

**Karbon Yakalama ve Depolama için CO₂ Taşımasının
Risk Tayini: Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi**

Proje No: 111M798

Prof. Dr. M. Semih YÜCEMEN
Prof. Dr. H. Şebnem DÜZGÜN

ŞUBAT 2014
ANKARA

ÖNSÖZ

Bu sonuç raporunda BS-ERA.NET çerçevesinde yürütülen ve TÜBİTAK tarafından desteklenen **111M798** Kod nolu **Karbon Yakalama ve Depolama için CO₂ Taşımalarının Risk Tayini** başlıklı proje kapsamında **Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi** konusunda yapılan çalışma yer almaktadır. Türkiye'nin yanında Yunanistan, Romanya ve Bulgaristan da bu projenin ortakları olmuşlardır. Bu ülkelerin projede yer alan ilgili kurumları şunlardır:

Yunanistan: National Technical University of Athens (NTUA) – Proje koordinatörü.

Romanya: Institute for Studies and Power Engineering (ISPE) – Projenin 1. ortağı.

Bulgaristan: Technical University of Sofia (TUS) – Projenin 2. ortağı.

Türkiye: Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) – Projenin 3. ortağı.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi olarak projenin Çoklu-Tehlike Risk Analizi başlıklı 2. İş Paketindeki **Sismik Tehlikenin Tahmini** konusunda görev alınmıştır. Sorumlu olduğumuz “Görev 2.2 Sismik Risk Analizi” başlıklı görevlendirme: (i) Karbondioksit (CO₂) taşımalarının yapılacağı boru hattı boyunca tasarıma esas teşkil edecek sismik tehlikenin saptanmasına ilişkin yöntem ve standartları belirlemek; (ii) Pilot uygulama için seçilecek bölgede öngörülen yöntemlerle sismik tehlikenin hesaplanması olarak tanımlanmıştır.

Raporda boru hattının inşa edileceği bölgedeki sismik tehlikenin belirlenmesi için uygulanacak olan olasılıksal sismik tehlike analizi (**OSTA**) modelinin başlıca aşamaları ayrıntılı bir şekilde anlatılmış ve bu aşamalarının uygulanması bir örnek çalışma ile gösterilmiştir. Bu örnek çalışmada Bursa ili ve yakın çevresi pilot bölge ve Bursa ilinin kuzeybatısından geçen doğal gaz boru hattı segmenti de pilot boru hattı olarak seçilmiştir.

Projede pilot uygulama için, ISPE firması tarafından Romanya’da inşa edilmesi planlanan ve CO₂ taşımada kullanılacak olan boru hattının yer alacağı bölge öngörülmüştü. Ancak sismik tehlike analizinin tarafımızdan gerçekleştirilmesi için boru hattının konumu ve bölgenin depremselliği ile ilgili gerekli bilgilerin derlenerek ISPE firması tarafından bize gönderilememesi nedeni ile sismik tehlike analizi Bursa ili ve yakın çevresi için gerçekleştirilmiş ve seçilen doğal gaz boru hattı segmenti boyunca sismik tehlike hesaplanmıştır. Projenin kapsamında olmamasına rağmen, bu raporda seçilen doğal gaz boru hattı segmentinin deprem güvenliğinin tahmini için bir model sunulmuş ve uygulaması da bu boru hattı segmenti için gösterilmiştir.

BS-ERA.NET çerçevesinde proje ortaklarının birlikte yürüttükleri çalışma sonucunda ortaya çıkan doküman (proje çıktısı), **Risk Assessment Guidelines**, da bu Sonuç Raporu ile birlikte sunulmuştur.

Bu araştırma BS-ERA.NET kapsamında, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun desteklediği 111M798 numaralı proje çerçevesinde yürütülmüştür. Araştırmacılar bu destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkür ederler. Projenin değişik aşamalarında görev alarak katkıda bulunan bursiyerler Sohrab Gheibi, Seyed Yashar Yasrobi, Naz Topkara ve Görkem Deniz Köksoy'a teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
Önsöz	i
İçindekiler	iii
Tablo Listesi	v
Şekil Listesi.....	vi
Özet	vii
Abstract	viii
1. Giriş.....	1
2. Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi (OSTA).....	2
2.1 Olasılıksal Sismik Tehlike Analizinin Başlıca Aşamaları	2
2.2 Literatür Taraması	4
2.3 Olasılıksal Sismik Tehlike Analizinin Ana Girdileri	6
2.3.1 Deprem Veri Tabanının Oluşturulması	6
2.3.2 Deprem Magnitüd - Tekerrür Modelleri	10
2.3.3 Depremlerin Zaman İçinde Oluşum Modelleri	13
2.3.4 Depremlerin Mekansal Dağılımı	15
2.3.5 Yer Hareketi Tahmin Denklemi	17
2.3.6 Belirsizliklerin Analizi	18
3. Pilot Uygulama.....	22
3.1 Giriş	22
3.2 Sismik Kaynaklar ve Sismik Veri Tabanı	22
3.3 Magnitüd Dağılımı ve Deprem Oluşum Modelleri	28
3.4 Zemin Hareketi Tahmin Modeli	28
3.4.1 Boore, vd. (1997) Tarafından Verilen Zemin Hareketi Tahmin Modeli	28
3.4.2 Kalkan ve Gülkan (2004) Tarafından Verilen Zemin Hareketi Tahmin Modeli	29

3.5	Bursa İli ve Yakın Çevresi İçin Değişik Varsayımlara Göre Sismik Tehlikenin Hesabı	29
4.	Boru Hattının Sismik Güvenirliğinin Tahmini	36
4.1	Giriş	36
4.2	Eleman ve Sistem Güvenirlik Modeli	36
4.3	Uygulama	39
5.	Özet ve Sonuçlar	44
	Kaynak Listesi	46

TABLO LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
1. Öncü ve artçı depremlerin ayırt edilmesinde kullanılacak olan uzaklık ve zaman pencerelerin boyutları (Deniz, 2006)	9
2. Arazi çalışmaları sonucunda Bursa il merkezi çevresinde belirlenen aktif fayların parametreleri (Yücemen vd., 2006)	26
3. Simav ve Kuzey Marmara fay zonlarını oluşturan ana fay segmentlerinin çeşitli parametrelerinin değerleri (Yücemen vd., 2006)	27
4. İlave edilen aktif fayların parametrelerinin değerleri (Yücemen vd., 2006)	28
5. Etkinliklerine göre fayların sınıflandırılması ve yaratacakları karakteristik depremlerin tekerrür süreleri (Yücemen vd., 2006)	30
6. Değişik varsayımlar altında geri plan sismik kaynak için hesaplanan β ve ν değerleri	31
7. Değişik varsayımlar ve bunlar için belirlenen öznel olasılık değerleri	32
8. Değişik tekerrür süreleri için doğal gaz boru hattı boyunca hesaplanan en büyük yatay yer ivme değerleri (PGA).....	33
9. Boru hattı segmentinin alt elemanları için hesaplanan güvenilirlik değerleri ($\mu_D = 1g$ ve $\sigma_D = 0.2g$)	41
10. Boru hattı segmentinin alt elemanlar için hesaplanan hasar görme olasılıkları ($\mu_D = 1g$ ve $\sigma_D = 0.2g$)	42
11. Boru hattı segmenti için güvenilirlik sınırları	42
12. Boru hattı segmenti için hasar görme olasılığı sınırları	42

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1. Budanmış üstel ve karakteristik deprem modelleri için magnitüd olasılık yoğunluk işlevleri	11
2. Schwartz ve Coppersmith (1984) tarafından önerilen karakteristik deprem modeli	12
3. Tekerrür süresi için kullanılan değişik olasılık dağılımları için geçerli olan tehlike oranı işlevleri. Üstel dağılım haricindeki tüm dağılımlar için ortalama değer 1, standart sapma ise 0.5' dir (Matthews, vd., 2002)	15
4. Sismik tehlike analizinin uygulaması için seçilen doğal gaz boru hattının takribi konumu	22
5. Sismik tehlike analizinin uygulaması için seçilen doğal gaz boru hattı ve seçilen bu boru hattının Botaş Genel Müdürlüğü doğal gaz ve petrol boru hatları haritasındaki konumunun gösterimi	23
6. Bursa ili ve civarı için aktif fay haritası (Yüçemen vd., 2006)	25
7. Doğal gaz boru hattının belirlenen segmenti boyunca 475 yıllık tekerrür süresi için hesaplanan en büyük yatay yer ivmesi (PGA) değerlerinin değişimi	34
8. Doğal gaz boru hattının belirlenen segmenti boyunca 1000 yıllık tekerrür süresi için hesaplanan en büyük yatay yer ivmesi (PGA) değerlerinin değişimi	34
9. Doğal gaz boru hattının belirlenen segmenti boyunca 2475 yıllık tekerrür süresi için hesaplanan en büyük yatay yer ivmesi (PGA) değerlerinin değişimi	35

ÖZET

Boru hatları, geniş coğrafi alanlara yayılmış altyapı sistemleridir. Deprem tehlikesine maruz boru hattı şebekelerinin sismik güvenilirliğinin hesaplanması, bu tür dağıtım şebekelerinin hasar verici bir deprem sırasında ya da sonrasında işlevlerini yerine getirebilmelerinin önemi nedeni ile gereklidir. Karbondioksit (CO₂) ya da doğal gaz taşıma ve dağıtım boru hatları gibi sistemlerin deprem güvenilirliğinin tahmini, sismik tehlike analizinin ve sistem güvenliği değerlendirmesinin yapılmasını gerektirmektedir. Raporda özellikle projenin esas amacı olan sismik tehlikenin olasılıksal yöntemlerle tahmini üzerinde durulmuştur. Sismik tehlike analizindeki aşamaların her birinin içerdiği rassal değişkenliklerden (aleatorik) ve bilgi eksikliğinden (epistemik) kaynaklanan belirsizlikler göz önünde tutulduğunda, sismik tehlike tahmininin olasılık ve istatistik yöntemlerinin kullanılarak yapılması kaçınılmaz olmaktadır.

Raporda boru hattının inşa edileceği bölgedeki sismik tehlikenin belirlenmesi için uygulanacak olan olasılıksal sismik tehlike analizi (**OSTA**) modelinin başlıca aşamaları ayrıntılı bir şekilde anlatılmış ve bu aşamalarının uygulanması bir örnek çalışma ile gösterilmiştir. Bu örnek çalışmada Bursa ili ve yakın çevresi pilot bölge ve Bursa ilinin kuzeybatısından geçen doğal gaz boru hattı segmenti de pilot boru hattı olarak seçilmiştir. Seçilen doğal gaz boru hattı segmentinin deprem güvenilirliğinin tahmini için bir model sunulmuş ve uygulaması da bu boru hattı segmenti için gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sismik tehlike, doğal gaz boru hattı, CO₂ taşıma riski, sistem güvenliği, boru hattı şebekesi.

ABSTRACT

Pipelines are systems that extend over large geographical areas. Earthquake hazard is an important design input for pipeline systems located in high seismic activity regions. Accordingly, in the construction of pipelines, such as carbon dioxide (CO₂) or natural gas transporting pipelines, the earthquake hazard should be quantified realistically and the seismic designs should be carried out consistent with this hazard in order to manage the associated risk in a rational way. Considering the aleatoric and epistemic uncertainties involved in the assessment of seismic hazard a probabilistic approach becomes necessary.

In this report basic guideline information needed in various steps of the probabilistic seismic hazard analysis (**PSHA**) is presented and the road map to be followed in the implementation is given. A pilot study is conducted to illustrate the implementation of the probabilistic seismic hazard analysis for developing earthquake hazard maps along the route of a selected pipeline. For this purpose the Bursa city center and its near vicinity has been chosen as the region to be considered in the pilot study and a segment of the natural gas transporting pipeline passing through the northwestern part of Bursa is selected as the pilot pipeline. Also, a method to estimate the seismic reliability of the selected segment of the natural gas transporting pipeline is developed and applied to this pipeline segment in order to illustrate its implementation.

Keywords: Seismic hazard, natural gas pipeline, CO₂ transportation risk, system reliability, pipeline network.

1. GİRİŞ

Boru hatları, geniş coğrafi alanlara yayılmış altyapı sistemleridir. Deprem tehlikesine maruz boru hattı şebekelerinin sismik güvenilirliğinin hesaplanması, bu tür dağıtım şebekelerinin hasar verici bir deprem sırasında ya da sonrasında işlevlerini yerine getirebilmelerinin önemi nedeni ile gereklidir. Karbondioksit (CO₂) ya da doğal gaz taşıma ve dağıtım boru hatları gibi sistemlerin deprem güvenilirliğinin tahmini, sismik tehlike analizinin ve sistem güvenliği değerlendirilmesinin yapılmasını gerektirmektedir.

Depremlerin oluşumu ve boru hattı şebekesini oluşturan elemanların dayanımındaki aleatorik ve epistemik belirsizlikler göz önünde tutulduğunda, güvenilirlik değerlendirmesinin olasılık ve istatistik yöntemlerinin kullanılarak yapılması kaçınılmaz olmaktadır. Bu değerlendirme aşağıda sıralanan üç değişik türde çalışmayı gerektirmektedir.

(i) Sismik tehlike analizi: Boru hattı sisteminin inşa edileceği bölgedeki sismik tehlikenin belirlenmesi ve oluşacak sismik yüklerin olasılık dağılımının çıkartılması.

(ii) Dayanım analizi: Boru hattı sisteminde yer alan elemanların belirlenen bir göçme kriterine göre deprem yüklerine dayanımlarının olasılık dağılımının çıkartılması.

(iii) Sistem güvenilirlik analizi: Boru hattı sistemindeki tüm elemanları göz önünde tutarak, sistem güvenliği prensipleri çerçevesinde boru hattı sisteminin deprem güvenliğinin tahmin edilmesi.

Raporun bundan sonraki bölümlerinde yukarıda sıralanan çalışmalar ile ilgili gerekli bilgiler sunulacak ve **özellikle projenin esas amacı olan sismik tehlikenin olasılıksal yöntemlerle tahmini üzerinde durulacaktır.** Boru hattının inşa edileceği bölgedeki sismik tehlikenin belirlenmesi için uygulanacak olan olasılıksal sismik tehlike analizi (**OSTA**) modelinin başlıca aşamalarının uygulanması üzere Bursa ili ve yakın çevresi pilot bölge ve Bursa ilinin kuzeybatısından geçen doğal gaz boru hattı da pilot boru hattı olarak seçilmiştir. Boru hattının geçtiği bölgedeki sismik tehlikeye göre boru hattının deprem güvenliğinin tahmini bu projenin kapsamında değildir. Bununla birlikte, raporun son bölümünde bu amaca yönelik bir model önerilmiş ve önerilen modelin uygulaması gene yukarıda söz konusu edilen, Bursa ilinin kuzeybatısından geçen bir doğal gaz iletim boru hattı segmenti için gerçekleştirilmiş ve seçilen bu segmentin deprem güvenliği tahmin edilmiştir.

2. OLASILIKSAL SİSMİK TEHLİKE ANALİZİ (OSTA)

2.1 Olasılıksal Sismik Tehlike Analizinin Başlıca Aşamaları

Sismik tehlike analizindeki aşamaların her birinin içerdiği rassal değişkenliklerden (aleatorik) ve bilgi eksikliğinden (epistemik) kaynaklanan belirsizliklerin göz önünde bulundurulabilmesi için mutlaka olasılık ve istatistik yöntemlerinin kullanılması gereklidir. Olasılıksal sismik tehlike analizini, sismik tehlikenin sayısal olarak belirlenmesi amacı ile yürütülen ve olasılıksal sonuçların hesaplandığı ve sunulduğu bir süreç olarak düşünmek mümkündür. Deterministik yöntemlere nazaran, olasılıksal sismik tehlike analizleri jeolojik, jeofizik, sismolojik ve tarihsel verilerin daha sistematik bir şekilde dikkate alınmasını sağlamaktadır. Ayrıca deterministik sismik tehlike analizinde sadece en kritik ya da birkaç kritik deprem senaryosu göz önünde tutulurken, olasılıksal yaklaşımda olası tüm deprem senaryolarını dikkate almak ve bunların toplam etkisini sonuçlara yansıtmak mümkün olmaktadır.

Boru hattı sisteminin yerleştirileceği bölgedeki sismik tehlikenin belirlenmesi için uygulanacak olan olasılıksal sismik tehlike analizi (**OSTA**) modelinin başlıca aşamaları aşağıda sıralanmıştır:

(i) Etkilenme alanının tespiti ve bu alanda geçmişte meydana gelmiş depremlerle ilgili bilgileri içeren deprem kataloglarından yararlanarak bir sismik veri tabanının hazırlanması ve gerekli değişiklikleri ve ayarlamaları yaparak bu veri tabanının yeknesak ve yansız olmasının sağlanması. Deprem kataloglarındaki ham veriler şu hususlar göz önünde tutularak gerekli işlemlere tabi tutulmalıdır: Mümkün olduğu takdirde değişik kataloglardan elde edilen ham veriler karşılaştırılmalı, tekrarlar önlenmelidir. Değişik ölçeklerde verilen magnitüd değerleri tek bir ölçeğe, tercihen moment magnitüd (M_w) ölçeğine, dönüştürülmelidir. Bu amaçla Deniz ve Yüccemen (2010) tarafından geliştirilen dönüşüm denklemleri kullanılabilir. Zaman ve mekan (uzaklık) pencerelerinin boyutları tanımlanarak öncü ve artçı depremler belirlenmeli ve istatistiksel bağımsızlığı sağlamak için bunlar veri tabanlarından çıkartılarak sadece ana şoklardan oluşan alternatif bir sismik veri tabanı oluşturulmalıdır. Ayrıca, deprem katalogu incelenerek değişik büyüklükteki depremlerin kataloglarda eksik sayıda yer almasının yarattığı yanlılık giderilerek, tekerrür oranlarının hesabı eksiksiz bir veri tabanına dayandırılmalıdır.

(ii) İncelenen bölgede alansal ve çizgisel sismik kaynakların tanımlanması. Aktif fay haritasının hazırlanması ve tanımlanan fayların özelliklerini ifade eden parametrelerin

değerlerinin belirlenmesi. Yeni nesil sismik tehlike haritalarının çıkartılmasında aktif faylardan kaynaklanan sismik tehlikenin tahmini önem kazanmıştır. Dolayısı ile yapılacak bir bölgesel deprem tehlikesi değerlendirmesinde inşaat sahasını etkileyebilecek mesafedeki aktif fayların kapsamlı bir arazi ve ofis çalışması yürütülerek belirlenmesi ve bölgenin aktif fay haritasının hazırlanması gereklidir. Bu haritanın hazırlanması sırasında belirlenen aktif faylarla ilgili olarak, her bir fayın türü, geometrisi (doğrultu ve eğimi), uzunluğu, segmenti, yaşı, toplam atım miktarı, yıllık kayma hızı, maksimum deprem üretme potansiyeli, maksimum depremlerin yinelenme aralığı gibi başlıca fay parametrelerinin de tahminine çalışılmalıdır.

