

Türkiye’de Deprem Tekrarlanma Zamanının Tahmini ve Neotektonik Bölgelere Göre DepremSELLİĞİN Markov Zinciri ile İncelenmesi

Gamze Özel^{1,*} ve Aysun Solmaz¹

¹Hacettepe Üniversitesi, İstatistik Bölümü, 06800 Beytepe, Ankara, Türkiye

*Corresponding author: gamzeozl@hacettepe.edu.tr

Özet. Markov zinciri, olasılıksal (stokastik) süreçlerde uygulanan bir olasılık modeli olup sismoloji, biyoloji, meteoroloji, hidroloji vb. bilim dallarında olayların meydana geliş olasılıklarının incelenmesinde kullanılmaktadır. Bu model başlangıç ve geçiş olasılıkları hesaplanarak bir olayın modellenmesi ve tahmini için de kullanılmaktadır. Bu olasılıklar, deprem modellenmesinde kullanılabilir önemli bilgiler taşımaktadır. Türkiye’nin büyük bir bölümü sıklıkla depreme maruz kaldığı için bu çalışmada Kandilli Rasathanesi kayıtlarına dayanan 108 yıllık deprem verisine Markov zinciri yaklaşımı uygulanmıştır. Ayrıca deprem büyüklüklerinin ve tekrarlanma yıllarının tahmini de yapılmıştır

Anahtar Kelimeler. Deprem modelleme, sismik risk, Markov zinciri, başlangıç olasılığı, geçiş olasılığı.

Abstract. The Markov chain is a probabilistic model used with stochastic processes in many branches of science such as seismology, biology, meteorology and hydrology. This model is utilized to evaluate modeling of an event and allows the use of combinatorial probability estimates including initial and transitional probabilities. These probabilities contain useful information that can be used in earthquake modelling. In this paper, the Markov chain approach is applied to 108 years of earthquake data recorded at Kandilli Observatory since a significant portion of Turkey is subject to frequent earthquakes.

Keywords. Earthquake modeling, seismic hazard, Markov chain, initial probability, transitional probability.

1. Giriş

Deprem parametrelerinin olasılığa bağlı olarak tanımlanmasına sismik risk adı verilmektedir. Günümüzde sismik riskin değerlendirilmesi için deterministik ve olasılıksal modellerden yararlanılmaktadır. Depremlerin yer, zaman ve büyüklüğe göre rastgelelik göstermesi, sismik risk analizinde kullanılan modellerdeki bazı belirsizlikler (deprem kayıtlarındaki bazı eksiklikler gibi) ve olasılıksal modellerin bu belirsizlikleri

Received May 7, 2012; accepted February 5, 2013.

dikkate alması nedeniyle sismik riskin olasılıksal yöntemlerle tahmini daha uygundur [1]. Sismik tehlikenin tahmininde kullanılan ilk modeller depremlerin zaman ve yer bakımından bağımsız oldukları varsayımına dayanmaktadır. Poisson modeli [1-4] ve uç değer istatistikleri [5-7] bu tür modellerin en yaygın kullanılanlarıdır. Poisson modeli ile risk saptamaları geniş alanlarda iyi sonuç vermekle beraber yerel bir alandaki depremler birbirinden bağımsız sayılamayacağı için yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, Poisson modelinin aksine elastik geri tepme kuramıyla bağlantılı olarak depremlerin zaman boyutunda bağımlılık gösterdiğini varsayan Markov modelinin deprem çalışmalarında kullanılması önerilmektedir [8, 11]. Markov modeli deprem araştırmalarında ilk kez Hagiwara [10] tarafından şekil değiştirme enerjisinin açığa çıkma mekanizmasında, Kremidjian ve Anagnos [11], Grivas v.d. [12] tarafından deprem oluşumunu açıklamak için kullanılmıştır. Yer kabuğunda meydana gelen hareketler kayaçlarda gerilmelere neden olmaktadır. Kayaçlar belirli bir gerilmeye kadar dayanmakta ve daha sonra kırılmaktadır. Depremler bu kırılmalar nedeniyle oluşmakta ve kayalarda birikmiş olan gerilmelerin tümünün veya bir bölümünün giderilmesini sağlamaktadır. Geçmiş depremlerde bu gerilmelerin hangi oranda giderildiği, daha sonraki depremlerin oluş zamanlarını ve şiddetlerini etkilemektedir. Bu nedenle gelecekteki depremler geçmişteki depremlere bağlı olmaktadır [13]. Markov modelinin belirli bir alanda ve aynı yapısal özellikteki bölgelere uygulanması, depremlerin sıralanışlarındaki bağımlılık özelliğinden, diğer bir deyişle, bir depremin kendisinden bir önceki depreme bağımlı olmasından dolayı yararlıdır.

