

Bu makale aşağıda atf bilgisi verilen makalenin Türkçe çevirisidir.

Atf bilgisi: Alashan, S., Akbayram, K., Nemutlu, Ö. F. 2023. Estimating the recurrence of earthquakes with statistical methods in the city of Bingöl, Eastern Turkey: a district-based approach. Bulletin of the Mineral Research and Exploration 172, 15-29. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1239185>



Maden Tetkik ve Arama Dergisi

<http://dergi.mta.gov.tr>



Bingöl ilinin (doğu Türkiye) deprem tekrarlanma periyotlarının istatistiksel yöntemlerle tahmin edilmesi: ilçe temelli bir yaklaşım

Estimating the recurrence of earthquakes with statistical methods in the city of Bingöl, Eastern Turkey: a district-based approach

Sadık ALASHAN^{a,b,*}, Kenan AKBAYRAM^{a,b} ve Ömer Faruk NEMUTLU^{a,b}

^a Bingöl Üniversitesi, Enerji, Çevre, Doğal Afet Çalışmaları Uygulama ve Araştırma Merkezi, 12000 Bingöl, Türkiye

^b Bingöl Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 12000 Bingöl, Türkiye

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:

Bingöl, Deprem
Büyüklüğü, Risk, Olasılık
Fonksiyonları, Karlıova
Üçlü Eklemleri.

ÖZ

Bu çalışma, Bingöl ilinde Karlıova Üçlü Eklemleri yakınında, deprem büyüklüklerinin zamansal dağılımını tartışmaktadır. Çalışmada Bingöl'ün tüm ilçeleri için depremlerin olasılık dağılımları ve tekrarlanma periyotları belirlenmiştir. Bingöl'ün sekiz ilçesi bulunmaktadır; Adaklı, Merkez, Genç, Karlıova, Kiğı, Solhan, Yayladere ve Yedisu. Bunlardan 6 tanesinde (Adaklı, Merkez, Genç, Karlıova, Solhan ve Yedisu) diri faylar daha önce haritalandırılmıştır. Bu çalışmada 5 ayrı, zamana bağlı olasılık dağılımı dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Yıllık maksimum deprem büyüklükleri kullanılarak yapılan analizler sonucunda, Merkez, Karlıova ve Adaklı ilçeleri için en uyumlu sonuçların Gumbel dağılımında ortaya çıktığı görülmüştür. En küçük maksimum deprem büyüklüğünün bildirildiği Genç ilçesi için Weibull dağılımı en uyumlu sonucu vermektedir. Deprem tekrarlanma periyodu ve maksimum yıllık deprem büyüklüğü arasındaki ilişkiler şu sonuçları vermiştir. En büyük deprem büyüklüklerinin rapor edildiği Merkez ve Karlıova ilçeleri için her 250 yılda bir sırasıyla 6,7 M ve 7,2 M büyüklüğünde depremler meydana gelmesi beklenmektedir. Bu sonuçlar, KAFZ ve DAFZ boyunca bildirilen paleo-sismolojik veriler ile uyumludur. 10 yıllık bir deprem tekrarlanma periyodu için, tüm ilçelerde deprem büyüklüklerinin 3,9 ve 5,1 büyüklüklerine ulaştığı görülmüştür. Yedisu ilçesinde, 1000 yıllık deprem tekrarlanma periyodu için maksimum deprem büyüklüğünün 5,1 M olduğu görülmüştür, ancak bu sonuç daha önce yayınlanmış bulgularla uyumlu değildir ve muhtemelen bu bölgedeki düşük kaliteli sismik veriler nedeniyle oluşmuştur.

Geliş Tarihi: 25.02.2022

Kabul Tarihi: 19.01.2023

Keywords:

Bingöl, Earthquake
Magnitude, Risk,
Probability Functions,
Karlıova Triple Junction.

ABSTRACT

This study discusses the temporal distribution of earthquake magnitudes in the city of Bingöl, near Karlıova Triple Junction. We determine the probability distributions and return periods of earthquakes for all districts of Bingöl. Bingöl has eight districts; namely Adaklı, Central, Genç, Karlıova, Kiğı, Solhan, Yayladere, and Yedisu. In six of them, active faults were mapped previously (Adaklı, Central, Genç, Karlıova, Solhan, and Yedisu). We consider 5 time-dependent probability distributions for analysis. Using the annual maximum earthquake magnitudes, the best fit arises from the Gumbel distribution for Central, Karlıova, and Adaklı Districts. For the Genç District,

*Başvurulacak yazar: Sadık ALASHAN, sadikalashan@bingol.edu.tr

where the least maximum earthquake magnitude is reported, the Weibull distribution gives the best fit. The return period and maximum annual earthquake magnitude relations suggest the following results. For the Central and Karlıova Districts along which maximum earthquake magnitudes are reported, every 250 years a 6.7 M, and 7.2 M occurs respectively. These results are compatible with the results of paleo-seismological data reported along the NAFZ and the EAFZ. For a 10-year return period, earthquake magnitudes reach 3.9 and 5.1 in all districts. It is important to note that in the Yedisu District, the maximum earthquake magnitudes seem as 5.1 M for the 1000-year return period, incompatible with previously published findings probably because of low quality seismic data in this region.

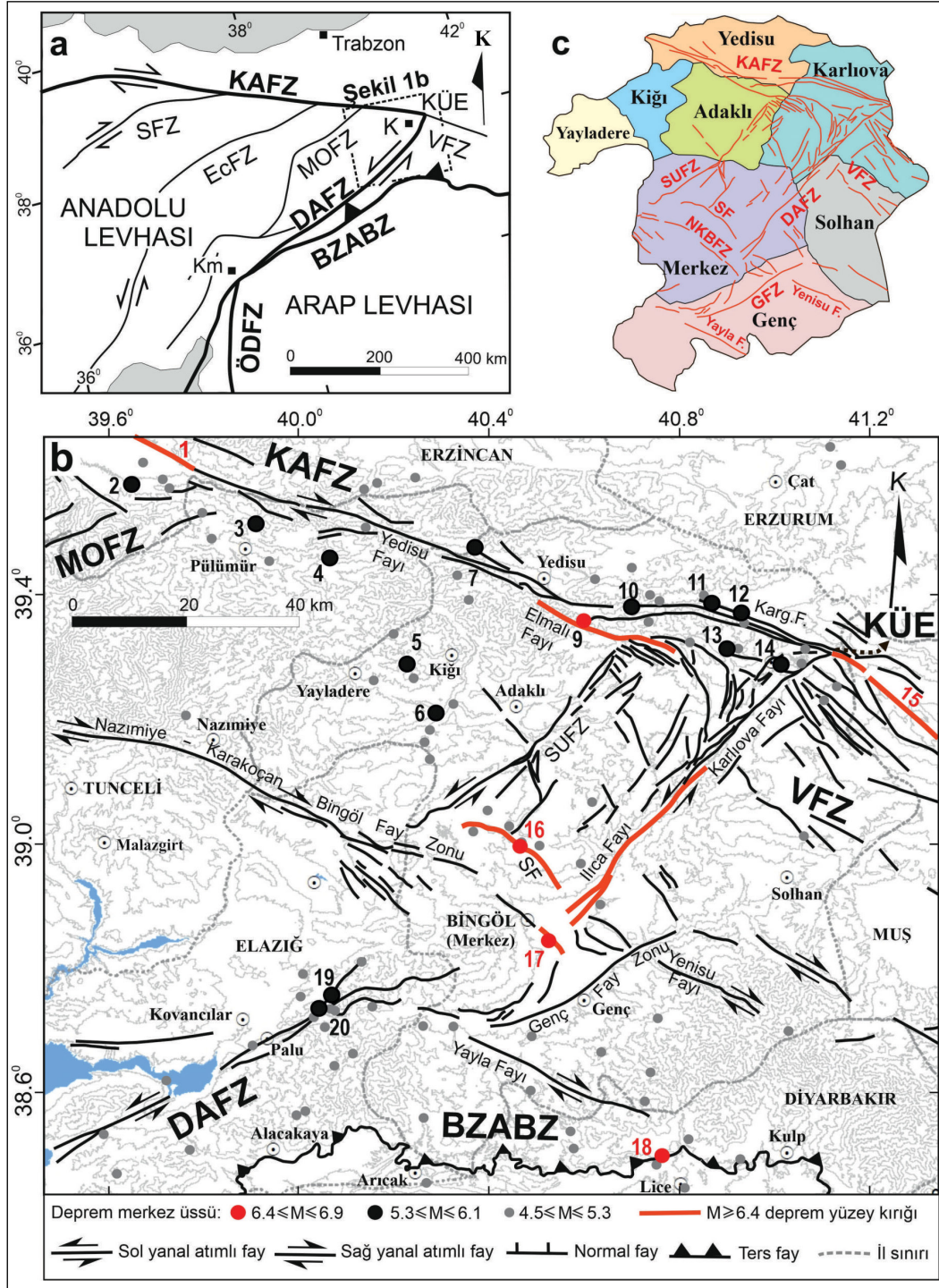
1. Giriş

Doğu Akdeniz'in üç önemli doğrultu atımlı fay zonu olan Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) ve Varto Fay Zonu (VFZ), Türkiye'nin doğusundaki Bingöl ilinde yer alan Karlıova Üçlü Eklemi'nde (KÜE) kesişmektedir (Şekil 1). Doğu Anadolu Yüksek Platosu ile Arap Levhası arasındaki tektonik sınır olan Bitlis-Zağros Aktif Bindirme Zonu (BZABZ) da (Şengör, 1980) Bingöl'e çok yakındır. KAFZ ile DAFZ arasındaki V şeklindeki alanın doğu ucundaki aktif fayların bir kısmı da (örneğin, Sudüğünü Fayı, Sancak-Uzunpınar Fay Zonu) Bingöl'de yer almaktadır (Şekil 1b). Bu bölgede, tarihsel deprem kayıtlarında 10. yüzyıla kadar uzanan birçok yıkıcı deprem rapor edilmiştir (Ambraseys, 1989, 1970; Ambraseys ve Jackson, 1998; Köküm ve Özçelik, 2020). Aletsel dönemde de Bingöl ve çevresinde birçok yıkıcı deprem meydana gelmiştir (Çizelge 1).

