

Estimation of Return Times for Earthquake Magnitudes: The Case of 100 Km Radius Area Centered in Istanbul

Burak Berk Tas ¹, Elif Eryilmaz ¹, Busra Yildirim ¹, Berke Demir ¹, Mustafa Hilmi Pekalp ¹

¹ Ankara University, Faculty of Applied Sciences, Department of Actuarial Sciences, 06590 Ankara, Türkiye

Keywords

Earthquake return period, Istanbul earthquake, Estimation, Shifted exponential distribution

Highlights

- * Earthquake return time estimation using a shifted exponential distribution
- * Estimation of earthquake return time in a 100 km radius centered on Istanbul
- * Statistical estimation of the return time of earthquakes larger than 7.0

Aim

Estimate earthquake return periods in the Istanbul region based on historical seismic data using statistical science

Location

100 km radius centered on Istanbul

Methods

Chi-square tests determined the most appropriate distribution for the sample and earthquake recurrence times were estimated using this distribution

Results

It is estimated that earthquakes of various magnitudes will occur in the relevant region within a few years

Supporting Institutions

TÜBİTAK

Financial Disclosure:

The authors declared that this study has received no financial support

Peer-review

Externally peer-reviewed

Conflict of Interest:

The authors have no conflicts of interest to declare

How to cite:

Tas B.B., Eryilmaz E., Yildirim B., Demir B., Pekalp M.H., 2025. Estimation of Return Times for Earthquake Magnitudes: The Case of 100 Km Radius Area Centered in Istanbul, Turk Deprem Arastirma Dergisi 7(2), 179-189, DOI:10.46464/tdad.1567134.

Manuscript

Research Article

Received: 14.10.2024

Revised: 05.04.2025

Accepted: 08.05.2025

Printed: 30.08.2025

DOI

10.46464/tdad.1567134



Content of this journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International Non-Commercial License

Corresponding Author

Burak Berk Tas

Email: tasburakberk@gmail.com



Figure
Faults crossing the Marmara Sea

Deprem Büyüklükleri İçin Dönüş Zamanlarının Tahmin Edilmesi: İstanbul Merkezli 100 km Yarıçaplı Bölge Örneği

Burak Berk Taş¹ , Elif Eryılmaz¹ , Büşra Yıldırım¹ , Berke Demir¹ , Mustafa Hilmi Pekalp¹ 

¹ Ankara Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Aktüerya Bilimleri Bölümü, 06590 Ankara, Türkiye

ÖZET

Yıkıcı depremlerin çokça yaşandığı geçmişe sahip olan Türkiye aktif tektonik hareketlerin güçlü olduğu bir sahadadır. Türkiye'nin nüfus bakımından en büyük şehri olan İstanbul, depremin yıkıcılığıyla karşı karşıyadır. Beklenen İstanbul depreminin oluş zamanı hakkında kesin bir sonuç elde etmek mümkün olmasa bile istatistiksel yöntemler kullanılarak deprem oluş zamanlarıyla ilgili fikir edinmek mümkündür. Bu bağlamda bu yıkıcı gücü minimum hasarla atlatabilmek için istatistiksel olarak deprem geri dönüş zamanı tahmini önemli bir problem olarak ele alınabilir. Bu çalışmada, İstanbul'u merkez alan 100 km yarıçaplı alanda, aletsel zaman içerisinde meydana gelmiş deprem verileri kullanılmıştır. İlgili veri setinin ele alınan dağılım varsayımı altında parametrelerinin tahmini yapılmış, varsayılan dağılıma uygunluğu kanıtlanmıştır. Bu doğrultuda depremlerin tekrarlama zamanlarının tahmini elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

Deprem dönüş zamanı, İstanbul depremi, Tahmin, Ötelenmiş üstel dağılım

Öne Çıkanlar

- * Ötelenmiş üstel dağılım kullanılarak deprem geri dönüş zamanı tahmini
- * İstanbul merkezli 100 km yarıçaplı bir alanda depremin geri dönüş zamanının tahmini
- * 7.0'dan büyük depremlerin geri dönüş zamanının istatistiksel tahmini

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 14.10.2024

Düzeltilme: 05.04.2025

Kabul: 08.05.2025

Basım: 30.08.2025

DOI

10.46464/tdad.1567134

Sorumlu yazar

Burak Berk Taş

E-posta:

tasburakberk@gmail.com

Estimation of Return Times for Earthquake Magnitudes: The Case of 100 Km Radius Area Centered in Istanbul

Burak Berk Taş¹ , Elif Eryılmaz¹ , Busra Yildirim¹ , Berke Demir¹ , Mustafa Hilmi Pekalp¹ 

¹ Ankara University, Faculty of Applied Sciences, Department of Actuarial Sciences, 06590 Ankara, Türkiye

ABSTRACT

Türkiye, with a history of frequent devastating earthquakes, is situated in a region with strong tectonic activity. Istanbul, the most populous city in Türkiye, faces the threat of significant seismic hazards. Although it is not possible to determine the exact timing of the expected Istanbul earthquake, statistical methods can provide valuable insights into the timing of earthquake occurrences. In this context, estimating earthquake recurrence times statistically is a crucial problem to minimize potential damage. In this study, earthquake data within a 100 km radius of Istanbul during the instrumental period have been used. The parameters of the assumed statistical distribution have been estimated, and the distribution's suitability has been confirmed. Accordingly, estimates of earthquake recurrence times have been obtained.

Keywords

Earthquake return period, Istanbul earthquake, Estimation, Shifted exponential distribution

Highlights

- * Earthquake return time estimation using a shifted exponential distribution
- * Estimation of earthquake return time in a 100 km radius centered on Istanbul
- * Statistical estimation of the return time of earthquakes larger than 7.0

Manuscript

Research Article

Received: 14.10.2024

Revised: 05.04.2025

Accepted: 08.05.2025

Printed: 30.08.2025

DOI

10.46464/tdad.1567134

Corresponding Author

Burak Berk Taş

Email:

tasburakberk@gmail.com

1.GİRİŞ

Deprem, yerkabuğunda aniden açığa çıkan enerji sonucunda meydana gelen sismik dalgalanmalar ve bu dalgalanmaların sebep olduğu yer hareketleri olarak tanımlanır (İşçi 2008). Depreme sebebiyet veren faylar, yer kabuğunun dinamik etkileşimlerinin sonucu meydana gelen ve tektonik aktivitenin belirgin bir yansıması olan jeolojik oluşumlardır. Faylar, yer kabuğundaki kırılmalar sonucu oluşan ve yer yüzeyini iki tarafa

ayıran kırık bölgelerdir. Bu kırıklar boyunca oluşan bloklara plaka adı verilir. Plakaların yer değiştirmesi sonucu gerilme birikimi olur ve serbest kalmasıyla depremler meydana gelir. Deprem frekansı, türü ve büyüklüğü, sismik aktivite olarak adlandırılır. Deprem büyüklüğü, moment magnitüd ölçeği (veya eskiden kullanılan Richter ölçeği) ile ölçülür. Sarsıntının etkisi ise Mercalli şiddet ölçeği ile değerlendirilir. Tablo 1'de büyüklüklere karşılık gelen şiddetler ve bu şiddetlere karşılık gelen açıklamalar verilmiştir.

