

SEMİ-MARKOV MODELİNİN KUZHEY ANADOLU FAY ZONUNDA DEPREM RİSKİNE UYGULANMASI

Seismic Risk Estimation of the North Anatolian Fault Zone Using Semi - Markov Model

Yıldız ALTINOK*

ÖZET

Bu çalışmada, aynı yapısal süreksizlikte birbirini izleyen depremlerin bağımsız olaylar sayılamayacağı ve arada geçen zamanın olayları etkileyeceği varsayımından yola çıkılarak, deprem oluşum modeli için Semi-Markov Modeli seçilmiş ve deprem riski saptanmaya çalışılmıştır.

Uygulama Bölgesi olarak, Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun 26°.00 E - 44°.25 E boylamları arasında kalan kısmı seçilmiştir. Seçilen alan önce A (26°.00 E - 31°.30 E), B (31°.30 E - 35°.00 E), C (35°.00 E - 40°.00 E) ve D (40°.00 E - 44°.25 E) olarak dört altbölgeye ayrılmıştır. Bu bölgelerde, 1900-1986 yılları arasında oluşmuş $M \geq 5.5$ olan 81 deprem göz önüne alınmıştır.

Dinamik davranış gösteren sistemlere uygulanabilen Semi-Markov Modeli, deprem olayına kolayca uygulanmış ve hesaplamalarda gözlem değerleri kullanılarak deprem riskinin saptanmasında yeni bir yaklaşım getirilmiştir.

ABSTRACT

In this study, earthquake risk is determined by using Semi-Markov Model for the earthquake occurrences. This model depends on the assumption that the successive earthquakes in the same structural discontinuity should not be independent events and the occurrence of the earthquakes should be influenced by the elapsed time between them.

A part of North Anatolian Fault Zone between the 26°.00 E and 44°.00 E longitudes is selected as a studying area. This zone is divided into four adjacent subregions from west to east such as A (26°.00 E - 31°.30 E), B (31°.30 E - 35°.00 E), C (35°.00 E - 40°.00 E) and D (40°.00 E - 44°.25 E). Eighty-one earthquakes occurred in these subregions between 1900-1986 are taken into account of which magnitudes equal to or greater than 5.5.

Semi-Markov Model which can be easily applied to dynamic systems could also be used for earthquake phenomena to dynamic systems a new approach found to be feasible to determine earthquake risk using the observed data.

GİRİŞ

Deprem bölgelerinde gelecekte olmasını beklediğimiz yıkıcı depremlerin zararlarından korunmak ve etkilerini en aza indirmek yolunda yapılan çalışmalar, sismoloji ve deprem mühendisliği konuları içinde yer alır. Yapılan çalışmalar depremlerin önceden belirlenmesi ve deprem zararlarının en aza indirilmesi olarak iki ana gruba toplanabilir.

Deprem riskinin belirlenmesi, yukarıda belirtilen çalışma gruplarından ikincisinde, önemli bir aşama oluşturur. Araştırmacılar, deprem oluşumuyla ilgili çeşitli istatistik modeller kullanarak deprem riskinin belirlenmesine yönelmişlerdir. İstatistik modeller içinde en çok kullanı-

lan, rastlantusal seri olayların olasılık modellerinden biri olan Poisson Modeli'dir. Modelin temel özelliği, depremlerin uzay ve zaman içindeki oluşumlarının birbirinden bağımsız olmasıdır. Poisson Modeli'nin pek çok uygulayıcıları arasında Cornell (1968), Caputo (1974), Shah (1975), Bath (1978) gösterilebilir. Ülkemizde de bugüne dek yapılan depremsellik çalışmalarında en çok kullanılan modeldir. Poisson Modeli'nden yararlanılarak, büyük depremler için geliştirilen bir başka yöntem de, Epstein ve Lomnitz'in 1966 yılında ileri sürdükleri, "Büyük Deprem Modeli"dir (Lomnitz, 1974). Yöntemin uygulayıcıları arasında Karnik ve Hubnerova (1968), Milne ve Davenport (1969), Schenkova ve Karnik (1970), Yegülalp ve Kuo (1974) ve daha birçok araştırmacı anılabilir. Poisson

* İ. Ü. Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Beyazıt - İSTANBUL

Modeli'nden yararlanarak Schilen ve Toksöz (1970) depremlerin zaman içinde gruplanmalarını göz önüne alarak Cluster Analizi yapmışlardır. Rikitake (1975) aynı modelin özel bir şekli olan Weibull Dağılımını kullanmıştır.

Poisson Modeli ile risk saptamaları geniş alanlarda iyi sonuç vermeye beraber yerel çalışmalarda yetersiz kalmaktadır (Oliviera 1974). Çünkü, yerel bir alanda olmuş depremleri birbirinden bağımsız saymak gerçekçi bir yaklaşım olamaz. Bu sorun dikkate alındığında, yerel bir alanda yapılacak çalışmalarda daha geçerli bir model kullanmak gereksinimi ortaya çıkmaktadır.

Yukarıda değinilen gereksinim, diğer bir istatistik model olan Markov Modeli'nin denenmesine neden olmuştur. Modelin temel özelliklerine bakıldığında, Poisson Modeli'nin aksine, olayların zaman ve uzay boyutlarına bağımlı olduğu görülür. Modeli Hagiwara (1975), şekil değiştirme enerjisinin açığa çıkma mekanizmasında; Kiremidjian ve Anagnos (1980) ile Grivas ve diğ. (1980) de deprem oluşumuyla ilgili olarak kullanmışlardır. Olayların sıralanışlarındaki bağımlılık özelliğinden dolayı, başka bir deyişle, olayların kendinden öncekilere bağımlı olmaları nedeniyle, Markov Modeli'nin belirli alanlarda ve aynı yapısal süreksizlikteki bölgelerde uygulanması yararlıdır. Modelin sakıncalı olan yanı ise, zaman boyutunda da bağımlı olmasıdır. Bu bağımlılık, zaman boyutunda seçilen her birim zaman içinde bir olayın olmasının gerekliliğidir. Oysa, deprem olayında seçilen her birim zamanda bir depremin olması zorunlu değildir. Bu da, araştırmacıları Semi-Markov Modeli'ni kullanmaya yöneltmiştir.

SEMI - MARKOV MODELİ

Semi-Markov Modeli, Markov Modeli'yle ortak pekçok özelliği olan, dinamik olasılık sistemlerinin incelenmesinde kullanılmak üzere geliştirilmiş bir modeldir (Howard, 1971). Markov Modeli için söz konusu olan uzay ve zaman boyutlarındaki bağımlılık özelliği, Semi-Markov Modeli'nde yalnız uzay boyutu için vardır. Ayrıca, Markov Modeli'nde olayların kendinden öncekilere bağlı olmalarından dolayı tek-adım bellek (one-step memory) özelliği görülmesine karşın, Semi-Markov Modeli'nde, ardışık olaylar arasında geçen zamanın bir önceki ve gelecek olan olaya bağımlılığı nedeniyle, çok-adım bellek (multi-step memory) özelliği görülür.

Semi-Markov Modeli'nde durum (state) ve geçiş (state transition) olmak üzere iki temel kavram vardır.

Fiziksel bir sistemde, sisteme ait değişkenlerin sayısal değerleri sistemi tanımlar. Bu değişkenlerin herbiri bir "durum" oluşturur. Deprem olayında deprem sayısı, enlem, boylam, derinlik, enerji gibi değişkenler, depremin uzay durumlarını oluşturur.

Zaman içerisinde sistem, durumdan duruma geçerse, dinamik bir davranış gösterir. Deprem olayında, belirli bir yerde M1 büyüklüğünde bir deprem olduktan sonra aynı yerde M2 büyüklüğünde bir depremin olması, M1 durumundan M2 durumuna bir geçişin olduğunu gösterir. Bu geçişe "durum geçişi" adı verilir.

Semi-Markov Modeli'nde olayların uzayı öyle olmalıdır ki, her durum kendinden önceki duruma bağımlı olsun. i ve j birer durumu gösteriyorsa ve bu durumlar için

n adet geçiş söz konusu ise, $n + 1$ 'inci geçiş için D , durum olmak üzere

$$\text{Prob} \{ D(n+1) = j \mid D(n) = i \}$$

bağlı olasılığını yazabiliriz. Bu, Markov Modeli'nde de bilinen tek adım bellek özelliğini gösterir. Ayrıca, modelin diğer özellikleri aşağıda verilmektedir.

Geçiş Matrisi (Transition Matrix), sistemde i durumundan j durumuna geçiş olmuşsa, G_{ij} olasılığı, i 'den j 'ye geçiş olasılığını gösterir.