Türkiye, dünyanın üç önemli deprem kuşağından biri olan Alp-Himalaya (Akdeniz) deprem kuşağı üzerinde yer aldığı için değişik büyüklüklerde, çok sık olarak deprem yaşayan bir ülkedir. Bugüne kadar yaşanan depremlerle, toplam can kaybı sıralamasında Çin, Japonya ve İtalya'dan sonra gelmekte, ancak, can kaybına yol açan depremlerin yıl olarak tekrarında 0.9 değeri ile birinci sırada yer almaktadır. Türkiye'de yapılan sismik risk analizi araştırmalarında Poisson dağılımı ve uç değer istatistikleri Altınok [14] tarafından 1904-1992 yılları arasındaki Kuzey Anadolu fay hattı deprem verileri için kullanılmıştır. Buna göre, deprem oluşumunu sadece zaman boyutunda inceleyen olasılıksal modeller $5.4 \leq M \leq 5.6$ büyüklüğündeki depremler için farklı risk tahminleri verirken, $M \geq 5.6$ büyüklüğündeki depremler için bu tahminler yaklaşık olarak aynı sonucu vermiştir. Ayrıca, Özel ve İnal [15] tarafından Türkiye'de 1903-2005 yılları arasında meydana gelen $M \geq 5.0$ büyüklüğündeki yıkıcı depremlerin artçı şokları birleşik Poisson süreci ile incelenmiştir. 1903-2010 yılları arasındaki yıkıcı depremlerin öncü ve artçı şokları iki değişkenli

birleşik Poisson süreçleri ile Türkiye'nin neotektonik bölge yapısı dikkate alınmadan Özel [16] ve dikkate alınarak Özel [17] tarafından modellenmiştir. Neotektonik bölgelere bağlı olarak elde edilen sonuçların daha güvenilir olduğu görülmüştür. Markov modeli kullanarak Türkiye'nin depremselliği üzerine yapılan bazı çalışmalar da bulunmaktadır. 1920-1986 yılları arasında Ege Bölgesi'nde meydana gelen ve büyüklüğü beşten fazla olan depremler Pınar v.d. [18] tarafından ve 1908-1998 yılları arasında Çukurova Bölgesi'ndeki deprem tehlikesi Ulutaş ve Özer [19] tarafından incelenmiştir. Kuzey Anadolu Fay Zonu'nda (KAFZ) 1900-1986 yılları arasında meydana gelen büyüklüğü 5.5 üzerinde olan depremlere Altınok [14] tarafından semi-Markov modeli uygulanmıştır. Ayrıca, Ünal [20] tarafından 1901-2006 yılları arasında büyüklüğü $M \geq 4$ olan deprem verilerine Markov modeli uygulanarak deprem riski tahmin edilmiştir.

Türkiye'de üç neotektonik rejim aynı zaman diliminde fakat farklı neotektonik bölgelerde etkinliklerini sürdürmektedir. Bu nedenle Türkiye'de depremlerin niteliği ve etkileme biçimi bölgelere göre farklılık göstermektedir. Neotektonik yapıların en önemlisi diri faylar olup, bunlar Türkiye'deki depremlerin ana kaynağıdır. Türkiye'deki diri fayların dağılımı Anadolu Levhası ve yakın çevresini etkileyen neotektonik dönem süreçleriyle ilişkili olup, fayların nitelikleri, dolayısı ile ürettikleri depremlerin özellikleri buldukları neotektonik bölgeye bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle deprem tehlikesi ve deprem riski değerlendirmelerinde diri fayların özelliklerinin yanı sıra bölgesel neotektonik rejimin türü, bu rejimin etkin olduğu neotektonik bölge ve bu bölgede oluşmuş olan neotektonik birim ve yapıların da bilinmesi gerekir. Ancak Türkiye'de neotektonik yapılar göz önünde bulundurularak Markov zinciri ile deprem riski analizi üzerine yapılan herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada 1903-2011 yılları arasında Türkiye'de meydana gelen depremler neotektonik bölge yapılarına bağlı olarak gruplanmış ve Markov zinciri yardımıyla Türkiye'nin depremselliği incelenmiştir. Ayrıca çalışmada yıkıcı depremlerin ortalama tekrarlanma süreleri tahmin edilmiştir.

2. Metodoloji

2.1. Deprem büyüklüğünün analizi. Bu bölümde deprem büyüklüğü raslantı değişkeninin fonksiyonunun belirlenmesi ve buna bağlı olarak depremlerin tekrarlanma süresinin tahmini ile ilgili yöntemler üzerinde durulacaktır. Sismik tehlike analizinde deprem büyüklüğünü gösteren M raslantı değişkeni için bir θ alt sınır

değeri belirlenmekte ve bu alt sınır değerinden daha küçük büyüklükteki depremler mühendislik yapılarında bir hasar yaratmayacaklarından, sismik tehlike analizinde dikkate alınmamaktadır. Ayrıca, θ 'dan daha küçük depremler için istatistiksel veriler çoğu kez güvenilir değildir. Buna göre, deprem büyüklüğünü gösteren M raslantı değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıda verilen üstel fonksiyondur:

$$f(M) = \lambda e^{-\lambda(M-\theta)}, \quad \theta \leq M \leq \infty \quad (1)$$

Burada, \bar{M} depremlerin ortalama büyüklüğünü göstermek üzere,

$$\lambda = (\bar{M} - \theta)^{-1} \quad (2)$$

olarak tanımlıdır [21]. Eşitlik (1)'de verilen olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılarak M raslantı değişkeninin dağılım fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir:

$$F(M) = \int_{R_M} \lambda e^{-\lambda(M-\theta)} dM = -e^{-\lambda(M-\theta)}. \quad (3)$$

Depremlerin tekrarlanma ya da geri dönüş sürelerini bulabilmek için yıllık beklenen deprem sayısının bulunması gerekmektedir. Yıllık deprem sayısı, M büyüklüğündeki depremin meydana gelme olasılıkları ile \bar{M} 'nin çarpılması ile elde edilir. Depremin tekrarlanma yılı ise, $1/(\text{yıllık beklenen deprem sayısı})$ oranından bulunabilir. Buna göre,

$$\text{Tekrarlanma yılı} = 1/(\text{bir yılda beklenen deprem sayısı}) \quad (4)$$

yazılabilir [21].