Tablo 1: Büyüklük/şiddet karşılaştırma tablosu (B.Ü. KRDAE 2025)
Table 1: Magnitude/severity comparison table (B.Ü. KRDAE 2025)

Magnitüd	Şiddet	Açıklama
1.0-2.9	I	Hemen hemen hiç hissedilmez.
3.0-3.9	II	Özellikle binaların üst katlarındaki bazı insanlar tarafından hissedilebilirler
	III	Binaların özellikle üst katlarında yaşayanlar açıkça hissederler. Birçok insan sarsıntının deprem olduğunu fark edemez.
4.0-4.9	IV	Gündüz vakti binalarda bulunan hemen herkes tarafından hissedilir. Gece vakti bazı insanları uykudan uyandırır.
	V	Hemen hemen herkes tarafından hissedilir ve gece vakti çoğu insanı uykusundan uyandırır.
5.0-5.9	VI	Herkes tarafından hissedilir. Genel olarak hafif hasarla sonuçlanır.
	VII	Dizaynı ve inşaatı çok iyi olan yapılarda göz ardı edilebilecek bir hasara yol açarken iyi inşa edilmiş sıradan binalarda hafif ya da orta seviyede hasar gözlenir. Kötü malzeme kullanılmış ya da kötü dizayn edilmiş binalarda ise önemli ölçüde hasara neden olur.
6.0-6.9	VIII	Özel olarak dizayn edilmiş binalarda hafif hasar, normal yapılarda orta hasar, zayıf binalarda ise oldukça büyük hasara yol açar.
	IX	İyi dizayn edilmiş kafes yapılar ekseninden kayar. Normal binalarda büyük hasar oluşur ve yer yer yıkılmalar gözlenir. Binalar temellerinden kayar.
7.0 veya daha büyük	X	İyi inşa edilmiş ahşap yapılardan bazıları yıkılırken taş ve kafes yapıların büyük çoğunluğu temelleriyle birlikte yıkılır. Demir yolları eğilir.
	XI	Birkaç yapı (özellikle taş) dışında tüm binalar ve köprüler yıkılır. Demir yolları büyük oranda eğilir ve bükülür.
	XII	Yıkıcılığı çok yüksektir. Ufuk çizgisi oynak bir yüzeye dönüşür.

Deprem oluştuğu bölgenin derinliği, yıkıcı etkisi üzerinde belirleyici bir rol oynar. Bu sebeple yüzeye yakın bölgelerde meydana gelen depremler genellikle daha fazla hasara yol açmaktadır. Deprem derinliğinin de etkili olduğu büyüklük ve şiddet ile ölçülen depremin yıkıcı etkisi, bir toplumun alt yapısını zayıflatır ve evsizliğe, ekonomik, ticari, sosyal, maddi ve manevi hasara yol açar. Örneğin, İstanbul'da 1 milyon 166 bin 433 bina bulunmaktadır. Bunların %22'si (263 bin 655) 1980 öncesinde inşa edilmişken %47.6'sı (555 bin 304) 1980-2000 yılları arasında yapılmıştır. Bu şekilde, 2000 yılı ve öncesinde yapılmış binaların oranı %70.2'ye ulaşmaktadır (B.Ü. KRDAE 2009). Bu oranlara dayanarak İstanbul'daki yapıların büyük çoğunluğu 1999 depreminden sonra çıkan yönetmeliğe uygun olarak yapılmadığı için depreme karşı riskli olabileceği, 7.0 ve daha büyük bir depremin yıkıcılığının çok yüksek olacağı sonucuna varılabilmektedir. Deprem yıkıcı etkilerinden korunabilmek adına insanlar, en optimal şekilde hazırlayabilecekleri, planlamalar yapabilecekleri ve tedbirler alabilecekleri zaman önerisine ihtiyaç duymaktadır. Bilimsel çalışmalar ışığında deprem tekrarlama süresi hakkında bazı değerlendirmelerde bulunulabilmektedir. Zaman önerisindeki başlıca bilimsel yaklaşım istatistiksel deprem geri dönüş zamanının tahminidir.

Depremlerin yer, zaman ve büyüklük bakımından rastgelelik göstermesi, sismik risk analizinde kullanılan modellerde bazı belirsizlikler bulunması ve istatistiksel modellerin bu belirsizlikleri hesaba katması nedeniyle istatistiksel yöntemlerle sismik risk değerlendirmesi uygun görülmektedir.

İstatistiksel deprem dönüş tahmini, geçmiş deprem verilerinin istatistiksel analizi yoluyla gelecekte olası deprem zamanlarının tahmin etmeye yönelik bir yaklaşımdır. Bu yöntem, yer kabuğundaki sismik aktivitenin belirli kalıplarını ve trendlerini tespit etmeye dayanır. Geçmiş deprem kayıtları, depremlerin meydana gelme olasılıkları hakkında bilgi sağlar. Literatürde bununla ilgili daha önce yapılmış çalışmaların bazıları şöyledir:

Bağcı (2000), deprem öncesi Kuzey Anadolu Fayı'nın batı kesiminin tarihsel ve aletsel dönemlerdeki depremselliği ile riskini ele aldığı çalışmada Poisson dağılımını kullanmıştır. Çobanoğlu ve diğ. (2006), Doğu Akdeniz'deki Çukurova Bölgesi'nde aletsel dönem verilerini kullanarak magnitüdü 4 ve üzeri depremleri incelemiştir. Çalışmada, bölgenin sismik aktivitesi değerlendirilmiş ve deprem oluş

sıklıkları ile tekrarlanma periyotları istatistiksel yöntemlerle analiz edilmiştir. Deprem tekrarlanma olasılıklarının hesaplanmasında üstel dağılım fonksiyonu, Poisson modeli ve Gumbel modeli kullanılmış ve bu modellerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışma, farklı model seçimlerinin deprem tehlikesi tahminleri üzerindeki etkisini ortaya koyarak bölgesel risk değerlendirmelerini incelemektedir. Öztürk ve diğ. (2008) çalışmasında, Türkiye ve çevresindeki bölgelerin deprem tehlike parametreleri Gumbel I aşırı değerler dağılımı kullanılarak nicel olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, Gumbel dağılım parametrelerine dayanarak her bir bölge için ortalama dönüş periyotları, belirli bir süre içinde meydana gelebilecek en olası maksimum deprem büyüklüğü ve belirli büyüklükte bir depremin belirli bir zaman aralığında gerçekleşme olasılığı hesaplanmıştır. Akyol ve diğ. (2012), Batı Anadolu Bölgesi'nde meydana gelen depremler için büyüklük-frekans ilişkisini istatistiksel olarak analiz etmişlerdir. Analizlerinde kullandıkları dağılımlar arasında doğruya en yakın sonucu normal dağılımın verdiği kararına varmışlardır. Bütünleştirilmiş Homojenize Türkiye Deprem Kataloğu verilerinden yararlanarak, farklı büyüklük ölçekleri arasındaki doğrusal ilişkiyi belirlemişlerdir. İncelenen veriler, özellikle büyük magnitudlü depremlerin meydana gelme sürelerinin bölge için kısa olduğunu göstermektedir. Toyganözü ve Balcı (2014) Göller Bölgesi'ne ait deprem verilerini incelerken, yıllık maksimum şiddetteki depremleri kullanarak blok maksima yöntemini uygulamıştır. Uç değer teorisi kullanılarak verilerin hangi olasılık dağılımına uyduğu belirlenmiş ve bu dağılıma ait parametre tahminleri yapılmıştır. Ayrıca, bu çalışma kapsamında bölgedeki depremlerin gelecekte meydana gelme olasılıkları ve tekrarlanma zamanları da tahmin edilmiştir. Köle (2016), 1900-2015 yılları arasında Richter ölçeğinde 4.0 ve üzeri büyüklüğe sahip sismik verileri kullanarak, Poisson dağılımı ile Çankırı il sınırları içinde farklı büyüklükteki depremlerin olasılıklarını ve tekrarlanma sürelerini hesaplamıştır. Akın (2020), yüksek lisans tezinde Batı Anadolu Bölgesi'ni iki alt bölgeye ayırarak Poisson, Üstel ve Gumbel modellerini kullanarak deprem tekrarlanma olasılıklarını incelemiştir. Çalışmada, $M \geq 4.0$, ≥ 6.0 ve ≥ 7.0 büyüklüğündeki depremler için olasılıklar hesaplanmış ve elde edilen model sonuçları karşılaştırılmıştır. Depremler açısından üç modelin de benzer sonuçlar verdiği, ancak daha küçük eşik değerlerinde bölgesel farklılıkların gözlemlendiği ifade edilmiştir. İncelenen alt bölgelerden birinde deprem olasılığının daha yüksek olduğu ve bu durumun tekrarlanma periyotlarının daha kısa olmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Alashan ve diğ. (2023), Karlıova üçlü eklemine yakın Bingöl ili için gerçekleştirdiği çalışmada, deprem tekrarlanma olasılıklarını ilçe bazında incelemiştir. Çalışmada, Bingöl'ün farklı ilçelerine ait yıllık maksimum deprem büyüklükleri değerlendirilerek beş farklı olasılık dağılımı test edilmiştir. Analizler sonucunda, bazı ilçelerde Gumbel dağılımının daha iyi uyum sağladığı, daha az büyük deprem kaydı bulunan bölgelerde ise Weibull dağılımının daha uygun olduğu belirlenmiştir. İslamoğlu (2024), Marmara Bölgesi'nde deprem tekrarlanma aralıklarını modellemek amacıyla yeni bir istatistiksel yaklaşım geliştirmiştir. Çalışmada, klasik yenilenme modellerinden farklı olarak Weibull-Üstel karma dağılımı önerilmiş ve bölgeye uygulanmıştır. Yapılan analizlerde, önerilen karma modelin deprem tekrarlanma periyotlarını hesaplamada klasik Weibull dağılımına kıyasla daha tutarlı sonuçlar sunduğu belirlenmiştir.

