



TÜRKİYE, BATI ANADOLU DEPREMLERİ İÇİN BÜYÜKLÜK-FREKANS İLİŞKİSİNİN İSTATİSTİKSEL ANALİZİ

(STATISTICAL ANALYSIS OF MAGNITUDE-FREQUENCY RELATIONSHIP FOR THE EARTHQUAKES IN WESTERN ANATOLIA, TURKEY)

Nihal AKYOL*, Fatih PALAS*, Petek SINDIRGI*

ÖZET/ABSTRACT

Bu çalışmanın amacı, 36.8°-39.8° K enlemleri ve 26°-30° D boylamları arasında kalan Batı Anadolu Bölgesi'nde meydana gelmiş depremler için büyüklük-frekans ilişkisinin istatistiksel analizini yapmaktır. Çalışmada kullanılan aletsel döneme ait deprem verileri Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü tarafından verilmekte olan iki farklı katalogdan elde edilmiştir. Bunlar Bütünleştirilmiş Homojenize Türkiye Deprem Kataloğu (BHTDK) ve Türkiye ve Çevresi Deprem Kataloğu (TÇDK) olarak tanımlanmaktadır. BHTDK'da verilen büyüklükler M_s , M_d , M_b , M_L ve M_w cinsindedir. Bu büyüklük bilgilerini kullanarak geliştirilen deneysel bağıntılar sayesinde, TÇDK deprem büyüklüklerinin tamamı M_d 'ye dönüştürülmüştür. Her iki katalog verisine Gutenberg-Richter eşitliği uygulanarak, deprem tehlikesi tespit edilmiştir. Daha sonra, her yıla ait bir maksimum değer ile karakterize olunan, Maksimum Değerler Yöntemi için; Üstel, Normal, Log-Normal ve Gumbel Dağılımlarının uygunluğu araştırılmıştır. Maksimum Değerler Yöntemi için, büyüklük-frekans ilişkisini en iyi ifade eden olasılık dağılımı, Normal Dağılımdır. Elde edilen Normal dağılım parametreleri kullanılarak hesaplanan, magnitudü $M_d=6.5$ değerine eşit veya daha büyük bir depremin yinelenme periyodu; BHTDK verilerine göre 54,64 yıl ve TÇDK verilerine göre ise 53,88 yıldır. Elde ettiğimiz gerek deprem sayısı-magnitud ilişkileri, gerekse yinelenme periyodu ve olma olasılıkları; sonuçların istatistiksel analiz girdi verisi olarak seçilen magnitud skalasına oldukça duyarlı olduğunu göstermektedir.

Aim of this study is statistical analysis of magnitude-frequency relationship for the earthquakes in western Anatolia, a region between 36.8°-39.8° N and 26°-30° E. Earthquake data used in the analysis were obtained from two different catalogs reported by Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute of Bosphorus University. These were described as the Integrated Homogenize Turkish Earthquake Catalog (IHTEC) and the Catalog for Turkey and Surrounding Areas (TEEC). Magnitude scales reported in IHTEC are M_s , M_d , M_b , M_L and M_w . Utilizing these information and obtained empirical relationships between different magnitude scales, all magnitude values in TEEC were converted to M_d values. Seismic hazard were evaluated by applying Gutenberg-Richter Relationship to both catalogs' data. After that, for the Maximum Values Method, which is characterized by the largest amplitude value for each year, fitness of the Exponansiyel, Normal, Log-Normal and Gumbel Distributions were examined. Probability distribution which represents the best fit for this method is Normal Distribution. Utilizing the obtained Normal Distribution parameters to the data of IHTEC and TEEC, return periods of the earthquake with a magnitude values equal and greater than $M_d = 6.5$ are 54.64 and 53.88 years, respectively. Obtained not only magnitude-frequency relationships and also exceedance probabilities and return periods have shown that the results are very sensitive to magnitude scale chosen as input data for statistical analysis.

ANAHTAR KELİMELER/KEYWORDS

Sismik tehlike, Depremsellik, Gutenberg-Richter eşitliği, Maksimum değerler yöntemi, Batı Anadolu, Türkiye
Seismic hazard, Seismicity, Gutenberg-Richter equation, Maximum values method, Western Anatolia, Turkey

* DEÜ, Müh. Fak., Jeofizik Müh. Bölümü, Tınaztepe Yerleşkesi, Buca, İZMİR

1. GİRİŞ

Bilindiği gibi Anadolu yarımadası Alp-Himalaya kuşağı diye adlandırılan Avrasya ve Afrika plakaları arasındaki büyük kompresyonel kuşağın bir parçasıdır. Kıta içi gerilme rejiminin en iyi örneklerden biri olan Batı Anadolu’da, mühendislik uygulamaları için gerekli sismik tehlike çalışmalarının önemi gün geçtikçe artmaktadır.

Batı Anadolu Bölgesi deprem tehlikesini incelemek için pek çok istatistiksel çalışma gerçekleştirilmiştir (Becerik, 1991; Papazachos, 1990; Öncel ve Wilson, 2004; Sayıl ve Osmanşahin, 2007; Polat vd., 2008; Firuzan, 2008; Kahraman vd., 2008). Polat vd; Fraktal davranışı, sismik hareketsizlik ve Gutenberg-Richter b-parametrelerini kullanarak, Batı Türkiye depremlerini incelemişler ve bölge için hasar yapıcı olası bir depremin büyüklüğünü $M_s=6.5$ olarak tahmin etmişlerdir (Polat vd., 2008). Buradan hareketle küçük-orta ölçekli depremlerden açığa çıkan enerji nedeniyle, söz konusu alanda büyük depremlerin genellikle beklenmemesi gerektiğini önermektedirler.

Firuzan; Batı Anadolu’ya istatistiksel frekans analizini uygulamak için 36.50° – 40° K ve 26.00° – 30.00° D koordinatları arasında kalan bölgeyi seçerek, çalışma alanı sekiz alana ayırarak incelemiştir (Firuzan, 2008). Deprem verilerini, belirli bir büyüklüğünü aşan ani çıkışlar ve belirli bir bölgede meydana gelen yıllık maksimum deprem şiddetleri ya da büyüklükleri olmak üzere iki şekilde ifade etmiştir ve sekiz ayrı alan için deprem aşılma olasılıklarını ve yineleme periyotlarını hesaplanmıştır. Elde ettiği magnitüd-frekans ilişkisinde hesaplanan b değerleri 0.40 – 0.76 aralığındadır.

Kahraman vd., Anadolu için 37° – 40° K ve 26° – 30° D koordinatları arasında kalan bölgeyi seçerek, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü katalog verilerinden hareketle, Gutenberg-Richter eşitliğini kullanarak, bölge depremleri için istatistiksel analiz yapmışlardır (Kahraman vd., 2008). Çalışmalarında; En Büyük Olabilirlik Yönteminin ve bölge depremlerinin tarihsel depremleri içerek şekilde incelenmesinin daha uygun olduğunu önermektedirler.

