



Focal Mechanisms of the January 22, 2020 Akhisar-Manisa Earthquake (M_w 5.5) and Its Aftershocks: Seismotectonic Implications

Tahir Serkan Irmak¹, Bulent Dogan², Evrim Yavuz¹, Hamdullah Livaoglu¹ and Fadime Sertcelik¹

¹ Kocaeli University, Engineering Faculty, Dept. of Geophysical Engineering, Izmit, 41001, Kocaeli

² Kocaeli University, Architecture and Design Faculty, Dept. of Urban and Regional Planning, Izmit, 41001, Kocaeli
ORCID: 0000-0002-4504-6286, 0000-0002-6684-2046, 0000-0002-9175-8962, 0000-0002-7947-41071, 0000-0002-4549-7941

Keywords

Earthquake Source Mechanism, moment tensor analysis, NW trending normal fault, extensional tectonics

Highlights

- * January 22, 2020 Akhisar-Manisa Earthquake Activity
- * Present day deformation Analysis of the Akhisar – Manisa Region
- * Active tectonics of the the Akhisar – Manisa Region

Acknowledgements

The Authors thanks to AFAD and KOERI for the earthquake data.

Aim

Presenting a seismotectonic analysis of the January 22, 2020 Akhisar-Manisa Sequence.

Location

Akhisar-Manisa, Turkey.

Methods

ISOLA and WIN-TENSOR to determine focal mechanism, and present-day stress analysis, respectively.

Results

The results indicated that the majority of the focal mechanism solutions are normal faulting and normal faulting with strike slip component or vice-versa. The present-day stress field is characterized by pure extensional regime and the study area is opening NE-SW.

Supporting Institutions

Kocaeli University

Manuscript

Research Article

Received: 30.04.2020

Revised: 20.05.2020

Accepted: 26.05.2020

Printed: 30.06.2020

DOI

10.46464/tdad.730335

Corresponding Author

Tahir Serkan Irmak

Email: irmakts@kocaeli.edu.tr

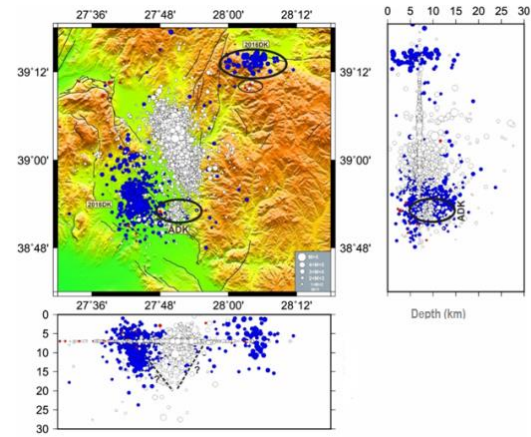


Figure
January 22, 2020 Akhisar-Manisa Earthquake Sequence

How to cite

Irmak T.S., Dogan B., Yavuz E., Livaoglu H., Sertcelik F., 2020. Focal Mechanisms of the January 22, 2020 Akhisar-Manisa Earthquake (M_w 5.5) and Its Aftershocks: Seismotectonic Implications, Turk. J. Earthq. Res. 2 (1), 27-46, <https://doi.org/10.46464/tdad.730335>



22.01.2020 Akhisar-Manisa Depremi (M_w 5.5) ve Artçılarının Sismotektonik Analizi

Tahir Serkan Irmak¹, Bülent Doğan², Evrim Yavuz¹, Hamdullah Livaoglu¹ ve Fadime Sertçelik¹

¹ Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İzmit 41001 Kocaeli

² Kocaeli Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, İzmit 41001 Kocaeli
ORCID: 0000-0002-4504-6286, 0000-0002-6684-2046, 0000-0002-9175-8962, 0000-0002-7947-41071, 0000-0002-4549-7941

ÖZET

Bu çalışmada, 22 Ocak 2020 Akhisar-Manisa (M_w 5.5) depremi ve artçılarının odak mekanizması çözümleri dalga şekli ters çözümü ile elde edilmiş ve buna göre sismotektonik yorum yapılmıştır. Bu amaçla, ana şok ve 35 artçı depremin odak mekanizması çözümleri ISOLA algoritması ile elde edilmiştir. Depremlerin odak mekanizması çözümlerinin çoğunluğu, bölgenin genişleme tektoniği ile uyumlu olup, normal faylanma ve az miktarda doğrultu atım bileşeni olan normal faylanma veya normal faylanma bileşeni olan doğrultu atımlı faylanma özelliğine sahiptir. Analizi yapılan depremlerin odak derinlikleri 4-15 km arasında değişmektedir. Gerilme tensörü ters çözümüne göre; bölge açılma rejiminin ($R'=0.75$) etkisi altındadır ve KD-BG yönünde açılmaktadır. Açılma hızı 1.3 mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Bölgede minimum basınç eksenini (σ_3), $K21^\circ D$ olarak yönelmiştir. Asal gerilme eksenlerinin bölgedeki konumları sırasıyla σ_1 , σ_2 , ve σ_3 olmak üzere $74^\circ / 111^\circ$, $16^\circ / 291^\circ$ ve $0^\circ / 201^\circ$ (eğim/azimut) olarak hesaplanmıştır. Bu stres dağılımlarına göre depremlerin üzerlerinde meydana geldiği fay düzlemleri, gerilmeli tektonik kabuk deformasyonunu işaret etmektedir.

Anahtar kelimeler

Deprem kaynak mekanizması, moment tensör analizi, KB doğrultulu normal fay, gerilme tektoniği

Öne Çıkanlar

- * 22 Ocak 2020 Akhisar-Manisa Deprem Etkinliği
- * Akhisar – Manisa Bölgesinin güncel gerilme analizi
- * Akhisar – Manisa Bölgesinin aktif tektoniği

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 30.04.2020

Düzeltilme: 20.05.2020

Kabul: 26.05.2020

Basım: 30.06.2020

DOI

10.46464/tdad.730335

Sorumlu yazar

Tahir Serkan Irmak

Eposta:

irmakts@kocaeli.edu.tr

Focal Mechanisms of the January 22, 2020 Akhisar-Manisa Earthquake (M_w 5.5) and Its Aftershocks: Seismotectonic Implications

Tahir Serkan Irmak¹, Bulent Dogan², Evrim Yavuz¹, Hamdullah Livaoglu¹ and Fadime Sertçelik¹

¹ Kocaeli University, Engineering Faculty, Dept. of Geophysical Engineering, İzmit, 41001, Kocaeli

² Kocaeli University, Architecture and Design Faculty, Dept. of Urban and Regional Planning, İzmit, 41001, Kocaeli
ORCID: 0000-0002-4504-6286, 0000-0002-6684-2046, 0000-0002-9175-8962, 0000-0002-7947-41071, 0000-0002-4549-7941

ABSTRACT

Focal mechanism solutions of the January 22, 2020 Akhisar-Manisa (M_w 5.5) earthquake and its aftershocks were obtained by using moment tensor inversion in order to make a seismotectonic interpretation for the study area. Total of 35 focal mechanism including the main shock have been obtained by using ISOLA algorithm. The results indicated that the majority of the focal mechanism solutions are normal faulting and normal faulting with strike slip component and some are strike slip faulting with normal faulting component. The results are compatible with the tectonics of the region. Focal depths of the analysed earthquakes are ranging between 4 and 15 km. The stress inversion of the studied earthquakes show that the present-day stress field is characterized by pure extensional regime ($R'=0.75$) and the study area is opening NE-SW. The horizontal direction of extension at $N21^\circ E$. Axis orientations are found as $74^\circ / 111^\circ$, $16^\circ / 291^\circ$ and $0^\circ / 201^\circ$ (dip/azimuth direction) for σ_1 , σ_2 , and σ_3 , respectively. According to these stress distributions, the fault planes on which earthquakes occur indicate extensional tectonic crustal deformation.

Keywords

Earthquake Source Mechanism, moment tensor analysis, NW trending normal fault, extensional tectonics

Highlights

- * January 22, 2020 Akhisar-Manisa Earthquake Activity
- * Present day deformation Analysis of the Akhisar – Manisa Region
- * Active tectonics of the the Akhisar – Manisa Region

Manuscript

Research Article

Received: 30.04.2020

Revised: 20.05.2020

Accepted: 26.05.2020

Printed: 30.06.2020

DOI

10.46464/tdad.730335

Corresponding

Author

Tahir Serkan Irmak

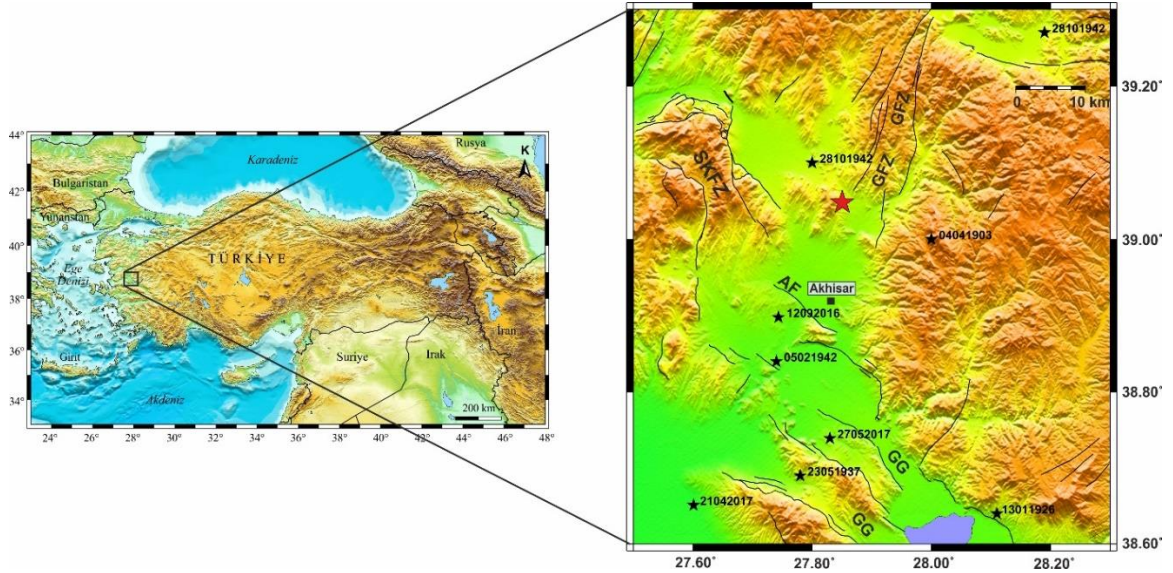
Email:

irmakts@kocaeli.edu.tr

1. GİRİŞ

Türkiye ve çevresinin tektonik yapısını Arap ve Afrika levhalarının Avrasya levhası ile çarpışması belirlemektedir. Arap levhası, yaklaşık 3 milyon yıldır, Avrasya levhasına doğru K-KB yönünde yaklaşık 18 mm/yıl hızı ile ilerlemektedir (McClusky ve diğ. 2000). Afrika levhasının Avrasya levhasına doğru ilerlemesi K yönlü olup, hızı yaklaşık 6 mm/yıl civarındadır (McClusky ve diğ. 2000). İki levha arasındaki bu farklı hızlardaki hareket sol yönlü doğrultu atımlı faylanma olan Ölü Deniz Fayı'nı oluşturmuştur. Bu iki levhanın kuzeye hareketi ise Anadolu levhasının batıya doğru kaçma hareketi ile karşılanmaktadır.