2.2. Depremlerin Markov zinciri ile analizi. Günümüzde fiziki, biyolojik, sosyal bilimler ve mühendislik gibi birçok alanda uygulanan Markov süreçleri, Markov tarafından tanımlanmıştır [22]. Markov süreçlerinin temel özelliği, Poisson sürecinin aksine, bir durumdan diğer duruma geçiş olasılığının, sistemdeki daha önceki durumlara bağlı olmayıp, yalnızca bir önceki durumuna bağlı olmasıdır.

T , dizin (indeks) kümesini göstermek üzere, X_t raslantı değişkeninin herhangi bir $t \in T$ zamanında aldığı her değere durum adı verilsin. Tüm olası durumların oluşturdukları kümeye de durum uzayı adı verilsin ve S ile gösterilsin. Buna göre $\{X_t, t \in T\}$ biçiminde gösterilen bir olasılıksal süreç, S durum uzayında tanımlı ve T zaman indeksli raslantı değişkenler kümesidir. Dizin kümesindeki n sayıda zaman noktasının herhangi bir $t_1 < \dots < t_n$ kümesi için, $X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_n}$ 'in verilen değerlerine göre $X_{t_{n+1}}$ 'nin koşullu dağılımı yalnızca X_{t_n} 'in değerlerine bağlı ise,

$\{X_t, t \in T\}$ sürecine Markov süreci adı verilir. Buna göre, herhangi gerçel x_1, \dots, x_n sayıları için, Markov eşitliği aşağıdaki gibidir:

$$P(X_{t_{n+1}} = x_{n+1} | X_{t_1} = x_1, \dots, X_{t_n} = x_n) = P(X_{t_{n+1}} = x_{n+1} | X_{t_n} = x_n). \quad (5)$$

Markov zincirleri, Markov süreçlerinin özel bir durumudur ve bir olasılıksal sürecin zaman boyunca içinde bulunabileceği farklı durumlar arasında yaptığı hareketlerin incelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [23]. Bir başka deyişle, Markov özelliğine sahip bir olasılıksal sürecin durum uzayında $S = \{0, 1, \dots, m\}$ biçiminde sonlu sayıda ya da $S = \{0, 1, 2, \dots\}$ biçiminde sayılabilir sonsuzlukta durum varsa, Markov zinciri söz konusudur. Markov zincirleri, işletme problemlerinde stok, planlama, işgücü tahmini, pazar payı ve performans analizleri, personel yönetimi, hisse senedi fiyat değişimleri, alacak yönetimi gibi konularda kullanılmaktadır. Ayrıca tasarım, optimizasyon, kuyruk kuramı uygulamaları, güvenilirlik çalışmaları, kalite kontrolde de model kurma ve çözümleme olanağı sağlamaktadır [24, 25].

Bir Markov zincirinde sistemin bir durumdan diğer duruma geçmesine neden olan olayların zaman içerisinde belirli bir zaman aralıklarında veya sürekli ortaya çıkmasına göre Markov zincirleri, kesikli veya sürekli Markov zincirleri olarak ikiye ayrılır. $\{X_n, n = 0, 1, 2, \dots\}$ kesikli parametrelili bir Markov zinciri olsun. Herhangi bir anda sistem belirli bir olasılık dağılımına bağlı olarak kendi durumundan başka bir duruma geçebilir veya aynı durumda kalabilir. Sistemin bu durum değişiklikleri geçiş olarak adlandırılmakta ve durum uzayındaki herhangi i ve j durumları için,

$$p_{ij}(m, n) = P(X_{m+n} = j | X_m = i) \quad (6)$$

biçimindeki koşullu olasılığa geçiş olasılığı adı verilmektedir. Eşitlik (6)'da verilen m . adımda i durumunda bulunan sürecin n adım sonra j durumunda bulunması olasılığı yalnızca n zaman aralığına bağlı, m zamanına bağlı değilse, homojen Markov zinciri söz konusudur. Başka bir deyişle, homojen bir Markov zincirinde geçiş olasılığı yalnızca adım sayısının bir fonksiyonu olup, m zamanına bağlı değildir. Bu çalışmada homojen Markov zincirleri kullanılarak deprem verisinin analizi yapılmıştır. Homojen bir Markov zinciri, gelecekteki deprem olaylarının geçmiş depremlere bağımlı olduğu varsayımını öngören elastik geri tepme kuramına uymaktadır. Homojen bir Markov zincirinde bir-adım geçiş olasılığı aşağıdaki gibidir:

$$p_{ij}(1) = p_{ij}^{(1)} = P(X_{m+1} = j | X_m = i). \quad (7)$$

Bir Markov zincirinde bir-adım geçiş olasılıklarının oluşturdukları matrise geçiş matrisi adı verilmekte ve \mathbf{P} ile gösterilmektedir. Geçiş matrisi, verilen bir durumda bulunan sistemin bir olay sonucunda hangi olasılıkla hangi duruma geçeceğini göstermektedir. Durum uzayı $S = \{0, 1, 2, \dots\}$ biçiminde sayılabilir sonsuzlukta duruma sahip ise geçiş matrisi aşağıdaki gibidir:

$$\mathbf{P} = [p_{ij}] = \begin{array}{c} \text{Şimdiki Durum} \\ \begin{array}{c} 0 \\ 1 \\ 2 \\ \vdots \\ \cdot \end{array} \end{array} \begin{array}{c} \text{Gelecek durum} \\ \begin{array}{c} 0 \quad 1 \quad 2 \quad \dots \quad \cdot \\ \left[\begin{array}{cccccc} p_{01} & p_{02} & p_{03} & \dots & \cdot \\ p_{11} & p_{12} & p_{13} & \dots & \cdot \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \end{array} \right] \end{array} \end{array} \quad (8)$$