Bilgimiz dahilinde, konuyla ilgili uluslararası literatür şu şekildedir; Parsons ve diğ. (2000), 17 Ağustos 1999 İzmit depremi sonrasında İstanbul'daki sismik tehlike olasılıklarını inceleyen çalışmasında MS 1500'lere uzanan Marmara bölgesi deprem kataloğunu kullanarak İstanbul'da önümüzdeki yıllarda yaşanabilecek şiddetli sarsıntı olasılığını hesaplamıştır. Yöntemde deprem aralıklarının zaman-bağımsız (Poisson) ve zaman-bağımlı (yenilenme) modelleri karşılaştırılmış; özellikle 1999 depreminden aktarılan gerilme etkisi hesaba katılmıştır. Kagan ve Schoenberg (2001), genelleştirilmiş Pareto dağılımının deprem sayılarının modellenmesinde kullanılabileceğini ancak cut-off parametre tahminlerinin yanlı olduğunu göstermiş ve bu parametreler için alternatif tahminler sunmuşlardır. Utsu (2002), çalışmasında üstel, iki parametrelili üstel, Weibull, gamma ve lognormal dağılımları kullanarak depremlerin meydana gelme zamanlarını modellemiştir. Shimazaki (2002), Nankai depremlerinin oluş zamanlarını modellemek için lognormal, Poisson, iki parametrelili üstel, Weibull ve gamma dağılımlarını kullanmıştır. Çalışmada, ötelenmiş üstel dağılım parametrelerinin en çok olabilirlik yöntemiyle tahmin edildiği ve modelin gözlemlere uyumunun ki-kare veya K-S testi gibi istatistiksel yöntemlerle değerlendirildiği belirtilmiştir.

Pisarenko ve Sornette (2004), deprem büyüklüğü 8.0 ve üzerinde olan depremlerde Gutenberg-Richter dağılımından sapmalar üzerine çalışmışlardır. Ferráes (2005) çalışmasında, büyük depremlerin tekrar periyotları istatistiksel yöntemlerle analiz edilerek, gamma ve lognormal dağılımları kullanılarak olasılıksal tahminler yapılmıştır. Çalışmada, yenilenme süreci temel alınarak belirli bir zaman dilimi içinde büyük bir depremin gerçekleşme olasılığı hesaplanmış ve farklı dağılımların tahmin performansları karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda çalışmada Malatya Ovacık Fay Zonunun Yazıhan Segmenti'nde deprem büyüklüklerinin istatistiksel analizinde kullanılan ötelenmiş üstel dağılım ile benzer şekilde, farklı olasılıksal modellerin deprem risk değerlendirmesine etkisi incelenmiştir. Apostol (2006), logaritmik dağılımı kullanarak sismik tahminler için yeni bir model ortaya koymuştur. Lombardi ve Marzocchi (2007), dünya genelinde $M \geq 7.0$ büyüklüğündeki depremlerin zaman içindeki dağılımını inceleyerek, büyük depremlerin rastgele gerçekleşmekten ziyade belirli dönemlerde yoğunlaşma eğilimi gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu bulgu, üstel modelin basit yapısına rağmen her durumda geçerli olmayabileceğini ve depremlerin bazı dönemlerde daha sık, bazı dönemlerde ise daha seyrek meydana gelebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, üstel dağılım özellikle veri setinin sınırlı olduğu durumlarda ve zamana bağımsız tehlike analizlerinde başlangıç modeli olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Kagan (2010), deprem sayılarının modellenmesi için Poisson, geometrik, logaritmik ve negatif binom gibi kesikli istatistiksel dağılımları araştırmıştır.

Literatürde yer alan dağılım belirleme problemini ele alan çalışmalarda birçok dağılım karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. Genel anlamda diğer dağılımlara nazaran daha güvenilir sonuçlar verdiği sınılanmış ve doğrulanmış olan gamma, Weibull ve Gumbel dağılımlarının uygun model olarak önerildikleri tespit edilmiştir. Güçlü birer model olarak düşünülen bu dağılımlar ile bu makalede önerilen ötelenmiş (shifted) üstel dağılımın karşılaştırılması, elde edilen bulguların güvenilirliğini

ve literatüre olan katkısını önemli ölçüde destekleyecektir. Bu dağılım varsayımları altında olasılıksal ve istatistiksel sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada ise Boğaziçi Üniversitesi (BÜ) Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (BDTİM)'nden elde edilmiş verilerin hangi dağılıma uygun olduğuna yönelik yapılan dağılım belirleme çalışmasında bahsi geçen tüm dağılımlar göz önüne alınmıştır. Yapılan karşılaştırma çalışması neticesinde ötelenmiş üstel dağılımın, ele alınan verinin modellenmesinde kullanılabilceği tespit edilmiştir. Hem ötelenmiş üstel dağılımın hem de bahsi geçen diğer dağılımlara ilişkin uyum iyiliği testlerinin sonuçları metodoloji ve uygulama bölümünde sunulmuştur.

Ele alınan veri kümesinin ötelenmiş üstel dağılıma uygunluğu ki-kare testi ile doğrulandıktan sonra bu dağılım varsayımı altında deprem dönüş zamanı tahmini elde edilecektir. Bu çalışmayı literatürde bulunan diğer çalışmalardan ayıran en önemli nokta ise İstanbul'u merkez alan 100 kilometre yarıçaplı bir alanda aletsel zaman içerisinde yaşanmış olan depremlere ait veriler kullanılarak ötelenmiş üstel dağılım varsayımı ile deprem dönüş zamanı tahmini yapan başka bir çalışmanın olmamasıdır.