Bu modele göre, Anadolu levhasının Avrasya levhasına göre batıya kaçma hareketi, Sina yarımadasının kuzeyinde bulunan (31.1°K, 33.4°D) Euler kutbu baz alındığında saatin ibresinin tersi yönünde bir dönme şeklindedir ve bu hareketin hızı Kuzey Anadolu Fayı üzerinde 24 mm/yıl olarak hesaplanmıştır (McClusky ve diğ. 2000). Anadolu levhasının batıya doğru hareketi Ege Bölgesinde çok sayıda D-B, KB-GD, KD-GB doğrultulu normal faylarla denetlenen grabenlerin oluşmasına yol açmıştır (Şekil 1) (Dewey ve Sengor 1979, Jackson ve McKenzie 1984, Eyidogan ve Jackson 1985, Taymaz ve diğ. 1991, Taymaz ve Price 1992, Kocuyigit ve diğ. 1999, Gurer ve diğ. 2003, Zhu ve diğ. 2006, Irmak ve Taymaz 2009, Irmak 2013, Dogan ve diğ. 2016).



Şekil 1. Çalışma alanının tektonik haritası. **GFZ**: Gelembel Fay Zonu, **SKFZ**: Soma-Kırkağaç Fay Zonu, **AF**: Akhisar Fayı, **GG**: Gediz Grabeni, Kırmızı yıldız 22 Ocak 2020 Akhisar-Manisa depreminin bu çalışmada elde edilen lokasyonunu, siyah yıldızlar ise aletsel dönemde meydana gelen ve $M > 5.0$ olan depremlerin (GGAAYYYY-GünAyYıl) yerlerini göstermektedir.

Akhisar-Manisa Bölgesinin de bulunduğu B-GB Anadolu Bölgesi Türkiye'nin aktif sismik bölgeleri arasında yer almaktadır. Bölgede Bakırçay, Gediz, Küçükmenderes, Büyükenderes ve Gökova Grabenleri gibi çok sayıda D-B, KB-GD, KD-GB doğrultulu grabenler bulunmaktadır. Bu yapıların sismotektonik özellikleri genellikle, blok dönmeleri ve gerilme birikiminin dağınık olması nedeniyle karmaşık bir görüntü sergilemektedir. Bu yapılardaki sığ sismik aktivite ana graben sistemleri boyunca yoğunlaşmış, küçük ve orta büyüklükteki depremler ile karakterize edilmektedir. Bununla

birlikte, aletsel dönem kayıtları incelendiğinde bu graben sistemlerinin orta-büyük depremler de ürettiği görülmektedir (Tablo 1).

Sismik moment, odak mekanizması ve derinlik gibi deprem kaynak parametrelerinin belirlenmesi deprem tehlike çalışmalarına önemli katkılar sunmaktadır. Hiposantrın doğru belirlenmesi, odak mekanizmasının belirlenmesi ve odak mekanizmalarından elde edilen P ve T eksenlerinin konumlarının belirlenmesi bölgesel tektoniğin ve kinematiğin anlaşılmasında büyük öneme sahiptir. Bu çalışmanın temel amacı, 22 Ocak 2020 Akhisar-Manisa depremi ve artçılarının odak mekanizmalarını çözerek tektonik yapıyı ortaya koymak ve bölge için kaynak parametreleri veritabanı oluşturmaktır. 22 Ocak 2020 Akhisar-Manisa depremi ve 35 tane artçısının ($M_w \geq 3.6$) odak mekanizmaları moment tensör analizi yöntemi ile belirlenmiş ve güncel gerilme analizi yapılmıştır. Odak mekanizmalarının belirlenmesinde ISOLA algoritması (Sokos ve Zahradnik 2008; 2013), güncel gerilme analizinde ise Delvaux ve Sperner (2003) algoritması kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların Akhisar-Manisa bölgesinin sismotektoniğinin anlaşılmasında katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Tablo 1: Çalışma alanı ve yakın çevresinde meydana gelen orta ve büyük depremler (Ergin ve diğ. 1967, Alsan ve diğ. 1976, Soysal ve diğ. 1981, Ambraseys 1988, Eyidoğan ve diğ. 1991, KRDAE deprem kataloğu (URL-1))

Sıra	Tarih (gg.aa.yyyy)	Zaman (UTC) (ss:dd)	Yer	Şiddet (MSK)	Büyükklük (M_w)	Can Kaybı
1	04.04.1903	00:00	Akhisar-Manisa		5.6	–
2	03.10.1914	22:07	Burdur	IX	6.9*	300
3	13.01.1926	01:47	Salihli-Manisa		5.8	–
4	13.01.1926	08:08	Salihli-Manisa		5.8	–
4	19.07.1933	20:07	Çivril-Denizli	VIII	5.8	20
5	23.05.1937	10:57	Saruhanlı-Manisa		5.5	–
6	05.02.1942	01:15	Akhisar-Manisa		5.5	–
7	28.10.1942	00:31	Sındırgı-Balıkesir		5.5	–
8	28.10.1942	02:22	Kırkağaç-Manisa		6.0	–
9	30.01.1964	17:45	Tefenni-Burdur	VIII	5.6	–
10	02.03.1965	22:00	Salihli-Manisa		5.3	–
11	13.06.1965	20:01	Denizli	VIII	5.7*	14
12	23.03.1969	21:08	Demirci-Manisa	VIII	5.9	–
13	24.03.1969	01:59	Demirci-Manisa		5.3	–
14	24.03.1969	08:13	Gördes-Manisa		5.0	–
15	25.03.1969	13:28	Demirci-Manisa		5.1	–
16	25.03.1969	16:13	Gördes-Manisa		5.0	–
17	28.03.1969	01:48	Alaşehir-Manisa	VIII	6.5*	53
18	28.03.1969	10:02	Demirci-Manisa		5.2	–
19	30.04.1969	20:20	Demirci-Manisa		5.3	–
20	28.03.1970	23:02	Gediz	IX	7.2	1086
21	01.04.1970	08:02	Selendi-Manisa		5.0	–
22	19.04.1970	15:29	Gediz	VIII	5.8	–
23	23.04.1970	11:01	Demirci-Manisa	VIII	5.6	–
24	12.05.1971	08:25	Burdur	VIII	5.9	57
25	01.10.1975	17:57	Dinar-Afyon	VIII	6.1	90
26	24.02.1977	20:47	Turgutlu-Manisa		5.0	–
27	28.01.1994	15:45	Yeniköy-Manisa		5.2	–
28	19.05.2011	23:15	Simav	VIII	5.9	2
29	12.09.2016	08:26	Akhisar-Manisa		5.0	–
30	21.04.2017	13:09	Selendi-Manisa		5.0	–
31	21.04.2017	14:12	Saruhanlı-Manisa		5.1	–
32	27.05.2017	15:53	Gölmarmara- Manisa		5.3	–

* M_s büyüklüğü

2. BÖLGENİN TEKTONİĞİ

Batı Anadolu Bölgesi, Neojen'den günümüze değin; gerilme bileşeni hâkim ve yüksek olan deformasyondan etkilenen kıtasal kabuk yapısına sahip olup, hem D-B, hem de K-G doğrultulu havzaları içerir (Bozkurt 2000, Seyitoglu ve Scott 1996). Bu havzaların oluşumunda; genellikle normal ve doğrultu atım bileşeni küçük olan oblik normal fay türleri etken olmuştur. Aynı faylar, Batı Anadolu'daki havzaların tümünde havza çökellerinin sedimantasyonuna eşlik eden birincil yapısal unsurlardır (Bozkurt ve Mittwede 2005).