Bu çalışmada ilk olarak; aletsel döneme ait iki farklı katalog verisine Gutenberg-Richter eşitliği (üstel dağılım) uygulanarak, bölge için deprem tehlikesi tespit edilmiştir. Daha sonra; her yıla ait maksimum magnitüd değeri ile karakterize olunan Maksimum Değerler Yöntemi için; farklı olasılık fonksiyonlarının verilerimize uyumu incelendikten sonra, frekans-büyüklik ilişkisini en iyi ifade eden olasılık dağılımının Normal Dağılım olduğuna karar verilerek, buna bağlı değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir.

2. KULANILAN YÖNTEMLER VE VERİ SETİ

Gutenberg ve Richter’e göre, magnitüd ve deprem sayısı arasındaki ilişki (Gutenberg ve Richter, 1958):

$$\text{Log}(N) = a - bM \quad (1)$$

şeklinde verilmektedir. Burada;

M: Gözlenen magnitüd,

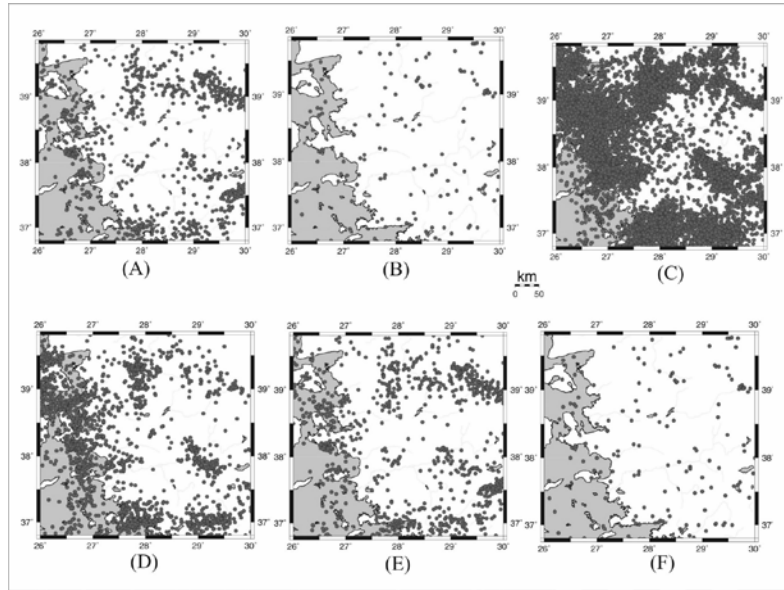
N: Magnitüdü M’ e eşit veya daha büyük olan birim zamandaki deprem sayısıdır.

$\text{Log}(N)$ ve M değerleri arasında lineer ilişki incelenerek, a ve b katsayılarına ulaşılır. “a” bölgede oluşan toplam deprem sayısına ve “b” ise; deprem magnitüdülerinin beklentisinin tersine bağlı parametrelerdir.

Bu çalışmada, Batı Anadolu bölgesinin depremselliğini incelemek amacıyla, 36.8° – 39.8° K enlemleri ve 26° – 30° D boylamları arasında kalan bölge, sismotektonik bölge olarak

seçilmiştir. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü tarafından verilen ve aletsel dönem verilerini içeren, iki farklı katalog kullanılmıştır. Bu kataloglar; BHTDK ve TÇDK olarak tanımlanmaktadır. İnceleme alanımız için, BHTDK 1900-2005 yılları arası, 1087 adet veri ve TÇDK 1900-2008 yılları arasında, 12498 adet veri içermektedir. TÇDK'daki magnitüd alt sınırı 3.0 iken BHTDK'da bu alt sınır 4.0'tür. BHTDK'da verilen büyüklükler M_L , M_d , M_s , M_b ve M_w cinsindedir. BHTDK ve TÇDK'dan elde edilen verilerin dağılımı Şekil 1'de görülmektedir. Bu şekillerde; depremler süreye bağlı büyüklüklerine göre sınıflandırılmıştır. BHTDK'na göre, magnitüdüleri $4.0 \leq M < 5.0$ olan depremler, Şekil 1a'da ve $5.0 \leq M$ olanlar ise Şekil 1b'de verilmektedir. TÇDK'ya göre ise Magnitüdüleri $3.0 \leq M < 3.5$ olan depremler Şekil 1c'de, $4.0 \leq M < 5.0$ olanlar Şekil 1d'de, $3.5 \leq M < 4.0$ olan depremler Şekil 1e'de ve $5.0 \leq M$ olanlar ise Şekil 1f'de verilmektedir.

TÇDK'da rapor edilmekte olan deprem büyüklükleri farklı magnitüd skalalarındadır. TÇDK'daki büyüklük bilgilerinin % 95'i M_d , % 7'si M_L ve kalan % 3'ü ise M_w , M_s , M_b olarak verilmektedir. Bu çalışmada, BHTDK verileri kullanılarak, farklı büyüklük skalaları arasındaki doğrusal ilişki tespit edilmiştir (Çizelge 1). Daha sonra bu ilişkiler yardımıyla; TÇDK'da M_d değerleri verilmeyen depremlerin M_d değerleri hesaplanmıştır. Rapor edilmekte olan büyüklük skalası olarak, en büyük yüzde M_d ye ait olduğu için, depremlere ait büyüklükler M_d skalasına dönüştürülmüştür.



Şekil 1. Batı Anadolu için; (a) BHTDK'ya göre $4.0 \leq M < 5.0$ olan, (b) BHTDK'ya göre $5.0 \leq M$ olan, (c) TÇDK'ya göre $3.0 \leq M < 3.5$ olan, (d) TÇDK'ya göre $3.5 \leq M < 4.0$ olan, (e) TÇDK'ya göre $4.0 \leq M < 5.0$ olan, (f) TÇDK'ya göre $5.0 \leq M$ olan depremlerin harita üzerine gösterimi

Daha sonra; iki farklı katalog verisine, her yıla ait bir maksimum değer ile karakterize olunan, Maksimum Değerler Yöntemi uygulanmıştır. Richter; hidrojeolojide taşkın analizinde kullanılan Maksimum Değerler Yönteminin, Nordquist tarafından deprem magnitüdülerine uygulandığını belirtmiştir (Richter, 1958; Nordquist, 1945). Maksimum Değerler Yönteminin uygulanmasında olasılık $Pr(M \geq m)$ ve yineleme periyodunu veren birçok ampirik formül önerilmiştir (Çizelge 2). Ancak Chow, Weibull ampirik formülünün doğayı diğerlerine göre daha iyi temsil ettiğini belirttiği için bu çalışmada, Weibull ampirik bağıntısı kullanılmıştır (Chow, 1964). BHTDK ve TÇDK verilerine ait maksimum magnitüd değerlerinin yıllara göre

dağılımı Şekil 2’de verilmektedir. İki farklı katalog yıllık maksimum değerlerine ait temel istatistik parametreler, Çizelge 3’de verilmektedir.