Eşitlik (8)'de geçiş matrislerinde satırlar olay öncesinde, sütunlar ise olay sonrasında sistemin bulunabileceği tüm olası durumları göstermektedir. Markov zincirinin en önemli varsayımlarından birisi tek adımda geçiş matrisinin zaman içerisinde değişmediği varsayımdır. p_{ij} olasılıklarının, $\forall i$ için $\sum_j p_{ij} = 1$ ve $\forall i, j$ için $p_{ij} \geq 0$ koşullarını da sağlaması gerekmektedir. Homojen bir Markov zincirinde n -adım geçiş olasılığı aşağıdaki gibidir:

$$p_{ij}(n) = p_{ij}^{(n)} = P(X_{m+n} = j | X_m = i). \quad (9)$$

Eşitlik (5)'teki n -adım geçiş olasılıklarını hesaplamak için Chapman-Kolmogorov denklemi kullanılmaktadır [26]. Bu denkleme göre,

$$\mathbf{P}^{(n)} = \mathbf{P}^{(n-1)}\mathbf{P} = \mathbf{P}^{(n)} \quad (10)$$

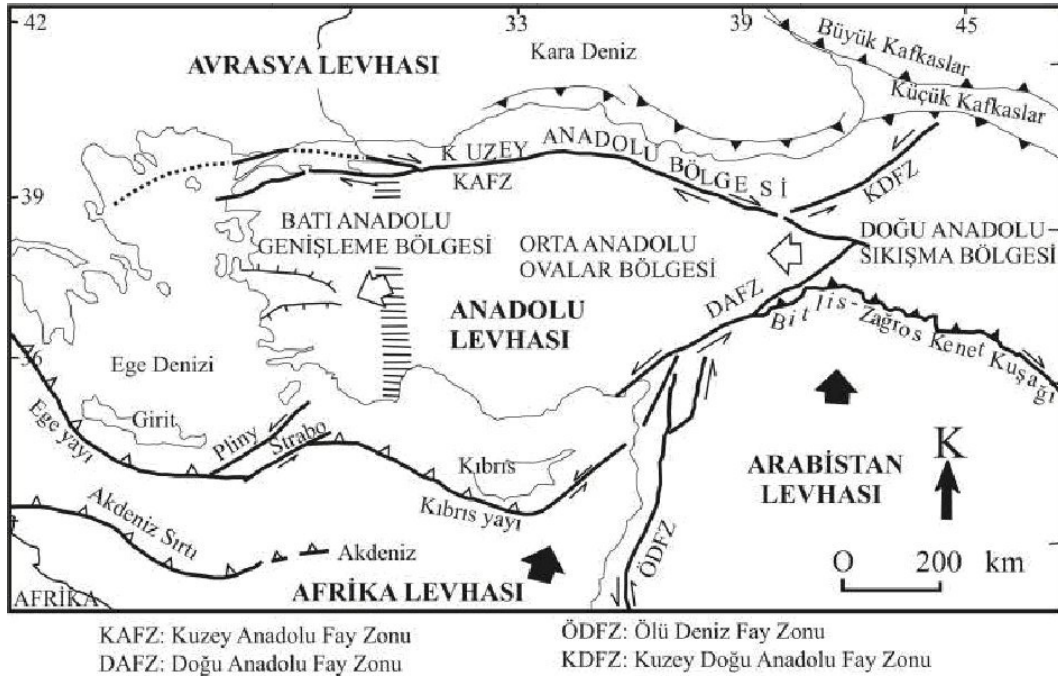
eşitliği yazılabilir. Burada $\mathbf{P}^n = [p_{ij}^n]$, n -adımlık geçiş matrisini göstermekte ve Eşitlik (5)'teki n -adım geçiş olasılıklarından oluşmaktadır. Eşitlik (6)'ya göre, (n) adım geçiş olasılıkları matrisi \mathbf{P} matrisinin kendisi ile n defa çarpılmasıyla elde edilmektedir. Homojen bir Markov zincirinde sistemin başlangıçtaki durumu, π_0 olasılık satır vektörü ile gösterilirse n -adım sonraki durumu,

$$\pi_n = \pi_0 \mathbf{P}^n, \quad n = 1, 2, \dots \quad (11)$$

eşitliğinden elde edilir [22].

3. Bulgular

Neotektonik bölgeler farklı kabuk deformasyonlarıyla temsil edilen farklı bölgeler olup, her neotektonik bölge farklı bir sismojenik bölgeye karşılık gelmekte, o neotektonik bölgede yer alan diri faylar da (deprem kaynakları da) farklı kinematik nitelikler göstermektedir. Böylece depremlerin oluş mekanizması ve niteliği de bölgeden bölgeye değişmektedir. Şengör [26] tarafından Türkiye ve yakın çevresi üç ana neotektonik bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgeler, Doğu Anadolu Sıkışma Bölgesi, Batı Anadolu Genişleme Bölgesi ve Orta Anadolu Ovalar Bölgesi'dir. Türkiye ve yakın çevresinin neotektonik sınıflamasını gösteren neotektonik harita Şekil 1'deki gibidir:



ŞEKİL 1. Türkiye ve yakın çevresinin neotektonik sınıflamasını gösteren yalınlaştırılmış neotektonik haritası (Şengör [26]).