(iii) Deprem merkez-üstlerinin konumlarını ve bunların belirlenen aktif faylar ile ilişkilerini incelemek üzere bir sismotektonik haritanın çizilmesi. Sismik veri tabanında yer alan depremlerin merkez-üstlerinin konumuna göre sismik kaynaklara dağıtılması ve buna bağlı olarak da her sismik kaynak için elde edilecek magnitüd-tekerrür ilişkisine göre magnitüd için bir olasılık dağılımının çıkartılması ve diğer sismisite parametrelerinin değerlerinin saptanması. Sismik tehlike analizinde magnitüd-tekerrür ilişkisi için değişik modeller kullanılmaktadır. Bunların arasında magnitüd sıklık ilişkisi için üstel dağılım ve karakteristik deprem modelleri en yaygın uygulananlarıdır. Belirlenen sismik kaynakların hiçbirisi ile ilişkilendirilemeyen depremlerin katkısını da dikkate almak üzere alansal geri plan sismik kaynakların tanımlanmalıdır. Ayrıca mekansal olarak düzleştirilmiş sismisite modelinin de (Frankel, 1995) göz önünde tutulması gereklidir.

(iv) Depremlerin zaman içinde oluşumları için uygun bir stokastik modelin seçilmesi. Depremlerin zaman içindeki bağımlılığını göz önünde tutmamasına rağmen Poisson süreci depremlerin zaman içinde oluşumu için en sık kullanılan stokastik modeldir. Yinelenme rassal süreci ile (örneğin Brownian aşma zamanı olasılık dağılımı, Matthews, vd., 2002) depremlerin zamana olan bağımlılığını dikkate almak mümkün olmaktadır.

(v) Yerel verilere dayanan bir yer hareketi tahmin (azalım) ilişkisinin çıkartılması ya da mevcutlar arasından uygun birinin seçilmesi.

(vi) Göz önünde tutulan tüm sismik kaynakların inşaat sahasındaki sismik tehlikeye katkılarını birleştirecek bir hesaplama algoritmasına göre seçilen deprem şiddeti ölçüsü ya da zemin hareketi parametresi için olasılık dağılımının elde edilmesi. Sayısal hesaplamalar, bu amaçla hazırlanmış olan bilgisayar yazılımları kullanılarak yapılacağından uygun bir yazılım paketinin seçilmesi.

(vii) Değişik türdeki belirsizliklerin değerlendirilmesinin ya doğrudan yapılması ya da duyarlılık analizleri ve mantık ağacı (Yüçemen, 1982) ya da benzeri yöntemler yolu ile bilgi eksikliğinden kaynaklanan (epistemik) belirsizliklerin etkilerinin sonuçlara yansıtılması.

(viii) Seçilen yer hareketi parametresinin belirli bir tekerrür süresine karşılık gelen değerinin boru sisteminin yer aldığı bölgedeki değişimini gösteren sismik tehlike haritasının çizimi.

Söz konusu bu aşamaların her biri, literatür taramasının yer aldığı Bölüm 2.2'den sonraki alt-bölümlerde daha ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

2.2 Literatür Taraması

Türkiye'de olasılıksal sismik tehlike analizine ilişkin ilk çalışmalar 1975 yılında Gülkan ve Yüçemen (1975) tarafından başlatılmıştır. Daha sonraları nükleer santral inşası için düşünülen belirli yerler arasında deprem tehlikesi açısından ayırım yapabilmek amacıyla olasılık kuramının uygulandığı değerlendirme çalışmaları yapılmıştır (Gülkan ve Yüçemen, 1977; Gürpınar, vd., 1979; Gülkan ve Gürpınar, 1977). Bu özel uygulamaların yanı sıra ülkemiz için şiddet veya maksimum ivme ile ifade edilen sismik tehlike haritaları da geliştirilmiştir (Yarar, vd., 1980; Erdik, vd., 1985; Gülkan, vd., 1993).

Alternatif sismik tehlike analizi modeli geliştirmeye yönelik çalışmalar çerçevesinde sismisite parametrelerindeki belirsizlikler ayrıntılı bir biçimde incelenmiş, ve Bayes kuramı yardımı ile ve mantık ağacı kullanılarak bu belirsizliklerin etkilerinin sismik tehlike tahminlerine yansıtılmasını sağlayacak bir yöntem geliştirilmiştir (Yüçemen, 1982; Yüçemen ve Gülkan, 1981; Başöz ve Gülkan, 1992; Gülkan, vd., 1993).

Bender (1986) tarafından geliştirilen ve sismik kaynak bölge sınırlarının konumundaki belirsizliğin doğrudan hesaplara katılmasını sağlayan algoritma, Gülkan ve Yüçemen (1991) ve Yüçemen ve Gülkan (1994) tarafından tadil ederek iki farklı yönde farklı belirsizlikler olması durumunun sonuçlara yansıtılması gerçekleştirilmiştir.

Çizgisel sismik kaynakların neden olduğu deprem tehlikesinin hesabı için Yüçemen (1989) deprem oluşumlarını bir zaman-mekan süreci olarak modellemiştir. Bu model Akkaya ve Yüçemen (2000, 2002) tarafından Kuzey Anadolu fay bölgesine ilişkin sismik tehlikenin tahmininde kullanılmıştır. Zorunlu deprem sigortası ile ilgili olarak yapılan çalışmada

(Bommer, vd., 2002) Türkiye için bir sismik tehlike analizi yapılmıştır. Aynı amaçla Deniz (2006), Deniz ve Yüçemen (2005, 2009) tarafından yapılan çalışmalarda da değişik varsayımlar altında sismik tehlike analizleri yapılmıştır.

Türkiye’de karakteristik depremlere dayalı yinelenme modelinin sismik tehlikenin tahminine uygulaması Marmara bölgesi (Atakan, vd., 2002; Erdik, vd., 2004; Parsons, 2004) ve Bolu şehri (Yüçemen ve Yılmaz, 2004; Yüçemen vd., 2008) ile sınırlı kalmıştır. Erdik vd. (1999) Türkiye ve civarı için bir sismik tehlike analizi yapmışlardır.

Boru hatları, ulaşım, iletişim ve güç dağıtım sistemleri, geniş coğrafi bölgelere yayılmış candamarı şebekeleridir (lifelines). Candamarı şebekelerinin deprem tehlikesine göre güvenilirliğini değerlendirecek bir model Selçuk ve Yüçemen (1999, 2000a, 2000b) tarafından önerilmiş ve gerekli hesaplamaları yapacak bir yazılım paketi de geliştirilmiştir.

Yurt dışında sismik tehlike konusunda yapılan çalışmaları zaman ve mekanda deprem oluşumları için yapılan varsayımlara göre üç grupta toplamak mümkündür:

(i) Deprem olaylarının zaman ve mekanda bağımsız olduklarını varsayan modeller:

Sismik tehlikenin tahmininde kullanılan ilk modeller çoğunlukla deprem olaylarının zaman ve mekanda bağımsız oldukları varsayımına dayanırlar. Poisson modeli (örneğin Cornell, 1968, 1971; Der Kiureghian ve Ang, 1977; Bender, 1986; Yüçemen ve Gülkan, 1994) ve uç değer istatistikleri (örneğin, Epstein ve Lomnitz, 1966; Lomnitz, 1974; Yegulalp ve Kuo, 1974; Burton, 1978; Knopoff ve Kagan, 1977; Makropoulos ve Burton, 1986) bu tür modellere örnek olarak verilebilir.

(ii) Depremlerin zaman ya da mekandaki bağımlılığını göz önünde tutan modeller:

“Elastik geri tepme kuramı” (Reid, 1910) ile tutarlı olarak depremlerin zamandaki bağımlılığını Markov özelliği taşıyan süreçlerle ile yansıtan bazı stokastik modeller geliştirilmiştir (örneğin, Patwardhan, vd., 1980; Kiremidjian, 1982; Suzuki ve Kiremidjian, 1991). Zamana bağımlı (örneğin, Shimazaki ve Nakata, 1980; Anagnos ve Kiremidjian, 1984) ve kaymaya bağımlı (örneğin, Kiremidjian ve Anagnos, 1984) tahmin modelleri Markov modelinin özel durumlarıdır. Hem zamana hem de kaymaya bağımlı bir model de Cornell ve Winterstein (1988) tarafından önerilmiştir. Depremlerin mekandaki bağımlılığını yansıtan modeller de geliştirilmiştir (örneğin, Kiremidjian, 1982; Zerva, vd., 1990). Yinelenme sürecine dayanan modellerde, depremlerin oluşumu, aynı dağılıma sahip tekerrür süreleri olan bir olaylar dizisi şeklinde, zamana bağımlılık ise tekerrür süreleri için varsayılan dağılımlara bağlı olan tehlike

oranı yolu ile modellenmektedir. Örneğin, Poisson süreci, tehlike oranının sabit ve tekerrür sürelerinin üstel dağılıma sahip olduğu bir yinelenme sürecidir. Esteva (1970) tekerrür süreleri için gamma dağılımını önermiştir. Weibull dağılımı, elastik geri tepme kuramı (Reid, 1910) ile uyumlu olarak, en son deprem olayından sonra geçen süre ile artan bir tehlike oranına sahip olması nedeni ile tekerrür zamanları için sıkça kullanılmıştır (örneğin, Kameda ve Ozaki, 1979; Hagiwara, 1974; Brillenger, 1982).

Wu, vd., (1995), karma (hybrid) yinelenme modelini geliştirmişlerdir. Bu modele göre, büyük magnitüdü karakteristik depremlerin zamana olan bağımlılığı yinelenme süreci ile modellenmiş ve daha küçük depremler için kabul edilen üstel dağılım ile birleştirilmiştir. Karma yinelenme modelinde bu iki bileşenden kaynaklanan sismik tehlike toplanarak birleştirilmiştir.

(iii) Depremlerin hem zamanda hem de mekandaki bağımlılığını göz önünde tutan modeller: Deprem oluşumlarını bir mekan-zaman süreci olarak modelleyen çalışmalar az sayıdadır (Vere Jones ve Smith, 1981; Veneziano ve Cornell, 1974; Kiremidjian ve Anagnos, 1984; Yüçemen, 1989, 1993; Yüçemen ve Akkaya, 1995; Akkaya ve Yüçemen, 2000, 2002). Geçmiş deprem verilerine göre hesaplanan deprem tekerrür tahminleri ile sismolojik ve jeolojik incelemelere göre yapılanlar arasındaki çelişkiler, araştırmacıları bu çelişkileri giderecek yeni tekerrür modellerinin geliştirilmesine teşvik etmiştir. Bunlar arasında Schwartz ve Coppersmith (1984) tarafından önerilen karakteristik deprem modeli en fazla kabul gören olmuştur. Üstel dağılım modelinin büyük alanlardaki magnitüd dağılımını yeterli bir biçimde tanımladığını, ama fay segmentlerinde oluşan büyük magnitüdü depremlerin oluş sıklığını eksik tahmin ettiğini belirterek, karakteristik deprem modelini önermişlerdir. Youngs ve Coppersmith (1985), karakteristik deprem modeli için geçerli olacak bir olasılık yoğunluk işlevini çıkartmışlardır.

2.3 Olasılıksal Sismik Tehlike Analizinin Ana Girdileri

2.3.1 Deprem Veri Tabanının Oluşturulması

Sismik veri tabanının oluşturulmasında deprem katalogları en önemli veri kaynağıdır. Ancak deprem kataloglarındaki veriler doğrudan kullanıma uygun olmayabilir. Genellikle deprem kataloglarında deprem magnitüdüleri değişik ölçeklerde verilmektedir. Bunların tek bir ölçeğe çevrilerek, magnitüd açısından yeknesak bir veri tabanının oluşturulması tavsiye

edilmektedir. Poisson modelinin içerdiği bağımsızlık varsayımı nedeni ile öncü ve artçı depremlerin ayıklanması da gerekebilir. Diğer bir problem de, deprem kataloglarında yer alan küçük magnitüd değerli depremler ile çok uzun tekerrür süreli büyük magnitüdü depremlerin sayılarının eksik olmasının yarattığı yanlılıktır. Aşağıdaki alt-bölümlerde bu problemlerin çözümüne yönelik işlemler kısaca özetlenmiştir.

(i) Deprem Veri Tabanının Tek Bir Magnitüd Ölçeğine Göre Oluşturulması: Kataloglarda yer alan değişik magnitüd ölçeklerinin tek bir magnitüd ölçeğine çevrilmesinde moment magnitüdünün (M_w) esas alınması uygun olacaktır. Farklı büyüklük ölçeklerine göre (cisim dalga magnitüdü – M_b , süre magnitüdü – M_d , yerel magnitüd – M_L ve yüzey magnitüdü – M_s) raporlanan deprem kayıtlarının M_w ölçeğine çevrilmesi oldukça önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu amaçla değişik ampirik dönüşüm ilişkileri geliştirilmiştir (örneğin Boore ve Joyner, 1982; Ulusay, vd., 2004; Scordilis, 2006). Bu ilişkilerin elde edilmesinde yaygın olarak standart en küçük kareler regresyonu kullanılmıştır. Bu yöntem, aralarında bağıntı kurulacak değişkenlerden yalnızca bağımlı değişkende (M_w) hata (depremin rassal oluşumundan ileri gelen) olması durumunu göz önüne almaktadır. Ancak deprem büyüklüklerinin çeşitli nedenlerden kaynaklanan belirsizlikler yüzünden hatasız olarak belirlenmesi mümkün değildir. Dolayısıyla aralarında bağıntı kurulacak olan bağımlı ve bağımsız değişkenlerin her ikisinin de hata içermesi kaçınılmazdır. Böyle bir durumda regresyon analizi yapılabilmesi için ortogonal regresyon yönteminin kullanılması uygun olacaktır. Casterello, vd. (2004) standart regresyon yoluyla elde edilen dönüşüm denklemlerindeki yanlılığı incelemiş ve geliştirdikleri “Unified Italian Catalogue”da 0.4 magnitüd değerlerine erişen hataların olabileceğini belirtmişlerdir.

Deniz ve Yücemem (2010), ortogonal regresyon yöntemini ve son yüzyıl içerisinde ülke çapında meydana gelmiş bütün depremlerden oluşan bir veri tabanını kullanarak bir dizi dönüşüm ilişkileri elde etmiştir. Bu ilişkiler Denklem 1’de gösterilmiştir.

$$M_w = 2.25 \times M_b - 6.14 \quad (1.a)$$

$$M_w = 1.27 \times M_d - 1.12 \quad (1.b)$$

$$M_w = 1.57 \times M_L - 2.66 \quad (1.c)$$

$$M_w = 0.54 \times M_s + 2.81 \quad (1.d)$$

Ortogonal regresyon, çevirim ilişkilerinin eğimlerini standart en küçük kareler yöntemine göre her zaman daha büyük tahmin etmektedir. Bu nedenle büyük depremlerin magnitüdlerini geleneksel yöntemle göre daha büyük vermektedir. Küçük depremler için bunun tersi geçerli olmakla birlikte, bu depremlerin sismik tehlikeye katkısı zaten oldukça küçük seviyelerde

kalmaktadır. Dolayısıyla deprem tehlikesinin tahmininde ortogonal regresyonun kullanılması durumunda geleneksel yöntemin sonuçlarına göre daha emniyetli tarafta değerler elde edilecektir.

Deniz ve Yüccemen (2010) ya da Ulusay, vd. (2004) tarafından verilen ilişkiler kullanılarak tümü ile moment magnitudü ölçeğinde ifade edilen bir veri tabanını elde etmek mümkün olacaktır.

(ii) Deprem Veri Tabanının İkincil Depremlerden Arındırılması: Olasılıksal sismik tehlike analizinde yaygın bir şekilde kullanılan Poisson modeli depremlerin gerek yer, gerekse zaman açısından birbirlerinden bağımsız bir şekilde meydana geldikleri varsayımına dayanır. Poisson modelinin gerektirdiği bağımsızlık koşulunu sağlamak için deprem öbekleşmelerinin belirlenerek öncü ve artçı depremlerin (ikincil depremler) sismik veri tabanından dışlanması lazımdır.

Öncü ve artçı şokların zaman ve mekan açısından tayini için birçok çalışmalar yapılmıştır (örneğin: Omori, 1894; Gardner ve Knopoff, 1974; Prozorov ve Dziewonski, 1982; Van Dyck, 1985; Utsu, vd., 1995; Savage ve Rupp, 2000 ve Kagan, 2002). Öncü ve artçı depremler zamansal ve mekansal olarak ana şok etrafında benzer dağılımlar göstermektedirler. Bu nedenle, ikincil depremlerin tayini öncü ve artçı depremler için farklılık göstermemektedir. Sözü geçen çalışmalar mühendislik uygulamaları için belirli bir büyüklük seviyesindeki depremlerin, deprem bölgesi, sismik kaynak, ilgili fayın uzunluğu ve çeşidi gibi ayrımlar gözetilmeksizin aynı ikincil deprem aktivitesine yol açtığını kabul eden çalışmalardır. Burada da her bir deprem büyüklüğü seviyesi için, bu seviyede bulunan bir ana şoka belirli bir zaman ve uzaklık penceresi içinde kalan bütün depremlerin ilgili ana şokun artçı depremleri olduğu kabul edilmiştir. Bir depremin öncü deprem sayılabilmesi için ise, kendi büyüklük seviyesi için belirlenmiş olan zaman ve uzaklık pencerelerinin içerisinde, kendisinden daha büyük bir deprem bulunması gerekmektedir. Böyle durumlarda magnitudü daha büyük olan ikinci depremin ana şok olduğu varsayılmıştır. Bu varsayımlara istisna olarak, yalnızca magnitudü 6.0'dan büyük olan bütün depremlerin ana şok olduğu kabul edilmiştir.

Deniz (2006), yukarıda belirtilen varsayımlar çerçevesinde ve Van Dyck (1985), Utsu, vd. (1995), Savage ve Rupp (2000) ve Kagan (2002) tarafından yapılan çalışmalara dayanarak zaman ve mekan pencerelerinin boyutlarını belirlemiştir. Bu dört çalışmada verilen değerlere dayanarak artçı şoklar için uzaklık penceresi boyutlarını, Gardner ve Knopoff (1974) ve Savage ve Rupp (2000) tarafından verilen değerlerin ortalamasını alarak da zaman

pencerelerinin boyutlarını tespit etmiştir. Elde edilen uzaklık ve zaman pencerelerinin boyutları Tablo 1'de verilmiştir. Tabloda yer almayan ara değerlerin hesabında, zaman için doğrusal, uzaklık için de log-doğrusal enterpolasyon kullanılması önerilmiştir. Tibi, vd. (2011) tarafından önerilen yöntem de bu amaçla kullanılabilir.

