

BATI ANADOLU DEPREM RİSKİNİN SEMİ-MARKOV MODEL İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Evaluation of Earthquake Risk in West Anatolia by Semi-Markov Model

Yıldız ALTINOK*

ÖZET

Bu çalışmada Batı Anadolu'nun 36.00°-39.80° K enlemleri ve 26.00°-31.00° D boylamları ile sınırlı alanına Semi-Markov Modeli uygulanarak deprem riski saptanmıştır.

İnceleme bölgesinde 1900-1986 yılları arasında oluşmuş $M \geq 5.5$ olan 75 deprem gözönüne alınmıştır. M1 ($5.5 \leq M < 6.0$), M2 ($6.0 \leq M < 6.5$) ve M3 ($M \geq 6.5$) olarak tanımlanan deprem büyüklük durumlarının büyüklük-büyüklük geçiş olasılıkları bulunarak aralık geçiş olasılıkları elde edilmiştir.

Büyüklük-büyüklük geçişlerinin aralık geçiş olasılıklarına göre; bölgede M1 deprem büyüklüğünün etkin olduğu, M1 büyüklüğündeki depremin ardından bir başka M1 büyüklüğündeki depremin olma olasılığının yüksek olduğu görülmektedir.

ABSTRACT

In this study earthquake risk is evaluated by the application of Semi-Markov Model for the area limited by the 36.00°-39.00° N latitudes and 26.00°-31.00° E longitudes of West Anatolia.

The work carried out on 75 earthquakes which have magnitudes 5.5 and higher in the time period of 1900-1986. The earthquake magnitude states were defined as M1 ($5.5 \leq M < 6.0$), M2 ($6.0 \leq M < 6.5$) and M3 ($m \geq 6.5$). Interval transition probabilities were obtained by magnitude-magnitude transition probabilities.

According to the interval transition probabilities of the magnitude-magnitude transitions; earthquakes with M1 magnitude is dominant in the region and the probability of occurring the other earthquake of M1 magnitude following the first one is high.

GİRİŞ

Deprem riski hesaplamalarında bugüne dek birçok yöntem kullanılmıştır. En çok kullanılan yöntem Poisson Modelidir. Modelin temel özelliği, olayların oluşumunu uzay ve zaman boyutunda bağımsız varsaymasıdır. Poisson Modelinden yararlanarak Gumbel Uç Değer Dağılımları, Weibull Olasılık Dağılımı gibi teknikler kullanılarak deprem riski hesapları yapılmaya çalışılmıştır. İkinci bir ana yöntem olarak da Markov Modeli kullanılmıştır. Bu modelde ise olayların oluşumunun uzay ve zaman boyutunda bağımlılıkları sözkonusudur. Her olayın kendinden bir önceki olaya bağlı olduğu kabul edilir. Bu da modelin tek adım bellek (one-step memory) özelliğidir. Modelin uygulayıcıları arasında Hagiwara (1975), Kiremidjian ve Anagnos (1980), Grivas ve diğ. (1980) anılabilir.

Semi-Markov Model, Markov Modelini temel alarak deprem riski hesaplarına uygulanmaktadır. Markov Modeline göre üstün yanı olayların uzay boyutunda bağımlı olmalarına karşın zaman boyutunda birim zamandan bağımsız değerlendirilmeleridir. Olaylar kendinden önceki ve gelecek olana bağlı olduklarından arada geçen zaman önemli bir rol oynar. Bu da modelin çok adım bellek (multi-step memory) özelliğini gösterir. Modelin uygulayıcıları arasında Patwardan ve diğ. (1980), Cluff ve diğ. (1980), Altmok (1984) anılabilir.

Semi-Markov Modeli ve deprem olayı arasındaki bağlantıya bakılacak olursa, birbirleriyle tektonik ilişkisi olan bölgelerde iyi sonuç vereceği öne sürülmüştür. Mogi (1969), Kelleher (1970), Sykes (1971), Patwardan ve diğ. (1980) tektonik ilişkinin olduğu yerlerde özellikle büyük depremlerin büyüklüklerinin ve oluşum zamanlarının rastlantısal olmadığını ileri sürmüşlerdir. Semi-Markov Modeline göre belirli bir bölgede oluşacak depremin büyüklüğü önceki depremin büyüklüğüne ve arada geçen zamana bağlıdır.

