



Investigation of the Temporal and Spatial Properties of Earthquake Activity and Gutenberg-Richter Parameters in the Vicinity of Manisa Akhisar

Haluk Eyidogan¹

¹Saksili Sokak, Deniz Apt., 3/1, D.2, Heybeliada, Adalar, 34970, Istanbul, Turkey
ORCID: 0000-0003-4218-5106

Keywords

Earthquake swarm, decrease in b-value, completeness magnitude, active fault, extensional tectonics

Highlights

- * Decrease in b-value before the seismic activity
- * Spatial and temporal change of Gutenberg-Richter (G-R) parameters
- * Relationship between earthquake parameters and fault mechanism solutions of active faults

Acknowledgements

The author thanks AFAD and KRDAE for making earthquake data and reports available.

Aim

In this study, spatial and temporal characteristics of seismicity and G-R parameters were analyzed for Akhisar-Golmarmara (western Turkey) region.

Location

Akhisar-Golmarmara region of Manisa City (western Turkey)

Methods

Spatial and temporal changes of Gutenberg-Richter parameters (b-value, a-value and M_c value) were analyzed using ZMAP algorithm.

Results

Two of the four earthquake activities in Akhisar-Golmarmara (western Turkey) had an obvious b-value decreasing pattern. It is suggested that the reason for the decrease in b-value is related to the increase in effective stress on normal faults before the activity.

Supporting Institutions

--

Manuscript

Research Article

Received: 31.07.2020

Revised: 10.09.2020

Accepted: 10.09.2020

Printed: 30.12.2020

DOI

10.46464/tdad.776186

Corresponding Author

Haluk Eyidogan

Email: halukeyidogan@yahoo.com.tr

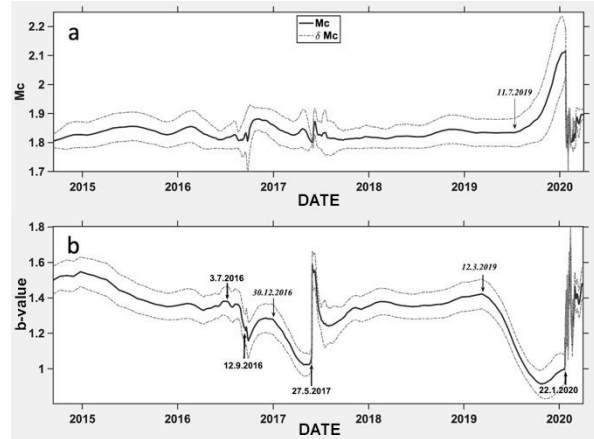
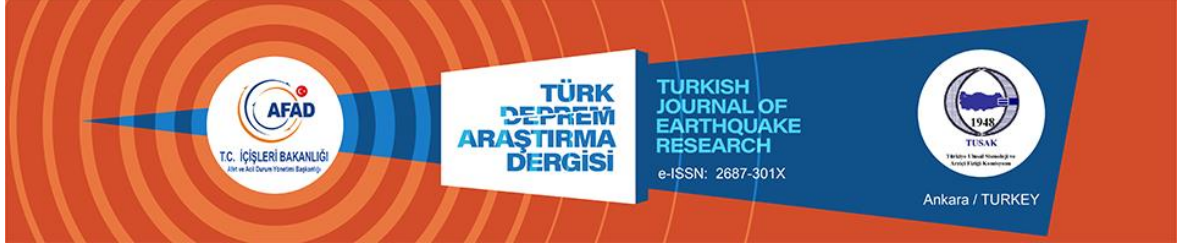


Figure
b-value decreasing and M_c increasing pattern in Akhisar-Golmarmara earthquake activity

How to cite

Eyidogan H., 2020. Investigation of the Temporal and Spatial Properties of Earthquake Activity and Gutenberg-Richter Parameters in the Vicinity of Manisa Akhisar, *Turk. J. Earthq. Res.* 2 (2), 138-159, <https://doi.org/10.46464/tdad.776186>



Manisa Akhisar Civarındaki Deprem Aktivitesi ile Gutenberg-Richter Parametrelerinin Zamansal ve Mekânsal Özelliklerinin İncelenmesi

Haluk Eyidoğan¹

¹ Saksılı Sokak, Deniz Apt., 3/1, D.2, Heybeliada, Adalar, 34970, İstanbul, Türkiye
ORCID: 0000-0003-4218-5106

ÖZET

Batı Anadolu Gediz Çöküntü Havzası'nın kuzey kanadında yer alan Soma-Akhisar-Gölmarmara çevresinde 2016-2020 tarihleri arasında olmuş dört deprem etkinliği değerlendirilmiştir. 3 Temmuz 2016, 12 Eylül 2016, 27 Mayıs 2017 ve 22 Ocak 2020 tarihlerindeki deprem etkinliklerinin dışmerkez dağılımlarının, fay mekanizması çözümlerinin, sismik enerji yoğunluklarının ve G-R değişkenlerinin mekânda ve zamanda değişimleri dikkat çekici örüntüler oluşturmuştur. 2017 ve 2020 deprem etkinlikleri öncesinde b-değerinde önemli düşüş örüntüleri oluşmuştur. b-değeri düşüşü 2017 aktivitesinden 148 gün önce başlarken, benzer düşüş daha büyük olan 2020 aktivitesinden 316 gün önce başlamıştır. Soma-Akhisar-Gölmarmara havzasında oluşan 2017 ve 2020 etkinliklerindeki b-değerinin önemli derecede düşüş nedeni bölgedeki fayların üzerindeki etkin gerilimin artması ve deprem aktivitesi öncesi fiziksel değişim süreci etkisi olabilir.

Anahtar kelimeler

Deprem kümelenmesi, b-değeri düşüşü, deprem büyüklüğü tamlığı, aktif fay, genişleme tektoniği

Öne Çıkanlar

- * Deprem etkinliği öncesi b-değeri düşüşü
- * G-R değişkenlerinin zaman ve mekânda değişimi
- * Deprem değişkenlerinin ve fay mekanizması çözümlerinin Akhisar çevresinde aktif faylarla ilişkileri

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 31.07.2020
Düzeltilme: 10.09.2020
Kabul: 10.09.2020
Basım: 30.12.2020

DOI

10.46464/tdad.776186

Sorumlu yazar

Haluk Eyidoğan
Eposta:
halukeyidogan@yahoo.com.tr

Investigation of the Temporal and Spatial Properties of Earthquake Activity and Gutenberg-Richter Parameters in the Vicinity of Manisa Akhisar

Haluk Eyidoğan¹

¹ Saksılı Sokak, Deniz Apt., 3/1, D.2, Heybeliada, Adalar, 34970, İstanbul, Turkey
ORCID: 0000-0003-4218-5106

ABSTRACT

Four earthquake activities between 2016 and 2020 were evaluated in the vicinity of Soma-Akhisar-Gölmarmara in the northern segment of the Gediz Graben, western Turkey. Changes in epicentral distribution, fault mechanism solutions, seismic energy densities and G-R parameters of earthquake activities on July 3, 2016, September 12, 2016, May 27, 2017 and January 22, 2020, have created remarkable patterns in space and time. Prior to the 2017 and 2020 earthquake events, significant patterns of decrease in b-value occurred. The b-value decline started 148 days before 2017 activity, while a similar decline started 316 days before the larger 2020 activity. The reason for the significant decrease in the b-value in the 2017 and 2020 activities occurring in the Soma-Akhisar-Gölmarmara basin may be due to the increase in the effective stress on the faults in the region and the physical change process before the intensive earthquake activity.

Keywords

Earthquake swarm, decrease in b-value, completeness magnitude, active fault, extensional tectonics

Highlights

- * Decrease in b-value before the seismic activity
- * Spatial and temporal change of Gutenberg-Richter (G-R) parameters
- * Relationship between earthquake parameters and fault mechanism solutions of active faults

Manuscript

Research Article

Received: 31.07.2020
Revised: 10.09.2020
Accepted: 10.09.2020
Printed: 30.12.2020

DOI

10.46464/tdad.776186

Corresponding Author

Haluk Eyidoğan
Email:
halukeyidogan@yahoo.com.tr

1. GİRİŞ

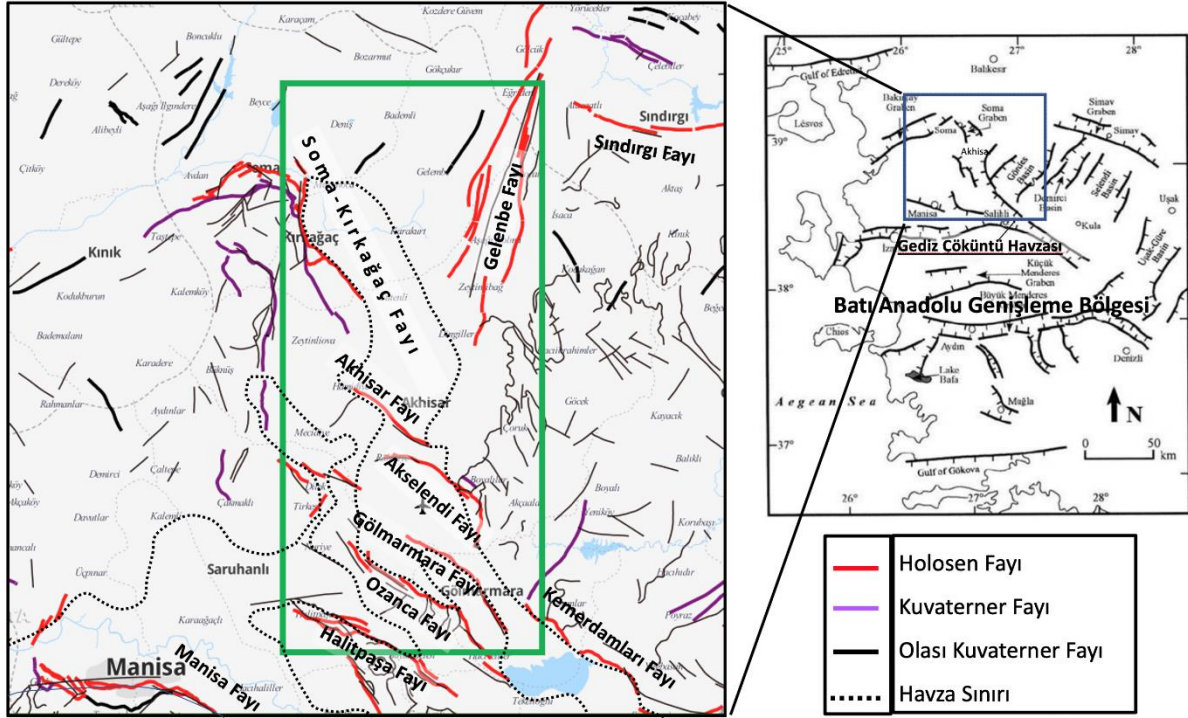
Türkiye'nin Manisa İli'nin Soma-Akhisar-Gölmarmara çevresinde son yıllarda sıkça gündeme gelen yoğun deprem etkinlikleri olmaktadır. Batı Anadolu'nun genç ve karmaşık tektonik yapısı nedeniyle (Sengor 1987, Yılmaz ve diğ. 2000, Emre ve diğ. 2016) büyük ve yıkıcı depremler oluşmasının yanı sıra, deprem fırtınasını andıran deprem etkinlikleri yaşanmaktadır. Bu tür deprem etkinlikleri fazla hasar yapmamakla birlikte, uzun süren ve çevre halkını tedirgin eden bir durum yaratmaktadır (Demirtaş ve diğ. 2002, Yeken 2016, AFAD 2016; 2019; 2020a, Demirtaş 2020, Eyidoğan 2020, KRDAE 2014; 2020).