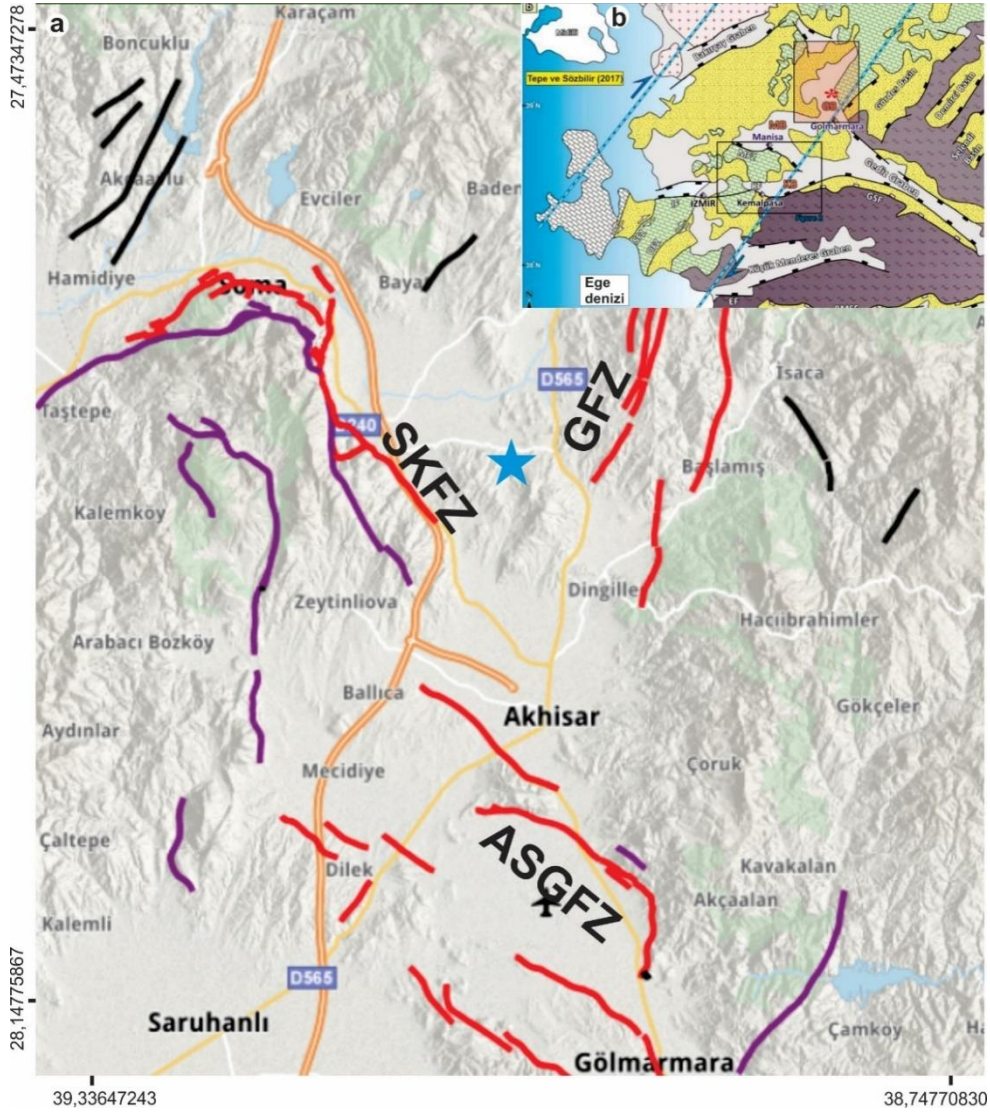
Akhisar-Manisa Bölgesi, 30 km uzunluğundaki KB-GD doğrultulu Soma-Kırkağaç Fay Zonu (SKFZ), Gelembel Fay Zonu (GFZ) güneybatı kesimi ve 40 km uzunluğundaki KB-GD doğrultulu Akhisar-Selendi-Gölmarmara Fay Zonu (ASGFZ) olmak üzere 3 tektonik yapının birleştiği bir bölgede yer almaktadır (Şekil 1) (Kartal ve diğ. 2016). Akhisar güneyinden kuzeyde Kırkağaç'a kadar uzanan bu alanda; hem KD'ya, hem de GB'ya eğimli normal faylar havzaları sınırlar. 22 Ocak 2020 depremi episantrı ve artçı deprem episantrları da bu alanda yer almaktadır (Şekil 2). Gediz Grabeni kuzeybatı ucunda farklı segmentler halinde izlenen KB doğrultulu ve Soma-Akhisar arasındaki KB doğrultulu faylar zonsal şekilde özellikle çöküntü alanlara dağılır. Yükselim veya temel kayalar ile havza çökellerinin sınırlarında bulunan ana faylar ve havza merkezlerine doğru da sentetik faylar deprem lokasyonu ve çevresinde izlenir (Kocuyigit ve diğ. 1999, Tepe ve Sozibilir 2017, URL-2). Bu çalışmaya konu olan depremlerin bölgesi; hem KD hem de KB doğrultulu çatal şekilli fayların çöküntü morfolojisinde bulunduğu bir alan olup deprem odak çözümlerinde de faylanma tipinin daha çok normal olduğu anlaşılır. Buna ilaveten yanıl bileşeni büyük olan odak düzlemi çözümleri elde edilse bile, günümüzde bölgedeki kıtasal kabuk, gerilmeli tektonik sistemin etkisinde deformasyon geçirmektedir.

3. MOMENT TENSÖR ANALİZİ

Moment tensör analizinin temelinde, tanımlanan moment tensör elemanı için (Double-Couple (DC), Deviatoric veya Isotropic (full)) gözlemsel sismogramlarla verilen yer yapısına göre hesaplanmış olan teorik (hesaplanmış) sismogramların birbirlerine benzetilmesi yaklaşımı yatmaktadır. MATLAB tabanlı bir arayüz olan ISOLA algoritmasının teorisine bakıldığında, arka planda ters çözümde Kikuchi ve Kanamori (1991) iteratif ters çözüm yaklaşımının kullanıldığı görülmektedir. ISOLA algoritması ile $M > 3.5$ olan lokal, bölgesel ve telesismik olaylar dalga şekli ters çözümü ile analiz edilebilmektedir. Ancak literatürde M_w 1.2'ye kadar olan depremlerin çözümüne dair yayınlar da bulunmaktadır (Fojtíková ve diğ. 2010).

Algoritma beş adımdan oluşmaktadır: (1) veri-işlem aşamaları ile verinin hazırlanması (pencere boyu, filtreleme), (2) kabuk modelinin tanımlanması, (3) kaynak elemanlarının tanımlanması, (4) Green Fonksiyonlarının hazırlanması, (5) İteratif ters çözüm ve sonuçların çizimi.

ISOLA algoritması üç bileşen veriyi (DB, KG ve Z) kullanabildiği gibi bu bileşenlerden herhangi birisini de kullanabilmektedir. Ters çözüm öncesinde veri işlem aşamasında kullanılan band geçişli filtrenin teorik (hesaplanmış) sismogramlara uygulanması gerekmektedir. Bu çalışmada, Moment büyüklüğü (M_w) 4.0'dan büyük depremler için 0.04-0.05/0.08-0.09 Hz, daha küçük depremler için 0.06-0.07/0.08-0.09 Hz bant-geçişli filtre kullanılmıştır. Verilen 1-boyutlu kabuk yapısına göre Green fonksiyonları frekans-dalgasayısı metoduna göre hesaplanmaktadır (Bouchon 1981). Bu çalışmada Akyol ve diğ. (2006)'nin önerdiği kabuk yapısı kullanılmıştır (Tablo 2). Toplam 35 adet depremin verileri ise KRDAE veri merkezinden elde edilmiştir (URL-3).



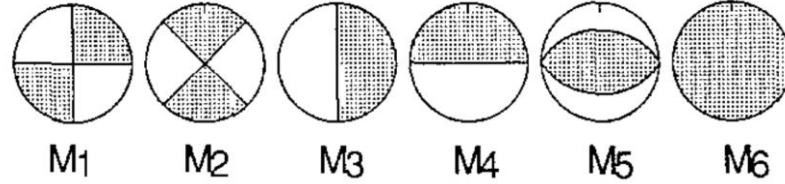
Şekil 2: a) Mavi yıldız 22 Ocak 2020 depreminin episantrını, siyah çizgiler: olası Kuvaterner fayları, kırmızı çizgiler: Holosen fayları ve Mor çizgiler: Kuvaterner fayları göstermektedir (URL-2) b) kırmızı kare içindeki deprem alanı ve civarındaki jeolojik birimler (Tepe ve Sozibilir 2017)

Tablo 2: Depremlerin odak mekanizma çözümleri için kullanılan 1-B hız modeli (Akyol ve diğ. 2006)

Derinlik (km)	Vp (km/sn)	Vs (km/sn)
0.0 - 1.5	4.73	2.73
1.5 - 3.0	5.06	2.92
3.0 - 5.0	5.84	3.37
5.0 - 15.0	6.00	3.47
15.0 - 21.0	6.25	3.61
21.0 - 29.0	6.43	3.72
29.0 -	7.80	4.51

Vp: P Dalgası Hızı, Vs: S Dalgası Hızı

Kikuchi ve Kanamori (1991) algoritmasında 6 temel moment tensör elemanı bulunmaktadır. Bunların 5 tanesi ikili-kuvvet çiftinden (DC) oluşmuşken, 1 tanesi (M_6) ise hacimsel değişimi göstermektedir (Şekil 3). Moment fonksiyonu delta fonksiyonu olarak kabul edilmektedir. Her bir kaynak-istasyon kombinasyonu (x,y) için Green tensörü ve temel moment tensörünün konvolüsyonundan oluşan 6 tane 3 bileşen temel sismogram ($G_i(x,y,t), i = 1,2, \dots, 6$) hesaplanmaktadır.



Şekil 3: Temel moment tensör elemanları (Kikuchi ve Kanamori 1991)

Herhangi bir moment tensör nedeniyle oluşan sismogram, temel sismogramların (G_i) lineer kombinasyonlarından oluşmaktadır:

$$d(x,y,t) = \sum_1^6 a_i G_i(x,y,t) \quad (1)$$

Burada a_i moment tensör ve skaler moment (M_0) ile ilişkili bir katsayıdır. Matris gösterimi (2) bağıntısı ile verilir;

$$d = G \cdot a \quad (2)$$

burada d , N tane istasyona ait dalgaşekli matrisidir. G , $N \times 6$ boyutunda bir matris olup, her kolonu temel sismogramları (G_1, G_2, \dots, G_6) içerir. a ise katsayılardan oluşan bir kolon matristir.

Buradan da görüleceği gibi, moment tensör analizi, bir lineer ters çözüm problemidir, burada d ; veri (data) matrisini, G ; bilinenler matrisi (hesaplanmış Green fonksiyonları) ve a ise parametre matrisini göstermektedir. Eğer hacimsel değişimin olmadığı kabul edilirse, $a_6 = 0$, a parametre matrisi 5 elemana düşecektir ($a_i, i=1, 2, 3, 4, 5$). Bu durumda çözüm "deviatoric moment tensör" olarak isimlendirilir. Ayrıca istenilirse, moment tensör matrisinin determinatının sıfır olması koşulu uygulanır ve sonuçların ikili-kuvvet çifti (DC) cinsinden verilmesi sağlanır. Bu durumda ise çözüm "DC sınırlaması yapılmış (DC constrained) moment tensör" olarak isimlendirilir.

