce) depremi ( $M_w 5.0$ ) için seçilen derinlikteki (13 km) dalga formu karşılaştırmaları (Kırmızı: gözlemlenmiş; mavi: hesaplanmış dalga formu; soldaki sayılar, pik genlikleri; sağ üstteki sayılar, gözlemlenen ve tahmin edilen izler arasındaki maksimum korelasyon için gereken zaman kaymasını; sağ alttaki sayılar, uyumu karakterize eden varyans azaltma yüzdesini gösterir. Sağdaki harfler ise istasyon isimleridir).

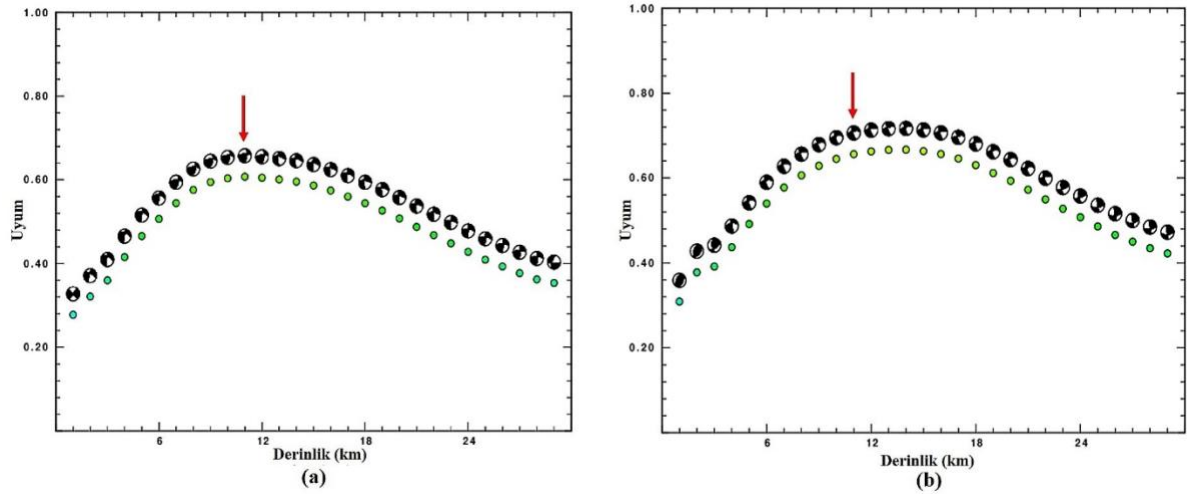




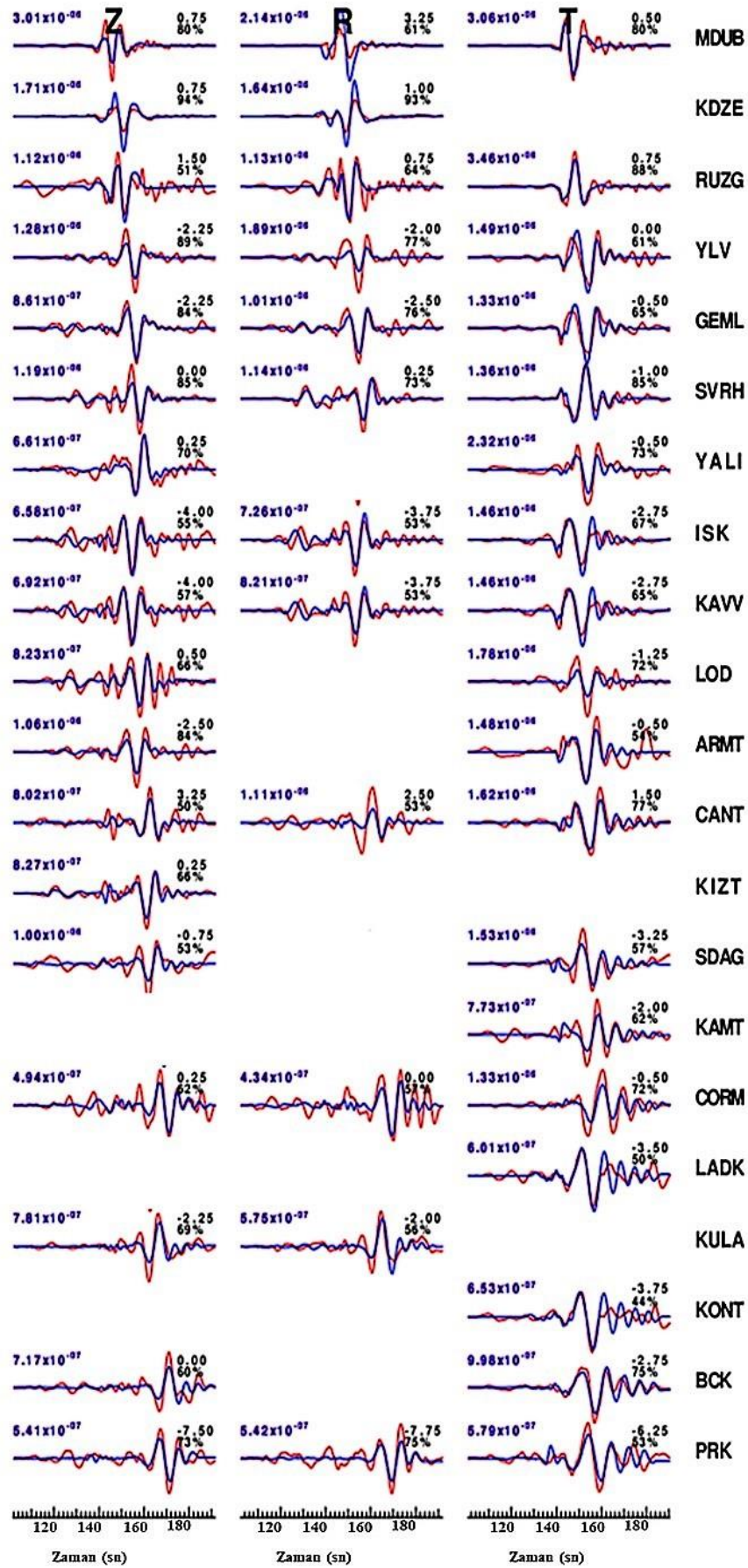


**Şekil 8.** Merkez (Düzce) depremi (a) Mw4.3 (b) Mw3.9 artçı şok dalga formu ters çözümü için kullanılan istasyonlar

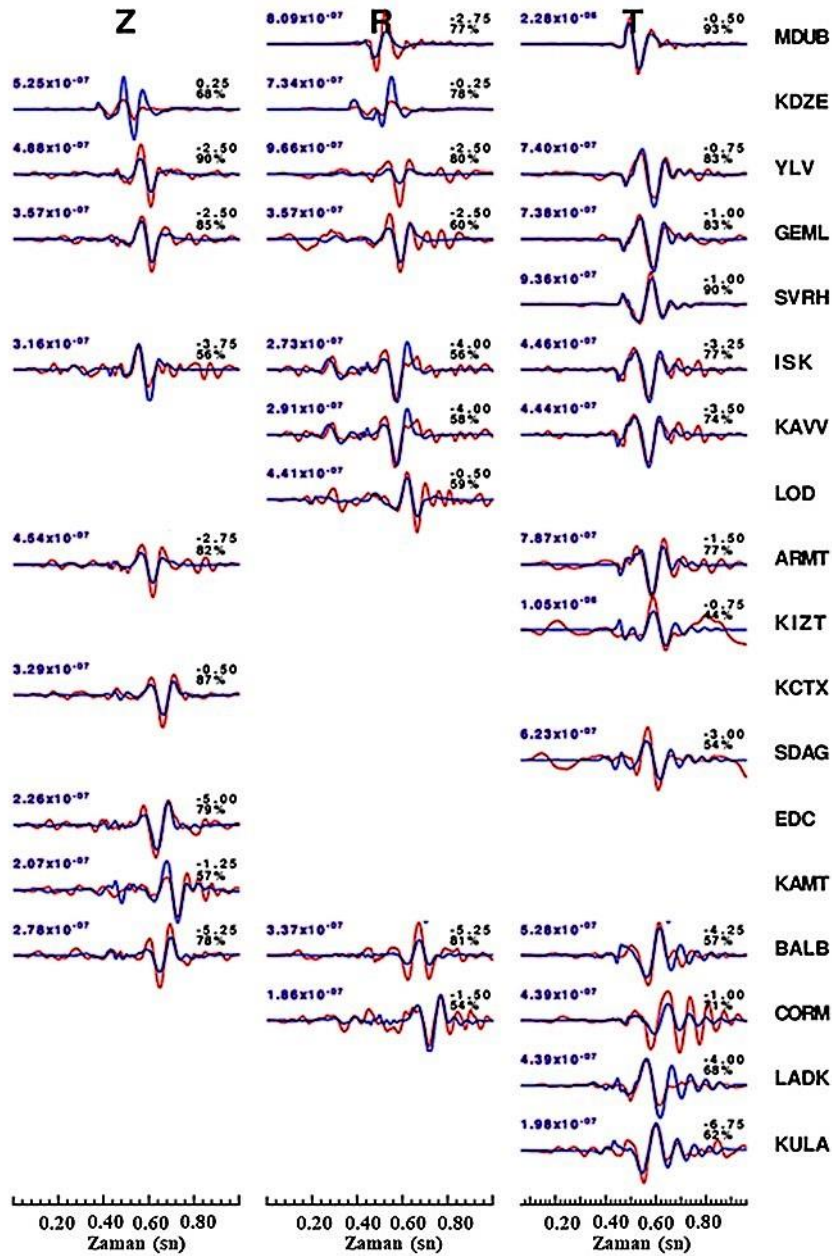
Ana şokta yapılan adımlar izlenerek, her iki artçı şok için 11 km derinlikteki kaynak parametreleri en iyi çözüm olarak bulunmuştur. Derinlik-uyum grafikleri Şekil 9'da, en iyi çözüm için tahmin edilen ve filtrelenmiş gözlemlenen dalga formları, Şekil 10'da verilmiştir. Merkez (Düzce) depremi ve iki artçı şok için en iyi uyum gösteren derinlikteki doğrultu, eğim ve atım değerleri Tablo 3 ve Şekil 11 (a)'da gösterilmiştir.



**Şekil 9.** Merkez (Düzce) depreminin (a) Mw4.3 ve (b) Mw3.9 artçı şokları moment tensör ters çözüm Derinlik-Uyum grafiği (Kırmızı ok, en iyi uyumu veren derinliği göstermektedir).