İleride gerçekleşmesi beklenen bir depremin tarihini net bir biçimde belirlemek mümkün olmasa da depremlerin meydana gelme olasılıkları belirli bir hata payı ile belirlenebilmektedir. Olasılık dağılım fonksiyonları, deprem risklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Depremlerin istatistiksel modellenmesi, belgelenmiş depremselliğin çeşitli özelliklerine basit bir noktasal işlem yaklaşımının uygulandığı bir yöntemdir (Hagiwara, 1974; Rikitake, 1974; Utsu, 1984; Anagnos ve Kiremidjian, 1988; Campbell vd., 2002; Çobanoğlu vd., 2006). En uyumlu istatistiksel modeller, belirli bir alanda uzun vadeli deprem oluşum sürecini tahmin etmek için kullanılabilir (Hainzl vd., 2006; Shelly vd., 2007; Wu vd., 2013). Gumbel (Gumbel, 1941), Gaussian (Rikitake, 1974), Lognormal (Nishenko ve Buland, 1987), Gamma (Utsu, 1984; Bak vd., 2002), ve Weibull (Hagiwara, 1974; Rikitake, 1974)

istatistiksel dağılımları, gelecekteki depremler için koşullu olasılıksal zamana bağlı deprem tekrarlanma modellerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır (Parvez ve Ram, 1999; Çobanoğlu vd., 2006; Yadav vd., 2010; Pasari ve Dikshit, 2015, 2018). Belirli bir alan için en iyi modeli veren, uygun dağılım modelinin belirlenmesi yalnızca gelecekteki depremleri tahmin etmek için değil, aynı zamanda olasılıksal sismik tehlike analizleri için de önemlidir (Pasari ve Dikshit, 2018). Olasılıksal modellemenin tarihçesi ve küresel uygulamaları yakın zamanlarda Çoban ve Sayıl (2020a, 2020b) tarafından özetlenmiştir. Ülkemizde, olasılıksal sismik tehlike analizi çalışmaları genellikle, Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) gibi büyük bölgesel fayların yüzlerce kilometre uzunluğundaki bölümlerine veya Ege Genişleme Bölgesi, Doğu Anadolu Yüksek Platosu gibi büyük deformasyon alanlarına odaklanmaktadır (örn., Öztürk vd., 2008; Polat vd., 2008; Öztürk, 2011; Öztürk ve Bayrak, 2012; Alkan ve Bayrak, 2022; Çoban ve Sayıl, 2020a, 2020b; Şahin ve Öksüm, 2021).

Bu çalışmanın temel amacı, Bingöl ili ve çevresinde uzun vadeli deprem potansiyelini tahmin etmek için en uygun istatistiksel modellerin yapılmasıdır (Şekil 1b). Bingöl'deki depremsellik şimdiye kadar iyi bir şekilde belgelenmiş olsa da bu bölgede yalnızca olasılıksal deprem tahminine odaklanan bir çalışma yoktur. Bingöl ilinde olasılıksal sismik tehlike analizi yapan bir çalışma (Balun vd., 2020), çeşitli azalım ilişkileri kullanarak bazı parametreler elde etmiş ve deprem kodlarını tartışmıştır. Elinizdeki bu çalışmada Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'nün (KOERI, 2022) deprem verileri kullanılmış ve Gumbel, Gaussian (Normal), Lognormal, Gamma ve Weibull dağılımları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, Bingöl'ün her bir ilçesi için en uyumlu olasılık dağılımı belirlenmiş ve çalışma alanındaki istatistiksel deprem tahminleri



Şekil 1- a) Doğu ve Güneydoğu Türkiye'nin basitleştirilmiş aktif tektonik haritası. Kalın çizgiler levha sınırı fay zonlarını, ince çizgiler Anadolu Levhası içinde oluşan fayları göstermektedir. b) Bingöl ve çevresinin diri fay haritası. Gri çizgiler yükseklik konturlarıdır. Konum için Şekil 1a'ya bakınız. Faylar ve isimleri genel olarak Emre vd. (2013)'ten alınmıştır. Yalnızca Genç Fay Zonu Akbayram vd. (2022a)'nden alınmıştır. Haritada numaralandırılmış olan depremlerin verileri Çizelge 1'de verilmiştir. Lütfen 1 ve 15 numaralı depremlerin merkez üslerinin haritanın dışında olduğuna dikkat ediniz (bkz. Çizelge 1). Depremlerin merkez üssü konumları, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'nün (KOERI, 2022) çevrimiçi kataloğundan alınmıştır. c) Bingöl ilinin ilçeleri ve aktif fay zonlarının haritası. BZABZ: Bitlis Zağros Aktif Bindirme Zonu; ÖDFZ: Ölü Deniz Fay Zonu; DAFZ: Doğu Anadolu Fay Zonu; EcFZ: Ececiği Fay Zonu; GFZ: Genç Fay Zonu; K: Karlıova; Karg. F.: Kargapazarı Fayı; Km: Kahramanmaraş; KÜE: Karlıova Üçlü Ekleme; MOFZ: Malatya Ovacık Fay Zonu; KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu; NKBFZ: Nazimiye Karakoçan Bingöl Fay Zonu; SF: Sudüğünü Fayı; SFZ: Sungurlu Fay Zonu; SUFZ: Sancak Uzunpınar Fay Zonu; VFZ: Varto Fay Zonu.

Çizelge 1- Aletsel dönemde kaydedilen, Şekil 1b'de gösterilen alanda meydana gelen $M \geq 5.3$ depremlerin sismik verileri. ¹: Bu depremlerin merkez üsleri Şekil 1b'nin dışındadır, ancak yüzey kırıklarının bir kısmı Şekil 1b'de gösterilmektedir.

| Deprem no | Büyüklik | Tarih (gg/aa/yy) | Merkez Üssü (N°) - (E°) | Referanslar |
|-----------------|----------|------------------|-------------------------|---|
| 1 ¹ | 7.9 | 26/12/1939 | 39.80 - 39.51 | Kalafat vd. (2009), KOERI (2022) |
| 2 | 6.1 | 27/01/2003 | 39.58 - 39.66 | Kalafat vd. (2009), KOERI (2022) |
| 3 | 5.8 | 15/03/1992 | 39.53 - 39.93 | Tan vd. (2008), KOERI (2022) |
| 4 | 5.7 | 05/12/1995 | 39.43 - 40.11 | Tan vd. (2008), KOERI (2022) |
| 5 | 5.3 | 02/12/2015 | 39.29 - 40.23 | Altuncu Poyraz vd. (2019) |
| 6 | 5.3 | 06/25/2021 | 39.17 - 40.22 | KOERI (2022) |
| 7 | 5.9 | 26/07/1967 | 39.50 - 40.40 | Eyidogan vd. (1991), McKenzie (1972), AFAD (2021) |
| 8 | 6.9 | 17/08/1949 | 39.39 - 40.61 | Ambraseys ve Jackson (1998), Nalbant vd. (2002) |
| 9 | 5.9 | 14/06/2020 | 39.37 - 40.74 | Akbayram vd. (2022b) |
| 10 | 5.4 | 23/03/2005 | 39.41 - 40.80 | Demirtaş (2019), KOERI (2022) |
| 11 | 5.6 | 12/03/2005 | 39.41 - 40.86 | Demirtaş (2019), KOERI (2022) |
| 12 | 5.9 | 14/03/2005 | 39.41 - 40.81 | Demirtaş (2019), KOERI (2022) |
| 13 | 5.7 | 06/06/2005 | 39.38 - 40.84 | KOERI (2022) |
| 14 ¹ | 6.9 | 19/08/1966 | 39.17 - 41.56 | Tan vd. (2008), KOERI (2022) |
| 15 | 6.4 | 01/05/2003 | 39.04 - 40.53 | Kalafat vd. (2009), KOERI (2022) |
| 16 | 6.8 | 22/05/1971 | 38.83 - 40.52 | Taymaz vd. (1991), KOERI (2022) |
| 17 | 6.0 | 06/09/1975 | 38.51 - 40.77 | Tan vd. (2008), KOERI (2022) |
| 18 | 6.1 | 08/03/2010 | 38.76 - 40.08 | Tan vd. (2011), KOERI (2022) |
| 19 | 6.8 | 08/03/2010 | 38.70 - 40.05 | USGS (2022) |

tartışılmıştır. Çalışmanın en sonunda, deprem tekrarlanma periyotları hesaplanmış ve bunların mevcut paleosismolojik verilerle korelasyonunu tartışılmıştır.

2. Bingöl'ün Aletsel Dönemdeki Depremselliğinin Özeti

Şekil 1b'de Bingöl ili ve çevresinin diri fay haritası görülmektedir. Kırmızı faylar, MTA diri fay veritabanına göre, $6.4 \leq M \leq 6.9$ büyüklüğe sahip depremlerde oluşan yüzey kırıklarıdır (Emre vd., 2013). Diğer tüm faylar (Şekil 1b'deki siyah çizgiler) aletsel dönemde kırılmamış olan aktif faylardır. Dolayısıyla bu faylardan her biri ileride gerçekleşebilecek büyük depremlerin kaynağı olabilirler (Akbayram vd., 2022a). Bingöl ilinin sekiz ilçesi vardır; Adaklı, Merkez, Genç, Karlıova, Kiğı, Solhan, Yayladere ve Yedisu (Şekil 1c). Bu çalışmada her ilçe için deprem istatistikleri hesaplanmıştır. Bu nedenle, bu bölümde fayların buldukları ilçelere göre depremsellikleri tanıtılmaktadır.