Deprem etkinlikleri zaman ve mekân içerisinde incelendiğinde özelliklerine göre mutad (background) depremler, öncü depremler, ana deprem ve artçı depremler olarak sınıflanır (Mogi 1963). Bu ayrımın zor olduğu ve çok sayıda küçük ve orta kuvvette depremlerden oluşan etkinlikler, deprem kümelenmesi veya deprem fırtınası olarak tanımlanır. Deprem fırtınaları gün, ay veya hatta yıllarca sürebilir. Böylesine bir sismik enerji salımı davranışı, büyük bir depremi (ana deprem) izleyen bir dizi artçı deprem sürecinden farklı seyrederek. Küme veya fırtına türündeki depremler çoğunlukla volkan, jeotermal kaynak ve okyanus ortası yarıkların bulunduğu alanlarda görülmektedir (Sykes 1970, Hill 1977, Ishida 1984). Kıta içerisi alanlarda deprem fırtınalarına özellikle genç jeolojik hareketlerin ve normal fayların bulunduğu çöküntü havzalarının yoğunlaştığı bölgelerde rastlanır.

Volkan etkinliklerinde mağmanın hareketleri sırasında ve yeryüzüne çıkarken çevre kayalarda yarattığı ek gerinim (strain) ve gerilim (stress) nedeniyle farklı boyutlarda faylanma ve kırılmalar gerçekleşmekte, dolayısıyla fırtınaya dönüşen depremler yaratacak yoğun küçük deprem etkinliği oluşmaktadır (Jacobs ve McNutt 2010). Yeraltına büyük miktarda basılan su veya sıvının yeraltındaki kırık ve faylara sızması (diffusion) durumunda, doğal dengeyi sağlayan gerilim alanı bozulur ve fırtınaya dönüşen küçük depremler tetiklenebilir (Hainzl ve Ogata 2005, Heinicke ve diğ. 2018, Hicks ve diğ. 2019). Jeotermal alanlarda doğal veya dış müdahalelerle termal denge değişimleri ve sıcak su akımlarının faylar/kırıklar ile etkileşimi deprem fırtınalarına neden olabilmektedir (Fischer ve diğ. 2010).

İnceleme alanımız batı Anadolu'nun güncel (genç) tektonik hareketlerin baskın olduğu ve deprenselliği yüksek alanlarından biridir. Afrika, Arap ve Avrasya Levhaları arasında kalan ve sürekli sıkışan Anadolu Levhası, günümüzde bu sıkışma rejimi altında çok karmaşık bir sismo-tektonik yapı sergilemektedir. Anadolu'nun yerkabuğu, bu kuzey-güney yönlü sıkışma altındayken (McKenzie 1978) Kuzey Anadolu Fayı ve Doğu Anadolu Fayı üzerinden batı yönünde hareket eder (Ketin 1969). Bu hareket sonucu Doğu Anadolu'daki yerkabuğu sıkışıp kalınlaşırken, batı Anadolu'nun yerkabuğu kuzeydoğu-güneybatı yönlü bir açılma gerilimi etkisi altında genişleyip incelik ve yılda ortalama 20 mm'lik bir hızla batıya doğru bir 'tektonik kaçış' hareketi sergiler (Sengor 1987, Yılmaz ve diğ. 2000, Bozkurt ve Sozbilir 2004). Son 12 milyon yıldır gelişen bu güncel tektonik rejim sürecinde Batı Anadolu'da yerkabuğunda bazen zıt yönde gelişen normal fayların denetlediği çöküntü havzaları (graben) ile onlara eşlik eden sırtlar (horst) oluşmuştur. Basamaklı yapılar şeklindeki bu çöküntü havzalarının yarattığı normal faylar yanı sıra, bu fayları kesen doğrultu atımlı faylar (accommodation fayı) ortaya çıkmıştır. Büyük çaplı bu çöküntü havzalarının sınırlarındaki (örn. Büyük Menderes, Küçük Menderes ve Gediz havzaları) normal fayların önündeki tavan blokları üzerinde daha küçük boyutta antitetik ve sentetik normal faylar gelişmiştir. Sismolojik ve tektonik bulgular Batı Anadolu'daki çöküntü havzalarını sınırlayan büyük normal fay yapılarının derinlere doğru eğim açılarının azalarak dekolman türü yapılara dönüşebileceğini göstermiştir (Eyidoğan ve Jackson 1985, Emre ve Sozbilir 1995, Bozkurt 2003). Birçok aktif unsuru barındıran bu karmaşık tektonik yapı büyük depremler yanı sıra, bazen küçük ve orta kuvvette çok sayıda depremden oluşan ve deprem fırtınasına dönüşen yoğun deprem etkinlikleri yaratmaktadır (Demirtaş ve diğ. 2002).

Bu makaledeki çalışma alanımız Soma-Akhisar-Gölmarmara (Manisa) ve çevresini kapsamaktadır. Bu alanın ve yakın çevresinin güncel tektonik özelliklerini 150 km uzunluğunda, 3-40 km genişliğinde ve D-B doğrultusunda uzanan Gediz Çöküntü Havzası'nı denetleyen jeolojik ve tektonik oluşumlar belirler (Şekil 1). Gediz Çöküntü Havzası güney tarafı aktif bir normal fayla sınırlanan asimetrik bir havza yapısı sergiler. Havzanın kuzey sınırındaki normal fayların daha az aktif oldukları öne sürülmüştür (Paton 1992, Yusufoglu 1996).



Şekil 1: Batı Anadolu Genişleme Bölgesinde yer alan Akhisar ve çevresindeki genç tektonik yapılar ve diri faylar (Fay bilgileri Emre ve diğ. (2016)'den (Tablo 1) alınmıştır. Tektonik haritadaki yeşil çizgili alan bu çalışmada Akhisar ve çevresinde deprem etkinliğinin incelendiği alanı göstermektedir. Batı Anadolu'nun genel tektonik hatlarını gösteren şekil Bozkurt (2001)'den alınmıştır.)

Bu çalışmanın amacı Soma-Akhisar-Gölmarmara çevresinde son beş yılda farklı konum ve ebatlardaki yoğun deprem etkinliklerinin sismolojik değişkenlerini ve sismotektonik özelliklerini belirlemektir. Bu amaçla, Akhisar ve çevresinde uzun süredir halkı korkutan ve hafif hasarlar yapan dört deprem etkinliğinin bölge tektoniği ile ilişkileri, episantr dağılımlarının ve Gutenberg-Richter değişkenleri olan M_c , a - ve b -değerlerinin (Gutenberg ve Richter 1944) zaman ve mekâna bağlı değişimleri incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

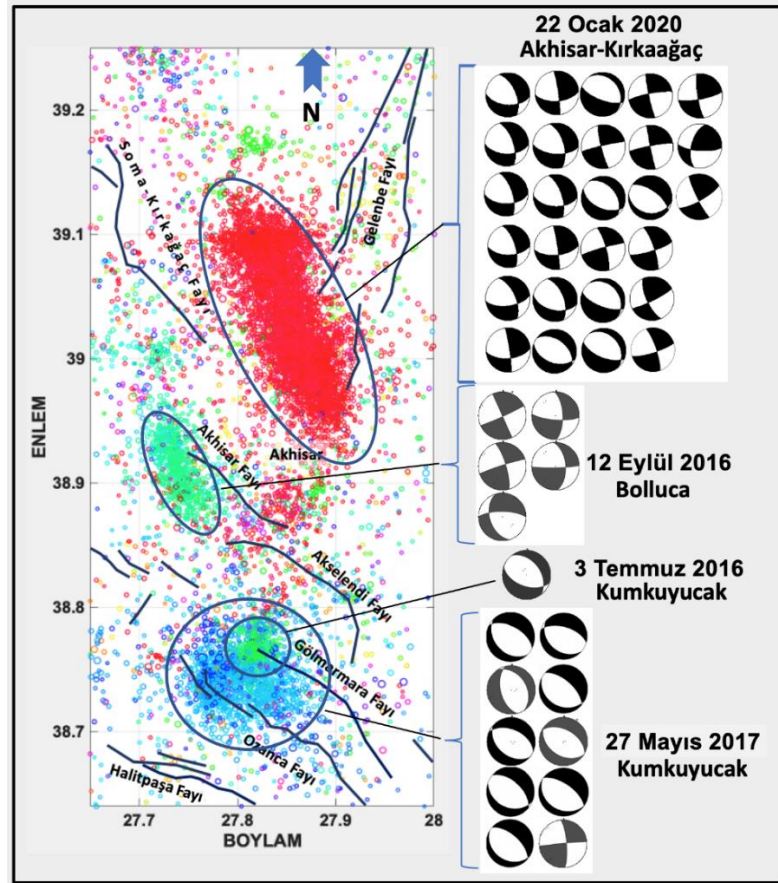
2. SOMA-AKHISAR-GÖLMARMARA ÇEVRESİNİN SİSMOTEKTONİK ÖZELLİKLERİ

Gediz Çöküntü Havzası, çok sayıda fay koluna ayrılan karmaşık bir büyük çöküntü havzasıdır. Havza batıya doğru uzanırken üç kola ayrılır. Bu kollardan Gölmarmara havzasından itibaren kuzey batıya uzanan bölümü Soma'ya doğru 70 km'lik bir genişliğe ulaşır (Şekil 1). Bu geniş havza, Manisa'nın bu bölgesinde çok sayıda saçılmış ve küçük karmaşık havzalar oluşturur. Havzanın kuzeybatı ucu, güneye bakan bir yay biçiminde yerleşen Soma-Kırkağaç Fayı'na bitişir. İnceleme alanındaki depremlerin fay mekanizması çözümleri ve sahada yapılan jeolojik gözlemler sonucunda, güncel tektonik hareketlerin ve diri fayların Kuvaterner döneminde KD-GB yönlü genişleme rejimi tarafından denetlendiği anlaşılmaktadır. MTA tarafından güncellenen Türkiye Diri Fay envanterine göre (Emre ve diğ. 2016) Soma-Akhisar-Gölmarmara çevresinde yer alan diri fayların yaratacağı olası deprem büyüklükleri ve fay uzunlukları ile ilgili bilgiler Tablo 1'de verilmiştir. İnceleme yaptığımız alanda 2012-2020 yılları

arasında Akhisar ve çevresini etkileyen dört adet belirgin deprem etkinliği oluşmuştur (Şekil 2). Tarihsel sırayla bunlar 3 Temmuz 2016 Kumkuyucak, 12 Eylül 2016 Bolluca, 27 Mayıs 2017 Kumkuyucak ve 22 Ocak 2020 Akhisar-Kırkağaç deprem etkinlikleridir. Bu deprem etkinlikleri içerisinde, M_w 5.4 büyüklüğünde bir deprem ile başlayan 22 Ocak 2020 etkinliği içerdiği kuvvetli deprem sayısı ve süresi bakımından en geniş ve güçlü deprem kümesini oluşturmuştur.

Tablo 1: Akhisar ve çevresindeki alanda yer alan aktif faylar (*Kod: Türkiye Diri Fay Haritası'nda verilen fay kodları (Emre ve diğ. 2016), N: Normal fay, SY: Sağ yönlü doğrultu atımlı fay)

Kod*	Fay Adı	Segment Sayısı	Fay Türü	Büyüklik M_w	Fay Uzunluğu km
27	Soma-Kırkağaç Fay Zonu	3	N	6.5-6.9	17-20-27
28	Gelenbe Fay Zonu	2	SY	6.9	35-36
30-1	Sındırgı Fayı	1	SY	6.9	35
44-12	Halitpaşa Fayı	1	N	6.7	23
44-13	Ozanca Fayı	2	N	6.2-6.7	11-27
44-14	Gölmarmara Fayı	1	N	6.5	18
44-15	Akselendi Fayı	1	N	6.6	19
44-16	Akhisar Fayı	1	N	6.4	12



Şekil 2: 1 Ocak 2014-22 Nisan 2020 gözlem döneminde Soma-Akhisar-Gölmarmara çevresinde belirgin bir şekilde oluşan dört adet kümelenmiş deprem etkinliğine ait dış merkezlerin konumları, bölgedeki diri faylar ve büyüklüğü M_w 4.0 ve daha fazla olan depremlerin fay mekanizması çözümleri (Deprem verileri AFAD (2020b)'dan, diri fay bilgileri Emre ve diğ. (2016)'den alınmıştır.)