(a)



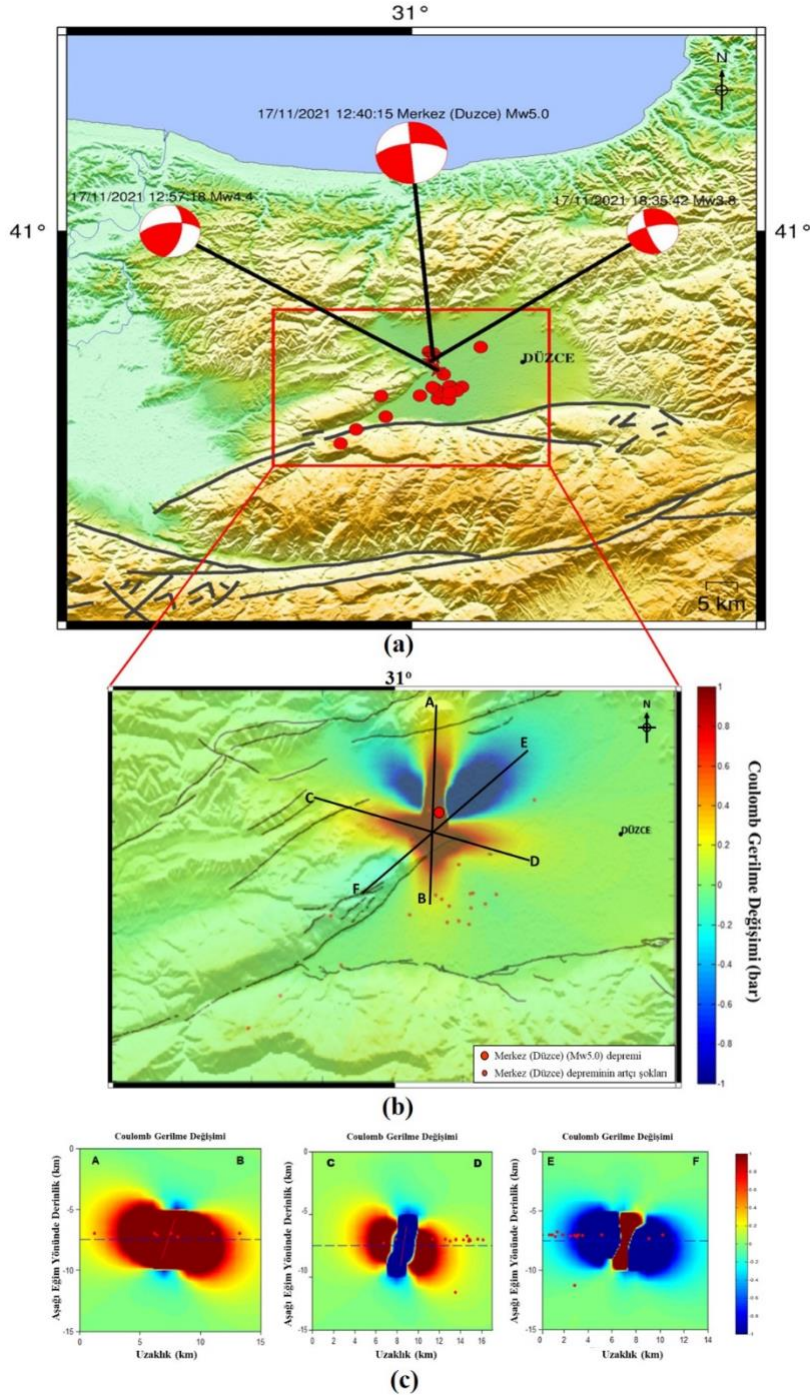
(b)

**Şekil 10.** Merkez (Düzce) depreminin (a) Mw4.3 ve (b) Mw3.9 artçı şokları için seçilen derinlikteki (11 km) dalga formu karşılaştırmaları (Kırmızı: gözlemsel; mavi: hesaplanmış dalga formunu; soldaki sayılar, pik genlikleri; sağ üstteki sayılar, gözlemlenen ve tahmin edilen izler arasındaki maksimum korelasyon için gereken zaman kaymasını; sağ alttaki sayılar, uyumu karakterize eden varyans azaltma yüzdesini ifade eder. Sağdaki harfler ise istasyon isimleridir).

**Tablo 3.** 17 Kasım 2021 Merkez (Düzce) depremi ve artçı şokları için bu çalışmada hesaplanan I. ve II. düğüm düzlemleri doğrultu, eğim ve kayma değerleri, Mw ve momentleri (Der.:Derinlik, D:Doğrultu, E:Eğim, A:Atım; 1 ve 2: I. ve II. Düğüm Düzlemlerini temsil eder).

Tarih (yıl/ay/gün)	Zaman (s:dk:sn)	Enlem (o)	Boylam (o)	Mw	Der. (km)	D1	E1	A1	D2	E2	A2	Moment ( $\times 10^{21}$ dyne-cm)
17/11/2021	15:40:15	40.8413	31.0310	4.8	13	265	65	-180	175	90	-25	16.80
17/11/2021	15:57:18	40.8228	31.0375	3.9	5.4	264	64	146	10	60	30	08.61
17/11/2021	21:35:42	40.8338	31.0282	3.7	2.6	255	71	-164	160	75	-20	04.62

Merkez (Düzce) depreminin bölgedeki gerilme rejimini nasıl etkilediğini araştırmak için; Coulomb 3.3 paket programı [77] kullanılmıştır. Coulomb gerilme değişimi için  $\mu'$  değeri 0.4 olarak kabul edilmiştir [80-81]. Coulomb gerilme değişim haritası Şekil 11 (b)'de verilmiştir. Coulomb gerilme değişim haritasında AB, CD ve EF yönlerinde 30 km derinlikteki gerilme değişimlerini incelemek için kesitler alınmıştır (Şekil 11 (b)). Alınan derinlik kesitlerinde yapılan incelemede, yaklaşık 15 km'den sonra gerilmede herhangi bir değişim gözlemlenmediğinden kesitler 15 km ile sınırlandırılmıştır (Şekil 11 (c)).



**Şekil 11** (a) Merkez (Düzce) depremi (Mw5.0) ile Mw4.3 ve Mw3.9 artçı şokları için elde edilmiş odak mekanizması çözümleri (kırmızı daireler Merkez (Düzce) depremi (Mw5.0) ve artçı şoklarının dış merkezlerini gösterir). (b) Bölgedeki Coulomb gerilme değişimi ve alınan profiller (A-B, C-D, E-F) (c) Coulomb gerilme değişimi haritasındaki profillerden elde edilen kesitler ((i)-AB (ii)-CD, (iii)-EF profillerinin aşağı eğim yönünde derinlik-uzaklık gerilme değişim kesitleri) (Kırmızı renk gerilme artışı, mavi renk gerilme azalmasını göstermektedir).