Tablo 1. Öncü ve artçı depremlerin ayırt edilmesinde kullanılacak olan uzaklık ve zaman pencerelerinin boyutları (Deniz, 2006)

Magnitüd	Uzaklık (km)	Zaman (gün)
4.5	35.5	42
5.0	44.5	83
5.5	52.5	155
6.0	63.0	290
6.5	79.4	510
7.0	100.0	790
7.5	125.9	1326
8.0	151.4	2471

(iii) Deprem Veri Tabanındaki Eksikliklerin (Yanlılığın) Giderilmesi: Üstel olasılık yoğunluk işlevinin parametrelerinin tahmini için kullanılacak deprem katalog verilerinin her magnitüd düzeyinde eksiksiz olması gerekmektedir. Zaman içinde geriye doğru gidildikçe kataloglardaki deprem kayıtlarının hem kalitesi düşmekte hem de sayısı azalmaktadır. Yakın zaman içinde küçük, büyük tüm depremler kaydedilirken, çok eski kayıtlar sadece büyük depremleri içermektedir. Ayrıca kaydedilmiş depremler daima iskan edilmiş bölgelerde olup, insan yaşamından çok uzak yerde olan büyükçe depremler bile kayda geçmeyebilmektedir. Dolayısı ile deprem kataloglarındaki bu eksiklikler veri tabanında hem zamanda hem de mekanda yanlılıklara sebep olmaktadır. Buna bağlı olarak da bulunan tekerrür ilişkileri uzun süreli oluş sıklıklarını gerçekçi bir biçimde vermeyebilmektedir. Bu nedenle, belirli bir magnitüd aralığına düşen depremlerin eksiksiz olarak kayda geçirildiği zaman dilimini belirlemek gerekmektedir. Bu zaman dilimi belirlendikten sonra da o magnitüd aralığındaki depremlerin oluş sıklığı, sadece o zaman diliminde oluşan depremler göz önünde tutularak yapılacaktır.

Katalogda yer alan deprem sayılarının suni olarak, gözlemlerde mevcut eksikliklerden arındırılması için Stepp (1973) tarafından geliştirilmiş olan bir yöntem yaygın bir biçimde

kullanılmaktadır. Deprem kataloglarındaki yanlılığın giderilmesi için diğer bazı yöntemler Mignan ve Woessner (2012) tarafından verilmiştir.

2.3.2 Deprem Magnitüd - Tekerrür Modelleri

Deprem magnitüdlerinin olasılık dağılımı için üstel dağılım ve karakteristik deprem modelleri kullanılacaktır. Bunlar ile ilgili kısa bilgiler aşağıda yer almaktadır.

(i) Üstel Dağılım Modeli: Deprem magnitüdlerinin olasılık dağılımı, magnitüdü ile bunların oluş sıklıkları arasındaki ilişkiyi gösteren tekerrür bağıntılarından çıkartılır. En yaygın kullanılan ilişki Richter (1958) tarafından önerilen doğrusal magnitüd-sıklık ilişkisidir. Bu ilişkiye bağlı olarak elde edilen üstel olasılık dağılımının olasılık yoğunluk işlevi, $f_M(m)$ aşağıda verilmiştir:

$$\begin{aligned} f_M(m) &= k\beta e^{-\beta(m-m_0)} & m_0 \leq m \leq m_1 \\ &= 0 & \text{diğer yerlerde} \end{aligned} \quad (2)$$

Burada,

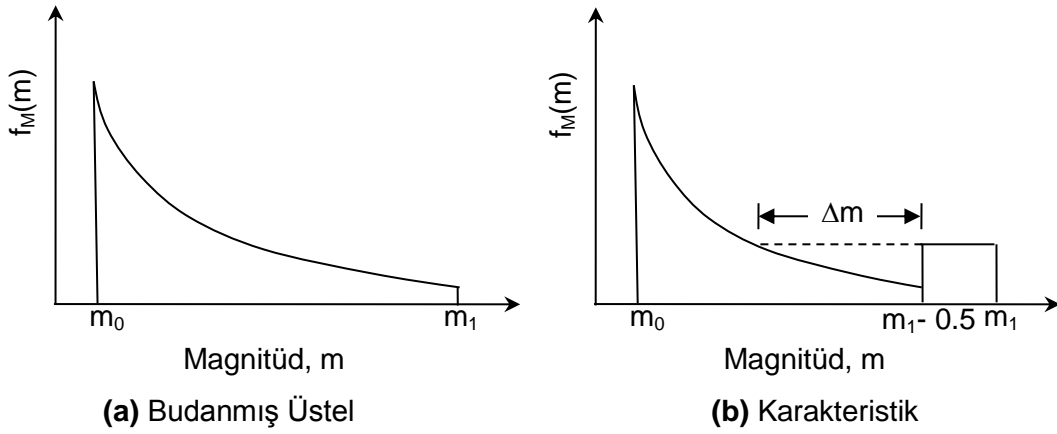
$$k = \left[1 - e^{-\beta(m_1 - m_0)} \right]^{-1} \quad (3)$$

birikimli dağılım işlevinin $m = m_1$ değerinde 1.0 olmasını sağlayan standartlaştırma katsayısı; m = Richter magnitüdü; $\beta = b(\ln 10)$; b = Richter tarafından önerilen doğrusal magnitüd-sıklık ilişkisinin eğimi; m_1 = deprem magnitüdlerinin üst sınırı (bölgede beklenebilecek en büyük deprem magnitüdü); m_0 = deprem magnitüdlerinin alt sınırıdır. β parametresi bölgenin tektonik yapısı ile ilişkili olup, büyük magnitüdü depremlerin küçüklere olan göreceli oranını gösterir. Bu bakımdan, β değerleri bölgenin tektonik açıdan sismik etkinliğinin bir göstergesi olarak kabul edilir.

Magnitüd için bir alt ve üst sınırın olduğu varsayımı ile magnitüd için elde edilen budanmış üstel olasılık yoğunluk işlevi, Şekil 1(a)'da gösterilmiştir.

Gözlem verilerine dayanarak üstel dağılımın parametrelerinin tahmini için değişik istatistiksel yöntemler kullanılabilir. Doğrusal regresyon ve en büyük olabilirlik istatistiksel tahmin yöntemleri en fazla tercih edilenlerdir. Standart en küçük kareler yöntemi, gözlenen ve

tahmin edilen değerler arasındaki farkların karelerinin toplamının en küçüklenmesine dayanmaktadır. En küçük kareler regresyon yönteminin değişik uygulamaları mümkündür. Örneğin: frekans ya da birikimli frekans verilerinin kullanılması, regresyonun her bir magnitüd düzeyindeki frekanslara o magnitüd düzeyindeki gözlem sayısına göre verilen ağırlıklara göre yapılması (McGuire, 2004). En büyük olabilirlik yöntemi ise üstel dağılımın parametrelerini gözlenen magnitüd verilerinin olabilirliğini en büyükleyecek şekilde tahmin etmektedir.

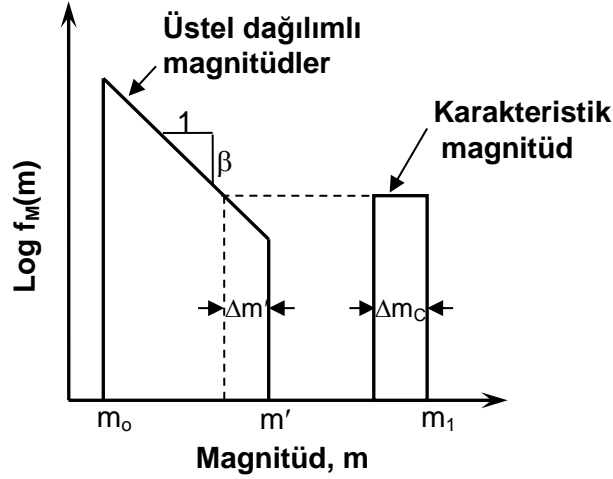


Şekil 1. Budanmış üstel ve karakteristik deprem modelleri için magnitüd olasılık yoğunluk işlevleri

(ii) Karakteristik Deprem Modeli: Geçmiş deprem verilerine göre hesaplanan deprem tekerrür tahminleri ile sismolojik ve jeolojik incelemelere göre yapılanlar arasındaki çelişkiler, araştırmacıları bu çelişkileri giderecek yeni tekerrür modellerinin geliştirilmesine teşvik etmiştir. Bunlar arasında Schwartz ve Coppersmith (1984) tarafından önerilen karakteristik deprem modeli en fazla kabul gören olmuştur. Schwartz ve Coppersmith (1984), üstel dağılım modelinin büyük alanlardaki magnitüd dağılımını yeterli bir biçimde tanımladığını, ama fay segmentlerinde oluşan büyük magnitüdü depremlerin oluş sıklığını eksik tahmin ettiğini belirterek, karakteristik deprem modelini önermişlerdir. Youngs ve Coppersmith (1985), karakteristik deprem modeli için geçerli olacak bir olasılık yoğunluk işlevini çıkartmışlardır. Bu modelde deprem magnitüdüleri m' değerine kadar üstel dağılımlı olarak alınmışlardır. Magnitüdü m' den büyük depremler karakteristik deprem olarak tanımlanmışlar ve bunların $m_1 - \Delta m_c$ ve m_1 arasında bir biçimli (uniform) dağılım gösterdikleri varsayılmıştır (Şekil 2).

Bu modelin kullanımı için Youngs ve Coppersmith (1985) bazı basitleştirici varsayımlar yapmışlardır. Δm_c , 0.5 ve $m' = m_1 - \Delta m_c$ olarak alınmıştır. Karakteristik depremin frekansının

da üstel dağılımın ($m'-1.0$) değerindeki frekansa eşit olduğu varsayılmıştır. Bu varsayımların uygulanması ve olasılık yoğunluk işlevinin altındaki toplam alanın 1 olmasının sağlanması için gerekli işlemin yapılması ile, karakteristik deprem modeli için aşağıda verilen olasılık yoğunluk işlevi elde edilmiştir:



Şekil 2. Schwartz ve Coppersmith (1984) tarafından önerilen karakteristik deprem modeli

$$f_M(m) = \begin{cases} k\beta e^{-\beta(m-m_0)} & m_0 \leq m \leq m_1 - 0.5 \\ k\beta e^{-\beta\left(\left(m_1 - \frac{3}{2}\right) - m_0\right)} & m_1 - 0.5 \leq m \leq m_1 \end{cases} \quad (4)$$

burada, k olasılık yoğunluk işlevinin altındaki toplam alanın 1 olmasını sağlayan katsayıdır ve şu şekilde ifade edilmiştir:

$$k = \left[1 - e^{-\beta(m_1 - 0.5 - m_0)} + \beta e^{-\beta\left(m_1 - \frac{3}{2} - m_0\right)} 0.5 \right]^{-1} \quad (5)$$

Bu varsayımlara göre ortaya çıkan olasılık yoğunluk işlevinin biçimi, Şekil 1(b)'de gösterilmiştir. Bu şekilde, $\Delta m = 1$ dir.

Yukarıda tanımlanan tekerrür ilişkileri için m_0 ve m_1 değerlerini de her sismik kaynak için belirlemek gerekir. Sismik tehlike analizleri için seçilecek deprem magnitüdü alt sınırı için üzerinde fikir birliğine varılmış bir değer olmasa da, $m_0 = 4.0$ ve 4.5 değerleri genellikle benimsenmektedir.

Sismik tehlike analizinde en önemli parametrelerden biri de sismik kaynaklar için belirlenecek olan deprem magnitüdü üst sınırıdır. Bu değerin tahmini için değişik yöntemler vardır. Gözlenmiş en büyük deprem magnitüdünün bir miktar artırılarak kullanılması bu yöntemlerden bir tanesidir. Diğer yöntemler kırılma boyu-magnitüd ve atım-magnitüd korelasyonlarına dayanmaktadır (Wells ve Coppersmith, 1994). Mevcut tüm yerel veriler ve belirtilen bu yöntemler kullanılarak m_1 için en iyi tahmin yapılmalıdır.

2.3.3 Depremlerin Zaman İçinde Oluşum Modelleri

Depremlerin zaman içinde gösterdikleri rassal dağılımın modellenmesi için değişik stokastik modeller geliştirilmiştir. Bunların arasında en yaygın olarak uygulanan ve bu projede de kullanılacak olan Poisson ve yinelenme modelleri aşağıda sunulmuştur.

(i) Poisson Modeli: Olasılıksal sismik tehlike analizi çalışmalarının çoğunluğunda depremlerin zaman içindeki oluşumlarının homojen Poisson sürecine uyduğu kabulü yapılmıştır. Poisson modelinde deprem olaylarının birbirlerinden bağımsız oldukları varsayılmaktadır. Bir sismik kaynak içerisinde ve belirli bir t zaman aralığında en az bir deprem olma olasılığı şöyledir:

$$\Pr(N \geq 1) = 1 - e^{-v \cdot t} \quad (6)$$

burada, v , incelenen bölgede, birim zaman süresinde (genellikle bir yıl) meydana gelen magnitüdü m_0 'a eşit veya m_0 'dan büyük depremlerin ortalama sayısı olup, $1/v$ ise yıl cinsinden ortalama tekerrür süresine eşittir. Poisson modelinde, v zaman içinde değişmeyen sabit bir değere eşittir.

(ii) Yinelenme Modeli: Depremlerin zamana olan bağımlılığını modellemek üzere yinelenme modellerini kullanmak mümkündür. Yinelenme sürecine dayanan modellerde, depremlerin oluşumu, aynı dağılıma sahip tekerrür süreleri olan bir olaylar dizisi şeklinde alınmaktadır. Diğer bir deyimle gelecekte olacak depremin beklenen zamanı sadece bir önceki depremin olduğu tarihe bağımlıdır. Fay segmentinde meydana gelen bir deprem sonraki deprem için yinelenme sürecini başlangıç durumuna getirerek tekrar başlatmaktadır. Zamana bağımlılık, tekerrür süreleri için varsayılan dağılımlara bağlı olan tehlike oranı yolu ile modellenmektedir. Tehlike oranı aşağıda denklemler verilen tehlike fonksiyonuna bağlıdır:

$$h(t) = \frac{f_T(t)}{1 - F_T(t)} \quad (7)$$

burada, $f_T(t)$ ve $F_T(t)$, sırası ile olaylar arası zamanın olasılık yoğunluk ve birikimli dağılım işlevleridir. Örneğin, Poisson süreci, tehlike oranının sabit ve tekerrür sürelerinin üstel dağılıma sahip olduğu bir yinelenme sürecidir.

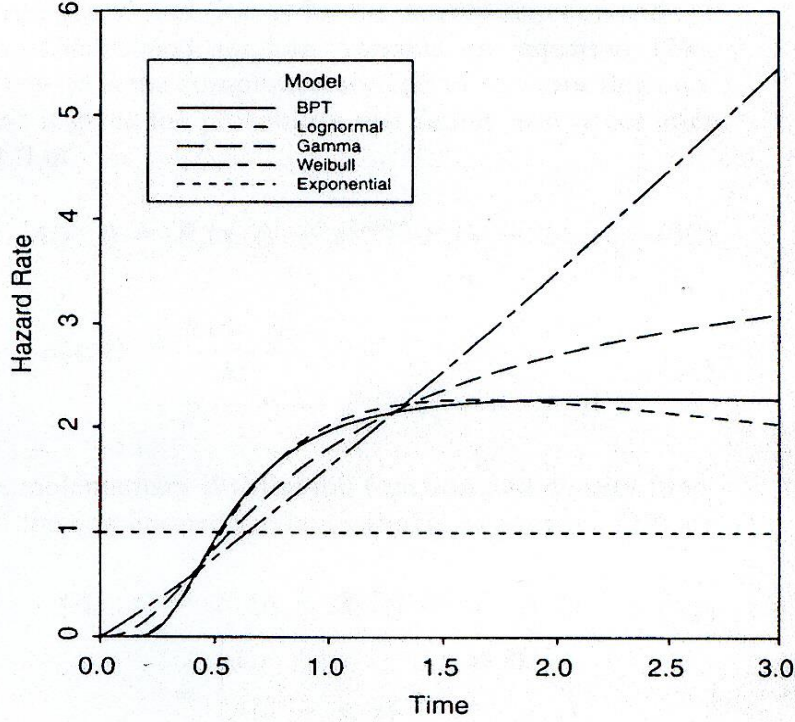
Esteva (1970) tekerrür süreleri için gamma dağılımını önermiştir. Weibull dağılımı, elastik geri tepme kuramı (Reid, 1910) ile uyumlu olarak, en son deprem olayından sonra geçen süre ile artan bir tehlike oranına sahip olması nedeni ile tekerrür zamanları için sıkça kullanılmıştır (örneğin, Kameda ve Ozaki, 1979; Hagiwara, 1974; Brillinger, 1982). Brownian Aşma Zamanı (Brownian Passage Time) modeli de karakteristik depremlerin tekerrür sürelerinin olasılık dağılımı için önerilmiştir (Matthews, vd., 2002). Brownian Aşma Zamanı (BAZ) modeli, San Francisco için 2002 yılında yapılan sismik tehlike analizinde kullanılmıştır. BAZ modeli için geçerli olan olasılık yoğunluk işlevi şöyledir (Matthews, vd., 2002):

$$f_T(t) = \left(\frac{\mu}{2\pi\alpha^2 t^3} \right)^{1/2} e^{\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\alpha^2 \mu t} \right)} \quad (8)$$

burada, μ ortalama tekerrür süresi ve α aperiyojiklik parametresi olup aynı zamanda standart sapmanın ortalama değere oranı olan değişkenlik katsayısına eşittir. Yinelenme modelinde, tekerrür süresi için kullanılan değişik olasılık dağılımları için geçerli olan tehlike oranı işlevlerinin değişimi Şekil 3'de gösterilmiştir. Bu şekilde de görüleceği üzere lognormal ve BAZ modelleri birbirlerine çok yakın değerler vermekte olup, depremlerin zamana bağımlı oluşum süreçlerini en iyi şekilde tasvir etmektedirler.

Wu, vd. (1995), karma (hybrid) yinelenme modelini geliştirmişlerdir. Bu modele göre, büyük magnitüdü karakteristik depremlerin zamana olan bağımlılığı yinelenme süreci ile modellenmiş ve daha küçük depremler için kabul edilen üstel dağılım ile birleştirilmiştir. Karma yinelenme modeli, büyük magnitüdü karakteristik depremlerin periyodik olarak meydana geldiği varsayımını içerebilmek için hafızasız Poisson modelini değiştirmektedir. Bu değişiklik karakteristik depremler için kabul edilen tek adımlık hafızadır. Diğer bir deyimle, bu modelde büyük magnitüdü karakteristik depremlerin oluşumunun bir önceki karakteristik depremden sonra geçen zamana bağımlı olduğu varsayılmaktadır. Buna ilaveten daha önceki bölümde de izah edildiği gibi, büyük magnitüdü karakteristik depremlerin olasılık

dağılımı için üstel dağılım yerine, karakteristik depremin yer aldığı dar aralıkta yoğunlaşmış bir biçimli (uniform) bir olasılık dağılımı varsayılmaktadır (bakınız Şekil 1 (b) ve 2).



Şekil 3. Tekerrür süresi için kullanılan değişik olasılık dağılımları için geçerli olan tehlike oranı işlevleri. Üstel dağılım haricindeki tüm dağılımlar için ortalama değer 1, standart sapma ise 0.5' dir (Matthews, vd., 2002)

2.3.4 Depremlerin Mekansal Dağılımı

Depremlerin mekandaki dağılımı sismik kaynaklar yoluyla tanımlanır. Sismik tehlike hesabında en önemli konulardan biri de, geçmiş depremlerin coğrafi dağılımı ile jeolojik ve tektonik bilgilerin incelenerek, inşaat sahası etrafında tehlike yaratabilecek deprem kaynaklarının saptanmasıdır. Geometrik özelliklerine bağlı olarak depremlerin mekan içinde oluşumu üç tür deprem kaynağına dayandırılmıştır. Bunlar nokta, çizgi ve alan kaynaklarıdır. Sismik kaynakların coğrafi konumlarının tayininde jeolojik, jeofiziksel ve sismolojik veriler ile geçmiş depremlerin merkez-üstlerinin konumlarını gösteren haritalardan yararlanılmalıdır. Uzman görüşü de sismik kaynakların konumlarının belirlenmesinde önemli rol oynar (SSHAC, 1997).