N adet durum için G_{ij} olasılığı, (2) bağıntısındaki özellikleri içerir.

$$0 \leq G_{ij} \leq 1 \quad ; \quad 1 \leq i, j \leq N \quad (2)$$

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

Elemanları G_{ij} olan $\{G_{ij}\}$ matrisi stokastik bir matristir. Başka bir deyişle, aşağıda gösterildiği gibi, bir kare matris olup her satır bir olasılık vektördür.

$$G = \{G_{ij}\} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ G_{N1} & G_{N2} & \dots & G_{NN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Geçiş Zamanı (Holding Time), olaylar zaman boyutunda incelenirse, i durumundan j durumuna geçiş zamanı t_{ij} olarak belirlenir. t_{ij} 'nin sayısal değeri pozitif, tam ve rastlantısaldır. u , birim zaman olarak seçildiğinde

$$t_{ij} = mu \quad ; \quad m = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

olur. Sonlu bir değeri olabileceği gibi en az bir birim uzunluktadır. t_{ij} 'nin olasılık değeri T_{ij} ;

$$\text{Prob} \{ t_{ij} = m \} = T_{ij}(m) \quad ; \quad m = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

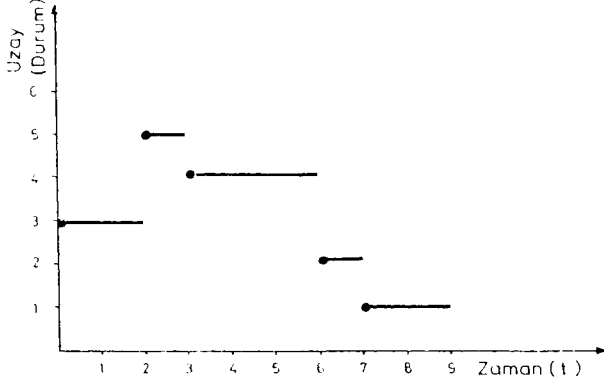
ve olasılık kütle fonksiyonu (probability mass function);

$$T(m) = \sum_{i,j=1}^N T_{ij}(m) = 1 \quad (6)$$

olarak gösterilir.

Modelin diğer özelliklerinden biri de başlangıç koşullarının belirlenmesidir. Dinamik bir sistemde, olayın hangi durumda ve hangi t_0 başlangıç zamanında başladığını belirtmekle başlangıç koşulları belirlenmiş olur. Modelin ayrık (discrete) ve sürekli (continuous) şekli vardır. Deprem olayında, Ayrık Semi-Markov Modeli'nden yararlanmak uygun olacaktır. Ayrık Semi-Markov

Modeli'nin şeması olarak verildiği Şekil 1'de noktalar uzay durumlarını göstermektedir. Şekilde olay, 3 nolu durumda sıfır zamanında başlamakta ve bu konumda 2 zaman birimi kaldıktan sonra diğer durumlara geçmektedir. Bu durumlarda değişik zaman birimlerinde kalıp 4 geçişle dinamik davranış sonuçlanmaktadır.



Şekil 1. Ayrık (uzay-zaman) Semi-Markov Model
Fig. 1. Discrete space and discrete time Semi-Markov Model

Çekirdek Matrisi (Core Matrix), G geçiş matrisi elemanlarıyla T (m) geçiş zamanı olasılık kütle fonksiyonu elemanlarının çarpımından oluşur. Bağlantılı olaylarda (joint events) olay, t_0 başlangıç zamanında i durumundan başlar ve m zamanında j durumuna geçerse, çekirdek matrisini oluşturan $c_{ij}(m)$ elemanları

$$c_{ij}(m) = G_{ij} T_{ij}(n) ; \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

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

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

bağıntısıyla gösterilir. Matrisi oluşturan $c_{ij}(m)$ elemanlarının elde edilmişindeki çarpım, (\square) simgesi ile tanımlanarak çekirdek matrisi;

$$C(m) = G \square T(m) \quad (8)$$

olarak yazılır. Burada, (\square) boyutları aynı olan iki matrisin karşılıklı elemanlarının çarpımını gösteren bir operatördür (congruent matrix multiplication). (\square) ile çarpımda değişme, birleşme ve dağılma özelliği vardır. C (m) matrislerini saptamakla bağlı olasılıklar (joint probability) elde edilir.

Çekirdek matrislerinin saptanmasıyla modelin diğer elemanlarından W (m), bekleme zamanı kütle fonksiyonu matrisleri ve $> W(n)$, tümleyici bekleme zamanı matrisleri oluşturur.

Bekleme Zamanı (Waiting Time), i durumunda başlayan olayın geçeceği durum belli olmaksızın bu durumda geçirdiği süre (t_i) olarak tanımlanır. t_i 'nin olasılığı w_i ve olasılık kütle fonksiyonu $w_i(m)$;

$$w_i(m) = \sum_{j=i}^N G_{ij} T_{ij}(m) = \sum_{j=i}^N c_{ij}(m); m=1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

şekindedir. Bağıntı, çekirdek matrisindeki satır elemanlarının toplamını gösterir. $w_i(m)$ elemanları, köşegenel bir matris olan, W (m) bekleme zamanı kütle fonksiyonu matrisini oluştururlar.

Tümleyici Bekleme Zamanı (Complementary Waiting Time), i durumundaki olayın, ne zamanı için i durumunda bulunmama süresi $> t_i$ olarak tanımlanır. n zamanı için olayın i durumunda bulunma olasılıkları (cumulative probability) $w_i(n)$;

$$w_i(n) = \sum_{m=1}^n w_i(m) ; \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

ve bulunmama olasılıkları (complementary cumulative probability) $> w_i(n)$ ise,

$$> w_i(n) = \sum_{m=n+1}^{\infty} w_i(m) ; \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

olarak gösterilir. $> w_i(n)$ olasılıkları, tümleyici bekleme zamanı matrisini oluştururlar.

Aralık Geçiş Olasılığı (Interval Transition Probability), F (n), m = 0 zamanında i durumunda başlayan olayın m = n zamanında j durumuna bir kez geçiş olasılığını gösterir. Olay i'den başlamak üzere (0, n) aralığında j'ye doğrudan geçmeli veya m zamanlarda ($0 < m < n$) başka durumlara geçerek n zamanda j'de son bulmalıdır. Eğer, (0, n) aralığında bir geçiş varsa, olay m = n anında j'ye geçmek zorundadır.

Aralık geçiş olasılığı F(n), tümleyici bekleme zamanı matrisi $> W(n)$, geçiş matrisi G, geçiş zamanı kütle fonksiyonu T(m) ve (n-m) için aralık geçiş olasılığı F(n-m) olmak üzere

$$F(n) = > W(n) + \sum_{m=0}^n G \square T(m) F(n-m) ; \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (12)$$

bağıntısıyla gösterilir. Görüldüğü gibi, F(n) matrisi, yinelenmeli (recursive) olarak saptanır.

F(n) olasılığı, m = 0'da T(m) = 0 olacağından, aralık oluşmadığı için $1 \leq m \leq n$ aralığında saptanır. n = 0 için F(n);

$$F(0) = \delta_j = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (13)$$

Kronecker Delta fonksiyonuna eşittir. n'nin büyük değerleri için F(n), limit matrise yaklaşır.

Deprem olayında, F(n)'leri saptamakla, yenilenmeli olasılık değerleri yardımıyla deprem diskine yaklaşım sağlanabilir.

DEPREM OLAYI VE SEMİ-MARKOV MODELİ

Semi-Markov Modeli'nin, birbirleriyle tektonik ilişkisi olan bölgelerdeki depremlere uygulandığında, iyi

sonuçlar vermesi beklenir. Böyle bölgeler fay, sırt (ridge) ve çukurlar (trench) gibi birtakım yapısal süreksizliklerin yer aldığı bölgelerdir.

Fay veya fay sistemleri boyunca oluşan depremlerin, birbirleriyle, oluşum yönünden ilişkili olmaları doğaldır. Mogi (1969), büyük depremlerin en çok yapısal süreksizliklerde oluştuğunu ve ardışık büyük depremlerin de büyük bir kırığın bitişik kırık bölgesinde ilerlemesine neden olduğunu ortaya koymuştur. Kelleher (1970), büyük depremlerin oluşumunun rastlantısal olmadığını ve ardışık büyük depremlerin birbiriyle ilişkili olduğunu; Sykes (1971), fay boyunca oluşacak büyük bir depremin, bitişik bölgede bir diğer büyük depremi tetiklediğini ileri sürmüşlerdir. Patwardan ve diğ. (1980), süreksizliklerde depremlerin büyüklüğünün ve oluşum zamanlarının rastlantısal olmadığını belirterek Semi-Markov Modeli'ni, Pasifik Kuşağında oluşan büyük depremlere ($M \geq 7.8$) uygulamışlardır. Bir büyük depremden sonra biriken enerjinin, diğer bir büyük depreme açığa çıkacağı ve depremin büyüklüğünün, arada geçen zamana bağlı olduğunu belirterek, buldukları sonuçların, sismik boşlukların karakterize edilmesinde ve sismik risk modelinde yardımcı olduğunu savunmuşlardır.