2.1. KAFZ'nun Bingöl'ün Karlıova, Yedisu ve Adaklı İlçelerindeki Depremselliği

Emre vd. (2013)'ne göre, 1949 yılında gerçekleşen 6,9 Ms büyüklüğündeki yıkıcı deprem, KAFZ'nun

Bingöl ilinin Adaklı ve Karlıova ilçeleri boyunca uzanan Elmalı Fayı üzerinde meydana gelmiştir (Şekil 1b-1c ve Çizelge 1). Bazı başka araştırmacılar, bu depremin Karlıova ve Yedisu ilçelerinin, Kargapazarı veya Yedisu Fayları üzerinde meydana geldiğini ileri sürmüştür (Barka vd., 1987; Ambraseys, 1989; Ambraseys ve Jackson, 1998; Nalbant vd., 2002). Bingöl dışında meydana gelen 5,9 Ms büyüklüğündeki 1967 Pülümür depreminin (Ambraseys, 1975) merkez üssü de Yedisu ilçesine çok yakındır. Bu alanda 14 Haziran 2020'de orta büyüklükte bir deprem (5,9 Mw), KAFZ'nun Karlıova ilçesi boyunca yüzeyleyen fayları üzerinde meydana gelmiştir (AFAD, 2021; KOERI, 2022). Ancak orta büyüklükteki depremler, Bingöl'de KAFZ'da birikmiş olan stresin salınmasını karşılayacak büyüklükte değildir (Akbayram vd., 2022b). Daha önce Bingöl'deki KAFZ'na ait fayların sismik boşluk karakterinde oldukları bildirilmiştir (Sançar vd., 2009; Zabcı vd., 2017). Zabcı vd. (2017), KAFZ'nun Yedisu Sismik Boşluğu'nda yer alan, 75 km uzunluğundaki kesintisiz bir fay segmentinin (Yedisu Segmenti) kırılması halinde, 7,2 Mw büyüklüğünde bir deprem oluşabileceğini hesaplamıştır.

2.2. DAFZ'nun Bingöl'ün Merkez, Karlıova ve Genç İlçelerindeki Depremselliği

22 Mayıs 1971 tarihli, yıkıcı Bingöl (Mw 6.8) depremi, Bingöl'ün Merkez ilçesindeki DAFZ'nun

İlica Fayı üzerinde meydana gelmiştir (Şekil 1b-1c ve Çizelge 1) (Arpat ve Şaroğlu, 1972; Taymaz vd., 1991). 878 kişinin hayatını kaybettiği ve 9111 binanın kullanılamaz hale geldiği Merkez ilçesinde, depremin maksimum şiddetinin VIII'e (Mercalli ölçeği) ulaştığı bildirilmiştir (AFAD, 2021; KOERI, 2022). İlica Fayı'nın KD'sunda yer alan, DAFZ'nun Karlıova Fayı (Şekil 1b) boyunca son büyük depremin (7.2 Ms) 1866 yılında gerçekleştiği belgelenmiştir (Ambraseys ve Jackson, 1998). İlica Fayı'nın güneybatı ucu ile Palu arasındaki DAFZ'na ait faylar geçtiğimiz 160 yılda kırılmamıştır (Akbayram vd. 2021). Bu faylar DFZ'nun, Bingöl Sismik Boşluğunun (BSB) bir parçası olarak yorumlanmaktadır (Duman ve Emre, 2013; Nalbant vd., 2002; Akbayram vd., 2021). Türkiye diri fay veri tabanında yer almasa da hem morfotektonik (Kıranşan vd., 2021) hem de sismik veriler Genç Fay Zonu'nun (GFZ) (Şekil 1b-1c) da aktif olduğunu düşündürmektedir (Herece 2008; Akbayram vd., 2022a). Son zamanlarda GFZ, BSB'nun önemli bir bileşeni olarak yorumlanmaktadır (Akbayram vd., 2022a). 2010 yılında merkez üsleri Bingöl ili Merkez ilçesine çok yakın olan iki adet orta şiddette deprem (6.1 ve 5.6 Ms), BSB üzerinde meydana gelmiştir (Şekil 1b ve Çizelge 1'deki 18 ve 19 numaralı depremler) (Tan vd., 2011). Bu depremler 42 kişinin ölümüne ve merkez üsleri yakınında 4000'den fazla binanın ağır hasar almasına neden olmuştur (AFAD, 2021; KOERI, 2022). Bununla birlikte, bu depremlerin, 1971 depreminin ardından BSB'nda biriken (Nalbant vd., 2002) yamulmayı neredeyse hiç karşılamamaktadır (Akbayram vd., 2021).

2.3. Anadolu Levhası İçinde Yer Alan Fayların Bingöl'ün Adaklı, Merkez ve Karlıova İlçelerindeki Depremselliği

Bingöl, Anadolu Levhasının en doğusunda oluşan levha içi alanda, KB-GD doğrultulu sağ ve KD-GB doğrultulu sol yanal atımlı aktif fayları da içermektedir (Şekil 1) (Dewey ve Şengör, 1979; Şengör, 1979; Şengör vd., 1985; Emre vd., 2013; Sançar vd., 2020). Nazımiye Karakoçan Bingöl Fay Zonu (NKBFZ), KB-GD doğrultulu sağ yönlü fay ailesine ait olup, en güney kısmı Bingöl ili Merkez ilçesine kadar uzanmaktadır (Şekil 1b-1c) (Emre vd., 2013). NKBFZ'nun aletsel dönemdeki depremselliği çok yakın zaman önce belgelenmiştir. 31 Ocak 2022 tarihinde, NKBFZ üzerinde Karakoçan yakınlarında orta büyüklükte (4,7 Mw) bir deprem meydana

gelmiştir (KOERI, 2022). Bingöl ili Merkez ilçesindeki bir diğer KB-GD doğrultulu sağ yanal atımlı fay olan Sudüğünü Fayı (SF) üzerinde (Şekil 1b-1c), 1 Mayıs 2003 tarihinde yıkıcı bir deprem (6,4 Ms) meydana gelmiştir (Çizelge 1) (Ulusay ve Aydan, 2005; Akkar vd., 2008; Kalafat vd., 2009; Utkucu vd., 2018). Merkez ilçesinde 176 kişinin hayatını kaybettiği bu depremin maksimum şiddeti VIII'e (Mercalli ölçeği) ulaşmıştır ve depremde 6000 bina kullanılamaz hale gelmiştir (AFAD, 2021; KOERI, 2022). KD-GB doğrultulu 50 km uzunluğunda bir sol yanal atımlı fay zonu olan Sancak Uzunpınar Fay Zonu (SUFZ) Merkez ve Adaklı ilçeleri boyunca uzanmaktadır (Emre vd., 2013; Selçuk vd., 2021) (Şekil 1b-1c). SUFZ'nun Holosen'deki aktivitesi, yakın zamanda bir paleosismolojik hendek çalışmasıyla belgelenmiştir (Selçuk vd., 2021). Yukarıda belirtilenlere ek olarak, KÜE yakınlarındaki Karlıova ilçesinde haritalanan bazı oblik aktif faylar da vardır (Şekil 1b-1c) (Emre vd., 2013). Bu fayların diri olup olmadıkları konusunda herhangi bir tartışma olmasa da (Emre vd., 2013), aletsel dönem sismisitelerinin net olarak tespiti için, KÜE'ne çok yakın, karmaşık bir deformasyon bölgesinde yer almaları nedeniyle, daha kapsamlı sismolojik analizler gerektirmektedir.

2.4. VFZ, Yayla ve Yenisu Fayları'nın Bingöl'ün Genç, Karlıova ve Solhan İlçelerindeki Depremselliği

KB-GD doğrultulu sağ yanal atımlı faylar, Bingöl'de yalnızca Anadolu Levhası ile sınırlı değildir (Şekil 1b-1c). Varto Fay Zonu'nun (VFZ) birçok paralel fayı hem Karlıova hem de Solhan ilçelerinde ve KÜE'nde, KAFZ ve DAFZ ile temas halindedir (Şekil 1b-1c). VFZ'nun fay yapısı ve depremselliği çeşitli çalışmalarda ayrıntılı olarak tartışılmıştır (Emre vd., 2013; Gürboğa, 2016; Sançar vd., 2015; Seyitoğlu vd., 2019). 1966'daki yıkıcı Varto depreminin (6,9 Ms) Bingöl dışında bulunan merkez üssü (Şekil 1b), VFZ'nun faylarından biriyle örtüşür (Çizelge 1). Bu depremin yüzey kırığı Bingöl'ün Karlıova ilçesine kadar ulaşmıştır (Şekil 1b). Genç ilçesinde yer alan Yayla ve Yenisu Faylarının tektonik aktivitesi (Şekil 1b-1c) çok az bilinmektedir ve sismisiteleri hakkında daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç vardır (Emre vd., 2013).

3. Veri ve Yöntem

Bu çalışmada Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi (KOERI)'ne ait deprem verileri

kullanılmıştır. Deprem büyüklüklerine göre veriler $1 \leq M < 3$ arasındaki depremler, $3 \leq M$ depremler ve $1 \leq M$ depremler olmak üzere 3 gruba ayrılmıştır. Sınır deprem büyüklüklerini sınıflandırmada, yalnızca ölçüm aletiyle algılanabilme ($1 \leq M$) ve ölçüm aletsiz algılanabilme ($3 \leq M$) ölçütleri belirlenmiştir. Daha önce de değinildiği üzere, bu çalışmada Bingöl ilinin her bir ilçesine ait deprem istatistikleri belirlenmiştir (Çizelge 2). KOERI deprem veri tabanında, $3 \leq M$ depremler için 1935 yılından beri ölçülmesine rağmen $1 \leq M < 3$ depremler yalnızca 2001 yılından beri ölçülmektedir. Her bir ilçe için deprem büyüklüklerine göre ölçüm aralığı Çizelge 2’de verilmiştir. Maksimum deprem sayısı (1393) ve deprem büyüklüğü (6.8) Merkez ilçesinde ölçülmüştür (Çizelge 2). KÜE’nin içerisinde yer aldığı Karlıova ilçesi, maksimum $1 \leq M < 3$ deprem sayısına sahiptir. Genç ilçesi için ölçülen maksimum

deprem büyüklüğü yalnızca 4.9M olmasına rağmen, $3 \leq M$ depremlerin ortalamasının maksimum olduğu ilçedir (3.7M). Ayrıca, Genç ilçesi $1 \leq M$ depremler için maksimum standard sapmaya sahiptir. Emre vd. (2013) tarafından yayınlanan ve yaygın şekilde kullanılan Türkiye Diri Fay Haritasında Kığı ilçesinde diri fay raporlanmamasına rağmen, bu ilçede sismik aktivite gözlenmektedir (Çizelge 2). Kığı ilçesinde maksimum deprem büyüklüğü 5.7M değerine ulaşmaktadır ve 2000 yılından bu yana önemli sayıda (654) depremin bu ilçede kaydedildiği görülmüştür (Çizelge 2). Genç, Yayladere ve Yedisu ilçeleri ile kıyaslandığında, Solhan ilçesinde en büyük deprem büyüklüğü 5.5M olmasına rağmen, 1935 yılından beri en küçük ikinci (126) deprem sayısı kaydedilmiştir. Yayladere ilçesi 4.5M en büyük deprem büyüklüğü ile en küçük kayıtlı deprem sayısına (108) sahiptir