Çizelge 1. M_L , M_s , M_b , M_d ve M_w büyüklükleri arasında, en küçük kareler (EKK) ile belirlenen ampirik ilişkiler (S: Standart sapmayı ve R: İlişki katsayısını ifade etmektedir)

Bağımlı değişken	Magnitüd skalaları arasındaki ampirik ilişkiler	S	R
M_b	$M_L=1.008*M_b-0.068$	0.158	0.940
	$M_s=1.399*M_b-1.959$	0.108	0.984
	$M_d=1.009*M_b-0.078$	0.129	0.959
	$M_w=1.125*M_b-0.411$	0.075	0.977
M_d	$M_L=0.958*M_d+0.191$	0.157	0.941
	$M_s=1.308*M_d-1.504$	0.023	0.969
	$M_b=0.911*M_d+0.435$	0.123	0.929
	$M_w=1.041*M_d+0.002$	0.132	0.963
M_L	$M_s=1.248*M_L-1.238$	0.207	0.941
	$M_d=0.924*M_L+0.337$	0.154	0.941
	$M_b=0.877*M_L+0.583$	0.147	0.940
	$M_w=0.994*M_L+0.208$	0.172	0.937
M_s	$M_L=0.710*M_s+1.389$	0.156	0.941
	$M_d=0.718*M_s+1.351$	0.112	0.969
	$M_b=0.693*M_s+1.497$	0.076	0.984
	$M_w=0.792*M_s+1.217$	0.074	0.989
M_w	$M_L=0.883*M_w+0.364$	0.162	0.937
	$M_s=1.235*M_w-1.405$	0.092	0.989
	$M_d=0.891*M_w+0.320$	0.122	0.963
	$M_b=0.868*M_w+0.462$	0.065	0.988

Çizelge 2. Maksimum Değerler Yönteminin uygulamasında kullanılan ampirik formüller (Chow, 1964)

FORMÜL ADI	TARİH	T veya $1/Pr(M \geq m)$
California	1923	N/k
Hazan	1930	$2N/(2k-1)$
Weibull	1939	$(N+1)/k$
Beard	1943	1
Chegodayev	1955	$(N+0.4)/(k-0.3)$
Bloom	1958	$(N+1/4)/(k-3/8)$
Tukey	1962	$(3N+1)/(3k-1)$
Gringorten	1963	$(N+0.12)/(k-0.44)$

3. UYGULAMA VE SONUÇLAR

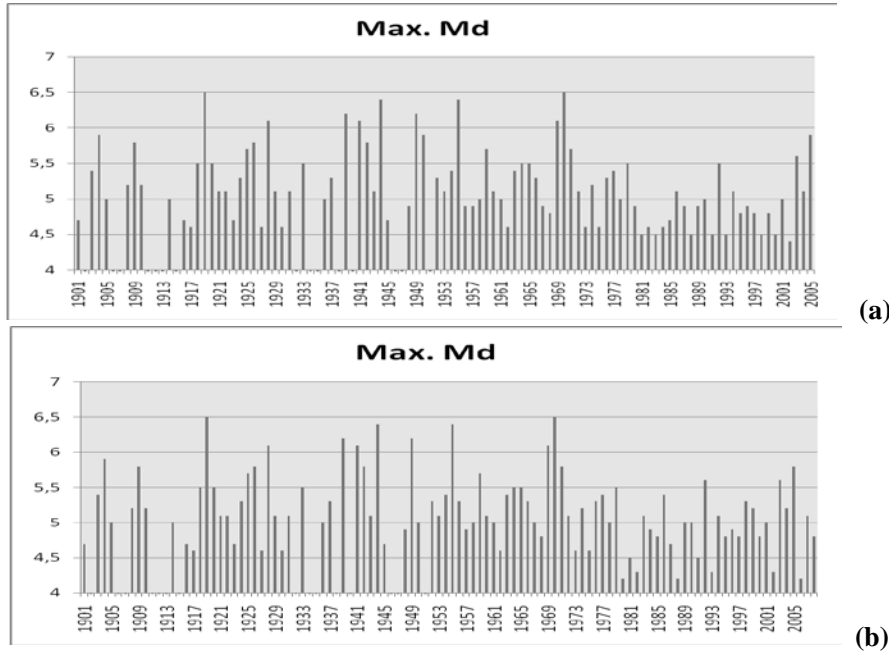
3.1. Gutenberg-Richter Yönteminin Uygulanması

BHTDK ve TÇDK verileri için magnitüd değerlerine göre hazırlanan, deprem sayılarının sınıflandırılmış hali Çizelge 4’de görülmektedir. Bu tablodaki N_i değerleri; verilen magnitüd değerlerine eşit veya daha büyük magnitüdü deprem sayısını göstermektedir. Bu veriler için temel istatistik değerleri Çizelge 5’de verilmektedir.

Çizelge 3. TÇDK ve BHTDK yıllık maksimum verilerinin temel istatistikleri

	TÇDK için	BHTDK için
X	5.2	5.2
S	0.065	0.074
S/\sqrt{N}	0.029	0.032

Bu çizelgede; **X**: verilerinin örnekleme beklentisi, verilerin aritmetik ortalaması, **S**: verilerin örnekleme standart sapması, S/\sqrt{N} verilerden hesaplanan örnekleme beklentisinin standart sapmasıdır (aritmetik ortalamının standart sapmasıdır).



Şekil 2. Maksimum deprem büyüklüklerinin yıllara göre dağılımı; (a) BHTDK'ya ait, (b) TÇDK'ya ait M_d verilerinden yararlanılarak elde edilen dağılım

BHTDK ve TÇDK verileri için $\log(N)=a-bM$ Gutenberg-Richter bağıntısına göre üstel dağılım uygulanırken; Çizelge 3'deki N_t değerleri, gözlem süresi olan 105 ve 108'e bölünerek $\log(N)$ ve M değerleri arasında EKK yaklaşımı uygulanmıştır (Şekil 3). Elde edilen a ve b parametreleri ve R korelasyon katsayıları Çizelge 5'de verilmektedir.

Gelecek depremler için, yineleme periyodu (T);

$$T=1/\lambda \text{ bağıntısından hesaplanabilir.} \quad (2)$$

burada $\lambda=\Pr(M\geq m)$; magnitüdü belli bir m (magnitüd) değerine eşit veya daha büyük bir depremin yıllık olma olasılığıdır. Verilen bir magnitüde eşit veya daha büyük bir depremin, belirli bir süreç içerisinde (T_e) olma olasılığı ise; aşağıdaki şekilde tahmin edilebilir (Cornell, 1968; Freud, 1992; Naeim ve Kelly, 1999).

$$\Pr(M\geq m)_e= 1-\exp(-\lambda.T_e) \quad (3)$$

BHTDK ve TÇDK verileri için belli bir M magnitüdüne eşit veya daha büyük depremlerin Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanan yineleme periyotları Çizelge 6'da verilmektedir. BHTDK ve

TÇDK verileri için, Eşitlik 3 kullanılarak elde edilen, bir M magnitudüne eşit veya daha büyük depremlerin belirli süreçlerde olma olasılıkları, sırasıyla, Çizelge 7 ve 8'de verilmektedir.