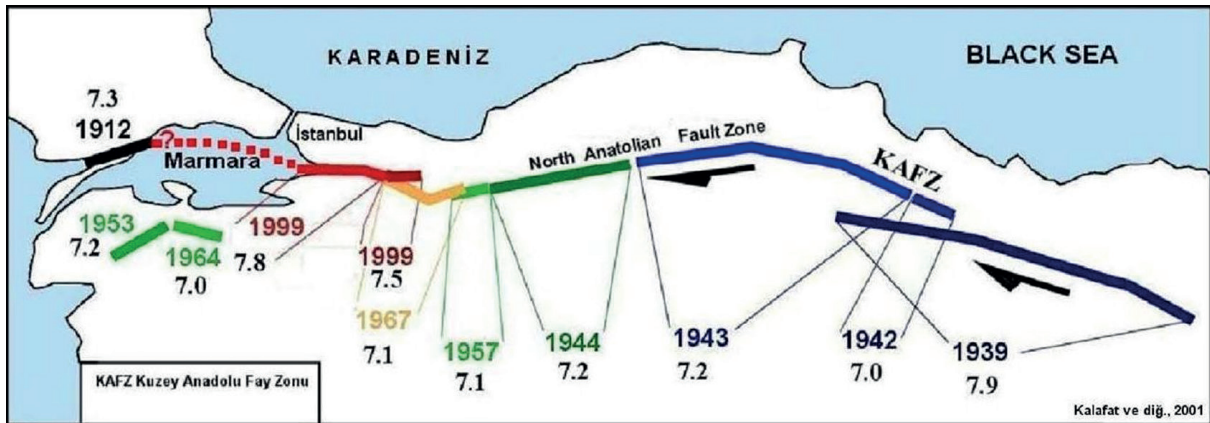
Çalışmanın içeriği şu şekilde tasarlanmıştır. Bölüm 2'de İstanbul merkezli 100 km yarıçaplı alanın tektonik yapısının incelenmesi ele alınmaktadır. Bölüm 3'te çalışmanın analizlerinin yapılmasında kullanılan metodoloji üzerinde ve ötelenmiş üstel dağılım varsayımıyla veri setine dayalı olarak deprem dönüş zamanlarının tahmini üzerinde durulmaktadır. Son olarak Bölüm 4, ilgili analizlerin genel değerlendirmesini içermektedir.

2. TEKTONİK YAPI

Dünya'nın en aktif deprem kuşakları arasında yer alan Alp-Himalaya deprem kuşağı Azor Adaları itibarıyla başlayarak Güneydoğu Asya doğrultusunda devam etmektedir. Türkiye de bu deprem kuşağı üzerinde bulunmaktadır. Deprem aktivitesinin yüksekliği fazla olan Türkiye'de; güneyinde bulunan kuzey ve kuzeybatı doğrultusunda hareket halinde olan Afrika ve Arap plakaları (her yıl 25 mm'leri bulan hızlı sıkıştırma) ve kuzeyinde bulunan Avrasya plakası (neredeyse hareketsiz olan) arasında bir yerde bulunduğundan dolayı yüksek sismik aktivite oluşmaktadır (Özmen ve Nurlu 1999).

Jeolojik açıdan bakıldığında deprem açısından aktif bir bölgede konumlanan Türkiye'de; Anadolu levhasını meydana getiren üç mühim fay hattı bulunmaktadır. Faylardan birincisi Doğu Anadolu Fay Hattı (DAF), güneydoğusunda yer alan Arabistan ve kuzeybatı tarafında yer alan Anadolu levhası arasındadır. Faylardan ikincisi, doğu ve batı yönlü KAF Hattıdır. Bu hattın yaklaşık olarak 1200 km uzunluğu olup doğu tarafında Karlıova mevkiinden başlayıp batı tarafında ise Saros Körfezi bölgesine doğru uzanır. Üçüncü fay hattı ise DAF ile KAF Hatları arasındaki Anadolu bloğunun batı kesiminde oluşan Ege grabenidir (Kartal ve diğ. 2015).

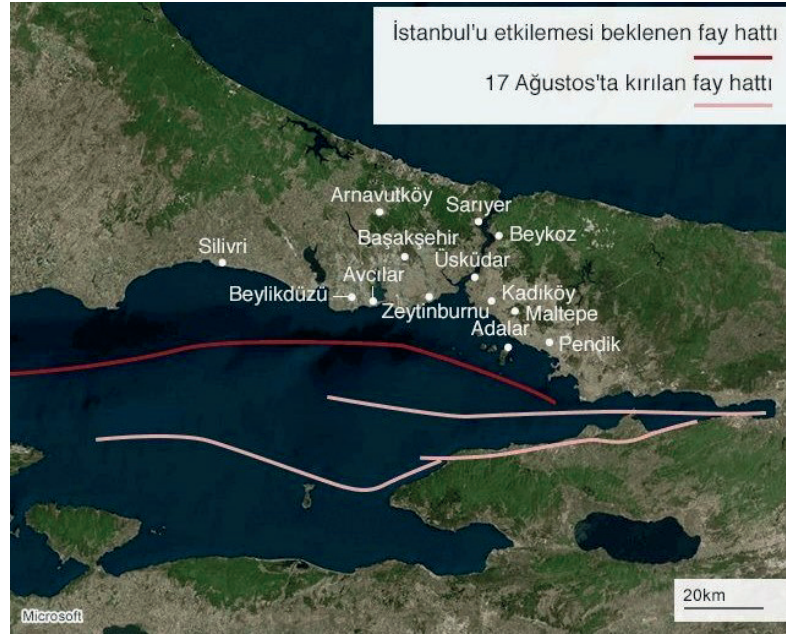
KAF Hattı, Türkiye'nin kuzey tarafında bulunan ve dünyanın en riskli sismik dalgalanmalarının yaşandığı bölgeler içerisinde yer alan aktif bir fay hattı olup yanal atılım sergilemektedir (Barka 1993). Bu hat üzerinde son yüzyılda kronolojik olarak 1912 Tekirdağ İli Şarköy İlçesi, 1939 Erzincan, 1942 Tokat, 1943 Çankırı, 1944 Bolu İli Gerede İlçesi, 1953 Çanakkale'nin Yenice İlçesi ve Balıkesir'in Gönen İlçesi, 1957 Bolu İli Abant İlçesi, 1964 Balıkesir İli Manyas İlçesi, 1967 Bolu İli Mudurnu İlçesi, 1999 yılında Bolu İli Gölçük İlçesi ve Düzce İlinde yıkıcı depremler yaşanmıştır. Şekil 1'de 1939 yılında yaşanan deprem ile birlikte, bu hat boyunca birikmiş enerjinin kısa sürede batı yönüne doğru ilerlediği görülmektedir.



Şekil 1: Büyük depremlerin 1939 depreminden sonra batıya göçü (Kalafat ve diğ. 2001)
Figure 1: Migration of large earthquakes to the west after the 1939 earthquake (Kalafat et al. 2001)

KAF Hattı'nın etki alanında yer alan Marmara Denizi ülkemizin aktif tektonik sahaları arasında yer almaktadır (Şekil 1). KAF Hattı'nın Batı Marmara üzerinden geçen uzantısı Marmara Denizi'nde en yoğun deprem aktivitesinin izlendiği alandır. Marmara Denizi ile birlikte çevresi de I. Derece Deprem Bölgesi alanları arasında yer almaktadır (B.Ü. KRDAE 2015). Bulgaristan'dan gelen Srednogorie fayının bir uzantısı, Kuzey Karadeniz yükseltisi boyunca ilerlerken güneyde KAF Hattı'nın, kuzeybatıda ise Trakya Fayı'nın etkisi altında kalmaktadır. Marmara bölgesinde etkili olan KAF, bu bölgeden 3 kola ayrılmıştır (Şekil 2). Kuzey kolu, Sapanca'dan başlayarak Marmara Denizi altından geçip Saros Körfezi'ne kadar uzanırken; orta kol, Geyve'den Gemlik Körfezi'ne kadar,

güney kol ise Geyve Yenişehir'den başlayıp Biga Yarımadası'na kadar devam etmektedir (Kalafat ve diğ. 2001). Bu bölgede gerçekleşen küresel konumlama sistemi çalışmaları KAF Hattı'nın kuzey kolunun diğer kollara göre daha büyük deprem oluşturma potansiyelinin daha fazla olduğunu göstermektedir (Flerit ve diğ. 2003). İstanbul ve çevresi, birçok fay hattının yer aldığı tektonik açıdan aktif bir bölgedir. Bu bölgede bulunan fayların aktif olduğu bilinmektedir. Bu durum; Türkiye ekonomisi, sanayi ve nüfusunun yoğun olduğu İstanbul ve çevresinde büyük risk oluşturmaktadır. Bölgenin tektonik hareketlerinin izlenmesi gelecekte büyük hasarlara neden olabilecek yıkıcı depremlere karşı tedbirli olunması açısından önem arz etmektedir.