Çizelge 2- Bingöl ilçelerine ait deprem istatistikleri.

| Konum | Deprem Büyüklükleri | Ölçüm Yılları | Deprem Sayısı | Ortalama (± 0.1) | Maksimum Büyüklük | Standart Sapma (± 0.01) |
|-----------|---------------------|---------------|---------------|------------------------|-------------------|-------------------------------|
| Adaklı | $1 \leq M < 3$ | 2001-2021 | 182 | 2.2 | 2.9 | 0.48 |
| | $3 \leq M$ | 1935-2020 | 58 | 3.5 | 5.7 | 0.66 |
| | $1 \leq M$ | 1935-2021 | 240 | 2.5 | 5.7 | 0.78 |
| Genç | $1 \leq M < 3$ | 2000-2021 | 146 | 2.2 | 2.9 | 0.45 |
| | $3 \leq M$ | 1964-2020 | 52 | 3.7 | 4.9 | 0.69 |
| | $1 \leq M$ | 1964-2021 | 198 | 2.6 | 4.9 | 0.82 |
| Karlıova | $1 \leq M < 3$ | 2000-2021 | 868 | 2.2 | 2.9 | 0.52 |
| | $3 \leq M$ | 1949-2020 | 323 | 3.4 | 6.0 | 0.58 |
| | $1 \leq M$ | 1949-2021 | 1189 | 2.6 | 6.0 | 0.76 |
| Kığı | $1 \leq M < 3$ | 2000-2021 | 654 | 2.1 | 2.9 | 0.37 |
| | $3 \leq M$ | 1907-2020 | 90 | 3.5 | 5.7 | 0.61 |
| | $1 \leq M$ | 1907-2021 | 744 | 2.3 | 5.7 | 0.62 |
| Merkez | $1 \leq M < 3$ | 2000-2021 | 708 | 2.4 | 2.9 | 0.48 |
| | $3 \leq M$ | 1971-2021 | 685 | 3.3 | 6.8 | 0.37 |
| | $1 \leq M$ | 1971-2021 | 1393 | 2.8 | 6.8 | 0.64 |
| Solhan | $1 \leq M < 3$ | 2002-2021 | 126 | 2.3 | 2.9 | 0.48 |
| | $3 \leq M$ | 1954-2014 | 30 | 3.6 | 5.5 | 0.62 |
| | $1 \leq M$ | 1954-2021 | 156 | 2.5 | 5.5 | 0.72 |
| Yayladere | $1 \leq M < 3$ | 2002-2021 | 84 | 2.2 | 2.9 | 0.38 |
| | $3 \leq M$ | 1998-2019 | 24 | 3.4 | 4.5 | 0.39 |
| | $1 \leq M$ | 1998-2021 | 108 | 2.5 | 4.5 | 0.62 |
| Yedisu | $1 \leq M < 3$ | 2002-2021 | 643 | 2.0 | 2.9 | 0.49 |
| | $3 \leq M$ | 1935-2021 | 95 | 3.5 | 5.3 | 0.56 |
| | $1 \leq M$ | 1935-2021 | 728 | 2.2 | 5.3 | 0.70 |

(Çizelge 2). Ancak, Yayladere ilçesindeki kayıtlar sadece 1998 yılına kadar dayanmaktadır.

Normal (Gauss), Lognormal, Gamma, Gumbel, ve Weibull dağılımları Bingöl ilinin tüm ilçelerine ait deprem tehlikesini analiz etmek için kullanılmıştır. Çalışma alanı küçük olduğu için koşullu olasılık durumlarını kullanmak için yeterli veri grubu mevcut değildir. Bu çalışmada, maksimum deprem büyüklükleri belli bir değerden büyük depremlerin zamansal dönüş aralık değerleri yerine (koşullu olasılık) kullanılmıştır.

3.1. Normal (Gauss) Dağılımı

Doğal olaylar genellikle Normal dağılıma uymaktadır. Normal dağılım bağımlı X değişkeninin sürekli bir fonksiyonudur. $f(X)$, belli bir ortalama (μ) ve standart sapmaya (σ) sahip bir rastgele değişkenin olasılık fonksiyonunu temsil etmektedir (Denklem 1). Yöntem Alman matematikçi Gauss ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş olup, 18. yüzyıldan beri yaygın olarak kullanılmaktadır (Kottogoda ve Rosso, 2008).

$$f(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right)^2\right] f(X) = \frac{1}{\sqrt{f2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \rho_p = \frac{F_G}{F_p} \quad -\infty < x < \infty \quad (1)$$

3.2. Lognormal Dağılımı

Bazı normal olmayan değişkenler logaritmik dönüşümler kullanılarak Normal dağılıma uydurulabilir (Denklem 2). Lognormal dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu Denklem 3'te verilmiştir. Burada μ_y ve σ_y parametreleri Y rastgele değişkeninin ortalama ve standart sapmasını temsil etmektedir.

$$Y = \ln(x) \rho_p = \frac{F_G}{F_p} \quad (2)$$

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad x \gg 0$$

$$(3) \rho_p = \frac{F_G}{F_p}$$

3.3. Gamma Dağılımı

Çarpık dağılımları incelemek için genellikle Gamma dağılımı kullanılmaktadır. Rastgele değişkenlerin dağılımları için şekil ve ölçek parametreleri α ve β ile temsil edilir (Denklem 4). Gamma fonksiyonu, $\Gamma(\alpha)$, Denklem 5 kullanılarak

hesaplanır. Gamma dağılımının ortalaması ve standart sapması Denklem 6 ve 7 ile elde edilir.

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad x \geq 0 \quad (4)$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (5)$$

$$Mean(x) = \alpha\beta \quad (6)$$

$$Var(x) = \alpha\beta^2$$

$$(7) Var(x) = \alpha\beta^2 E(x) = \alpha\beta$$

3.4. Gumbel Dağılımı

Gumbel dağılımı Genelleştirilmiş Ekstrem Değer dağılımının özel bir halidir. Ekstrem değer problemleri için kullanılır. Toplam (kümülatif) dağılım fonksiyonu Denklem 8 üzerinde görülmektedir (Gumbel, 1941). Burada x rastgele değişkeni, α şekil parametresini ve β ölçek parametresini temsil etmektedir

$$\left(\alpha = \frac{\sigma}{1.283} \text{ and } \beta = \mu - \frac{0.577}{\alpha}\right)$$

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha} - \xi\right)\right]\right\}$$

$$\kappa = 0 \quad F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right) \quad (8)$$

3.5. Weibull Dağılımı

Weibull dağılımı malzeme ömür tayini ve rüzgâr potansiyelini belirlemek için literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Olasılık dağılım fonksiyonu Denklem 9'da verilmektedir. $x \geq 0$ için, α ölçek parametresini ve β şekil parametresini vermektedir. Ölçek ve şekil parametreleri Denklem 10 ve 11 kullanılarak elde edilebilir. $\Gamma(\alpha)$ Gamma fonksiyonunu temsil etmektedir (Denklem 5).

$$f(x) = \alpha\beta x^{\beta-1} e^{-\alpha x^\beta} \quad (9)$$

$$E(x) = \beta\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (10)$$

$$Var(x) = \beta^2 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)\right]^2 \right\} \quad (11)$$

Normal (Gaussian), Lognormal, Gamma, Gumbel ve Weibull dağılımlarının model parametreleri

momentler yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Söz konusu olasılık dağılım fonksiyonlarının uygunlukları ortalama mutlak hata (MAE), ortalama yüzde hata (MPE) ve Kolmogorov-Smirnov (KS) uygunluk testi kullanılarak sınanmıştır. 12, 13 ve 14 numaralı denklemlerde, $\hat{F}(x)$ ampirik toplam dağılım fonksiyonunu, $F(x)$ teorik olasılık dağılım fonksiyonunu, n veri sayısını ve D parametresi KS test istatistiğini ifade etmektedir. Eğer KS test istatistiği, D , tablolaştırılmış test istatistiğinden küçükse ölçülmüş ampirik toplam olasılık dağılım değerleri teorik toplam olasılık dağılım değerleri ile uyumaktadır. MPE değerleri %5 değerinden küçük ise istatistik çalışmalarda güvenli olarak kabul edilebilir.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{F}(x_i) - F(x_i)| \quad (12)$$

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\hat{F}(x_i) - F(x_i)}{\hat{F}(x_i)} \right) \times 100 \quad (13)$$

$$D = (|\hat{F}(x_i) - F(x_i)|) \quad 1 \leq i \leq n \quad (14)$$

4. Sonuçlar ve Tartışma

4.1. Toplam Olasılık Dağılımları

Bingöl ili Merkez ilçesi için önceki kısımda bahsedilen tüm ampirik ve teorik toplam olasılık dağılım fonksiyon değerleri Şekil 2’de gösterilmektedir. Çalışmada çok fazla yer tutmaması açısından, Bingöl’ün diğer ilçeleri için yalnızca ortalama mutlak hata, KS istatistik (D) ve ortalama yüzde hata değerleri Çizelge 3’te verilmiş ve toplam olasılık dağılımları ayrı şekiller üzerinde gösterilmemiştir. Çizelge 3 üzerinde, en küçük ortalama mutlak hatalar, KS test istatistikleri ve %5’ten küçük ortalama yüzde hatalar ilgili bölge için en uygun dağılımı belirlemek amacıyla koyu renkte gösterilmiştir. Şekil 2 üzerinde, mavi saçılma noktaları deprem büyüklükleri için ampirik toplam olasılık değerlerini verirken, siyah çizgiler sürekli teorik toplam olasılık değerlerini temsil etmektedir. Veri uzunluğu, “ n ” ve mertebesi, “ i ” olmak üzere, ampirik toplam olasılık değerleri, $(\frac{i}{n+1})$ olarak elde edilmektedir. Teorik toplam olasılık değerleri Normal, Lognormal, Gamma, Weibull ve Gumbel olasılık dağılım fonksiyonları kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanmış olasılık dağılım fonksiyonları kıyaslandığında, ortalama yüzde hataları %5’ten küçük olmak kaydıyla, en küçük ortalama hata ve