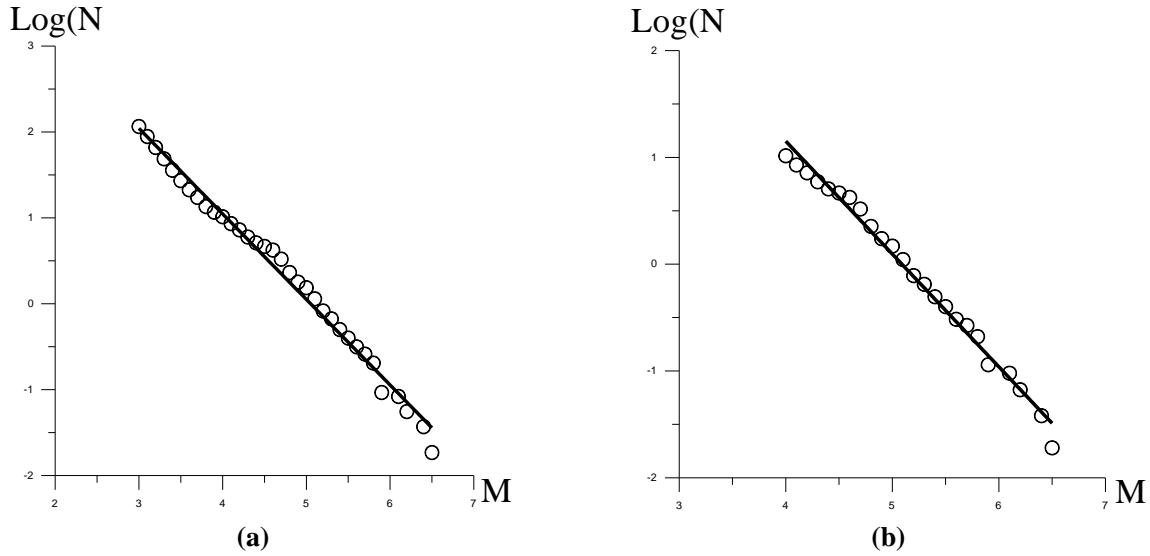
BHTDK verileri için magnitud değerleri 5 farklı skalada verilmektedir. Bu çalışmada TÇDK ve BHTDK verilerinden elde edilen istatistiksel sonuçları karşılaştırabilmek amacıyla, ilk olarak her iki katalog için M_d büyüklükleri kullanılarak, Gutenberg-Richter Yöntemi uygulanmıştır. BHTDK için diğer 4 magnitud skalası (M_L , M_s , M_b , M_w) için de $\text{Log}(N)=a-bM$ eşitliği hesaplanmıştır. BHTDK verilerinin farklı magnitud skalalarına göre temel istatistikleri Çizelge 9'da verilmektedir. Her bir magnitud skalası için elde edilen a ve b katsayıları, standart hataları ile birlikte aynı çizelgede yer almaktadır.

Çizelge 4. TÇDK ve BHTDK verilerine göre magnitudü verilen bir m değerine eşit veya daha büyük deprem sayıları

M	N_t (TÇDK için)	N_t (BHTDK için)	M	N_t (TÇDK için)	N_t (BHTDK için)
6.5	2	2	4.7	357	345
6.4	4	4	4.6	455	443
6.3	4	7	4.5	502	487
6.2	6	7	4.4	552	532
6.1	9	10	4.3	646	620
6.0	9	10	4.2	782	752
5.9	10	12	4.1	925	891
5.8	22	22	4.0	1111	1087
5.7	28	28	3.9	1256	-
5.6	34	32	3.8	1462	-
5.5	43	42	3.7	1866	-
5.4	54	52	3.6	2292	-
5.3	72	68	3.5	2927	-
5.2	89	82	3.4	3867	-
5.1	123	116	3.3	5254	-
5.0	166	155	3.2	7116	-
4.9	193	182	3.1	9546	-
4.8	249	237	3.0	12498	-

Çizelge 5. M_d büyüklüğü için TÇDK ve BHTDK verilerinin temel istatistikleri ve hesaplanan a, b katsayıları.(Parantez içinde katsayılara ait standart hatalar verilmektedir. R: ilişki katsayısıdır. Diğer parametreler Çizelge 3'de tanımlandığı şekildedir)

	TÇDK için	BHTDK için
X	3.3	4.5
S	0.1068	0.0848
S/\sqrt{N}	0.0001	0.0026
a	5.0297 (±0.087)	5.3781 (±0.124)
b	-0.9960 (±0.018)	-1.0566 (±0.024)
R	0.99473	0.99453



Şekil 3. EKK ile elde edilen doğrusal ilişki; (a) TÇDK ve (b) BHTDK için M ve Log(N) parametreleri arasındaki ilişki

Çizelge 6. TÇDK ve BHTDK'nın verileri için Gutenberg-Richter parametreleri kullanılarak hesaplanan, belli bir M magnitüd değerine eşit veya büyük magnitüd değerleri depremlerin yıl olarak yineleme periyotları

M	T (yıl) TÇDK için	T (yıl) BHTDK için
6.5	54	52.50
6.4	27	26.25
6.3	-	-
6.2	18	15.00
6.1	12	10.50
6.0	-	-
5.9	10.80	8.75
5.8	4.91	4.77
5.7	3.86	3.75
5.6	3.18	3.28
5.5	2.51	2.50
5.4	2.00	2.02
5.3	1.50	1.54
5.2	1.21	1.28
5.1	0.88	0.91
5.0	0.65	0.68
4.9	0.56	0.58
4.8	0.43	0.44

M	T (yıl) TÇDK için	T (yıl) BHTDK için
4.7	0.30	0.30
4.6	0.24	0.24
4.5	0.22	0.22
4.4	0.20	0.20
4.3	0.17	0.17
4.2	0.14	0.14
4.1	0.12	0.12
4.0	0.10	0.10
3.9	0.09	-
3.8	0.07	-
3.7	0.06	-
3.6	0.05	-
3.5	0.04	-
3.4	0.03	-
3.3	0.02	-
3.2	0.02	-
3.1	0.01	-
3.0	0.01	-