## **V. TARTIŞMA ve SONUÇLAR**

Bu çalışmada 17 Kasım Merkez (Düzce) depremi ile iki artçı şokun kaynak mekanizma çözümleri Herrmann (2013) tarafından geliştirilen moment tensör ters çözüm yöntemiyle (MT) [74] bulunmuştur. Buna göre, Merkez (Düzce) depremi sentetik ve gözlemsel dalga formu verileri arasındaki en iyi uyumu 13 km derinlikte vermiştir. Birinci düğüm düzleminin doğrultu, eğim ve atımı sırasıyla 265, 65 ve -180 derece; moment büyüklüğü 4.8, momenti  $16.80 \times 10^{21}$  dyne-cm olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada elde edilen kaynak parametreleri, diğer deprem veri merkezlerinden elde edilen fay çözümleri ile karşılaştırılmış, diğer deprem veri merkezleri tarafından elde edilen sonuçlar ile bu çalışmada elde edilen çözümlerin uyumlu olduğu görülmüştür (Tablo 2, Şekil 7). Bu çalışmada bulunan moment ve moment büyüklüğü değerleri ise USGS tarafından elde edilmiş değerler ile uyumludur (Tablo 2). KOERI ve AFAD moment büyüklük değerleri 0.1-0.2 kadar farklılık göstermektedir. Bu farklılığın, bu çalışmada daha fazla istasyon (48 istasyon) kullanılmasından dolayı (AFAD, 11 istasyon [79]; KOERI, 25 istasyon [22]) olduğu düşünülmektedir. Ana şokun, KD-GB uzanımlı doğrultu atımlı fay üzerinde meydana geldiği düşünülmektedir. Ayrıca, Merkez (Düzce) depremi (Mw5) fay çözümünün, 12 Kasım 1999 Düzce depremi ile benzer kaynak mekanizmasına sahip olduğu görülmüştür (Şekil 1).

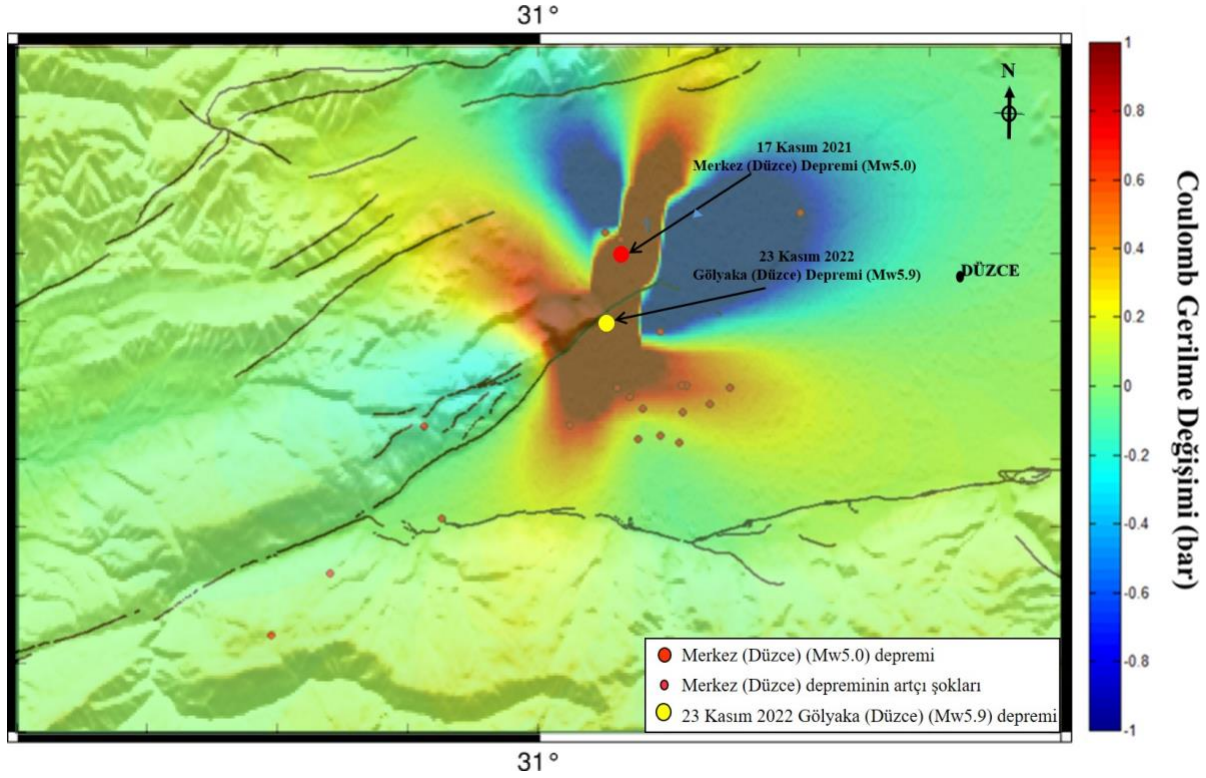
Merkez (Düzce) depreminin YS ile 17.57'de meydana gelen Mw4.3 büyüklüğündeki artçı şokunun moment tensör çözümünün 11 km derinlikte verdiği en uyumlu çözümde, birinci düğüm düzleminin doğrultu, eğim ve atımı 264, 64 ve 146 derece olarak bulunmuştur. Bu artçı şokun moment büyüklüğü 3.9, momenti ise  $8.61 \times 10^{21}$  dyne-cm olarak hesaplanmıştır (Tablo 3, Şekil 11(a)). Kaynak mekanizmasının doğrultu atım bileşeni olan ters faylanma olduğu bulunmuştur.