Şekil 2: Marmara Denizi'nden geçen faylar (Köker ve Yazgan 2019)
Figure 2: Faults crossing the Marmara Sea (Köker ve Yazgan 2019)

Bu amaç doğrultusunda deprem dönüş zamanlarının bu bölge için hesaplanması önemli bir husustur. Bir sonraki bölümde İstanbul ve çevresi için dönüş zamanlarının hesaplanması amacıyla bu çalışmada göz önüne alınan yöntemler açıklanacaktır.

3. METODOLOJİ VE UYGULAMA

Bu bölümde, İstanbul ve çevresi için deprem geri dönüş zamanlarının hesaplanmasında kullanılan metodoloji detaylandırılacak ve ardından uygulamasına yönelik bir örnek sunulacaktır. Uygulama, İstanbul'u merkez alan 100 km yarıçaplı bir bölgede meydana gelen magnitüdü (M) 4.0'dan büyük ve eşit büyüklükteki depremlerden elde edilen verilerle gerçekleştirilecektir. Veriler, KRDAE'den elde edilmiştir. Deprem verilerinin istatistiksel dağılımını belirlemek için Ki-kare uyum iyiliği testi uygulanacak ve verilerin hangi dağılımla

en iyi temsil edildiği tespit edilecektir. Bu bağlamda literatürde sık kullanılan ve literatür doğrultusunda diğer dağılımlara göre daha güvenilir sonuçlar verdiği ispatlanmış gamma, Weibull, Gumbel ve ötelenmiş üstel dağılımları ele alınarak, en uygun dağılım seçilecektir.

Belirlenen dağılımın parametrelerinin tahmini için En Çok Olabilirlik Yöntemi (Maximum Likelihood Estimation - MLE) kullanılacaktır. MLE, istatistiksel tahmin yöntemleri arasında geniş kullanım alanına sahip olup, tahmin edicilerin asimptotik olarak yansız ve düşük varyanslı olmasını sağlaması nedeniyle tercih edilmiştir. Bu özellikler, özellikle büyük veri setlerinde parametre tahminlerinin güvenilirliğini artırmaktadır. X_1, X_2, \dots, X_n örnekleme olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(x; \theta)$ olan kitleden alınan bir örneklem olmak üzere θ parametresi için en çok olabilirlik fonksiyonu Eşitlik 1' de gösterilmektedir.

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} \mathcal{L}(\theta) \quad (1)$$

Yapılan hesaplamalar doğrultusunda elde edilen parametreler kullanılarak, farklı büyüklüklerdeki depremler için dönüş zamanları hesaplanacaktır.

Bu çalışmada literatürde sıkça kullanılan gamma, Weibull, Gumbel ve ötelenmiş üstel dağılımları incelenmiştir:

Şekil parametresi α ve ölçek parametresi β olan Weibull dağılımı (Eşitlik 2):

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}}, \quad x \geq 0; \alpha, \beta > 0. \quad (2)$$

Şekil parametresi γ ve ölçek parametresi η olan gamma dağılımı (Eşitlik 3):

$$f(x; \gamma, \eta) = \frac{x^{\gamma-1} e^{-x/\eta}}{\eta^{\gamma} \Gamma(\gamma)}, \quad x \geq 0; \gamma, \eta > 0. \quad (3)$$

Konum parametresi μ ve ölçek parametresi σ olan Gumbel dağılımı (Eşitlik 4):

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)} + e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)}, \quad (4)$$

$$x \in \mathbb{R}; \mu \in \mathbb{R}, \quad \sigma > 0.$$

Ölçek parametresi λ ve öteleme parametresi θ olan ötelenmiş üstel dağılımı (Eşitlik 5):

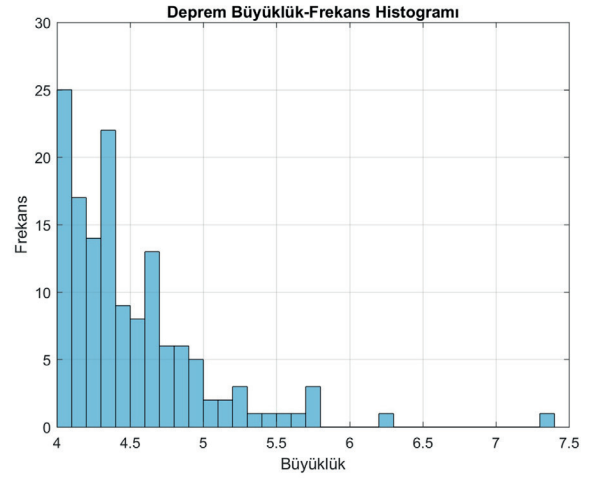
$$f(x; \lambda, \theta) = \lambda e^{-\lambda(x-\theta)} \quad x \geq 0, \quad \lambda, \theta > 0. \quad (5)$$

3.1) Verilerin Toplanması ve Hazırlanması

M, deprem büyüklüğü olarak tanımlanan bir rastgele değişkeni ifade ettiği daha önce verilmiştir. Aletsel zamanda 41.013611 enlem ve 28.955 boylamda bulunan İstanbul'u merkez alan 100 km yarıçaplı bölgede meydana gelmiş $M \geq 4.0$ büyüklüğündeki depremlerden elde edilen veriler kullanılmıştır. Veriler KRDAE-BDTİM'nden derlenmiş olup deprem büyüklüklerinden oluşmaktadır. Ele alınan veriler deprem büyüklüklerine göre frekanslar halinde Tablo 2'de ve histogram olarak gösterimi Şekil 3'te verilmiştir.

Tablo 2: Büyüklüklere göre deprem frekansları
Table 2: Earthquake frequencies by magnitudes

Büyüklük	Frekans	Büyüklük	Frekans
4.0	25	5.0	2
4.1	17	5.1	2
4.2	14	5.2	3
4.3	22	5.3	1
4.4	9	5.4	1
4.5	8	5.5	1
4.6	13	5.6	1
4.7	6	5.7	3
4.8	6	6.3	1
4.9	5	7.4	1



Şekil 3: Deprem büyüklük - frekans histogramı
Figure 3: Earthquake magnitude - frequency histogram

Çalışma bölgesinde aletsel zamanda $M \geq 4.0$ olan 141 deprem verisi kaydedilmiştir. Literatürde aralık uzunluğu genellikle 0.4 olarak seçildiğinden bu aralık uzunluğu kullanılarak 7 sınıf oluşturulmuştur. Buna ek olarak sınıf değeri (orta değer), frekans ve yüzde değeri Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'te, her bir sınıf için alt ve üst sınır değerleri, sınıf değeri (orta değer), frekans ve yüzde değerleri sunulmuştur. Buna ek olarak, genel ortalama büyüklük değeri 4.5, genel standart sapma ise 0.5 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3: Meydana gelen depremlerin büyüklüklerine göre sıklık dağılımı
Table 3: Frequency distribution of earthquakes according to their magnitudes

Sınıf	Alt Sınır	Sınıf Değeri	Üst Sınır	Frekans	Yüzde (%)
4.0-4.4	4.0	4.2	4.4	87	0.6170
4.5-4.9	4.5	4.7	4.9	38	0.2695
5.0-5.4	5.0	5.2	5.4	9	0.0638
5.5-5.9	5.5	5.7	5.9	5	0.0355
6.0-6.4	6.0	6.2	6.4	1	0.0071
6.5-6.9	6.5	6.7	6.9	0	0.0000
7.0-7.4	7.0	7.2	7.4	1	0.0071

Çalışmamızda İstanbul ve çevresi için deprem verilerinin hangi dağılıma daha iyi uyduğunu belirlemek amacıyla ele alınan dağılımlar ki-kare uyum iyiliği testiyle bir sonraki alt bölümde değerlendirilmiştir.