KS test istatistiğine sahip olasılık dağılım fonksiyonu incelenen bölge için en uygun olasılık dağılım fonksiyonu olarak seçilmiştir. Bingöl Merkez ilçesinde ölçülmüş deprem büyüklüklerine Gumbel dağılımı en iyi şekilde uymaktadır. Yani siyah çizgi mavi saçılma noktalarına en iyi Gumbel dağılımıyla uymaktadır (Şekil 2). Bingöl Merkez ilçesinde ölçülmüş deprem büyüklüklerinin ortalama mutlak hata ve KS test istatistikleri Gumbel dağılımı için minimum (0.036 ve 0.118<0.274) ve Weibull dağılım için maksimumdur (0.072 ve 0.189) (Çizelge 3). Gumbel dağılımı, aynı zamanda Karlıova (0.031 ve 0.075<0.270) ve Adaklı (0.032 ve 0.078<0.286) ilçelerinin deprem büyüklüklerine en iyi şekilde uymaktadır. Weibull dağılımı, Bingöl Merkez ilçesinde olduğu gibi Karlıova (0.071 ve 0.143) ve Adaklı (0.083 ve 0.172) ilçelerinde ölçülmüş deprem büyüklükleri için de maksimum ortalama hata ve KS test istatistik değerlerine sahiptir. Ancak, Genç (0.034 ve 0.103<0.274) ve Yayladere (0.028 ve 0.072<0.278) ilçelerinin deprem büyüklükleri en iyi Weibull dağılımına uymaktadır. Lognormal dağılım, Kiğı (0.026) ve Solhan (0.036) ilçelerinin deprem büyüklükleri için en küçük ortalama mutlak hata değerine sahipken, Gumbel dağılımı en küçük KS test istatistik (0.075 ve 0.092) değerlerine sahiptir. Lognormal dağılımın ortalama yüzde hata değerleri Gumbel dağılımından küçük olduğundan bu bölgeler için Lognormal dağılım en uygun dağılım olarak seçilmiştir. Yedisu ilçesinin deprem büyüklükleri, 0.045 ortalama mutlak hata ve 0.093<0.270 KS test istatistik değerleriyle en iyi olarak Normal dağılıma uymaktadır.

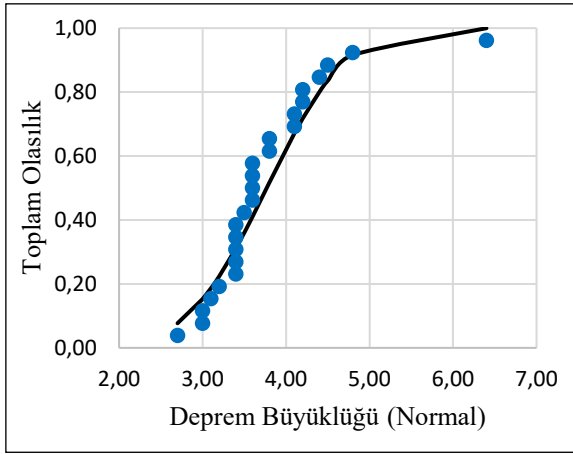
Bingöl’ün her bir ilçesi için kayıtlanmış olan $1 \leq M < 3$ depremler, olasılık dağılım fonksiyonu gözönünde bulundurulmadan deprem hareketliliğini belirlemek için analiz edilmiştir (Şekil 3). Bingöl’ün her bir ilçesinde 2001 yılından beri kayıt altına alınan $1 \leq M < 3$ depremlerinin sayısı, çalışma alanındaki ilçelerin sismik hareketliliğini benzer dönemler boyunca kıyaslamak için Şekil 3 üzerinde gösterilmektedir. Şekil üzerinde yatay eksen, yılları ve düşey eksen, deprem sayılarını göstermektedir. Diğer yıllar ile kıyaslandığında, Bingöl Merkez ilçesinde 2003 ve 2018 yıllarında kaydedilen $1 \leq M < 3$ deprem sayıları yüksektir. 2003 yılında kaydedilen $1 \leq M < 3$ depremlerinin çoğu Merkez ilçesinde Sudüğünü Fayı (SF) üzerinde meydana gelen, 1 Mayıs 2003 (6.4 Ms) depreminin (Çizelge 1) artçı depremleridir (Ulusay ve Aydan, 2005; Akkar vd., 2008; Kalafat vd., 2009; Utkucu vd., 2018).

Çizelge 3-Bingöl ilçelerinin deprem büyüklüklerinin olasılık dağılımlarının ortalama mutlak, yüzde hataları ve Kolmogorov-Smirnov test istatistikleri.

| Ortalama Mutlak Hata | | | | | | |
|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| İlçeler | Ölçüm Aralığı | Normal | Lognormal | Gamma | Weibull | Gumbel |
| Merkez | 1996-2020 | 0.062 | 0.041 | 0.052 | 0.072 | 0.036 |
| Adaklı | 1999-2020 | 0.063 | 0.049 | 0.054 | 0.083 | 0.032 |
| Genç | 1999-2020 | 0.042 | 0.053 | 0.049 | 0.034 | 0.075 |
| Karlıova | 1995-2020 | 0.059 | 0.041 | 0.045 | 0.071 | 0.031 |
| Kiğı | 1998-2020 | 0.034 | 0.026 | 0.027 | 0.047 | 0.033 |
| Solhan | 2001-2020 | 0.042 | 0.036 | 0.037 | 0.057 | 0.042 |
| Yayladere | 1998-2020 | 0.028 | 0.034 | 0.033 | 0.028 | 0.051 |
| Yedisu | 2000-2020 | 0.045 | 0.048 | 0.047 | 0.053 | 0.067 |
| Kolmogorov-Smirnov minimum mesafeler | | | | | | |
| İlçeler | Ölçüm Aralığı | Normal | Lognormal | Gamma | Weibull | Gumbel |
| Merkez | 1996-2020 | 0.166 | 0.142 | 0.141 | 0.189 | 0.118 |
| Adaklı | 1999-2020 | 0.139 | 0.111 | 0.124 | 0.172 | 0.078 |
| Genç | 1999-2020 | 0.131 | 0.159 | 0.143 | 0.103 | 0.166 |
| Karlıova | 1995-2020 | 0.125 | 0.101 | 0.102 | 0.143 | 0.075 |
| Kiğı | 1998-2020 | 0.111 | 0.089 | 0.101 | 0.122 | 0.075 |
| Solhan | 2001-2020 | 0.155 | 0.122 | 0.133 | 0.184 | 0.092 |
| Yayladere | 1998-2020 | 0.074 | 0.112 | 0.103 | 0.072 | 0.143 |
| Yedisu | 2000-2020 | 0.093 | 0.113 | 0.104 | 0.122 | 0.151 |
| Ortalama Yüzde Hata | | | | | | |
| İlçeler | Ölçüm Aralığı | Normal | Lognormal | Gamma | Weibull | Gumbel |
| Merkez | 1996-2020 | -4.90% | 0.31% | -6.43% | -3.39% | -4.17% |
| Adaklı | 1999-2020 | -1.53% | 1.03% | -2.46% | 1.13% | 0.16% |
| Genç | 1999-2020 | -0.07% | -2.73% | -0.99% | 2.58% | -4.44% |
| Karlıova | 1995-2020 | -1.90% | 1.70% | -2.52% | -1.44% | 1.75% |
| Kiğı | 1998-2020 | 1.18% | 3.43% | 0.72% | 2.16% | 3.71% |
| Solhan | 2001-2020 | 3.35% | 4.00% | 2.87% | 4.10% | 5.06% |
| Yayladere | 1998-2020 | 4.36% | 3.47% | 4.81% | 4.26% | 6.92% |
| Yedisu | 2000-2020 | 3.67% | 3.87% | 3.95% | 4.38% | 7.81% |

Adaklı ve Solhan ilçelerinde kaydedilen $1 \leq M < 3$ deprem sayıları düzenli değişmekte ve grafik üzerinde keskin bir sıçrama görülmemektedir. Genç ve Yayladere ilçelerinde, $1 \leq M < 3$ deprem sayıları 2015 yılında önemli bir artış görülse de genellikle düşüktür. Dahası, Kiğı ilçesinde 2015 yılında hem maksimum sayıda $1 \leq M < 3$ deprem hem de maksimum $1 \leq M$ deprem büyüklüğü (5.5) meydana gelmiştir. Karlıova ilçesinde maksimum $1 \leq M < 3$ deprem sayısı ve maksimum $1 \leq M$ deprem büyüklüğü (5.9), 2005 ve 2020 yıllarında kaydedilmiştir. Bu yıllarda deprem

sayılarında meydana gelen artış 12-14 Mart 2005 (5.7 Ml ve 5.9 Ml) (Demirtaş, 2019; KOERI, 2022), ve 14 Haziran 2020, 5.9 Mw (Akayram vd., 2022b; AFAD 2021; KOERI 2022) depremlerinin artçıları ile açıklanabilir. 2020 yılında Yedisu ilçesinin, $1 \leq M < 3$ deprem sayıları Karlıova ilçesindeki benzer biçimde maksimumdur. Yedisu ilçesinin 2020 yılındaki maksimum $1 \leq M < 3$ deprem sayısı, aynı yıldaki 5.9Mw Karlıova depreminin artçıları ile meydana gelmiş ve maksimum $1 \leq M$ deprem büyüklüğü 4.4M olarak kaydedilmiştir (Akayram vd., 2022b).