Cluff ve diğ. (1980) de, Utah'daki Wasatch Fay Zonu'nda, $6.5 \leq M \leq 7.5$ olan depremleri göz önüne alıp Semi-Markov Modeli'ni uygulamışlardır.

Yukarıda değinilen son iki çalışmada araştırmacılar, Semi-Markov Modeli'ni uygularken, geçiş olasılıkları ve geçiş zamanı olasılıkları için bir dağılım varsaymışlar ve verilerin yetersiz olmaları nedeniyle, öngördükleri dağılıma uygun olabilecek şekilde veri türeterek, sürekli bir dağılım elde etmişlerdir.

Semi-Markov Modeli'ne göre, yer kabuğunda enerjinin birikimi, ardışık iki deprem arasında geçen zamana bağlıdır. Büyük bir deprem olduktan sonra uzun bir süre depremin olmayışı, gelecekte büyük bir depremin olabileceğini gösterir. Gelecekteki depremin büyüklüğü, önceki depremin büyüklüğüne ve arada geçen zamana bağlıdır.

Semi-Markov Modeli'ni kullanarak, deprem olma olasılıklarının saptanmasıyla, deprem riskine yaklaşım sağlamak olanaklı olacağı gibi depremlerin önceden belirlenmesi çalışmalarına da katkıda bulunabilecektir.

UYGULAMA

Uygulama Bölgesi olarak Kuzey Anadolu Fay Zonu ile bu zonun doğu ve batıdaki, uzantıları olduğu düşünülen fayların geçtiği bir şerit-alan seçilmiştir. Bu alan doğu ve batıda, Şekil 2'de görüldüğü gibi, $26^{\circ}.00$ E - $44^{\circ}.25$ E boylamlarıyla sınırlanmıştır. Bu şerit alanda, 1900-1986 yılları arasında oluşmuş, büyüklükleri $M \geq 5.5$ olan 81 depremden yararlanılmıştır. Benzer çalışmalarda genelde, büyük deprem, $M \geq 7$ olarak nitelenmekte ise de seçtiğimiz bölgede, inceleme süresince $M \geq 7$ olan depremlerin sayısının, bir istatistik değerlendirmeye elverişli olmayışı, ayrıca, bölgede oluşan depremlerin genellikle sığ odaklı ve $M \geq 5$ olanların yıkıcı olmaları nedeniyle büyüklük alt sınırı olarak $M = 5.5$ alınmıştır. Veri kaynağı olarak, Gündoğdu ve Altınok (1986) tarafından derlenen veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti, Alsan ve diğ. (1975), Dewey (1976), Kandilli Deprem Kataloğu (1981),

Türkiye ve Dolayları Deprem Kataloğu (1986) ve deprem bültenlerinden (ISC, PDE) yararlanarak oluşturulmuştur.

Bölge-Bölge Geçişleri

Modelin uygulanmasının ilk aşamasında, uzay durum olarak "bölge" seçilmiştir. İnceleme alanı, 1900-1986 yılları arasında oluşmuş depremlerin dışmerkez dağılım özelliklerine, içerdiği fay ve fay sistemlerinin süreklilik özelliklerine ve fay sistemleri boyunca gözlenen yerdeğiştirmelerin türlerine göre dört alt-bölgeye ayrılarak, uzay durumları oluşturulmuştur. Bu bölgeler aşağıda belirtilmiştir.

A Bölgesi	A1	$30^{\circ}.60$ - $41^{\circ}.00$ N	$26^{\circ}.00$ - $28^{\circ}.00$ E
	A2	$39^{\circ}.80$ - $41^{\circ}.20$ N	$28^{\circ}.00$ - $31^{\circ}.30$ E
B Bölgesi	B1	$40^{\circ}.05$ - $41^{\circ}.25$ N	$31^{\circ}.30$ - $33^{\circ}.00$ E
	B2	$40^{\circ}.30$ - $41^{\circ}.70$ N	$33^{\circ}.00$ - $35^{\circ}.00$ E
C Bölgesi	C1	$40^{\circ}.05$ - $41^{\circ}.45$ N	$35^{\circ}.00$ - $37^{\circ}.00$ E
	C2	$39^{\circ}.55$ - $40^{\circ}.95$ N	$37^{\circ}.00$ - $39^{\circ}.00$ E
	C3	$39^{\circ}.15$ - $40^{\circ}.55$ N	$39^{\circ}.00$ - $40^{\circ}.00$ E
D Bölgesi	D1	$38^{\circ}.75$ - $40^{\circ}.50$ N	$40^{\circ}.00$ - $41^{\circ}.00$ E
	D2	$38^{\circ}.75$ - $41^{\circ}.00$ N	$41^{\circ}.00$ - $42^{\circ}.00$ E
	D3	$38^{\circ}.50$ - $41^{\circ}.00$ N	$42^{\circ}.00$ - $44^{\circ}.25$ E

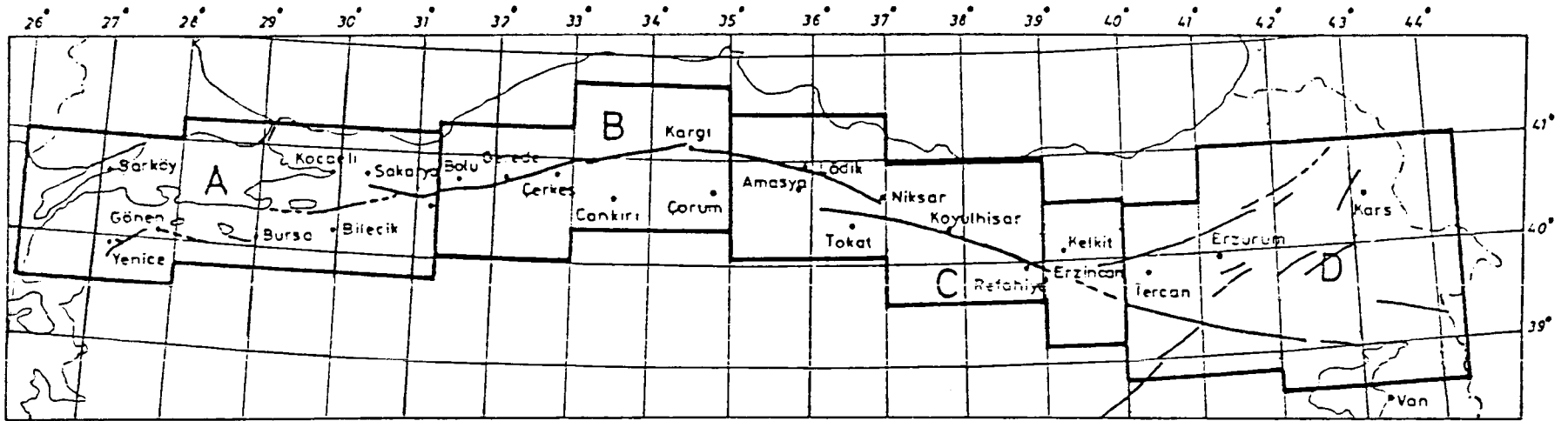
Uygulama bölgesinde A, B, C ve D olarak adlandırılan bu dört bölgede oluşan depremlerin ($M \geq 5.5$) Bölge-Bölge geçişlerinin ardışık geçiş sayıları göz önüne alınarak geçiş olasılıklarının elde edilmesiyle geçiş matrisi oluşturulur.

Zaman boyutunda, olayların geçişi incelenerek, T(m) geçiş zamanı olasılık kütle fonksiyonları saptanır. Geçiş olasılıkları ve geçiş zamanı olasılıkları için Patwardan ve diğ. (1980) ve Cluff ve diğ. (1980)'nin varsaydıkları biçimde bir dağılım fonksiyonu öngörülerek veri türetilmediğinden, bu çalışmada, gerçek geçiş sayıları ve gerçek geçiş zamanlarından yararlanılmıştır.