3.2) Ki-Kare Uyum İyiliği Testi ile Uygun Modelin Belirlenmesi

Verilerin elde edildiği kitleyi temsilen tanımlanan M rastgele değişkeninin literatürde kullanılan dağılımlardan hangisi ile daha iyi temsil edildiğini saptamak amacıyla ki-kare uyum iyiliği testi göz önüne alınmıştır. Anlamlılık düzeyi %5 seçilerek aşağıdaki hipotezler kurulmuştur.

H_0 : Kitle dağılımı F dağılımına sahiptir.

H_1 : Kitle dağılımı F dağılımına sahip değildir.

Bu çalışmada hipotezlerde belirtilen F dağılımı, literatürde sıkça kullanılan ve doğruluğu sınanmış olan Weibull, gamma, Gumbel ve ötelenmiş üstel dağılım seçilerek ilgili hipotezler test edilmiştir. Hipotezler test edilirken dağılım parametreleri

en çok olabilirlik yöntemi (MLE) ile tahmin edilmiştir (Eşitlik 1). Ki-kare testinin uygulanmasının ardından ele alınan dağılımlar için test istatistiği değerleri ve bunlara karşılık gelen R^2 değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

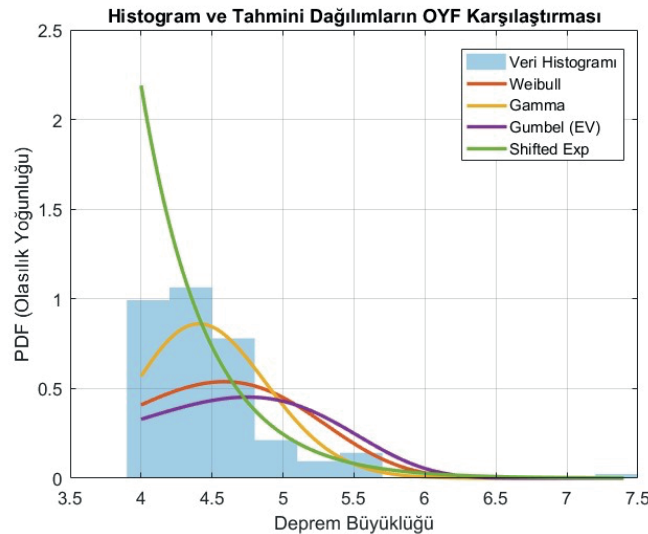
Tablo 4: Parametre Tahminleri, Ki-kare Test İstatistiği Değerleri ve p -değeri
Table 4: Parameter Estimates, Chi-square Test Statistic Values and p -value

Dağılımlar	Parametre Tahminleri	Ki-kare Test İstatistiği	p -değeri	R^2 değeri
Gamma	$\hat{\alpha} = 79.5270$ $\hat{\beta} = 0.0560$	$\chi_H^2 = 1381.4904$	0.0000	0.9202
Weibull	$\hat{\gamma} = 11.2550$ $\hat{\eta} = 4.6432$	$\chi_H^2 = 13204.9840$	0.0000	0.8111
Gumbel	$\hat{\mu} = 4.2318$ $\hat{\sigma} = 0.3896$	$\chi_H^2 = 3.17 \times 10^{10}$	0.0000	0.7362
Ötelenmiş Üstel	$\hat{\lambda} = 2.1894$ $\hat{\theta} = 4.0000$	$\chi_H^2 = 12.5710$	0.0504	0.9651

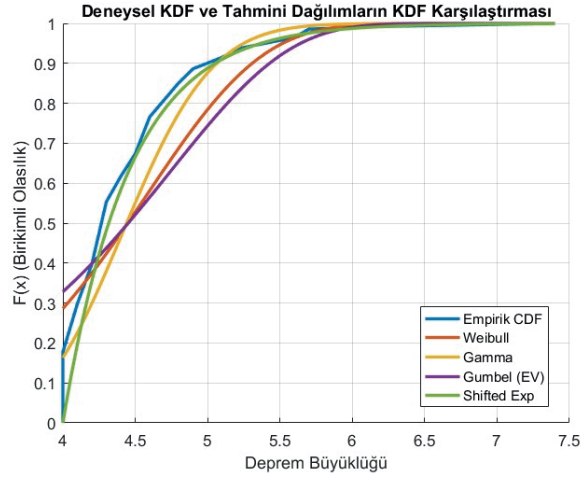
M rastgele değişkeninin hangi dağılıma sahip bir kitleden geldiğini test etmek amacıyla ki-kare uyum iyiliği testleri uygulanmıştır. Tablo 4'e göre gamma dağılımı için hesaplanan ki-kare test istatistiğinin değeri 1381.4904 olarak ve bu değere karşılık gelen p değeri 0.0000 olarak hesaplanmıştır. Ki-kare değeri %5 anlamlılık düzeyine göre gamma dağılımının ele alınan veri kümesi için uygun bir model olmadığı söylenebilir. Benzer şekilde, Weibull dağılımı için yapılan testte, ki-kare test istatistiği $\chi_H^2 = 13204.9840$ olarak hesaplanmış ve karşılık gelen p -değerinin %5'ten daha küçük olması nedeniyle uygun bir model olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Gumbel dağılımına göre hazırlanan ki-kare test istatistiği $\chi_H^2 = 3.17E + 10$ ve karşılık gelen p değeri %5'ten küçüktür. Bu nedenle Gumbel dağılımının da uygun bir model olmadığı söylenebilir. Son olarak, ötelenmiş üstel dağılım için ki-kare test istatistiği $\chi_H^2 = 12.571$ olarak hesaplanmış ve bu değere karşılık gelen p -değerinin %5 anlamlılık düzeyinden büyük olduğundan ötelenmiş üstel dağılımın veri kümesine en uygun model olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ek olarak, Tablo 4'te verilen R^2 değerleri de modellerin veriye uyumunu değerlendirmek

amacıyla incelenmiştir. Ötelenmiş üstel dağılım için elde edilen $R^2 = 0.9651$ değeri, bu modelin gözlemlenen veriyi en iyi şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Gamma dağılımı için hesaplanan $R^2 = 0.9202$ değeri yüksek olmakla birlikte, ki-kare test istatistiğinin anlamlılık düzeyine göre modelin uygun olmadığı belirlenmiştir. Weibull dağılımı için elde edilen $R^2 = 0.8111$ ve Gumbel dağılımı için hesaplanan $R^2 = 0.7362$ değerleri ise diğer dağılımlara kıyasla daha düşük olup, bu modellerin veriyi daha zayıf temsil ettiğini göstermektedir.

Bu sonuçlar, verinin histogramıyla tahmini olasılık yoğunluk fonksiyonunun (OYF) karşılaştırıldığı Şekil 4 ve deneysel kümülatif dağılım fonksiyonunun (KDF) tahmini dağılım fonksiyonuyla kıyaslandığı Şekil 5'teki görsellerle de desteklenmektedir. Bu doğrultuda, istatistiksel test sonuçları ve görsel analizleri birlikte değerlendirilerek, ötelenmiş üstel dağılımın veri seti için en uygun model olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bulgular doğrultusunda farklı büyüklükler için deprem geri dönüş zamanlarının tahminleri ötelenmiş üstel dağılım varsayımı altında bir sonraki alt bölümde yapılacaktır.