Şekil 2- Bingöl ili Merkez ilçesindeki maksimum deprem büyüklüklerinin toplam olasılık dağılım fonksiyonları.

4.2. Deprem Tekrarlanma Periyotlarının Maksimum Deprem Büyüklükleri ile Korelasyonu ve Mevcut Paleosismolojik Veriler ile Tartışılması

Bu bölümde Bingöl'ün her bir ilçesi için deprem tekrarlanma periyotlarını ve bu periyotlara göre oluşan yıllık maksimum deprem büyüklüklerini vermekteyiz (Şekil 4). Bu değerler, bu bölümde tartıştığımız mevcut paleosismolojik verilerle ilişkilendirildiğinde anlam kazanmaktadır. Şekil 4'te, yatay eksen, deprem tekrarlanma periyotlarını ve dikey eksen, seçilen bir tekrarlanma periyotuna göre oluşacak maksimum deprem büyüklüklerini göstermektedir. Deprem tekrarlanma periyotları 10, 50, 100, 250 ve 1000 yıl olarak seçilmiştir. Örneğin, şekle göre Bingöl'ün Merkez ilçesi için beklenen maksimum deprem büyüklüğü, 1000 yıllık deprem tekrarlanma periyodu için 7,5 olmaktadır.

Merkez ilçesinde elde edilen deprem büyüklüğü maksimumları, 10, 50, 100, 250 ve 1000 tekrarlanma periyotları için sırasıyla 4,7, 5,7, 6,1, 6,7 ve 7,5 olarak ortaya çıkmıştır. Merkez ilçesinde dört aktif fay zonu haritalanmıştır; EAFZ, NKBZF, SF ve SUFZ (Şekil 1b-1c). Ancak, Merkez ilçesinde, DAFZ, NKBZF ve SF fay zonları üzerinde yayınlanmış paleosismoloji verileri bulunmamaktadır.

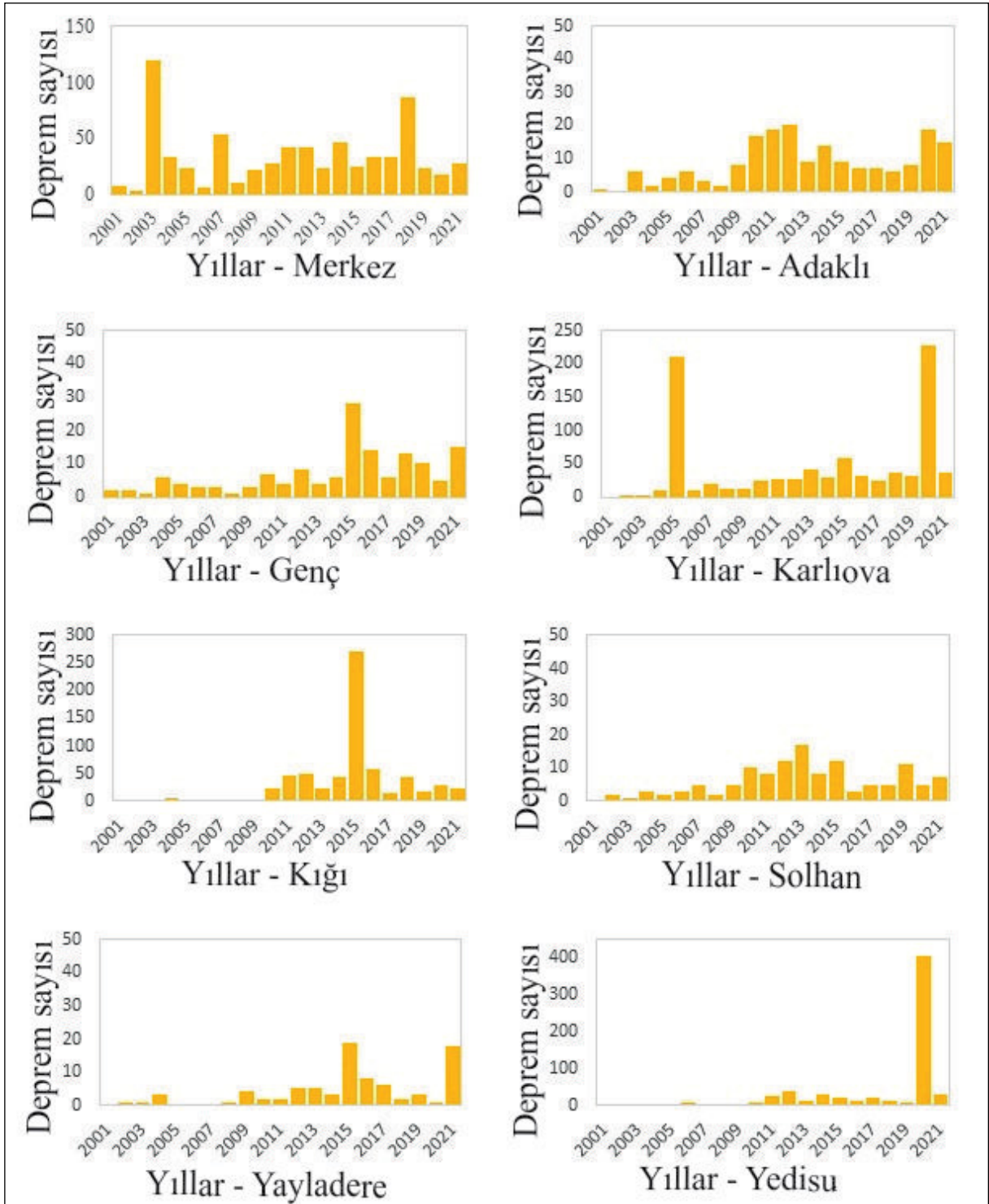
Ancak, DAFZ'nun Palu-Hazar Gölü Segmenti boyunca yapılan paleo-sismoloji çalışmaları, bu fay zonunda her 100 ila 365 yılda bir, büyük bir depremin ($M > 7$) meydana geldiğini göstermektedir (Çetin vd., 2003). Hazar Gölü'nün sismo-türbiditlerini tarihlendiren bir araştırma, son 3800 yılda ~190

yıllık bir deprem tekrarlanma aralığı olduğunu göstermektedir (Hubert-Ferrari vd., 2020). Bu bulgular birleştirilerek yayınlanan değerlerin ortalaması alındığında, Bingöl'de DAFZ'na ait faylarda her ~230-250 yılda bir, büyük bir deprem meydana geldiği kabul edilebilir (Taymaz vd., 1991). SUFZ boyunca yapılan paleosismolojik hendek çalışmaları, bir deprem tekrarlama aralığı bildirmese de Holosen'de bu fay zonunda en az iki önemli deprem gerçekleştiğini göstermiştir (Selçuk vd., 2021).

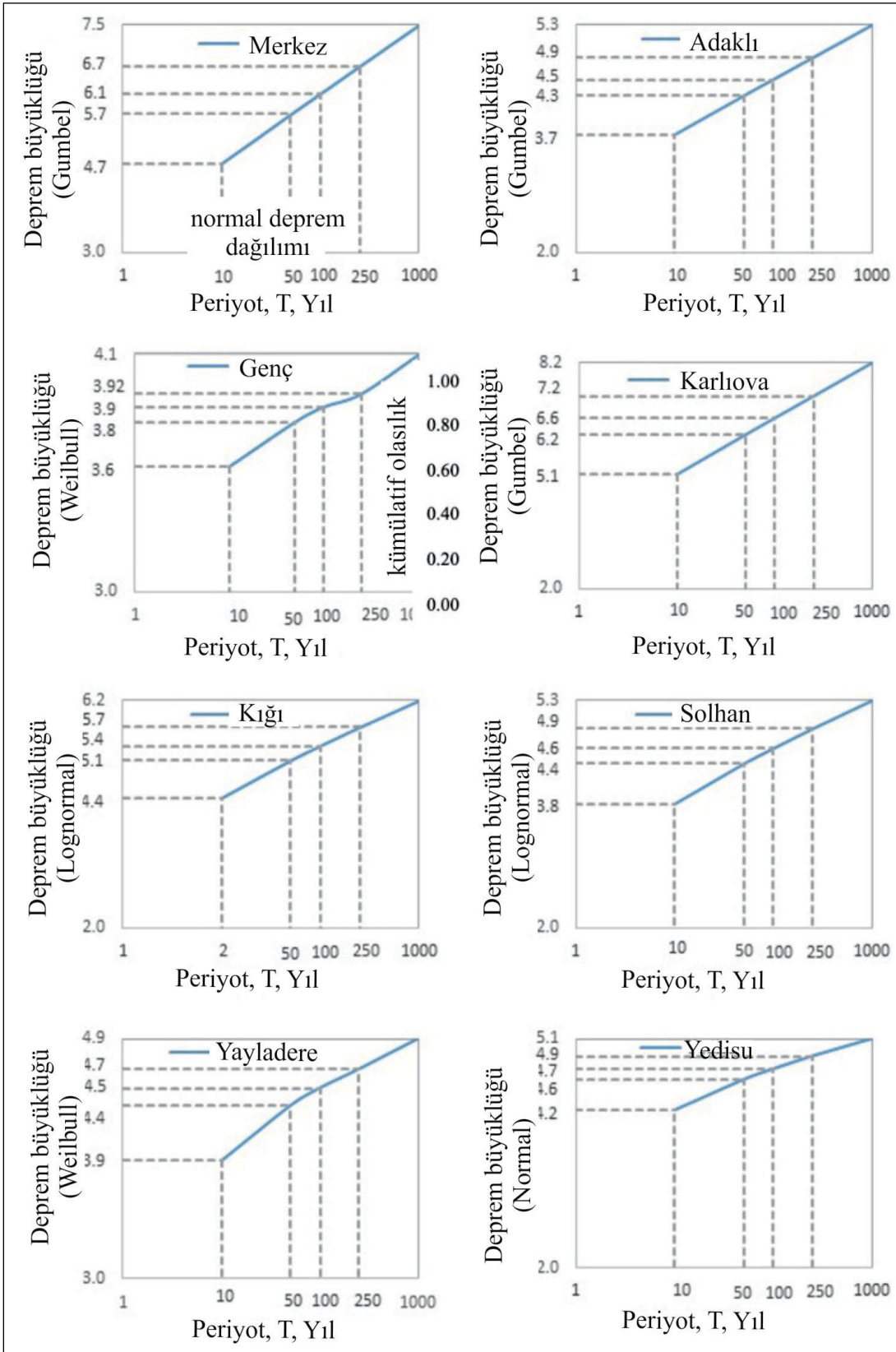
Karlıova ilçesinde 10, 50, 100, 250 ve 1000 yıllık deprem tekrarlanma periyotları için maksimum deprem büyüklükleri 5,1, 6,2, 6,6, 7,2 ve 8,2 olarak elde edilmiştir. Karlıova ilçesi hem KAFZ hem de DAFZ'nun parçalarının haritalandığı KÜE'ne ev sahipliği yapmaktadır. Önceki çalışmalar, KAFZ'nun büyük bir kısmı boyunca 200 ila 250 yıl arasında deprem tekrarlama aralığı önermektedir (cf., Zabcı vd., 2017). Bu nedenle, Karlıova ilçesinde KAFZ ve DAFZ'nunda meydana gelecek bir sonraki büyük depremin olası büyüklüğü olarak, 250 yıllık bir tekrarlanma periyotuna karşılık gelen maksimum deprem değeri olan 7,2 M'yi (Şekil 4) seçmek güvenlidir. Bu büyüklük, Zabcı vd. (2017) tarafından hesaplanan, beklenen maksimum deprem değeri (7,2 M) ile de uyumludur.