Bu çalışmada, 28.04.1903-09.11.2011 tarihleri arasında Türkiye'de büyüklüğü $M \geq 5.0$ olan depremler Şekil 1'de verilen neotektonik bölge yapısına bağlı olarak üç gruba ayrılarak incelenmiştir. I. Bölge, Isparta üçgeninden kabaca kuzey-güney yönlü bir hattın batısında kalan bölge olup, Batı Anadolu Genişleme bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Bu bölge kuzey-güney yönlü gerilme etkisi altındadır. II. Bölge, Orta Anadolu Ovalar Bölgesi olup kuzeyde KAFZ ve güney doğuda DAFZ ile sınırlı ve Karlıova eklemine doğusunda kalan bölgedir. III Bölge ise, KAFZ ve DAFZ'nin kesiştiği Karlıova kavşağının doğusunda ve Bitlis-Zagros kenet kuşağının

kuzeyinde kalan bölge Doğu Anadolu Sıkışma bölgesini oluşturmaktadır. Bu bölge kuzey-güney yönlü sıkışma tektoniği altında deforme olmaktadır. Bu bölgelerdeki deprem büyüklüğüne dayanan deprem sayıları Tablo1’de verilmiştir:

TABLO 1. Büyüklüğüne göre Türkiye’de meydana gelen depremlerin dağılımı.

Büyüklük	I. Bölge	II. Bölge	III. Bölge
5.0 - 5.4	10	8	6
5.5 - 5.9	14	16	7
6.0 - 6.4	10	9	4
6.5 - 6.9	7	5	8
7.0 - 7.4	2	6	2
7.5 - 7.9	0	3	1
Toplam	43	47	28

Tablo 1 incelendiğinde, en fazla yıkıcı depremin II. Bölge’de ve en az yıkıcı depremin III. Bölge’de meydana geldiği görülmektedir. Bu bölgelerde meydana gelen depremlerin büyüklüklerine ait sıklık dağılımı ise Tablo 2’de verilmiştir:

TABLO 2. 28.04.1903-09.11.2011 tarihleri arasında meydana gelen depremlerin büyüklüklerine göre sıklık dağılımı.

Sınıf No	Sınıf	Alt Sınır	Sınıf Değeri	Üst Sınır	Sıklık Sayısı (f)	Yüzde(%)
1	5.0 - 5.4	5.0	5.2	5.4	24	0.2034
2	5.5 - 5.9	5.5	5.7	5.9	37	0.3136
3	6.0 - 6.4	6.0	6.2	6.4	23	0.1949
4	6.5 - 6.9	6.5	6.7	6.9	20	0.1695
5	7.0 - 7.4	7.0	7.2	7.4	10	0.0847
6	7.5 - 7.9	7.5	7.7	7.9	4	0.0339

28.04.1903-09.11.2011 tarihleri arasındaki büyüklüğü $M \geq 5.0$ olan 118 depremin büyüklüklerinin üstel dağılıma uygun olup olmadığı incelenmiştir. Bu çalışmada θ kabul edilen en küçük değer, Tablo 2’de verilen ilk sınıfa ait sınıf değeri olarak alınmıştır ($\theta = 5.2$). Diğer bir deyişle, Türkiye’de meydana gelen ve büyüklüğü 5.2’den fazla olan depremlerin sismik tehlike olarak değerlendirilebileceği söylenebilir. Çalışmada incelenen bölgelerdeki deprem büyüklüklerine dayanarak ortalama deprem büyüklüğü, $\bar{M} = 6.062$ biçimindedir. Buradan, Türkiye’de meydana gelen depremlerin ortalama olarak altı büyüklüğünde olduğu ve sismik tehlike içerdikleri sonucuna ulaşılabilir. Ayrıca, Eşitlik (2)’den yararlanarak, $\hat{\lambda} = (6.062 - 5.2)^{-1} = 1.16$ olarak bulunmuştur. Buna göre, deprem büyüklüğünü gösteren M raslantı değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu Eşitlik (1)’den aşağıdaki gibidir:

$$f(M) = 1.16 e^{-1.16(M-5.2)}, \quad 5.2 \leq M \leq \infty.$$

Eşitlik (3)'ten M raslantı değişkeninin dağılım fonksiyonu,

$$F(M) = \int_{R_M} 1.16 e^{-1.16(M-5.2)} dM = -e^{-1.16(M-5.2)}$$

olarak bulunmuştur.

Deprem büyüklüğü değişkeninin üstel dağılıma uygunluğunu ki-kare uyum iyiliği testi ile belirleyebilmek amacıyla elde edilen deprem büyüklüklerine ait gözlenen ve beklenen dağılımlar Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'teki gözlenen frekanslar, yüzdelerin birikimli olarak toplanmasıyla bulunmuştur. Ayrıca beklenen birikimli olasılıklar, dağılım fonksiyonunun $\theta = 5.2$ biçimindeki alt sınır değeri ile her sınıfın üst değeri arasında integrali alınarak hesaplanmıştır.