Şekil 4: Histogram ve tahmini dağılımların OYF karşılaştırması
Figure 4: PDF comparison of histogram and estimated distributions



Şekil 5: Deneysel KDF ve tahmini dağılımların KDF karşılaştırması
Figure 5: Comparison of experimental CDF and CDF of estimated distributions

3.3) Ötelenmiş Üstel Dağılımı ile Deprem Dönüş Zamanlarının Tahmini

Depremi tekrarlanma ya da geri dönüş sürelerini bulabilmek için yıllık beklenen deprem sıklığını bulmak gerekmektedir. Yıllık beklenen deprem sıklığını bulmak için toplam deprem sayısının incelenen zaman dilimine oranını bulmak gerekmektedir. Bulunan oran ile M büyüklüğündeki depremin meydana gelme olasılığının çarpılması sonucu yıllık beklenen deprem sıklığı elde edilir (Eşitlik 6) (Kasap ve Gürten 2003).

$$\text{Tekrarlama Yılı} = 1/(\text{yıllık beklenen sıklık}) \quad (6)$$

Tablo 5'te ele alınan veri kümesi için deneysel dağılım fonksiyon değerleri sunulmuştur. Ayrıca bu tabloda bulunan beklenen birikimli olasılıklar, dağılım fonksiyonunun $\theta = 4.0$ olarak bulunan alt sınır değeriyle her bir sınıf için üst sınır değeri arasında karşılık gelen olasılık değerlerinin hesaplanması ile elde edilmiştir.

Tablo 5: Deneysel ve kuramsal dağılıma ilişkin değerler
Table 5: Values related to experimental and theoretical distribution

$F_M(m)$ Gözlenen	$F_M(m)$ Beklenen	Fark Değerleri
0.6170	0.5507	0.0663
0.8865	0.8347	0.0518
0.9504	0.9392	0.0112
0.9858	0.9776	0.0082
0.9929	0.9918	0.0011
0.9929	0.9955	-0.0026
1.0000	0.9983	0.0017

Yukarıdaki Tablo 5'e göre deneysel dağılım ile kuramsal dağılımın birbirine yakın değerler verdikleri söylenebilir. Şimdi Tablo 5'ten yararlanarak merkezi İstanbul olan 100 km yarıçaplı alanda gerçekleşmiş depremlerin deprem dönüş zamanı yani tekrarlanma periyodunu hesaplayalım. Bu doğrultuda beklenen birikimli olasılıklar, m büyüklüklü depremin meydana gelme olasılıkları, yıllık beklenen sıklıklar bulunmuş, deprem dönüş zamanlarına ait hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6: Çeşitli büyüklüklerdeki depremlerin dönüş zamanları
Table 6: Return times of earthquakes of various magnitudes

Deprem büyüklükleri	$F_M(m)$	$f_M(m)$	Yıllık beklenen sıklık	Ortalama tekrarlanma süresi (yıl)
$4.0 \leq m \leq 4.4$	0.5507	0.5507	0.6637	1.5068
$4.5 \leq m \leq 4.9$	0.8347	0.284	0.3423	2.9218
$5.0 \leq m \leq 5.4$	0.9392	0.1045	0.1259	7.9405
$5.5 \leq m \leq 5.9$	0.9776	0.0384	0.0463	21.6090
$6.0 \leq m \leq 6.4$	0.9918	0.0142	0.0171	58.4357
$6.5 \leq m \leq 6.9$	0.9955	0.0037	0.0045	227.2668
$m \geq 7.0$	0.9983	0.0028	0.0034	296.3526

Tablo 6'da verilen sonuçlara göre 7.0 ve daha büyük magnitüdü bir depremin 296 yıl içerisinde tekrarlanacağı söylenebilir. Bu, 7.0 ve daha büyük magnitüdü yaşanmış en son depremden sonra 296 yıl içerisinde tekrar yaşanabileceği anlamına gelmektedir.

4. SONUÇ

1999 yılında yaşanan İzmit depremi, İstanbul merkezli olmasa da İstanbul'da da etkileyen büyük bir depremdir. Kentte birçok bina hasar görmüş ve yıkılmış, ulaşım yolları hasar görmüş ve toplumsal panik yaşanmıştır. Geçmişte yaşanmış büyük depremlerin bıraktığı olumsuz etkilerin tekrarlanmaması için tedbir alınabilecek zaman önerisi önemlidir.

Türkiye'nin en büyük nüfusa sahip şehri olan İstanbul, KAF hattının yıkıcı gücüyle karşı karşıyadır. Bu yıkıcı güç bölgesel olmasına karşın Türkiye genelinde sosyolojik, ekonomik ve psikolojik birçok etkiye yol açacaktır. Geçmişte yaşanmış yıkıcı depremlerden alınan ders ile bu etkilerin en az hasarla atlatılabilmesi önemlidir.

İstanbul merkezli 7.0 ve daha büyük magnitüdü yaşanmış en son deprem aletsel zaman öncesidir. 1766 yılında olduğu düşünülen 7.0 büyüklüğündeki İstanbul depremi, İstanbul'un tarihindeki en yıkıcı ve büyük doğal felaketlerden biri olarak kayıtlara geçmiştir. Çeşitli bilimsel yaklaşımlarla depremlerin geri dönüş zamanlarına yönelik değerlendirmeler yapılabilir. Bu çalışmada başlıca bilimsel yöntemlerden biri olan istatistiksel deprem geri dönüş tahmin modeli ele alınmıştır.

Literatürde incelenen Weibull, gama, Gumbel ve ötelenmiş üstel dağılımlarının deprem geri dönüş zamanı tahmininde, diğer dağılımlara kıyasla daha doğru sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, söz konusu dağılımlar istatistiksel testler ve görsel analizler kullanılarak karşılaştırılmış; veri seti için en uygun dağılım tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, çeşitli sınıflar için deprem geri dönüş zamanları hesaplanmıştır. Ayrıca, çalışmanın literatürdeki diğer çalışmalardan ayrılan en önemli özelliği, KAF hattının Marmara Denizi'nden geçen kısmı ve kırılması beklenen fayı içeren bölgeyi kapsayan; İstanbul merkezli 100 km yarıçaplı alandaki, aletsel zaman da kaydedilmiş tüm deprem verileri kullanılarak geri dönüş zamanı tahmininin gerçekleştirilmesidir.

Merkezi İstanbul olan 100 km yarıçaplı alanda aletsel dönemde gerçekleşmiş ve büyüklüğü $M \geq 4.0$ olan 141 veri ile çalışılmıştır. Deprem büyüklüğü rastgele değişkeninin ötelenmiş üstel dağılımına iyi uyum sağlayabileceği değerlendirilerek, ki-kare uyum iyiliği testi ile M rastgele değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu, $\lambda = 2$ ve $\theta = 4.0$ olan ötelenmiş üstel dağılım olduğu belirlenmiştir. Farklı büyüklüklerdeki depremlerin geri dönüş zamanlarına dair tekrarlanma yılı tahmini üzerine çalışılmıştır. Bu incelemeler sonucunda, $4.0 \leq m \leq 4.4$ büyüklüğündeki bir depremin ortalama tekrarlanma yılının 1.5 yıl olduğu hesaplanmıştır. Örneğin bu aralıkta yaşanan en son deprem Mart 2023 tarihinde yaşanmış olsun. Bu analiz sonucunda bir sonraki $4.0 \leq m \leq 4.4$ büyüklükleri aralığındaki depremin Eylül 2024'e kadar yaşanacağı söylenebilmektedir. Benzer olarak 7.0 ve üzeri büyüklüğündeki bir deprem için ortalama tekrarlanma süresi 296 yıl olduğu sonucuna varılmıştır. İstanbul merkezli 7.0 ve üzeri büyüklükte yaşanan en son depremin aletsel zaman öncesi verileri ile 1766 yılında olduğunu göz önüne alırsak, bu sınıf değeri için bir sonraki depremin 2062 yılına kadar yaşanabileceği söylenebilmektedir.