2.1) Fay Mekanizması Çözümleri

Deprem etkinliklerini incelediğimiz dönemde büyüklüğü M_w 4.0 ve daha büyük olan bazı depremlerin fay düzlemi çözümleri AFAD tarafından rapor edilmiştir (Tablo 2). 12 Eylül 2016 etkinliği içerisindeki beş depremin doğrultu atım bileşeni baskın oblik faylanma çözümleri verdiği gözlenmiştir. Fay çözümlerindeki KKB-GGD doğrultulu sol yönlü doğrultu atımlı fay hareketi etkinlik alanına uzanan Akhisar Fayı'nın doğrultusuna uymakla birlikte deprem etkinliğinin Akhisar fay hattının batısında uzanması ve faylanma türü, Akhisar Fayı'nın daha önceki yayınlarda (AFAD 2016; 2017) belirtilen, kuzeydoğuya doğru dalan normal fay modeline uymamaktadır.

3 Temmuz 2016 etkinliğinden bir adet, 27 Mayıs 2017 etkinliklerinden on adet deprem için elde edilen fay mekanizması çözümleri başat bir şekilde KB-GD doğrultulu normal faylanma hareketini sergilemektedir. Dairesel bir yayılım gösteren bu deprem etkinliğinin Gölmarmara Fayı ve/veya Ozanca Fayı ile ilişkili olduğu söylenebilir.

22 Ocak 2020 etkinliğindeki yirmi yedi deprem için raporlanan (AFAD 2020b) fay mekanizması çözümlerinden on altı tanesi KB-GD yönlü normal faylanma gösterirken, on bir tanesi aynı doğrultuda doğrultu atımlı faylanma hareketi vermektedir (Şekil 2). Normal fay çözümlerinin doğrultusu ile deprem dış merkezlerinin alansal uzanımı uyumludur ancak fayın hangi eğim yönünde olduğu kesin olarak bilinmemektedir. Irmak ve diğ. (2020)'nin makalelerinde gösterdikleri iç merkez derinlik kesitlerinde deprem etkinliği Gelenbe Fayı ile Soma-Kırkağaç-Akhisar Fayları ile ilişkilendirilmiştir. 22 Ocak 2020 deprem etkinliği sağ yönlü doğrultu atımlı Gelenbe Fayı (Emre ve diğ. 2016) ile normal fay olarak tanımlanan Soma-Kırkağaç Fayı arasındaki bölgede oldukça geniş bir alanı kapsamaktadır. Her iki fayın birbirine yaklaştığı ve Gediz Çöküntü Havzası'nın kuzey uzantısı içerisinde yer alan bu alanda fay mekanizma çözümlerinden elde edilen doğrultu atımlı faylar ve normal faylar birlikteliğinin, buradaki sismotektonik yapının sismolojik tekniklerle daha ayrıntılı incelenmesi gerektiğini göstermektedir. Daha küçük depremlerin fay mekanizma çözümleri yapılamadığından ve özellikle deprem derinlikleri daha duyarlı belirlenemediğinden bu etkinlik sırasında alandaki antitetik ve sentetik normal fayların hareket ederek deprem fırtınasının daha uzun sürmesine katkı sağlayıp sağlamadıkları konusunda somut bir değerlendirme yapılamamaktadır. AFAD (2020a) raporunda 22 Ocak 2020 etkinliğinin odak mekanizmalarının sol yanal doğrultu atım bileşeni olan normal faylanmayı simgelediği ve tüm etkinlik bir arada değerlendirildiğinde KB-GD uzanımlı $60-70^\circ$ KD'ya eğimli Kırkağaç Fay segmentinin bu etkinliği oluşturabileceği belirtilmiştir. Ancak bu tezin, duyarlı olarak saptanacak deprem derinliklerinin ortaya koyacağı geometriyle test edilmesi gerekmektedir. Irmak ve diğ. (2020) güncelledikleri fay mekanizması çözümleriyle 22 Ocak 2020 deprem kümelenme etkinliğinin gerilme analizini yapmış, asal gerilme eksenlerinin Akhisar çevresinde KD-GB yönünde $R'=0.75$ değeri ile tam açılma (pure extensional) rejiminin etkin olduğunu göstermişlerdir.

Mevcut veri ve bulgulardan hareketle, bu alandaki küçük depremlere ait sismolojik değişkenlerin ve fay mekanizması çözümlerinin daha duyarlı olarak elde edilecek şekilde deprem kayıt ağının geliştirilmesi, böylece bölgedeki Gediz Çöküntü Havzası'nın sınırlarındaki ana faylar yanı sıra antitetik ve sentetik fayların ve bu fayları kesen doğrultu atımlı fayların birbirleri arasındaki kinematik süreçlerin ve ilişkilerin araştırılması önerilir.

Tablo 2: Akhisar ve çevresinde Temmuz 2016-Mayıs 2020 tarihleri arasında olmuş ve büyüklüğü M_w 4.0 ve daha fazla olan depremlerin fay mekanizması çözümleri (AFAD 2020b) (UTC: Evrensel saat, H: İç merkez derinliği, M_w : Moment Büyüklüğü, D, E, K: Derece cinsinden sırasıyla fay düzlemi doğrultusu, eğimi (dalım) ve kayma açısı)

Tarih gg-aa-yyyy	Saat ss-dd (UTC)	Enlem (derece)	Boylam (derece)	H km	M_w	D°	E°	K°
03-07-16	18:05	38.7630	27.8053	10	4.0	322	43	-65
12-09-16	08:26	38.9050	27.7451	18	4.6	336	90	-3
12-09-16	09:29	38.9023	27.7448	17	4.5	343	77	4
09-10-16	06:21	39.0091	27.7260	14	4.0	162	47	-26
15-10-16	02:49	38.9333	27.7200	8	4.1	358	65	-16
15-10-16	02:51	38.9298	27.7166	10	4.2	355	55	-6
27-05-17	15:53	38.7358	27.8156	11	5.1	298	55	-100
28-05-17	02:14	38.7286	27.8005	9	4.4	327	37	-105
28-05-17	02:16	38.7448	27.8465	7	4.0	294	49	-101
28-05-17	02:50	38.7206	27.7910	4	4.6	311	56	-79
28-05-17	02:52	38.7115	27.7956	7	4.8	311	61	-86
28-05-17	04:38	38.7365	27.8060	10	4.5	287	58	-103
28-05-17	07:34	38.7306	27.7743	3	4.1	311	62	-84
28-05-17	08:49	38.7541	27.8043	12	4.1	299	49	-93
28-05-17	11:04	38.7231	27.7921	11	4.8	306	63	-89
19-07-17	04:42	38.7851	27.8233	13	4.0	265	88	168
22-01-20	19:22	39.0488	27.8443	10	5.4	94	53	-141
22-01-20	19:25	39.0723	27.8523	7	4.0	91	53	-149
22-01-20	19:48	39.0763	27.8210	7	4.1	90	54	-151
22-01-20	20:17	39.0641	27.8646	7	4.3	88	57	-152
22-01-20	21:24	39.0513	27.8638	7	4.0	82	62	-148
22-01-20	21:30	39.0475	27.8460	7	4.0	84	62	-175
22-01-20	21:52	39.0715	27.8511	7	4.1	86	66	-173
22-01-20	22:39	39.0250	27.8481	8	4.2	93	60	-146
23-01-20	00:45	39.0390	27.8658	7	4.2	92	52	-149
24-01-20	21:16	39.0540	27.8625	10	4.0	352	86	-28
25-01-20	17:49	39.0293	27.8430	8	4.1	339	58	-50
28-01-20	11:26	39.1001	27.8411	7	4.8	110	46	-102
28-01-20	14:53	39.0831	27.8295	7	4.1	323	25	-60
28-01-20	20:10	39.0131	27.8700	5	4.7	166	82	-5
03-01-20	14:03	39.0980	27.8490	7	4.0	115	51	-107
02-02-20	00:23	39.0065	27.8730	7	4.4	254	85	168
02-02-20	03:25	39.0696	27.8045	7	4.0	111	67	-103
02-02-20	11:36	39.0858	27.8565	7	4.4	112	63	-104
04-02-20	16:47	38.9906	27.8701	7	4.3	168	84	-9
04-02-20	17:55	38.9893	27.8668	9	4.8	259	84	-177
07-02-20	06:31	39.0146	27.8705	10	4.0	305	63	-77
08-02-20	05:39	39.0315	27.8685	7	4.0	73	79	-168
18-02-20	16:09	39.1015	27.8453	15	5.2	341	78	-11
18-02-20	21:23	39.0941	27.8153	14	4.2	63	82	160
23-02-20	12:40	38.9833	27.8846	7	4.5	79	78	170
24-02-20	02:43	38.9796	27.8676	9	4.8	195	59	21
16-04-20	02:49	39.0911	27.8096	7	4.1	153	82	14

3. YÖNTEM

3.1) Deprem Büyüklüklerin Homojenleştirilmesi

Bu çalışmanın başlangıcında 1 Ocak 2012 ve 22 Nisan 2020 tarihleri arasında, 38.64° - 39.25° K enlemleri ile 27.65° - 28.0° D boylamlarının sınırladığı alanda AFAD (2020c) arşivinden büyüklüğü $M \geq 1.0$ olan 10.408 adet deprem seçilmiştir. Seçilen depremler içerisinde en büyük depremin büyüklüğü M_w 5.4 olarak verilmiştir.

Deprem veri setimizde depremlerin çoğunluğu yerel büyüklük M_L olmak üzere, süre (koda) büyüklüğü M_d ve sismik moment büyüklüğü M_w olarak rapor edilmişlerdir. Araştırmanın hedeflediği değişkenlerin hesabında bu farklılığın sapmalara nedeni olabileceği öngörülerek, deprem büyüklüklerinin M_w ölçeğine homojenleştirilmesine karar verilmiştir. Bu amaçla çoğunluğunun büyüklüğü $M_L \leq 3.0$ olan depremlerin M_w 'ye dönüştürülmesi için literatürde küçük depremler için kullanılacak bağıntılar taranmıştır. Bu konuyla ilgili yapılan çalışmalar incelenmiş (Grünthal ve diğ. 2009, Goertz-Allmann ve diğ. 2011, Dost ve diğ. 2018) ve veri setimizdeki M_L cinsinden büyüklüklerin M_w 'ye dönüştürülmesi işlemleri için Goertz-Allmann ve diğ. (2011)'nin (1), (2) ve (3) nolu bağıntıları, kodadan hesaplanan M_d türü büyüklükler için ise Bora (2016)'nın (4) nolu bağıntısı kullanılmıştır.

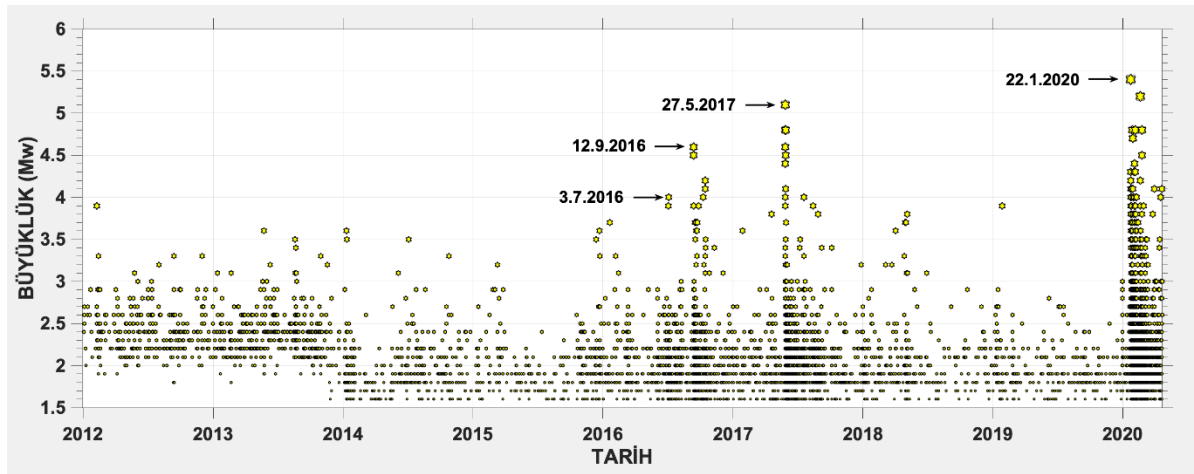
$$M_w = 0.594M_L + 0.985 \quad (M_L < 2.0) \quad (1)$$

$$M_w = 1.327 + 0.253M_L + 0.085 M_L^2 \quad (2.0 \leq M_L \leq 4.0) \quad (2)$$

$$M_w = M_L - 0.3 \quad (M_L > 4.0) \quad (3)$$

$$M_w = 0.93M_d + 0.35 \quad (4)$$

1 Ocak 2012-22 Nisan 2020 tarihleri arasında Akhisar ve çevresinde olmuş depremlerin M_w için homojenleştirilmiş büyüklükleri zamanın fonksiyonu olarak incelendiğinde 2012-2014 yılları arasında büyüklüğü $1.6 \leq M_w \leq 2.0$ arasında olan depremlerin çok azının rapor edilebildiği, bu nedenle bir veri boşluğu ve dolayısıyla tamlik kriterini karşılayamaması durumu olduğundan (Şekil 3), G-R parametre hesaplamasına 2014 yılı sonrası veriler dâhil edilmiştir.