TABLE 3. Deneysel ve kuramsal dağılıma ilişkin değerler.

x	f	Yüzde (%)	$F_M(X)$ Gözlenen	$F_M(X)$ Beklenen	Fark Değerleri
5.2	24	0.2034	0.2034	0.2071	0.0037
5.7	37	0.3136	0.5170	0.5560	0.0390
6.2	23	0.1949	0.7119	0.7514	0.0395
6.7	20	0.1695	0.8814	0.8608	0.0206
7.2	10	0.0847	0.9661	0.9221	0.0440
7.7	4	0.0339	1.0000	0.9564	0.0436

Tablo 3 incelendiğinde gözlenen ve beklenen birikimli olasılıklar arasındaki en büyük fark değeri, 7.2 büyüklüğündeki sınıfa karşılık gelen 0.044 değeri olduğu görülmektedir. Deprem büyüklüğü değişkeninin üstel dağılımlı bir kitleye uygun olup olmadığını test etmek amacıyla kurulan yokluk hipotezi “ H_0 : İncelenen deprem büyüklükleri üstel dağılıma sahip bir kitleden seçilmiştir.” ve seçenek hipotez “ H_S : İncelenen deprem büyüklükleri üstel dağılıma sahip bir kitleden seçilmemiştir.” biçimindedir. Bu hipotezlerin testinde kullanılan test istatistiği değeri $\chi_H^2=0.00946$ ve tablo değeri $\chi_T^2=12.59$ olarak bulunmuştur. Buna göre, Türkiye’de meydana gelen büyüklüğü beş ya da daha çok olan depremlerin kuramsal olarak üstel dağılıma uygun olduğu 0.05 yanılma düzeyinde söylenebilir.

Türkiye’de meydana gelen çeşitli deprem büyüklüklerinin tekrarlanma sürelerini bulabilmek için Tablo 3’ten yararlanılmıştır. Bu amaçla beklenen birikimli olasılıklar, M büyüklüklü bir depremin meydana gelme olasılıkları, yıllık ortalama deprem sayıları ve bunlara ilişkin tekrarlanma süreleri Tablo 4’te verilmiştir:

TABLO 4. Çeşitli büyüklüklerdeki depremlere ilişkin bilgiler.

x	$F_M(X)$	$f_M(X)$	F_i (yıllık beklenen sıklık)	Ortalama tekrarlama süresi (yıl)
5.2	0.2071	0.2071	0.2242	4.4603
5.7	0.5560	0.3489	0.3777	2.6476
6.2	0.7514	0.1954	0.2115	4.7281
6.7	0.8608	0.1094	0.1184	8.4459
7.2	0.9221	0.0613	0.0664	15.0602
7.7	0.9564	0.0343	0.0371	26.9542

Tablo 4 incelendiğinde, Türkiye’de 5.7 büyüklüğünde bir depremin meydana gelme olasılığının yüksek; 7 ve üzerindeki depremlerin meydana gelme olasılıklarının düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca Türkiye’de 7.7 büyüklüğündeki bir depremin yaklaşık olarak 27 yılda ve 5.7 büyüklüğündeki bir depremin 2.5 yılda meydana gelebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Türkiye’de meydana gelen depremlerin Markov zinciri ile analizi için Şekil 1’de verilen Şengör [26]’e ait haritadaki neotektonik bölge yapısı dikkate alınmıştır. Bir deprem katalogunda başlangıç zamanı verildiğinde, herhangi bir Δt zaman aralığında r . bölgenin durumunu gösteren s_r , depremlerin varlığını ya da yokluğunu belirtecek şekilde sırasıyla 0 ya da 1 değerlerini alabilmektedir. Bu çalışmada incelenen üç neotektonik bölge olduğundan, karşılaşılabilecek $2^3 = 8$ durum bulunmaktadır. Tüm durumları gösteren durum uzayı $S = \{0, 1, \dots, 7\}$ olmak üzere, bu durumlar Tablo 5’te verilmiştir:

TABLO 5. Markov zincirine ait olası durumlar.

Durum	Bölge		
	I. Bölge	II. Bölge	III. Bölge
0	0	0	0
1	1	0	0
2	0	1	0
3	1	1	0
4	0	0	1
5	1	0	1
6	0	1	1
7	1	1	1

Tablo 5’e göre, herhangi bir Δt zaman aralığında Türkiye’de hiçbir bölgede deprem olmamışsa 000, yalnızca I. Bölgede deprem olmuşsa 100, ..., tüm bölgelerde deprem olmuşsa 111 olarak kayıt edilmektedir. Geçiş matrisini oluşturabilmek amacıyla tanımlanan durumlar arasında geçen Δt zamanı bir yıl olarak alınmıştır. Buna göre $\Delta t = 1$ yıl için elde edilen geçiş frekanslarına ait matris aşağıdaki gibi bulunmuştur:

$$\text{Frekans} = \begin{matrix} & & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \left[\begin{array}{cccccccc} 26 & 8 & 6 & 1 & 3 & 1 & 1 & 0 \\ 5 & 2 & 1 & 2 & 3 & 1 & 1 & 0 \\ 4 & 2 & 3 & 4 & 1 & 1 & 1 & 2 \\ 2 & 3 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \end{matrix} \quad (12)$$

Buna göre, Eşitlik (12)'de verilen geçiş frekanslarından yararlanarak $\Delta t = 1$ için elde edilen geçiş matrisi aşağıdaki gibidir:

$$\mathbf{P} = \begin{matrix} & & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \left[\begin{array}{cccccccc} 0.5652 & 0.1739 & 0.1304 & 0.0217 & 0.0652 & 0.0217 & 0.0217 & 0 & 0 \\ 0.3333 & 0.1333 & 0.0667 & 0.1333 & 0.2000 & 0.0667 & 0.667 & 0 & 0 \\ 0.2222 & 0.1111 & 0.1667 & 0.2222 & 0.0556 & 0.0556 & 0.0556 & 0.1111 & 0 \\ 0.2222 & 0.3333 & 0.4444 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5000 & 0.1000 & 0.1000 & 0 & 0.1000 & 0 & 0 & 0 & 0.2000 \\ 1000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3333 & 0 & 0.6667 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3333 & 0.6667 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \end{matrix} \quad (13)$$