$N \gg 6$ olması durumunda $d = G \cdot a$ yaklaşımının tek bir çözümü yoktur. Bu durumda yaklaşık veya en uygun çözüm en küçük kareler yaklaşımı ile belirlenir:

$$a = (G^T G)^{-1} G^T d \quad (3)$$

Moment tensör çözümü elde edildikten sonra, kaynak lokasyonu moment tensör lineer tersçözümün iteratif olarak tekrarlanması ile grid arama (grid-search) tekniği ile belirlenmektedir. Gözlemsel ve teorik (hesaplanmış) sismogramların arasındaki en iyi mutlak değer korelasyon katsayısını veren grid, kaynak lokasyonunu verecektir. Gözlemsel ve teorik (hesaplanmış) sismogramlar arasındaki en iyi uyumu veren değer VR (*Variance Reduction*) adı verilen değerdir.

$$VR = 1 - E/O \quad (4)$$

burada $E = \sum(G_i - T_i)^2$, $O = \sum(G_i - T_i)^2$ ile verilmektedir. G: Gözlemsel sismogramı, T: Teorik (hesaplanmış) sismogramı ifade etmektedir. VR değerinin 100 olması, gözlemsel ve teorik (hesaplanmış) sismogramlar arasındaki uyumun tam olduğunu göstermektedir. Ancak yüksek VR değerlerinin elde edilmesi her zaman güvenilir sonuçların elde edildiği anlamına gelmemektedir. Özellikle büyük genliklerin gözlemlendiği istasyon/bileşenlerde en iyi dalga şekli uyumu görülecektir. Bu durumda diğer istasyonlardaki dalga şekli uyumu iyi olmasa bile VR değeri yüksek çıkabilecektir. Bu yüzden bir çözümün güvenilirliğini tartışırken tek başına VR değeri yeterli olmamaktadır. VR değeri mutlak suretle, ilk hareket yönü çözümü, %DC oranı, maksimum özdeğerin minimum özdeğere oranı olan durum numarası (condition number-CN), 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) birlikte değerlendirilmelidir. Genel olarak, bir çözümde $VR > 0.50$, $CN < 10$, $FMVAR < 30$, $STVAR > 0.30$ değerlerinin elde edilmesi o çözümün güvenilir olacağını göstermektedir. Ancak ileride de değinileceği gibi, hidrotermal bölgelerde meydana gelen depremlerin Dengelenmiş Lineer Vektör Dipolleri (Compensated Linear Vector Dipole - CLVD) değerlerinin yüksek olması çözümlerin %DC ve VR değerlerinin düşmesine yol açmaktadır. Bu durumda ilk hareket yönüne bağlı çözümler oldukça önem kazanmakta ve değerlendirmelerde dikkate alınmaktadır. Bu yüzden bu çalışmada, diğer parametre (%DC, CN, FMVAR, STVAR) koşullarının sağlanmasına rağmen ancak düşük VR değerlerine sahip çözümler, eğer ilk hareket yönü çözümleri ile çok yakın çözüme sahip iseler değerlendirmeye alınmışlardır. Algoritma ile ayrıntılı bilgi Sokos ve Zahradnik (2008) ve (2013)'te verilmektedir.

4. GÜNCEL GERİLME ANALİZİ

Yer kabuğunun kırılğan (brittle) kesiminde meydana gelen depremlerin odak mekanizması çözümleri, kabuk içerisinde gerilme değişimlerinin nasıl olduğunun bir ifadesidir. Bu yüzden, ters çözüm ile elde edilen odak mekanizmaları tektonik gerilme alanlarının tanımlanması ve tektonik süreç hakkında güvenilir bilgiler vermektedir. Bunun yanı sıra, sondaj ile ulaşılamayan derinliklerdeki gerilme alanlarını tanımlamada kullanılan önemli bir yaklaşımdır. Akhisar-Manisa bölgesinin gerilme alanlarının davranışlarını belirlemek için Delvaux (1993) ve Delvaux ve Spencer (2003) algoritması kullanılmıştır.

Algoritma iki temel kabule dayanmaktadır: (1) Gerilme alanı tekdüzedir ve zaman ve uzayda değişmez, (2) depremdeki kayma (slip) (d) maksimum kayma gerilmesi (τ) doğrultusu boyunca gerçekleşir. Hesaplanmış gerilme (τ) ve kayma vektörü (d) arasındaki açı uyumsuzluk (misfit) açısı (α) olarak tanımlanır. Algoritmada her bir deprem (i) için minimize edilmiş uyumsuzluk fonksiyonu (f), uyumsuzluk açısı (α) olarak tanımlanır.

$$f(i) = \alpha(i) \quad (5)$$

Gerilme oranı R , üç temel ortogonal gerilme ekseninin, σ_1, σ_2 ve σ_3 (burada $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) konumlanmasına göre belirlenir:

$$R = (\sigma_2 - \sigma_1)/(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (6)$$

Ana gerilme rejimi, gerilme elipsoidinin şekli ve temel gerilme eksenlerinin konumlanmasına bağlıdır. σ_1 düşey olduğu zaman açılma, σ_2 düşey olduğu zaman doğrultu-atım ve σ_3 düşey olduğu

zaman ise sıkışma rejimleri görülmektedir. Her üç rejim için gerilme oranı R' 'nin değeri 0 ile 1 arasında değişir. Bu yüzden Delvaux ve diğ. (1997) R' ile gösterilen gerilme rejimi indeksini tanımlamıştır:

- σ_1 düşey olduğu zaman $R' = R$ (açılma rejimi)
- σ_2 düşey olduğu zaman $R' = 2 - R$ (doğrultu atım rejimi)
- σ_3 düşey olduğu zaman $R' = 2 + R$ (sıkışma rejimi)

R' 0 (radyal açılma) ile 3 (radyal sıkışma) arasındaki değerler ile gerilme rejimini tanımlamaktadır. 0 ile 1 arasında normal faylanma rejimi (σ_1 düşey), 1 ile 2 arasında doğrultu-atım rejimi (σ_2 düşey), 2 ile 3 arasında da sıkışma rejimini (σ_3 düşey) temsil eder.

Algoritma ilk adımda "Right Dihedron Metodu"nu kullanmaktadır (Angelier ve Mechler, 1977). Bu metotta σ_1 ve σ_3 'ün fay düzlemlerinin seçiminden bağımsız olarak muhtemel konumlanmaları grafiksel olarak belirlenmektedir. Buradan elde edilen sonuçlar, uyumsuzluk fonksiyonunu belirlemede kullanılan iteratif grid arama tekniği olan "Rotational Optimisation" için başlangıç parametresi olarak kullanılır (Delvaux ve Sperner 2003). "Rotational Optimisation" tekniği gerilme tensörünü kullanarak (5) numaralı denklemde verilen uyumsuzluk açısını, α , minimize eder. Algoritma ile ilgili ayrıntılı bilgi Delvaux ve Sperner (2003)'te verilmiştir.

5. KAYMA HIZI

Aksihar-Manisa bölgesindeki tektonik hareket hızı moment tensör analizi yapılan depremlerin sismik momentleri kullanılarak Brune (1968) yaklaşımı ile belirlenmiştir. Bir fay zonu üzerindeki toplam yerdeğiştirme aşığıdaki bağıntı ile belirlenmektedir (Brune, 1968):

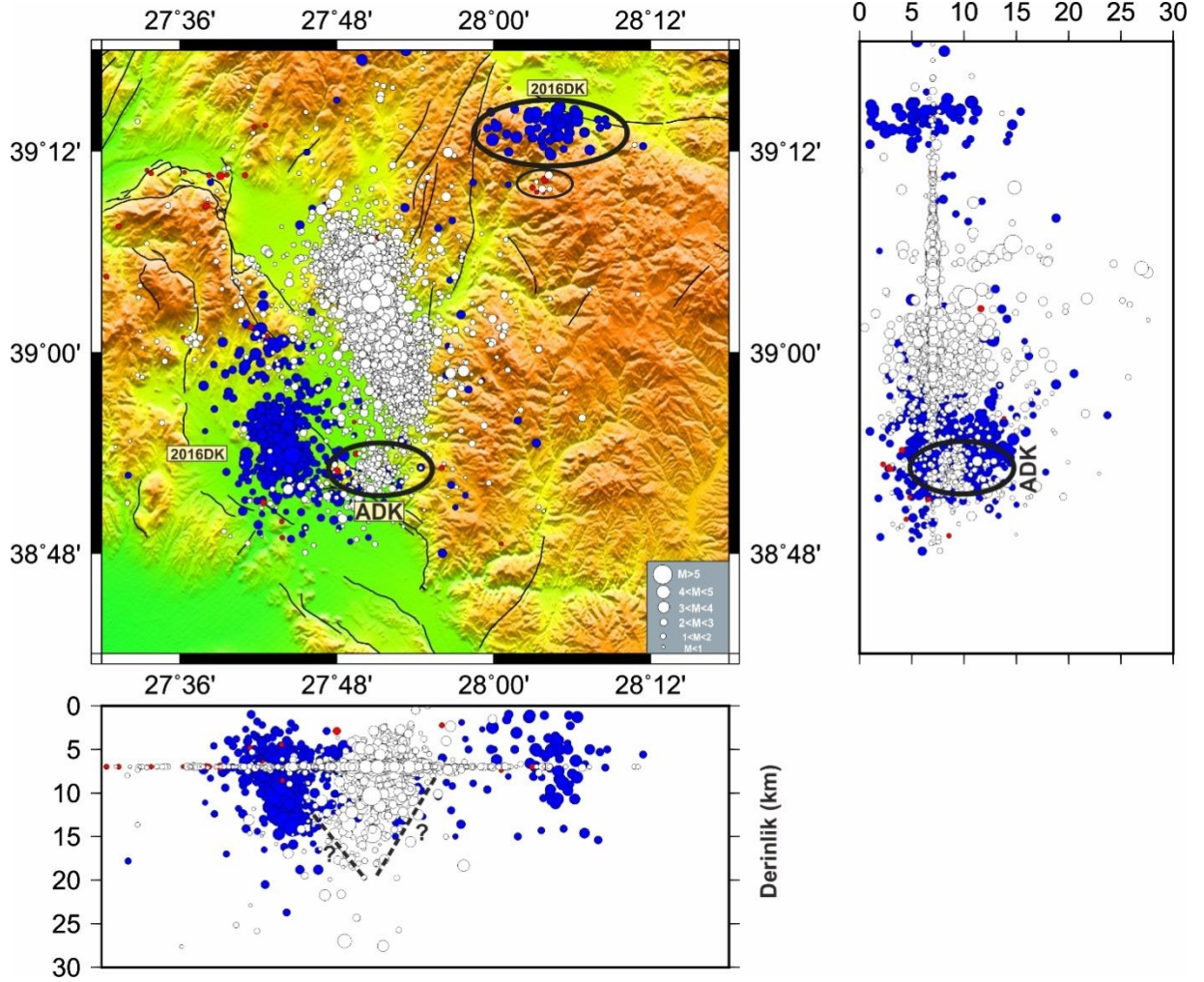
$$\sum \langle \langle u \rangle \rangle = \frac{1}{\mu A_0} \sum M_0 \quad (7)$$

burada, u ; metre (m) cinsinden toplam yerdeğiştirme miktarı, μ ; rijidite (N/m^2), A_0 ; faylanma alanı (m^2) ve M_0 ; sismik momenttir (Nm).