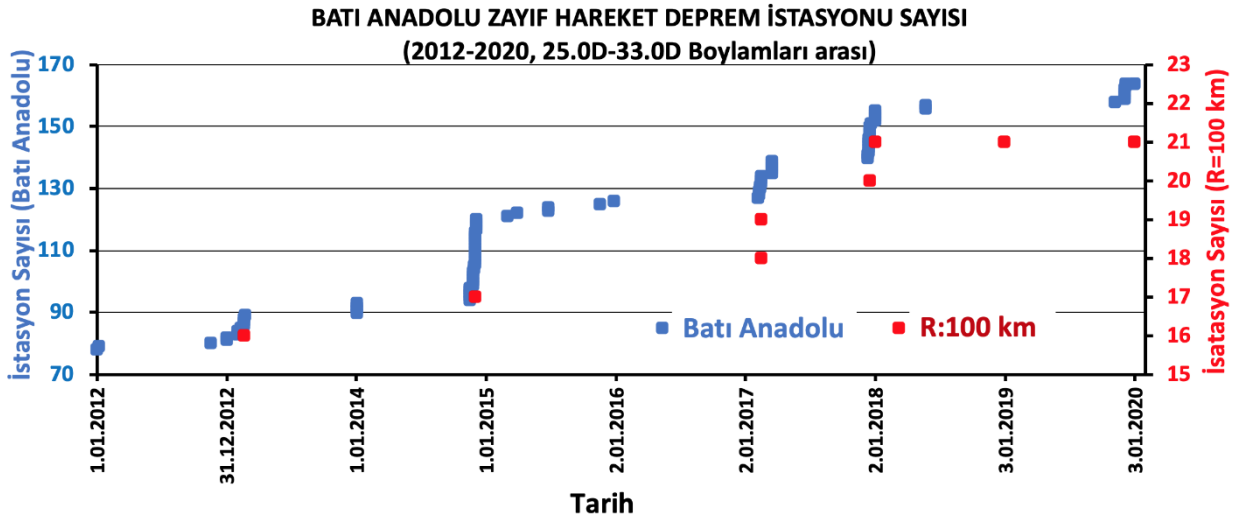


Şekil 3: 1 Ocak 2012-22 Nisan 2020 arasında Akhisar ve çevresinde olmuş deprem etkinliğinin zamana göre büyüklüklerinin dağılımı (Grafikte görüldüğü gibi 2012-2014 yılları arasında büyüklüğü $1.6 \leq M_w \leq 2.0$ arasında olan depremlerin çok azının (16 adet) rapor edilebilmesi nedeniyle veri boşluğu oluşmuştur. G-R parametrelerinin hesaplama işlemleri 2014-2020 tarihleri arasındaki deprem etkinliği için yapılmıştır.)

3.2) Deprem İstasyon Dağılımının Tamlık Analizine Etkisi

Bir bölgenin deprem kimliğinin duyarlı olarak belirlenmesi için her ölçekteki depremleri kaydetme alt yapısının yeterli olması ve yer kabuğu yapısının jeofizik ve jeolojik özelliklerinin de ayrıntılı bilinmesi gerekir. Özellikle insanlar tarafından duyulmayan küçük depremlerin (mikro-deprem veya depremcik) kaydedilmesi için uygun sayıda ve yakın deprem istasyonları konumlandırılmalıdır. Bu kurallar, kaydedilen depremlerin oluş zamanı, enlem, boylam, derinlik, büyüklük ve fay düzlemi çözümleri gibi temel değişkenlerinin duyarlı olarak hesaplanması ve bilimsel araştırmaların sağlıklı sonuçlar vermesi bakımından elzemdir. Bu amaçla Akhisar ve çevresinde deprem kaydeden istasyonların zaman içerisinde sayısal dağılımlarındaki değişimlere dair bilgi edinebilmek için Şekil 4'teki grafik hazırlanmıştır. İnceleme bölgesini içerisine alan Batı Anadolu bölgesinde AFAD (2020d)'a ait 165 adet zayıf hareket (partikül hızı) kaydı yapan deprem istasyonu vardır. 2006 ve 2014 yıllarında Batı Anadolu'da deprem istasyon sayısında önemli artışlar olmuştur. Kasım 2014 tarihinde Batı Anadolu'da mevcuda ek olarak 27 adet yeni deprem istasyonu kurulmuştur. Akhisar merkez olmak üzere 100 km yarıçaplı alan içerisinde ise deprem istasyonu sayısı 2006 yılında 5'den 15'e yükselmiştir. 2014-2020 yılları arasındaki inceleme döneminde 100 km yarıçaplı alanda istasyon sayısı 4 adet artarak sayı 21 olmuştur. Bu durumda deprem derinlikleri dışında sismolojik değişkenlerin zayıf istasyon performansından dolayı olumsuz etkilenme olasılığı azalmış, küçük depremlerin kaydedilme şansı da artmıştır.

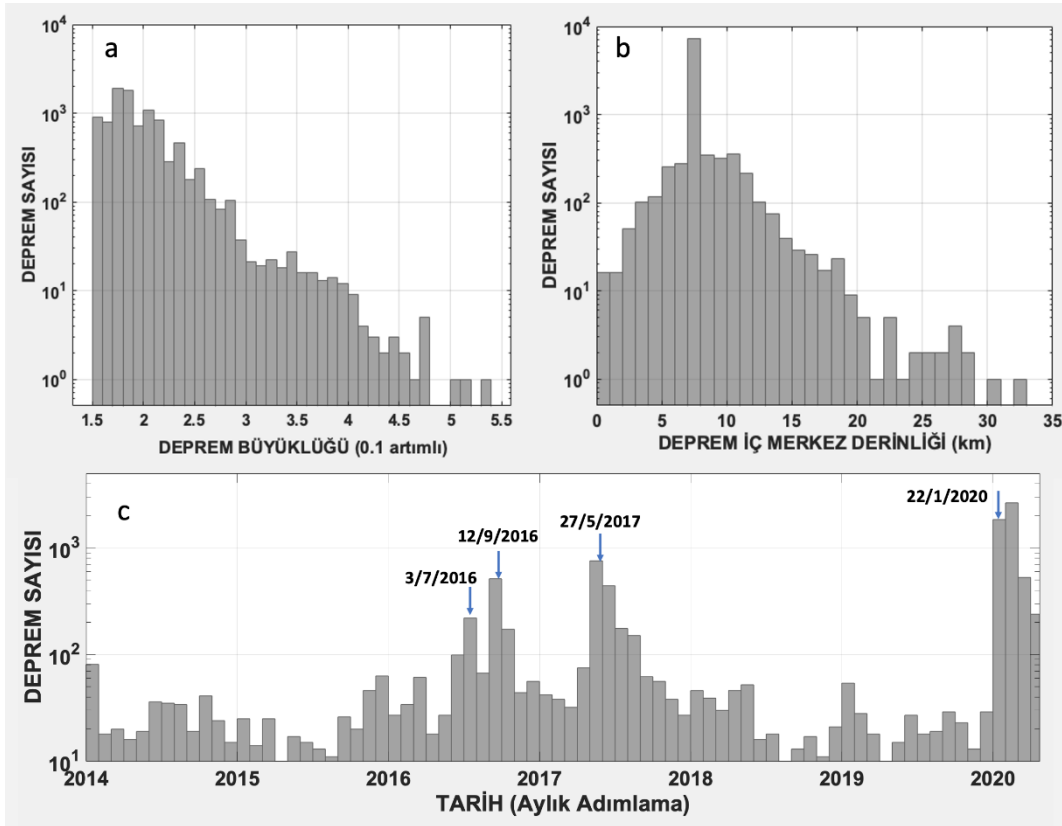
Deprem büyüklüklerinin homojenleştirilmesi ve deprem istasyonlarının deprem kaydetme performansı ile ilgili durum değerlendirildikten sonra bu sismolojik değişkenlerin hesap işlemlerine geçilmiştir. Söz konusu değişkenlerin zaman ve mekân bağımlı değişimlerini elde etmek amacıyla, 1 Ocak 2014-22 Nisan 2020 yılları arasında olmuş ve büyüklükleri M_w 1.6'dan büyük 9.737 adet deprem verisinin analizler için kullanılmasına karar verilmiştir (Şekil 2, Şekil 5).



Şekil 4: Batı Anadolu'da AFAD (2020d) tarafından işletilen istasyonlarının 2012-2020 yılları arasındaki sayısal gelişimi (Mavi renkli kareler tüm batı Anadolu'daki deprem istasyon sayılarını, kırmızı renkli kareler ise Akhisar merkez olmak üzere R:100 km yarıçaplı alandaki deprem istasyon sayılarını gösterir. 2012-2020 yılları arasında 100 km'den yakın kayıt istasyon sayısı 16'dan 21'e yükselmiştir.)

İnceleme alanımızdaki farklı yoğunluklarda dört dönemde yoğunlaşan (Şekil 2, Şekil 5c) deprem etkinliğindeki deprem sayısı ortalama olarak, 3 Temmuz 2016 Kumkuyucak etkinliği 250 depremi, 12 Eylül 2016 Bolluca etkinliği 1.160 depremi, 25 Mayıs 2017 Kumkuyucak etkinliği 2.030 depremi ve 22 Ocak 2020 Akhisar-Kırkağaç etkinliği ise 5.520 depremi kapsamaktadır.

1 Ocak 2014-22 Nisan 2020 tarihleri arasında Akhisar ve çevresinde olmuş depremlerin oluş sayısının büyüklük ve iç merkez derinliğine göre histogramları incelendiğinde (Şekil 5a, b) depremlerin önemli çoğunluğunun sığ ve büyüklüklerinin $1.6 \leq M_w \leq 2.2$ arasında olduğu anlaşılmaktadır. Gözlenen sığ deprem etkinliği beklenildiği gibi bölgenin sismotektonik özelliklerine uygundur. Ancak, alandaki depremlerin iç merkez derinlikleri incelendiğinde toplam 9.737 adet depremden 7.000 civarındaki depremin iç merkez derinlikleri 7 km derinlikte yığılmaktadır (Şekil 5b). Bölgedeki yerkabuğu yapısının ve tektonik hareketinin fiziksel bir özelliği olarak değerlendirilemeyecek bu durum, deprem istasyon sayı ve dağılımının küçük depremler için yetersiz olmasından ve yerkabuğu sismik hız yapısının iyi bilinmemesinden kaynaklanmaktadır. Bu yetersizlikten dolayı özellikle küçük depremlerin derinlik değerleri algoritma tarafından duyarlı olarak belirlenememekte ve böylece 7 km'lik bir derinlik değerine sabitlenmektedir. Bu sorunları kısmen çözebilecek sismolojik algoritmalar geliştirilmiş olmakla birlikte bu konu, buradaki incelemenin dışında ayrı bir çalışmayı gerektirmektedir. Deprem derinliklerinin duyarlılıkları tatmin edici olmadığından dolayı bu çalışmada yalnızca dış merkez konumları, büyüklük ve G-R değişkenleri kullanılmış, derinlik değerleri sismotektonik analizlere dâhil edilmemişlerdir.