Nokta kaynak en basit sismik kaynak türüdür. Bir sismotektonik bölge ya da bir fay ile ilişkisi kurulamayan ve küçük bir bölge içinde yoğun bir şekilde toplandığı bilinen depremlerin bir nokta kaynaktan ortaya çıktığı varsayılabilir. Burada kullanılan “nokta” kelimesi, gerçek anlamda değil fakat kaynak boyutlarının, kaynağın inşaat sahasına olan uzaklığına oranla küçük olduğu bir bölgeyi tasvir etmek için kullanılmıştır. Kaynak boyutları küçük olduğu için, bir nokta kaynak içinde oluşacak tüm depremlerin inşaat sahasına olan uzaklıkları aynı ve ortalama uzaklığa eşit alınabilir.

Çizgi kaynaklar üç-boyutlu fay düzlemlerinin harita üzerinde görüntülenmesini sağlar. Deprem merkez-üstleri çoğu kez önemli fay sistemlerinin etrafında yoğunlaşır. Sismik tehlike analizinde fay segmentleri birer çizgi kaynak olarak alınır. Genellikle çizgisel bir kaynağın her yerinde deprem olma olasılığının eşit olduğu varsayılır. Çizgi kaynak olarak modellenen aktif faylarla ilgili olarak, her bir fayın türü, geometrisi (doğrultu ve eğimi), uzunluğu, segmenti, yaşı, toplam atım miktarı, yıllık kayma hızı, maksimum deprem üretme potansiyeli, maksimum depremlerin yinelenme aralığı gibi başlıca fay parametrelerinin belirlenmesi gereklidir.

Bazı bölgelerde mevcut jeolojik yapı ile geçmiş deprem olayları arasında belirgin bir ilişki kurulamaz; varolan deprem kayıtları belirli bir fay sistemini kesinlikle ortaya çıkarılmasına yetecek doğrultuda ve sayıda değildir. Ayrıca kalın örtü tabakaları fayların konumunun kesinlikle belirlenmesine olanak tanımayabilir. Böyle durumlarda, söz konusu bölge, depremlerin her yerde eşit olasılık ile oluşabilecekleri bir **alan kaynak** olarak alınabilir. Alan kaynaklar, etraflarındaki bölgelerden farklı ama kendi içlerinde aynı sismisite özelliklerine sahip olan ve ayrıca belirlenmiş aktif fayları dışlayan bölgeleri tanımlamak için kullanılmaktadır (Thenhaus ve Campbell, 2003).

Nokta kaynak modeli basit olması nedeni ile uygulamada çoğunlukla çizgi ve alan kaynakların nokta kaynaklarla yaklaşık tasviri yoluna gidilir. Bu amaçla bir alan kaynak daha küçük alanlara, bir çizgi kaynak ise daha küçük doğru parçalarına bölünür. Bu şekilde oluşturulan küçük boyutlu alt kaynak birimleri, inşaat sahasına uzaklıkları geometrik merkezlerinden ölçülen noktasal deprem kaynakları olarak alınmışlardır. Bu yaklaşıklardan doğan hata, özellikle inşaat sahasından uzak kaynaklar için çok küçük olacaktır. Sismik kaynakların geometrik özelliklerini ve coğrafi konumlarını belirlemek pek çok unsurun göz önünde tutulmasını gerektiren zor bir iştir.

Sismik kaynak bölgelerinin sınırlarını belirlemek ve aktif fayları ayırt etmek sismik tehlike analizinde çok önemlidir. Bunun için jeoloji, sismoloji, jeofizik, istatistik ve uzman görüşünün sağlayacakları her türlü bilgiden yararlanılmalıdır.

Ayrıca, belirlenen sismik kaynakların hiçbiri ile ilişkilendirilemeyen depremlerin katkısını da dikkate almak üzere alansal geri plan sismik kaynakların tanımlanması gerekmektedir. Geri plan sismik etkinliğin sonuçlara yansıtılmasında homojen sismisiteye sahip geri plan alan kaynak ve mekansal olarak düzleştirilmiş sismisite modellerine (Frankel, 1995 ve Frankel, vd., 1996) göre hesaplamalar yapılmalıdır.

2.3.5 Yer Hareketi Tahmin Denklemi

Sismik tehlikenin tahmini için depremin etkinliğini yansıtan bir zemin hareketi parametresi seçilmelidir. Bundan sonra da o parametrenin azalımına ilişkin bir model geliştirmelidir. Zemin hareketi tahmin ya da azalım modelleri zemin hareketi parametrelerinin özelliklerinin odak noktasından ya da sismik kaynağın seçilen bir noktasından uzaklaştıkça nasıl değişeceğini gösteren ve çoğunlukla gözlemsel yollarla elde edilen denklemlerdir. Bu denklemler genellikle m magnitudündeki bir depremin, r uzaklığındaki inşaat sahasında yaratacağı en büyük zemin hareketi parametresinin değerini veren bir fonksiyon şeklindedir. Uzaklık olarak, merkez-üstü, odak ya da sismik kaynak üzerindeki bir noktadan ölçülen mesafeler alınmaktadır. Ayrıca inşaat sahasının zemin özelliklerini yansıtan bir parametre de bu ilişkilerde yer alabilmektedir. Bazı azalım ilişkileri fayın türünü de göz önünde tutmaktadır. Bu azalım ilişkilerinin genel yapısı aşağıda verilen denklem ile tanımlanabilir (Araya ve Der Kiureghian, 1988):

$$Y = N_y f (M, R, SP_i) \quad (9)$$

Burada, Y=tahmin edilecek olan kuvvetli yer hareketi parametresi (bağımlı değişken); N_y =azalım ilişkisindeki (ortalama tahmin eğrisi) belirsizlik (saçılım) için rassal düzeltme katsayısı; R=depremden inşaat sahasına olan “tanımlanmış” uzaklık ölçüsü; M=deprem büyüklüğünü gösteren herhangi bir ölçekteki magnitud değeri; SP_i = deprem kaynağı, dalga yayılma hattı, yerel zemin koşulları ile ilgili parametreler.

Zemin hareketi tahmin ilişkisi genellikle en küçük kareler yönteminin gözlemsel verilere uygulanması ile elde edilen bir eğri şeklindedir. Bu eğrinin etrafındaki saçılımdan doğan

belirsizliğin analize yansıtılması, bundan sonraki bölümde anlatılacağı üzere rassal düzeltme katsayısı N_y ile sağlanmaktadır.

2.3.6 Belirsizliklerin Analizi

Olasılıksal sismik tehlike analizinde temelde birbirinden farklı iki tür belirsizlik vardır. Şu an kullanılan terminolojiye göre bunlar rassal (**aleatory**) ve bilgiye dayalı (**epistemic**) belirsizliklerdir. Rassallıktan kaynaklanan belirsizlikler sismik tehlikeyi etkileyen fiziksel olayların doğasında mevcut olan rassallık ve değişkenlikten kaynaklanmaktadır ve daha fazla veri ve bilgi elde edilerek azaltılmaları mümkün değildir. Gelecekte olacak bir depremin yeri, büyüklüğü, fay kırılmasının boyutları ve yönü bu tür belirsizliğin örnekleridir. Bilgi/veri eksikliğinden kaynaklanan belirsizliği ise elde edilecek yeni bilgiler ve veriler ile azaltmak mümkündür. Sismotektonik bölgelerin konumu, sismisite parametrelerinin dağılımlarındaki istatistiksel parametrelerdeki belirsizlikler bu tür belirsizliğe örneklerdir.

(i) Zemin Hareketi Tahmin Modelindeki Belirsizlik: Sismik tehlike analizinde en önemli belirsizlik kaynaklarından biri kullanılan azalım ilişkisidir. Bu “aleatorik” belirsizliğin modele doğrudan yansıtılması Denklem 9’da gösterildiği gibi azalım ilişkisinin N_y ile simgelenen rassal düzeltme katsayısı ile çarpılması ve birinci mertebe belirsizlik analizi yönteminin kullanılması ile sağlanmıştır. Genellikle, N_y , beklenen değeri (ortalaması) 1 olan (yani ortalama tahmin eğrisinde bir yanlılığın olmadığı) lognormal dağılımlı bir değişken olarak alınmaktadır. Azalım ilişkileri çoğunlukla $\ln Y$ cinsinden ifade edildiğinden, düzeltme katsayısı da toplam ve $\ln N_y$ şeklinde olacaktır. Bu durumda $\ln N_y$ ortalaması, $\mu_a = 0$ ve standart sapması, σ_a , olan normal dağılımlı bir rassal değişkene dönüşür. Azalım ilişkisindeki belirsizliğin (saçılımın) ölçüsü olan standart sapma, σ_a , vasıtası ile azalım ilişkisindeki belirsizlik sismik tehlike sonuçlarına yansıtılmıştır. Genellikle literatürde yer alan azalım ilişkileri, σ_a değeri ile birlikte verilmektedir. Yerel verilere dayanmayan “ithal” azalım ilişkilerinin kullanıldığı durumda σ_a değerini arttırmak gerekebilecektir.

(ii) Sismik Kaynakların Konumundaki Belirsizlik: Diğer bir belirsizlik sebebi de sismik kaynak bölgelerinin belirlenmesi ile ilgilidir. Bu belirsizliğin sonuçlara yansıtılması için klasik sismik tehlike modellerindeki deterministik bölge sınırları yerine, bu sınırların konumunun rassal olduğu varsayılmıştır. Bender (1986) tarafından önerilen modelde depremlerin beklenen konumu birbiçimli dağılım olarak alınmış, ancak ortalama konum etrafındaki

belirsizlik iki değişkenli Gauss (normal) dağılımı ile modellemiştir. Ortalama vektör, (\bar{x}, \bar{y}) , en olası konumu, standard sapma σ ise konumdaki belirsizliği göstermektedir. En olası konumdan, δ_x ve δ_y miktarlarında bir sapma olasılığı aşağıdaki yoğunluk işlevi ile orantılı olacaktır:

$$f(\delta_x, \delta_y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{\delta_x^2 + \delta_y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (10)$$

Burada, x ve y birbirine dik iki eksen simgelemektedir ve her iki eksen boyunca konumdaki belirsizliğin eşit olduğu varsayılmıştır.

Yücemen ve Gülkan (1994), Bender (1986) tarafından önerilen modeli, konumdaki yöne bağlı belirsizliği içerecek şekilde geliştirmişlerdir. Eğer konumdaki belirsizlik birbirine dik iki eksen boyunca aynı değilse, o zaman Denklem 10 şu şekilde yazılacaktır (Yücemen ve Gülkan, 1994):

$$f(\delta_x, \delta_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{\delta_x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{\delta_y^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] \quad (11)$$

Denklem 10 ve 11 ile bir sismik kaynağın sınırlarındaki belirsizlik inşaat sahasında oluşacak zemin hareketi parametresine yansıtılmış olacaktır; zira bir sismik kaynaktan oluşacak depremlerin beklenen konumları (δ_x, δ_y) miktarında kaydırılırsa, bu o sismik kaynağın sınırlarının da aynı miktarda yer değiştireceği anlamına gelir. Burada dikkat çekilmesi gereken husus, bir kaynak bölgesinde meydana gelen depremin koordinatlarındaki σ_x ve σ_y ile gösterilen belirsizliğin, o depremi içine alan bölgenin sınırlarında aynı değerlere sahip bir belirsizliğe eşdeğer olduğu gerçeğidir.

Yukarıda anlatılan modele göre, sismik kaynak sınırlarındaki belirsizliğin analize katılması, bir sismik kaynak etrafında yoğunlaşan sismisitenin bu belirsizliği modelleyen standart sapma ile orantılı olarak çevreye yayılmasına neden olmaktadır. Sismisite daha geniş bir alana yayıldığından, sismik kaynağın yakın çevresindeki sismik tehlikenin yoğunluğunda bir azalma olacaktır. Bu nedenle, fayların (çizgi kaynakların) konumundaki belirsizliği bu modele göre analize katmak gerçeğçi değildir. Ayrıca, Ürdün için yapılan bir çalışmada, Yücemen (1995) bir çok sismik kaynağın (alan ya da fay kaynaklar) etkilediği alanlarda, kaynak

konumlarındaki belirsizliğin diğer belirsizlik kaynaklarına (örneğin azalım modelindeki belirsizlik) kıyasla sismik tehlike sonuçlarını çok daha az etkilediği sonucuna varmıştır.

Sismik kaynakların konumundaki belirsizliği yukarıda anlatılan model ile sonuçlara doğrudan yansıtmak SEISRISK-III programı (Bender ve Perkins, 1987) ile mümkün olmaktadır.

(iii) Sismik Kaynak Parametrelerinin Tahmin Edilen Değerlerindeki Belirsizlikler ve Mantık Ağacı Yöntemi: Olasılıksal sismik tehlike analizi modelinde bulunan yıllık sismik tehlike değeri, $P(Y > y)$, sismik parametreler v , β ve m_1 'in verilen değerlerine, sismik kaynak modellemesine ve diğer varsayımlara bağlıdır. Dolayısı ile hesaplanan sismik tehlike değerleri koşullu olasılıklardır, ve $P(Y > y / v, \beta, m_1, A_j)$ şeklinde yazılmalıdır. Burada A_j değişik varsayımları simgelemektedir. Sismik parametrelerin tahminindeki ve değişik varsayımlardaki epistemik belirsizliklerin sonuçlara yansıtılması, aşağıda özetlenen ve genellikle mantık ağacı (logic-tree) olarak adlandırılan şu basit yöntemle, dolaylı olarak yapılabilir (Yüccemen, 1982):

(a) Sismik parametrelerin değerlerine, sismik kaynakların konumuna, azalım ilişkisine, sismik veri tabanına ve diğer hususlara ilişkin her varsayıma, o varsayımın diğerlerine göre doğru olma olasılığını yansıtan öznel olasılık değerleri verilir.

(b) Her bir varsayım grubu için (mesela, bir v değeri, bir β değeri, bir m_1 değeri, bir azalım ilişkisi ve kaynakların konumuna ilişkin bir varsayım), o grubu oluşturan varsayımların öznel olasılıklarının çarpımına eşit olan birleşik olasılık değeri bulunur. Bu şekilde hesaplanan birleşik olasılıkların toplamının bir e eşit olması gereklidir. Ayrıca en iyi tahminlerden oluşan grup için bulunacak birleşik olasılık değerinin de en büyük olması beklenir.

(c) Her bir varsayım için sismik tehlike hesabı yapılır. Bulunan aşılma olasılığı o varsayım grubu için belirlenen birleşik olasılık değeri ile çarpılır. Birleşik olasılıklarla çarpılmış aşılma olasılıklarının toplamı aranılan sismik tehlike değerini verecektir. Bu şekilde hesaplanan ağırlıklı ortalama sismik tehlikeye "Bayes" tahmini denilecektir. Matematiksel olarak ifade edilirse:

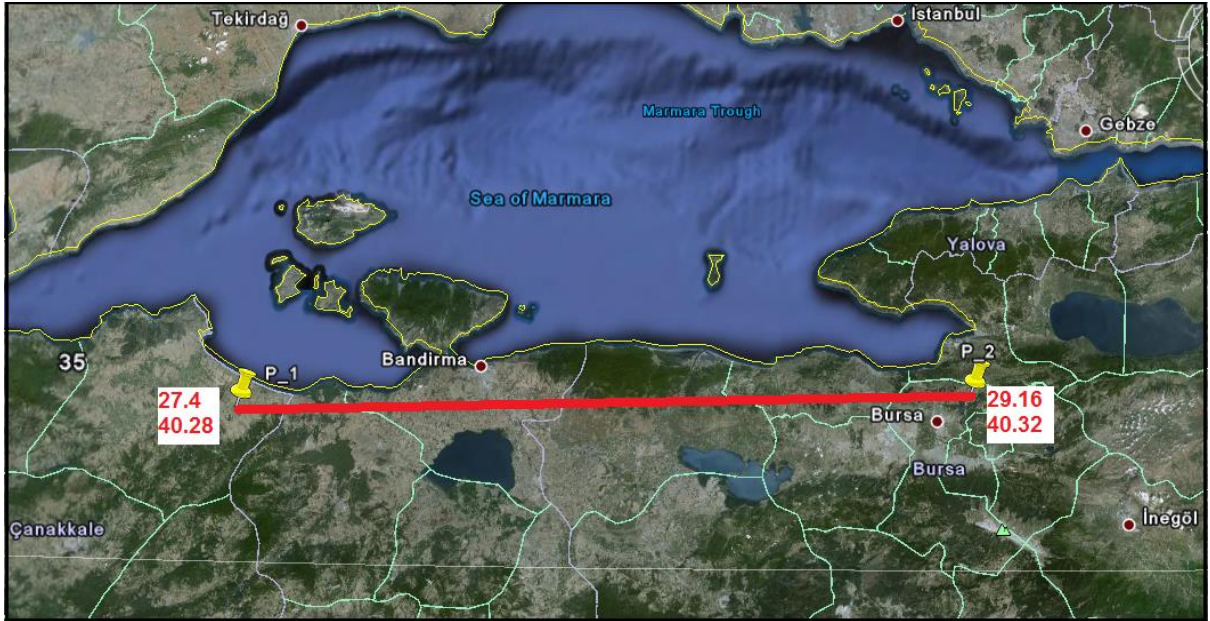
$$P(Y > y) = \sum_{j=1}^n P(Y > y/G_j) w_j \quad (12)$$

burada, G_j =j sayılı varsayım grubu; $w_j=P(G_j)$, j sayılı varsayım grubunun diğerlerine göre doğru olma olasılığını yansıtan birleşik öznel olasılık; n=göz önünde tutulan varsayım takımlarının toplam sayısıdır.

3. PİLOT UYGULAMA

3.1 Giriş

Boru hattının inşa edileceği bölgedeki sismik tehlikenin belirlenmesi için uygulanacak olan olasılıksal sismik tehlike analizi (**OSTA**) modelinin bir önceki bölümde (Bölüm 2) ortaya konulan başlıca aşamalarının uygulanması raporun bu bölümünde gösterilecektir. Bu amaçla Bursa ili ve yakın çevresi pilot bölge olarak seçilmiş ve Bursa ilinin kuzeybatısından geçen ve koordinatları 40.28° K enlemi ve 27.40° D boylamı olan birinci düğüm noktası ile koordinatları 40.32° K enlemi ve 29.16° D boylamı olan ikinci düğüm noktası arasında kalan doğal gaz boru hattı da pilot boru hattı olarak alınmıştır (Şekil 4 ve 5). Sismik tehlike analizi Bursa ili ve yakın çevresi için gerçekleştirilmiş ve seçilen doğal gaz boru hattı boyunca sismik tehlike hesaplanmıştır. Bundan sonraki alt bölümlerde, seçilen bu doğal gaz boru hattı için yapılan olasılıksal sismik tehlike analizinin aşamaları anlatılacaktır.