Deprem riski hesaplamalarında kullanılan modellerin birbirlerine göre seçilebilecek üstün yanları vardır. Poisson Modeli bölgesel çalışmalarda ve geniş alanlarda iyi sonuç vermeye beraber Markov Modeli ve Semi-Markov Modeli yerel çalışmalarda ve benzer tektonik özellik gösteren alanlarda kullanılabilir (Altmok 1988).

YARARLANILAN YÖNTEM

Bu çalışmada Semi-Markov Modeli kullanılarak deprem riski saptanmaya çalışılmıştır.

Modelin uygulanmasındaki ilk aşamada G_{ij} (G), geçiş matrisinin (transition probability matrix) belirlenmesi gerekmektedir. i ve j durum (state) olmak üzere i durumundan j du-

* I.Ü. Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Avcılar 34840 İstanbul

rumuna geçiş olasılıklarını içeren G_{ij} matrisi stokastik bir matris olduğundan (1) eşitliğinde gösterildiği gibi her satır bir olasılık vektörüdür (Howard 1971).

$$0 \leq G_{ij} \leq 1 \quad , \quad 1 \leq i \quad , \quad j \leq N$$

$$\sum_{j=1}^N G_{ij} = 1 \quad , \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

N , toplam durum sayısıdır. Olayların geçiş olasılıklarının dağılımı G_{ij} matrisi ile belirlenir.

İkinci aşamada olaylar zaman boyutunda incelenerek i durumundan j durumuna geçiş zamanı (holding time) t_{ij} ler oluşturulur. t_{ij} pozitif, tam ve rastlantısal bir sayıdır. u birim zaman olarak seçildiğinde

$$t_{ij} = mu \quad , \quad m = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

olur. Söz konusu t_{ij} en az bir birim uzunlukta ve sonlu bir değerdedir. t_{ij} lerin olasılık değerleri, T_{ij} ler elde edilerek $T(m)$, olasılık kütle fonksiyonları (holding time mass functions)

$$T(m) = \sum_{i=1}^N T_{ij}(m) = 1 \quad (3)$$

bağıntısına uygun olarak oluşturulur.

G_{ij} (G), geçiş matrisi ve $T(m)$, geçiş zamanı olasılık kütle fonksiyonlarının belirlenmesi ile elemanları c_{ij} olan

$$c_{ij}(m) = G_{ij} T_{ij}(m) \quad , \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$j = 1, 2, \dots, N$$

$$m = 1, 2, 3, \dots, N$$

$C(m)$, çekirdek matrisleri (core matrixes) elde edilerek bağlantılı olasılıkları (joint probabilities) bulunur.

$C(m)$ matrislerinden yararlanarak elemanları $w_i(m)$ olan

$$w_i(m) = \sum_{j=1}^N c_{ij}(m) \quad , \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

$W(m)$, bekleme zamanı matrisleri (waiting time matrixes) ve elemanları $w_i(n)$ olan

$$w_i(n) = \sum_{m=n+1}^{\infty} w_i(m) \quad , \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

$W(n)$, tümleyici bekleme zamanı matrisleri (complementary waiting time matrixes) oluşturulur.

Semi-Markov Modelinde $F(n)$, aralık geçiş olasılıklarının (interval transition probabilities) bulunması ile deprem riskini saptamaya yaklaşım sağlanır.