KAFZ'nun bazı önemli kesimlerinin haritalandığı Yedisu ilçesinde 1000 yıllık deprem tekrarlanma periyodu için maksimum deprem büyüklüğü 5,1 M olarak görünmektedir (Şekil 4). Bu, Zabcı vd. (2017)'nin paleosismolojik hendek sonuçları ve ampirik hesaplamaları ile uyumlu değildir. Bu tutarsızlığın nedeni, bu bölgedeki düşük kaliteli sismik verilere bağlanmaktadır.

Kığı ve Solhan ilçeleri için maksimum deprem büyüklükleri Lognormal dağılıma uymakta olup, deprem büyüklükleri 1000 yıllık tekrarlanma periyodu için 6,2 ve 5,3'tür. Weibull dağılımına göre, Yayladere ilçesinde 1000 yıllık deprem tekrarlanma periyodu için maksimum deprem büyüklüğü 4,9 M olarak görülmektedir. Genç ilçesi için 1000 yıllık tekrarlanma periyodu için bütün ilçelerdeki en küçük deprem büyüklüğü olan, 4,1 büyüklüğü hesaplanmıştır. 10 yıllık tekrarlanma periyotları incelendiğinde tüm ilçelerde maksimum deprem büyüklükleri 3,6 ile 5,1 arasında hesaplanmaktadır. Bu, hissedilebilir depremlerin her on yılda bir meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 3- Bingöl'de ilçe bazında 2001 ve 2021 yılları arasında meydana gelen $1 \leq M < 3$ deprem sayıları.



Şekil 4- Bingöl'de ilçe bazında, seçilen deprem tekrarlanma periyotlarına göre oluşan maksimum deprem büyüklükleri.

5. Sonuçlar

Bingöl'ün tüm ilçeleri için depremlerin zamana bağlı 5 farklı olasılık dağılımı (Normal, Lognormal, Gamma, Gumbel, Weibull) ve deprem tekrarlanma periyotlarının belirlenmesi aşağıdaki sonuçları vermektedir. Merkez, Karlıova ve Adaklı ilçeleri için en uygun olasılık Gumbel dağılımından gelmektedir. En az maksimum deprem büyüklüğünün bildirildiği Genç ilçesi için Weibull dağılımı en uygun sonuçları verir. En büyük deprem büyüklüklerinin raporlandığı ve KAFZ ve DAFZ'nun önemli faylarının haritalandığı Merkez ve Karlıova ilçeleri için 250 yılda bir sırasıyla 6,6 M ve 7,2 M büyüklüğünde depremler meydana gelmektedir. Bu sonuçlar, KAFZ ve DAFZ boyunca bildirilen paleosismolojik çalışmaların sonuçlarıyla uyumludur. 250 yıllık deprem tekrarlanma periyotlarında, deprem büyüklükleri 3,9 (Genç), 4,9 (Adaklı), 4,9 (Solhan), 4,9 (Yedisu), 4,7 (Yayladere), 5,7 (Kiğı) şeklinde değişmektedir. Hesaplanan maksimum deprem büyüklükleri, Bingöl ili ve Karlıova ilçesindeki yapıların diğer ilçelere göre daha dikkatli inşa edilmesi gerektiğini göstermektedir. 10 yıllık bir deprem tekrarlanma periyodu için, tüm ilçelerde deprem büyüklüklerinin 3,6 ve 5,1'e ulaşması, Bingöl'de her on yılda bir hissedilir bir deprem olacağını ortaya koymaktadır. Yedisu ilçesinde 1000 yıllık deprem tekrarlanma periyodu için maksimum deprem büyüklüklerinin daha önce yayınlanmış bulgularla uyumsuz olarak 5,1 M olarak görüldüğünü belirtmek önemlidir. Yedisu'daki deprem sayılarındaki önemli değişim, bölgedeki aktif fayların ve depremselliğin ayrıntılı olarak araştırılmasını gerekli kılmaktadır.

Teşekkür

Şekil 1b'deki eş yükselti eğrilerini ve şehir sınırlarını sağladığı için Kemal Kıranşan'a, değerli eleştirileri ve inceleme sürecindeki yardımları için üç anonim hakeme, Editör Halim Mutlu, Yardımcı Editörler Şule Gürboğa ve Eren Pamuk'a içtenlikle teşekkür ederiz. Kenan Akbayram'ın Bingöl'deki diri fay haritalama ve sismik tehlike analizi çalışmaları 121Y406 numaralı TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmektedir.

Değinen Belgeler

- AFAD (Disaster and Emergency Management Presidency). <http://www.afad.gov.tr>. April 23,2021.
- Akbayram, K., Bayrak, E., Pamuk, E., Özer, Ç., Kıranşan, K., Varolüneş, S., 2022a. Dynamic sub-surface characteristic and the active faults of the Genç District locating over the Bingöl Seismic Gap of the East Anatolian Fault Zone, Eastern Turkey Natural Hazards 114(1) ,825-847.
- Akbayram, K., Kıranşan, K., Özer, Ç., Varolüneş, S., 2021. The surface deformation of the 2020 Doğanyol-Sivrice earthquake (Mw 6.8) and the earlier events suggest Mw<7.0 earthquakes do not create significant surface slip along the East Anatolian Fault Zone(unpublished).
- Akbayram, K., Kıranşan, K., Varolüneş, S., Büyükakpınar, P., Karasözen, E., Bayık, Ç. 2022b. Multi-disciplinary analyses of the rupture characteristic of 2020 June 14 Mw 5.9 Kaynarınar (Karlıova, Bingöl) earthquake reveals NE-SW trending active faulting along the Yedisu Seismic Gap of the North Anatolian Fault Zone towards Turkish-Iranian Plateau. International Journal of Earth Sciences, 1-21.
- Akka, S., Boore, D.M., Gülkan, P. 2008. An evaluation of the strong ground motion recorded during the May 1, 2003 Bingol Turkey, earthquake. Journal of Earthquake Engineering 9, 173-197.
- Alkan, H., Bayrak, E. 2022. Coulomb stress changes and magnitude - frequency distribution for Lake Van region. Bulletin of the Mineral Research and Exploration 168, 141-156.
- Altuncu Poyraz, S., Aksarı, D., Ergün, T., Teoman, U.M., Pınar, A., 2019. The December 2nd, 2015 Bingöl, Eastern Anatolia-TURKEY, earthquake (Mw = 5.3): A rupture on optimally oriented fault plane. Journal of Asian Earthscience 173, 88-97.
- Ambraseys, N. 1970. Some characteristic features of the Anatolian fault zone. Tectonophysics 9, 143-165.
- Ambraseys, N., 1975. Studies in historical seismicity and tectonics. Geodynamics.
- Ambraseys, N., 1989. Temporary seismic quiescence: SE Turkey. Geophysical Journal International 96, 311-331.
- Ambraseys, N., Jackson, J. 1998. Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region. Geophysical Journal International 133, 390-406.