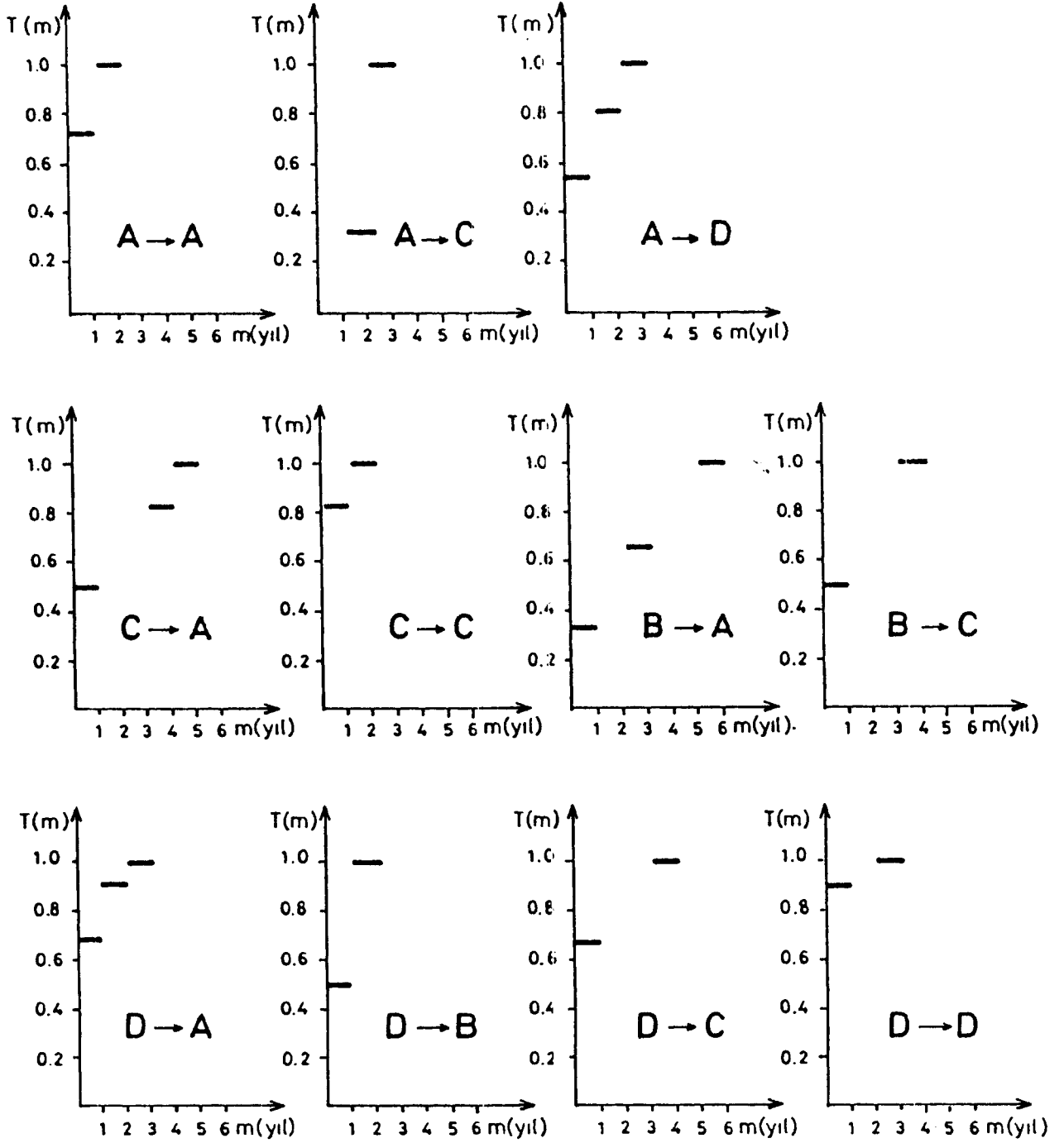
Bölge-Bölge geçişleri için birim zaman bir yıl seçilmiştir. En büyük zaman aralığı altı yıldır. Her Bölge-Bölge geçişi için m zamanlarda oluşan depremlerin geçiş sayılarının olasılıkları saptanmıştır. (6) eşitliğini sağlayan geçiş zamanı olasılık kütle fonksiyonları, birikimli olarak, Şekil 3'de gösterilmektedir. Hesaplamalarda, m zamanlara ait olasılık değerlerinden yararlanırken birikimli değerler kullanılmamış, grafikleri oluşturan gerçek olasılık değerleri göz önüne alınmıştır.

Daha sonra, sırasıyla çekirdek matrisleri C (m), bekleme zamanı olasılık kütle fonksiyonu matrisleri W (m), tümleyici bekleme zamanı matrisleri $> W(n)$ ve aralık geçiş olasılığı matrisleri F(n) saptanır.

Bölge-Bölge aralık geçiş olasılığı değerleri, Şekil 4'de grafiklenmiştir. Grafiklerden, altı yıllık bir zaman süreci içinde A, B, C ve D bölgelerinde, $M \geq 5.5$ olan bir depremin ardından, aynı büyüklükteki bir depremin, aynı bölgelerde ve diğer bölgelerde olma olasılıkları izlenmektedir.



Şekil 2. İnceleme Bölgesi. Şekilde verilen harita Ketin (1969, 1976) ve Sipahioğlu (1984)'dan yararlanarak derlenmiştir.
 Fig. 2. Investigated Area. Map of the region was redrawn using the maps of Ketin (1969, 1976) and Sipahioğlu (1984).



Şekil 3. Bölge-Bölge Geçişleri Olasılık Kütle Fonksiyonları
Fig. 3. Probability Mass Functions for Region to Region

Büyüklik - Büyüklik Geçişleri

Araştırmanın ikinci aşamasında, uzay durum olarak "büyüklik" seçilmiştir. Büyüklükleri M1, M2 ve M3 olan üç büyüklük durumu göz önüne alınmıştır. Bunlar sırasıyla;

M1 Durumu $5.5 \leq M < 6.0$

M2 Durumu $6.0 \leq M < 6.5$

M3 Durumu $6.5 \leq M$

olarak tanımlanmıştır.

Bölge-Bölge geçişlerinin F(n) aralık geçiş olasılıklarına baktığımızda (Şekil 4), B ve C bölgelerinin ben-

zerlik gösterdiği izlenmektedir. Bu nedenle, bu iki bölge tek bir BC bölgesi olarak değerlendirilmiş ve A, BC ve D bölgelerinde oluşan depremlerin ($M \geq 5.5$) Büyüklük-Büyüklük geçişleri saptanmıştır.

Bölge-Bölge geçişlerinde olduğu gibi, bu geçişlerde de geçiş olasılıkları ve geçiş zamanı olasılıkları için bir dağılım fonksiyonu öngörülmemiştir. Her üç bölge içinde, Bölge-Bölge geçişlerindeki aşamalar izlenerek,

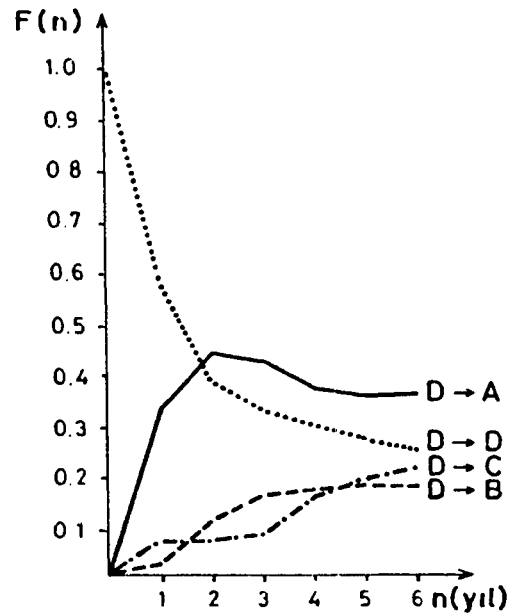
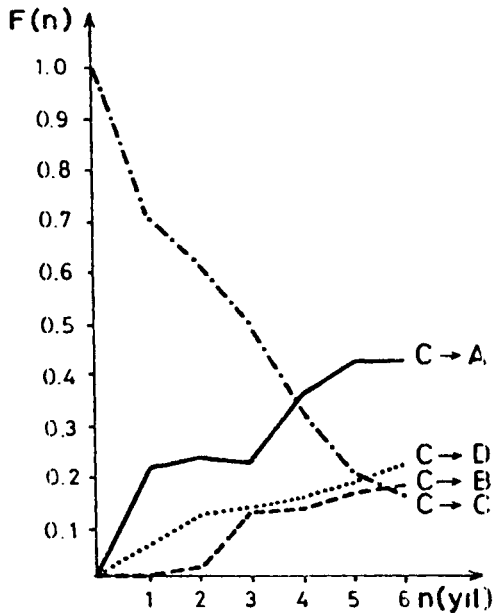
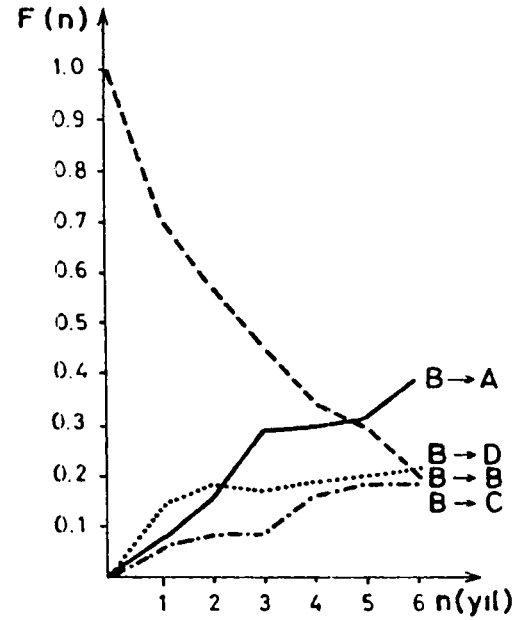
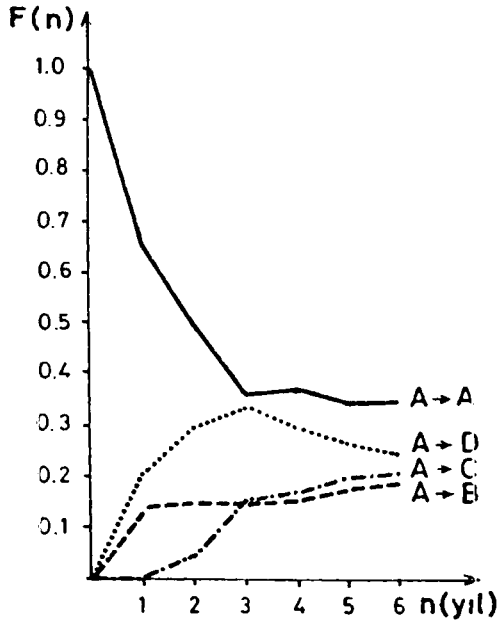
A Bölgesi için geçiş zamanı olasılık kütle fonksiyonları $T(m)$, Şekil 5'te; aralık geçiş olasılıkları $F(n)$,

Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu bölge için en büyük zaman aralığı $n = 11$ yıldır.

Büyüklük-Büyüklük geçişlerinin $F(n)$ aralık geçiş olasılıkları saptanmıştır. Bu işlemler sırasında birim zaman, yine bir yıl olarak seçilmiştir.

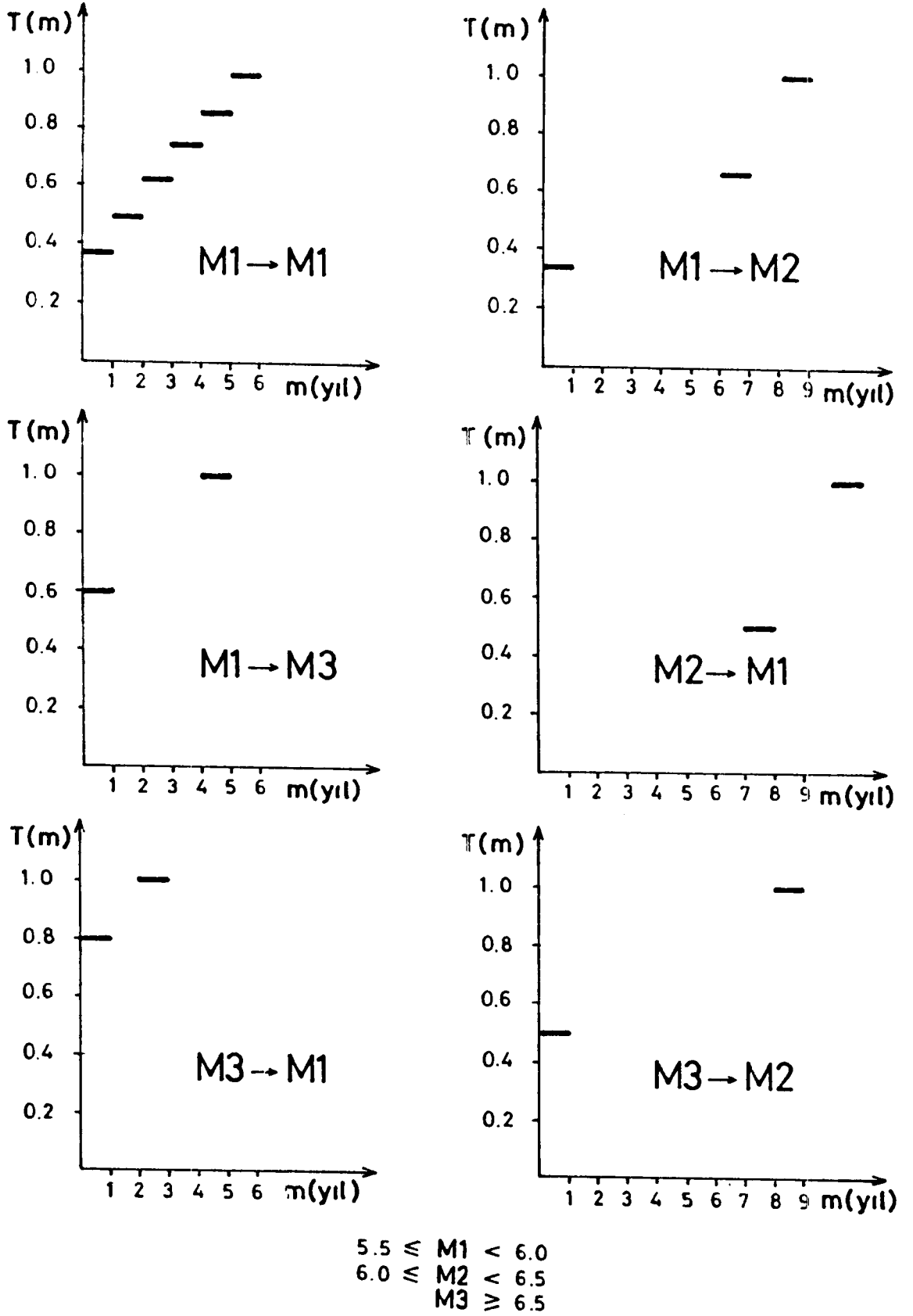
BC Bölgesinin $T(m)$ fonksiyonları Şekil 7'de ve $F(n)$ olasılıkları da Şekil 8'de gösterilmiştir. Bölgenin en büyük zaman aralığı $n = 17$ yıldır.

D Bölgesinin $T(m)$ fonksiyonları ise Şekil 9'da, $F(n)$ olasılıkları da Şekil 10'da gösterilmektedir. D Bölgesinin en büyük zaman aralığı $n = 14$ yıldır.



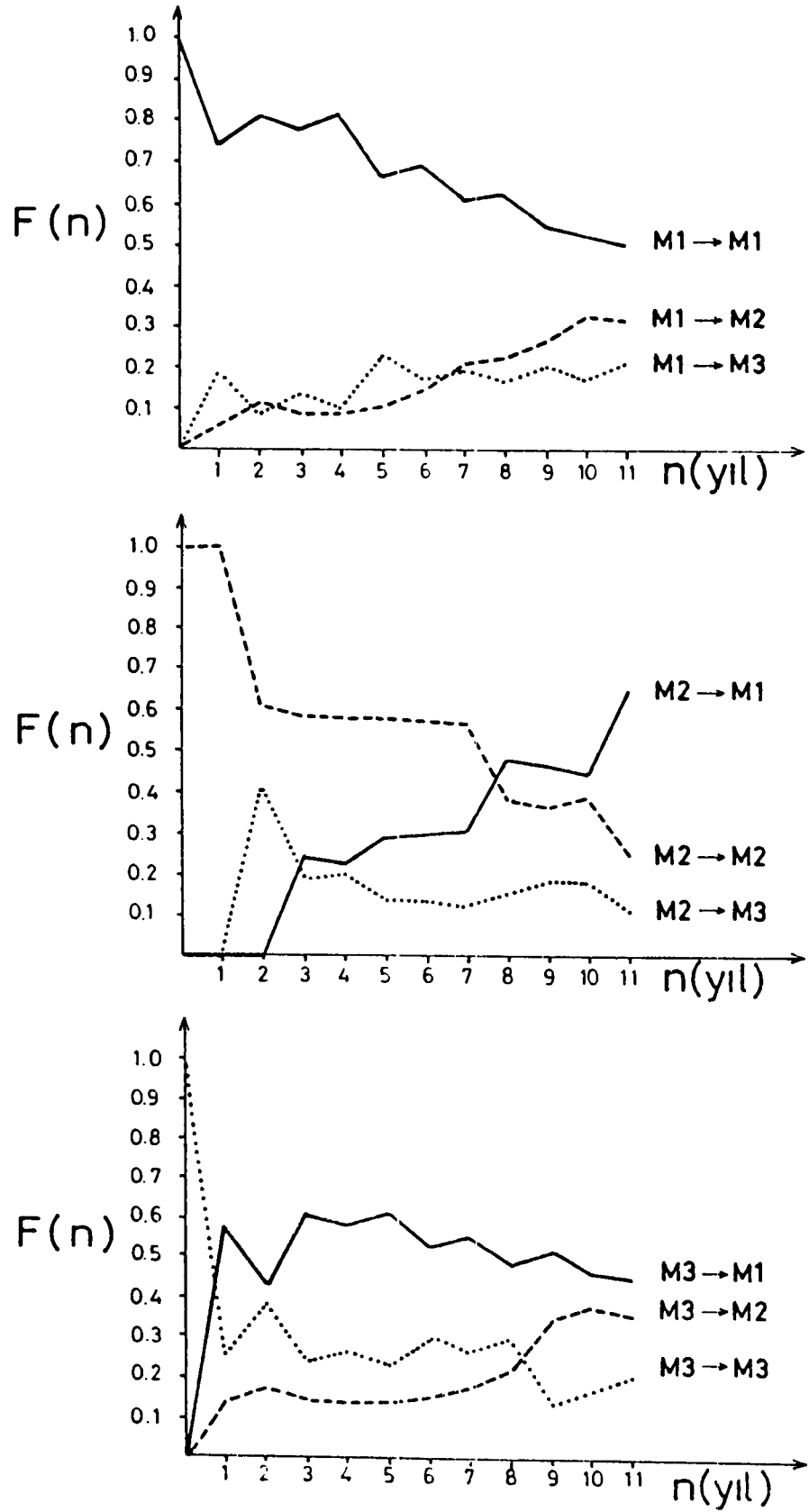
Şekil 4. Bölge-Bölge Geçişleri Aralık Geçiş Olasılığı Fonksiyonları