Şekil 5: Manisa ve çevresinde 1 Ocak 2014-22 Nisan 2020 tarihleri arasında olmuş büyüklükleri M_w 1.6-5.4 arasındaki 9.737 depremin, a) deprem büyüklüğü, b) deprem iç merkez derinliği ve c) inceleme döneminde aylık aralıklarla olan deprem sayısı histogramları (Deprem sayılarının daha belirginleşmesi için grafiklerin düşey eksenleri logaritmik ölçekle gösterilmiştir. Deprem sayısı-Tarih histogramı üzerindeki tarihler dört deprem kümesi etkinliğinin başladığı tarihleri işaret eder.)

3.3) Manisa, Akhisar Çevresi Deprem Etkinliklerinin Gutenberg-Richter (G-R) Değişkenlerinin Analiz Yöntemi

Sismoloji külliyyatında, bir alanın depremsellik özelliklerine ve jeolojik yapı-deprem ilişkilerine yönelik incelemelerde Gutenberg-Richter (G-R) ampirik bağıntısı önemli bir yer tutar. Bu bağıntı, bir bölgede oluşan deprem dizisinde tamlik büyüklüğünden (M_c) büyük her bir büyüklük birimi ile o büyüklükteki depremin birikimli (kümülatif) oluş sayısı arasındaki ilişkiyi temsil eder ve $\log_{10} N(M)=a-bM$ şeklinde gösterilir (Gutenberg ve Richter 1944, Mogi 1962). Bu bağıntıdan hesaplanan a- ve b-değişkenlerinin zaman ve mekân içerisindeki özellikleri deprem etkinlik alanındaki birçok jeolojik, tektonik, jeofizik ve sismolojik unsur ile ilişkilidir. Çok genel olarak açıklamak istersek a-değeri deprem bölgesinin deprem etkinlik derecesinin bir göstergesidir. Deprem etkinlik düzeyi yanı sıra gözlem aralığı ve deprem sayısı gibi unsurlar a-değerini etkiler. Matematik olarak G-R bağıntısındaki dağılımın eğimi olan b-değerinin o bölgedeki yer kabuğunda gelişen gerilim (stres) değişimlerinin özelliklerini temsil ettiği söylenebilir. Birbirinden bağımsız deprembilim çalışmalarının bulgularına dayanarak b-değeri “gerilim ölçer” (Wu ve diğ. 2018) olarak nitelendirilmeye başlanmıştır. Sismik b-değerinin, yer içerisindeki fayların ve kırıkların çevresindeki gerilim değişimi, volkanik ve jeotermal kaynak alanlarındaki ısı değişimi, kayalardaki sıvının gözenek basıncı değişimleri ve fay/kırık yoğunluğu dahil yer içerisindeki fiziksel parametrelerdeki değişikliklerden dikkat çekici oranda etkilendiği gözlenmiştir. Bu fiziksel değişikliklerin birbiriyle olan bağlantıları göz önüne alındığında, b-değerinin araştırılması yoğun deprem etkinliklerini harekete geçiren fiziksel süreçleri belirlemede önemli katkılar sağlamaktadır. Ortalama b-değeri dünya için yaklaşık 1.0 olarak kabul edilir ancak farklı sismo-tektonik alanlarda 0.3-2.0 arasında değiştiği gözlenmiştir (Utsu 1971).

G-R bağıntısının temel değişkenleri olan M_c , a- ve b-değerlerinin güvenli olarak elde edilmesi için inceleme bölgesindeki deprem değişkenlerinin (konum, derinlik, büyüklük) en az hatayla hesaplanması en önemli ölçüttür. G-R bağıntısının hesaplanması sürecinde ilk iş inceleme alanındaki deprem büyüklüklerinin homojenleştirilmesini sağlamaktır. Bu aşamadan sonra veri tabanındaki deprem büyüklüklerinin tamlik (completeness) analizi yapılır ve hesaplarda kullanılacak en küçük deprem büyüklüğü sınırı olan M_c belirlenir. M_c değeri ile b-değeri arasında matematiksel olarak özgün bir ilişki vardır. M_c değerinin belirlenmesindeki zayıflıklar a- ve b-değerlerinin hata miktarının artmasına, dolayısıyla incelenen alanın deprem kimliğinin değerlendirilmesinde eksikliklere neden olabilmektedir (Hainzl 2016). Tamlik oranının tüm alan ve gözlem süresi içerisinde %90 ve üstü olması önerilir. M_c büyüklüğü ne kadar küçük depremleri temsil ediyorsa, o bölgede deprem istasyon sayısının ve kayıt performansının o kadar yüksek olduğu kabul edilir. Deprem istasyon performansı iyi olmasına rağmen M_c değerinde önemli değişimler gözleniyorsa bu depremselliğin etkinlik ve suskunluk dönemlerine işaret eden bir bulgu olabilir (Popandopoulos ve diğ. 2016). Bu durum inceleme bölgesindeki depremlerin zaman ve mekândaki özellikleri hakkında önemli ipuçları verir. Bu nedenle M_c , a ve b-değerlerinin bir arada zaman ve mekândaki değişimleri, depremlerle jeolojik hareketlerin ve yapıların özelliklerini anlamının yanı sıra, depremlerin önceden tahmini konusu dahil deprembilimde birçok araştırmaya konu olmuştur (Riviere ve diğ. 2018, Lei ve diğ. 2018).

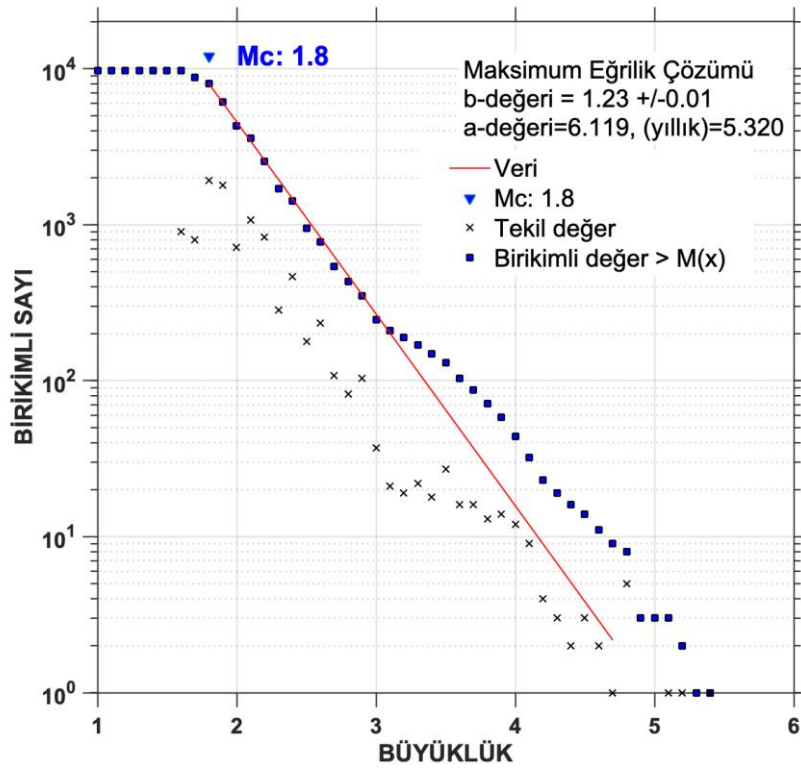
Akhisar ve çevresini kapsayan inceleme alanımızda M_w için homojenleştirilmiş depremlerin zaman ve mekânda M_c , a ve b-değeri analizi, Wiemer (2001) tarafından geliştirilmiş ZMAP yazılımının yeni versiyonu MATLAB R2018b altında çalıştırılan ZMAP7 ile yapılmıştır. M_c değeri, verilen bir deprem büyüklüğü için bulunan birikimli deprem sayısının o büyüklük dağılımının oluşturduğu fonksiyonundan maksimum eğri çözümü (maximum curvature) yöntemi ile hesaplanmıştır (Wiemer ve Wyss 2000). b-değerini duyarlı olarak elde etmek için maksimum olasılık yöntemi (Aki 1965, Shi ve Bolt 1982) kullanılmıştır.

4. BULGULAR

4.1) M_c , a- ve b-değerleri Bulguları

Bu işlemle elde edilen optimum M_c ile hata değeri en aza indirilmiş a- ve b-değerleri saptanmıştır. Kullanılan algoritmayla M_c , a ve b-değerleri burada hem mekân hem de zaman boyutunda incelenmiştir. M_c ve b-değeri hesabında grid aralıkları, her grid noktasında hareket edecek mekân penceresinin büyüklüğü ve her pencere alanına düşen en az (veya en fazla) deprem sayısı için çeşitli değerler denenmiş ve en az standart sapmayı temsil eden kıstaslar belirlenmiştir. Farklı ölçütler için elde edilen sonuçlar çok farklı olmamakla birlikte çalışma alanında grid aralığı 0.7 km x 0.7 km, pencere içerisine düşen minimum deprem sayısı 50, kayan pencere için yarıçap 7.0 km, değişken pencere için en yakın olay sayısı 150 olarak kabul edilmiştir. Tüm inceleme alanında en uygun M_c değeri $M_c:1.8$ olarak saptanmıştır. 2012-2020 tarihleri arasında Akhisar ve çevresini temsil eden en optimal M_c değeri için G-R bağıntısı (5) hesaplanmıştır (Şekil 6).

$$\text{Log}_{10} N(M_w) = 6.12 - 1.23M_w \quad (5)$$

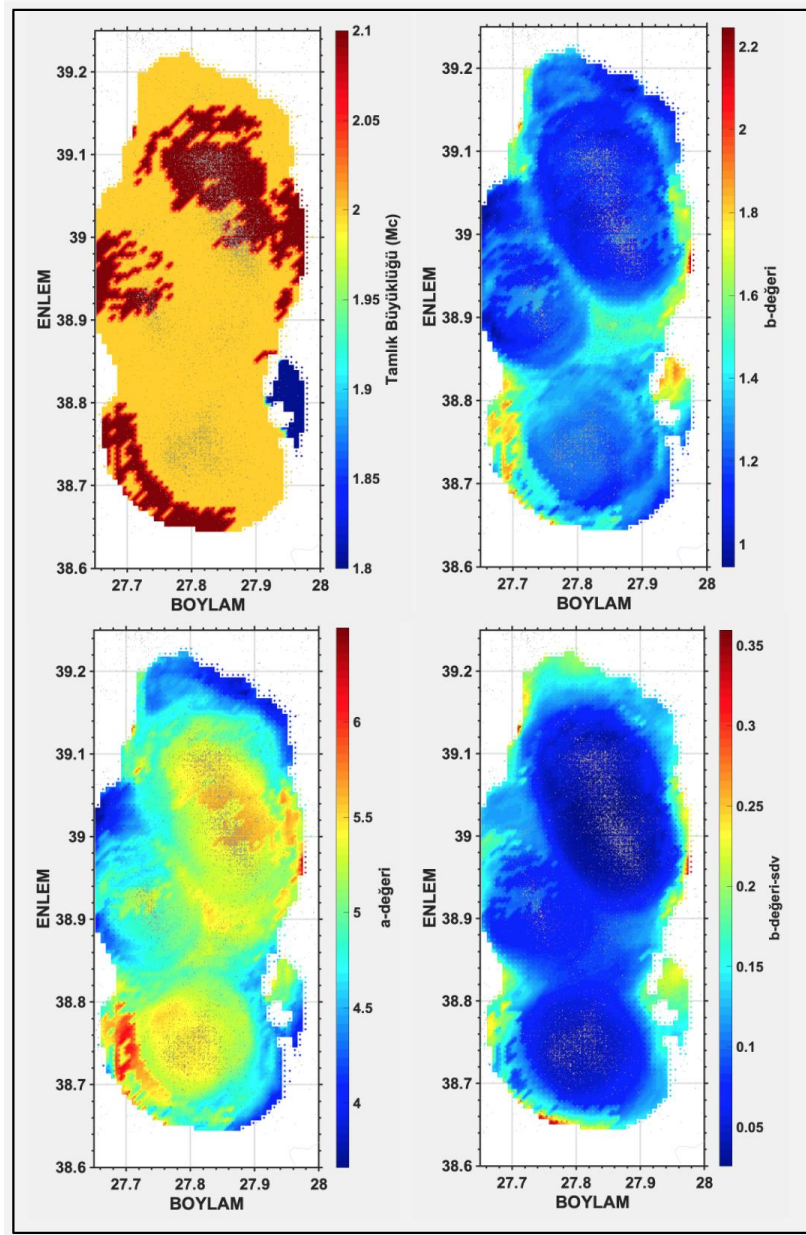


Şekil 6: Akhisar ve çevresinin 2014-2020 tarihleri arasındaki deprem etkinliğine ait G-R grafiği

4.1.1) G-R Değişkenlerinin Mekânsal Dağılım Özellikleri

M_c , a- ve b-değerleri için elde edilen değerlerin alansal dağılımı Şekil 7'de verilen haritalarda gösterilmiştir. Bölgede deprem yoğunlaşma alanlarında M_c büyüklüğünün 2.0-2.1 civarında kaldığı, b-değerinin 1.0-1.3 değerlerinde ve a-değerinin 4.0 ile 5.7 arasında değiştiği gözlenmiştir (Şekil 7). 2014-2020 tarihleri arasında gözlem bölgesindeki 3 Temmuz 2016, 12 Eylül 2016, 25 Mayıs 2017 ve 22 Ocak 2020 tarihlerindeki her dört etkinlik kümesi için (Şekil

5) ayrı ayrı hesaplanmıştır; bu etkinlikler için b-değerleri sırasıyla 1.48, 1.25, 1.26 ve 1.18 bulunmuştur. Her dört deprem etkinliğinde hesaplanan M_c değeri 1.8 olmuştur. 2014-2020 döneminde tüm bölgedeki en olası ortalama b-değeri 1.23 ± 0.01 olarak saptanmıştır. b-değerinin standart sapmasının (sdv) deprem fırtınasının yoğunlaştığı alanlarda 0.05 değerinin altına düşmesi (Şekil 7), bu alanlardaki b-değerinin duyarlı olarak tespit edildiğinin kanıtıdır. İnceleme alanı sınırlarında b-değeri ve standart sapmasının yükselmesi hesaba katılan deprem sayısının yetersizliğinden kaynaklanan bir sonuç olarak değerlendirilebilir. Benzer şekilde, deprem etkinliğinin azaldığı alanlarda a-değeri düşmektedir. 27 Mayıs 2017 ve 22 Ocak 2020 deprem fırtına alanlarında, depremlerin en yoğun olduğu yerlerde b-değerinin en düşük standart sapmalar göstermesi M_c değerinin tamlığı ve birim alana düşen deprem sayısının artışıyla ilgili olduğu söylenebilir.



Şekil 7: Akhisar ve çevresinde büyüklüğü $1.8 \leq M_w \leq 5.4$ büyüklüğündeki depremlerin oluşturduğu deprem kümelerinin M_c tamlık büyüklüğü değeri, b-değeri, a-değeri ve b-değerinin standart sapması (sdv) değerlerinin mekânsal dağılımı

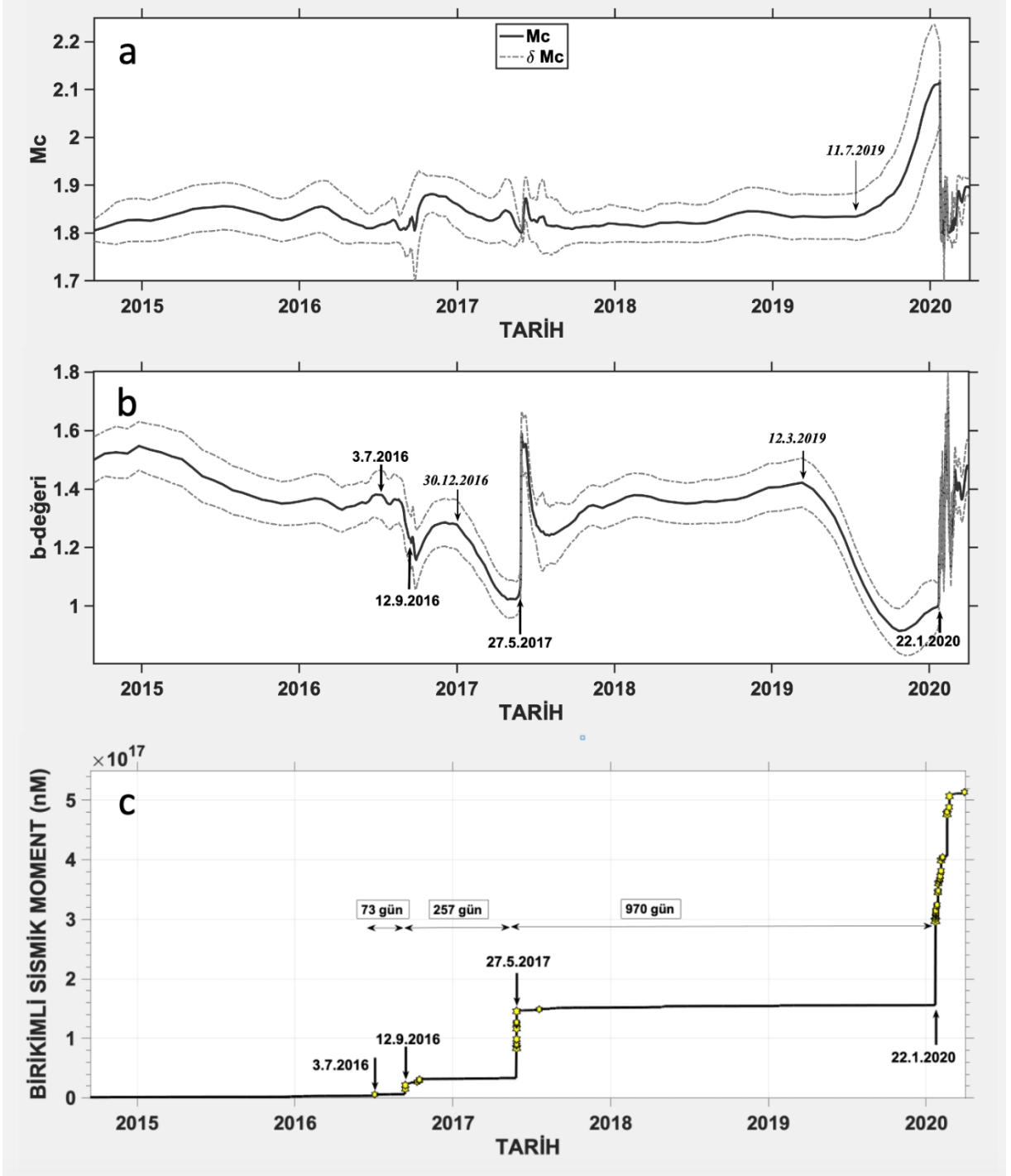
4.1.2) G-R Değişkenlerinin Zamana Göre Dağılım Özellikleri

2014-2020 yılları arasında dört farklı deprem etkinliğinin zamana bağlı olarak M_c değerleri, b -değerleri, sismik moment enerji değerleri ve etkinlikler arasındaki sürelerle ilgili dikkate değer değişimler ve ilişkiler gözlenmektedir (Şekil 8).

3 Temmuz 2016, 12 Eylül 2016 ve 27 Mayıs 2017 deprem etkinlikleri M_c 'nin değerlerini az etkilemiş ve M_c değeri 1.8 ile 1.9 arasında seyretmiştir. Ancak, 22 Ocak 2020 Akhisar-Karakurt deprem etkinliği başlamadan 195 gün önce, 11 Temmuz 2019'da M_c bir artış rejimi sergilemeye başlamış ve dikkat çekici bir anomali yaratmıştır (Şekil 8a). Bu artış 22 Ocak 2020 M_w 5.4 büyüklüklü depreminin oluşuna kadar muntazam bir şekilde sürmüştür. M_c değeri her dört deprem etkinliği için ortalama 1.8 olarak bulunurken, 22 Ocak 2020 depremi öncesi 1.85 değerinden 2.1 değerine kadar yükselmiştir (Şekil 8a). Bunun nedeni o süre içerisinde büyüklüğü M_w 2.0'den küçük depremlerin sayısındaki azalma olabilir.

Akhisar ve çevresi deprem etkinliklerinin b -değerlerinin zamanla değişimi dikkat çekici örüntüler ortaya çıkarmıştır. Ocak 2014 tarihinde b -değeri 1.5 civarından Temmuz 2016'da 1.35 değerine inmiştir. 3 Temmuz 2016, 12 Eylül 2016, 27 Mayıs 2017 ve 22 Ocak 2020 etkinliklerinde değişen derecelerde b -değerinde düşüş anomalileri oluşmuştur (Şekil 8b). 3 Temmuz 2016'daki deprem etkinliği ile b -değeri etkileşimi belirgin bir anomali göstermemektedir. 12 Eylül 2016 etkinliği öncesi b -değeri hafif bir düşüş sergilemiş, etkinlik başladıktan sonra düşüş sürmüştü ve sonra yükselmiştir. Bu yükselme sürerken 30 Aralık 2016'da b -değeri 1.25 düzeyinden düşmeye başlamış ve bu düşüş 148 gün sonra 1.0 değerine kadar azalmıştır. Bu azalmayı takiben 27 Mayıs 2017 tarihinde yoğun bir deprem etkinliği başlamıştır (Şekil 8b). Bu deprem etkinliğinin ilk günlerinde b -değeri 1.6 değerine kadar ulaşmış, Temmuz 2016 sonuna doğru 1.25 değerine inmiştir. 22 Ocak 2020'de Akhisar çevresinde başlayan ve oldukça uzun süren deprem etkinliğinin öncesinde b -değerinin muntazam ve belirgin bir şekilde sergilediği düşüş anomalisi oldukça ilginçtir. Bu etkinlikten 316 gün önce, 12 Mart 2019'dan itibaren b -değeri 1.4 düzeyinden düşmeye başlamıştır. b -değeri 29 Ekim 2019 tarihine kadar muntazam bir şekilde 0.9 düzeyine kadar inmiştir. Bu minimum değerden sonra b -değerinde tekrar hafif bir artış başlamış, 22 Ocak 2020'de 5.4 büyüklüğünde bir depremin arkasından aylarca süren bir deprem etkinliği oluşmuştur (Şekil 3, Şekil 8b). Bu deprem etkinliği sırasında b -değeri 1.1 ile 1.8 değerleri arasında kuvvetli değişimler yapmış ve deprem etkinliği geniş bir alana yayılmıştır (Şekil 3). Bu dört önemli etkinlik sırasında salınan sismik enerjinin düzeyi ve belirginliğini değerlendirmek ve b -değeri değişimleri ile karşılaştırmak için birikimli moment değerlerinin zamanla değişimi ayrıca grafiklenmiş ve yorumlanmıştır (Şekil 8c).

3 Temmuz 2016 ile 22 Nisan 2020 tarihleri arasındaki incelediğimiz dört deprem etkinliği ile ilişkili dört tane sismik enerji artış dönemi dikkat çekmektedir. Birincisi olan 3 Temmuz 2016'da oluşan etkinlik sırasında (Şekil 3) toplam $0.22E+16$ nM değerinde sismik enerji salınmıştır (Şekil 8c). Bu etkinlikten 73 gün sonra ikinci etkinlik dönemi 12 Eylül 2016'da başlamış ve $2.5E+16$ nM değerine ulaşan sismik enerji açığa çıkmıştır. Üçüncü etkinlik ise 257 gün sonra 27 Mayıs 2017 tarihinde başlamış ve $11.1E+16$ nM değerine ulaşan sismik enerji kısa bir sürede salınmıştır. Dördüncü ve en uzun süren deprem etkinliği ise 27 Mayıs 2017 etkinliğinden 970 gün sonra 22 Ocak 2020'de başlamış ve çok sayıda kuvvetli depremler içeren yoğun bir deprem etkinliğine dönüşmüştür. 22 Ocak 2020 de başlayan bu etkinlik, 22 Nisan 2020 tarihine kadar $36.0E+16$ nM düzeyinde sismik enerjiyi açığa çıkarmıştır (Şekil 8c).



Şekil 8: Akhisar ve çevresi deprem etkinliğinde kaydedilen dört deprem kümesinin (a) M_c değerinin zamanla değişim grafiği (22 Ocak 2020 deprem etkinliğinin öncesi 11 Temmuz 2019'da başlayan M_c değer artışı okla işaretlenmiştir. Noktalı eğri standart sapma değerleridir.), (b) b -değerinin zamanla değişim grafiği (Dört farklı deprem etkinliğinin başladığı tarihler normal karakter ile, b -değerinin düşüşe başladığı tarihler ise italik karakter ile işaretlenmiştir.), (c) Birikimli sismik moment değerlerinin zamanla değişim grafiği (Birikimli sismik moment grafiğindeki yıldızlar büyüklüğü $M_w \geq 4$ olan depremleri işaret eder. Yatay oklarla işaretlenen zaman aralıkları 3 Temmuz 2016 etkinliği dahil izleyen diğer deprem etkinliklerinden sonra sismik etkinliğin sakin olduğu gün sayısını göstermektedir.)

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Tektonik genişleme hareketlerinin ve çöküntü havzası gelişiminin etkin bir şekilde sürdüğü Soma-Akhisar-Gölmarmara bölgesinde 2014-2020 tarihleri arasında oluşan dört deprem kümesinin zaman ve mekânda sismolojik değişkenleri, fay mekanizması çözümleri ve Gutenberg-Richter değişkenleri olan M_c , a- ve b-değerleri incelenmiştir. Dört farklı zamanda olan deprem kümelerinin genelde normal fay mekanizmasının baskın olduğu görülmektedir. Ozanca Fayı ile Gölmarmara Fayı arasında kalan 3 Temmuz 2016 ve 27 Mayıs 2017 Kumkuyucak etkinliklerinde çözümlü yapılan fay mekanizmaları her iki fayın doğrultusu ve fay türü ile uyumludur. Ancak depremlerin duyarlı olmayan derinlik bilgilerini kullanamadığımızdan bu faylardan hangisinin harekete geçtiği konusunda değerlendirme yapılamamıştır.

12 Eylül 2016 Bolluca etkinliği normal fay bileşeni olan doğrultu atımlı bir fay hareketini temsil etmektedir. Fay mekanizması çözümleri konumları göz önüne alındığında Akhisar Fayı için önerilen kuzeydoğu yöndeki eğimine (AFAD 2016; 2017) uyumlu değildir.

22 Ocak 2020'de M_w 5.4 büyüklüğünde bir depremle başlayan Akhisar-Kırkağaç etkinliği geniş bir alanı kaplamış ve uzun sürmüştür. Normal fay sınıfındaki Soma-Kırkağaç Fayı'nın doğusunda uzanan ve sağ yönlü doğrultu atımlı Gelenbe Fayı'nın güney ucunda bulunan bu deprem etkinliğinin çözümlerinin içerisinde normal fay çözümleri yanı sıra çok sayıda doğrultu atımlı fay çözümleri elde edilmiştir.

Dört deprem kümesinin değerlendirilmesi aşamalarında derinlik değerlerinin duyarlı olarak hesaplanmaması nedeniyle depremlerin derinlik dağılımlarına bağlı örüntüler ve değişkenler kullanılamamıştır. Bu çalışmada kullanılan deprem konum hesaplarının gelişmiş konumlama yöntemleriyle yeniden yapılması ve faylarla ilişkilerinin ondan sonra değerlendirilmesini önermekteyiz.

İncelediğimiz dört deprem kümesinin süre ve sismik enerji değeri bakımından daha büyük olan 27 Mayıs 2017 ve 22 Ocak 2020 depremleri kümelerinin, etkinlik başlamadan önce çok belirgin b-değeri düşümü anomalileri yarattıkları saptanmıştır. 27 Mayıs 2017 etkinliğinin b-değeri düşüşü etkinlikten 148 gün önce başlamıştır. 22 Ocak 2020 deprem etkinliği öncesi ise çok daha belirgin olarak b-değeri düşüşü anomalisi olduğu gözlenmiştir. M_w 5.4 büyüklüğündeki Akhisar-Kırkağaç depremi öncesi b-değerinde başlayan düşüş trendi 316 gün sürmüştür. Her iki deprem için b-değeri düşüş örüntülerinin veri analizinde uygulanan çeşitli grid aralığı ve veri pencerelerinden önemli derece etkilenmediği ve genel düşüş karakterini koruduğu gözlenmiştir.

1970'li yıllardan bu yana deprebilimciler yaptıkları araştırmalarda b-değerinin büyük depremler öncesinde azaldığına dair önemli bulgular elde etmişlerdir. Bu konuda tartışmalar halen sürmekle birlikte (Kamer ve Hiemer 2015), bu düşüş anomalilerin önemli deprem etkinliklerini önceden uyarma ve haber verme konusunda umut verdiği söylenebilir.

Laboratuvar deneylerinde kaya örneklerine uygulanan gerilim değeri arttıkça b-değerinin belirgin bir biçimde düştüğüne dair çok sayıda gözlem vardır (Mogi 1962, Scholz 1968, Main ve diğ. 1989, Sammonds ve diğ. 1992, Amitrano ve diğ. 2005, Goebel ve diğ. 2013, Riviere ve diğ. 2018, Lei ve diğ. 2018). Schorlemmer ve diğ. (2005) b-değerinin fay üzerinde biriken gerilim (stres) ile ters ilişkili olduğunu ileri sürmüştür. Bunun anlamı, ana kırılma gerçekleşmeden önce gerilimdeki artışın b-değerinde düşüşe neden olduğu, depremden sonra azalan gerilim nedeniyle b-değerinin yükseleceğidir.

Gulia ve Wiemer (2016, 2019) b-değeri düşüş örneklerinin depremlerle ilgili olanlarını 6.6 büyüklüğündeki 2016 Norcia (İtalya) (Pino ve diğ. 2019) depremi için ve Kato ve diğ. (2016) 7.0 büyüklüğündeki 2016 Kumamoto (Japonya) depremleri için göstermişlerdir. Nuannin

(2006) İsviçre'nin Zinkruvan madeninde sekiz yıllık gözlemler sonucu rockburst (kaya patlaması) öncesi b-değerinde belirgin biçimde düşüş anomalileri sergilediğini ortaya koymuştur. Çeşitli tektonik ortamlarda yapılan araştırmalarda, b-değerinin ortamdaki gerilimin durumuna bağlı ters orantılılık kuralına uyduğu görülmüştür (Wang 1988, Enescu ve Ito 2003, Helmetter ve diğ. 2003, Schorlemmer ve diğ. 2005, Nanjo ve diğ. 2012, Xie ve diğ. 2019). Nuannin (2006) 1995-2004 yılları arasında Andaman-Sumatra bölgesinde b-değeri haritalarından büyük depremlerin düşük b-değeri alanlarında, yani yüksek gerilim alanlarında olduğunu göstermiştir. ABD Denver'de derinlere atık su depolama alanında yapılan sismolojik incelemelerde tetiklenmiş depremler yüksek kayma gerilimi nedeniyle düşük b-değerleri ve yüksek sismik moment değişimleri göstermiştir (Evans 1966, Wyss 1973, Shibutani ve diğ. 2002, Enescu ve Ito 2003) Japonya Tottori depreminden önce, 1989-1997 yılları arasında oluşan deprem fırtınalarının b-değerinin ortalama 0.6 olduğunu, depremden sonraki deprem etkinliğinin b-değerinin 1.3-1.4 düzeyine yükseldiğini göstermişlerdir. Wiemer ve Wyss (2002) fayların hareketlerine direnç ve engellerin (asperity) olduğu yerlerde b-değerinin düştüğünü belirtmişlerdir.

Gediz Çöküntü Havzası'nın kuzey kolu içerisine yerleşmiş Soma-Akhisar-Gölmarmara havzasında oluşan özellikle 27 Mayıs 2017 Kumkuyucak ve 22 Ocak 2020 Akhisar-Kırkağaç etkinliklerindeki b-değerinin düşüş nedeni olarak etkinlik öncesi bölgedeki normal fayların üzerindeki etkin gerilimin artması ve fayların harekete geçmeye hazırlanması süreci olduğu önerilebilir. İncelediğimiz dört saha örneğinden ikisinde çok belirgin olan bu b-değeri düşüş anomalisinden hareketle, batı Anadolu'nun diğer yerlerinde yaygın olarak görülen kümelenme şeklindeki deprem etkinlikleri yanı sıra Türkiye'nin diğer bölgelerindeki deprem etkinliklerinin de bu bağlamda izlenmesi ve değerlendirilmesi deprembilimde değerli sonuçlar üretebilir.

Depremselliğin mekânda ve zamanda b-değerine bağımlılık özelliğinden hareketle birçok sismolog deprem tehlikesinin belirlenmesinde ve daha önceden haber verilmesinde b-değerinin önemli bir araç olabileceği konusunda ümitlidir. Depremlerin gelişmiş sismik ağlarla izlenmesi gerçekleştiğinde, sismolojik değişkenlerin zaman ve mekânda incelenmesini sağlayacak veri kalitesi yükseldikçe ve yeni yöntemlerle inceleme olanakları artınca deprem tehlike uyarılarında başarı umudumuz daha da artacaktır.

TEŞEKKÜR

Yazar, deprem verilerini ve raporlarını kullanıma açtıkları için KRDAE ve AFAD kurumlarına, makalenin düzeltme aşamasındaki katkılarından dolayı hakemlere ve Editör'e teşekkür eder.

KAYNAKLAR

AFAD, 2016. 12.09.2016 Akhisar Manisa depremi raporu, Basına ve Kamuoyuna (Ön bilgi formu), 6 sayfa.

Erişim adresi: <https://deprem.afad.gov.tr/downloadDocument?id=446>

AFAD, 2017. 27.05.2017 Saruhanlı- Manisa Depremi, Basına ve Kamuoyuna (Ön bilgi formu), 6 sayfa.

Erişim adresi: <https://deprem.afad.gov.tr/downloadDocument?id=1533>

AFAD, 2019. 20 Mart 2019 Acıpayam (Denizli) depremi (M_w 5.5) değerlendirme raporu, T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Araştırma Dairesi, 17 sayfa.

Erişim adresi: <https://deprem.afad.gov.tr/downloadDocument?id=1670>

AFAD, 2020a. 22 Ocak 2020 Akhisar (Manisa) depremi (M_w 5.4) ön değerlendirme raporu, T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Araştırma Dairesi, 10 sayfa.

Erişim adresi: <https://deprem.afad.gov.tr/downloadDocument?id=1824>

AFAD, 2020b. Erişim adresi: <https://deprem.afad.gov.tr/faycozumleri>

AFAD, 2020c. Erişim adresi: <https://deprem.afad.gov.tr/ddakatalogu>

AFAD, 2020d. erişim adresi: <https://deprem.afad.gov.tr/istasyonlar>

Aki K., 1965. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log(N)=a-bM$ and its confidence limits, *Bull Earthq. Res. Int. Tokyo Univ.* 43, 237-239.

Amitrano D., Grasso J. R., Senfaute G., 2005. Seismic precursory patterns before a cliff collapse and critical point phenomena, *Geophysical Research Letters* 32(8),1-5, doi.org/10.1029/2004GL022270

Bora D.K., 2016. Scaling relations of moment magnitude, local magnitude, and duration magnitude for earthquakes originated in northeast India, *Earthq. Sci.* 29(3),153-164.

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

Bozkurt E., 2003. Origin of NE-trending basins in western Turkey, *Geodinamica Acta* 16, 61-81.

Bozkurt E., Sozibilir H., 2004. Tectonic evolution of the Gediz Graben: field evidence for an episodic, two-stage extension in western Turkey, *Geol. Mag.* 141(1), 63-79.

Demirtaş R., Tepeuğur E., Eravcı B., Yaman M., Yanık K., 2002. 1965 Salihli, 2000 Denizli ve 1999-2001 Savaştepe (Balıkesir) deprem dizileri, deprem fırtınası mı? 55. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri.

Demirtaş R., 2020. 22 Ocak 2020- Günümüz Akhisar-Kırkağaç (Manisa) Depremleri (Mw 5.4) Deprem Fırtınası mı? Kırkağaç-Soma Fayı, Gelenbe Fayı ve Akhisar Fayı'ndan mı kaynaklanıyor? ResearchGate.net, doi.org/10.13140/RG.2.2.23968.53767

Dost B., Edwards B. Bommer J.J., 2018. The relationship between M and ML - a review and application to induced seismicity in the Groningen gas field, the Netherlands, *Seismol. Res. Lett.* 89(3), 1062-1074.

Emre O., Duman T.Y., Ozalp S., Saroglu F., Olgun S., Elmaci H., Can T., 2016. Active fault database of Turkey, *Bulletin of Earthquake Engineering* 16, 3229-3275.

Emre T., Sozibilir H., 1995. Field evidence for metamorphic core complex, detachment faulting and accommodation faults in the Gediz and Büyük Menderes grabens, western Anatolia. In: Piskin O., Ergün, M. Savascin, M.Y. and Tarcan G. (eds), *Proceedings of International Earth Science Colloquium on the Aegean Region* 1, 73-93.

Enescu B., Ito K., 2003. Values of b and p: their Variations and Relation to Physical Processes for Earthquakes in Japan, *Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.* No.46 B.

Evans M.D., 1966. Man-made earthquakes in Denver, *Geotimes* 10, 11-18.

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, *Geophysical Journal International* 81(3), 569-607.

Eyidoğan H., 2020. Akhisar-Kırkağaç (Manisa) deprem fırtınasının özellikleri, *Bilim ve Gelecek*, Mayıs 2020.

Erişim adresi: <https://bilimvegelecek.com.tr/index.php/2020/05/01/akhisar-kirkagac-manisa-deprem-firtinasinin-ozellikleri>

Fischer T., Horalek J., Michalek J., Bouskova A., 2010. The 2008 West Bohemia earthquake swarm in the light of the WEBNET network, *Journal of Seismology* 14(4), 665-682.

Goebel T.H.W., Schorlemmer D., Becker T.W., Dresen G., Sammis C.G., 2013. Acoustic emissions document stress changes over many seismic cycles in stick-slip experiments, *Geophysical Research Letters* 40(10), 2049-2054.

Goertz-Allmann B.P., Goertz A., Wiemer S., 2011. Stress drop variations of induced earthquakes at the Basel geothermal site, *Geophysical Research Letters* 38(9), L09308, 1-5.

Grünthal G., Wahlström R., Stromeyer D., 2009. The unified catalogue of earthquakes in central, northern, and northwestern Europe (CENEC), *Journal of Seismology* 13, 613-632.

Gulia L., Wiemer S., 2016. Short-term earthquake risk assessment considering time-dependent b-values, *Geophysical Research Letters* 43(3), 1100-1108.

Gulia L., Wiemer S., 2019. Real-time discrimination of earthquake foreshocks and aftershocks, *Nature* 574 (7777), 193-199.

Gutenberg R., Richter C.F., 1944. Frequency of earthquakes in California, *Bulletin of the Seismological Society of America* 34, 185-188.

Hainzl S., Ogata Y., 2005. Detecting fluid signals in seismicity data through statistical earthquake modeling, *J. Geophys. Res.* 110, B05S07.

Hainzl S., 2016. Rate-Dependent incompleteness of earthquake catalogs, *Seismol. Res. Lett.* 87, 2A, 337-344.

Heinicke J., Woith H., Alexandrakis C., Buske S., Telesca L., 2018. Can hydroseismicity explain recurring earthquake swarms in NW-Bohemia?, *Geophysical Journal International* 212(1), 211-228.

Helmstetter A., Sornette D., Grasso J.R., 2003. Mainshocks are aftershocks of conditional foreshocks: How do foreshock statistical properties emerge from aftershock laws, *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 108(B1).

Hicks S.P., Verdon J., Baptie B., Luckett R., Mildon Z.K., Gernon T., 2019. A shallow earthquake swarm close to hydrocarbon activities: discriminating between natural and induced causes for the 2018-2019, Surrey, United Kingdom, Earthquake Sequence, *Seismol. Res. Lett.* 90(6), 2095-2110.

Hill D.P., 1977. A model for earthquake swarms, *J. Geophys. Res.* 82(8), 1347-1352.

Irmak T.S., Dogan B., Yavuz E., Livaoglu H., Sertcelik F., 2020. Focal mechanisms of the January 22, 2020 Akhisar-Manisa earthquake (Mw5.5) and its aftershocks: seismotectonic implications, *Turk. J. Earthq. Res.* 2 (1), 27-46.

Ishida M., 1984. Spatial-temporal variation of seismicity and spectrum of the 1980 earthquake swarm near the Izu Peninsula, Japan, *Bull. Seis.Soc.of America*. 74(1), 199-221.

Jacobs K., McNutt S.R., 2010. Using seismic b-values to interpret seismicity rates and physical processes during the preeruptive earthquake swarm at Augustine Volcano 2005-2006, (in: The 2006 Eruption of Augustine Volcano, Alaska, Edited by Power J.A., Coombs M.L., Freymueller J.T., U.S. Geological Survey Professional Paper, 1769), 60-75.

Kamer Y., Hiemer S., 2015. Data- driven spatial b value estimation with applications to California seismicity: To b or not to b, *J. Geophys. Res. Solid Earth* 120, 5191-5214.

Kato A., Fukuda J.I., Nakagawa S., Obara K., 2016. Foreshock migration preceding the 2016 $M_w7.0$ Kumamoto earthquake, Japan, *Geophysical Research Letters*. 43(17), 8945-8953.

Ketin İ., 1969. Türkiye'nin genel tektonik durumu ile başlıca deprem bölgeleri arasındaki ilişkiler, İ.T.Ü. Maden Fakültesi.

KRDAE, 2014. 2-4 Ağustos 2014 Termal-Yalova deprem etkinliği hakkında (Basın Duyurusu), B.Ü. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, UDİM, 4 sayfa.

Erişim adresi:

http://udim.koeri.boun.edu.tr/Depremler/onemliler/04082014_0122TSI_Termal_YalovaDepremi_Hakkinda.pdf

KRDAE, 2020. Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi, Basın Bültenleri.

Erişim adresi: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprem-bilgileri/onemli-depremler>

Lei X., Wang Z., Su J., 2018. The December 2018 $M_L5.7$ and January 2019 $M_L5.3$ earthquakes in South Sichuan Basin induced by shale gas hydraulic fracturing, *Seismol. Res. Lett.* 90(3), 1099-1110.

Main I., Meredith P., Jones C., 1989. A reinterpretation of the precursory seismic b-value anomaly from fracture mechanics, *Geophysical Journal International* 96(1), 131-138.

MATLAB, 2018. MathWorks.

Erişim adresi: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

McKenzie D.P., 1978. Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 55, 217-254.

Mogi K., 1962. Magnitude-frequency relationship for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes, *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, 40, 831-883.

Mogi K., 1963. Some discussion on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms-the fracture of a semi- infinitebody caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena (3rd Paper), *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo* 41, 615-658.

Nanjo K., Hirata N., Obara K., Kasahara K., 2012. Decade-scale decrease in b value prior to the $M9$ -class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes, *Geophys. Res. Lett.* 39, L20304, doi.org/10.1029/2012GL052997

Nuannin P., 2006. The Potential of b-value variations as earthquake precursors for small and large events, Acta Universitatis Upsaliensis Uppsala, Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology. 183, 46 pp.

Popandopoulos G. A., Baskoutas I., Chatziioannou E., 2016. The spatiotemporal analysis of the minimum magnitude of completeness M_c and the Gutenberg-Richter law b-value parameter using the earthquake catalog of Greece, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 52, 195-209.

- Paton S., 1992. Active normal faulting, drainage patterns and sedimentation in southwestern Turkey, *Journal of the Geological Society* 149, 1031-1044.
- Pino N.A., Convertito V., Madariaga R., 2019. Clock advance and magnitude limitation through fault interaction: the case of the 2016 central Italy earthquake sequence, *Scientific reports*, 9(1), 5005.
- Riviere J., Lv Z., Johnson P.A., Marone C., 2018. Evolution of *b*-value during the seismic cycle: Insights from laboratory experiments on simulated faults, *Earth and Planetary Science Letters* 482, 407-413.
- Sammonds P., Meredith P., Main I.G., 1992. Role of pore fluids in generation of seismic precursors to shear fracture, *Nature* 39, 228-230.
- Scholz C.H., 1968. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America* 58(1), 399-415.
- Schorlemmer D., Wiemer S., Wyss M., 2005. Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes, *Nature* 437, 539-542.
- Sengor A.M.C., 1987. Cross-faults and differential stretching of hangingwalls in regions of low-angle normal faulting: examples from western Turkey, *Geological Society, London*, 575-589, doi.org/10.1144/GSL.SP.1987.028.01.38.
- Shi Y., Bolt B.A., 1982. The standard error of the magnitude-frequency *b* value, *Bulletin of the Seismological Society of America* 72(5), 1677-1687.
- Shibutani T., Nakao S., Nishida R., Takeuchi F., Watanabe K., Umeda Y., 2002. Swarm-like seismic activity in 1989, 1990 and 1997 preceding the 2000 Western Tottori Earthquake, *Earth, Planets and Space*, 54, 831-845.
- Sykes R.L., 1970. Earthquake swarm and sea-sloor spreading, *J. Geophys. Res.* 75(32), 6598-6611.
- Utsu T., 1971. Aftershocks and earthquake statistics (3)-analyses of the distribution of earthquakes in magnitude, time and space with special consideration to clustering characteristics of earthquake occurrence (1), *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University, Ser. 7 (Geophysics)*. 3(5), 379-441.
- Wang J., 1988. *b* values of shallow earthquakes in Taiwan, *Bulletin of the Seismological Society of America* 78(3), 1243-1254.
- Wiemer S., Wyss M., 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the western United States, and Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America* 90(4), 859-869.
- Wiemer S., 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP, *Seismol. Res. Lett.* 72(3), 373-382.
- Wiemer S., Wyss M., 2002. Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes, *Advances in Geophysics* 45, 259-302.

Wu Y.-M., Chen S.K., Huang T.-C., Huang H.-H., Chao W.-A., Koulakov I., 2018. Relationship between earthquake b-values and crustal stresses in a young orogenic belt, *Geophysical Research Letters* 45, 1832-1837.

Wyss M., 1973. Toward a physical understanding of the earthquake frequency distribution, *Geophys. J. Royal Astronomical Society* 31, 341-359.

Xie W., Hattori K., Ha P., 2019. Temporal variation and statistical assessment of the b-value off the Pacific coast of Tokachi, Hokkaido, Japan, *Entropy* 21, 249.

Yeken T., 2016. Spatial analysis of b-value variability in Armutlu Peninsula (NW Turkey), *Open Geoscience* 8, 548-555.

Yilmaz Y., Genc S.C., Gurer F., Bozcu M., Yilmaz K., Karacik Z., Altunkaynak S., Elmas A., 2000. When did the western Anatolian grabens begin to develop? *Geological Society, London, Special Publications*. 173, 353-384.

Yusufoglu H., 1996. Northern margin of the Gediz graben: age and evolution, west Turkey, *Turk. J. of Earth Sci.* 5, 11-23.