YS ile 21.35'te meydana gelen Mw3.9 büyüklüğündeki ikinci artçı şok için moment tensör çözümü 11 km derinlikte en uyumlu sonucu vermiştir. Buna göre, birinci düğüm düzlemi doğrultu, eğim ve atım değerleri 255, 71 ve 164 derece olarak bulunmuş, moment büyüklüğü 3.7, momenti  $4.62 \times 10^{21}$  dyne-cm olarak hesaplanmıştır (Tablo 3, Şekil 11(a)). Bu artçı şokun da faylanma mekanizmasının KD-GB uzanımlı doğrultu atımlı olduğu görülmüştür.

Coulomb 3.3 paket programı kullanılarak [77] Merkez (Düzce) depreminin bölgedeki gerilme rejimine etkisi tespit edilmiştir. Buna göre, Merkez (Düzce) depreminin (Mw5), meydana geldiği alanda K-G ve BKB-DGD yönünde baskın gerilme alanları oluşturduğu görülmüştür. Ayrıca, Coulomb gerilme haritasında yaklaşık K-G, KB-GD ve KD-GB yönlerinde 30 km derinlik için profiller alınmış (Şekil 11(b)), derinlik-gerilme değişim kesitleri elde edilmiştir (Şekil 11(c)). Gerilmenin yaklaşık 15 km derinliğe kadar etkili olduğu, 15 km'den sonra gerilmede değişim olmadığı tespit edilmiştir.

Çalışma alanındaki deprem etkinliği incelenmiş, Merkez (Düzce) depreminin meydana geldiği alanda 1999 yılından beri  $M \geq 4.0$  olan depremin meydana gelmediği tespit edilmiştir (Şekil 2). Merkez (Düzce) depreminin, meydana geldiği bölgede tektonik gerilmeyi KD-GB yönünde azalttığı; K-G ve BKB-DGD yönünde yakın faylara ise 0.5-1.0 bar arasında gerilme yüklediği bulunmuştur. Dolayısıyla sismik tehlike, gerilmenin yükseldiği yönlerdeki yakın faylar üzerinde artmıştır.

23 Kasım 2022 tarihinde YS ile 04.08'de Gölyaka (Düzce) depremi (Mw5.9), bu çalışmada gerilmenin arttığına işaret edilen bölgede meydana gelmiştir (Şekil 12). Ayrıca derinlik kesitleri alınırken 30 km derinlik için inceleme yapılmış, derinlikte 15 km'den sonra değişim gözlenmemiş, özellikle 5 ile 10 km'ler arasındaki derinlikte gerilmenin yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 11(c), (i)-(ii)). 23 Kasım 2022 Gölyaka (Düzce) depremi (Mw5.9) 6.81 km derinlikte meydana gelmiştir [83].



Şekil 12. Çalışma alanındaki Coulomb gerilme değişimi (Kırmızı renk gerilme artışı; mavi renk gerilme azalımı işaret etmektedir).

**TEŞEKKÜR:** Bu makalenin gelişmesinde görüşleri ile katkıda bulunan hakemlere ve Dr. Recep ÇAKIR'a teşekkür ederim.

## VI. KAYNAKLAR

- [1] D.P. McKenzie, "Active tectonics of the Mediterranean region", *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, 30, 109-185, 1972.
- [2] Ö. Alptekin, "Focal Mechanisms of Earthquakes in Western Turkey and Their Tectonic Implications" Ph.D. thesis, New Mexico Institute of Mining and Teach., Socorro, New Mexico, USA, 1973.
- [3] , A.M.C. Şengör, "The North Anatolian Transform Fault: its age, offset and tectonic significance", *Journal of Geol. Soc. London*, 136:269–82, 1979.
- [4] A.M.C. Şengör, N. Görür, F. Şaroğlu, "Strike slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. In Strike-slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation", *Soc. Econ. Paleontol. Miner. Spec. Publ. 37* (in honor of J.C. Crowell), ed. KT Biddle, N Christie-Blick, pp. 227–64, 1985.
- [5] R.E. Reilinger, S.C. McClusky, M.B. Oral, R.W. King, M.N. Toksöz, "Global Positioning System measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa- Eurasia plate collision zone", *J. Geophys. Res.*, 102:9983–99, 1997.
- [6] S. McClusky, S. Balassanian, A. Barka, C. Demir, S. Ergintav, I. Georgiev, O. Gurkan, M. Hamburger, K. Hurst, H. Kahle, K. Kastens, G. Kekelidze, R. King, V. Kotzev, O. Lenk, S. Mahmoud,

A. Mishin, M. Nadariya, A. Ouzounis, D. Paradissis, Y. Peter, M. Prilepin, R. Reilinger, I. Sanli, H. Seeger, H., A. Tealeb, M.N. Toksöz, G. Veis, “GPS constraints on plate kinematics and dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus”, *J. Geophys. Res.*, 105, 5695-5719, 2000.

[7] L. Gülen, A. Pınar, D. Kalafat, N. Özel, G. Horasan, M. Yılmaz, A.M. Işıkara, “Surface Fault Breaks, Aftershock Distribution, and Rupture Process of the August 17, 1999 Izmit, Turkey Earthquake”, *Bulletin of the Society of America*, 92, 230-244, 2002.

[8] A. Allen, J. Jackson, R. Walker, “Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates”, *Tectonics*, 23, TC2008, doi:10.1029/2003TC001530, 2004.