Fig. 4. Interval Transition Probability Functions for Region to Region.



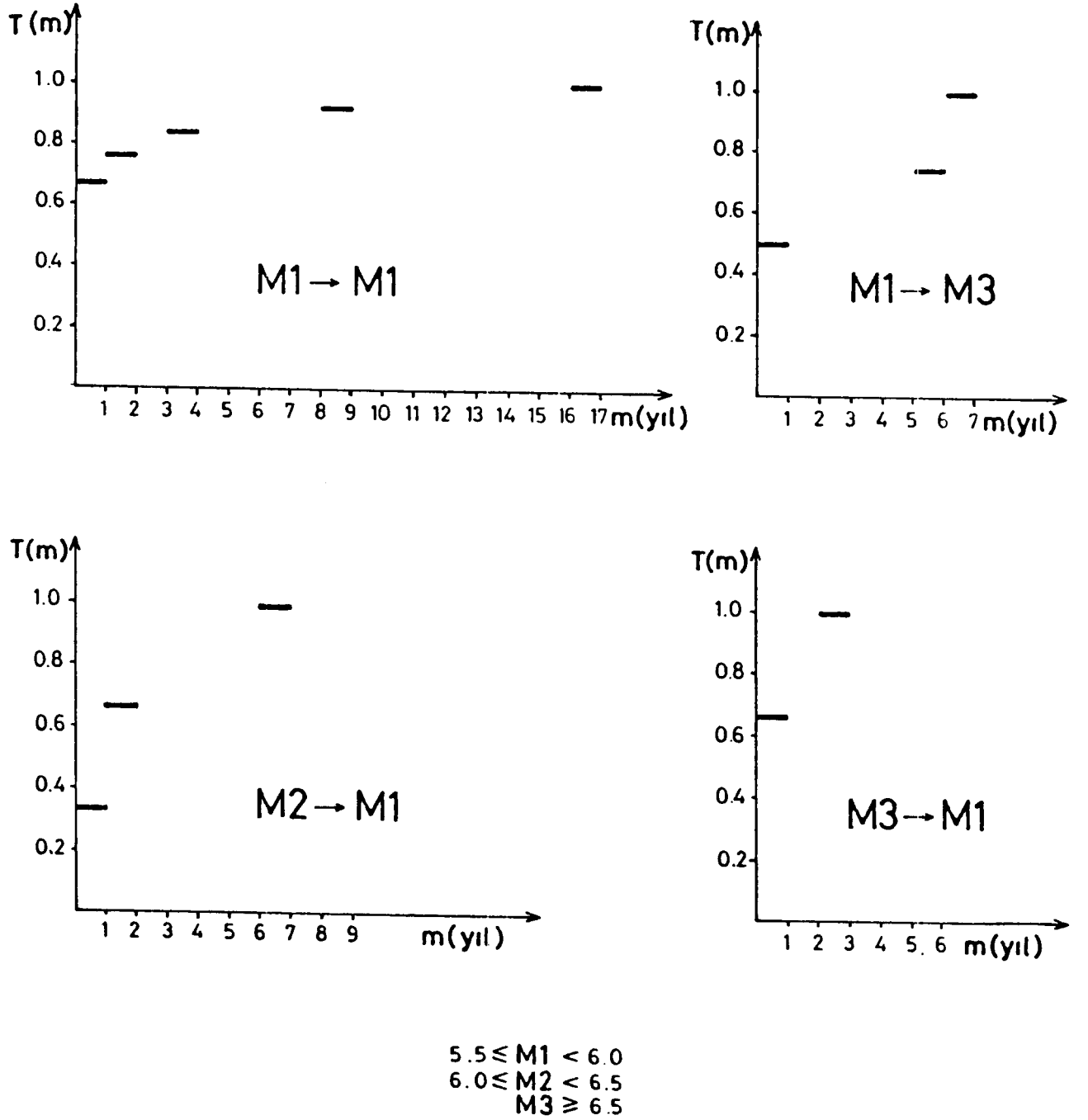
Şekil 5. A Bölgesi Olasılık Kütle Fonksiyonları.
Fig. 5. Probability Mass Functions for the Region A.

Altınok



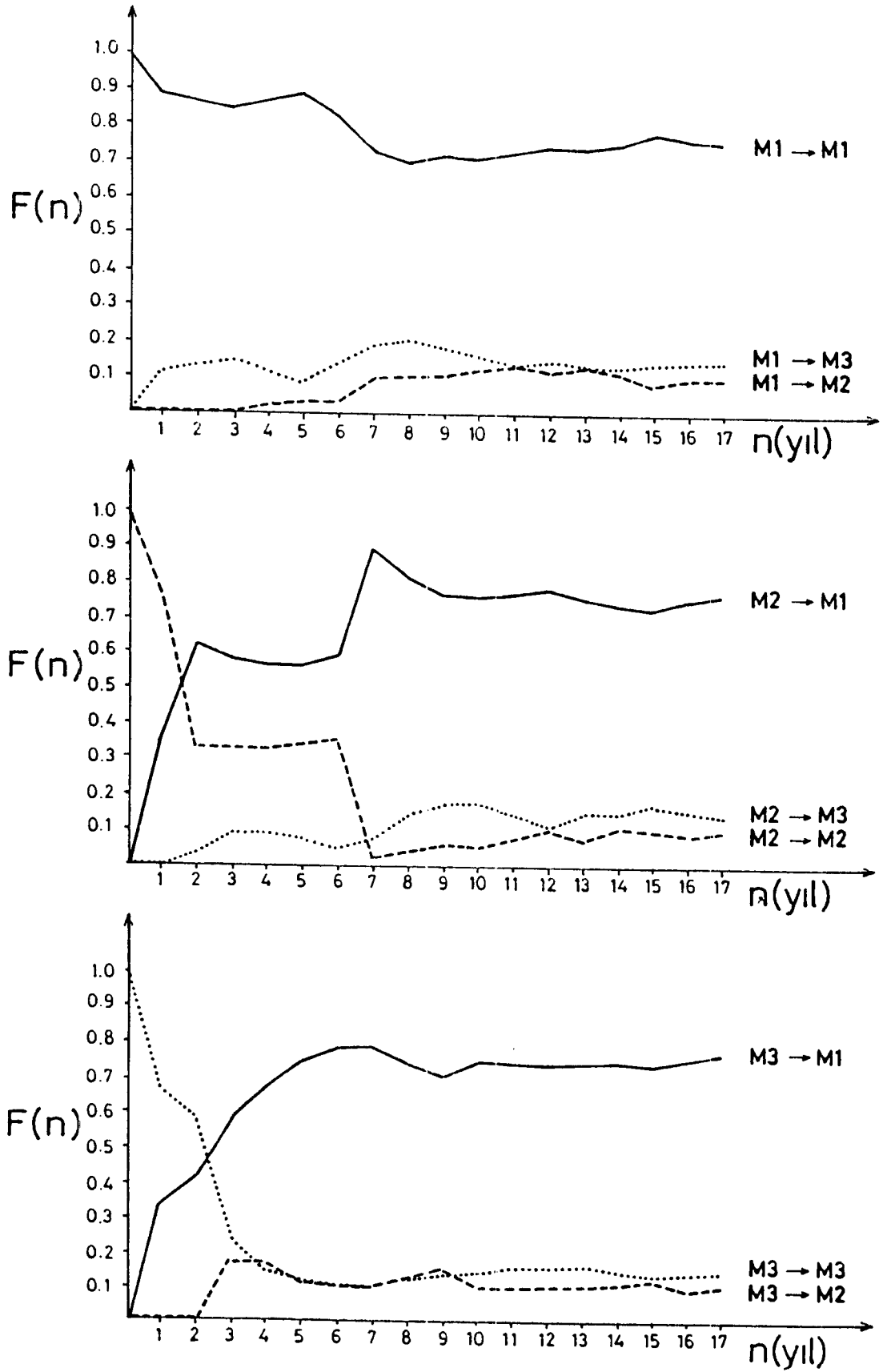
Şekil.
Fig.