Şekil 4. Sismik tehlike analizinin uygulaması için seçilen doğal gaz boru hattının takribi konumu

3.2 Sismik Kaynaklar ve Sismik Veri Tabanı

Seçilen doğal gaz boru hattının yer aldığı bölge için bu proje çerçevesinde bir arazi çalışması yapılmadığı için Bursa ili ve yakın çevresi için daha önceki yıllarda yapılan çalışmalardan

yararlanılmıştır. 26.0°- 31,8° D boylamları ile 38.8°- 42.0° K enlemleri arasında kalan bölge göz önünde tutulmuş ve bu alanda yer alan faylar ve bunlara ilişkin parametreler literatürde mevcut değişik çalışmalardan elde edilmiştir. Bursa il merkezi etrafındaki 50 km yarıçaplı alan içinde geniş kapsamlı bir arazi ve ofis çalışması Prof. Dr. Ali Koçyiğit tarafından

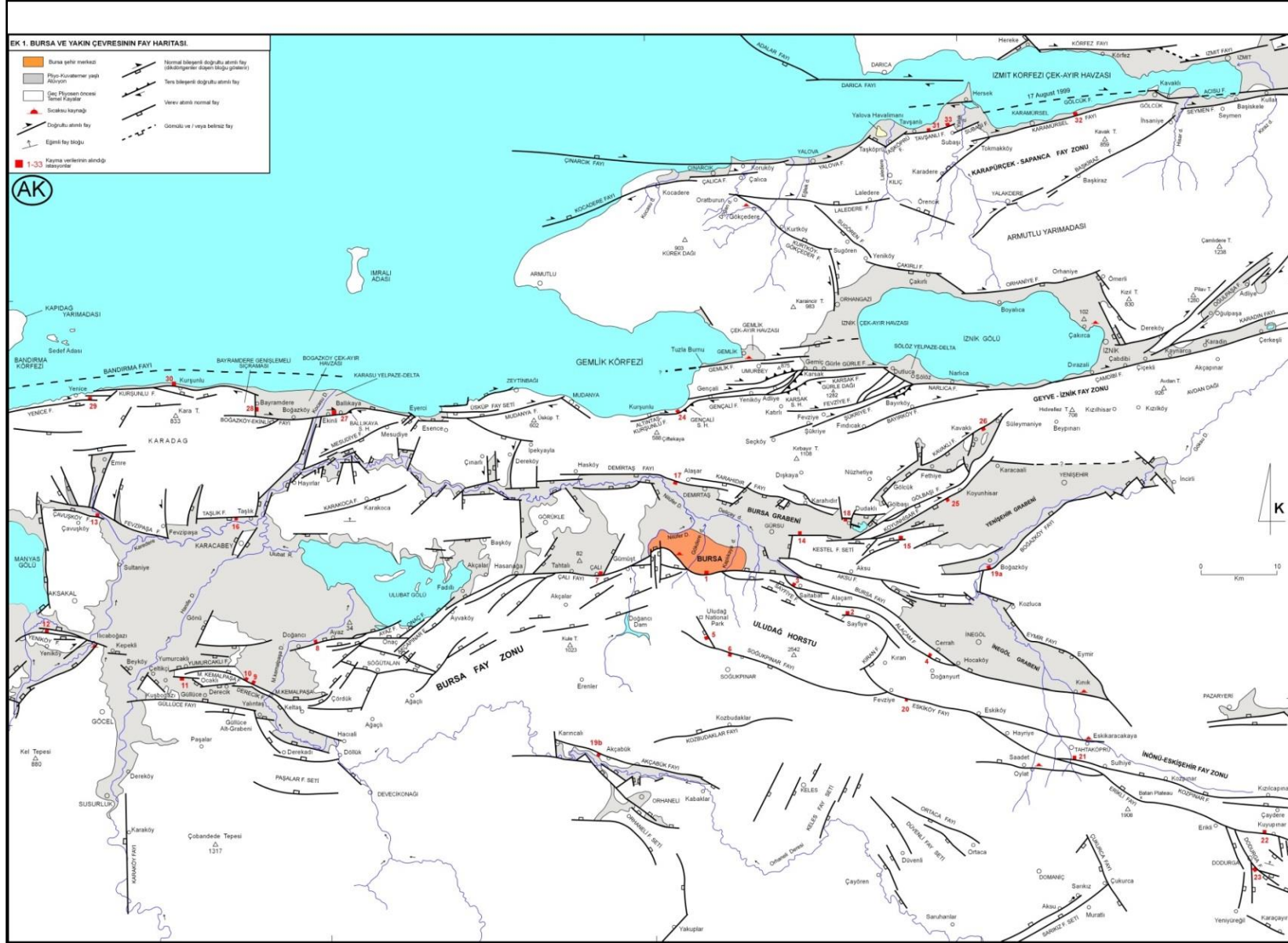


Şekil 5. Sismik tehlike analizinin uygulaması için seçilen doğal gaz boru hattı ve seçilen bu boru hattının Botaş Genel Müdürlüğü doğal gaz ve petrol boru hatları haritasındaki konumunun gösterimi

yürütülerek bölgedeki aktif faylar belirlenmiş ve bölgenin aktif fay haritası hazırlanmıştır (Yücemen, vd., 2006). Bu haritanın hazırlanması sırasında belirlenen aktif faylarla ilgili olarak, her bir fayın türü, geometrisi (doğrultu ve eğimi), uzunluğu, segmenti, yaşı, toplam atım miktarı, yıllık kayma hızı, maksimum deprem üretme potansiyeli, maksimum depremlerin yinelenme aralığı gibi başlıca fay parametrelerinin tahminine çalışılmıştır.

Ayrıntılı bir değerlendirmenin yapıldığı bu alan 28° - 30° D ve 39.75° - 40.75° K koordinatları arasında olup Bursa il merkezi yaklaşık olarak bu bölgenin merkezinde yer almaktadır. Bu bölge içinde, Şekil 6'da yer alan haritada gösterildiği gibi kırk bir adet fay segmenti tanımlanmıştır. Bu kırk bir fay segmenti ile ilgili veriler Tablo 2'de verilmiştir. Ayrıca, daha geniş bir inceleme alanında ve daha çok literatüre dayalı yapılan çalışma sonucunda belirlenen ilave faylar ile ilgili bilgiler Tablo 3'de özetlenmiştir. Söz konusu tabloda da görüldüğü üzere iki fay zonu tanımlanmıştır. Bunlardan Simav fay zonunda yer alan faylar seçilen doğal gaz boru hattına uzak olmaları nedeni ile sismik tehlikeye bir katkısı olmamaktadır ve sismik tehlike hesaplarında göz önünde tutulmamışlardır. Buna karşılık Kuzey Marmara fay zonunda yer alan ve Tablo 4'de özellikleri verilen beş adet fay, sismik tehlike hesaplarında dikkate alınmışlardır. Özetlenirse: Tablo 2 ve Tablo 4'de tanımlanan fay sistemleri ve fay segmentleri Bursa ili ve yakın çevresi ve de seçilen doğal gaz boru hattı için değişik varsayımlara göre gerçekleştirilecek sismik tehlike belirleme çalışmasında kullanılacak sismik kaynakları oluşturmuşlardır.

Sismik veri tabanının hazırlanmasında, Afet İşleri Genel Müdürlüğü – Deprem Araştırma Dairesi tarafından hazırlanan katalog göz önünde tutulmuştur. Bu katalogdan verilerin elde edilmesinde göz önünde tutulan coğrafi alan, kapsamlı arazi ve ofis çalışması yapılan alandan biraz daha büyük olup, 27.8° - 30.2° doğu boylamları ile 39.7° - 41° kuzey enlemleri tarafından sınırlanan dikdörtgen alanı kapsamaktadır. Deprem magnitüdüleri değişik ölçeklerde verildiği için bunların hepsi moment magnitüd (M_w) ölçeğine çevrilmiştir. Bu çevirim işlemi Deniz ve Yücemen (2010) tarafından geliştirilen dönüşüm denklemleri kullanılarak yapılmıştır. Esas sismik veri tabanının oluşturulması için moment magnitüd değeri 4.5 ve daha büyük olan depremler alınmıştır. Son olarak da, Yücemen, vd. (2006)'de verilen uzaklık ve zaman pencereleri kullanılarak öncü ve artçı şoklar veri tabanından çıkartılmıştır. Bu şekilde oluşturulan sismik veri tabanındaki depremlerin hepsinin ana şok olduğu varsayılmıştır.



Tablo 2. Arazi çalışmaları sonucunda Bursa il merkezi çevresinde belirlenen aktif fayların parametreleri (Yüccemen vd., 2006)

No	Adı	Türü	Ortalama doğrultu	Ortalama eğim	Uzunluk (km)	Etkinlik derecesi	Dikey (V) ve Yatay(H) deplasman (Km)	Kayma hızı (mm/yıl)	En büyük deprem magnitudü	Yinelenme aralığı (yıl)
1	Bursa fayı	Verev atımlı normal fay	N 59° E	37° NW	63	Potansiyel aktif	2.7 (V)	1	7.2	≥ 1000
2	Sayıfe fayı	Verev atımlı normal fay	N 50° W	44° NE	29	Potansiyel aktif	~1 (V)	?	6.8	?
3	Alaşam fayı	Verev atımlı normal fay	N 57° W	84° E	27	Aktif		?	6.7	
4	Soğukpınar fayı	Verev atımlı normal fay	N 48° W	63° SW	28	Potansiyel aktif	~1 (V)	?	6.7	
5	Çalı fayı	Verev atımlı normal fay	N 82° W N 75° E	46° NE 66° NE	29	Potansiyel aktif	~1 (V)	?	6.8	≥ 1000
6	Ayaz fayı	Verev atımlı normal fay	N 60° W	76° NE	15	Potansiyel aktif	-0.5 (V)	?	6.4	≥ 1000
7	M. Kemalpaşa fayı	Verev atımlı normal fay	N 87° E	73° N	20	Potansiyel aktif	?	?	6.5	≥ 1000
8	Derecik fayı	Verev atımlı normal fay	N 85° W	83° SW	19	Potansiyel aktif	?	?	6.5	≥ 1000
9	Yeniköy fayı	Verev atımlı normal fay	N 56° W	75° NE	10	Potansiyel aktif	?	?	6.2	≥ 1000
10	Çavuşköy fayı	Verev atımlı normal fay	N 86° E	52° NW	7	Potansiyel aktif	?	?	6.0	≥ 1000
11	Kestel fay grubu (En uzun segmenti)	Verev atımlı normal fay	N 76° W	76° NE	15	Potansiyel aktif			6.4	≥ 1000
12	Taşlık fayı	Verev atımlı normal fay	N 65° E	70° SE	7	Potansiyel aktif	?	?	6.0	
13	Demirtaş fayı	Verev atımlı normal fay	N 85° E	46° SE	22	Potansiyel aktif	?	?	6.6	≥ 1000
14	Karahıdır fayı	Verev atımlı normal fay	N 82° W	52° SW	26	Potansiyel aktif	0.5 (V)	?	6.7	≥ 1000
15	Eymir fayı	Verev atımlı normal fay	N 70° W	67° SW	23	Potansiyel aktif	0.2 (V)		6.6	≥ 1000
16	Boğazköy fayı t	Verev atımlı normal fay	N 70° E	85° NW	25	Potansiyel aktif	0.4 (V)	?	6.7	≥ 1000
17	Eskiköy fayı	Verev atımlı normal fay	N 58° W	47° NE	35	Potansiyel aktif	0.3 (V)	?	6.9	≥ 1000
18	Kozpınar fayı	Verev atımlı normal fay	N 30° W	71° NE	39	Potansiyel aktif	0.2 (V)	?	7.0	≥ 1000
19	Erikli fayı	Verev atımlı normal fay	N 70° W	75° NE	37	Potansiyel aktif	0.3 (V)	?	6.9	≥ 1000
20	Dodurga fayı	Verev atımlı normal fay	N 64° W	78° SW	10	Potansiyel aktif	0.05 (V)	?	6.2	≥ 1000
21	Gemlik fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 76° W	74° NE	14 (kıyıda)	Aktif	?	?	6.4	
22	Gürle fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 80° E	50° NW	12	Aktif	?	?	6.3	
23	Gençali fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 85° E	82° NW	12	Aktif	?	?	6.3	
23	Altıntaş-Kurşunlu fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 66° E	84° NW	9	Aktif	?	?	6.2	
24	Narlıca fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	E-W	54° N	10	Aktif	?	?	6.2	
25	Şükriye fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 70° E	78° NW	20	Aktif	?	?	6.5	
26	Çamdibi fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 41° E	81° NW	42	Potansiyel aktif	22 (H)	8,5	7.0	≥ 1000
27	Karadin fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 70° E	85° SE	19	Aktif	?	?	6.5	
28	Orhaniye fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 85° E	80° SE	18	Aktif	?	?	6.5	
29	Kurtköy-Gökçedere fayı	Verev atımlı normal fay	N 55° W	68° NE	15	Aktif	?	?	6.4	
30	Koyunhisar fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 60° E	88° NW	20	Aktif	?	?	6.5	
31	Kavaklı fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 44° E	77° SE	12	Aktif	?	?	6.3	
32	Mudanya fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 80° E	82° NW	20	Aktif	2 (H)		6.5	
33	Boğazköy-Ekinli fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 83° E	72° NW	25	Aktif	2 (H)		6.7	
34	Kurşunlu fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 55° W	54° NE	21	Aktif	?	?	6.6	
35	Karamürsel fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 50° E	49° NW	28	Çok aktif			6.7	250-300
36	Çınarcık fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 85° E	79° NW	36	Çok aktif	4 (H)	5,7	6.9	≥ 400
37	Laledere fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 80° E	82° NW	20	Aktif	1.5 (H)	1,5	6.5	< 1000
38	Gölcük fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 82° E	80° NW	25	Çok aktif	?	?	6.7	210-280
39	Körfez fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 75° E	79° SE	16	Çok aktif	?	?	6.4	250-300
40	Ortaca fayı	Normal fay	N 70° W	64° SW	13	Potansiyel aktif	?	?	6.3	≥1000
41	Akçabük fayı	Normal fay	N 66° W	69° SW	20	Potansiyel aktif	?	?	6.5	≥1000

Tablo 3. Simav ve Kuzey Marmara fay zonlarını oluşturan ana fay segmentlerinin çeşitli parametrelerinin değerleri (Yüçemen vd., 2006)

	Adı	Türü	Ortalama doğrultu	Ortalama eğim	Uzunluk (km)	Enlem (°)	Boylam (°)	Büyükük	Yinelenme aralığı (yıl)	Etkinlik derecesi
Simav Fay Zonu (SFZ)	Ağaçlı fayı	Normal fay	K 50° B	66° KD	30	38,95 38,80	29,94 30,21	6.8	≥ 1000	Potansiyel aktif
	Muratdağı fayı	Normal fay	K 87° B	68° KD	50	38,95 38,93	29,94 29,36	7.0	≥ 1000	Potansiyel aktif
	Erdoğmuş fayı	Normal fay	K 85° B	65° KD	20	38,95 38,91	29,35 29,46	6.5	≥ 1000	Potansiyel aktif
	Abide fayı	Normal fay	K 50° B	55° KD	18	39,00 38,92	29,15 29,31	6.5	≥ 1000	Potansiyel aktif
	Simav fayı	Normal fay	K 70° B	60° KD	72	39,21 39,00	28,37 29,15	7.2	≥ 1000	Potansiyel aktif
	Bandırma fayı	S. doğrultu atımlı fay	K86° D	80° KB	43	40,40 40,42	28,00 28,30	7.0	≥1000	Potansiyel aktif
Kuzey Marmara Fay Zonu (KMFZ)	Darıca fayı	S. doğrultu atımlı fay	D - B	Yarı dik	19	40,73 40,72	29,22 29,44	6.5	?	Aktif
	Adalar fayı	Normal fay	K 50° B	75° - 80° KD	35	40,86 40,73	28,88 29,22	6.9	?	Çok aktif
	Yeşilköy fayı	S. doğrultu atımlı fay	K 85° D	Yarı dik	41	40,82 40,86	28,39 28,88	7.0	257±23	Çok aktif
	Kumburgaz fayı	S. doğrultu atımlı fay	K 86° D	Yarı dik	18	40,84 40,83	28,41 28,18	6.5	257±23	Çok aktif
	Orta Marmara fayı	S. doğrultu atımlı fay	~ D - B	Yarı dik	14	40,78 40,78	28,11 27,93	6.4	?	Aktif
	Kumbağı fayı	S. doğrultu atımlı fay	K 85° D	Yarı dik	42	40,78 40,75	27,93 27,45	7.0	283	Çok aktif
	Uçmaktedere fayı	S. doğrultu atımlı fay	K 70° D	Yarı dik	10	40,75 40,71	27,45 27,32	6.3	283	Çok aktif

Tablo 4. İlave edilen aktif fayların parametrelerinin değerleri (Yücemen vd., 2006)

No	Adı	Türü	Ortalama doğrultu	Ortalama eğim	Uzunluk (km)	Etkinlik derecesi	En büyük deprem magnitudü	Yinelenme aralığı (yıl)
1	Darıca fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	E - W	Yarı-dik	19	Aktif	6.5	?
2	Adalar fayı	Normal fay	N 50° W	75° - 80° NE	35	Çok aktif	6.9	?
3	Yeşilköy fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 85° E	Yarı-dik	41	Çok aktif	7.0	257± 23
4	Kumburgaz fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 86° E	Yarı-dik	18	Çok aktif	6.5	257± 23
5	Bandırma fayı	Sağ doğrultu atımlı fay	N 86° E	80° NW	42	Potansiyel aktif	7.0	≥1000

3.3 Magnitud Dağılımı ve Deprem Oluşum Modelleri

Günümüzde yapılan sismik tehlike çalışmalarının büyük bir bölümü, klasik sismik tehlike analizi modelinde de olduğu gibi, depremlerin zaman içinde Poisson sürecine göre meydana geldikleri, deprem magnitudlerinin de üstel dağılım gösterdikleri varsayımlarına dayanmaktadır. Burada da kullanılacak esas modelin bu varsayımlara göre hazırlanmasının uygun olacağı düşünülmüştür. Ancak Bölüm 2'de açıklanan nedenlerle üstel magnitud dağılımına alternatif olarak karakteristik deprem modeli, Poisson sürecine alternatif olarak ise yinelenme süreci dikkate alınmıştır. Yapılan uygulamada magnitud dağılımları olarak üstel ve karakteristik, deprem oluşum modelleri olarak da Poisson ve yinelenme kullanılmıştır.

3.4 Zemin Hareketi Tahmin Modeli

Daha önceki çalışmalarda, Kalkan ve Gülkan (2004), ve Boore, vd. (1997) tarafından geliştirilen azalım ilişkilerinin benzer sonuçlar verdikleri gözlenmiş ve bu iki zemin hareketi tahmin modeli hem münferiden hem de birleştirilerek sismik tehlike hesaplarında kullanılmıştır. Pilot uygulamada kullanılacak olan bu iki azalım ilişkisi ile ilgili önemli hususlar aşağıda özetlenmiştir.