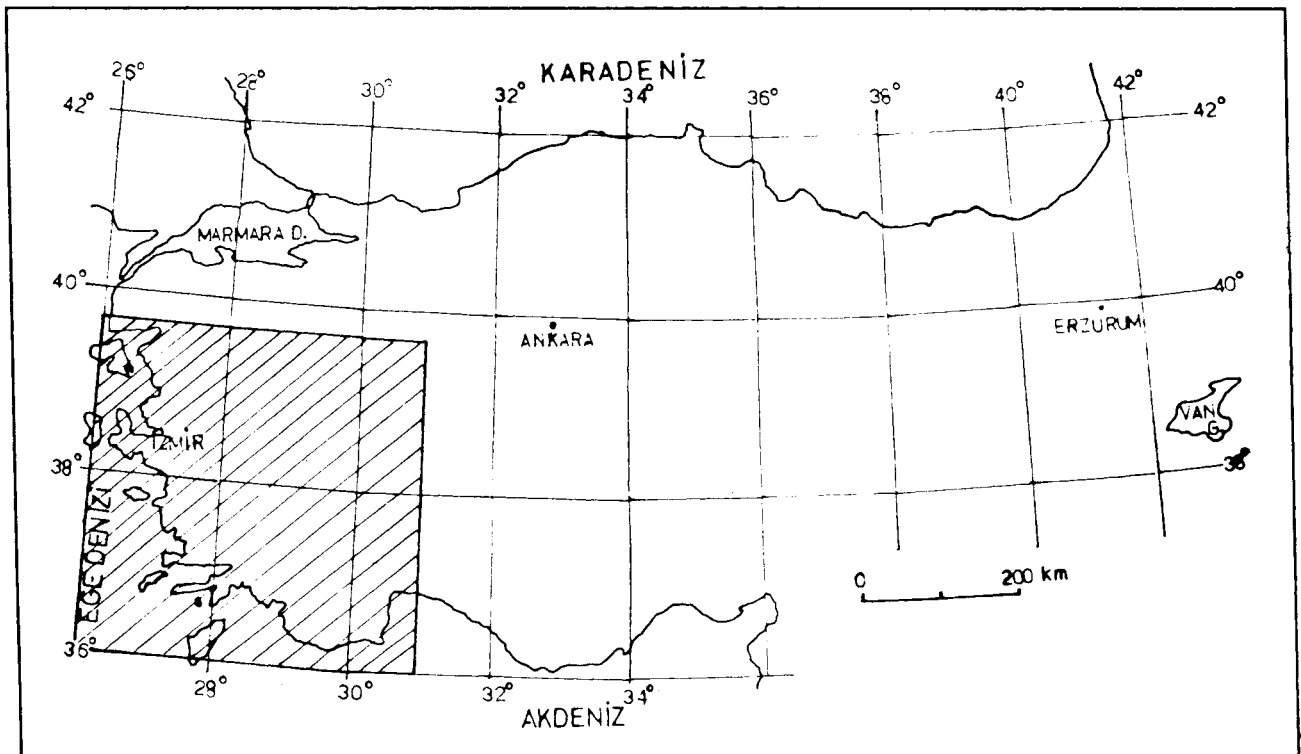
$$F(n) \Rightarrow W(n) + \sum_{m=0}^n G \square T(m) F(n-m) \quad , \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

$F(n)$ olasılıkları, $m = 0$ zamanında i durumundan başlayan olayın $m = n$ zamanında j durumuna geçiş olasılığını göstermektedir. Başka bir deyişle olay i den başlamak üzere $(0, n)$ aralığında j ye bir kez geçmeli veya m zamanlarda $(0 < m < n)$ başka durumlara geçerek n zamanında j de son bulmalıdır.

(7) nolu bağıntıdaki \square operatörü, boyutları aynı olan iki matrisini karşılıklı elemanlarının çarpımını göstermektedir (congruent matrix multiplication).

UYGULAMA BÖLGESİ

Semi-Markov Modelinin yapısal süreksizlikler gibi bir-biriyle tektonik ilişkisi olan yerlerde iyi sonuç vereceği gözönüne alınarak benzer tektonik alanlara da uygulanabileceği dü-



Şekil 1. İnceleme bölgesi
Fig. 1. Investigated area

şünülmüştür. Bu nedenle uygulama bölgesi olarak Batı Anadolu'nun 36.00°-39.80° K ve 26.00°-31.00° D koordinatları ile sınırlı alanı seçilmiştir (Şekil 1). Bilindiği gibi Batı Anadolu'daki tüm fay düzlemi çözümleri normal eğim atınlı faylanma göstermekte olup, bölgede yerkabuğunun genişlediğini işaret etmektedir (Alptekin 1978). Bölgede kuzey-güney doğrultulu gerilmeler egemendir. Ayrıca bölgedeki düşey hareketlerin etkinliği tektonik özelliği veren grabenlerin göstergesidir. Batı Anadolu'nun kuzey ve güneyinde deprem odak mekanizma çözümleri farklılık göstermektedir.