3.2. Maksimum Değerler Yönteminin Uygulanması

Bu bölümde ilk olarak BHTDK ve TÇDK magnitüd verileri için; Weibull formülü kullanılarak hesaplanan $Pr(M \geq m)$ değerleri yarı logaritmik kağıda işlenmiş ve sonuç BHTDK ve TÇDK maksimumları için Şekil 4'de verilmiştir. Bu şekillerden açıkça görüldüğü gibi, Üstel Dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonu maksimum magnitüd verilerine uygun değildir. Bu nedenle, bu çalışmada, maksimum magnitüd verilerinin başka olasılık dağılımlarıyla uygunluğu araştırılmıştır. Bu amaçla, BHTDK ve TÇDK magnitüdü için, Weibull formülüyle hesaplanmış $Pr(M \leq m)$ değerleri, Gumbel, Normal ve Log Normal olasılık

kağıtlarına işaretlenen veriler sırasıyla Şekil 5, 6 ve 7'de verilmektedir. Bu şekillerden doğruya en yakın olanı maksimum değer verilerini en iyi şekilde karakterize eden olasılık yoğunluk fonksiyonunu göstermektedir. Bu şekiller incelendiğinde doğruya en yakın olanının Normal dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonu olduğuna karar verilmiştir. Log Normal olasılık yoğunluk fonksiyonu da doğruya yakın görünmesine karşın; bu olasılık yoğunluk fonksiyonun çiziminde kullanılan düşey eksen aralıklarının çok küçük olmasının yanıltıcı olduğu ve bunun hatalara neden olabileceği düşünülmüştür.

Çizelge 7. BHTDK'ya göre, belli bir süre içerisinde, magnitudü belli bir m değerine eşit veya daha büyük depremlerin olma olasılıkları

M	1 yılda	10 yılda	20 yılda	30 yılda	40 yılda	50 yılda	75 yılda	100 yılda
6.5	0.02	0.17	0.32	0.44	0.53	0.61	0.76	0.85
6.4	0.04	0.32	0.53	0.68	0.78	0.85	0.94	0.98
6.2	0.06	0.49	0.74	0.86	0.93	0.96	0.99	1
6.1	0.09	0.61	0.85	0.94	0.98	0.99	1	1
5.9	0.11	0.68	0.90	0.97	0.99	1	1	1
5.8	0.19	0.88	0.98	1	1	1	1	1
5.7	0.23	0.93	1	1	1	1	1	1
5.6	0.26	0.95	1	1	1	1	1	1
5.5	0.33	0.98	1	1	1	1	1	1
5.4	0.39	0.99	1	1	1	1	1	1
5.3	0.48	1	1	1	1	1	1	1
5.2	0.54	1	1	1	1	1	1	1
5.1	0.67	1	1	1	1	1	1	1
5.0	0.77	1	1	1	1	1	1	1
4.9	0.82	1	1	1	1	1	1	1
4.8	0.90	1	1	1	1	1	1	1
4.7	0.96	1	1	1	1	1	1	1
4.6	0.99	1	1	1	1	1	1	1
4.5	0.99	1	1	1	1	1	1	1

Normal Dağılım için, maksimum magnitudü ve $\Pr(M \leq m)$ değerleri arasında EKK yaklaşımı uygulanmıştır. Bu çalışmada maksimum magnitudü verisi bulunmayan yıllara ait veri eksikliği göz ardı edilerek gözlem süreleri yine BHTDK için 105 yıl, TÇDK için 108 yıl olarak alınmış ve bu eksik veriler hesaplama işlemlerine katılmamışlardır.

3.2.1. Normal Dağılım için EKK Yaklaşımının Uygulanması

Standartlaştırma z rastgele değişkeni;

$$z = \frac{M - \mu}{\sigma} \quad \text{yani} \quad M = \mu - \sigma z \quad (4)$$

olmak üzere, Normal Dağılımın matematiksel ifadesi:

$$\Pr(X < x) = \Pr(Z \leq z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{1}{2}z^2} dz \quad (5)$$

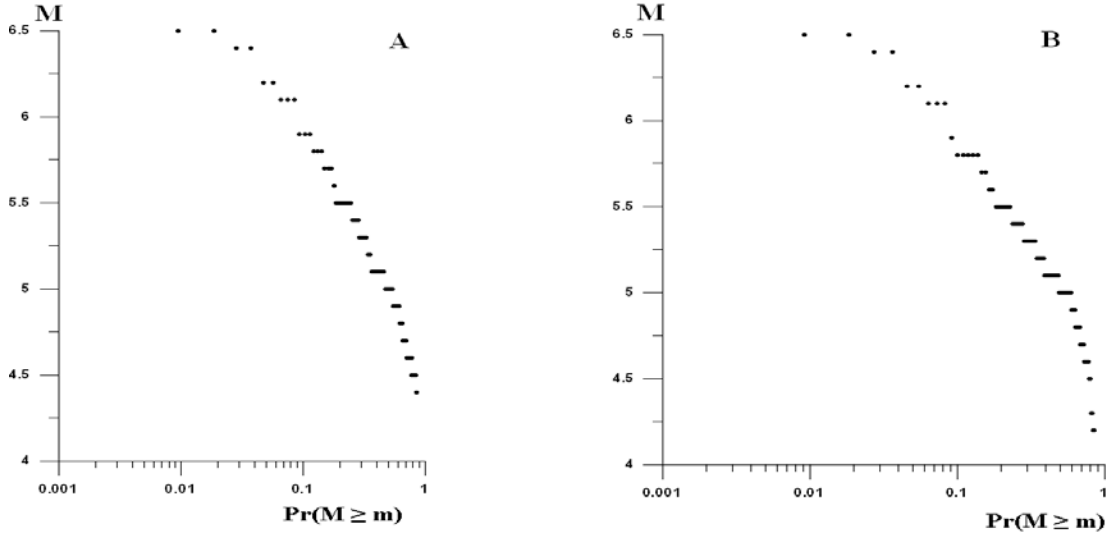
şekline dönüşür. Burada; $\mu(z) = 0$ ve $\sigma(z) = 1$ dir.

Çizelge 8. TÇDK'ya göre, belli bir süre içerisinde, magnitudü belli bir m değerine eşit veya daha büyük depremlerin olma olasılıkları.