3.4.1 Boore, vd. (1997) Tarafından Verilen Zemin Hareketi Tahmin Modeli

Boore, vd. (1997) tarafından önerilen azalım ilişkisi ve bu ilişkide yer alan parametreler aşağıda tanımlanmış olup, değişik periyotlara karşılık gelen denklem sabitleri (b_1 , b_2 , b_3 , b_5 , b_v , ve V_A) bir tablo halinde Boore, vd. (1997)'de verilmiştir.

$$\ln Y = b_1 + b_2(M_w - 6) + b_3(M_w - 6)^2 + b_5 \ln r + b_v \ln(V_S / V_A) \quad (13)$$

burada

$$r = \sqrt{r_{jb}^2 + h^2} \quad (14)$$

$$b_1 = \begin{cases} b_{1SS} & \text{yan - atımlı depremler} \\ b_{1RS} & \text{ters - atımlı depremler} \\ b_{1ALL} & \text{mekanizma bilinmiyor} \end{cases} \quad (15)$$

Y : yer hareketi parametresi (PGA = en büyük yer ivmesi; SA = spektral ivme) g cinsinden

M_w : moment magnitudü

r_{jb} : kırılmanın düşey izdüşümüne en yakın mesafesi (km cinsinden), h: sanal derinlik

V_s : 30 m'deki ortalama kayma dalgası hızı (m/s cinsinden)

3.4.2 Kalkan ve Gülkan (2004) Tarafından Verilen Zemin Hareketi Tahmin Modeli

Kalkan ve Gülkan (2004) tarafından geliştirilen azalım ilişkisi Boore, vd. (1997) ile aynı formatta olup şu şekilde ifade edilmiştir:

$$\ln Y = b_1 + b_2 (M - 6) + b_3 (M - 6)^2 + b_5 \ln r + b_v \ln (V_s / V_A) \quad (16)$$

$$r = (r_{cl}^2 + h^2)^{1/2}$$

burada, Y yer hareketi parametresi (en büyük yer ivmesi (PGA) veya sözde spektral ivme (PSA) g cinsinden), M moment büyüklüğü, r_{cl} istasyona en yakın yatay mesafe (Joyner-Boore mesafesi) km cinsinden, V_s ortalama kayma dalgası hızıdır (m/s). Denklemdaki h değeri sanal derinlik ve V_A sanal hızdır. Değişik periyotlara karşılık gelen Denklem 16'daki sabitler bir tablo halinde Kalkan ve Gülkan (2004)'de verilmiştir.

3.5 Bursa İli ve Yakın Çevresi İçin Değişik Varsayımlara Göre Sismik Tehlikenin Hesabı

Tablo 2 ve 4'de, karakteristik depremlerin beklenen tekerrür süreleri için beş segment haricindekiler için doğrudan bir değer verilmemiştir. Bu eksik bilgi nedeni ile Tablo 5'den yararlanılmıştır. Tablo 2 ve 4'de yer alan ve tekerrür süreleri (TS) için kesin bir değer verilmediği kırk bir fay segmentinin her biri için, Tablo 5'deki en iyi tahmin değerleri ve fayın

kategorisi göz önünde tutularak, yaratabilecekleri karakteristik depremlerin tekerrür süreleri tahmin edilmiştir.

Tablo 5. Etkinliklerine göre fayların sınıflandırılması ve yaratacakları karakteristik depremlerin tekerrür süreleri (Yüçemen vd., 2006)

Fay Kategorisi	Tekerrür Süresi (TS) (yıl)	En İyi Tahmin Tekerrür Süresi (yıl)
Çok yüksek derecede aktif fay	$TS < 200$	150
Yüksek derecede aktif fay	$200 < TS \leq 500$	200
Aktif fay	$500 < TS \leq 1000$	500
Muhtemel aktif fay	$TS \geq 1000$	1000

Mevcut veriler ve bölgede tanımlanan sismik kaynakların türleri göz önünde tutulduğunda, Bursa ili ve seçilen doğal gaz boru hattı için sismik tehlikeye en önemli katkının çalışmada tanımlanan beş adet fay zonundan geldiği sonucuna varılabilir. Bu fay zonları şöyledir: (i) Bursa fay zonu, (ii) İnönü-Eskişehir fay zonu, (iii) Geyve-İznik fay zonu, (iv) Karapürçek-Sapanca fay zonu ve son yapılan çalışma sonucunda eklenen Kuzey Marmara fay zonu. Bu fay zonları ve ayrıntılı bir şekilde tanımlanmış olan fay segmentasyonu göz önünde tutularak yapılan analizde, enerjinin bu segmentler boyunca karakteristik depremler yolu ile ortaya çıktığı varsayılmıştır. Karakteristik depremler magnitüdüleri ve yinelenme süreleri ile tanımlanmaktadır. Karakteristik magnitüd değerleri, Tablo 2 ve 4'de verilen en büyük deprem magnitüdülerine eşit alınmıştır. Bu segmentler boyunca depremlerin zaman içinde oluş süreçleri için hem hafızasız Poisson, hem de zamana bağımlı yinelenme modelleri göz önünde tutulmuştur. Daha önce de üzerinde durulduğu gibi, Poisson modeline göre bir karakteristik depremin meydana gelme olasılığı zaman içinde sabitken, yinelenme modelinde bir önceki karakteristik depremden sonra geçen süreye bağımlıdır.

Yinelenme modelinde karakteristik depremler için eşlenik ortalama oluş sıklığının hesabında yinelenme sürelerinin olasılık dağılımı için Brownian Aşma Zamanı (BAZ) modeli benimsenmiştir. Bu modelin parametreleri şu şekilde saptanmıştır: (i) Ortalama tekerrür zamanları için Tablo 2 ve 4'de verilen değerler alınmıştır. (ii) Aperiodiklik parametresi için Ellsworth, vd. (1999) tarafından yürütülen çalışma sonuçlarına dayanılarak 0.50 değeri alınmıştır. (iii) En son meydana gelen karakteristik depremden sonra geçen süre " t_0 ", için, deprem katalogundaki kısıtlı veriler, Erdik, vd. (2004) tarafından verilen değerlerle desteklenerek tahmin edilmiştir. Sismik tehlike analizinde göz önünde tutulan gelecek zaman süresi, " w ", 50 yıl olarak alınmıştır.

Faylardan kaynaklanan sismik etkinliğin dışında, bir de geri plan sismik aktivitenin varlığı göz önünde tutulmuştur. Bu aktivitenin 4.5-6.0 magnitüd aralığındaki depremlerden kaynaklandığı varsayılmıştır. Alan şeklinde modellenen bu geri plan sismik kaynak içinde depremlerin Poisson sürecine göre oluştukları ve magnitüdlere de üstel olasılık dağılımına uydukları varsayılmıştır. Deprem veri tabanındaki eksikliklerin (yanlılığın) giderilmesi işlemi şu şekilde gerçekleştirilmiştir: Sismik veri tabanının moment magnitüd değeri 5.5'dan büyük olan depremlerin sayısı bakımından eksiksiz olduğu kabul edilmiştir. Ancak eksiksiz kayıt durumunun moment magnitüdü 5.0-5.5 arasında olan depremler için 1960'dan, 4.5-5.0 arasında olanlar için de 1980'den sonra geçerli olduğu varsayılmıştır. Bu varsayımlara göre katalog verilerinde tadilat yapılarak bulunan ν ve β değerleri ile hiçbir tadilat yapılmadan bulunan ν ve β değerleri Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Değişik varsayımlar altında geri plan sismik kaynak için hesaplanan β ve ν değerleri

Ana şok/ ikincil şok analizi	Eksiksiz raporlanma tadilatı	β	ν
Bütün depremler	Yapılmadı	1.184	0.657
	Yapıldı	1.734	1.382
Ana şoklar	Yapılmadı	2.026	0.402
	Yapıldı	1.529	0.794

Bursa ili ve yakın çevresi için sismik tehlikenin tahmini için yapılan hesaplamalarda, depremlerin oluşumu ve magnitüd olasılık dağılımı modelleri ile ilgili şu seçenekler düşünülmüştür:

(a) Geri plan sismik aktivite için Poisson modelinin ve budanmış üstel magnitüd olasılık dağılımının geçerli olduğu varsayılmıştır. Geri plan sismik kaynak için ν ve β değerlerinin hesabında, tüm katalog ya da sadece ana şoklar ile eksik raporlanma için katalog verilerinde tadilat yapıp yapılmama durumları göz önünde tutulmuştur (Tablo 6).

(b) Fay segmentlerinin sadece karakteristik deprem ürettikleri varsayımı için de, karakteristik depremlerin Poisson ya da yinelenme sürecine göre oluştukları seçenekleri ortaya konulmuştur.

(c) Azalım ilişkisi olarak Boore, vd. (1997) ve Kalkan ve Gülkan (2004) tarafından verilen ilişkiler, geçerli katsayıları ve standart sapmaları ile birlikte, kullanılmıştır.

Önerilen modellere ve yapılan varsayımlara göre sismik tehlike hesaplarının gerçekleştirilmesi için EZ-FRISK (2012) yazılımının sismik tehlike modülü kullanılmıştır.

Yukarıda bahsedilen değişik varsayımlar ve bunların birbirlerine göre doğru olma olasılığını yansıtan öznel olasılık değerleri Tablo 7’de verilmiştir. Bu varsayımların ve sismik parametre değerlerindeki epistemik belirsizliklerin etkisini sonuçlara yansıtmak için mantık ağacı yöntemi (Yüccemen, 1982) aşağıda izah edildiği şekilde uygulanmıştır.

Tablo 7. Değişik varsayımlar ve bunlar için belirlenen öznel olasılık değerleri

Alternatif varsayımlar	Öznel olasılık
Tüm katalog	0.4
Sadece ana şoklar	0.6
Eksik raporlanma ile ilgili bir tadilat yapılmaması	0.3
Eksik raporlanma ile ilgili bir tadilat yapılması	0.7
Karakteristik depremlerin Poisson sürecine göre oluşması	0.3
Karakteristik depremlerin yinelenme sürecine göre oluşması	0.7
Kalkan ve Gülkan (2004) tarafından önerilen azalım ilişkisi	0.5
Boore vd. (1997) tarafından önerilen azalım ilişkisi	0.5

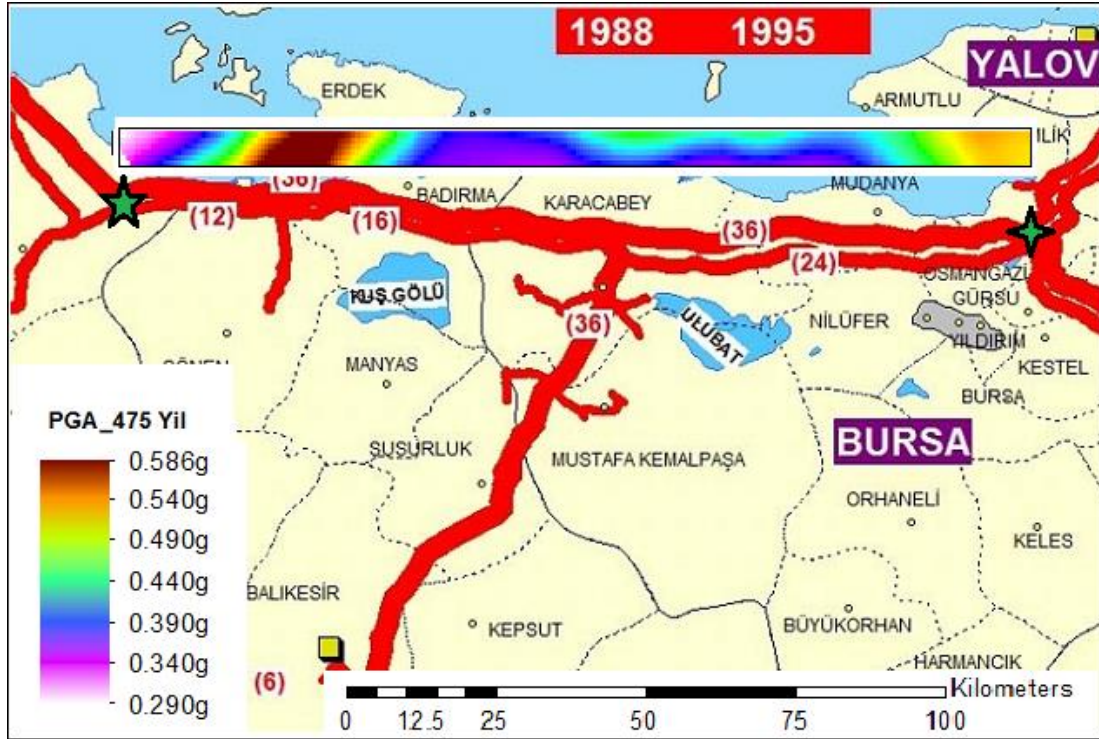
Tablo 7’de verilen tüm varsayımların göz önünde tutulması ile ortaya çıkan $2^4 = 16$ kombinasyonun her biri için sismik tehlike analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bir kombinasyonda yer alan varsayımlara göre hesaplanan sismik tehlike değerinin, o kombinasyon için bulunan birleşik olasılık değeri ile çarpılması ve 16 kombinasyonun her biri için benzer şekilde bulunan sismik tehlike değerlerinin toplanması ile elde edilen ağırlıklı ortalama sismik tehlike değeri “en iyi tahmin” olarak adlandırılmıştır. Bu pilot uygulamada mantık ağacı yöntemi ile “en iyi tahmin” sismik tehlike değerleri pilot uygulama için seçilen doğal gaz boru hattının bulunduğu yerler için gerçekleştirilmiştir.

Doğal gaz boru hattı boyunca elde edilen en büyük yatay yer ivmelerini (PGA) gösteren olasılıksal sismik tehlike haritaları, 475, 1000 ve 2475 yıllık tekerrür süreleri (sırası ile, 50 yılda % 10, % 5 ve % 2 aşılma olasılıkları) için Şekil 7, 8 ve 9’da sunulmuştur. Tablo 8’de ise 475, 1000 ve 2475 yıllık tekerrür sürelerine karşılık gelen en büyük yatay yer ivme (PGA) değerleri doğal gaz hattı boyunca takriben 10 km aralıklarla verilmiştir. Bu tabloda görüldüğü gibi, doğal gaz boru hattının maruz kalacağı en yüksek PGA değerleri, koordinatları 40.28° K enlemi ve 27.74° D boylamı olan mevkide meydana gelmektedir. Bu PGA değerleri, 475,

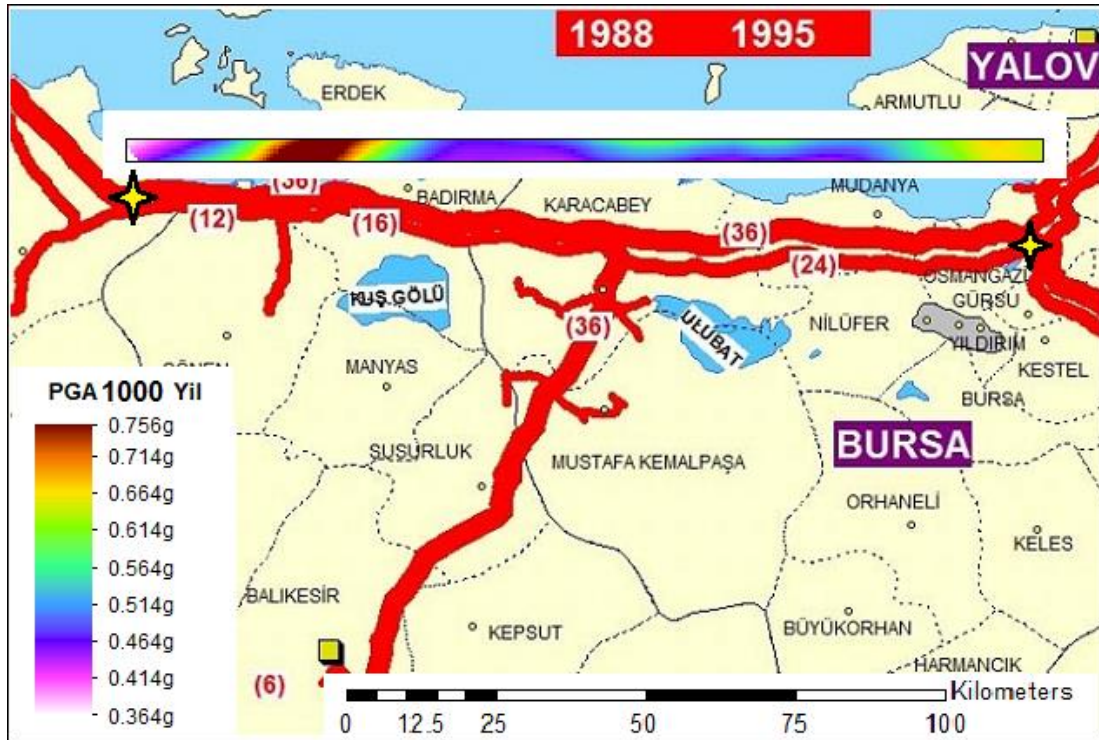
1000 ve 2475 yıllık tekerrür süreleri için, sırası ile, 0.58g, 0.74g ve 0.97g olarak tahmin edilmiştir.