YARARLANILAN VERİLER

Bu çalışmada yararlanılan veriler 1900 sonrası aletsel döneme ait olup Gündoğdu-Altınok Deprem Veri Seti (1986)'nden sağlanmıştır (Ek. 1). Bu veri kümesi; Alsan ve diğ. (1975), Dewey (1976), Kandilli Deprem Kataloğu (1981), Ambraseys ve Jackson (1981), Ayhan ve diğ. (1986) ve bazı bültenlerden (ISC ve PDE) yararlanarak derlenmiştir. Çalışmada kullanılan 75 depremin büyüklükleri 5.5 veya daha büyüktür.

MODELİN UYGULANMASI

Modelin uygulanmasındaki ilk aşamada bölgede oluşan depremlerin büyüklükleri durum olarak alınmış ve 3 durum oluşturulmuştur. Bunlar sırasıyla aşağıda belirtildiği gibidir.

$$5.5 \leq M < 6.0 \quad M1 \text{ Durumu}$$

$$6.0 \leq M < 6.5 \quad M2 \text{ Durumu}$$

$$M \geq 6.5 \quad M3 \text{ Durumu}$$

M1, M2 ve M3 büyüklüklerinde oluşan depremlerin ardışık geçiş sayıları gözönüne alınarak G_{ij} geçiş matrisi elde edilmiştir.

$$G_{ij} = \begin{bmatrix} 0.63 & 0.26 & 0.11 \\ 0.56 & 0.13 & 0.31 \\ 0.66 & 0.17 & 0.17 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ardışık geçişler arasındaki zamanlar incelenerek geçiş zamanı olasılık kütle fonksiyonları oluşturulmuştur (Şekil 2). Geçiş zamanları için birim zaman $u = 1$ yıl seçilmiştir. Geçiş yoksa t_{ij} geçiş zamanı sıfır alınmıştır.

Geçiş matrisi ve geçiş zamanı olasılık kütle fonksiyonlarının belirlenmesi ile (2) - (6) bağıntılarında gösterilen $C(m)$, çekirdek matrisleri ve (7) - (11) bağıntıları ile gösterilen $> W(n)$, tümleyici bekleme zamanı matrisleri saptanmıştır.

$$C(1) = \begin{bmatrix} 0.42 & 0.17 & 0.07 \\ 0.50 & 0.07 & 0.19 \\ 0.42 & 0.09 & 0.09 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C(2) = \begin{bmatrix} 0.11 & 0.04 & 0.02 \\ 0.00 & 0.00 & 0.06 \\ 0.08 & 0.08 & 0.08 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C(3) = \begin{bmatrix} 0.07 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.06 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C(4) = \begin{bmatrix} 0.02 & 0.00 & 0.02 \\ 0.00 & 0.00 & 0.06 \\ 0.16 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C(5) = \begin{bmatrix} 0.02 & 0.04 & 0.00 \\ 0.06 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$> W(1) = \begin{bmatrix} 0.34 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.24 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.40 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$> W(2) = \begin{bmatrix} 0.17 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.08 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.16 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$> W(3) = \begin{bmatrix} 0.10 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.12 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.16 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$> W(4) = \begin{bmatrix} 0.06 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.06 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$> W(5) = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \quad (11)$$

İnceleme bölgesinin $F(n)$, aralık geçiş olasılıkları m zamanlar için 5 aralıkta ($n = 5$) $F(1) - F(5)$ matrisleri olarak aşağıdaki biçimde saptanmıştır.