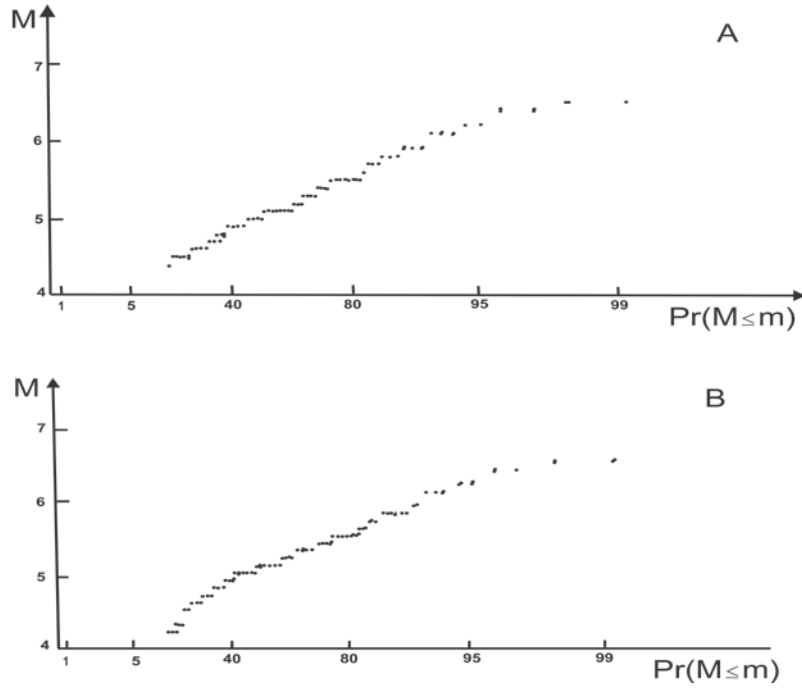
M	1 yılda	10 yılda	20 yılda	30 yılda	40 yılda	50 yılda	75 yılda	100 yılda
6.5	0.02	0.17	0.31	0.43	0.52	0.60	0.75	0.84
6.4	0.04	0.31	0.52	0.67	0.77	0.84	0.94	0.98
6.2	0.05	0.43	0.67	0.81	0.89	0.94	0.98	1
6.1	0.08	0.57	0.81	0.92	0.96	0.98	1	1
5.9	0.09	0.60	0.84	0.94	0.98	0.99	1	1
5.8	0.18	0.87	0.98	1	1	1	1	1
5.7	0.23	0.93	0.99	1	1	1	1	1
5.6	0.27	0.96	1	1	1	1	1	1
5.5	0.33	0.98	1	1	1	1	1	1
5.4	0.39	0.99	1	1	1	1	1	1
5.3	0.49	1	1	1	1	1	1	1
5.2	0.56	1	1	1	1	1	1	1
5.1	0.68	1	1	1	1	1	1	1
5.0	0.78	1	1	1	1	1	1	1
4.9	0.83	1	1	1	1	1	1	1
4.8	0.90	1	1	1	1	1	1	1
4.7	0.96	1	1	1	1	1	1	1
4.6	0.99	1	1	1	1	1	1	1
4.5	0.99	1	1	1	1	1	1	1

Çizelge 9. BHTDK verilerinin farklı magnitud skalalarına göre temel istatistikleri ve farklı magnitud skalaları için hesaplanan a, b katsayıları. Parantez içinde katsayılara ait standart hatalar verilmektedir (R: ilişki katsayısıdır. Diğer parametreler Çizelge 3'de tanımlandığı şekildedir)

	M_L	M_d	M_s	M_b	M_w
X	4.5	4.5	4.3	4.5	4.7
S	0.0984	0.0848	0.1053	0.1383	0.1787
S/\sqrt{N}	0.0464	0.0026	0.0508	0.0652	0.0822
a	5,2409 (± 0.118)	5.3781 (± 0.124)	4,1290 (± 0.104)	5.9707 (± 0.208)	5.6144 (± 0.234)
b	-1.0315 (± 0.022)	-1.0566 (± 0.024)	-0.8055 (± 0.020)	-1.1790 (± 0.040)	-1.0692 (± 0.044)
R	0.9943	0.9945	0.9914	0.9876	0.9797



Şekil 4. (a) BHTDK ve (b) TÇDK'ya ait maksimum magnitüd verilerinin, Weibull formülüne göre hesaplanan $\Pr(M \geq m)$ değerlerinin üstel dağılım olasılık kağıdında gösterimi



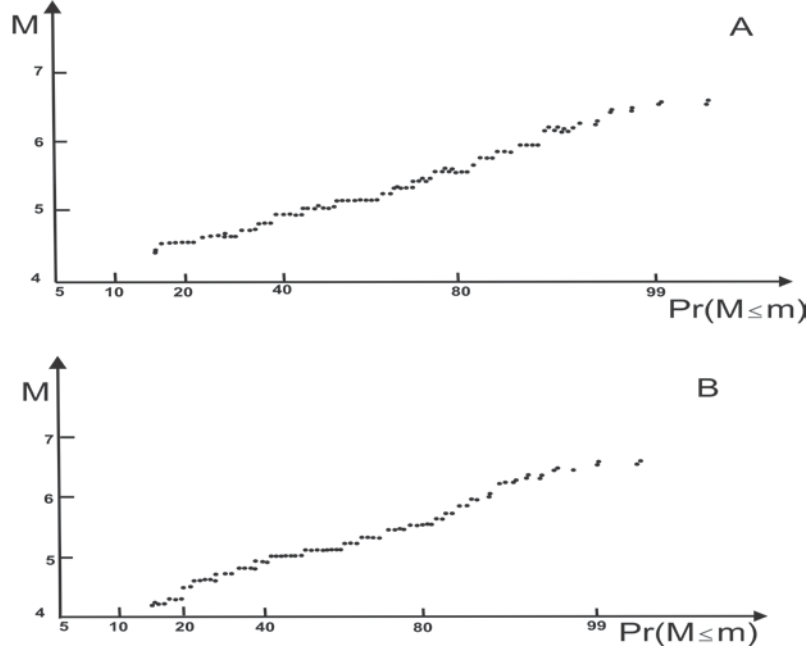
Şekil 5. (a) BHTDK ve (b) TÇDK'ya ait maksimum magnitüd verilerinin, Weibull formülüne göre hesaplanan $\Pr(M \leq m)$ değerlerinin Gumbel Dağılımı olasılık kağıdında gösterimi

Eşitlik 4'teki M ; Gözlenen magnitüd değerini, z ise $\Pr(M \geq m)$ değerlerine göre hesaplanan normal standart değişkeni ifade etmektedir. z standart normal değişkenin hesaplanmasında tarafından verilen aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır (Abramowitz and Stegun, 1970).