- Anagnos, T., Kiremidjian, A. 1988. A review of earthquake occurrence models for seismic hazard analysis. *Probabilistic Engineering Mechanics* 3, 3–11.
- Arpat, E., Şaroğlu, F. 1972. The East Anatolian Fault System: thoughts on its development. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi* 78, 33–39.
- Bak, P., Christensen, K., Danon, L., Scanlon, T. 2002. Unified scaling law for earthquakes. *Physical Review Letters* 88, 178501.
- Balun, B., Nemutlu, Ö.F., Sarı, A. 2020. Estimation of probabilistic hazard for Bingol province, Turkey. *Earthquakes and Structures* 18(2), 223-231.
- Barka, A., Toksöz, M., Kadinsky-Cade, K., Gülen, L. 1987. The segmentation, seismicity and earthquake potential of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone. *Bulletin of Earth Science* 14, 337–352.
- Campbell, K., Thenhaus, P., Bamhard, T., Hampson, D. 2002. Seismic hazard model for loss estimation and risk management in Taiwan. *Soil Dynamic Earthquake Engineering* 22, 743–754.
- Çetin, H., Güneşli, H., Mayer, L. 2003. Paleoseismology of the Palu-Lake Hazar segment of the East Anatolian fault zone, Turkey. *Tectonophysics* 374, 163-197.
- Çoban, K. H., Sayıl, N, 2020a. Different probabilistic models for earthquake occurrences along the North and East Anatolian fault zones. *Arabian Journal of Geosciences* 13(18), 1-16.
- Çoban, K.H., Sayıl, N, 2020b. Conditional Probabilities of Hellenic Arc Earthquakes Based on Different Distribution Models. *Pure and Applied Geophysics* 177(11), 5133–5145.
- Çobanoğlu, İ., Bozdağ, Ş., Dinçer, İ., Erol, H. 2006. Statistical Approaches to Estimate the Recurrence of Earthquakes in the Eastern Mediterranean Region. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi* 19, 91–100.
- Demirtaş, R. 2019. 12 Mart 2005 (M=5.6), 14 Mart 2005 (M=5.9) ve 24 Mart 2005 (M=5.4) Karlıova (Bingöl) Depremleri, Ankara.
- Dewey, J., Şengör, A. 1979. Aegean and surrounding regions: complex multiplate and continuum tectonics in a convergent zone. *Geological Society America Bulletin* 84–92.
- Duman, T.Y., Emre, Ö. 2013. The East Anatolian Fault: geometry, segmentation and jog characteristics. *Geological Society, London, Special Publications* 495–529.
- Emre, Ö., Duman, T., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş., Şaroğlu, F., 2013. Active Fault Map of Turkey with an Explanatory Text 1:1.250.000 scale, Special Publication Series 30. General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA), Turkey.
- Eyidoğan, H., Güçlü, U., Utku, Z., Değirmenci, E. 1991. Türkiye Büyük Depremleri Makro-Sismik Rehberi (1900–1988). ITU Maden Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Gumbel, E.J. 1941. The Return Period of Flood Flows. *Annals of Mathematical Statistics* 12, 163-190.
- Gürboğa, Ş. 2016. The termination of the North Anatolian Fault System (NAFS) in Eastern Turkey. *International Geological Review* 58, 1557–1567.
- Hagiwara, Y. 1974. Probability of earthquake occurrence as obtained from a Weibull distribution analysis of crustal strain. *Tectonophysics* 23, 313–318.
- Hainzl, S., Scherbaum, F., Beauval, C. 2006. Estimating Background Activity Based on Interevent-Time Distribution. *Bulletin of the Seismological Society of America* 96, 313–320.
- Herece, E. 2008. Atlas of East anatolian fault. MTA Special Publication Series 13.
- Hubert-Ferrari A., Lamair, L., Hage, S., Schmidt, S., Çağatay, M.N., Avşar, U. 2020. A 3800 yr paleoseismic record (Lake Hazar sediments, eastern Turkey): Implications for the East Anatolian Fault Seismic Cycle. *Earth and Planetary Science Letters* 538, 116-152.
- Kalafat, D., Kekovalı, K., Güneş, Y., Yılmaz, M., Kara, M., Deniz, P., Berberoğlu, M. 2009. A catalogue of source parameters of moderate and strong earthquakes for Turkey and its surrounding area (1938–2008). Boğaziçi University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute.
- Kıranşan, K., Akbayram, K., Avci, V. 2021. Effects of Active Tectonism on Geomorphological Structure in Bingöl Basin and Its Surroundings. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Elektronik Dergisi* 12, 1110–1129.
- KOERI (Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute). <http://koeri.boun.edu.tr> May 12, 2022.
- Kottegoda, N.T., Rosso, R. 2008. *Applied Statistics for Civil and Environmental Engineers*, Engineering.
- Köküm, M., Özçelik, F. 2020. An example study on re-evaluation of historical earthquakes: 1789 Palu (Elazığ) earthquake, Eastern Anatolia, Turkey.

- Bulletin of the Mineral Research and Exploration 161, 157-172.
- McKenzie, D. 1972. Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophysics Journal International* 30, 109–185.
- Nalbant, S., McCloskey, J., Steacy, S., Barka, A. 2002. Stress accumulation and increased seismic risk in eastern Turkey. *Earth Planetary Science Letters* 195, 291–298.
- Nishenko, S., Buland, R. 1987. A generic recurrence interval distribution for earthquake forecasting. *Bulletin of the Seismological Society of America* 77, 1382–1399.
- Öztürk, S. 2011. Characteristics of seismic activity in the Western, Central and Eastern parts of the North Anatolian Fault Zone, Turkey: Temporal and spatial analysis. *Acta Geophysica* 59, 209–238.
- Öztürk, S., Bayrak, Y. 2012. Spatial variations of precursory seismic quiescence observed in recent years in the eastern part of Turkey. *Acta Geophysica* 60, 92–118.
- Öztürk, S., Bayrak, Y., Çınar, H., Koravos, G.C., Tsapanos, T.M. 2008. A quantitative appraisal of earthquake hazard parameters computed from Gumbel I method for different regions in and around Turkey. *Natural Hazards* 47 (3), 471–495
- Parvez, I.A., Ram, A. 1999. Probabilistic Assessment of Earthquake Hazards in the Indian Subcontinent. *Pure and Applied Geophysics* 154, 23–40.
- Pasari, S., Dikshit, O. 2015. Earthquake interevent time distribution in Kachchh, Northwestern India. *Earth Planet and Space* 67, 1-17.
- Pasari, S., Dikshit, O. 2018. Stochastic earthquake interevent time modeling from exponentiated Weibull distributions. *Natural Hazards* 90, 823–842.
- Polat, O., Gök, E., Yılmaz, D. 2008. Earthquake hazard of Aegean Extension Region, Turkey. *Turkish Journal of Earth Science* 17, 593–614.
- Rikitake, T. 1974. Probability of earthquake occurrence as estimated from crustal strain. *Tectonophysics* 23, 299–312.
- Sançar, T., Zabcı, C., Akyüz, H., Karabacak, V., Altunel, E. 2009. Late Holocene Activity of Kargapazari Segment, Eastern Part of the North Anatolian Fault Zone, Bingöl, Turkey. *EGU General Assembly, Vienna, 7710.*
- Sançar, T., Zabcı, C., Akyüz, H., Sunal, G., Villa, I. 2015. Distributed transpressive continental deformation: The Varto Fault Zone, eastern Turkey. *Tectonophysics* 661, 99–111. <https://doi.org/10.1016/J.TECTO.2015.08.018>
- Sançar, T., Zabcı, C., Akcar, N., Karabacak, V., Yeşilyurt, S., Yazıcı, M., Akyüz, H., Öztüfekçi Önal, A., Ivy-Ochs, S., Christl, M., Vockenhuber, C. 2020. Geodynamic importance of the strike-slip faults at the eastern part of the Anatolian Scholle: Inferences from the uplift and slip rate of the Malatya Fault. *Journal of Asian Earth Science* 188, 104091.
- Selçuk, A., Erturaç, M., Karabacak, V., Sançar, T., Kul, A., Yavuz, M. 2021. Active Tectonic Setting and Paleoseismicity of the Sancak-Uzunpazar Fault Zone. *Turkish Journal of Earthquake Research* 3, 75–91.
- Şahin, Ş., Öksüm, E. 2021. The relation of seismic velocity and attenuation pattern in the East Anatolian fault zone with earthquake occurrence: Example of January 24, 2020 Sivrice Earthquake. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 165, 141-161.
- Şengör, A., 1979. The North Anatolian transform fault: its age, offset and tectonic significance. *Journal of Geological Society of London* 136, 269–282.
- Şengör, A. 1980. Türkiye neotektoniğinin esasları. *Türkiye Jeoloji Kurumu Konferans Serisi 2. Ankara*, 40.
- Şengör, A., Görür, N., Şaroğlu, F. 1985. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study, in: Biddle, K., Christie-Blick, N. (Eds.), *Strike-Slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, OK, 227–264.
- Seyitoğlu, G., Esat, K., Kaypak, B., Moosarreja, T., Bahadır, A. 2019. Internal Deformation of Turkish-Iranian Plateau in the Hinterland of Bitlis-Zagros Suture Zone, Saein, A. (Ed.). *Developments in Structural Geology and Tectonics* 3, 161–244.
- Shelly, D., Beroza, G., Ide, S. 2007. Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms. *Nature* 446, 305–307.
- Tan, O., Pabucu, Z., Tapırdamaz, M.C., Nan, S., Ergintav, S., Eyidoğan, H., Aksoy, E., Kuluöztürk, F. 2011. Aftershock study and seismotectonic implications of the 8 March 2010 Kovancilar (Elazığ, Turkey) earthquake (MW = 6.1). *Geophysics Research Letters* 38.
- Tan, O., Tapırdamaz, M., Yörük, A. 2008. The Earthquake Catalogues for Turkey. *Turkish Journal Earth Science* 17, 405–418.

- Taymaz, T., Eyidoğan, H., Jackson, J. 1991. Source parameters of large earthquakes in the East Anatolian Fault Zone (Turkey). *Geophysics Journal International* 106, 537–550.
- Ulusay, R., Aydan, Ö. 2005. Characteristics and ge-engineering aspects of the 2003 Bingöl (Turkey) earthquake. *Journal of Geodynamics* 40, 334–346.
- USGS (United States Geological Survey). <http://usgs.gov>. June,2022.
- Utkucu, M., Budakođlu, E., Çabuk, M. 2018. Teleseismic finite-fault inversion of two $M_w = 6.4$ earthquakes along the East Anatolian Fault Zone in Turkey: the 1998 Adana and 2003 Bingöl earthquakes. *Arabian Journal of Geoscience* 11, 1–14.
- Utsu, T. 1984. Estimation of parameters for recurrence models of earthquakes. *Bulletin of Earthquake Research Institute* 59, 53–55.
- Wu, C., Shelly, D., Gomberg, J., Peng, Z., Johnson, P. 2013. Long-term changes of earthquake inter-event times and low-frequency earthquake recurrence in central California. *Earth Planetary Science Letters* 368, 144–150.
- Yadav, R., Tripathi, J., Rastogi, B., Das, M., Chopra, 2010. Probabilistic assessment of earthquake recurrence in northeast India and adjoining regions. *Pure Applied Geophysics* 167, 1331–1342.
- Zabcı, C., Akyüz, H.S., Sançar, T. 2017. Palaeoseismic history of the eastern part of the North Anatolian Fault (Erzincan, Turkey): Implications for the seismicity of the Yedisu seismic gap. *Journal of Seismology* 21, 1407–1425.