$$F(1) = \begin{bmatrix} 0.76 & 0.17 & 0.07 \\ 0.50 & 0.31 & 0.19 \\ 0.42 & 0.09 & 0.49 \end{bmatrix}$$

$$F(2) = \begin{bmatrix} 0.71 & 0.17 & 0.12 \\ 0.50 & 0.30 & 0.20 \\ 0.49 & 0.18 & 0.33 \end{bmatrix}$$

$$F(3) = \begin{bmatrix} 0.70 & 0.16 & 0.14 \\ 0.50 & 0.33 & 0.17 \\ 0.52 & 0.15 & 0.33 \end{bmatrix}$$

$$F(4) = \begin{bmatrix} 0.66 & 0.17 & 0.17 \\ 0.55 & 0.22 & 0.23 \\ 0.69 & 0.15 & 0.16 \end{bmatrix}$$

$$F(5) = \begin{bmatrix} 0.62 & 0.21 & 0.17 \\ 0.64 & 0.17 & 0.19 \\ 0.65 & 0.18 & 0.17 \end{bmatrix}$$

Bölgenin $F(1) - F(5)$ matrisleri ile verilen aralık geçiş olasılıkları Şekil 3'de grafiklenmiştir.

SONUÇLAR

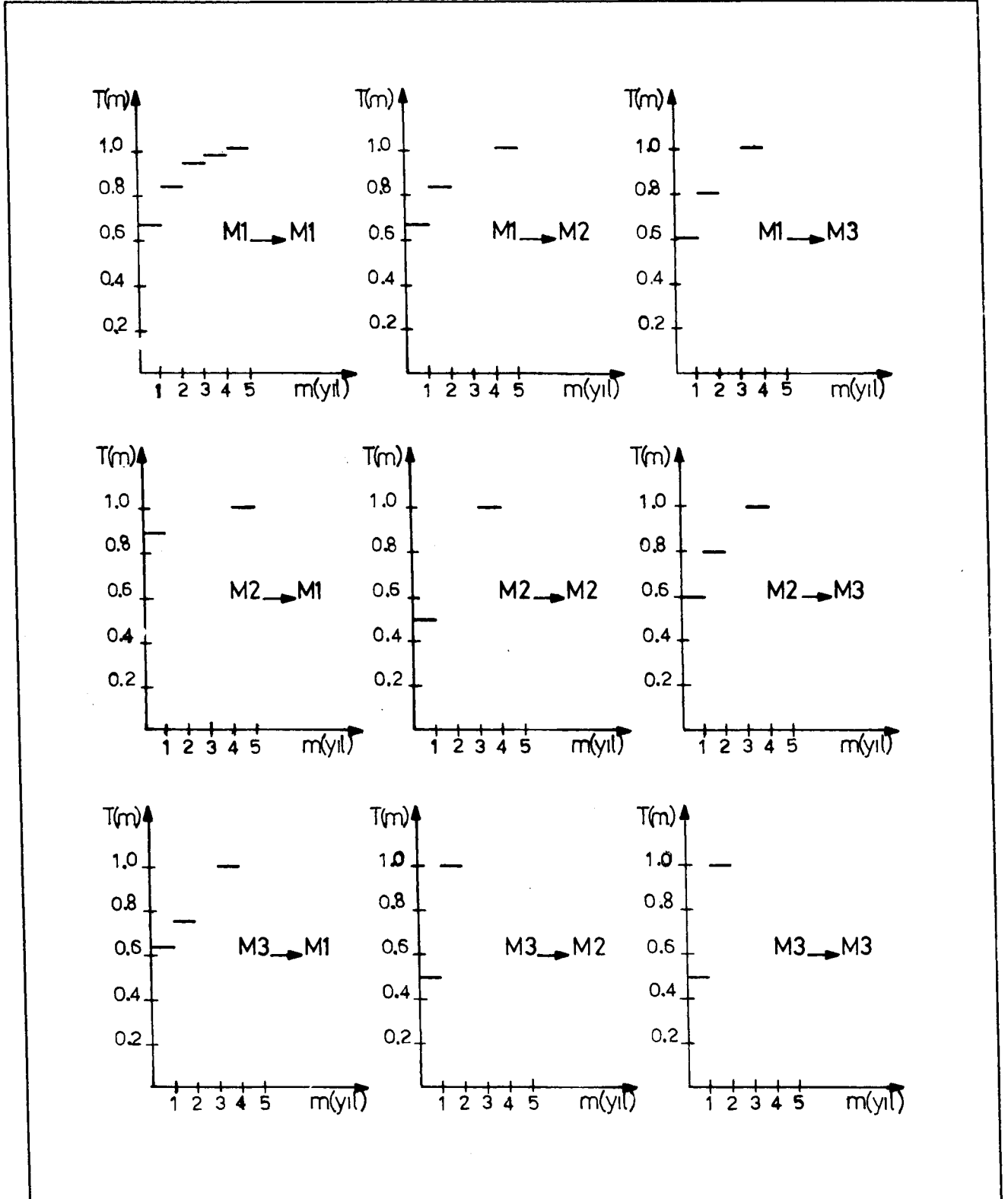
Bu çalışmada Batı Anadolu'nun 36.00°-39.80° K enlemleri ve 26.00° - 31.00° D boyları ile sınırlı alanında $M \geq 5.5$ olan depremler gözönüne alınarak Semi-Markov Modeli uygulanmış ve deprem riski saptanmıştır.