Depremin nerede ve ne zaman olduğu bilinmese bile yaşananlar dikkate alınarak beklenen hasar en aza indirilebilir. Ayrıca, eldeki bilgiler istatistiksel yöntemlerle değerlendirilerek depremin belirsizliği açıklanmaya çalışılabilir. Bu bilgiler doğrultusunda kentsel dönüşüm, bütçe planlaması, deprem gerçekliğinin ve bilinçlenmenin hızlandırılması gibi tedbirlerle oluşacak hasarı en aza indirilebilecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hayata geçirilmesine vesile olan, bilimsel araştırmaları teşvik eden ve genç araştırmacıların yolunu açan TÜBİTAK'a, "TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı" çerçevesinde sunduğu değerli destek ve fırsatlar için en derin şükranlarımızı sunarız.

KAYNAKLAR

- Alashan S., Akbayram K., Nemetli 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(2023/2), 1-18.
- Akın F.G., 2020. Poisson, Üstel ve Gumbel Uç Değerler Dağılım Modelleri Kullanılarak Batı Anadolu Bölgesi'nin Depremselliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 82 s.
- Akyol N., Palas F., Sındırcı P., 2012. Türkiye Batı Anadolu Depremleri İçin Büyüklük-Frekans İlişkisinin İstatistiksel Analizi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(1), 39-54.
- Apostol B.F., 2006. A Model of Seismic Focus and Related Statistical Distribution of Earthquakes, *Physics Letters A*, 357(6), 462-466.
- Bağcı G., 2000. Deprem Öncesi Sismisite: Kuzey Anadolu Fayı'nın Batı Kesiminin Depremselliği ve Risk, (İçinde: 17 Ağustos 1999 İzmit Körfezi Depremi Raporu, Editör: Ramazan Demirtaş), Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Barka A., 1993. Erzincan Baseni Çevresinin Tektoniği ve 13 Mart 1992 Depremi, 2. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Deprem Mühendisliği Türkiye Millî Komitesi, İTÜ Yapı ve Deprem Uyg-Ar Mrk., 259-270.
- B.Ü. KRDAE, 2009. İstanbul İli Olası Deprem Kayıp Tahminlerinin Güncellenmesi Projesi Sonuç raporu, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Deprem Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 305 s.
- B.Ü. KRDAE, 2015. Marmara Denizi Depremi Basın Bülteni, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi.
- B.Ü. KRDAE, 2025. Magnitüd/Şiddet Karşılaştırması, Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Erişim adresi: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/bilgi/xMercalli.htm>.
- Çobanoğlu İ., Bozdağ Ş., Dinçer İ., Erol H., 2006. Statistical Approaches to Estimating the Recurrence of Earthquakes in the Eastern Mediterranean Region, *İstanbul Üniv. Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi*, 19(1), 91-100.
- Ferrás S.G., 2005. A probabilistic prediction of the next strong earthquake in the Acapulco-San Marcos segment, Mexico, *Geofísica Internacional*, 44(4), 347-353, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Flerit F., Armijo R., King G.C.P., Meyer B., Barka A., 2003. Slip Partitioning in the Sea of Marmara Pull-Apart Determined From GPS Velocity Vectors, *Geophysical Journal International*, 154(1),1-7. July 2003, <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01899.x>.
- İslamoğlu S., 2024. Weibull-Üstel Karma Modeli: Deprem Tekrarlama Aralıklarının Hesaplanması İçin Yeni Bir Yaklaşım, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, 31 s.
- İşçi P.D.C., 2008. Deprem Nedir ve Nasıl Korunuruz, Yaşar Üniversitesi E-Dergisi, 3(9), 959.
- Kagan Y.Y., 2010. Statistical Distribution of Earthquake Numbers: Consequence of Branching Process, *Geophysical Journal International*, 180(3), 1313-1328.
- Kagan Y.Y., Schoenberg F., 2001. Estimation of the Upper Cut-off Parameter For the Tapered Distribution, *Journal of Applied Probability*, 38A, 901-918.
- Kalafat D., Tahaoglu A.M., Işıkara A.M., 2001. 9 Ağustos 1992 Saros-Marmara Depremi, Türkiye 14. Jeofizik Kurultayı ve Sergisi Genişletilmiş Sunu Özetleri Kitabı, 103-106.
- Kartal R.F., Kadiroğlu F.T., Zünbül S., 2015. Kuzey Anadolu Fay Zonunun Kinematığı, AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı.
- Kasap R., Gürten Ü., 2003. Deprem Magnitüdüleri İçin Tekrarlanma Yıllarının Elde Edilmesi: Marmara Bölgesi Örneği, *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 4, 157-166.
- Köker İ., Yazan A., 2019. İstanbul Beklenen 'Büyük Depreme' Hazır mı?, BBC News Türkçe, Haberler, Erişim adresi: <https://www.bbc.com/turkce/haberler-turkiye-49342666>.
- Köle M.M. 2016. Çankırı İli İçin Deprem Olasılık Tahmini, Çankırı Karatekin Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 7(1), 455-470.
- Lombardi A.M., Marzocchi W., 2007. Evidence of Clustering and Nonstationarity in the Time Distribution of Large Worldwide Earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, 112, 1-15.
- Özmen B., Nurlu M., 1999. Deprem Bölgesel Haritası ile İlgili Bazı Bilgiler, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Haber Bülteni, 99/2-3, 32-35.
- Öztürk S., Bayrak Y., Çınar H., Koravos G., Tsapanos T., 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.
- Parsons T., Barka A., Toda S., Stein R.S., Dieterich J.H., 2000. Influence of the 17 August 1999 Izmit Earthquake on Seismic Hazards in Istanbul, In: *The 1999 Izmit and Düzce Earthquakes: Preliminary Results*, Editors: A. Barka, O. Kozacı, S. Akyüz & E. Altunel, İstanbul: İTÜ Yayınları, 295-310.

Pisarenko V.F., Sornette D., 2004. Statistical Detection and Characterization of a Deviation From The Gutenberg-Richter Distribution Above Magnitude 8, Pure and Applied Geophysics, 161, 839-864.

Shimazaki K., 2002. Long-term Probabilistic Forecast in Japan and Time-Predictable Behavior of Earthquake Recurrence, (In: Seismotectonics in Convergent Plate Boundaries, Editors: Fujinawa Y., & Yoshida A., 37-43.

Toyganözü C., Balcı Ç., 2014. Deprem Verilerinin Ekstrem Değer Teorisi ile İstatistiksel Analizi: Göller Bölgesi Örneği, Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi A: Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik, 15(2), 105-112.

Utsu T., 2002. List of Deadly Earthquakes in the World: 1500-2000, International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology Part A, Academic Press, 691-717.

ARAŞTIRMA VERİSİ (Research Data)

Bu çalışma kapsamında kullanılan deprem verileri, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (BDTİM)'nden elde edilmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ (Conflict of Interest / Relationship)

Bu çalışmada, herhangi bir çıkar çatışması ya da özel bir ilişki bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI (Author Contributions)

- Çalışmanın tasarlanması (Designing of the study): B.B.T.
- Literatür araştırması (Literature research): B.B.T.
- Saha çalışması, veri temini/derleme (Fieldwork, collection/ compilation of data): B.B.T., B.D.
- Verilerin işlenmesi/analiz edilmesi (Processing/analysis of data): B.B.T.
- Şekil/Tablo/Yazılım hazırlanması (Preparation of figures/ tables/software): E.E., B.B.T.
- Bulguların yorumlanması (Interpretation of findings): B.B.T., E.E.
- Makale yazımı, düzenleme, kontrol (Writing, editing and checking of manuscript): E.E., B.B.T., M.H.P., B.D., B.Y.