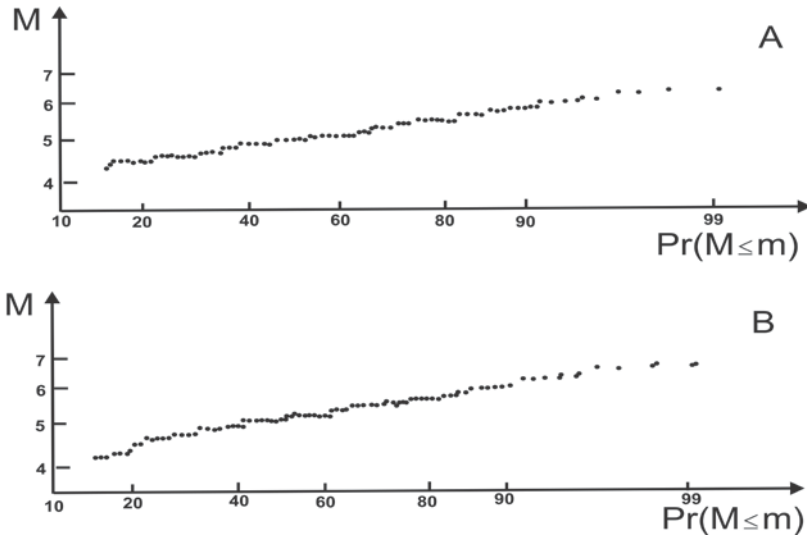
$$z = t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} + e(p) \quad (6)$$

Burada:

$$t = \sqrt{\ln \frac{1}{p^2}} = \sqrt{-2 \ln p} \quad (7)$$



Şekil 6. (a) BHTDK ve (b) TÇDK'ya ait maksimum magnitüd verilerinin, Weibull formülüne göre hesaplanan $\Pr(M \leq m)$ değerlerinin normal dağılım olasılık kağıdında gösterimi



Şekil 7. (a) BHTDK ve (b) TÇDK'ya ait maksimum magnitüd verilerinin, Weibull formülüne göre hesaplanan $\Pr(M \leq m)$ değerlerinin Log normal dağılım olasılık kağıdında gösterimi

$$\text{Hata} = |e(p)| < 4.5 \times 10^{-4} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} c_0 &= 2.51557 & d_1 &= 1.432788 \\ c_1 &= 0.802853 & d_2 &= 0.189269 \\ c_2 &= 0.010328 & d_3 &= 0.001308 \end{aligned}$$

olarak tanımlanmaktadır. Bu eşitsizliklerdeki p değeri için hesaplanan $Pr(M \geq m)$ değerleri kullanılmıştır. Gözlenen M ve yukarıda açıklandığı şekilde hesaplanan z değerleri kullanılarak EKK yaklaşımıyla μ ve σ parametreleri hesaplanmıştır. TÇDK ve BHTDK maksimum magnitüd verileri için hesaplanan bu parametreler, korelasyon katsayıları ile birlikte Çizelge 10'da verilmektedir.

TÇDK ve BHTDK verileri kullanılarak, Batı Anadolu Bölgesi için, elde edilen Normal Dağılım katsayıları kullanılarak, ayrı ayrı hesaplanan, belli bir m magnitüd değerine eşit veya daha büyük magnitüdü depremlerin yineleme periyotları Çizelge 11'de verilmektedir.

Çizelge 10. TÇDK ve BHTDK için Normal Dağılıma göre hesaplanan dağılım parametreleri (Parantez içinde katsayılar a ait standart hatalar verilmektedir) ve korelasyon sayıları

Katsayı	TÇDK için	BHTDK için
σ	0.6968 (± 0.009)	0.6952 (± 0.010)
μ	5.0474 (± 0.007)	5.0500 (± 0.008)
R	0.9906	0.9924

Çizelge 11. TÇDK ve BHTDK maksimum magnitüd verileri için, bulunan normal dağılım parametreleri kullanılarak hesaplanan, belli bir m magnitüd değerine eşit veya daha büyük depremlerin yineleme periyotları

M	T (yıl) TÇDK için	T (yıl) BHTDK için
6.5	53.89	54.64
6.4	38.27	38.35
6.2	20.38	20.39
6.1	15.28	15.27
5.9	9.04	9.03
5.8	7.14	7.13
5.7	5.73	5.72
5.6	4.68	4.66
5.5	3.88	3.87
5.4	3.26	3.25
5.3	2.79	2.78
5.2	2.42	2.41
5.1	2.13	2.12
5.0	1.90	1.89
4.9	1.71	1.71
4.8	1.57	1.56
4.7	1.45	1.44
4.6	1.35	1.35
4.5	1.28	1.27

4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Batı Anadolu bölgesi deprem tehlikesini incelemek amacıyla, 36.8°-39.8° K enlemleri ve 26°-30° D arasında kalan bölge için, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü tarafından verilmekte olan iki farklı kataloga ait veri analiz edilmiştir. Her iki katalog verisine Gutenberg-Richter eşitliği (üstel dağılım) uygulanarak, bölge için deprem tehlikesi belirlenmiştir. BHTDK için, 1900-2005 yılları arasında meydana gelen, magnitudü 4 ve daha büyük olan depremler kullanılarak Gutenberg ve Richter tarafından önerilen, deprem sayısı-magnitud ilişkisi;

$$\text{Log}(N) = 5.3781 - 1.0566 * M_d \quad (R=0.9945)$$

olarak bulunmuştur. TÇDK için, 1900-2005 yılları arasında meydana gelen, magnitudü 3 ve daha büyük olan depremler kullanılarak Gutenberg ve Richter tarafından önerilen, deprem sayısı-magnitud ilişkisi ise;

$$\text{Log}(N) = 5.0297 - 0.9960 * M_d \quad (R=0.9947)$$

olarak elde edilmiştir. $M_d = 6.5$ büyüklüğündeki depremin yinelenme periyodu; BHTDK verilerine göre 52,5 yıl ve TÇDK verilerine göre ise 54 yıldır (Çizelge 6). Çizelge 7 ve 8'de, bölge için 10, 20, 30, 40, 50, 75 ve 100 yıllık süreçler için Gutenberg-Richter parametreleri kullanılarak hesaplanan magnitudü m^* e eşit veya daha büyük depremlerin olma olasılığı değerleri yer almaktadır. Aletsel kayıt döneminde kaydedilmiş en büyük deprem olan $M_d=6.5$ magnitudlü bir depremin 10 yıllık bir süreçte olma olasılığı % 17 olup, yaklaşık % 60 olasılıkla bölgede her 50 yılda bir 6.5 magnitudlü bir deprem beklentisi olduğu görülmektedir. Elde edilen değerler incelendiğinde bölge için, özellikle büyük magnitudlü, depremlerin oluş periyodlarının küçük olduğunu ve bölge içindeki bütün yapılar için kabul edilebilecek bir yapı ömrü süreci içerisinde, her bir yapının büyük deprem etkisine maruz kalma olasılığının yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle tüm yapıların mutlak olarak, zemin etüdü çalışmaları sonrasında elde edilecek parametreler gözönünde bulundurularak, yapı standartlarına uygun olarak projelendirilip inşa edilmesi gerekmektedir.

BHTDK verileri için magnitud değerleri, 5 farklı skalada verilmektedir. Bu çalışmada, TÇDK ve BHTDK verilerinden elde edilen istatistiksel sonuçları karşılaştırabilmek amacıyla, ilk olarak her iki katalog için M_d büyüklükleri kullanılarak, Gutenberg-Richter Yöntemi uygulanmıştır. BHTDK için, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü tarafından rapor edilmekte olan diğer 4 magnitud skalası (M_L , M_s , M_b , M_w) içinde $\text{Log}(N)=a-bM$ eşitliği hesaplanmıştır. BHTDK verileri için farklı magnitud skalalarına için elde edilen Gutenberg-Richter eşitlikleri aşağıda verilmektedir.