6. BULGULAR ve TARTIŞMA

12 Eylül 2016 da meydana gelen M_w 5.0 deprem ve artçıları ile 22 Ocak 2020 Akhisar-Manisa depremi (M_w 5.5) ve artçıları Şekil 4'te gösterilmektedir. Buradaki en ilgi çekici özellik, ilksel çözümlere göre 2016 deprem aktivitesi ile 2020 deprem aktivitesinin çalışma alanı içerisinde birbirine yakın iki bölgede yoğunlaşmasıdır. 12 Eylül 2016 depremi Akhisar Fayı'nda meydana gelmiş ve artçı depremler KB-GD doğrultusunda ilerlemiştir. 2016 deprem aktivitesinde Akhisar Fayı deprem üretirken, 2020 deprem aktivitesinde ise anaşok ve artçıların 2016 depreminin KD'sunda ve benzer şekilde KKB-GGD doğrultulu yönlendiği görülmektedir. 2020 deprem aktivitesi sırasında Akhisar Deprem Kümesi (ADK) olarak isimlendirilen deprem kümesinin ana kümeden ayrıldığı görülmektedir. Bu kümede meydana gelen en büyük deprem M_L 3.1 büyüklüğündedir. Bu durum Akhisar deprem kümesinin, 2016 deprem aktivitesinde Akhisar Fayı'nın kırılmayan parçalarının 2020 deprem aktivitesi ile yeniden harekete geçmesi sonucu oluştuğunu göstermektedir. 2016 deprem aktivitesinin meydana getirdiği ve çalışma alanının KD'sunda yer alan ve siyah elips ile gösterilen deprem kümesinin hemen altında 2020 deprem aktivitesinde öncü ve artçı depremlerin oluşturduğu bir diğer küçük deprem kümesi görülmektedir (Şekil 4). Depremlerin derinlik dağılımlarına bakıldığında 2016 deprem kümelerinin arasında kalan sismik boşluğun 2020 deprem aktivitesi ile doldurulduğu görülmektedir. Gelembey Fay Zonu ile

Soma-Kırkağaç Fay Zonları arasında kalan bölgeyi sınırlayan fayların doğu ve batıya doğru eğimli düzlemlere sahip oldukları yine odak derinliği dağılım haritasından görülmektedir.



Şekil 4: 12 Eylül 2016 M_w 5.0 (mavi daireler) ve 22 Ocak 2020 M_w 5.5 (beyaz daireler) deprem süreçleri. ADK: Akhisar Deprem Kümesi, 2016DK: 2016 deprem kümesi. Kırmızı daireler 22 Ocak 2020 depreminden önce meydana gelen öncü depremleri göstermektedir. Siyah çizgiler çalışma alanındaki aktif fayları göstermektedir (URL-2)

MOMENT TENSOR ÇÖZÜMÜ**İÇ MERKEZ LOKASYONU (KOU)**

Oluş Zamanı 20200122 19:22:15.80
Enlem 39.0562 Boylam 27.847 Derinlik 8.9

CENTROID

Denenen Kaynak Numarası : 11 (Sabit Dış Merkez Ters Çözümü)
Centroid Enlem (K)39.0562 Boylam (D)27.847
Centroid Derinlik (km) : 6
Centroid zamanı : +2.7 (s) oluş zamanına göre

Moment (Nm): 2.164e+17

Mw: 5.5

VOL%: 0

DC%: 55.4

CLVD%: 44.6

SNR CN FMVAR STVAR

Var.red.:(ters çözümde kullanılan tüm istasyonlar için): 0.68 NaN 2.6 18±9 0.19
Var.red.(tüm istasyonlar için): 0.65

Doğrultu Eğim Kayma Açısı | Ters çözümde kullanılan frekans bandı (Hz)
87 68 -153 | 0.04 - 0.05 -- 0.08 - 0.09

Doğrultu Eğim Kayma Açısı |

İstasyonlar-Kullanılan Bileşenler-Uzaklık

	KG	DB	D	U (km)
P-ekseni Azimut Dalım	BALB +	+	+	66
	DKL +	-	+	82
T-ekseni Azimut Dalım	KULA +	+	+	93
	SIMA +	+	+	98
	BLCB -	+	+	102
	AYDB -	-	-	123
	URLA +	+	+	133
	GEDZ +	+	+	135
	GCAM +	+	+	160

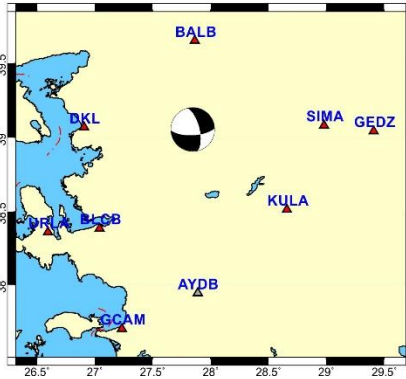
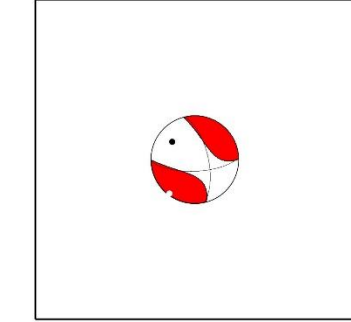
Mrr Mtt Mpp

-0.932 0.992 -0.059

Mrt Mrp Mtp

-0.455 -0.420 -1.836

Exponent (Nm): 17

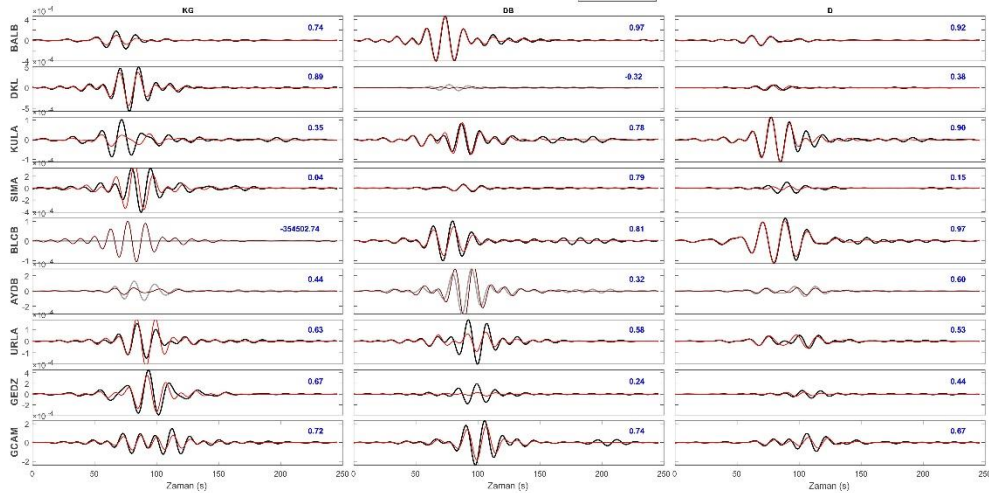


Olay gün-saat: 22.01.2020 19:22:15.80

Yer değişime (m). Ters çözüm bandı (Hz) 0.04 0.05 0.08 0.09

Çiz renkli dalgı seşilimi ters çözümde kullanılmıştır.

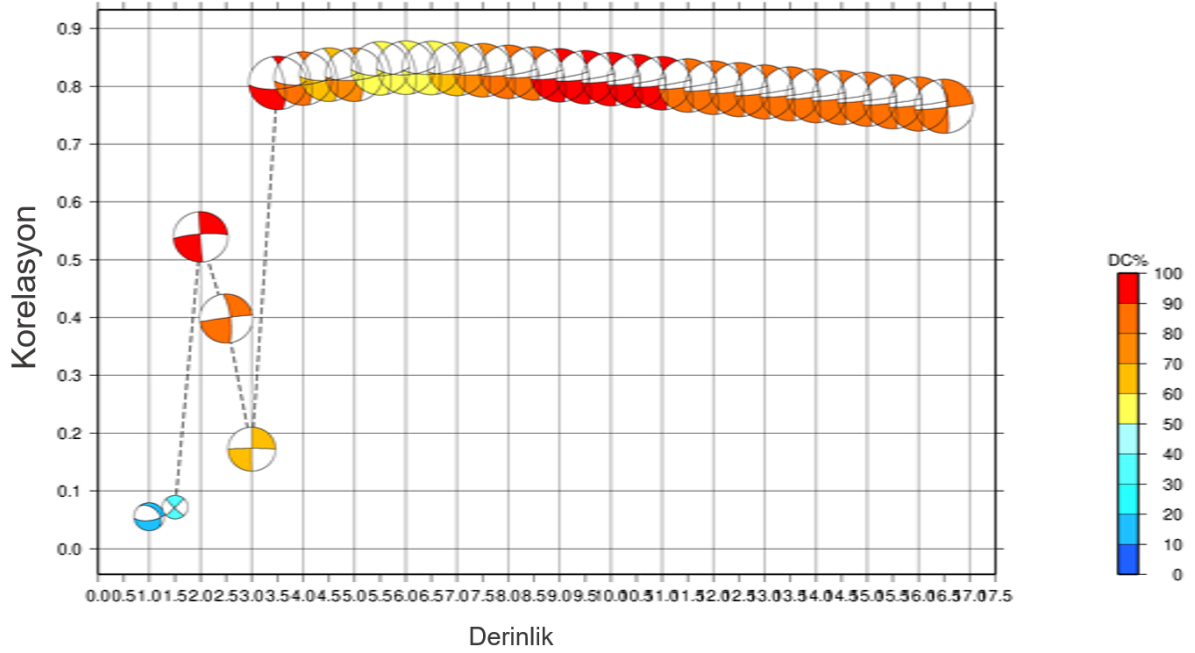
Mavi renkli seřilimler variance reduction (VR) değeriñi göstermektedir.