[9] R. Reilinger, S. McClusky, P. Vernant, S. Lawrence, S. Ergintav, R. Çakmak, M. Nadariya, “GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B5), 2006.

[10] H. Yalçın, L. Gülen, Z. Çağnan, D. Kalafat, “Kıbrıs ve Yakın Çevresinin Depremselliği”, 65. Jeoloji Kurultayı, Bildiri Özetleri Kitabı, s 4-5. Ankara, 2012.

[11] A. Barka, “Slip distribution along the North Anatolian Fault associated with large earthquakes of the period 1939 to 1967”, *Bull. Seis. Soc. Amer.*, 86, 1238-1254, 1996.

[12] A. Barka, and K. Kadinsky-Cade, “Strikeslip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity”, *Tectonics*, 7, 663-684, 1988.

[13] A. Barka, H.S. Akyüz, E. Altunel, G. Sunal, Z. Çakır, “The surface rupture and slip distribution of the 17 August 1999 İzmit earthquake (M 7.4), North Anatolian Fault”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92:43–60, 2002.

[14] R.M. Langridge, H.D. Stenner, T.E. Fumal, S.A. Christofferson, T.K. Rockwell, R.D. Hartleb, J. Bachhuber, & A.A. Barka, “Geometry, slip distribution, and kinematics of surface rupture on the Sakarya Fault segment during the 17 August 1999 İzmit, Turkey, earthquake”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 107–125, 2002.

[15] R.D. Hartleb, J.F. Dolan, H.S. Akyüz, T. E. Dawson, A.Z. Tucker, B. Yerli, T.K. Rockwell, E. Toraman, E., Z. Çakır, Z., A. Dikbaş, A., and E. Altunel, “Surface rupture and slip distribution along the Karadere segment of the 12 November 1999 Düzce, Turkey, earthquakes”, *Bulletin of Seismological Society of America*, 92, 67-78, 2002.

[16] W.R. Lettis, J. Bachhuber, R.C. Witter, C. Brankman, E. Randolph, A.A. Barka, W.D. Page, A. Kaya, “Influence of releasing step-overs on surface fault rupture and fault segmentation: examples from the 17 August 1999 İzmit earthquake on the North Anatolian fault, Turkey,” *Bulletin of Seismological Society of America*, 92, 19–42, 2002.

[17] E. Herece, E. Akay, “Atlas of North Anatolian Fault (NAF). Ankara, Turkey: General Directorate of Mineral Research and Exploration”, *Special Publication Series-2*, 61: 13, 2003.

[18] R. Bürgmann, M.E. Ayhan, E.J. Fielding, T.J. Wright, S. McClusky, B. Aktuğ, C. Demir, O. Lenk, A. Türkezer, “Deformation during the 12 November 1999 Düzce, Turkey, earthquake, from GPS and InSAR data” *Bulletin of Seismological Society of America*, 92, 161–171, 2002.

[19] Ö. Emre, T.Y. Duman, Y. Awata, T. Yoshioka, A. Doğan, “17 Ağustos 1999 Doğu Marmara depremi yüzey kırığı: Eş zamanlı üçlü faylanma örneği” *ATAG-3, Bildiri Özetleri Kitabı*, s. 4, 1999.



- [20] T. Komut, Y. Ikeda, “17/08/1999 Kocaeli depremi yüzey kırığının arazi incelemesi”. ATAG-3, Bildiri Özleri Kitabı, sayfa 11, Sivas, 1999.
- [21] Ö. Emre, T.Y. Duman, S. Özalp, H. Elmacı, Ş. Olgun, F. Şaroğlu, “1/1.250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası”, *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayınlar Serisi*, Ankara, Türkiye, 2013.
- [22] B.Ü. Kandilli Rasathanesi ve DAE. Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi, 17 Kasım 2021 Yayakbaşı-Düzce Depremi, Basın Bülteni, 2021.
- [23] F.F. Pollitz, “Postseismic relaxation theory on the spherical earth”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82, 422–453, 1992.
- [24] F.F. Pollitz, “Gravitational viscoelastic postseismic relaxation on a layered spherical Earth”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B8), 17921-17941, 1997.
- [25] M. Utkucu, F. Uzunca, E. Doğan, Sakarya Üniversitesi Afet Yönetim Uygulama ve Araştırma Merkezi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 17 Kasım 2021 Yayakbaşı (Düzce) Depremi Ön Değerlendirme Raporu, Rapor No: 2021-1, Kasım 2021.
- [26] J. L. Hardebeck, and P. M. Shearer, “Using S/P amplitude ratios to constrain the focal mechanisms of small earthquakes”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, 2434-2444, 2003.
- [27] H. Kanamori, and J. W. Given, “Use of long-period surface waves for rapid determination of earthquake source parameters: 2. Preliminary determination of source mechanisms of large earthquakes ( $M_s > 6.5$ ) in 1980”, *Physics Earth Planetary Interiors*, 30, 260-268, 1982.
- [28] A. M. Dziewonski, and J. H. Woodhouse, “An experiment in systematic study of global seismicity: centroid-moment tensor solutions for 201 moderate and large earthquakes of 1981”, *Journal of Geophysical Research*, 88, 3247-3271, 1983.
- [29] A. M., Dziewonski, A. Friedman, D. Giardini, and J. H. Woodhouse, “Global seismicity of 1982: centroid-moment tensor solutions for 308 earthquakes”, *Physics Earth Planetary Interiors*, 33, 76- 90, 1983.
- [30] A. M. Dziewonski, J. E. Franzen, and J. H. Woodhouse, “Centroid-moment tensor solutions for July-September 1983”, *Physics Earth Planetary Interiors*, 34, 1-8, 1984.
- [31] D. Giardini, “Systematic analysis of deep seismicity: 200 centroid-moment tensor solutions for earthquakes between 1977 and 1980”, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 77, 883-914, 1984.
- [32] G. Ekström, and A. M. Dziewonski, “Centroid moment tensor solutions for 35 earthquakes in Western North America (1977-1983)”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 23-39, 1985.
- [33] A. M. Dziewonski, G. Ekström, J. E. Franzen, and J. H. Woodhouse, “Global seismicity of 1979: centroid-moment tensor solutions for 524 earthquakes”, *Physics Earth Planetary Interiors*, 48, 18-46, 1987.
- [34] G. Ekström, A. M. Dziewonski, and J. H. Woodhouse, “Centroid-moment tensor solutions for the 51 IASPEI selected earthquakes, 1980-1984”, *Physics Earth Planetary Interiors*, 47, 62- 66, 1987.
- [35] R.S. Stein, A.A. Barka A.A., and J.H. Dieterich, “Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering”, *Geophysical Journal International*, 128, 594-604, 1997.