Bölgede oluşan depremlerin birbirlerinden bağımsız olmadıkları varsayılarak ardışık olaylar değerlendirilmiştir. Olayların gelecekteki durumlarını belirlemek için herhangi bir dağılım fonksiyonundan yararlanılmamıştır. Ancak olayların gelecekteki durumlarına bir yaklaşım sağlamak, $F(n)$ aralık geçiş olasılığı değerleriyle olmaktadır. Bu olasılıklarla deprem risk değerlerini belirlemek olanaklıdır.

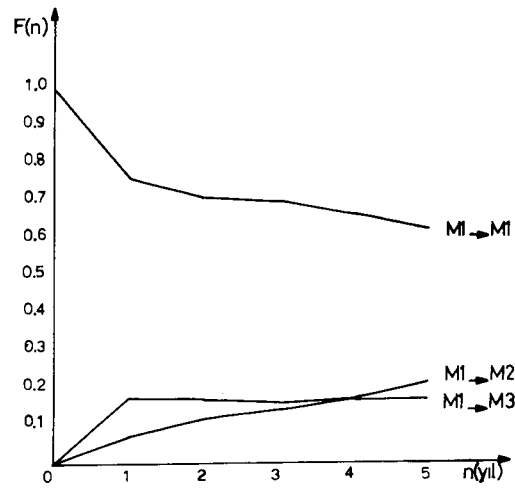
İnceleme bölgesinde $M \geq 5.5$ olan depremlerin büyüklükleri durum (state) olarak alınıp büyüklük-büyüklük geçişleri uzay ve zaman boyutlarında incelenerek $F(n)$ aralık geçiş olasılıkları elde edilmiştir. Tüm inceleme aralığı gözönüne alındı-

ğında ($n = 1, 2, \dots, 5$) büyüklük-büyükük geçişlerinde M1 ($5.5 \leq M < 6.0$) büyüklüğündeki depremin ardından aynı büyüklükteki depremin olma olasılığının çok yüksek olduğu gözlenmektedir. Ayrıca M3 ($M \geq 6.5$) büyüklüğündeki depremin ardından M2 ($6.0 < M < 6.5$) büyüklüğündeki depremin olması

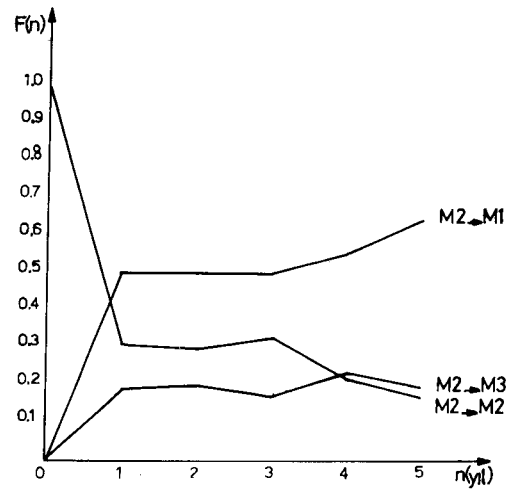
1 yıl için önemli bir olasılık değeri gösterirken M1 büyüklüğündeki depremin olma olasılığı oldukça yüksektir. Bölgede M1 büyüklüğünde depremlerin olma olasılıklarının etkin olduğu görülmektedir.