Tablo 8. Değişik tekerrür süreleri için doğal gaz boru hattı boyunca hesaplanan en büyük yatay yer ivme değerleri (PGA)

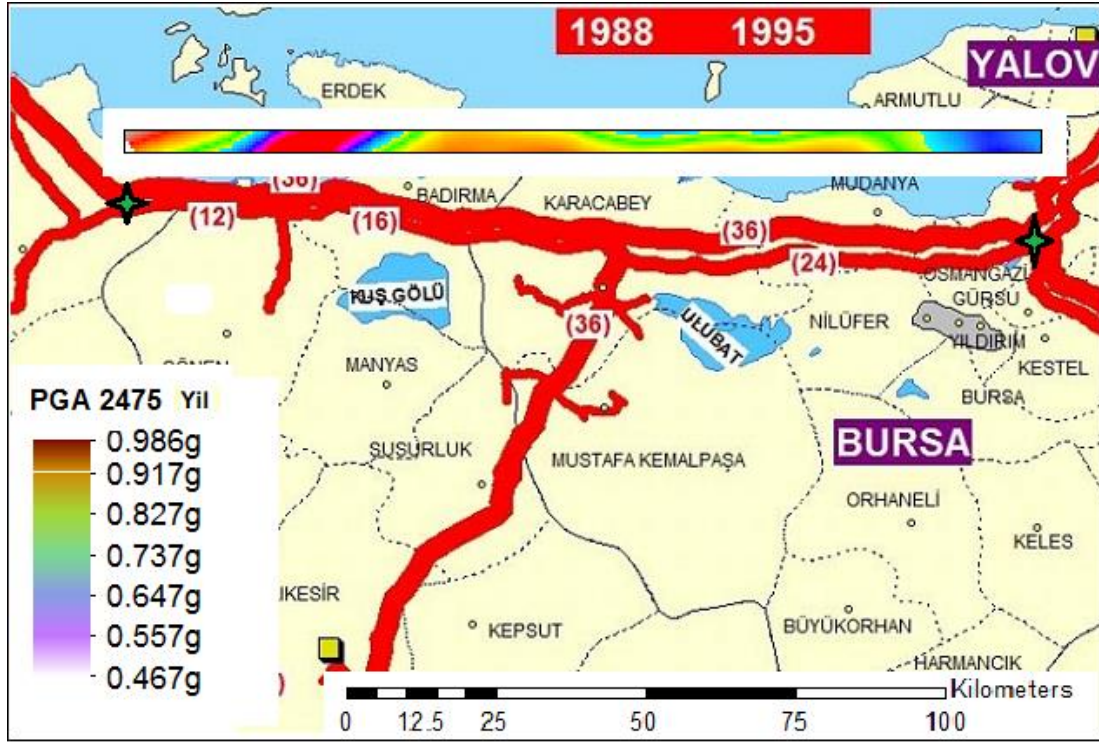
Takribi Konum		En Büyük Yatay Yer İvmesi (PGA)		
		Ortalama Tekerrür Süresi (yıl)		
Enlem (°) K	Boylam (°) D	475	1000	2475
40.28	27.40	0.327g	0.419g	0.546g
40.28	27.54	0.405g	0.519g	0.675g
40.28	28.64	0.348g	0.446g	0.582g
40.28	27.74	0.577g	0.744g	0.971g
40.28	27.86	0.426g	0.543g	0.705g
40.28	27.98	0.350g	0.437g	0.556g
40.30	28.12	0.346g	0.436g	0.562g
40.30	28.24	0.353g	0.447g	0.578g
40.30	28.36	0.390g	0.504g	0.658g
40.30	28.46	0.382g	0.497g	0.654g
40.32	28.58	0.404g	0.529g	0.703g
40.30	28.68	0.372g	0.480g	0.631g
40.30	28.82	0.370g	0.473g	0.617g
40.32	28.94	0.429g	0.544g	0.706g
40.30	28.04	0.347g	0.435g	0.556g
40.32	29.16	0.472g	0.588g	0.747g



Şekil 7. Doğal gaz boru hattının belirlenen segmenti boyunca **475** yıllık tekerrür süresi için hesaplanan en büyük yatay yer ivmesi (PGA) değerlerinin değişimi



Şekil 8. Doğal gaz boru hattının belirlenen segmenti boyunca **1000** yıllık tekerrür süresi için hesaplanan en büyük yatay yer ivmesi (PGA) değerlerinin değişimi



Şekil 9. Doğal gaz boru hattının belirlenen segmenti boyunca **2475** yıllık tekerrür süresi için hesaplanan en büyük yatay yer ivmesi (PGA) değerlerinin değişimi

4. BORU HATTININ SİSMİK GÜVENİRLİĞİNİN TAHMİNİ

4.1 Giriş

Boru hattının geçtiği bölgedeki sismik tehlikeye göre boru hattının deprem güvenirlığının tahmini bu projenin kapsamında değildir. Bununla birlikte, raporun bu bölümünde bu amaca yönelik bir model önerilmiş ve önerilen modelin uygulaması Bölüm 3'de sismik tehlike analizinin yapıldığı, Bursa ilinin kuzeybatısından geçen doğal gaz iletim boru hattı segmenti için gerçekleştirilmiştir.

4.2 Eleman ve Sistem Güvenirlik Modeli

Bir altyapı sistemi belli bir görevi yerine getirmek üzere, belirli bir düzene göre birleştirilmiş elemanlar topluluğudur. Bu elemanlar bireysel davranışları ile sistemin tüm dayanımı etkiler. Yapı elemanlarını etkileyen yüklerin değeri kesin olmayıp rassal bir özellik göstermektedir. Bundan başka eksik bilgi ve verilerden doğan belirsizliklerin de tasarıma etkisi göz önünde tutulmalıdır. Bu belirsizlikler klasik tasarım yöntemlerinde güvenlik ya da yük katsayılarının kullanılmasını gerektirmektedir. Ancak belirsizlikler ve bunların yapının güvenliğine etkileri, tutarlı bir şekilde yalnızca olasılık yöntemleri ile çözümlenebilir. Bu nedenle altyapı sistemlerinin tasarım ilkesi de olasılık yöntemleri çerçevesinde geliştirilmelidir. Burada bir altyapı elemanının güvenirlığı, dayanım ve yükün rassal değişken olduğu durum için incelenmiştir.

Elemanlar için sismik yük (talep) olasılık dağılımı belirlendikten sonra, her elemanın dayanımı için de bir olasılık dağılımı çıkartılmalıdır. Bu olasılık dağılımı altyapı sistemini oluşturan elemanların dayanımından, kullanılan malzeme özelliklerinden, boyutlarından ve modelleme hatalarından kaynaklanan belirsizliği yansıtmaktadır. Farklı kaynaklardan gelen belirsizliklerin dayanıma olan toplam etkisi birinci-mertebe ikinci-moment yöntemi (Ang ve Tang, 1984) kullanılarak bulunabilir.

Dayanım ve deprem yüküne bağlı olarak elemanın hasar durumu sürekli bir hasar göstergesi değişkeni ile tanımlanabilir. En basit şekilde ise tam hasar, göçme (failure) ve hiç hasar görmeme, kalım (survival) şeklinde iki durum düşünülebilir. Dayanım ve deprem etkisine ilişkin olasılık dağılımları bilindiğinde elemanın kalım olasılığı bulunabilir. Kalım olasılığı, burada **güvenirlik** olarak adlandırılmıştır. Eğer D ve S herhangi bir elemanın, sırasıyla,

sismik dayanımını (kapasitesini) ve sismik yükünü (talebi) gösteren rassal değişkenler ise, bu elemanın güvenilirliği (kalım olasılığı), P_s , şöyledir:

$$P_s = \Pr (D > S) \quad (17)$$

Elemanın göçmesi ise “ $D \leq S$ ” durumunda ortaya çıkacaktır ve göçme olasılığı, P_f :

$$P_f = \Pr (D \leq S) = 1 - P_s \quad (18)$$

olur. Burada $\Pr (.)$ olasılığı simgelemektedir. D ve S rassal değişkenlerinin istatistiksel anlamda birbirinden bağımsız oldukları durumda ve Denklem 18 kullanılarak,

$$P_f = \int_0^{\infty} \int_0^s f_D(d) f_S(s) dd ds = \int_0^{\infty} F_D(s) f_S(s) ds \quad (19)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, $F_X(.)$ ve $f_X(.)$, sırası ile X rassal değişkeninin birikimli dağılım ve olasılık yoğunluk işlevleridir.

Altyapı sistemini oluşturan herhangi bir elemanın güvenilirliği, bu elemanın dayanımını, elemana gelen yük etkisi ile karşılaştırarak belirlenir. Mekana yayılı bir altyapı sisteminde her eleman için boyut faktörünün göz önüne alınması gerekir. Uzunlukları birbirlerinden farklı olan elemanların güvenilirliğinin hesaplanması amacıyla iki model geliştirilmiştir. Bunlardan birincisi olan “nokta eleman” modelinde sismik parametrenin olasılık dağılımı sistemin mekanda yayılı olan her elemanı boyunca değişik noktalarda hesaplanarak, en yüksek sismik yük belirlenmekte ve bu değer elemanın maruz kaldığı sismik tehlike olarak kabul edilerek belirli bir uzunluğa sahip olan o eleman nokta elemana dönüştürülmektedir. Burada elemanın uzunluğu güvenilirlik belirlemede etkin olmamaktadır. Bu yaklaşım sismik yükün ve dayanımın elemanın tüm uzunluğu boyunca istatistiksel bakımdan tam bağımlı olduğunu varsaymaktadır.

İkinci model olan “çoklu alt eleman” modelinde ise, her eleman, mekansal korelasyon değerlerine bağlı olarak eşit uzunlukta alt elemanlara bölünmektedir. Bu durumda elemanın kalımlığı, “seri” olarak bağlanmış alt elemanların tümünün kalımlığını gerektirmektedir. Aynı deprem etkisine maruz kaldıklarından ve dayanımı etkileyen malzeme, işçilik gibi etkenlerin aynı olması nedeni ile alt elemanların göçme olaylarının istatistiksel olarak kuvvetli bir bağımlılık göstermeleri beklenir. Bu bölümde açıklanan modeller çerçevesinde ve

değişkenlerin normal dağılım gösterdiği durumlarda eleman güvenirliliği (kalım olasılığı) Denklem 17 kullanılarak bulunabilir. Ancak bu modeller ve elde edilen kalım olasılıkları “nokta eleman” varsayımı için geçerlidir. Birbirleri ile bağlantılı olan z sayıdaki alt elemandan oluşan bir altyapı elemanının güvenirliliğinin bulunması, oldukça zor olan bir sıra entegralin alınmasını ve elde edilmesi genellikle olanak dışı olan alt eleman dayanımlarının ortak olasılık yoğunluk işlevinin saptanmasını gerektirmektedir. Bütün bu zorluklar karşısında, bazı basitleştirici varsayımlar altında P_f (ya da P_s) için alt ve üst sınır değerlerini bulmak en uygun yol olmaktadır (Yüçemen, 1977). Basitleştirici varsayımlar ve buna göre bulunacak sistem hasar olasılıklarının simgeleri aşağıda özetlenmiştir:

- P_f' : alt elemanların göçmelerinin tam bir korelasyon gösterdikleri varsayımına göre elemanın hasar görme olasılığı;
- P_f^* : alt elemanların göçmelerinin istatistiksel bakımdan bağımsız olaylar oldukları varsayımına göre elemanın hasar görme olasılığı.

Yukarıdaki varsayımların ilkinde alt elemanların dayanımlarının tam bir korelasyon gösterdikleri kabul edilmiştir. Bu durumda z sayıda alt elemandan oluşan bir şebeke elemanının en zayıf noktası, güvenilirlik değerinin en küçük olduğu alt elemandır ve S yükünün şebekeye ilk etkisinde elemanın hasara uğrama olasılığı, bu en zayıf eleman için Denklem 18'den bulunan göçme olasılığına eşit olacaktır. Kısaca,

$$P_f' = \max \{P_{f_i}\} = \max \{P_{f_1}, P_{f_2}, \dots, P_{f_z}\} \quad (20)$$

Burada, P_{f_i} , i sayılı alt elemanın deprem etkisi ile hasar görme olasılığıdır. Eğer alt elemanların göçmelerinin istatistiksel bakımdan bağımsız olaylar oldukları varsayılırsa,

$$P_s^* = \prod_{i=1}^z P_{s_i} = \prod_{i=1}^z (1 - P_{f_i}) \quad (21)$$

ve buna bağlı olarak elemanın hasar görme olasılığı da

$$P_f^* = 1 - \prod_{i=1}^z (1 - P_{f_i}) \quad (22)$$

olur.

Bir şebeke elemanının hasar görme olasılığı için elde edilen bu değerler ile gerçek hasar görme olasılığı, P_f , arasında şu eşitsizliklerin geçerli olduğu gösterilmiştir (Yüçemen, 1977):

$$P_f' \leq P_f \leq P_f^* \quad (23)$$

Bir elemanın hasar görme olasılığı için Denklem 23'de gösterilen alt ve üst sınır değerleri, elemanı oluşturan alt elemanların göçme olasılıkları cinsinden şöyle ifade edilebilir:

$$\text{Alt Sınır: } P_f' = \max \{P_{f_i}\} \quad i = 1, 2, \dots, z \quad (24)$$

$$\text{Üst Sınır: } P_f^* = 1 - \prod_{i=1}^z (1 - P_{f_i}) \quad (25)$$

Benzer şekilde elemanın güvenilirliği (kalım olasılığı) için alt ve üst sınır değerleri, z sayıdaki alt elemanların kalım olasılıkları cinsinden şu şekilde yazılabilir:

$$\text{Alt Sınır: } P_s^* = \prod_{i=1}^z P_{s_i} \quad (26)$$

$$\text{Üst Sınır: } P_s' = \min \{P_{s_i}\} \quad i = 1, 2, \dots, z \quad (27)$$

Yukarıda açıklanan çoklu alt eleman modelinde bir elemanın kalım olasılığı alt sınırı (Denklem 26), elemanın bölündüğü alt parça sayısına duyarlı olmaktadır. Bunun nedeni alt güvenilirlik sınırının, alt elemanların bağımsız oldukları varsayımına göre alt eleman güvenilirliklerinin çarpımına eşit olmasıdır. Elemanın bölündüğü parça sayısı arttıkça, eleman güvenilirliği, dolayısıyla da altyapı sisteminin güvenilirliği azalacaktır. Alt elemanların uzunluğunun λ ile simgelenen mekansal dalgalanma ölçeğine (spatial scale of fluctuation) eşit olduğu varsayımı uygun bir yaklaşım olacaktır. λ , Vanmarcke (1983) tarafından rassal süreçlerdeki korelasyon yapısını modellemek için önerilmiş bir parametredir. Fiziksel olarak, λ , sismik kapasite ve yükün mekanda kuvvetli bağımlılık gösterdiği mesafeyi belirtmektedir.

4.3 Uygulama

Bursa ilinin kuzeybatısından geçen ve koordinatları 40.28° K enlemi ve 27.40° D boylamı olan birinci düğüm noktası ile koordinatları 40.32° K enlemi ve 29.16° D boylamı olan ikinci düğüm noktası arasında kalan segment, Botaş Genel Müdürlüğü doğal gaz iletim boru hatları sisteminin bir parçasını (elemanını) oluşturmaktadır. Güvenirlik değerlendirilmesi yapılacak bu segmentin konumu Şekil 4 ve 5'de gösterilmiştir. Bu segmentin deprem güvenilirliği, Bölüm 4.2'de anlatılan modelin uygulamasını göstermek amacı ile hesaplanacaktır. Deprem şiddeti ve doğal gaz boru hattına gelen deprem etkisinin göstergesi olarak en büyük yatay

yer ivmesi (PGA) seçilmiştir. Bölüm 3’de, seçilen bu doğal gaz boru hattı segmenti boyunca sismik tehlike hesaplanmış ve Tablo 8’de 475, 1000 ve 2475 yıllık tekerrür sürelerine karşılık gelen en büyük yatay yer ivme (PGA) değerleri doğal gaz boru hattı segmenti boyunca takriben 10 km aralıklarla verilmiştir.

Boru hattı üzerindeki pig istasyonlarının, vanaların, kompresör ve basınç düşürme istasyonlarının tam güvenilir oldukları varsayılmıştır. Taşıyıcı boruların deprem yüküne dayanımı ile ilgili bir bilgi BOTAŞ’tan elde edilememiştir. Ayrıca boruların deprem yüküne olan dayanımı ile ilgili bir analiz de bu araştırmanın kapsamı dışındadır. Bu nedenle boru hattı boyunca tüm boruların aynı olduğu ve deprem yüküne karşı dayanımlarının bir Gauss dağılımı gösterdiği varsayılmış ve değişkenlik katsayısı (d.k.) 0.20 olarak alınmıştır. Dayanım ile ilgili yukarıda belirtilen bilgi eksikliği nedeni ile ortalama dayanımın $\mu_D = 1.00g$ olduğu varsayılmıştır.

Göz önünde tutulan doğal gaz boru hattı segmenti, uzunluğu takriben 10 km olan 16 alt elemana bölünmüş ve her bir alt elemanın güvenirliliği Denklem 17’den hesaplanmıştır. Bu hesaplamada, incelenen segment boyunca aynı kalitede boru kullanıldığı ve zemin koşullarının da aynı olduğu öngörüsü ile tüm alt elemanların dayanımının (D), ortalaması $\mu_D = 1.00g$ ve değişkenlik katsayısı, d.k. = 0.20 (standart sapması $\sigma_D = 0.20g$) olan bir normal dağılıma sahip olduğu varsayılmıştır. Buna karşılık her alt elemanı etkileyen deprem yükü (S), alt elemanın konumuna ve göz önünde tutulan tekerrür süresine göre, Tablo 8’de görüldüğü üzere, değişecektir. Tablo 8’de verilen takribi konum koordinatları bu 16 alt elemanın her birisinin orta noktasının konumu olarak değerlendirilmiş ve bu koordinatlara karşılık gelen en büyük yatay yer ivme (PGA) değeri de o elemanı etkileyen deprem yükü olarak (S) alınmıştır. Bu güvenirlilik değerlendirmesini 475, 1000 ve 2475 yıllık üç değişik tekerrür süresi için, yani üç değişik risk düzeyine göre, yapmak mümkündür. Hesaplanan güvenirlilik değerleri Tablo 9’da 16 alt elemanın her biri için ve 475, 1000 ve 2475 yıllık tekerrür süreleri için verilmiştir. Tablo 10’da ise Denklem 18’den hesaplanan hasar görme olasılıkları yer almaktadır.

Yapı güvenirliliği açısından başlangıç koordinatları 40.28° K enlemi ve 27.40° D boylamı bitiş koordinatları 40.32° K enlemi ve 29.16° D boylamı olan bu doğal gaz iletim boru hattı segmentini seri olarak birleştirilmiş 16 elemandan oluşan bir sistem olarak değerlendirmek mümkündür. Bu doğal gaz iletim boru hattı segmentinin başlangıç ve bitiş noktaları arasında iletişim sağlanması olasılığı bu segmentin güvenirliliği olarak alınmıştır. Sistem güvenirliliği bakımından bu iletişimin sağlanması için 16 elemanın da depremden bir hasar görmemesi

gerekir. Sistem güvenilirliğinin hesabında bu 16 elemanın birbirleri ile olan mekansal korelasyonu bilmek gerekir. Ancak böyle bir bilgi mevcut olmadığı için şu iki uç durum dikkate alınmıştır: (i) alt elemanların dayanımlarının tam bir korelasyon gösterdikleri varsayımına göre boru hattı segmentinin hasar görme olasılığı (P_f'); ve (ii) alt elemanların göçmelerinin istatistiksel bakımdan bağımsız olaylar oldukları varsayımına göre boru hattı segmentinin hasar görme olasılığı (P_f^*).