M_L (yerel büyüklük) için;

$$\text{Log}(N) = 5.2409 - 1.0315 * M_L \quad (R=0.9943)$$

M_s (yüzey dalgalarından elde edilen büyüklük) için;

$$\text{Log}(N) = 4.129 - 0.8055 * M_s \quad (R=0.9945)$$

M_b (Cisim dalgalarından elde edilen büyüklük) için;

$$\text{Log}(N)=5.9707-1.179*M_b \quad (R=0.9876)$$

M_w (Moment Büyüklüğü) için;

$$\text{Log}(N)=5.6144-1.0692*M_w \quad (R=0.9797)$$

Kahraman vd., Anadolu için $37^\circ-40^\circ$ K ve $26^\circ-30^\circ$ D koordinatları arasında kalan bölgeyi seçerek, Kandilli katalog verilerinden hareketle, 1900-2005 yılları arasında oluşmuş, $M \geq 4.0$ olan toplam 753 deprem için, Gutenberg-Richter eşitliğini kullanarak, istatistiksel analiz yapmışlardır (Kahraman vd., 2008). EKK Yaklaşımı ile elde ettikleri sonuca göre;

$$\text{Log}(N) = 4.43-0.876 (M) \quad (R^2=0.993)$$

bağıntısına ulaşmışlardır. Elde ettiğimiz sonuçlar ile Kahraman vd., tarafından elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, kendilerinin M_s magnitüd skalasını kullandıkları anlaşılmaktadır (Kahraman vd., 2008).

Firuzan (2008), Batı Anadolu'ya istatistiksel frekans analizini uygulamak için $36.50^\circ-40^\circ$ K ve $26.00^\circ-30.00^\circ$ D koordinatları arasında kalan bölgeyi seçerek, sekiz alana ayırarak incelemiştir (Firuzan, 2008). Elde ettiği sonuçlara göre, sekiz farklı alan için; magnitüd-frekans ilişkisinde hesapladığı b değerleri $0.40-0.76$ aralığındadır.

Bu çalışmada, iki farklı katalog verisine; deprem verilerine uygulanabilirliği pek çok araştırmacı tarafından ispatlanan Maksimum Değerler Yöntemi de uygulanmıştır (Nordquist, 1945; Becerik, 1991; Firuzan, 2008). Maksimum Değerler Yöntemi için; başta Üstel Dağılım olmak üzere, Normal, Log-Normal ve Gumbel Dağılımlarının uygunluğu araştırılmıştır. Maksimum Değerler Yöntemi için, frekans-büyüklik ilişkisini en iyi ifade eden olasılık dağılımının Normal Dağılım olduğuna karar verilerek, değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın devamı için; Maksimum Değerler Yönteminin uygulanmasında, Weibull bağıntısı dışındaki ampirik bağıntıların kullanımının ve bu değerleri ifade edebilecek farklı olasılık dağılımları varlığının araştırılmasını önermekteyiz.

Bu çalışmada, beş farklı magnitüd skalası için elde ettiğimiz gerek deprem sayısı-magnitüd ilişkileri, gerekse yineleme periyodu ve olma olasılıkları; sonuçların magnitüd skalası farklılığına oldukça duyarlı olduğunu göstermektedir. Frekans-magnitüd ilişkisi için elde edilen parametreler ve buna bağlı olarak hesaplanan olasılık ve yineleme periyotları göstermektedir ki; bölgedeki deprem tehlikesine neden olan aktif fay sistemlerinin kinematik özelliklerinin ve bölgedeki stress dağılımının detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Deprem potansiyeli yüksek olan Batı Anadolu Bölgesinde daha gerçekçi sismik risk çalışmaları için, yalnızca kaynak zonları ile ilgili parametrelerin değil, aynı zamanda, ortam ve zemin koşulları ile ilgili parametrelerin de incelenmesi ve elde edilen sonuçlar ışığında, bölge için sismik tehlike haritalarının hazırlanması gerekmektedir. Amaç, bilimsel veriler doğrultusunda can ve mal güvenliğini en üst seviyeye taşımak olmalıdır.

5. KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü öğrencilerinden Fatih Palas'ın, bitirme projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Çalışmaya altyapı oluşturacak bilgi birikimini sağladıkları için, Yüksel Birsoy ve Ertuğrul Benzeden'e teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- M. Abramowitz, I. A. Stegun (1970): "Handbook of Mathematical Functions", Dover Publications, New York, sf. 933.
- N. Becerik (1991): "Türkiye Depremlerinin İstatistiksel Analizi", Bitirme Tezi, DEÜ, Mühendislik Fakültesi, sf. 73.
- V. T. Chow (1964): "Statistical and Probability Analysis of Hydrologic Data, Handbook of Applied Hydrology'de Section 8-I", Mc Graw-Hill Book Company.
- A. C. Cornell (1968): "Engineering Seismic Risk Analysis", Bull. Seism. Soc. Am., Cilt 58, sf. 1583-1606.
- E. Firuzan (2008): "Statistical Earthquake Frequency Analysis for Western Anatolia", Turkish J. Earth Sci., Cilt 17, sf. 741-762.
- J. E. Freund (1992): "Mathematical Statistics", Prentice Hall, New Jersey, sf. 658.
- B: Gutenberg, C. F. Richter (1958): "Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration", Bull. Seism. Soc. Am., Cilt 63, sf. 501-516.
- S. Kahraman, T. Baran, İ. A. Saatçi, M. Şalk (2008): "The Effect of Bordes when Using the Gutenberg-Richter Model, Case Study: Western Anatolia", Pure and Applied Geophysics, Cilt 165, sf. 331-347.
- F. Naeim, J. M. Kelly (1999): "Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practise", John Willey and Sons, New York, sf. 289.
- Nordquist, J.M, 1945, Theory of largest values applied to earthquake magnitudes, Trans., Am. Geophys. Union, Vol. 26, pp. 29-31.
- A: O: Öncel, T. Wilson (2004): "Correlation of Seismotectonics Variables and GPS Strain Measurements in Western Turkey", J. Geoph. Res., Cilt 109, B11306.
- B. C. Papazachos (1990): "Seismicity of the Aegean and Surrounding Area", Tectonophysics, Cilt 253, sf. 129-153.
- O. Polat, E. Gök, Y. Doğuser (2008): "Earthquake Hazard of the Aegean Extension Region (West Turkey)", Turkish J. Earth Sci., Cilt 17, sf. 593-614.
- C. F. Richter (1958): "Elementary Seismology", Freeman and Co., San Francisco.
- N: Sayıl, İ. Osmanşahin (2007): "An Investigation of Seismicity for Western Anatolia, Natural Hazards", DOI: 10.1007/s11069-007-9141-2.