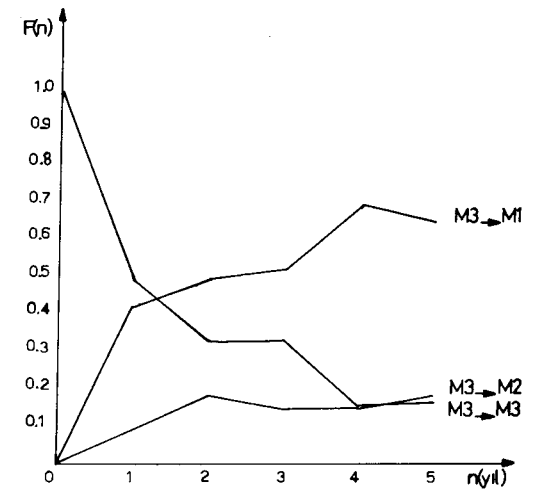
Şekil 2. Geçiş zamanı olasılık kütle fonksiyonları.
Fig. 2. Probability mass functions of holding time.



Şekil 3.1.



Şekil 3.2.



Şekil 3.3.

Şekil 3.1-3.3. Aralık geçiş olasılığı fonksiyonları.
Fig. 3.1-3.3. Interval transition probability functions.

EK. 1. YARARLANILAN DEPREM VERİLERİ

Sıra No	Tarih	Koordinat		Magnitüd (M_s)
		K	D	
1	04.04.1903	39.00	28.00	5.5
2	11.08.1904	37.70	26.90	6.2
3	18.08.1904	38.00	27.00	6.0
4	10.10.1904	38.40	27.20	5.8
5	19.01.1909	38.00	26.50	6.0
6	30.04.1911	36.00	30.00	6.1
7	03.10.1914	37.70	30.40	6.9
8	16.01.1918	38.34	29.48	5.7
9	16.07.1918	36.08	26.99	6.1
10	18.11.1919	39.26	26.71	7.0
11	02.04.1920	36.75	26.44	5.5
12	28.09.1920	37.89	28.35	5.7
13	20.11.1924	38.55	30.78	5.9
14	07.08.1925	38.10	30.20	5.9
15	13.01.1926	38.64	28.11	5.8
16	13.01.1926	38.53	28.19	5.7
17	01.03.1926	37.03	29.43	6.1
18	26.06.1926	36.54	27.33	7.5
19	31.03.1928	38.18	27.80	6.5
20	02.05.1928	39.64	29.14	6.1
21	15.07.1928	38.05	27.32	5.5
22	23.04.1933	36.77	27.29	6.4
23	19.07.1933	38.17	29.87	5.5
24	18.03.1935	36.08	27.30	6.1
25	15.09.1939	39.71	29.58	5.7
26	22.09.1939	38.89	26.91	6.6
27	23.05.1941	37.07	28.21	6.0
28	13.07.1941	38.11	26.54	5.9
29	13.12.1941	37.13	28.06	5.7
30	28.10.1942	39.03	27.74	6.0
31	28.10.1942	39.46	27.79	5.5
32	15.11.1942	39.35	28.06	6.1
33	16.10.1943	36.45	27.94	5.8
34	20.11.1943	36.55	28.36	5.5
35	05.01.1944	36.42	27.67	5.6
36	27.05.1944	36.23	27.25	5.5
37	25.06.1944	38.90	29.26	6.2
38	06.10.1944	39.37	26.53	6.8
39	12.04.1946	36.24	26.69	5.5
40	23.07.1949	38.56	26.21	6.6
41	22.10.1952	36.83	27.60	5.5
42	01.05.1954	37.81	26.95	5.5
43	16.07.1955	37.65	27.26	6.8
44	10.07.1956	36.77	26.23	5.5
45	24.04.1957	36.43	28.63	6.8
46	25.04.1957	36.42	28.68	7.0
47	26.04.1957	36.22	28.87	5.9
48	25.04.1959	36.94	28.58	5.9
49	23.05.1961	36.70	28.49	5.8
50	28.04.1962	36.03	26.87	5.8
51	28.04.1962	36.09	26.88	5.5
52	11.03.1963	37.96	29.14	5.5
53	30.01.1964	37.41	29.89	5.7
54	02.03.1965	38.38	28.34	5.6
55	13.06.1965	37.85	29.32	5.7
56	28.11.1965	36.12	27.43	5.6
57	05.12.1968	36.60	26.92	5.7
58	14.01.1969	36.11	29.19	6.2