- [36] G. C. P. King, R. S. Stein, and J. Lin, “Static stress changes and the triggering of earthquakes”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 935–953, 1994.
- [37] G. C. P. King, A. Hubert-Ferrari, S. S. Nalbant, B. Meyer, R. Armijo, and D. Bowman, “Coulomb stress interactions and the 17 August 1999, Izmit, Turkey earthquake”, *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences*, 333, 557–570, 2001.
- [38] A. Hubert, G.C.P. King, A. Armijo, B. Meyer and D. Papanastassiou, “Fault re-activation, stress interaction and rupture propagation of the 1981 Corinth earthquake sequence”, *Earth Planetary Science Letter*, 142, 573-585, 1996.
- [39] S. S. Nalbant, A. Hubert, and G. C. P. King, “Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the north Aegean Sea”, *Journal of Geophysical Research*, 103, 24,469–24,486, 1998.
- [40] A. Hubert-Ferrari, A.A. Barka, E. Jacques, S.S. Nalbant, B. Meyer, R. Armijo, P. Topponnier, and G.C.P. King, “Seismic hazard in the Marmara Sea region following the 17 August 1999 İzmit earthquake”, *Nature*, 404, 269-273, 2000.
- [41] G.C.P. King and M. Cocco, “Fault interaction by elastic stress changes: new clues from earthquake sequences”, *Advances in Geophysics*, 44, 1–38, 2000.
- [42] I S. Das and C. Scholz, “Theory of Time-Dependent Rupture in the Earth”, *Journal of Geophysical Research*, 86, 6039-6051, 1981.
- [43] R. Stein, and M. Liwoski, “The 1979 Homestead Valley earthquake sequence, California: control of aftershocks and postseismic deformation”, *Journal of Geophysical Research*, 88, 6477-6490, 1983.
- [44] R.S. Stein, “The role of stress transfer in earthquake occurrence”, *Nature*, Vol. 402, 605–609, 1999.
- [45] M. Utkucu, A. Pınar, Ö. Alptekin, “Uzak alan P dalga Şekillerinin Sonlu Fay Ters Çözümünden 22 Mayıs 1971 Bingöl Depremi Kırılma Sürecinin İncelenmesi”, *Yerbilimleri*, 28, 65-79, 2003.
- [46] S. Toda, R. Stein, “Toggling of Seismicity by the 1997 Kagoshima Earthquake Couplet: A Demonstration of Time-Dependent Stress Transfer”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. B12, 2567, 2003.
- [47] T. Parsons, “Recalculated probability of  $M \geq 7$  earthquakes beneath the Sea of Marmara, Turkey”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, B05304, 2004.
- [48] S. Toda, R.S. Stein, K.R. Dinger, and S.B. Bozkurt, “Forecasting the Evolution of Seismicity in Southern California: Animations Built on Earthquake Stress Transfer”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, B05S16, 2005.
- [49] İ. Seymen, “Kelkit Vadisi Kesiminde Kuzey Anadolu Fay Zonunun Tektonik Özelliği: Dr. Eng.”, *İstanbul Tek. Univ., Maden Fak.*, XIX+192 pp.+2 foldout maps, 1975.
- [50] Y. Tatar, “Kuzey Anadolu Fay Zonu’nun Erzincan-Refahiye arasındaki bölümü üzerinde tektonik incelemeler”, *Yerbilimleri Dergisi*, 5(3/4), 201-236, 1978.
- [51] A.A. Barka, “Seismo-tectonic aspects of the North Anatolian fault zone”, Ph.D. thesis, University of Bristol, England, 335 pp, 1981.
- [52] A.A. Barka, “The North Anatolian Fault zone”, *Annales Tectonicae*, 6:164–95, 1992.
- [53] A.A. Barka, P.L. Hancock, “Neotectonic deformation patterns in the convex-northwards arc of the North Anatolian fault zone”. *Geological Society, London*, Special Publications, 17(1), 763- 774, 1984.