Şekil 5: 22 Ocak 2020 Akhisar-Manisa depremi (M_w 5.5) moment tensör analizi sonuçları. Çözümde kullanılan istasyon bileşenleri (+) ile gösterilmiştir. Altta gözlemsel (siyah) ve teorik/hesaplanmış (kırmızı) sismogramlar görülmektedir

Şekil 5, Tablo 2'de verilen olaylardan en büyüğü olan 1 numaralı olayın yani 22 Ocak 2020 Akhisar-Manisa depreminin (M_w 5.5) moment tensör analizinin detaylı sonuçlarını göstermektedir. Deprem lokasyonu bu çalışmada KRDAE (URL-3) ve AFAD (URL-4) verilerinin bir araya getirilip tekrar okunması ile HYPO71 algoritması ile elde edilmiştir. 22 Ocak 2020 M_w 5.5 depremi için 11

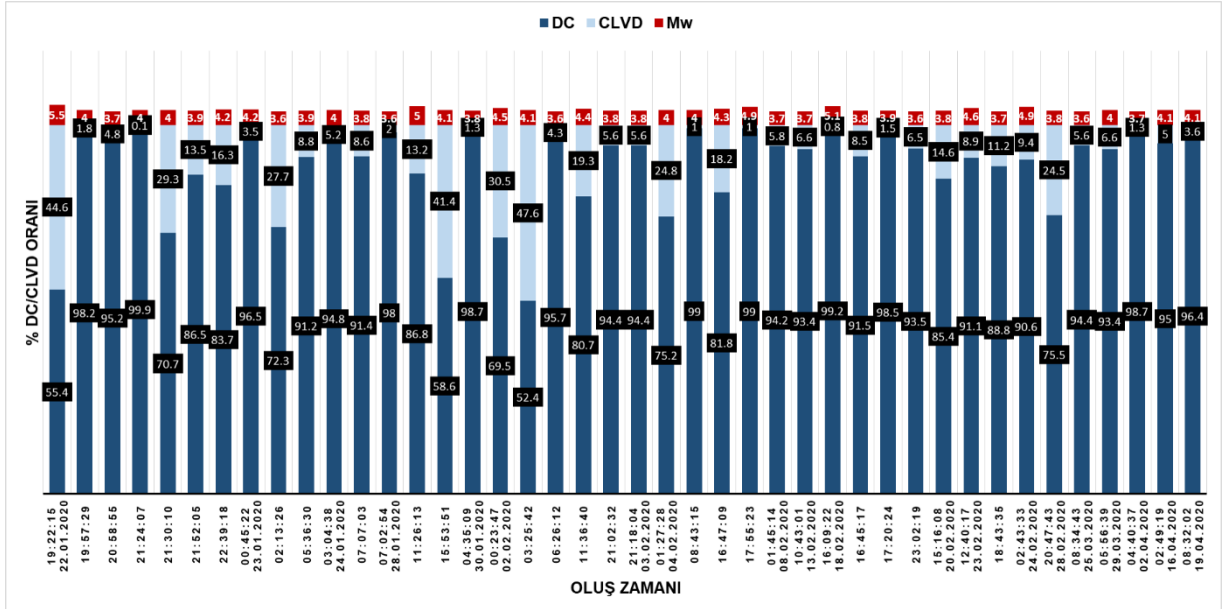
farklı derinlik iteratif olarak denendikten sonra en büyük enerji boşalımının olduğu derinlik (centroid derinliği) 6 km olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6: Derinlik belirlemede kullanılan derinlik-korelasyon grafiği. En yüksek korelasyon ve DC değeri 6 km'de elde edilmiştir

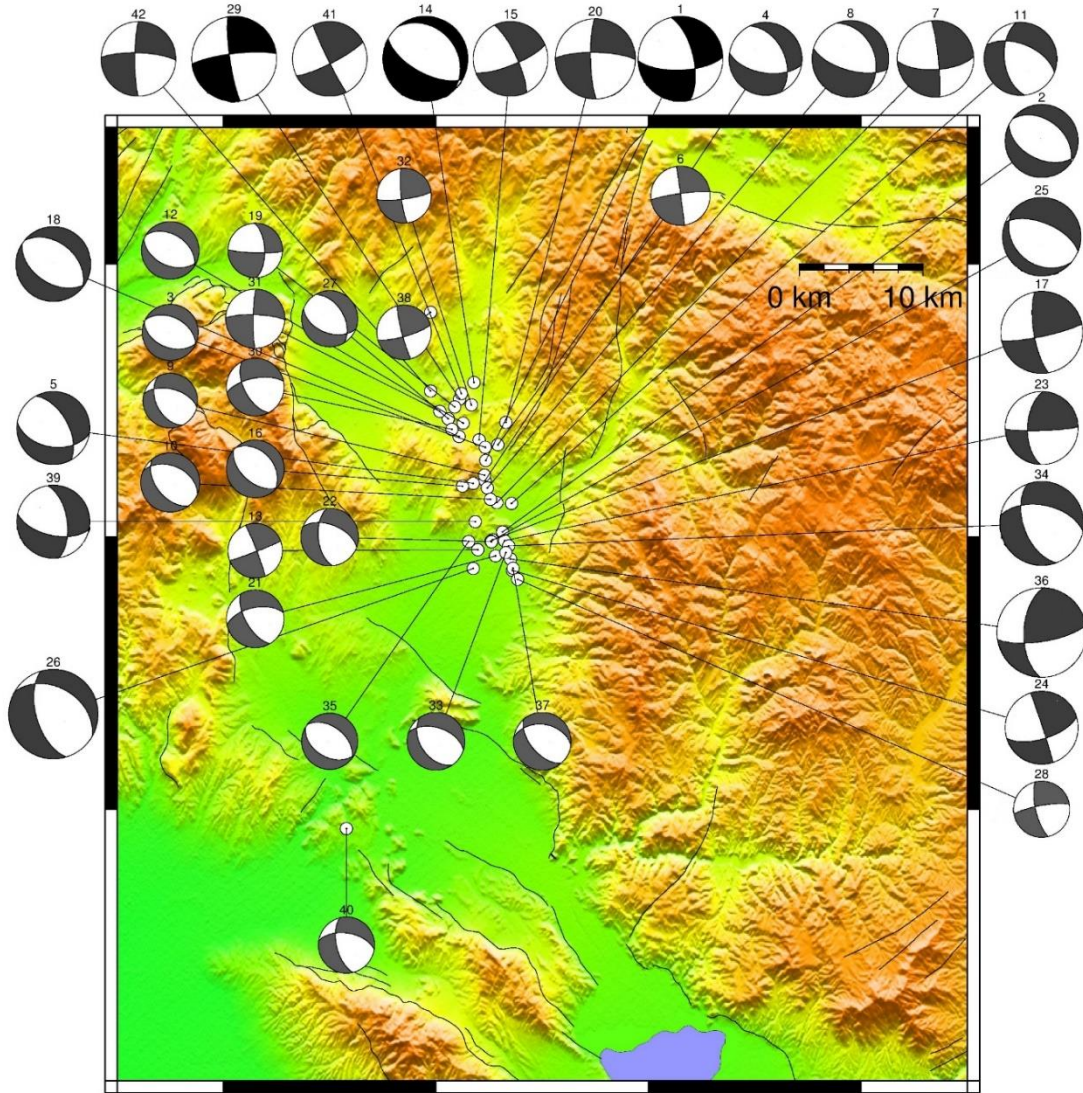
Sengor (1987), Akyol ve diğ. (2006) ve Irmak (2013) Batı Anadolu'da meydana gelen depremlerin derinliklerinin 10 km'yi geçmediğini göstermişlerdir. Ancak bu çalışmada gerek KRDAE ve AFAD katalogları (Şekil 4) gerekse moment tensör çözümleri (Tablo 3), analizi yapılan depremlerin derinliklerinin 15 km'ye kadar uzandığını göstermektedir. Her ne kadar KRDAE ve AFAD katalogları ilksel çözümleri içerse de, Ege Bölgesinde yapılan sismik tomografi çalışmaları, çalışma alanında meydana gelen deprem derinliklerinin dağılımını desteklemektedir (Kaypak ve Gokkaya 2012, Ozer ve Polat 2017, Ozer ve diğ. 2018).

Çözümün ikili-kuvvet çifti oranına (DC) bakıldığında %55.4, CLVD oranının ise %44.6 olduğu görülmektedir. Irmak (2013) Denizli Grabeni'nde meydana gelen depremlerin oblik, birbirine paralel olmayan düzlemler ve özellikle Büyük Menderes, Gediz ve Pamukkale faylarının kesiştiği bölgelerdeki hidrotermal etkilerden dolayı yüksek CLVD değerlerine sahip olduklarına işaret etmiştir. Benzer yapıya sahip olan Akhisar-Manisa bölgesindeki depremlerin yüksek CLVD içerikleri, bölgenin oblik ve karmaşık tektonik yapısı ve güneydoğusundaki Alaşehir-Manisa civarındaki yoğun hidrotermal etkiler ile açıklanabilir. Çözümü yapılan depremlere ait DC/CLVD oran grafiği Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'den de görüleceği gibi, sismik aktivitenin zaman içerisinde azalmasıyla birlikte çözümü yapılan depremlerin CLVD oranları da azalmaya başlamıştır. Bu durum CLVD bileşenlerinin yüksek olmasında kayıtların, özellikle sismik aktivitenin ilk günlerindeki yoğun artçı deprem aktivitesi ile kayıtların gürültü içeriğinin fazla olabileceğinin de etkili olabileceğini göstermektedir.