Sıra No	Tarih	Koordinat		Magnitüd (M_s)
		K	D	
59	23.03.1969	39.06	28.52	5.9
60	25.03.1969	39.02	28.44	6.0
61	28.03.1969	38.42	28.45	6.5
62	06.04.1969	38.36	26.41	5.6
63	28.03.1970	39.06	29.54	7.2
64	19.04.1970	38.90	29.76	5.8
65	19.04.1970	38.90	29.81	5.8
66	23.04.1970	38.98	28.64	5.6
67	20.12.1970	39.23	29.28	5.5
68	12.05.1971	37.64	29.72	6.2
69	12.05.1971	37.58	29.60	5.6
70	25.05.1971	38.94	29.68	5.9
71	30.04.1975	36.19	30.74	5.9
72	12.11.1975	36.28	28.15	5.5
73	16.12.1977	38.41	27.19	5.5
74	14.06.1979	38.79	26.57	5.7
75	26.04.1981	36.55	30.71	5.9

KAYNAKLAR

- Alptekin, Ö. 1978, Batı Anadolu depremlerinin odak mekanizmaları ve bunların aktif tektonik ile ilişkileri, Jeofizik 7.
- Alsan, E., Tezuçan, L., Bath, M. 1975, An Earthquake Catalogue for the Interval 1913-1970, Report No. 7-75, Uppsala-Sweden.
- Altınok, Y. 1984, Semi-Markov modelinin Kuzey Anadolu Fay Zonunda deprem riskine uygulanması, Jeofizik 2, 44-58.
- Ambraseys, N.N. and Jackson, J.A. 1981, Earthquake hazard and Vulnerability in the Northeastern Mediterranean: The Corinth Earthquake sequence of February-March 1981, Disaster 5, 355-368.
- Ayhan, E., Alsan, E., Sancaklı, N., Üçer, B. 1986, Türkiye ve Dolayları Deprem Kataloğu 1881-1980, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- Cluff, L.S., Patwardan, A.S., Coppersmith, K.S. 1980, Estimating the probability of occurrences of surface faulting earthquakes on the Wasatch Fault Zone, Utah., Bull. Seism. Soc. Am. 70, 1463-1478.
- Grivas, A.A., Dyvik, R., Howland, J. 1980, An engineering analysis of the seismic history of New York State, Proceed. of the 7th World Conf. on Earthquake Engineering, İstanbul.
- Gündoğdu, O. ve Altınok, Y. 1986, Türkiye ve Çevresi Deprem Veri Seti 1900-1986, İ.Ü. Mühendislik Fak., Jeofizik Müh. Bl., İstanbul.
- Hagiwara, Y. 1975, A stochastic model of earthquake occurrence and the accompanying horizontal land deformation, Tectonophysics 26, 91-101.
- Howard, R.A. 1971, Dynamic Probabilistic System, vol. 1, 2., John Wiley and Sons, New York.
- Kandilli Deprem Kataloğu 1981, Kandilli Deprem Kataloğu 1900-1975, Bilgisayar çıktısı, Kandilli Rasathanesi-Sismoloji Bölümü, İstanbul (yayınlanmamış).
- Kelleher, J.A. 1970, Space-time seismicity of the Alaska-Aleutian seismic zone, Jour. Geophys. Res. 75, 5745-5756.
- Kiremidjian, A.S. and Anagnos, T. 1980, A homogeneous stochastic model for earthquake occurrences, Contract no. 14-08-0001-17766, Dept. of Civil engineering, Stanford University, Stanford.
- Mogi, K. 1969, Relationship between the occurrence of great earthquakes and tectonic structures, Bull. Earthq. Res. Inst. 47, 429-451.
- Patwardan, A.S., Kulkarni, R.B., Tocher, D. 1980, A Semi-Markov Model for characterizing recurrence of great earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am. 70, 323-347.
- Sykes, L.R. 1971, Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps and earthquake prediction for Alaska and the Aleutians, Jour. Geophys. Res. 76, 8921-8941.