6. A Bölgesi Aralık Geçiş Olasılığı Fonksiyonları.
6. Interval Transition Probability Function for the Region A.

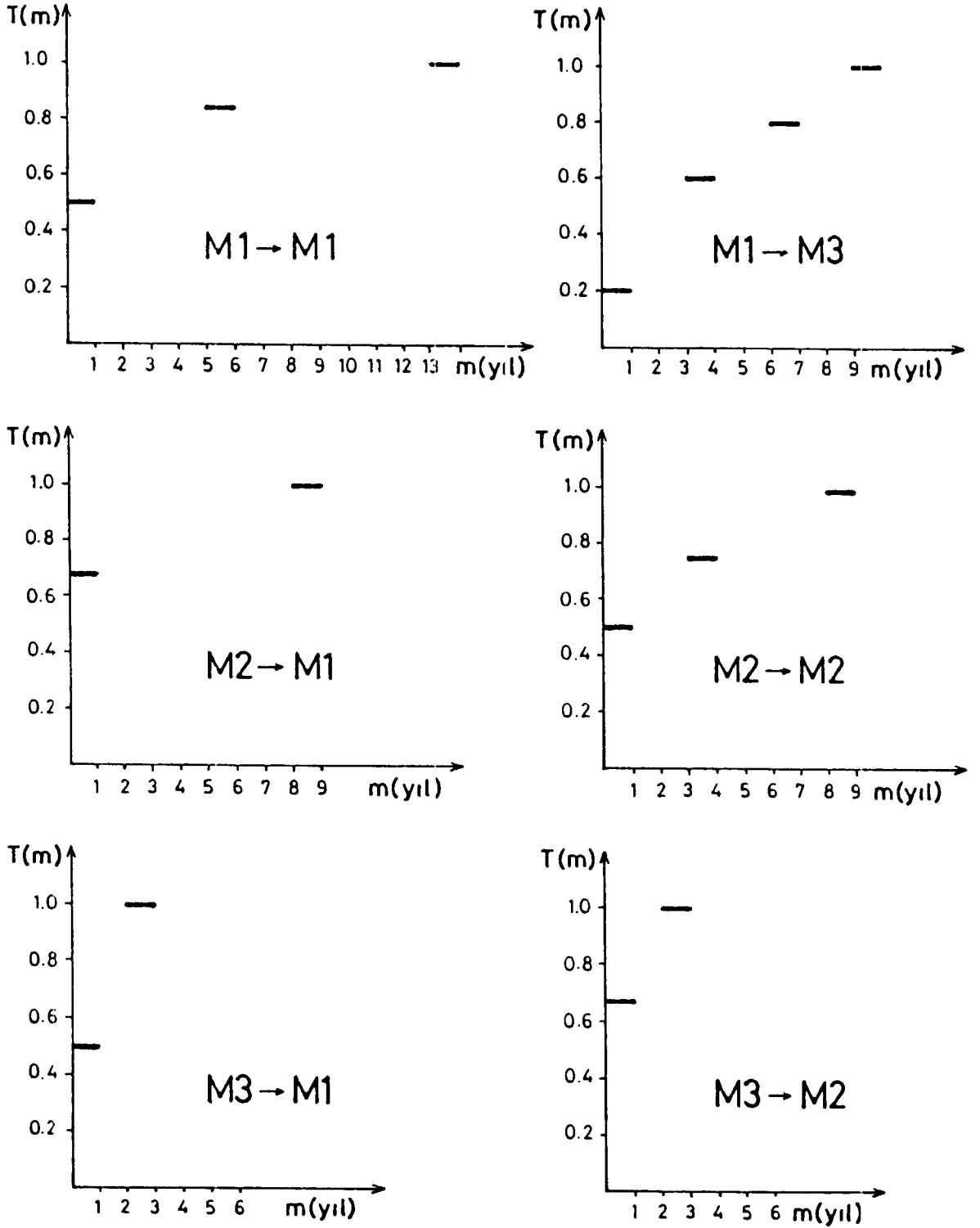


Şekil 7. BC Bölgesi Olasılık Kütle Fonksiyonları.
Fig. 7. Probability Mass Function for the Region BC.

Altınok



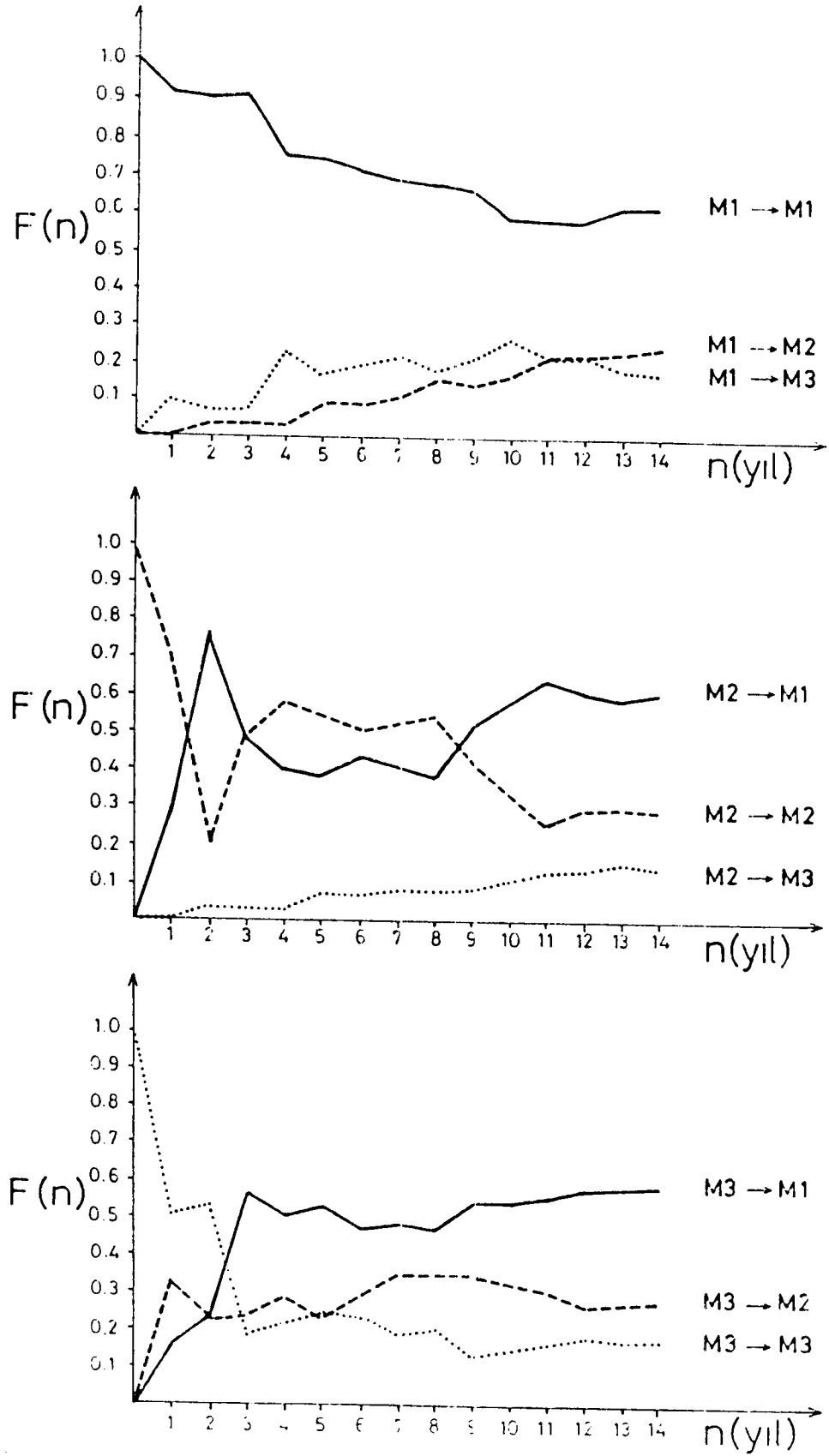
Şekil 8. BC Bölgesi Aralık Geçiş Olasılığı Fonksiyonları.
Fig. 8. Interval Transition Probability Functions for the Region BC.



$$\begin{aligned}
 5.5 &\leq M1 < 6.0 \\
 6.0 &\leq M2 < 6.5 \\
 M3 &\geq 6.5
 \end{aligned}$$

Şekil 9. D Bölgesi Olasılık Kütle Fonksiyonları.
Fig. 9. Probability Mass Functions for the Region D.