- [54] F. Şaroğlu, “Doğu Anadolu’nun Neotektonik Dönemde Jeolojik ve Yapısal Evrimi”, Ph.D thesis. İstanbul Univ., Fen Bilim. Enst., İstanbul. 240 pp.+7 foldouts, 1985.
- [55] F. Şaroğlu, “Age and offset of the North Anatolian Fault”, *METU J. Appl. Sci.* 21:65-79, 1988.
- [56] A. Koçyiğit, “Basic geological characteristics and total offset of the North Anatolian Fault zone in Suşehri area, NE Turkey”. *METU Pure and Applied Sciences*, 22, 43-68, 1988.
- [57] A. Koçyiğit, “Suşehri Basin: An Active Faultwedge Basin on the North Anatolian Fault Zone, Turkey”, *Tectonophysics*, 167, 11–29, 1989.
- [58] A. Koçyiğit, “Tectonic setting of the Gölova basin: total offset of the North Anatolian Fault Zone, E. Pontide, Turkey”. *Ann. Tectonicae*, 4, 155-170, 1990.
- [59] V. Toprak, “Neotectonic characteristics of the North Anatolian Fault Zone between Koyulhisar and Suşehri (NE Turkey)” *METU J. Pure Ap. Sci.*, 21:155-66, 1988.
- [60] C. Yalıtırak, “Ganos Fay Sistemi’nin tektonik tarihi”. *Türk. Petrol Jeol. Derneği, Bül.* 8:137–56, 1996.
- [61] J.D.A. Piper, O. Tatar, H. Gürsoy, “Deformational behaviour of continental lithosphere deduced from block rotations across the North Anatolian Fault Zone in Turkey.” *Earth Planet. Sci. Lett.* 150:191–203, 1997.
- [62] O. Tüysüz, E. Yiğitbaş, T. Genç, U. Tari, “Batı Karadeniz Bölgesinin Tektonik Birliklerinin Ayırıcı ve 1: 500.000 Ölçekli Jeoloji Haritasının Hazırlanması [Tectonic Units of Western Black Sea Region and Their Geological Mapping at 1: 500.000 Scale]”, TÜBİTAK Project Report YDABÇAG-17, 1998.
- [63] R. Armijo, B. Meyer, A. Hubert-Ferrari, A.A. Barka, “Westward propagation of North Anatolian Fault into the Northern Aegean: timing and kinematics”. *Geology*, 27:267–70, 1999.
- [64] A.A. Barka, H.S. Akyüz, H.A. Cohen, F. Watchorn, “Tectonic evolution of the Niksar and Taşova-Erbaa pull-apart basins, North Anatolian Fault Zone: their significance for the motion of the Anatolian Block”. *Tectonophysics*, 322:243–64, 2000.
- [65] R. Westaway, “Present-day kinematics of the Middle East and eastern Mediterranean”. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B6), 12071-12090, 1994.
- [66] Y. Tatar, “Düzce İl Gelişme Planı. Çevre ve Mekansal Gelişme Sektörü Raporu, Düzce”, 103 s, 2003.
- [67] F. Şaroğlu, Ö. Emre, A. Boray, “Türkiye’nin Diri Fayları ve Depremsellikleri” MTA Genel Müdürlüğü, Rapor No: 8174, Ankara, 394s (yayımlanmamış), 1987.
- [68] F. Şaroğlu, Ö. Emre, İ. Kuşçu, Türkiye Diri Fay Haritası. MTA Genel Müdürlüğü, Ankara, 1992.
- [69] E. Alsan, L. Tezuçan, and M. Bath, “An earthquake catalogue for Turkey for the interval 1913-1970”, Kandilli Observatory Seismological Department Çengelköy-İstanbul, Turkey and Seismological Institute Box, 517, S-751 20 Uppsala, Sweden. 1975.
- [70] E. Ayhan, E. Alsan, N. Sancaklı, S.B. Üçer, “Türkiye ve Dolayları Deprem Kataloğu 1881- 1980”, *Boğaziçi Üniversitesi Yayınları*, 1980.
- [71] N.N. Ambraseys, C.F. Finkel, “Long-term seismicity of İstanbul and of the Marmara Sea region”. *Terra Nova* 3, 527–539, 1991.

- [72] N.N. Ambraseys, C.F. Finkel, “The seismicity of Turkey and Adjacent Areas, a Historical Review”, 1500- 1800, Eren yayıncılık, İstanbul, 1995.
- [73] United States Geological Survey web page, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> Erişim Tarihi: 22.11.2021.
- [74] R.B. Herrmann, “Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research”, *Seismological Research. Letters.*, 84, 1081-1088, doi:10.1785/0220110096, 2013.
- [75] T. Lay, T. C. Wallace, *Modern Global Seismology*, Academic Press, San Diego, 521pp, 1995
- [76] C.A. Langston, “Source inversion of seismic waveforms: the Koyna, India, earthquakes of September 13, 1967”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71:1-24, 1981.
- [77] S. Toda, R.S. Stein, V. Sevilgen, and J. Lin, Coulomb 3.3 Graphic-rich deformation and stress-change software for earthquake, tectonic, and volcano research and teaching—user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1060, 63 p., available at <http://pubs.usgs.gov/of/2011/1060/>, 2011.
- [78] Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/earthquake-catalog/>
- [79] İzmit Rapor AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı. [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: <https://deprem.afad.gov.tr/depremdetay?eventID=246572>. Erişim Tarihi: 22.11.2021.
- [80] Y. Li, L. Huang, R. Ding, S. Yang, L. Liu, S. Zhang and H. Liu, “Coulomb stress changes associated with the M7.3 Maduo earthquake and implications for seismic hazards”, *Natural Hazards Research 1*, 95-101, 2021.
- [81] Z. Çakır, A.A. Barka, S. Akyüz, “Coulomb gerilme etkileşimleri ve 1999 Marmara depremleri”, *itiüdergisi/d mühendislik*, Cilt:2, Sayı:4, 99-111, 2003.
- [82] 17 Kasım 2021 Merkez (Düzce) Mw5.0 Depremine İlişkin Ön Değerlendirme Raporu, AFAD İzmir rapor AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı. <https://deprem.afad.gov.tr/event-detail/10003>, Erişim tarihi: 18 Kasım 2021.
- [83] 23 Kasım 2022 Gölyaka (Düzce) Mw5.9 Depremine İlişkin Ön Değerlendirme Raporu, AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı. <https://deprem.afad.gov.tr/event-detail/401390>, Erişim tarihi: 23 Kasım 2023.
- [84] AFAD, T.C. İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, <https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog>