



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Balıkesir İli ve Çevresinin Gutenberg-Richter İlişkisi ve Depremselliğinin Bölgesel Dağılımı

 Nazlı Ceyla ANADOLU KILIÇ^{a,*}

^a Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: nazlianadolu@nevsehir.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1114105

ÖZ

Bu çalışmada Balıkesir İli ve çevresinin (38.50°-40.50°K-26.00°-29.00°D) depremselliği ve depremsellik parametreleri belirlenmiştir. Bu amaçla 1900-2020 yılları arasında meydana gelen $M \geq 3.0$ olan deprem verileri Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü deprem kataloğundan alınmıştır. Çalışma alanının tamamı için “b”, “ D_c ” ve olası-güvenilir “ M_{mak} ” değeri sırası ile $b=1.17$, $D_c=2.22$ ve $M_{mak}=6.95$ olarak belirlenmiştir. Detaylı depremsellik değerlendirilmesi yapılabilmesi ve depremsellik parametrelerinin uzaysal dağılımlarının haritalanabilmesi için çalışma alanı 0. 5°Kx0. 5°D olacak şekilde alt alanlara ayrılmıştır. “a” değeri $3.63 \leq a \leq 7.49$, “b” değeri ise $0.73 \leq b \leq 1.55$ aralığında hesaplanmıştır. “ M_{mak} ” değerlerinin ise $4.9 \leq M_{mak} \leq 7.6$ aralığında değişim gösterdiği görülmüştür. Depremselliğin oldukça yüksek olduğu çalışma alanı içerisinde depremsellik açısından ön plana çıkan Balıkesir il merkezi ve yakın çevresi için $5.9 \leq M_w \leq 7.2$ büyüklüğündeki depremlerin olası olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: “b” değeri, “ M_{mak} ” değeri, Depremsellik, Frekans-magnitüd ilişkisi, Balıkesir

The Gutenberg-Richter Relationship and the Regional Distribution of Seismicity of Balıkesir Province and its Vicinity

ABSTRACT

In this study, the seismicity and the seismicity parameters of Balıkesir Province and its vicinity (38.50°-40.50°N-26.00°-29.00°E) were determined. For this purpose, the earthquake of magnitude $M \geq 3.0$ data used, in this analysis were taken from Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute's earthquake catalog, for the time period from 1900 to 2020. For the entire study area, “b”, “ D_c ” and possible-reliable “ M_{max} ” values were determined as $b=1.17$, $D_c=2.22$ and $M_{max}=6.95$ respectively. In order to make a detailed seismicity assessment and map the spatial distributions of the seismicity parameters, the study area was divided into subregions as 0. 5°N x 0. 5°E. The “a” value was calculated in the range of $3.63 \leq a \leq 7.49$ and, the “b” value was calculated in the range of $0.73 \leq b \leq 1.55$. It was observed that the “ M_{max} ” values varied in the range of $4.9 \leq M_{max} \leq 7.6$. It is seen that earthquakes of $5.9 \leq M_w \leq 7.2$ are possible for Balıkesir province and its vicinity, which are prominent in terms of seismicity in the study area, where seismicity is quite high.

Keywords: “b” value, “ M_{max} ” value, Seismicity, Frequency-magnitude relation, Balıkesir

I. GİRİŞ

Yeryüzündeki büyük depremlerin yaklaşık olarak %20'sinin meydana geldiği Alp-Himalaya Deprem Kuşağı üzerinde yer alan Türkiye'de ortalama olarak beş yılda bir, yıkıcı etkisi olan bir deprem meydana gelmektedir [1]. Depremin yıkıcı etkisine bağlı olarak sosyal, ekonomik ve kültürel kayıplar yaratmasının kökeninde hızlı şehirleşme ve endüstrileşme süreçleri ile ilişkili yerleşime uygun olmayan büyüme, kontrolsüz ve depreme dayanıklı olmayan bina inşaatları yatmaktadır. Oluşumu engellenemeyen depremin yıkıcı etkisini ortadan kaldırmak ve/veya en az seviyeye indirmek dolayısı ile bir doğa olayı olan depremin afete dönüşmesini engellemek mümkün olabilmektedir. Bunun için deprem meydana gelmeden, gelecekte deprem olması muhtemel bölgenin, depremin büyüklüğünün ve depremin o bölgede yaratacağı etkinin mühendislik uygulamaları açısından anlamlı ve istatistiksel açıdan güvenilir bir şekilde belirlenebilmesi gerekmektedir.

Gelecekte bir bölgede ne kadar büyüklükte bir depremin oluşabileceği deprem tehlike çalışmaları ile belirlenirken, büyüklüğü belirlenen bu depremin o bölgede yaratacağı etki ise deprem risk ve deprem senaryo çalışmaları ile belirlenmektedir. Aslında deprem açısından dirençli bir şehirleşmenin yolu deprem tehlike çalışmalarından elde edilecek güvenilir sonuçlara ve bu sonuçlara göre oluşturulacak deprem master planına dayanmaktadır. Böylelikle deprem kaynaklı oluşması muhtemel sosyo-ekonomik ve sosyo-kültürel kayıpların önüne geçilebildiği gibi deprem öncesi, deprem anı ve deprem sonrasında toplumun ve toplumu oluşturan paydaşların yaşam kalitelerinin kararlılığını sağlamak da mümkün olabilmektedir.

Bu çalışmada hem tarihsel hem de aletsel dönemde önemli deprem hareketliliklerinin yaşandığı ve bu nedenle de gelecekte de yoğun deprem hareketliliklerinin yaşanılmasının kaçınılmaz olacağı düşünülen Balıkesir ili ve çevresi (38.50°-40.50°K - 26.00°-29.00°D) çalışma alanı olarak belirlenmiş ve depremsellik çalışması yapılmıştır. Yapılan depremsellik çalışması kapsamında öncelikle tarihsel ve aletsel dönemde meydana gelen depremlerin dağılımları incelenerek çalışma alanının depremselliğinin sınırları belirlenmiş ve çalışma alanının tamamı için geçerli depremsellik parametreleri hesaplanmıştır. Belirlenen depremselliğin bölgesel değişiminin yakalanabilmesi için ise, oluşturulan alt alanlarda depremsellik parametreleri ayrı ayrı tekrar hesaplanmış ve dağılımları haritalandırılmıştır. Böylelikle nüfus yoğunluğu, sanayi, turizm faaliyetleri ile Türkiye için önemli bir yere sahip olan çalışma alanı için kapsamlı bir çalışma yapılarak deprem potansiyeli ortaya konmuştur.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

A. ÇALIŞMA ALANININ DEPREM GEÇMİŞİ VE DEPREM KATALOĞUNUN OLUŞTURULMASI

Herhangi bir bölgeye ait depremselliğin, depremsellik parametrelerinin dolayısı ile deprem tehlikesi ve riskinin belirlenebilmesi için o bölgede meydana gelen, geçmiş deprem verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Deprem verileri, çeşitli araştırmacılar, ulusal ve uluslararası veri merkezleri tarafından hazırlanan deprem kataloglarından temin edilebilmektedir [2-11]. İnceleme yapılan zaman dilimine bağlı olarak tarihsel ve aletsel dönem deprem katalogları olarak adlandırılan bu deprem kataloglarının duyarlılığı istatistiksel açıdan anlamlı ve güvenilir sonuçlara ulaşılması açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle depremsellik çalışmalarında deprem veri seçimi ve/veya deprem kataloğu oluşturmak oldukça önemlidir.

1900'lü yıllardan önce meydana gelen deprem verilerinden oluşan tarihsel dönem deprem katalogları genellikle depremi yaşayan insanların deneyimlerinden/gözlemlerinden oluşan yazılı tarih araştırmalarından ya da arkeosismoloji, paleosismoloji ve arkeojeofizik tabanlı çalışmalardan elde edilen verilerden oluşmaktadır. Herhangi bir sayısal kayıt, ölçüm vb. mühendislik uygulaması olmadan elde edilen bu deprem verilerinin doğal olarak bazı dezavantajlara sahip olabileceği göz ardı

deprem verilerinden oluşmalarına rağmen deprensellik ile ilgili çalışmalarda doğrudan kullanıma uygun olmayabilirler. Öncelikle belirli kriterler göz önüne alınarak seçilmesi gerekli deprem verilerinin yapılacak çalışmaya uygun olarak belirlenecek bir takım dönüşüm işlemlerine tabii tutulmaları gerekmektedir. Bu bağlamda deprem kaydı olmayan yıl sayısının toplam yıl sayısının %25'inden az olmasına özen göstererek mümkün olan en geniş zaman aralığının inceleme dönemi olarak belirlenmesi gerekmektedir. Böylelikle hem çalışma alanının deprenselliği kesintiye uğramadan belirlenebilecek hem de magnitüd hataları kabul edilebilir bir seviyeye indirgenmiş olacaktır [17-22].

Belirtilen bu kriterler doğrultusunda çalışma alanına ait deprenselliğin ve deprensellik parametrelerinin belirlenebilmesi için 1900-2020 yılları arasında meydana gelen $M \geq 3.0$ olan depremlere ait veriler Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) kataloğundan alınmış ve 121 yıllık sürece ait farklı magnitüd ölçeklerinde (M_b , M_d , M_l , M_s , M_w) kaydedilmiş 9818 adet deprem verisine ulaşılmıştır. Deprem verilerinin birbiri ile kıyaslanabilirliğini sağlamak için tamamı belirlenen bir magnitüd ölçeğine dönüştürülmeli ve nihayetinde de katalog homojen hale getirilmelidir. Deprem verilerinin belirlenen magnitüd ölçeğine dönüştürülmesi yapılan çalışmanın amacına bağlı olarak değişebilmekle birlikte bu çalışmada üst limitte doyuma uğramaması nedeni ile deprem verilerinin moment magnitüd (M_w) ölçeğine dönüştürülmesi tercih edilmiştir. Bu dönüşüm için çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiş ve literatürde kabul edilmiş farklı ilişkiler bulunmaktadır [23-25]. Literatürde kabul edilen bağıntıların yerel/bölgesel özellikler taşıma ihtimallerine karşılık yapılan bu çalışmada çalışma alanına ve çalışmada kullanılacak deprem verisine uygun yeni ilişkiler geliştirilmesi yoluna gidilmiştir. Dönüşüm ilişkilerinin geliştirilmesi sırasında ortogonal regresyon yöntemi tercih edilmiştir [26]. Bu kapsamda magnitüd dönüşüm ilişkilerinin ve ilişki katsayılarının belirlenebilmesi için M_w ölçeği bağımlı değişken olarak kabul edilirken diğer magnitüd ölçekleri (M_b , M_s , M_l , M_d) bağımsız değişkenler olarak kabul edilmiştir. Sonuç olarak bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki ve ilişki katsayılarına ait bilgiler ise Tablo 1'de verilmiştir.

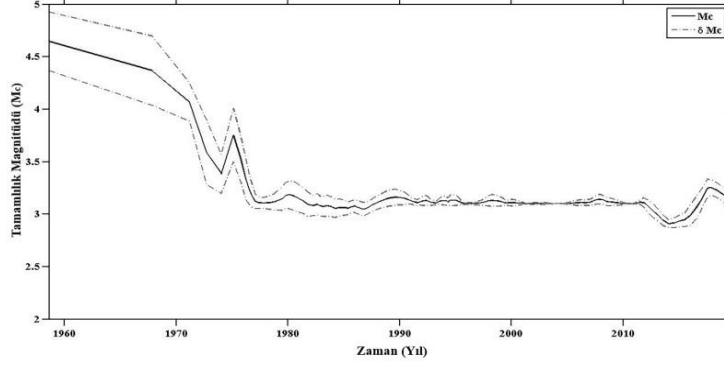
Tablo 1. Magnitüd ölçekleri arasındaki dönüşüm ilişkileri ve ilişki katsayıları

Bağımlı Değişken	Bağımsız Değişken	Belirlenen İlişki	İlişki Katsayısı
M_w	M_b	$M_w = -0.369808 + 1.1141 * M_b$	0.98
	M_d	$M_w = -0.0370159 + 1.04799 * M_d$	0.98
	M_l	$M_w = -0.343326 + 1.09302 * M_l$	0.96
	M_s	$M_w = 1.21039 + 0.790061 * M_s$	0.98

Tablo 1'de görülen ilişki katsayıları geliştirilen ilişkilerin deprem istatistiği çalışmalarında kullanılacak yetkinlikte ve güvenilirlikte olduğunu göstermektedir. Böylelikle çalışma alanı için " M_w " ölçeğinde homojen hale getirilmiş bir katalog oluşturulmuştur. Oluşturulan bu homojen katalog içerisindeki deprem verileri içerisinde ana şoklar dışında öncü şok, artçı şok, deprem yığılımları ve deprem çiftleri olarak adlandırılan ana şoka bağlı olarak gelişen olaylar da yer almaktadır. Ana şoka bağlı bu tür olaylar deprem istatistiğinin temelini oluşturan deprem sayısını artırmakta dolayısı ile de güvenilirlik sınırları dışına çıkan deprensellik parametrelerinin elde edilmesine neden olabilmektedirler. Bu nedenle yapılacak çalışmalarda bu tür olayların homojen deprem kataloğundan uzaklaştırılması gerekmektedir. Literatürde deprem kataloğunda yer alan bağımlı ve bağımsız olayları farklı zaman ve mesafe aralıklarına göre ayırıtıran farklı algoritmalar bulunmaktadır [27-30]. [28] tarafından geliştirilen algoritma ise zaman-mesafe seçiminin uygunluğu nedeni ile deprensellik çalışmalarında tercih nedenidir [31-34]. Yapılan çalışmada da MATLAB tabanlı ZMAP 6.0 [35] paket programı kullanılarak Reasenber algoritması [28] esaslarına göre ayırıtma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak 1984 deprem verisi katalogdan uzaklaştırılarak 7834 deprem verisine sahip yeni bir katalog elde edilmiştir.

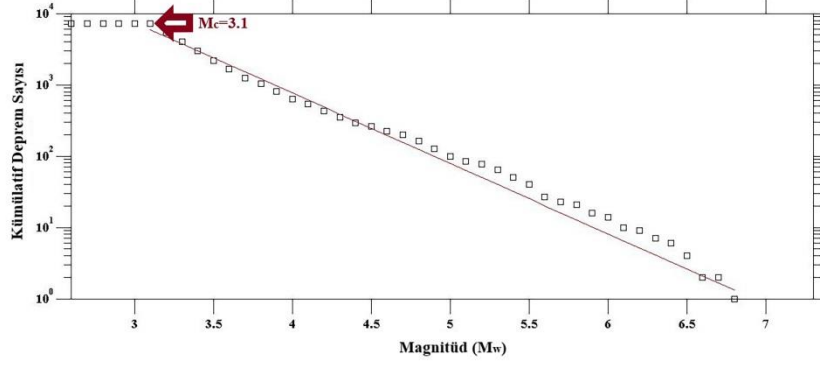
Teoride deprem istatistiği çalışmalarında kullanılacak deprem kataloğunda yer alan deprem verilerinin küçükten büyüğe sıralı ve tam olması arzu edilmekle birlikte bu ideal durum pratikte her daim yakalanamamaktadır. Bu ideali yakalayabilmek ya da mümkün olan en yakın duruma getirebilmek için tamamlılık analizi olarak adlandırılan bir işlem ile deprem kataloğunun belirlenecek bir magnitüd

değerine (M_c) göre tamamlanması gerekmektedir. “ M_c ” değeri, kullanılan katalogdaki en küçük magnitüd değerine eşit olan değer olarak kabul edilebildiği gibi en çok deprem sayısına ait magnitüd değeri olarak da kabul edilebilmekte ya da çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilen varsayımlara göre de belirlenebilmektedir. Yapılan çalışmada “ M_c ” değerini belirlemeden önce Maximum Curvature (MAXC) [29] yöntemi esaslarına göre MATLAB tabanlı ZMAP 6.0 [35] paket programı kullanılarak bu değerın zamana bağlı değişimi incelenmiştir. “ M_c ” değerinin zamana bağlı değişimleri pencere başına en az 20 deprem verisi olmak üzere 200 deprem verisi olacak şekilde hareketli zaman penceresi tekniği kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 2).



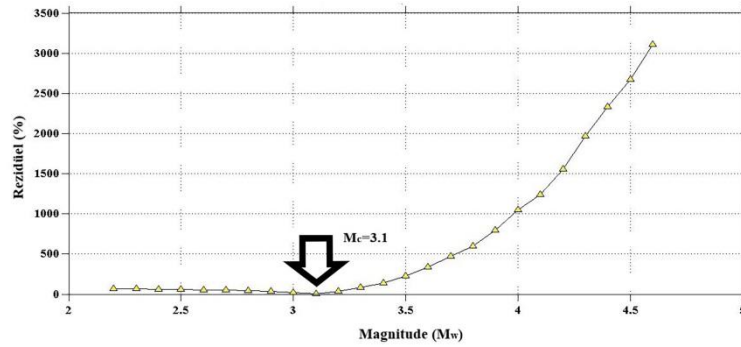
Şekil 2. Tamamlılık magnitüd değerinin (M_c) zamana bağlı değişimi

Şekil 2 incelendiğinde deprem katalogunun ilk yılları için yaklaşık olarak $M_c=4.7$ değeri ile karakterize edilen tamamlılık magnitüd değerinin günümüze yaklaştıkça $M_c=3.0$ seviyesine kadar düştüğü görülmektedir. “ M_c ” değerinin deprem katalogunun ilk yıllarında nispeten büyük magnitüd değerleri ile karakterize olması günümüze yaklaştıkça ise bu değerın görece olarak daha düşük seviyelere inmesi sismolojik açıdan oldukça anlamlı ve olağan bir durumdur. Bu durumu ana hatları ile üç ana zaman dilimi içerisinde açıklamak mümkündür. Aletsel sismolojik verilerin 1900’lü yılların başında elde edilmeye başlaması ve bu dönemde hem deprem kayıt istasyonu sayılarının hem de kayıt yöntemlerinin yetersizliği nedeniyle deprem kataloglarında yer alan deprem verileri genellikle yıkıcı etki yaratan büyük depremlerden oluşmakta dolayısı ile deprensellik çalışmaları için nitelik ve nicelik açısından yetersiz kalmaktadır. 1960’lı yıllara kadar aletsel sismoloji çalışmaları için belirli bir standart oluşturulamamış ve bu durum uzun bir zaman dilimi içerisinde çok sayıda küçük ve orta magnitüd değerine sahip deprem verisinin kayıt altına alınmamasına neden olmuştur. Deprem kaynaklı afetlerin yerbilimsel çalışmaları üzerindeki yarattığı ilerleme ile birlikte özellikle 2000’li yıllardan sonra kayıt istasyon sayılarının artmaya başlaması ve kayıt yöntemlerinin duyarlılığının geliştirilmesi ile birlikte herhangi bir hasar yaratmayan hatta çoğu zaman hissedilmeyen daha küçük magnitüd değerine sahip deprem verilerinin de kataloglarda kayıt altına alınması sağlanmıştır. Böylelikle deprem istatistiği çalışmaları için dezavantaj yaratan veri eksikliğini en az seviyeye indirgeyecek sayıda ve güvenilirlikte deprem verisine ulaşılmaya başlanmıştır. Deprensellik parametreleri üzerinde oldukça etkili olan bu değerın görece olarak küçük magnitüdü bir değer olması buna karşılık deprem katalogunun tamamını kapsayabilecek nitelikte olması gerekmektedir. Oluşturulan homojen katalog incelendiğinde de, deprem magnitüdülerinin $2.7 \leq M_w \leq 6.8$ aralığında değişim gösterdiği görülür. Magnitüdü $2.7 \leq M_w < 3.7$ arasında değişen 6580 deprem, $3.7 \leq M_w < 4.7$ arasında değişen 1054 deprem, $4.7 \leq M_w < 5.7$ arasında değişen 177 deprem, $5.7 \leq M_w < 6.7$ arasında değişen 21 deprem ve $6.7 \leq M_w \leq 7.7$ arasında değişen 2 deprem vardır. Görüldüğü üzere depremlerin magnitüdüleri çoğunlukla $2.7 \leq M_w \leq 3.7$ arasında değişmekte ve bu aralıkta 1775 deprem ile $M_w=3.1$ ilk sırada yer almaktadır. Sonuç olarak yapılan çalışma için tamamlılık magnitüd değeri $M_c=3.1$ olarak kabul edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. ZMAP Programı ile oluşturulan kümülatif deprem sayısı-magnitüd ilişkisi ve “ M_c ” değeri

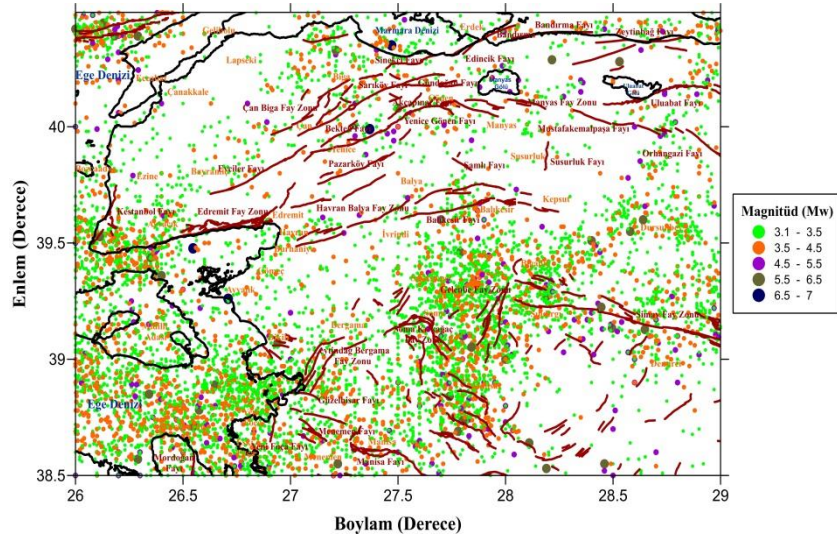
Şekil 3’de çalışma alanı için belirlenen “ M_c ” değeri ($M_c=3.1$) görülmektedir. “ M_c ” değeri hem uzaya hem de zamana bağlı olarak değişim göstermektedir. Belirlenen “ M_c ” değerinden daha küçük magnitüdü depremlerin katalogdan uzaklaştırılması ile yapılan tamamlılık analizi sonucunda olabildiğince az sayıda deprem verisinin katalogdan ayrıştırılması güvenilirliği yüksek istatistiksel sonuçların elde edilmesine olanak sağlayacaktır. Belirlenen “ M_c ” değerinin güvenilirliğinin ve oluşturulan yeni katalogun istatistiksel modelinin gözlem setine (frekans-magnitüd dağılımına) uygunluğunun belirlenmesi için MATLAB tabanlı ZMAP 6.0 [35] paket programı kullanılarak güç yasası uyum iyiliği analizi (Goodness of fit to power law) yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4’de verilmiştir.



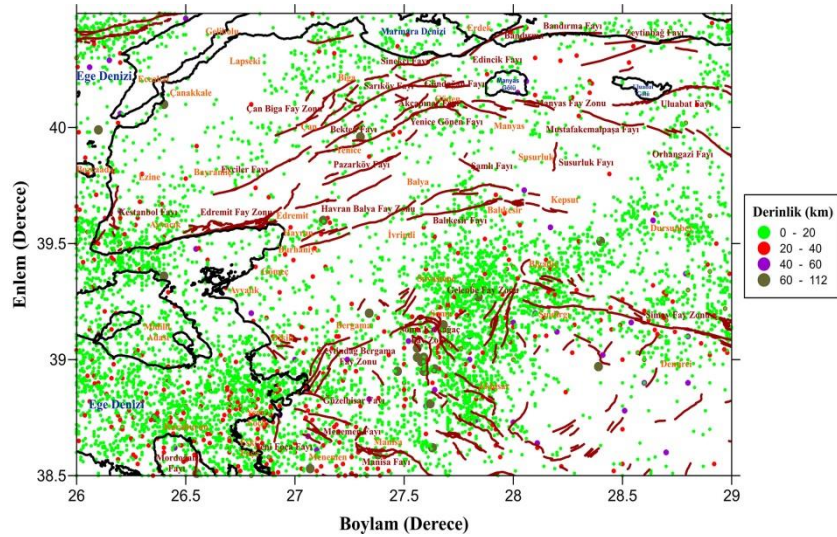
Şekil 4. Tamamlılık analizi yapılan katalogun frekans-magnitüd dağılımının uyum iyiliği analizi sonuçları

Şekil 4 $M_c=3.1$ değeri için %95’lik güvenilirliğin tanımlanamadığını buna karşılık çalışmada kullanılacak katalog için belirlenen “ M_c ” değerinin %90 güvenilirlik verdiği ifade etmektedir. Böylelikle çalışma alanı için oluşturulan deprem katalogu kullanılarak elde edilen sonuçların istatistiksel açıdan güvenilir olacağını ifade etmek mümkündür.

$M_c=3.1$ değerinden küçük olan deprem verilerinin katalogdan uzaklaştırılması ile birlikte toplamda 7171 deprem verisinden oluşan homojen, bağımlı olaylardan arındırılmış ve belirli bir magnitüd değerine göre tamamlanmış deprensellik çalışmaları için uygun bir katalog oluşturulmuştur. Oluşturulan bu katalogta yer alan deprem verilerinin episantr ve derinlik dağılımları sırası ile Şekil 5 ile Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 5. 1900-2020 yılları arasında meydana gelen depremlerin episantr dağılım haritası



Şekil 6. 1900-2020 yılları arasında meydana gelen depremlerin derinlik dağılım haritası

Şekil 5 ve Şekil 6'da çalışma alanında küçük magnitütlü ($3 \leq M_w \leq 5.0$) ve sığ depremlerin ($0 \leq h \leq 60$) baskın olduğu görülmektedir. Ancak orta büyüklükteki depremler ile orta derin depremlerinin de varlığı göz ardı edilmemelidir. Ege Denizi açıkları, Akhisar Fayı ve çevresi, Gelenbe Fayı ve çevresi, Simav Fay Zonu ve çevresi ile Balıkesir ve ilçelerinde orta büyüklükteki depremlerin varlığı göze çarparken orta derin depremlerinin büyük bir çoğunluğunun ise Soma-Kırkağaç Fay Zonu civarında yoğunlaştığı görülmektedir.

Çalışma alanının aletsel dönem deprem etkinliği incelendiğinde; 1935 Erdek, 1944 Edremit, 1953 Yenice-Gönen, 1964 Manyas, 1969 Gönen, 1971 İvrindi, 2001 Savaştepe ve 2010 Balya Depremlerinin çalışma alanı için önemli yer hareketleri oldukları görülmektedir. Bu depremler arasında ise meydana geldikleri alt alanlar açısından aletsel dönemin etkili ve son depremleri olmaları sebebi ile 1944 Edremit ve 1953 Yenice-Gönen Depremleri ön plana çıkmaktadır.

B. DEPREMSELLİĞİN VE DEPREMSELLİK PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Magnitüd-frekans bağıntıları deprem istatistiğinin temelini oluşturmakta ve depremselliğin bir ölçütü olarak kabul edilmektedir. Bu bağıntılar içerisinde literatürde kabul görmüş ve yaygın olarak kullanılan bağıntı ise Gutenberg-Richter (G-R) [36] tarafından geliştirilmiştir. $\log N = a - bM$ olarak tanımlanan bu ilişkide N ; çalışma alanı için inceleme yapılan zaman dilimi içerisinde magnitüdü M 'e eşit ve/veya daha büyük depremlerin sayısını, “a” ve “b” ise regresyon katsayılarını ifade etmektedir. Çalışma alanının büyüklüğüne, inceleme yapılan zaman aralığına ve çalışma alanının deprem etkinlik düzeyine bağlı olarak değişen “a” katsayısı ortalama yıllık sismik aktivite indeksi olarak ifade edilmektedir. Kayaçların deformasyonu dolayısı ile deprem oluşumunun fiziki ile ilişkili olan “b” katsayısı ise deprem istatistiğinde önemli bir yere sahiptir. Kullanılan yöntem ve deprem verilerinin normal ve kümülatif frekanslarına bağlı olarak değişen “b” katsayısı aynı zamanda tektonik özelliklere bağlı olarak da değişim göstermektedir. Bu nedenle de depremselliğin bölgesel dağılımı ve deprem kestirimi çalışmaları için önemli bir sismotektonik parametre olarak kabul edilmektedir. En genel ifade ile hesaplanan “b” değerinin büyüklüğü ile gerilim birikme seviyesi arasında ters bir ilişki olduğu kabul edilmektedir [37-44].

Literatürde $\log N = a - bM$ bağıntısındaki “a” ve “b” katsayılarının belirlenmesi için başta En Küçük Kareler Yöntemi, Ağırlık En Küçük Kareler Yöntemi, En Büyük Olasılık Yöntemi ve Utsu-Page formülleri olmak üzere farklı yöntemler bulunmaktadır. Yapılan çalışmada verdiği güvenilir sonuçlar nedeniyle [45] tarafından geliştirilen En Büyük Olasılık (EBO) Yöntemi tercih edilmiştir. EBO yönteminde rasgele değişken $N_i (i = 1, 2, \dots, n)$ bir Poisson dağılımı gösterir, yani olasılık dağılım fonksiyonu;

$$P(a, b; N_i) = \exp(-\langle N_i \rangle) * \langle N_i \rangle^{N_i} * \langle N_i \rangle^{-1} \quad (1)$$

ile verilir. Burada $\langle N_i \rangle = 10^{a-bM}$ 'dir. Gözlemlerin bağımsız olduğu kabul edilirse;

$$a = \log \sum_{i=1}^n N_i - \log \sum_{i=1}^n 10^{-bM} \quad (2)$$

$$b = \frac{0.4343}{\frac{\sum_{i=1}^n M_i N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} - M_{\min}} \quad (3)$$

olarak elde edilir.

G-R ilişki grafiğinin elde edilmesinden sonra deprem olayının başta zaman ve mekan olmak üzere çok sayıda belirsizlik ve bilinmezlik içermesi nedeniyle çalışma alanında fraktal geometri esasları kullanılarak fraktal analiz değerlendirilmesi de yapılabilmektedir. Fraktal analiz doğada gerçekleşen olayların karmaşıklık seviyelerini sayısal olarak ifade edebilmeyi mümkün kıldığı için çoğu doğa olayında olduğu gibi depremsellik çalışmalarında da tercih edilmektedir [46-49].

Fraktal analiz, geometrik nesnelerin kendine benzerliğinin belirlenmesinde kuvvetli bir ilişki sunmaktadır. İlişki boyutu “ D_c ” ve ilişki oranı “ $C(r)$ ” arasında var olan ilişki;

$$D_c = \lim_{r \rightarrow 0} [\log C(r) / \log r] \quad (4)$$

$$C(r) = 2N_{R < r} / (N - 1) \quad (5)$$

şeklinde gösterilmektedir.

Burada; “r” iki episantr veya hiposantr arasındaki uzaklığı, “N” birbirinden $R < r$ uzaklıkla ayrılan deprem çiftlerinin sayısını ifade etmektedir [50].

Eğer episantr dağılımı fraktal bir yapıya sahip ise;
 $C(r) \sim r^{-D_c}$

(6)

elde edilir.

İki deprem arasındaki derece cinsinden “r” uzaklığı ise;

$$r = \cos^{-1}(\cos\theta_i \cos\theta_j + \sin\theta_i \sin\theta_j \cos(\phi_i - \phi_j))$$

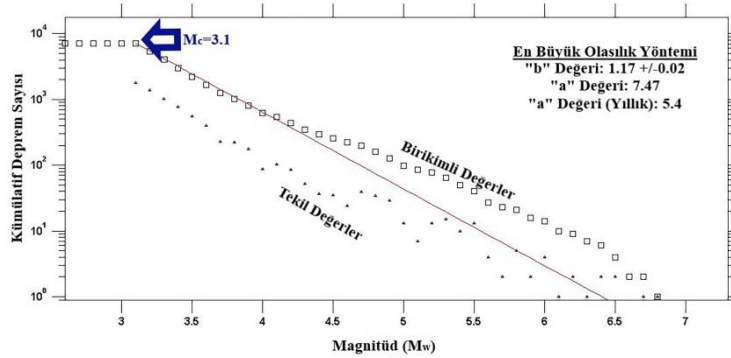
(7)

Burada (θ_i, ϕ_i) ve (θ_j, ϕ_j) sırası ile i. ve j. olayların enlem ve boylamlarına karşılık gelmektedir [51].

G-R ilişkisi ve ilişki integralinin belirlenmesinin ardından “ M_{mak} ” olarak sembolize edilen meydana gelmesi muhtemel en büyük magnitüd değerinin de belirlenmesi ile çalışma alanı için gerekli genel depremsellik parametreleri tamamlanmış olacaktır. Literatürde “ M_{mak} ” değerini belirlemek için kabul edilmiş kesin bir yöntem olmamakla birlikte farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmiş farklı esas ve kabullere dayalı yöntemlere göre bu değeri belirlemek mümkündür. Yapılan çalışmada ise “ M_{mak} ” değeri belirlenirken parametrik yöntemler arasında yer alan Kijko-Sellevoll (K-S) ve Kijko-Sellevoll-Bayes (K-S-B) teorilerinin Gutenberg-Richter ilişkisine dayanıyor olması tercih nedeni olmuştur. Ayrıca K-S-B teorisinin, K-S teorisi üzerindeki “b” değeri belirsizliğini dikkate alıyor olması da elde edilen sonuçlar aracılığı ile teorilerin kıyaslanabilirliğini sağlamaktadır [52, 53]. Gerekli hesaplamalar [54] tarafından geliştirilen MATLAB tabanlı kodlar kullanılarak yapılmıştır.

III. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Çalışma alanı için deprem kataloğunun hazır hale getirilmesinin ardından çalışma alanının deprem potansiyelini tanımlamak için gerekli olan depremsellik parametreleri ZMAP 6.0 [35] paket programı kullanılarak elde edilmiştir. EBO yöntemi kullanılarak çalışma alanı için hesaplanan “a” ve “b” değerleri ile G-R ilişkisine ait grafik Şekil 7’de verilmiştir.

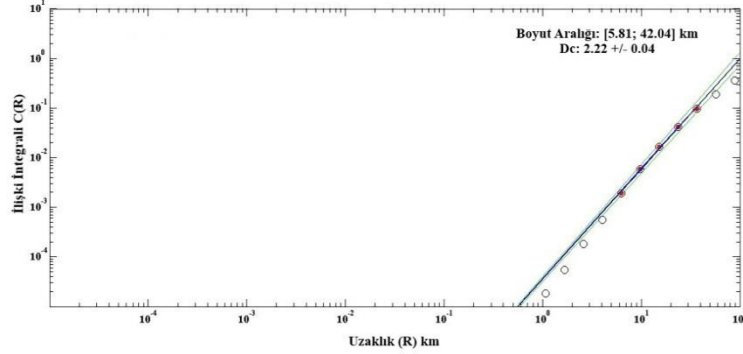


Şekil 7. G-R ilişkisi grafiği ve “a” ve “b” katsayıları

Şekil 7’de $\log N = 7.47 - 1.17M_w$ olarak tanımlanan G-R ilişkisindeki “b” katsayısı aldığı matematiksel değere bağlı olarak çalışma alanının depremselliğinin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. “b” katsayısı dünyanın farklı bölgeleri için farklı değer aralıklarında ($0.3 \leq b \leq 2.6$) temsil edilmektedir. Sismik açıdan aktif coğrafyalarda G-R bağıntısındaki ortalama “b” katsayısının 1.0 ve 1.0’e yakın değerler aldığı kabul edilirken tektonik kökenli depremler için ise bu değer $0.5 \leq b \leq 1.5$ arasında değişim gösterdiği varsayılmaktadır [55]. Şekil 7’de görülen $b=1.17$ değerinin 1’den büyük olması ise çalışma alanının tektonik yapısının aktifliğinin az ya da çok olmasından ziyade çalışma alanında hakim durumda olan küçük magnitüdü depremlerden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak

çalışma alanı için elde edilen “b” değerinin ve dolayısı ile magnitüd-frekans dağılımının bilinen G-R ilişkisi ile uyumlu olduğu görülmektedir.

G-R grafiğinin oluşturulmasından sonra çalışma alanı için fraktal boyut, “ D_c ” değeri R (km) uzaklığına karşı $C(R)$ ilişki integralinin logaritmik olarak çizilmesi ile elde edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. İlişki integrali grafiği ile fraktal boyut “ D_c ” değeri ve fraktal boyut aralığı

Şekil 8’de görüldüğü üzere fraktal boyut aralığı [5.81-42.04] km olmak üzere $D_c=2.22 \pm 0.04$ olarak belirlenmiştir. “ D_c ” değerinin belirlenmesinde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta sonuç üzerinde doğrudan etkisi olan boyut aralığı seçimidir. Deprem yoğunluğuna uygun olarak belirlenmesi gereken bu değer çalışma alanı için sismolojik anlamı kuvvetli “ D_c ” değerinin elde edilmesine olanak sağlayacaktır. Belirlenecek en küçük boyut aralığının çalışma alanında meydana gelen depremlerin episantr hata büyüklüğü veya episantr büyüklüklerindeki hata ile orantılı olduğu, en büyük boyut aralığının ise çalışma alanının genişliği ile alakalı olduğu kabul edilmektedir [56]. Türkiye’nin farklı bölgelerinde yapılan fraktal analiz çalışmaları incelendiğinde fraktal boyut aralığının 2 km ile 160 km arasında değişim gösterdiği görülmektedir [57]. En büyük boyut aralığının çalışma alanı özelinde değişiklik gösterebileceği göz önüne alındığında çalışma alanı için belirlenen en küçük fraktal boyut aralığının literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Düzenli yapılar ile ilgilenen Öklid geometrisinde boyut kavramı noktanın boyutu 0 (sıfır), doğrunun boyutu 1 (bir), düzlemin boyutu 2 (iki) ve küpün boyutu 3 (üç) olacak şekilde tam sayılarla ifade edilir [58]. Düzensiz yapılar ile ilgilenen Fraktal geometrisinde ise boyut kavramı kesirli sayılarla belirtilmektedir. Yani eğrinin fraktal boyutu 1 ile 2 arasında değişirken düzlem veya küresel yapı arasında bir düzensizliğe sahip yapının fraktal boyutu ise 2 ile 3 arasında değişim göstermektedir. $2 < D_c < 3$ aralığında değişim gösteren görece olarak yüksek “ D_c ” değeri çalışma alanında düzlem veya küresel bir yapı arasında bir düzensizliğe sahip ortamın varlığına işaret etmektedir [59].

Literatürde “ D_c ” değeri ile “b” değeri arasında anlamlı ve güvenilir ampirik bağıntıların varlığı “ D_c ” değerinin sismoloji çalışmaları için önemini ortaya koymaktadır [47, 60-62]. Farklı araştırmacılar tarafından Türkiye’nin tamamı ya da belirli bölgeleri için farklı deprem verileri kullanılarak yapılan fraktal analiz çalışmalarının incelenmesi ile birlikte Türkiye genelinde “ D_c ” değerinin $0.78 \leq D_c \leq 2.57$ aralığında değişim gösterdiği görülmektedir [57, 63]. Bu bağlamda çalışma alanı için elde edilen “ D_c ” değerinin Türkiye için elde edilen “ D_c ” değer aralığı ile uyumlu olduğu görülmektedir.

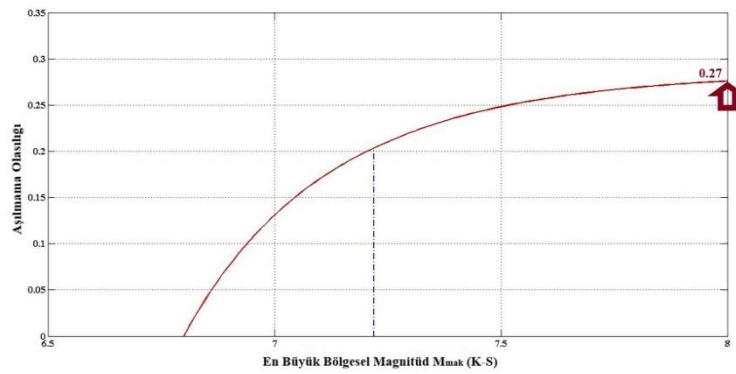
Çalışma alanı için standart sapma değeri oldukça küçük olan “b” ve “ D_c ” değerleri hem literatür ile hem de birbiri ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Bu durum çalışma alanı için kullanılan katalogun ve yöntemin güvenilirliği arttırmakta dolayısı ile de elde edilecek deprensellik parametrelerinin anlamlarını kuvvetlendirmektedir. Sonuç olarak birbiri ile uyumlu “b” ve “ D_c ” değerlerinin sismolojik açıdan anlamlı sonuçlar vermesi çalışma alanı için gerilme değişiminin bir belirtisi olabileceği düşünülmektedir [49].

Çalışma alanının tamamında ileride meydana gelmesi muhtemel “ M_{mak} ” değeri G-R ilişki grafiğinden elde edilen $b=1.17$ değeri kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar ise Tablo 2’de verilmiştir.

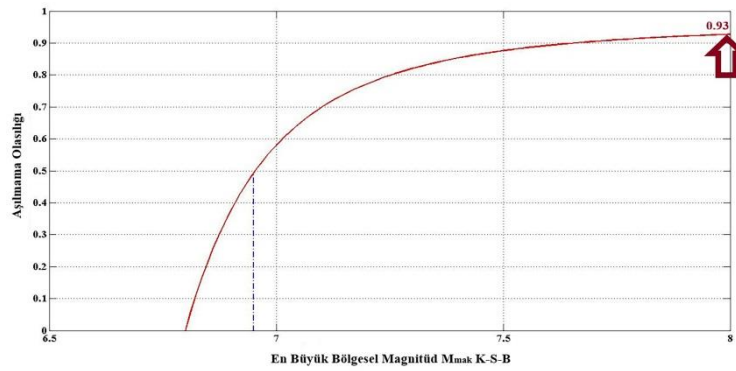
Tablo 2. G-R ilişki grafiğinden hesaplanan “ M_{mak} ” değerleri

“b” değeri	K-S “ M_{mak} ” değeri	K-S-B “ M_{mak} ” değeri
1.17	7.22	6.95

Ancak elde edilen “ M_{mak} ” değerlerinin çalışma alanının tamamı için yapılacak deprem tehlike ve deprem risk çalışmalarında kullanılabilirliklerini sağlamak için olasılık-güvenilirlik sınırlarının belirlenmesi gerekmektedir. Psirenko [64], “ M_{mak} ” değerlerinin aşılma olasılıklarının 0.90 ve daha yüksek olması durumunda hesaplanan “ M_{mak} ” değerinin olası-güvenilir olduğunu belirtmiştir. Çalışma alanında kullanılan yöntemlere bağlı olarak elde edilen “ M_{mak} ” değerlerine ait olasılık-güvenilirlik grafikleri sırası ile Şekil 9 ve Şekil 10’da verilmiştir.



Şekil 9. K-S yöntemi ile hesaplanan “ M_{mak} ” değerinin olasılık-güvenilirlik grafiği



Şekil 10. K-S-B yöntemi ile hesaplanan “ M_{mak} ” değerinin olasılık-güvenilirlik grafiği

Şekil 9’da aşılma olasılığının yaklaşık olarak 0.27 olduğu görülürken Şekil 10’da bu değer yaklaşık olarak 0.93’dür. Bu değerlendirmeye göre çalışma alanı için K-S-B yönteminin daha uygun olduğunu ve aynı şekilde çalışma alanının tamamı için $M_{mak}=6.95$ değerinin olası-güvenilir olduğunu ifade etmek mümkündür.

Yapılan genel depremsellik değerlendirmesinden sonra çalışma alanının deprem potansiyelinin detaylı olarak incelenebilmesi için çalışma alanı $0.5^{\circ}K \times 0.5^{\circ}D$ olacak şekilde alt alanlara ayrılmıştır. Oluşturulan her bir alt alanda meydana gelen depremlerin yığınsal dağılımları dikkate alınarak belirlenmek istenen parametrik değer için gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Ancak inceleme yapılan alt alanda yeterli sayıda depremin (10 depremden daha az deprem bulunması durumu) bulunmaması durumunda o alt alan değerlendirmeye alınmamıştır.

ve açıklarının çevresine nazaran sahip olduğu düşük “b” değerini ise ısı akısının düşüşünün yanı sıra küçük ve büyük magnitüdü depremlerin varlığının bir arada görülmesi ile ilişkilendirmek mümkündür. Her ne kadar bu bölgedeki en büyük jeotermal potansiyel Bergama ve çevresi olarak tanımlansa da Foça-Aliğa bölgesi de eğilimin bir uzantısı konumundandır ve yüksek potansiyele sahiptir [75]. Ayrıca Foça ve çevresinin sahip olduğu ve Foça Volkanik Kompleksi olarak adlandırılan jeolojik birim nedeniyle de bu alanın ısı akısının çok düşük olamayacağı düşünülmektedir. Bu nedenle de Eski Foça ve Yeni Foça'nın küresel ortalama “b” değerine göre yüksek ancak çalışma alanı içinde Soma-Kırkağaç Fay Zonu ve Zeytindağ-Bergama Fay Zonu için elde edilen “b” değerine göre görece olarak düşük olmasını da ısı akısındaki bu az miktardaki değişim ile ilişkilendirmek mümkündür. Sonuç olarak, çalışma alanının güneybatı kısmı için ısı akısı değerleri ile “b” değeri dağılımının hem literatür ile hem de kabul edilen varsayımlar ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Jeotermal enerji hammaddeleri bakımından zengin alanlara sahip Balıkesir ve çevresindeki jeotermal alanlar ağırlıklı olarak Gönen, Havran, Balya ve Susurluk ilçelerinde yoğunlaşmaktadır [76]. Hisarlı [77] tarafından yapılan çalışmada Biga Yarımadası ve Kireç (Dursunbey)-Sındırgı civarından elde edilen sığ Curie nokta derinlikleri ile manyetik-gravite anomalileri arasında gözlenen ilişkiden dolayı bu alt alanların yüksek ısı ve ince kabuk yapısına sahip olabileceği belirtilmiştir. Bu durum çalışma alanı içerisindeki Sındırgı ve çevresi ile Ayvacık, Kestanbol, Bayramiç ve çevresindeki yüksek “b” değerini açıklamaktadır. Yapılan çalışmada olduğu gibi Akyol [78] tarafından yapılan çalışmada da Edremit Körfezi çevresinde yüksek “b” değerleri elde edilmiştir. Ve bu durumun bir nedeni olarak da jeolojik açıdan Kestanbol granitleri olarak tanımlanan sağlam litolojik özelliklere sahip jeolojik birimler olabileceği belirtilmiştir. Çalışma alanının kuzeybatı kısmına ait ısı akısı değişimleri ile “b” değeri değişiminin uyumlu bir dağılım verdiğini söylemek mümkündür. Aktif sağ yanal doğrultu atımlı bir fay özelliğinde olan Yenice-Gönen Fayı üzerinde yer alan Gönen jeotermal kaynağına rağmen bu alt alan çalışma alanı içerisinde düşük “b” değeri ile karakterize edilmektedir. Schorlemmer [79] tarafından yapılan çalışmada normal faylanma alanlarında yüksek “b” değeri, ters faylanma alanlarında orta büyüklükte “b” değeri ve son olarak doğrultu atımlı faylanma alanlarında ise düşük “b” değeri beklenmesi gerektiği belirtilmiştir. Geçmişte yıkıcı ve büyük depremlerin yaşandığı Yenice ve Gönen çevresindeki “b” değerindeki bu düşüşü geçmiş deprem hareketliliğinin yanı sıra faylanma karakterindeki değişim ile de ilişkilendirmek mümkün olabilmektedir. Ancak çalışma alanı içerisinde büyük ve yıkıcı etki yaratan depremlerin de bu alt alan ve yakın çevresinde gerçekleştiği ve dolayısı ile “b” değerinin düşük değerler ile karakterize edilmesinde bu durumun etkisinin de göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Ayrıca Gezer ve Bekler [80] tarafından yapılan çalışmada da Yenice-Gönen kırığının ürettiği depremlerin olduğu alanlarda “b” değerinin düşük olduğu belirtilmiştir.

Çalışma alanının bilinen tektonik yapısının sıkışmalı-genişlemeli bir hareketin ürünü olarak doğrultu atımlı faylanmadan normal faylanmaya geçiş olarak tanımlanıyor olması göz önüne alındığında “b” değeri dağılımı ile faylanma karakteri değişiminin önemli bir oranda uyum yakaladığını ifade etmek mümkündür.

Tüm bu değerlendirmelere ilave olarak, Gutenberg ve Richter [81] dünya ölçeğinde istatistiksel sonuçlara dayandırarak sığ depremler için “b” değerinin $b=0.9\pm 0.02$, orta ve derin depremler için ise “b” değerinin $b=1.2\pm 0.2$ olduğunu belirtmişlerdir. Çalışma alanı derinlik dağılım haritasında (Şekil 6) görüldüğü üzere çalışma alanı içerisinde meydana gelen orta derin depremlerin en yoğun görüldüğü alt alan Soma-Kırkağaç Fay zonu ve çevresidir. Bu alanın yüksek “b” değeri ile karakterize olmasının bir önemli nedeninde bu durum olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, Edremit Fay Zonu ve yakın çevresinin Zeytindağ-Bergama Fay Zonu ve çevresi ile Soma-Kırkağaç Fay Zonu'na kıyasla daha küçük ama çalışma alanının tamamı için görece olarak yüksek “b” değerine sahip olduğu görülmektedir. Çalışma alanı episantr dağılım haritası (Şekil 5) incelendiğinde Edremit Fay Zonu ve yakın çevresinin yeterli deprem verisine sahip olmadığı görülmektedir. Yüksek “b” değeri ile karakterize edilen alt alanları deprem sayısı yetersizliği, büyük magnitüdü olayların az olması, küçük magnitüdü depremlerin yakın alt alanlara göre bu alanlarda daha fazla olması ile ilişkilendirmek mümkündür. Edremit Fay Zonu ve çevresinde görülen “b” değeri üzerinde bu durumun etkisi kaçınılmazdır. Çalışma alanı içerisinde düşük “b” değeri ile karakterize edilen alt alanlar incelendiğinde de büyük magnitüdü depremlerin küçük magnitüdü depremleri baskıladığı

sonuçlara rağmen yapılan çalışmalarda kullanılan yöntemler, deprem veri setleri, yapılan kabuller/varsayımlar ve hata payları/oranları arasında farklılıklar olduğu gerçeği de unutulmamalıdır.

Sonuç olarak çalışma kapsamında elde edilen “ M_{mak} ” değerlerinin çalışma alanının tektonik yapısına uygun değerler vermesi ve dağılım göstermesinin yanında literatür ile de uyumlu sonuçlar vermesi çalışma alanı için elde edilen güncel “ M_{mak} ” değerlerinin güvenilirliğinin göstergesi olması açısından oldukça önemlidir. Bu kapsamda elde edilen ortalama “ M_{mak} ” değerinden ($M_{makort}=5.98$) küçük “ M_{mak} ” değeri ile karakterize olan alt alanlar için $5.5 \leq M_{mak} \leq 5.8$ aralığındaki depremlerin geniş yayılımlar gösterdiği ve dolayısı ile bu alt alanlarda bu aralıkta depremlerin meydana gelme olasılığının oldukça olası olduğu görülmektedir. Ortalama “ M_{mak} ” değerinden ($M_{makort}=5.98$) büyük “ M_{mak} ” değeri ile karakterize olan alt alanlar incelendiğinde ise $6.0 \leq M_{mak} \leq 6.9$ aralığındaki depremlerin $6.9 \leq M_{mak} \leq 7.6$ aralığındaki depremlere oranla daha kapsayıcı dağılım gösterdiği görülmektedir. Bu nedenle çalışma alanının genelinde $6.0 \leq M_{mak} \leq 6.9$ aralığında deprem ve/veya depremler ile karşı karşıya olma olasılığının daha fazla olduğunu ifade etmek mümkündür.

IV. SONUÇ

Tektonik açıdan Kuzey Anadolu Fay Zonu ile Ege Graben Sistemi arasında bir geçiş bölgesinde yer alan Balıkesir MS 117 yılından itibaren yıkıcı etkisi olan depremlere ev sahipliği yapmaktadır. Balıkesir ve çevresinin günümüzde sahip olduğu nüfus yoğunluğu, sanayi alt yapısı, turizm potansiyeli ve kültürel miras noktaları göz önüne alındığında yıkıcı etkisi olan bir depremin yaratacağı kayıpların sadece Balıkesir ili ve çevresini değil aynı zamanda Türkiye'nin tamamını etkileyeceği çok açıktır. Bu nedenle Balıkesir ili ve çevresinin güncel depremselliğinin belirlenebilmesi ve elde edilen sonuçlara göre de aksiyon alınabilmesinin sağlanması hem sosyal hem de ekonomik açıdan hayati önem taşımaktadır. Yapılan çalışmada Balıkesir ili ve çevresi (38.50° - 40.50° K- 26.00° - 29.00° D) için kapsamlı bir depremsellik çalışması yapılmıştır. Farklı istatistiksel yöntemlerin kullanıldığı çalışmada belirlenen depremsellik parametreleri aracılığı ile çalışma alanının genel depremselliği ve aynı zamanda deprem potansiyeli açısından ön plana çıkan alt alanlar belirlenmiştir.

Çalışma alanının güncel depremselliğinin belirlenmesi için hem tarihsel hem de aletsel dönem deprem verileri incelenmiştir. Mühendislik yetkinliğinin bulunmaması nedeniyle deprem istatistiği çalışmalarına dahil edilmeyen tarihsel dönem deprem verilerinin Manyas Gölü ve çevresi, Ege Denizi açıkları özellikle de Midilli Adası ve yakın çevresi ile Dikili ve Foça arasında yoğunlaştığı gözlenmiştir. Tarihsel dönem deprem verilerinin bu alt alanlarda yoğunlaşmasında bu alt alanların deprem hareketliliği dışında arkeolojik açıdan da zengin olması nedeniyle günümüzde bu alt alanlar hakkında çok fazla bilgiye sahip olunmasının etkisi de göz ardı edilmemelidir. Güncel depremselliğin matematiksel olarak ifade edilebilmesi için KRDAE kataloğundan temin edilen aletsel dönem deprem verilerine uygulanan işlemlerden sonra depremsellik çalışmalarında kullanılabilir homojen, bağımlı olaylardan arındırılmış ve tamamlılık analizi yapılmış bir deprem kataloğu oluşturulmuştur. Oluşturulan bu kataloğa göre çalışma alanının 1900'lü yılların başından itibaren oldukça fazla deprem hareketliliğine ev sahipliği yaptığı ve bu depremlerin büyük bir çoğunluğunun da küçük magnitudlü ve sığ depremlerden oluştuğu görülmektedir. Dolayısı ile de görece olarak daha az sayıda deprem sayısı ile temsil edilen orta büyüklükte ve orta derinlikteki depremlerin deprem tehlike ve olasılık çalışması sonuçları üzerinde daha az etkiye sahip olacağını ifade etmek mümkündür.

Depremselliğin genel hatları ile ortaya konulabilmesi için G-R ilişki grafiği ve “a” ve “b” katsayıları ile ilişki integrali, fraktal boyut “ D_c ” değeri ve fraktal boyut aralığı belirlenmiştir. “b” değeri $b=1.17$ “ D_c ” değeri ise $D_c=2.22$ olarak bulunmuştur. Çalışma alanının tamamının sahip olduğu görece olarak düşük kabul edebileceğimiz “b” değeri ile görece olarak yüksek “ D_c ” değeri baskın sismolojik yapısal bir özellik olarak ön plana çıkmaktadır. Çalışma alanının tamamını kapsayacak ileride meydana gelmesi muhtemel “ M_{mak} ” değerinin $6.95 \leq M_{mak} \leq 7.22$ aralığında değişim gösterebileceği ancak güvenilir “ M_{mak} ” değerinin K-S-B yönteminden elde edilen $M_{mak}=6.95$ olduğu belirlenmiştir.

Baskın sismolojik özelliklerin daha detaylı incelenebilmesi için $0.5^{\circ}K \times 0.5^{\circ}D$ olacak şekilde alt alanlara ayrılan çalışma alanında her bir alt alan için G-R ilişki grafiği oluşturulmuştur. “a” değeri $3.63 \leq a \leq 7.49$ aralığında değişim gösterirken sahip olduğu fiziksel anlamlar nedeni ile deprem kestirimi çalışmaları için öncü bir parametre olarak kabul edilen “b” değeri ise $0.73 \leq b \leq 1.55$ aralığında değişmektedir. Aktif tektonik yapısının yanı sıra sahip olduğu bölgesel yüksek ısı akısının varlığı ve alt alanların deprem verisi özellikleri çalışma alanı içerisinde düşük ve yüksek “b” değerlerinin bir arada görülmesine neden olmaktadır. Başta Gönen ve çevresi, Uluabat Gölü ve çevresi, Erdek ve çevresi, Ege Denizi ve Midilli-Ayvacık açıkları ile Demirci-Akhisar arası düşük “b” değeri ile karakterize olmakta dolayısı ile deprem potansiyeli açısından ön plana çıkmaktadırlar.

Çalışma alanında meydana gelmesi muhtemel “ M_{\max} ” değerinin ise $4.9 \leq M_{\max} \leq 7.6$ aralığında değişim gösterdiği görülmektedir. “b” değeri ve “ M_{\max} ” değeri dağılım haritalarının birlikte değerlendirilmesi sonucunda Yenice-Gönen Fayı ve çevresi ile başlayan ve Marmara Denizi’ne doğru genişleyen alt alan başta olmak üzere Midilli-Ayvacık açıkları, Demirci-Akhisar arası ve bölgesel değişikliklere rağmen Ege Denizi için deprenselliğin yüksek olduğu görülmektedir. Ege Denizi için $5.9 \leq M_w \leq 6.8$ aralığında deprem büyüklüğünün oldukça olağan olduğunu ayrıca Balıkesir il merkezi ve yakın çevresi için ise $5.9 \leq M_w \leq 7.2$ aralığındaki depremlere hazırlıklı olunması gerektiğini söylemek mümkündür.

Sonuç olarak çalışma alanı için tanımlanan sismolojik özellikler, hesaplanan deprensellik parametreleri ve deprensellik açısından ön plana çıkan alt alanların belirlenmesi ile birlikte gelecekte meydana gelmesi muhtemel deprem ve/veya depremlerin zararlarının azaltılmasına yönelik yapılacak çalışmalarda kullanılabilir önemli olasılıksal değerler hesaplanmıştır. Yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçlar; çalışma alanı içerisinde istenilen herhangi alt alanın olası bir depremden ne kadar etkileneceğinin belirlenmesi amacı ile yerel tasarım ivme spektrumlarında deprem dağılım ve deprem büyüklüğü aşılma olasılığı çalışmalarında kullanılabilir veri girişini sağlayacak düzeydedir.

V. KAYNAKLAR

- [1] Anonim. (2022, Nisan). *Türkiye’de Afet Yönetimi ve Doğa Kaynaklı Afet İstatistikleri* [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/35429/xfiles/turkiye_de_afetler.pdf
- [2] N. Pınar ve E. Lahn, “Türkiye Depremleri İzahlı Kataloğu”, Bayındırlık Bakanlığı, Yapı ve İmar İşleri Reisliği, Türkiye, 6, 1952.
- [3] K. Ergin, U. Güçlü, U. ve Z. Uz, “Türkiye ve Civarının Deprem Kataloğu (M.S. 11-1964)” İstanbul Teknik Üniversitesi, Arz Fiziği Enstitüsü Yayınları, Türkiye, 1967.
- [4] H. Soysal, S. Sipahioğlu, D. Kolçak, ve Y. Altınok, “Türkiye ve Çevresinin Tarihsel Deprem Kataloğu, M.Ö.2100-M.S.1900,” TÜBİTAK Temel Bilimler Araştırma Grubu, Türkiye, Rap. 341, 1981.
- [5] N. N. Ambraseys and C. F. Finkel, “Long Term Seismicity of İstanbul and of the Marmara Region”, *Terra Nova*, vol. 3, pp.527-539, 1991.
- [6] N. N. Ambraseys and J. A. Jackson, “Seismicity of the Sea of Marmara (Turkey) since 1500”, *Geophysical Journal International*, vol. 141,, T539-834, 2000.
- [7] O. Tan, M. C. Tapırdamaz and A. Yörük, “The Earthquake Catalogues for Turkey”, *Turkish Journal of Earth Sciences*, vol.17, 405-418, 2008.

- [8] AFAD. *T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://deprem.afad.gov.tr/home-page>
- [9] KRDAE. *Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü* [Çevrimiçi]. Erişim: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/tr/>
- [10] ISC. *International Seismological Centre* [Çevrimiçi]. Erişim: <http://www.isc.ac.uk/>
- [11] NEIC. *National Earthquake Information Center* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/national-earthquake-information-center-neic>
- [12] W. Salomon-Calvi, “Türkiye’nin Zelzele Haritasına Dair Birkaç Söz”, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) Yayını, Türkiye, Rap. 1257, 1941.
- [13] K. Ergin, U. Güçlü ve Z. Uz, “Türkiye ve Civarının Deprem Katalogu (M.S. 11-1964)”, İstanbul Teknik Üniversitesi, Arz Fiziği Enstitüsü Yayınları, Türkiye, Rap. 24, 1967.
- [14] N. V. Shebalin, V. Karnik and D. Hadzievski, “Catalogue of Earthquakes, Part 1, 1901-1970”, UDNP-Unesco Survey of the Seismicity of Balkan Region, Skopje, 1974.
- [15] A. Özoğul, “Balıkesir Ovası ve Yakın Çevresinde Meydana Gelen Depremlerin Uygulamalı Jeomorfoloji Bakımından Etkileri”, *Uludağ Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, vol. 11, ss. 43-51, 1987.
- [16] Ö. Emre, S. Özalp, A. Doğan, V. Özaksoy, C. Yıldırım ve F. Göktaş, İzmir Yakın Çevresinin Diri Fayları ve Deprem Potansiyelleri. Maden Tetkik Arama, Türkiye, Rap. 10754, 2005.
- [17] B.C. Papazachos, “Dependence of the seismic parameter b on the magnitude range”, *Pure and Applied Geophysics*, vol. 112, pp. 1059-1065, 1974.
- [18] P.W. Burton, “Seismic risk in Southern Europe through India examined Gumbel’s third distribution of extreme values”, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 59, pp. 259-280, 1979.
- [19] A. Kijko and M.A. Sellevoll, “Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files, part I, utilization of extreme and complete catalogues with different threshold magnitudes”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 79, pp. 645-654, 1989.
- [20] A. Kijko and M.A. Sellevoll, “Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files, part II, incorporation of magnitude heterogeneity”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 82, pp. 120-134, 1992.
- [21] B.C. Papazachos, “An alternative method for a reliable estimation of seismicity with an application in Greece and the Surrounding Area”, *Bulletin of Seismology Society of America* vol. 89, pp. 111-119, 1999.
- [22] M.V. Manakou and T.M. Tsapanos, “Seismicity and seismic hazard parameters evaluation in the Island of Crete and surrounding area inferred from mixed data files”, *Tectonophysics*, vol. 321, pp. 157-178, 2000.
- [23] E.M. Scordilis, “Empirical Global Relations Converting Ms And Mb To Moment Magnitude”, *Journal of Seismology*, vol. 10, pp. 225-236, 2006.
- [24] A. Deniz and M. S. Yüçemen, “Magnitude Conversion Problem for the Turkish Earthquake Data”, *Natural Hazards*, vol. 55, pp. 333-352, 2010.

- [25] F. T. Kadirioglu and R. F. Kartal, "The New Empirical Magnitude Conversion Relations Using and Improved Earthquake Catalogue for Turkey and its near vicinity (1900-2012)", *Turkish Journal of Earth Sciences*, vol 25, pp. 300-310, 2016.
- [26] M.S. Yucemen, "Olasılıksal sismik tehlike analizi: Genel bakış ve istatistiksel modellemede dikkat edilmesi gerekli hususlar", *1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Ankara, Türkiye, 2011, ss. 1-20.
- [27] J. K. Gardner and L. Knopoff, "Is the sequence of earthquakes in Southern California, with Aftershocks Removed Poissonian?", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 64, pp. 1363-1367, 1974.
- [28] P.A. Reasenber, "Second-order moment of Central California seismicity 1969-1982", *Journal of Geophysical Research*, vol. 90, no. B7, pp. 5479-5495, 1985.
- [29] S. Wiemer and M. Wyss, "Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 90, no. 4, pp. 859-869, 2000.
- [30] I. Zaliapin and Y. Ben-Zion, "Earthquake Clusters in Southern California II: Classification and Relation to Physical Properties of the Crust", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 118, 2865-2877, 2013.
- [31] R. Console, C. Montuori and M. Murru, "Statistical Assessment of Seismicity Patterns in Italy: Are they Precursors of Subsequent Events?" *Journal of Seismology*, vol. 4, pp. 435-449, 2000.
- [32] A. Helmstetter, Y. Y. Kagan and D. D. Jackson, "Comparison of Short-Term and Time-Independent Earthquake Forecast Models for Southern California", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 96, 90-106, 2006.
- [33] M. Zare, H. Amini, P. Yazdi, K. Sesetyan, M. B. Demircioglu, D. Kalafat, M. Erdik, D. Giardini, M. A. Khan and N. Tsereteli, "Recent Developments of the Middle East Catalog", *Journal of Seismology*, vol. 18, 749-772, 2014.
- [34] S. Öztürk, "A Study on the Correlations Between Seismotectonic b-value and Dc-value, and Seismic Quiescence Z-value in the Western Anatolian Region of Turkey", *Austrian Journal of Earth Sciences*, vol. 108, pp. 172-184, 2015.
- [35] S.A. Wiemer, "Software package to analyze seismicity: Zmap", *Seismological Research Letters*, vol. 72, no. 2, pp. 374-383, 2001.
- [36] B. Gutenberg and C.F. Richter, "Frequency of earthquakes in California", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 34, pp. 185-188, 1944.
- [37] C.R. Allen, P., Amanp, C.F. Richter and J.M. Nordquist, "Relation between seismicity and geological structure in the S. California region", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 55, pp. 752-797, 1965.
- [38] J. Weeks, D. Lockner, and J. Byerlee, "Change in b-values during movement on cut surfaces in granite", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 68, pp. 333-341, 1978.
- [39] P.M. Hazidimitriou, E.E. Papadimitriou, D.M. Mountrakis and B.C. Papazachos, "The seismic parameter b of the frequency-magnitude relation and its association with the geological zones in the area of Greece", *Tectonophysics*, vol. 120, pp. 141-151, 1985.

- [40] J.H. Wang, “b-values of shallow earthquakes in Taiwan”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 78, pp. 1243-1254, 1988.
- [41] T.M. Tsapanos, D.G. Galanopoulos and P.W. Burton, “Seismicity in the Hellenic Volcanic Arc: Relation between seismic parameters and the geophysics fields in the region”, *Geophysical Journal International*, vol. 117, pp. 1677-1687, 1994.
- [42] J. Mori, and R.E. Abercrombie, “Depth dependence of earthquake frequency-magnitude distributions in California”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, pp. 15081-15090, 1997.
- [43] Olsson, R., An Estimation of Maximum b-Value in the Gutenberg-Richter Relation. *Journal of Geodynamics*, 27, 547-552, 1999.
- [44] S. Wiemer and M. Baer, “Mapping and removing quarry blast events from seismicity catalogs”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 90, pp. 525-530, 2000.
- [45] K. Aki, “Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits”, *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, vol. 43, pp. 237-239, 1965.
- [46] A.O. Oncel and T.H. Wilson, “Space-time correlations of seismotectonic parameters and examples from Japan and Turkey preceding the İzmit earthquake”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 92, no. 1, pp. 339-350, 2002.
- [47] A.O. Oncel and T.H. Wilson, “Anomalous seismicity preceding the 1999 İzmit event, NW Turkey”, *Geophysical Journal International*, vol. 169, pp. 259-270, 2007.
- [48] O. Polat, E. Gök and D. Yılmaz, “Earthquake hazard of the Aegean Extension Region (West Turkey)”, *Turkish Journal of Earth Science*, vol. 17, pp. 593-614, 2008.
- [49] S. Öztürk, “Orta Anadolu Bölgesi ve civarındaki depremselliğin bölge-zaman-magnitüd analizleri ve güncel deprem potansiyeli”, *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, c. 1, s. 2, ss. 148-166, 2019.
- [50] P. Grassberger and I. Procaccia, “Measuring the strangeness of Strange attractors”. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 9, no. 1-2, pp. 189-208, 1983.
- [51] T. Hirata, “Correlation between the b-value and the fractal dimension of earthquakes”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, pp. 7507-7514, 1989.
- [52] A. Kijko, “Statistical Estimation of Maximum Regional Earthquake Magnitude m_{max} ”, Workshop: Seismicity Modelling in Seismic Hazard Mapping, Poljce, Slovenia, 2000.
- [53] A. Kijko, “Estimation of the Maximum Earthquake Magnitude, m_{max} ” *Pure and Applied Geophysics*, vol. 161, pp. 1-27, 2004.
- [54] A. Kijko and M. Singh, “Statistical tools for maximum possible earthquake magnitude estimation”, *Acta Geophysica*, vol. 59, no. 4, pp. 674-700, 2011.
- [55] C. Frohlich and S. Davis, “Teleseismic b-values: or, much about 1.0”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 98, pp. 631-644, 1993.
- [56] Y.Y. Kagan and L. Knopoff, “Spatial distribution of earthquakes: The two correlation function”, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 62, pp. 303-320, 1980.

- [57] S. Öztürk, “Kuzey Anadolu Fay Zonu ve civarındaki güncel deprem aktivitesinin bölgesel ve zamana bağlı analizleri”, *Yerbilimleri*, c. 38, s. 2, ss. 193-228, 2017.
- [58] D.L. Turcotte, *Fractals and chaos in geology and geophysics*, 2nd edition, Cambridge University Press, New York, 1997.
- [59] E. Aydınadağ, “Kuzey Anadolu ve San Andreas Fay Zonlarında Aktif Fay Verilerinin Fraktal Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Mühendislik Bilimleri Anabilim Dalı, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [60] A.O. Oncel and T.H. Wilson, “Correlation of seismotectonic variables and GPS strain measurements in Western Turkey”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 109, no. B11306, pp. 1-13, 2004.
- [61] S. Roy, U. Ghosh, S. Hazra and J.R. Kayal, “Fractal dimension and b-value mapping in the Andaman-Sumatra subduction zone”, *Natural Hazards*, vol. 57, pp. 27–37, 2011.
- [62] S. Öztürk, “Statistical correlation between b-value and fractal dimension regarding Turkish epicentre distribution”, *Earth Sciences Research Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 103-108, 2012.
- [63] S. Öztürk, “Türkiye’nin Batı Anadolu Bölgesi için deprem istatistiği ve olası güçlü depremlerin orta vadede bölgesel olarak tahmini üzerine bir çalışma”, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 4, s. 1, ss. 75-93, 2014.
- [64] V.F. Pisarenko, “Statistical evaluation of maximum possible magnitude”, *Izvestiya, Earth Physics*, vol. 27, pp. 757-763, 1991.
- [65] E. Bayrak, “Batı Anadolu bölgesinin deprem tehlikesinin farklı yöntemler kullanılarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2012.
- [66] N.M. Warren and G.V. Latham, “An experiment study of thermal induced micro-facturing and its relation to volcanic seismicity”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 75, pp. 4455-4464, 1970.
- [67] Y. Ogata, M. Imoto and K. Katsura, “3-D spatial variation of b-values of magnitude-frequency distribution beneath the Kanto District, Japan”, *Geophysical Journal International* vol. 104, pp. 135–146, 1991.
- [68] N. Maden and S. Öztürk, “Seismic b-values, bouguer gravity and heat flow data beneath Eastern Anatolia, Turkey: Tectonic implications”, *Surveys in Geophysics*, vol. 36, no. 4, pp. 549-570, 2015.
- [69] U. Akın, E.U. Uluggerli, ve S. Kutlu, “Türkiye jeotermal potansiyelinin ısı akısı hesaplamasıyla değerlendirilmesi”, *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, c. 149, ss. 205-214, 2014.
- [70] D. Gürcün ve A. Petek, “Jeotermal Enerji Potansiyelinin Swot Analizi ile Değerlendirilmesi: Aydın İli Örneği”, *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, c. 14, pp. 349-364, 2021.
- [71] S. Wiemer, S.R. McNutt and M. Wyss, M., “Temporal and three-dimensional spatial analyses of the frequency–magnitude distribution near Long Valley Caldera, California”, *Geophysical Journal International*, vol. 134, no. 2, pp. 409-421, 1998.
- [72] A. Bal, Aydın-İzmir civarının hava manyetik verilerinden ısı akısı değerlerinin belirlenmesi ve ısı akısı dağılımının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2004.

- [73] O.M. İlkişik, “Regional heat flow in Western Anatolia using silica temperature estimates from thermal springs”, *Tectonophysics*, vol. 244, pp. 175–184, 1995.
- [74] A. Gurer, Ö.F. Gürer, A. Pinçe and O.M. İlkisik, “Conductivity structure along the Gediz Graben, West Anatolia, Turkey: Tectonic implications”, *International Geology Review*, vol. 43, no. 12, pp. 1129-1144, 2001.
- [75] A. Aydemir, F. Bilim, G. Ciftci and S. Okay, “Modeling of the Foca-Uzunada magnetic anomaly and thermal structure in the gulf of Izmir, Western Turkey”, *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 156, pp. 288-301, 2018.
- [76] Anonim (2022, Nisan). Balıkesir İli Maden ve Enerji Kaynakları [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden_potansiyel_2010/Balikesir_Madenler.pdf
- [77] Z. M. Hisarlı, Batı Anadolu’da Curie noktası derinliklerinin saptanması ve jeotermal alanlarla ilişkisi, Doktora Tezi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1996.
- [78] B. Akyol, Çanakkale ve Çevresinin Deprem Riskinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, Türkiye, 2009.
- [79] D. Schorlemmer, S. Wiemer, M. Wyss, “Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes,” *Nature*, vol. 437, pp. 539-542, 2005.
- [80] A. Gezer ve T. Bekler, “6 Şubat 2017, $M_w=5.4$ Ayvacık depremi öncesi ve sonrası temel deprem tehlike parametrelerinin analizi”, *Çanakkale Onsekiz Mart University Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, s. 1, ss. 82-89, 2021.
- [81] B. Gutenberg and C.F. Richter, *Seismicity of the earth and associated phenomena*, Princeton University Press, Princeton, NJ, USA, 1954.
- [82] Y. Bayrak, S. Öztürk, H. Çınar, D. Kalafat, T. M. Tsapanos, G. Ch. Koravas and G.A. Leventakis, Estimating earthquake hazard parameters from instrumental data for different regions in and around Turkey, *Engineering Geology*, vol. 105, pp. 200-210, 2009.
- [83] H. Yalçın, L. Gülen ve M. Utkucu, Türkiye ve yakın çevresinin aktif fayları veri bankası ve deprem tehlikesinin araştırılması, *Yerbilimleri*, s. 34, ss. 133-160, 2013.
- [84] G. Esin ve Ş. Ceryan, Burhaniye (Balıkesir) yerleşim alanının sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi, *Yerbilimleri*, s. 36, ss. 81-96, 2015.
- [85] Ş. Ceryan, G. G. Büyükkahraman, S. Berber ve F. Çoban, BAUN Mühendislik Fakültesi binalarının bulunduğu (Çağış, Balıkesir) deprem tehlike analizi, dinamik özellikleri ve standart deprem hareketi spektrumları, *Balıkesir Üniversite Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, s. 24, ss.422-435, 2022.