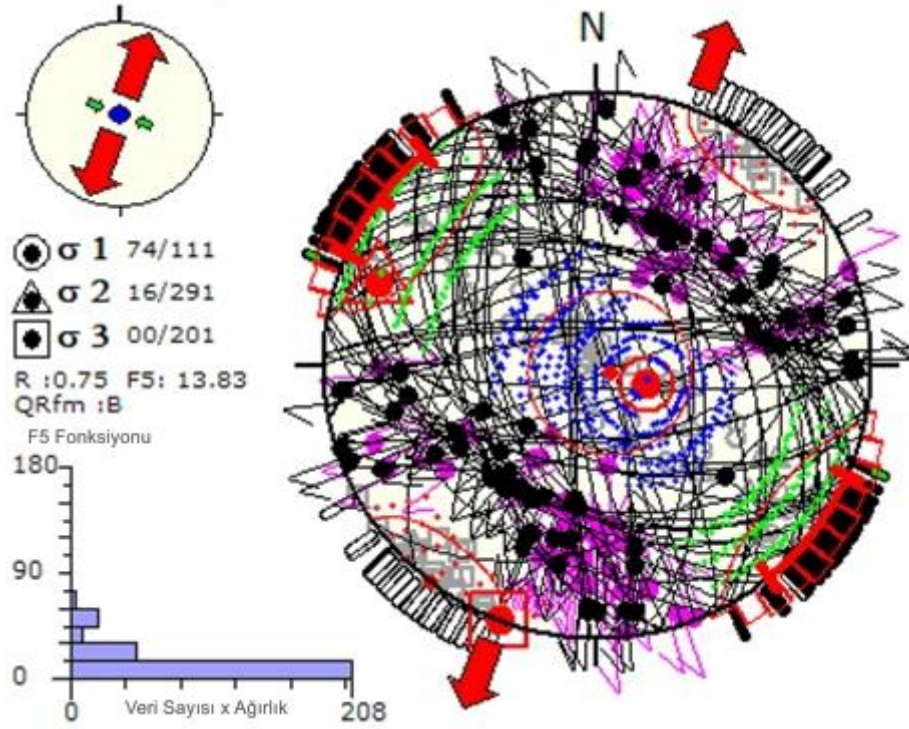
Şekil 7: Moment tensör analizi yapılan depremlerin DC/CLVD oranları grafiği. Barların üzerinde yazan değerler % olarak DC veya CLVD oranını vermektedir. Kırmızı rakamlar depremin (M_w) magnitüdünü ifade etmektedir

Şekil 8 Akhisar-Manisa bölgesinde meydana gelen ve analizi yapılan tüm depremlerin odak mekanizmalarını göstermektedir (Tablo 3). Meydana gelen depremlerin çok büyük bir kısmı doğrultu atım bileşenine sahip normal faylanma mekanizması göstermektedir. Şekil 4'te gösterilen depremlerin derinlik dağılımları, Gelembel Fay Zonu ile Soma-Kırkağaç Fay Zonu arasında kalan bölgedeki fayların Doğu ve Batı'ya eğimli olduğunu göstermektedir. Bu faylar; Anadolu'nun batıya kaçış ve saatin tersi yönde blok hareketine uygun oluşabilecek mikro faylar olabilir. Çalışma alanı ve civarında da saf (pure) doğrultu atımlı faylanma mekanizması içeren fay düzlemleri, hem uzun, hem de yayılımı fazla olmayan niteliktedir (Şekil 8).



Şekil 8: 22 Ocak 2020 deprem aktivitesinde moment tensör analizi ile çözümü yapılan depremlerin harita üzerinde gösterimi. Odak mekanizmalarının üzerinde gösterilen rakamlar Tablo 3'te verilen depremlere karşılık gelmektedir

Şekil 9, Akhisar-Manisa bölgesi için moment tensör analizi ile elde edilen odak mekanizmaları ve asal gerilme eksenlerinin konumlarının kullanılması ile elde edilen gerilme alanları ters çözümü sonucunu göstermektedir. Gerilme ters çözümüne göre σ_1 yaklaşık düşey, σ_2 ve σ_3 ise yatay olarak elde edilmiştir. Asal gerilme eksenlerinin konumlanmaları, σ_1 , σ_2 ve σ_3 için sırasıyla, $74^\circ/111^\circ$, $16^\circ/291^\circ$ ve $0^\circ/201^\circ$ (eğim/azimut) olarak hesaplanmıştır. Akhisar-Manisa bölgesi tam açılma (pure extensional) rejiminin etkisi altındadır ($R' = 0.75$). Bölge KD-GB yönlü açılmaktadır.



Şekil 9: Elde edilen odak mekanizması çözümlerine göre gerilme ters çözümü sonuçları. Histogramlar F5 uyumsuzluk fonksiyonunun dağılımını göstermektedir. Ağırlıklandırmalar büyüklüklere göre aritmetik olarak yapılmıştır

Manisa-Akhisar bölgesinde meydana gelen, Şekil 1’de gösterilen depremler ve 2020 deprem aktivitesinin yaşandığı çalışma alanındaki açılma hızı, Tablo 1’de verilen ve çalışma alanına düşen depremlerin (8) numaralı bağıntıya göre hesaplanan ve Tablo 3 de verilen sismik moment değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.

$$M_w = \left(\frac{2}{3}\right) \log M_o - 10.7 \quad (8)$$

Buna göre 1903 yılından günümüze oluşan toplam sismik moment $\sum M_o = 2.58 \times 10^{18}$ Nm, toplam faylanma alanı (35000 x 15000 m²), ve rijidite değeri de $\mu = 3.3 \times 10^{10}$ N/m² olarak alınmıştır. Buna göre Akhisar-Manisa bölgesinin açılma hızı (1903-2020 yılları arasında) 1.3 mm/yıl olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3: Bu çalışmada analizi yapılan depremlerin kaynak parametreleri

#	Tarih (gg.aa.yyyy)	Oluş Zamanı (UTC) Ss.dd:sn	Enlem (°K)	Boylam (°D)	Centroid Derinliği (km)	Sismik Moment (Nm)	Büyükklük (M_w)	Doğrultu Açısı	Eğim Açısı	Kayma Açısı	DC	CLVD	Var.Red. (VR)
1	22.01.2020	19:22:15.80	39.0562	27.8470	6.0	2.164x10 ¹⁷	5.5	87/347	68/65	-153/-24	55.4	44.6	0.68
2	22.01.2020	19:57:29.43	39.0038	27.8627	6.0	1.101x10 ¹⁵	4.0	116/308	49/42	-98/-81	98.2	1.8	0.39
3	22.01.2020	20:58:55.81	39.0658	27.8463	7.0	4.413x10 ¹⁴	3.7	112/296	45/45	-93/-87	95.2	4.8	0.64
4	22.01.2020	21:24:07.10	39.0415	27.8462	8.0	1.067x10 ¹⁵	4.0	334/99	47/59	-46/-127	99.9	0.1	0.55
5	22.01.2020	21:30:10.77	39.0395	27.8350	4.0	1.271x10 ¹⁵	4.0	331/99	57/46	-55/-132	70.7	29.3	0.59
6	22.01.2020	22:39:18.10	39.0253	27.8572	6.0	2.953x10 ¹⁵	4.2	354/87	84/67	-23/-173	83.7	16.3	0.81
7	23.01.2020	00:45:22.87	39.0360	27.8483	8.0	2.131x10 ¹⁵	4.2	338/105	37/65	-44/-118	96.5	3.5	0.70
8	23.01.2020	02:13:26.34	39.0455	27.8457	6.0	3.283x10 ¹⁴	3.6	284/154	55/48	-124/-52	72.3	27.7	0.64
9	23.01.2020	05:36:30.58	39.0278	27.8512	4.0	9.040x10 ¹⁴	3.9	293/142	43/51	-112/-70	91.2	8.8	0.51
10	24.01.2020	03:04:38.40	39.0247	27.8712	5.5	1.240x10 ¹⁵	4.0	292/173	57/54	-135/-43	94.8	5.2	0.40
11	24.01.2020	07:07:03.76	39.0835	27.8255	7.0	6.845x10 ¹⁴	3.8	114/302	46/44	-96/-84	91.4	8.6	0.62
12	28.01.2020	07:02:54.06	38.9908	27.8395	4.0	3.378x10 ¹⁴	3.6	69/339	87/86	-176/-3	98.0	2.0	0.53
13	28.01.2020	11:26:13.55	39.1133	27.8357	7.5	3.907x10 ¹⁶	5.0	318/119	28/64	-73/-99	86.8	13.2	0.64
14	28.01.2020	15:53:51.23	39.0713	27.8405	7.0	1.926x10 ¹⁵	4.1	68/335	76/76	-166/-14	58.6	41.4	0.51
15	30.01.2020	04:35:09.13	39.0373	27.8248	4.5	6.719x10 ¹⁴	3.8	131/317	52/39	-94/-85	98.7	1.3	0.68
16	02.02.2020	03:25:42.12	39.0737	27.8217	6.0	1.584x10 ¹⁵	4.1	123/310	48/42	-94/-85	52.4	47.6	0.69
17	02.02.2020	06:26:12.74	39.0955	27.8177	4.0	2.962x10 ¹⁴	3.6	358/92	62/83	-8/-151	95.7	4.3	0.69
18	02.02.2020	11:36:40.06	39.0842	27.8657	13.5	4.489x10 ¹⁵	4.4	271/179	77/80	-170/-13	80.7	19.3	0.49
19	02.02.2020	21:02:32.43	38.9862	27.8562	4.5	6.637x10 ¹⁴	3.8	258/150	58/63	-148/-36	94.4	5.6	0.63
20	03.02.2020	21:18:04.01	38.9965	27.8523	7.0	5.396x10 ¹⁴	3.8	291/175	55/57	-139/-43	94.4	5.6	0.75
21	04.02.2020	08:43:15.09	38.9757	27.8718	5.0	1.167x10 ¹⁵	4.0	342/73	88/65	-25/-178	99.0	1.0	0.54
22	04.02.2020	16:47:09.21	38.9970	27.8518	4.0	4.002x10 ¹⁵	4.3	292/129	61/30	-99/-75	81.8	18.2	0.38
23	04.02.2020	17:55:23.31	38.9770	27.835	5.5	3.274x10 ¹⁶	4.9	300/163	40/59	-126/-64	99.0	1.0	0.47
24	08.02.2020	01:45:14.91	39.0868	27.8115	6.5	4.911x10 ¹⁴	3.7	329/111	49/48	-63/-118	94.2	5.8	0.51
25	13.02.2020	10:43:01.32	38.9690	27.8770	12.5	4.539x10 ¹⁴	3.7	260/167	79/72	-162/-11	93.4	6.6	0.54
26	18.02.2020	16:09:22.40	39.1013	27.8222	7.0	4.750x10 ¹⁶	5.1	263/172	80/82	-172/-10	99.2	0.8	0.80
27	18.02.2020	16:45:17.32	39.0790	27.8150	5.5	7.082x10 ¹⁴	3.8	259/153	65/59	-145/-30	91.5	8.5	0.67
28	18.02.2020	17:20:24.33	39.0922	27.8035	6.5	8.690x10 ¹⁴	3.9	272/181	79/84	-174/-11	98.5	1.5	0.73
29	20.02.2020	15:16:08.84	38.9887	27.8657	6.0	6.193x10 ¹⁴	3.8	288/146	51/46	-116/-61	85.4	14.6	0.66
30	23.02.2020	12:40:17.55	38.9935	27.8683	6.0	1.068x10 ¹⁶	4.6	281/166	54/50	-134/-36	91.1	8.9	0.52
31	23.02.2020	18:43:35.31	38.9968	27.8308	6.0	5.168x10 ¹⁴	3.7	120/306	43/48	-95/-86	88.8	11.2	0.51
32	28.02.2020	20:47:43.96	38.9772	27.8725	7.0	6.939x10 ¹⁴	3.8	278/140	41/57	-124/-64	75.5	24.5	0.67
33	29.03.2020	05:56:39.18	39.0113	27.8370	4.0	1.432x10 ¹⁵	4.0	351/102	59/59	-37/-144	93.4	6.6	0.78
34	02.04.2020	04:40:37.36	38.7857	27.7158	5.5	3.950x10 ¹⁴	3.7	279/166	55/61	-144/-41	98.7	1.3	0.75
35	19.04.2020	08:32:02.05	39.1072	27.7950	5.5	1.573x10 ¹⁵	4.1	272/180	77/82	-172/-14	96.4	3.6	0.86