Altınok



Şekil 10. D. Bölgesi Aralık Geçiş Olasılığı Fonksiyonları.

Fig. 10. Interval Transition Probability Functions for the Region D.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, içinde Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun yer aldığı 26°.00 E - 44°.25 E boylamları arasındaki inceleme bölgesinde $M \geq 5.5$ olan depremler göz önüne alınarak, Semi-Markov Modeli ile deprem riskine yaklaşım sağlanmıştır.

Uygulamanın ilk aşaması, yer-zaman boyutunda, $M \geq 5.5$ olan depremlerle denenmiştir. Bölge-Bölge geçişlerinin aralık geçiş olasılıklarından izleneceği gibi, her bölgede $M \geq 5.5$ büyüklüğündeki bir depremin ardından, aynı bölgede, belirtilen büyüklükteki depremin olma olasılığının, zaman aralığı arttıkça azaldığı, bunun yanı sıra diğer bölgelere olan geçişlerin zamanla arttığı görülmektedir. A ve D bölgelerinin diğerlerine göre farklılık, B ve C bölgelerinin ise benzerlik gösterdiği izlenmektedir.

Uygulamanın ikinci aşaması, büyüklük-zaman boyutunda A, B, C ve D Bölgelerinde oluşan M1, M2 ve M3 olarak tanımlanan üç büyüklük durumu ile denenmiştir. Büyüklük-Büyüklük geçişlerinin aralık geçiş olasılıklarına göre; A Bölgesinde M1 büyüklüğündeki bir depremin ardından aynı büyüklükteki bir depremin olması (M1 → M1) yüksek olasılıklarla ve zamanla azalmaktadır. M2 → M2 geçişi zamanla artmakta, M3 → M1 geçişi ise oldukça yüksek olasılıkla zaman içinde kararlılık göstermektedir. M2 → M2 geçişi 0 - 7 yıl arasında yüksek olasılık değeri gösterirken M3 → M3 geçişi, diğerlerine göre, daha düşük olasılık değerlerini izlemektedir.

BC Bölgesinde M1, M2 ve M3 büyüklüğündeki depremlerin ardından M1 büyüklüğündeki depremin olma olasılığı hemen hemen tüm zaman aralıklarında yüksektir. M2 → M2 geçişi 0-1 yıl, M3 → M3 geçişi 0-2 yıl için yüksek olasılıklar göstermektedir.

D Bölgesinde ise, M1 → M1 geçişi yüksek olasılık değerleri göstermesine rağmen zamanla azalırken, M2 → M1 ve M3 → M1 geçişlerinin olasılık değerleri artmaktadır. M2 → M2 geçişinin 0-1 yıl ve 3-8 yıl arasında gösterdiği olasılıklar önemlidir. M3 → M3 geçişinin BC Bölgesindeki gibi, 0-2 yıl için gösterdiği olasılık değerleri yüksek sayılabilir.

Genelde her üç bölgede de M1 büyüklüğündeki bir depremin ardından aynı büyüklükte bir deprem olma olasılığı zamanla azalmasına rağmen, M2 veya M3 büyüklüğünde bir deprem olma olasılığı yüksek bir değerde kalmaktadır.

KATKI BELİRTME

Bu araştırmanın hazırlanmasında öneri ve eleştirilerinden yararlandığım başta merhum Prof. Dr. Sayın Hüseyin Soysal olmak üzere, Prof. Dr. Sayın Nezihî Canutez'e ve Prof. Dr. Sayın Cahit Çoruh'a şükranlarımı sunarım.

Çalışmanın her aşamasında katkılarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Sayın Demir Kolçak'a, destek ve yardımlarını gördüğüm Dr. Sayın Selçuk Sipahioğlu'na teşekkür ederim.

YARARLANILAN KAYNAKLAR

- Alsan, E., Tezuçan, L., Bath, M. (1975), An Earthquake Catalogue for Turkey for the interval 1913-1970, Report No. 7-75, Uppsala-Sweden.
- Bath, M. 1979, Seismic Risk in Fennoscandia, Tectonophysics 57, 285-295.
- Caputo, M. (1974), Analysis of Seismic Risk. Engineering Seismology and Earthquake Engineering, Nato Advanced Study Institutes Series, Series E: Applied Sciences - No. 3 Noordhoff-Leiden.
- 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.
- Cornell, C.A. 1968, Engineering seismic risk analysis, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 58, p. 1583-1606.
- Dewey, J.W. 1976, Seismicity of Northern Anatolia, Bull. Seism. Soc. Am. 66, 847-865.
- Grivas, A.A., Dyvik, R. and Howland, J. 1980, An engineering analysis of the seismic history of New York State, Proc. of the Seventh World Conf. on Earthquake Engineering 1, 324-331, 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 Systems, John Wiley and Sons, New York.
- Kandilli Deprem Kataloğu 1981, Kandilli Deprem Kataloğu 1900-1975, Bilgisayar çıkışı, Kandilli Rasathanesi - Sismoloji Bölümü, İstanbul (yayınlanmamış).
- Karnik, V. and Hubnerova, Z. 1968, The probability of occurrence of largest earthquakes in the European Area, Pure and Appl. Geophys. 70, 61-73.
- Kelleher, J.A. 1970, Space-time seismicity of the Alaska-Aleutian Seismic Zone, J. Geophys. Res. 75, 5745-5756.
- Ketin, İ. 1969, Kuzey Anadolu Fayı hakkında, MTA Enstitüsü Dergisi 72, 1-27.
- Ketin, İ. 1976, Genel Jeoloji, Cilt 1, Yerbilimlerine Giriş. İTÜ Yayınları.
- 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.
- Lomnitz, C. 1974, Global Tectonics and Earthquake Risk, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Milne, W.G., Davenport, A.G. 1969, Distribution of earthquake risk in Canada, Bull. Seism. Soc. Am. 59, 729-754.
- Mogi, K. 1969, Relationship between the occurrence of great earthquakes and tectonic structures, Bull. Earthq. Res. Inst. 47, 429-451.
- Oliveira, C.S. 1974, Seismic Risk Analysis, Report No. EERC 74-1, Univ. of California, Berkeley.
- Patwardan, A.S., Kulkarni, R.B. and Tocher, D. 1980, A Semi-Markov model for characterizing recurrence of great earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am. 70, 323-347.
- Rikitake, T. 1975, Statistics of ultimate strain of the earth's crust and probability of earthquake occurrence, Tectonophysics 26, 1-21.
- Schenkova, Z. and Karnik, V. 1970, The probability of occurrence of largest earthquakes in the European Area 11, Pure and Appl. Geophysics 80, 152-161.
- Schilen, S. and Toksöz N. 1970, Clustering model for earthquake occurrences, Bull. Seism. Soc. Am 60, 1765-1787.
- Shah, H.C. and Movassate, M. 1975, Seismic risk analysis of California State water project, Proc. of Fifth European

- Conf. on Earthquake Engineering 2, Chap. 10/156, İstanbul.
- Sipahioğlu, S. 1984, Kuzey Anadolu Fay Zonu ve çevrenin deprem etkinliğinin incelenmesi, Deprem Araştırma Bülteni 45.
- Sykes, L.R. 1971, Afterschock zones of great earthquakes, seismicity gaps and earthquake prediction for Alaska and the Aleutians, J. Geophys. Res. 76, 8921-8941.
- Türkiye ve Dolayları Deprem Kataloğu (1986), Türkiye ve Dolayları Deprem Kataloğu 1881-1980, Bilgisayar çıkışı. Kandilli Rasathanesi - Sismoloji Bölümü, İstanbul (yayınlanmamış).
- Yegulalp, T.M. and Kuo, J.T. 1974, Statistical prediction of the occurrence of maximum magnitude earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am. 64, 393-414.