Eşitlik (13)'te verilen bir-adım geçiş matrisi incelendiğinde yutucu ya da kapalı küme oluşturan durumların olmadığı görülmektedir. Bu nedenle, bu Markov zincirinin indirgenemez bir Markov zinciri olduğu ve bir limit dağılımı olduğu söylenebilir. Diğer bir deyişle, Türkiye'de mevcut deprem dağılımının belirli zaman sonraki durumu elde edilebilir. Limit dağılımı başlangıç olasılıklarından bağımsız olduğu için başlangıçtaki durum ne olursa olsun değişmemektedir. Markov zincirinin uzun dönem sonrasındaki yapısını gösterecek olan limit dağılımını elde edilebilmek için, başlangıç dağılımı,

$$\pi'_0 = [0.125 \quad 0.125 \quad 0.125 \quad 0.125 \quad 0.125 \quad 0.125 \quad 0.125 \quad 0.125] \quad (14)$$

olarak alınmıştır. Limit dağılımı, Eşitlik (11)'deki denklem sisteminin Eşitlik (14)'ten yararlanarak Microsoft Excel yardımıyla çözümlenerek elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, ortalama olarak 20 dönem (yıl) sonunda zincirin limit dağılımına

ulaştığı görülmüştür. Bulunan limit dağılımı aşağıdaki gibidir:

$$\pi'_n = [0.373 \quad 0.134 \quad 0.145 \quad 0.080 \quad 0.084 \quad 0.025 \quad 0.025 \quad 0.033] \quad (15)$$

Eşitlik (15)'ten 20 yıl sonra büyüklüğü beş ve üzerinde bir depremin hiçbir bölgede olmama olasılığı 0.373; yalnızca I. Bölgede olma olasılığı 0.134; yalnızca II. Bölgede olma olasılığı 0.145 olacağı sonucuna ulaşılabilir. Tüm bölgelerde beş ve üzerindeki deprem görülme olasılığı ise 0.033'tür.

Türkiye'de ileriki zaman noktalarında meydana gelebilecek depremlere ait limit dağılımı 2011 yılı başlangıç olarak kabul edilerek tahmin edilmiştir. Eşitlik (14)'teki başlangıç olasılıkları dikkate alınarak, sistemin n dönem sonraki durumu hakkında tahmin yapmak mümkündür. Eşitlik (13)'te verilen bir-adım geçiş matrisinden yararlanarak, durumlar arasında geçen zaman $\Delta t = 1$ yıl olmak üzere, 2012-2015 dönemi için neotektonik bölgelere ait deprem olasılıkları Tablo 6'da verilmiştir:

TABLE 6. 2012-2015 dönemi için deprem olasılıkları.

	0	1	2	3	4	5	6	7
2012	0.396	0.155	0.177	0.092	0.080	0.026	0.026	0.049
2013	0.397	0.148	0.165	0.101	0.091	0.029	0.029	0.036
2014	0.404	0.150	0.165	0.089	0.092	0.028	0.028	0.036
2015	0.405	0.147	0.160	0.090	0.092	0.028	0.028	0.037

Tablo 6 incelendiğinde, Türkiye'de 2012 yılında $M \geq 5$ büyüklüğündeki bir depremin hiçbir bölgede olmama olasılığının 0.396, yalnızca I. bölgede olma olasılığının 0.155; yalnızca II. bölgede olma olasılığının 0.177 olduğu söylenebilir. Zaman noktaları için durumlara ait deprem olasılıkları incelendiğinde, olasılıklar arasında farklılık olmadığı diğer bir deyişle Türkiye'deki deprenselliğin bir dengeye ulaşacağı söylenebilir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, Ünal [20]'in çalışmasına da paralellik göstermektedir. Türkiye'de $\Delta t = 0.07$ yıl (yaklaşık 25.5 gün) için $M \geq 4$ büyüklüğündeki bir depremin hiçbir bölgede olmama olasılığı 0.214 ve yalnızca I. bölgede olma olasılığı 0.155 olarak elde edilmiştir. Diğer bölgeler için de benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Ayrıca Özel ve İnal [16]'ın çalışmasında birleşik Poisson süreci kullanıldığında da yaklaşık olarak $M \geq 5$ üzerinde beklenen bir depremin bir önceki depremden zamandan bağımsız olabilmesi için en az 20 yıllık bir dönem geçmesi gerektiği biçiminde benzer bir sonuca ulaşılmıştır.

4. Sonuç

Bu çalışmada, Türkiye’de, 28.04.1903-09.11.2011 tarihleri arasında ve büyüklüğü $M \geq 5$ olarak kaydedilmiş 118 deprem verisi için çeşitli istatistiksel analizler ile çözümlenmiştir. Öncelikle deprem büyüklüğü değişkeninin yoğunluk ve dağılım fonksiyonu üstel modelden yararlanarak bulunmuştur. Buradan çeşitli büyüklüklerdeki depremlerin meydana gelişlerine ilişkin bazı olasılıklar ve tekrarlanma yılları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Üstel modelin uygunluğu hipotez testi ile desteklenmiştir. Üstel dağılım modelinin genellikle büyüklüğü az olan depremler için daha iyi sonuçlar verdiği göz önüne alındığında, 5.2 büyüklüğünde bir depremin tekrarlanma süresinin 0.2242 yıl olabileceği söylenebilir. Diğer bir deyişle, yaklaşık dört buçuk yılda bir kez 5.2 büyüklüğünde deprem olabileceği şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca elde edilen sonuçlara göre, 7.7 büyüklüğündeki bir depremin ise yaklaşık olarak ortalama 27 yıl sonra tekrarlanabileceği söylenebilir. Depremlerin zaman ve uzay içindeki oluşumlarının birbirinden bağımsız olamayacağı varsayılarak Markov modeli neotektonik bölge yapıları dikkate alınarak deprem oluşumlarına uygulanmıştır. Markov zinciri ile elde edilen sonuçlara göre, yaklaşık 20 yıl sonra Türkiye’deki deprem sisteminin dengeye ulaşacağı, diğer bir deyişle, depremlerin meydana gelme olasılıklarının yıllar geçse de değişmeyeceği sonucuna ulaşılmıştır. 2012 ve 2013 yılında beş ve üzerindeki büyüklükteki bir deprem olma olasılığının 0.4; 2014 ve 2015’te 0.6 olduğu söylenebilir.

Kaynaklar

- [1] C. A. Cornell, Engineering seismic risk analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America* **58** (1968), 1583–1606.
- [2] M. Caputo, Analysis of seismic risk. In: *Engineering Seismology and Earthquake Engineering*, NATO Advanced Study Institutes Series, Series E: Applied Sciences, **3** (1974), 55–86.
- [3] H. C. Shah and M. Movassate, Seismic risk analysis of California State water Project, *Proceedings of the 5th European Conference on Earthquake Engineering, İstanbul, Turkey* **3** (1975), 99–106.
- [4] M. Båth, Seismic risk in Fennoscandia, *Tectonophysics* **57** (1979), 285–295.
- [5] L. Epstein and C. Lomnitz, A model for the occurrence of large earthquakes, *Nature* **211** (1966), 954–956.
- [6] C. Lomnitz, *Global Tectonic and Earthquake Risk*, Elsevier Scientific, Amsterdam, Netherlands 1974.
- [7] L. Knopoff and Y. Kagan, Analysis of the theory of extremes as applied to earthquake problems, *Journal of Geophysical Research* **82** (1977), 5647–5657.

- [8] A. S. Kiremidjian, A minimum stress level model for large high strain energy thresholds corresponding to earthquakes, *Proceeding of 7th ECEE, Athens, Greece* (1982), 32–41.
- [9] S. Suzuki and A. S. Kiremidjian, A random slip rate model for earthquake occurrences with Bayesian parameters, *Bulletin of the Seismological Society of America* **81** (1991), 781–794.
- [10] Y. Hagiwara, A stochastic model of earthquake occurrence and the accompanying horizontal land deformation, *Tectonophysics* **26** (1975), 91–101.
- [11] A. S. Kiremidjian and T. Anagnos, Stochastic slip predictable model for earthquake occurrences, *Bulletin of the Seismological Society of America* **74** (1984), 739–755.
- [12] D. Athanasiou-Grivas, R. Dyvik and J. Howland, An engineering analysis of the seismic history of New York State, *Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering, İstanbul, Turkey* **1** (1980), 324–331.
- [13] V. Gökçe, *Seismicity and Earthquake Hazard Analysis in Southwest of Turkey*, Master Thesis, Süleyman Demirel University, Isparta, Turkey 2007.
- [14] Y. Altınok, Semi-Markov modelinin Kuzey Anadolu Fay Zonu'nda deprem riskine uygulanması, *Jeofizik* **2** (1988), 44–58.
- [15] G. Özel and C. İnal, The probability function of the compound Poisson process and an application to aftershock sequences, *Environmetrics* **19** (2008), 79–85.
- [16] G. Özel, A bivariate compound Poisson model for the occurrence of foreshock and aftershock sequences in Turkey, *Environmetrics* **22** (2011), 847–856.
- [17] G. Özel, On certain properties of a class of bivariate compound Poisson distributions and an application to earthquake data, *Revista Colombiana de Estadística* **34** (2011), 545–566.
- [18] R. Pınar, Z. Akçığ ve F. Demirel, Batı Anadolu depremselliğinin Markov yöntemi ile araştırılması, *Jeofizik* **3** (1999), 56–66.
- [19] E. Ulutaş ve M. F. Özer, Markov modeli kullanılarak Çukurova Bölgesinin deprem tehlikesinin belirlenmesi, *Jeofizik* **14** (2000), 104–105.
- [20] S. Ünal, *Türkiye'de Meydana Gelen Depremlerin Markov Zincirleri ile Modellenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, Turkey 2010.
- [21] R. Kasap ve Ü. Gürlen, Deprem magnitüdüleri için tekrarlanma yıllarının elde edilmesi: Marmara Bölgesi örneği, *Doğuş Üniversitesi Dergisi* **4** (2003), 157–166.
- [22] C. İnal, *Olasılıksal Süreçlere Giriş*, Hacettepe Üniversitesi Yayınları, Ankara, 1988.
- [23] Ö. Önalan, *Stokastik Süreçler*, Avcıol Basım Yayın, İstanbul 2010.
- [24] F. Aparisi and C. J. Diaz, Design and optimization of EWMA control charts for in-control, indifference, and out-of-control regions, *Computers & Operations Research* **34** (2007), 2096–2108.
- [25] D. A. Serel and H. Moskowitz, Joint economic design of EWMA control charts for mean and variance, *European Journal of Operational Research* **184** (2008), 157–168.
- [26] A. M. C. Şengör, *Türkiye'nin Neotektoniğin Esasları*, Türkiye Jeoloji Kurumu, Ankara 1980.