DC: Double-Couple (İkili kuvvet çifti oranı); CLVD: Compensated Lineer Vector Dipole oranı

7. SONUÇLAR

22 Ocak 2020 Akhisar-Manisa depremi (M_w 5.5) ve artçılarının sismotektonik analizi sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- (1) 2020 sismik aktivitesi, 2016 deprem aktivitesinin KD'sunda meydana gelip, KB-GD doğrultusunda ilerlemiştir.
- (2) 2016 ve 2020 deprem aktiviteleri sonucunda Akhisar-Manisa bölgesinin orta kısımları tamamen kırılmış ancak bölgenin kuzeyinde yer alan Gelembe Fay Zonu ve Soma-Kırkağaç Fay Zonu ile Güneydoğu'da yer alan Gediz Grabeni'nin batısının kırılmadığı düşünülmektedir.
- (3) Akhisar-Manisa bölgesinde meydana gelen depremlerin, belirgin biçimde normal bileşenleri çok belirgin olup, doğrultu atım bileşeni de içeren oblik normal faylanma ve çok az sayıda da doğrultu atım bileşeni hâkim oblik faylar ile karakterize edilmektedir. Analizi yapılan depremlerin derinlikleri 4-15 km arasında değişmektedir.
- (4) Gerilme analizi sonuçları Akhisar-Manisa bölgesinin KD-GB (K21°D) doğrultusunda açıldığını göstermektedir. Asal gerilme eksenlerinin konumlanmaları, σ_1 , σ_2 ve σ_3 için sırasıyla, 74°/111°, 16°/291° ve 0°/201° (eğim/azimut) olarak hesaplanmıştır. Akhisar-Manisa bölgesi tam açılma rejiminin (pure extensional regime) etkisi altındadır ($R' = 0.75$).
- (5) 1903 – 2020 yılları arasındaki açılma hızı 1.3 mm/yıl olarak hesaplanmıştır.
- (6) KD-GB açılmaya bağlı olarak, Ege Bölgesinde kabuğun nispeten ince oluşu, buna bağlı olarak ergimiş sıvıların hareketi ve çalışma alanındaki jeotermal elektrik santrallerinin sondaj derinliği-çekilen su miktarı ilişkisinin meydana gelen küçük depremlerin üzerindeki etkileri de ihmal edilmemelidir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar KRDAE ve AFAD personeline deprem verilerini son kullanıcıya açtıkları için teşekkür ederler. Yazarlar, makalenin düzeltme aşamasındaki katkılarından dolayı hakemlere ve Editör'e teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Akyol N., Zhu L., Mitchell B.J., Sozbilir H., Kekovali K., 2006. Crustal structure and local seismicity in western Anatolia. *Geophys. J. Int.*, 166(3), 1259-1269.
- Alsan E., Tezucan L., Bath M., 1976. An earthquake catalogue for Turkey for the interval 1913–1970. *Tectonophysics*, 31(1-2), T13-T19.
- Ambraseys N.N., 1988. Engineering seismology: part I. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 17(1), 1-50.
- Angelier J., Mechler P., 1977. Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits. *Bulletin de la Société géologique de France*, 7(19), 1309-1318.
- Bouchon M., 1981. A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(4), 959-971.

Bozkurt E., 2000. Timing of extension on the Büyük Menderes Graben, western Turkey, and its tectonic implications. *Geological Society, London, Special Publications*, 173(1), 385-403.

Bozkurt E., Mittwede S.K., 2005. Introduction: Evolution of continental extensional tectonics of western Turkey. *Geodinamica Acta*, 18(3-4), 153-165.

Brune J.N., 1968. Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault zones. *Journal of Geophysical Research*, 73(2), 777-784.

Delvaux D., 1993. The TENSOR program for paleostress reconstruction: examples from the east African and the Baikal rift zones. *TERRA nova*, 5(1), 216.

Delvaux D., Moeys R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnichenko A., Ruzhich V., San'kov V., 1997. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, central Asia, Part 2. Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 282(1-4), 1-38.

Delvaux D., Sperner B., 2003. Stress tensor inversion from fault kinematic indicators and focal mechanism data: the TENSOR program. New insights into structural interpretation and modelling, 212, 75-100.

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

Dogan B., Irmak T.S., Karakas A., Kalafat D., 2016. Seismotectonic content by the source parameters of the 10 June 2012 Ölüdeniz-Fethiye (Dodecanese Islands) Mw 6.1 earthquake and aftershocks (southwestern Turkey). *Acta Geodaetica et Geophysica*, 51(1), 15-41.

Ergin K., Güçlü U., Uz Z., 1967. A catalog of Earthquake for Turkey and Surrounding Area (11 A.D. to 1964 A.D.). ITU Faculty of Mining Engineering, Istanbul, Turkey.

Eyidoğan H., Güçlü U., Utku Z., Değirmenci E., 1991. Türkiye büyük depremleri makrosismik rehberi (1900-1988). Kurtiş Matbaası, İstanbul.

Eyidogan H., Jackson J., 1985. A seismological study of normal faulting in the Demirci, Alaşehir and Gediz earthquakes of 1969–70 in western Turkey: Implications for the nature and geometry of deformation in the continental crust. *Geophys. J. Int.*, 81(3), 569-607.

Fojtíková L., Vavryčuk V., Cipciar A., Madarás 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.

Gurer O.F., Kaymakci N., Cakir S., Ozburan M., 2003. Neotectonics of the southeast Marmara region, NW Anatolia, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(9), 1041-1051.

Holt W.E., Ni J.F., Wallace T.C., Haines A.J., 1991. The active tectonics of the eastern Himalayan syntaxis and surrounding regions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B9), 14595-14632.

Irmak T.S., 2013. Focal mechanisms of small-moderate earthquakes in Denizli Graben (SW Turkey). *Earth, Planets and Space*, 65(9), 943-955.

Irmak S., Taymaz T., 2009. Source mechanics of recent moderate earthquakes occurred in Honaz-Denizli (W Turkey) graben obtained by regional broadband waveform inversion. In

International Symposium on Historical Earthquakes and Conservation of Monuments in the Eastern Mediterranean Region, Istanbul, Turkey (pp. 350-356).

Jackson J., McKenzie D., 1984. Active tectonics of the Alpine—Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan. *Geophys. J. Int.*, 77(1), 185-264.

Kartal R.F., Demirtaş R., Kadıroğlu F.T., 2016. Seismotectonic Evaluation of August 08, 2019 Bozkurt (Denizli) Earthquake (Mw 6.0): Western Turkey.

Erişim Adresi:

https://www.researchgate.net/publication/336719706_Seismotectonic_Evaluation_of_August_08_2019_Bozkurt_Denizli_Earthquake_Mw_60_Western_Anatolia

Kaypak B., Gokkaya G. 2012. 3-D imaging of the upper crust beneath the Denizli geothermal region by local earthquake tomography, western Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 211, 47-60.

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

Kocuyigit A., Yusufoglu H., Bozkurt E., 1999. Evidence from the Gediz graben for episodic two-stage extension in western Turkey. *Journal of the Geological Society*, 156(3), 605-616.

McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., Georgiev I., Gurkan O., Hamburger M., Hurst K., Kahle H., Kastens K., Kekelidze G., King R., Kotzev V., Lenk O., Mahmoud S., Mishin A., Nadariya M., Ouzounis A., Paradissis D., Peter Y., Prilepin M., Reillinger R., Sanli I., Seeger H., Tealeb A., Toksoz M.N., Veis G., 2000. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B3), 5695-5719. <https://doi.org/10.1029/1999JB900351>

Ozer C., Gok E., Polat O., 2018. Three-dimensional seismic velocity structure of the Aegean Region of Turkey from local earthquake tomography. *Annals of Geophysics*, 61(1), 111.

Ozer C., Polat O., 2017. 3-D crustal velocity structure of İzmir and surroundings. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32, 733-747.

Sengor A.M.C., 1987. Cross-faults and differential stretching of hanging walls in regions of low-angle normal faulting: examples from western Turkey. *Geological Society, London, Special Publications*, 28(1), 575-589.

Seyitoglu G., Scott B.C., 1996. The cause of N–S extensional tectonics in western Turkey: Tectonic escape vs back-arc spreading vs. orogenic collapse *J. Geodyn.*, 22 (1996), pp. 145-153.

Sokos E.N., 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.N., Zahradnik J., 2013. Evaluating centroid-moment-tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. *Seismological Research Letters*, 84(4), 656-665.

Soysal H., Sipahioğlu S., Kolcak D., Altinok Y., 1981. Türkiye ve Cevresinin Tarihsel Deprem Katalogu. TUBITAK, Proje no. TBAG 341, Istanbul, 86 pp.

Taymaz T., Jackson J., McKenzie D., 1991. Active tectonics of the north and central Aegean Sea. *Geophys. J. Int.*, 106(2), 433-490.

Taymaz T., Price S., 1992. The 1971 May 12 Burdur earthquake sequence, SW Turkey: a synthesis of seismological and geological observations. *Geophys. J. Int.*, 108(2), 589-603.

Tepe C., Sozobilir H., 2017. Tectonic geomorphology of the Kemalpaşa Basin and surrounding horsts, southwestern part of the Gediz Graben, Western Anatolia. *Geodinamica Acta*, 29(1), 70-90.

Zhu L., Mitchell B.J., Akyol N., Cemen I., Kekovali K., 2006. Crustal thickness variations in the Aegean region and implications for the extension of continental crust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B1).

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-bilgileri/buyuk-depremler/>

URL-2; MTA, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü,
Erişim adresi: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/yenilenmis-diri-fay-haritalari>

URL-3; 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-4; AFAD, T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı,
Erişim adresi: <http://tdvm.afad.gov.tr/>