Tablo 9. Boru hattı segmentinin alt elemanları için hesaplanan güvenilirlik değerleri ($\mu_D = 1g$ ve $\sigma_D = 0.2g$)

Takribi Konum		Güvenirlik (P_s)		
		Ortalama Tekerrür Süresi (yıl)		
Enlem ($^{\circ}$ K)	Boylam ($^{\circ}$ D)	475	1000	2475
40,28	27,40	0,9996	0,9982	0,9884
40,28	27,54	0,9986	0,9920	0,9484
40,28	27,64	0,9994	0,9972	0,9817
40,28	27,74	0,9830	0,8997	0,5596
40,28	27,86	0,9979	0,9890	0,9306
40,28	27,98	0,9994	0,9976	0,9868
40,30	28,12	0,9995	0,9976	0,9857
40,30	28,24	0,9994	0,9972	0,9826
40,30	28,36	0,9989	0,9934	0,9564
40,30	28,46	0,9990	0,9941	0,9582
40,32	28,58	0,9986	0,9909	0,9319
40,30	28,68	0,9992	0,9953	0,9678
40,30	28,82	0,9992	0,9959	0,9726
40,32	28,94	0,9979	0,9887	0,9292
40,30	29,04	0,9995	0,9977	0,9868
40,32	29,16	0,9959	0,9803	0,8980

Bu varsayımların ilkinde alt elemanların dayanımlarının tam bir korelasyon gösterdikleri kabul edilmiştir. Bu durumda 16 alt elemandan oluşan bu segmentin, en zayıf noktası, güvenilirlik değerinin en küçük olduğu alt elemandır ve S yükünün şebekeye ilk etkisinde elemanın hasara uğrama olasılığı, bu en zayıf alt eleman için Denklem 18'den bulunan göçme olasılığına eşit olacaktır. Tablo 11'de en büyük hasar görme olasılığı orta noktasının koordinatlarının 40.28° K enlem ve 27.74° D boylam olduğu elemanda oluşmaktadır ve Denklem 24'e göre, 475, 1000 ve 2475 yıllık tekerrür süreleri için, hasar görme olasılığının alt

sınırı, P_f^1 , sırası ile, **0.0170**, **0.1003** ve **0.4404**'tür. Eğer alt elemanların hasar görmelerinin istatistiksel bakımdan bağımsız oldukları varsayılırsa, Denklem 25'den 475, 1000 ve 2475 yıllık tekerrür süreleri için, hasar görme olasılığının üst sınırı, P_f^* , sırası ile **0.0346**, **0.1821** ve **0.6968** olarak hesaplanır. Benzer şekilde, boru hattı segmentinin güvenilirliği (kalım olasılığı)

Tablo 10. Boru hattı segmentinin alt elemanlar için hesaplanan hasar görme olasılıkları ($\mu_D = 1g$ ve $\sigma_D = 0.2g$)

Takribi Konum		Hasar Görme Olasılığı (P_f)		
		Ortalama Tekerrür Süresi (yıl)		
Enlem ($^{\circ}$ K)	Boylam ($^{\circ}$ D)	475	1000	2475
40,28	27,40	0,0004	0,0018	0,0116
40,28	27,54	0,0014	0,0080	0,0516
40,28	27,64	0,0006	0,0028	0,0183
40,28	27,74	0,0170	0,1003	0,4404
40,28	27,86	0,0021	0,0110	0,0694
40,28	27,98	0,0006	0,0024	0,0132
40,30	28,12	0,0005	0,0024	0,0143
40,30	28,24	0,0006	0,0028	0,0174
40,30	28,36	0,0011	0,0066	0,0436
40,30	28,46	0,0010	0,0059	0,0418
40,32	28,58	0,0014	0,0091	0,0681
40,30	28,68	0,0008	0,0047	0,0322
40,30	28,82	0,0008	0,0041	0,0274
40,32	28,94	0,0021	0,0113	0,0708
40,30	29,04	0,0005	0,0023	0,0132
40,32	29,16	0,0041	0,0197	0,1020

için alt ve üst sınır değerleri, sırası ile, Denklem 26 ve 27'den hesaplanabilir. Bu değişik varsayımlara göre ve üç farklı tekerrür süresine karşılık gelen doğal gaz iletim boru hattı segmenti için hesaplanan güvenilirlik ve hasar görme olasılığı alt ve üst sınırları, sırası ile, Tablo 11 ve 12'de verilmiştir.

Tablo 11. Boru hattı segmenti için güvenilirlik sınırları

Ortalama Tekerrür Süresi (yıl)		
475	1000	2475
$0.9654 \leq P_s \leq 0.9830$	$0.8179 \leq P_s \leq 0.8997$	$0.3032 \leq P_s \leq 0.5596$

Tablo 12. Boru hattı segmenti için hasar görme olasılığı sınırları

Ortalama Tekerrür Süresi (yıl)		
475	1000	2475
$0.0170 \leq P_f \leq 0.0346$	$0.1003 \leq P_f \leq 0.1821$	$0.4404 \leq P_f \leq 0.6968$

5. ÖZET VE SONUÇLAR

Bu raporda karbon dioksit (CO₂) ve doğal gaz taşıma ve iletim boru hatları gibi mekanda yayılı altyapı sistemlerinin maruz kalabilecekleri deprem tehlikesinin olasılıksal yöntemlerle tahmini için yürütülecek çalışmanın başlıca aşamaları üzerinde durulmuş ve Bursa ilinin kuzeybatısından geçen doğal gaz iletim boru hattı segmenti için gerçekleştirilen bir sismik tehlike analizi ile uygulaması gösterilmiştir. Boru hattının geçtiği bölgedeki sismik tehlikeye göre boru hattının deprem güvenilirliğinin tahmini bu projenin kapsamında olmamasına rağmen, raporda bu amaca yönelik bir model önerilmiş ve önerilen modelin uygulaması sismik tehlike analizinin yapıldığı doğal gaz iletim boru hattı segmenti için gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen başlıca sonuçlar ve sunulan öneriler şöyledir:

(i) Boru hattı sistemlerini deprem etkilerinden zararsız ya da az zararla kurtarma çalışmalarının başlangıç noktası, mekanda yayılı bu sistemlerin maruz kalacağı sismik tehlikeyi belirlemektir. Sismik tehlike analizindeki aşamaların her birinin içerdiği rassal değişkenliklerden (aleatory) ve bilgi eksikliğinden (epistemic) kaynaklanan belirsizliklerin göz önünde bulundurulabilmesi için mutlaka olasılık ve istatistik yöntemlerinin kullanılması gereklidir.

(ii) Son yıllarda aktif faylardan kaynaklanan sismik tehlikenin tahmini önem kazanmıştır. Faylar üzerinde gerçekleştirilen kapsamlı çalışmalar neticesinde fayların ana özelliklerine ait elde edilen bilgiler ve verilerin de bunda önemli bir katkısı olmuştur. Dolayısı ile boru hattının geçtiği bölgedeki deprem tehlikesinin değerlendirmesinde inşaat sahasını etkileyebilecek mesafedeki aktif fayların sismik tehlikeye olan katkıları özellikle göz önünde tutulmalıdır.

(iii) Mekanda yayılı boru hattı şebekelerinin depreme karşı güvenilirliğinin değerlendirilmesi için önerilen model sistemin güvenilirliğini olasılık cinsinden vermektedir. Güvenirliğin olasılık cinsinden ifade edilmesi, güvenilirlik artırmaya yönelik seçeneklerin karşılaştırılmasını, karar kuramı yöntemlerinden yararlanarak maliyet/yarar analizlerinin yapılmasını sağladığı gibi, mevcut ya da yeniden inşa edilecek şebekelerin güvenilirlik düzeylerini, göreceli de olsa, niceliksel olarak ortaya koymaktadır.

(iv) Göçme olaylarının mekanda gösterdiği bağımlılık boru hattı sisteminin güvenilirliğini etkilemektedir. Bu nedenle çalışmada bir boru hattı elemanın değişik noktalarında meydana gelebilecek hasar olayları arasındaki bağımlılık dikkate alınmıştır. Mekansal bağımlılığın

ölçüsü olarak dalgalanma ölçeği benimsenmiş ve mekansal korelasyonun eleman güvenilirliğine etkisi geliştirilen “çoklu alt eleman” modeli ile analize yansıtılmıştır. Bu modele göre eleman güvenilirliği, sistem güvenilirliği prensipleri ile de uyumlu olarak, elemanın uzunluğuna bağlı olmaktadır.

(v) Proje çalışmasının kapsamı dışında olması nedeni ile bu raporda sunulan uygulamada doğal gaz boru hattındaki elemanların dayanımları ile ilgili ayrıntılı bir çalışma yapılmamıştır. Daha sonraki çalışmalarda, boru ve karayolu gibi aksenel boyutları fazla olan altyapı elemanlarının, kırılma, zemin sıvılaşması, farklı oturma gibi değişik göçme biçimlerindeki dayanımlarının modellenmesi, parametrelere ilişkin belirsizliklerin tahmin edilmesi ve olasılık dağılımlarının çıkartılması gereklidir.

KAYNAK LİSTESİ

Akkaya, A.D. and Yüçemen, M.S.: 2000, Estimation of Earthquake Hazard Based on Extremes of Local Integral Random Functions, Engineering Geology, 58, Elsevier, pp. 53-66.

Akkaya, A.D. and Yüçemen, M.S.: 2002, Stochastic Modeling of Earthquake Occurrences and Estimation of Seismic Hazard: A Random Field Approach, Probabilistic Engineering Mechanics, Elsevier Science, Vol. 17, pp: 1-13.

Anagnos, T. and Kiremidjian, A. S.: 1984, Stochastic Time-Predictable Model for Earthquake Occurrences, Bull. Seism. Soc. Am., vol. 74, no.6, pp. 2593-2611.

Ang, A. H.-S. and Tang, W. H.: 1984, Probability Concepts in Engineering, Planning and Design, Volume II: Decision, Risk and Reliability, John Wiley and Sons Inc., New York.

Araya, R. and Der Kiureghian, A.: 1988, Seismic Hazard Analysis: Improved Models, Uncertainties and Sensitivities, EERC Report No. UCB/EERC-90/11, College of Engineering, University of California, Berkeley.

Atakan, K., Ojeda, A., Meghraoui, M., Barka, A., Erdik, M. and Bodare, A.: 2002, Seismic Hazard in Istanbul following the 17 August 1999 İzmit and 12 November 1999 Düzce Earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., vol. 92, no.1.

Başöz, N. and Gülkan, P.: 1992, Seismic Hazard Assessment in Regions with Diffused Boundaries and Nonhomogeneous Attenuation : An Application to Turkey, METU Earthquake Engineering Research Centre Report 92-01.

Bender, B. : 1986, Modeling Source Zone Boundary in Seismic Hazard Analysis, Bull. Seism. Soc. Am., vol. 76, no. 2, pp. 329-341.

Bender, B. and Perkins, D.: 1987, SEISRISK III: A Computer Program for Seismic Hazard Estimation, U.S.G.S. Bulletin 1772.

Bommer, J., Spence, R., Erdik, M., Tabuchi, S., Aydinoglu, N., Booth, E., del Re D. and Peterken, O.: 2002, Development of An Earthquake Loss Model for Turkish Catastrophe Insurance, J. of Seismology, vol. 6, no. 3, pp. 431-446.

Boore, D.M. and Joyner, W.B.: 1982, The Empirical Prediction of Ground Motion, Bull. Seism. Soc. Am., vol. 72, no. 6, pp. 43-60.

Boore, D.M., Joyner, W.B., Fumal, T.F.: 1997, Equations For Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration From Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work, Seismological Research Letters, Vol. 68, No. 1, pp. 128-153, January/February.

Brillinger, D. R. : 1982, Some Bounds for Seismic Risk, Bull. Seism. Soc. Am., vol. 72, no. 4, pp. 1403-1410.

Burton, P. W. : 1978, The Application of Extreme Value Statistics to Seismic Hazard Assessment in the European Area, Proc. Symp. Anal. Seismicity and on Seismic Risk, pp. 323-334.

Castellaro, S., Mulargia, F., Kagan, Y. Y.: 2004, Regression Problems for Magnitudes: A Unified Italian Catalogue, (unpublished), available on-line at moho.ess.ucla.edu/~kagan/SFY1.pdf, Department of Earth and Space Sciences, University of California, Los Angeles.

Cornell, C. A.: 1968, Engineering Seismic Risk Analysis, Bull. Seism. Soc. Am., vol. 8, no. 5, pp. 1583-1606.

Cornell, C. A.: 1971, Probabilistic Analysis of Damage to Structures Under Seismic Loads, in Dynamic Waves in Civil Engineering. Ed. Howells, D.A.,

Cornell, C. A. and Merz, H. A. : 1975, Seismic Risk Analysis of Boston, J. Struct. Div., ASCE, vol. 101, no. ST10, pp. 2027-2043.

Cornell, C. A. and Winterstein, S. R.: 1988, Temporal and Magnitude Dependence in Earthquake Recurrence Models, Bull. Seism. Soc. Am., vol. 78, no. 4, pp. 1522-1537.

Der Kiureghian, A. and Ang, A. H-S.: 1977, A Fault-Rupture Model for Seismic Risk Analysis, Bull. Seism. Soc. Am., vol. 67, no. 4, pp. 1173-1194.

Deniz, A.: 2006, Estimation of Earthquake Insurance Premium Rates for Turkey, M.Sc. Thesis, Dept. of Civil Engineering, METU, Jan. 2006.

Deniz, A. and Yüçemen, M.S.: 2005, Antalya Yöresi İçin Deprem Tehlikesinin Stokastik Yöntemlerle Tahmini, Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi Bildiriler Kitabı, Cilt 1, s 540-551, Antalya.

Deniz, A. and Yüçemen, M.S.: 2009, Assessment of earthquake insurance rates for the Turkish Catastrophe Insurance Pool, Georisk, vol. 3, no.2, pp. 67-74.

Deniz, A. and Yüçemen, M. S.: 2010, Magnitude Conversion Problem for the Turkish Earthquake Data, Natural Hazards, 55(2): 333-352.

Ellsworth, W. L., Matthews, M. V., Nadeau, R. M., Nishenko, S. P., Reasenberg, P. A. and Simpson, R. W.:1999, A Physically-Based Earthquake Recurrence Model for Estimation of Long-Term Earthquake Probabilities, U. S. Geological Survey, Open-File Report: 99-522.

Epstein, B. and Lomnitz, C.: 1966, A Model for the Occurrence of Large Earthquakes, Nature, vol. 211, pp. 954-956.

Erdik, M., Doyuran, V., Akkaş, N. and Gülkan, P.: 1985, A Probabilistic Assessment of the Seismic Hazard in Turkey, Tectonophysics, Vol. 117, pp. 295-344.

Erdik, M., Biro, Y., Onur, T., Sesetyan, K. and Birgören, G.: 1999, Assessment of Earthquake Hazard in Turkey and Neighboring Regions, Annali Di Geofisica, 42(6), pp. 1125-1138.

Erdik, M., Demircioğlu, M., Sesetyan, K., Durukal, E. and Siyahi, B.: 2004, Earthquake Hazard in Marmara Region, Turkey, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 24, pp. 605-631.

Esteva, L.: 1970, Seismic Risk and Seismic Design Decisions, in Seismic Design for Nuclear Power Plants, Ed. Hansen, R. J., MIT Press, Cambridge, Mass.

- EZ-FRISK: 2012, User's Manual, version 7.12, Risk Engineering Inc., Boulder, Colorado.
- Frankel, A. D.: 1995, Mapping Seismic Hazard in the Central and Eastern United States. *Seismological Research Letters* 66(4): 8-21.
- Frankel, A. D., Mueller, C. S., Barnhard, T. P., Perkins, D. M., Leyendecker, E.V., Dickman, N.C., Dickman, N.C. and Hopper, M. G.: 1996, National Seismic-Hazard Maps: Documentation, USGS Open-File Report 96-532: United States Geological Survey.
- Gardner, J. K. and Knopoff, L.: 1974, Is the Sequence of Earthquakes in Southern California, with Aftershocks Removed, Poissonian?, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 64, pp.1363-1367.
- Gülkan, P. and Yüçemen, M.S.: 1975, A Seismic Risk Study of İzmir, *Proceedings of the Fifth European Conference an Earthquake Engineering*, vol. 2, İstanbul.
- Gülkan, P. and Yüçemen, M.S.: 1977, Seismic Risk Analysis for Nuclear Power Plants, *METU Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 10, 1, April, pp. 115-135.
- Gülkan, P. and Gürpınar, A.: 1977, Seismic Risk of Northwestern Turkey, *Earthquake Engineering Research Centre Report No. 77-05*, Middle East Technical University, Ankara.
- Gülkan, P. and Yüçemen M.S.: 1991, Seismic Hazard Determination in Regions Having Diffused Boundaries, *Proceedings of the Fourth International Conference on Seismic Zonation*, Stanford University, Palo Alto, CA, vol. 1, pp. 65-70.
- Gülkan, P., Koçyiğit, A., Yüçemen, M.S., Doyuran, V. and Başöz, N.: 1993, A Seismic Zones Map of Turkey Derived from Recent Data, Middle East Technical University, Earthquake Engineering Research Center, Report No:93-01, Ankara (in Turkish).
- Gürpınar, A., Erdik, M., Öner, M. and Yüçemen, M.S.: 1979, Seismic Risk Analysis of Northern Anatolia Based on Intensity Attenuation, *Proceedings, Second U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Stanford, pp. 72-81.
- Hagiwara, Y.: 1974, Probability of Earthquake Occurrence as Obtained from a Weibull Distribution Analysis of Crustal Strain, *Tectonophysics*, vol. 23, no. 3, pp. 313-318.
- Kagan, Y. Y.: 2002, Aftershock Zone Scaling, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 92, No. 2, pp.641-655.
- Kalkan E. and Gülkan, P.: 2004, Site-Dependent Spectra Derived from Ground Motion Records in Turkey, *Earthquake Spectra* 20, pp. 1111-1138.
- Kameda, H. and Ozaki, Y.: 1979, A Renewal Process Model for Use In Seismic Risk Analysis, *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto University* , 41, pp.11-35.
- Kiremidjian, A. S.: 1982, A Minimum Stress Level Model for Large Earthquakes, *Proc., 7th ECEE, Athens, Greece*, vol. 2, pp. 32-41.
- Kiremidjian, A. S. and Anagnos, T. : 1984, Stochastic Slip-Predictable Model for Earthquake Occurrences, *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 74, no. 2, pp. 739-755.
- Knopoff, L. and Kagan, Y.: 1977, Analysis of the Theory of Extremes as Applied to Earthquake Problems, *J. Geophys. Res.*, vol. 82, no. 32, pp. 5647- 5657.

- Lomnitz, C. : 1974, Global Tectonics and Earthquake Risk, Elsevier, Amsterdam.
- Makropoulos, K. C. and Burton, P. W. : 1986, HAZAN: A Fortran Program to Evaluate Seismic-Hazard Parameters Using Gumbel's Theory of Extreme Value Statistics, Computers and Geosciences, vol. 12, no.1, pp. 29-46.
- Matthews, M. V., Ellsworth, W. L. and Reasenber, P. A.: 2002, A Brownian Model for Recurrent Earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., 92:6, pp. 2233-2250.
- McGuire, R. K.: 2004, Seismic Hazard and Risk Analysis, EERI, MNO-10, Oakland, CA.
- Mignan, A. and Woessner, J.: 2012, Estimating the Magnitude of Completeness for Earthquake Catalogs, Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis, doi:10.5078/corssa-00180805. Available at <http://www.corssa.org>.
- Omori, F. :1894, On the Aftershocks of Earthquakes, Journal of College of Science, Vol. 7, pp. 111-200, Imperial University, Tokyo.
- Parsons, T: 2004, Recalculated Probability of $M \geq$ Earthquake Beneath the Sea of Marmara, Turkey, J. of Geophysical Research, vol.109, 21 pages.
- Patwardhan, A. S., Kulkarni, R. B and Tocher, D. : 1980, A Semi- Markov Model for Characterizing Recurrence of Great Earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., vol. 70, no. 1, pp. 323-347.
- Prozorov, A. G., Dziewonski, A. M.: 1982, A Method of Studying Variations in the Clustering Property of Earthquakes: Application to the Analysis of Global Seismicity, Journal of Geophysical Research, Vol. 87, No. B4, pp. 2829-2839.
- Reid, H. F.: 1910, The Mechanics of the Earthquake, The California Earthquake of April 18, 1906, Report of the State Investigation Commission, Vol.2, Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C., pp. 16-28.
- Richter, C. F.: 1958, Elementary Seismology, W.H. Freeman and Company, San Francisco.
- Savage, M. K. and Rupp, S. H.: 2000, Foreshock Probabilities in New Zealand, New Zealand Journal of Geology and Geophysics, Vol. 43, pp. 461-469.
- Schwartz, D. P. and Coppersmith K. J.: 1984, Fault Behavior and Characteristic Earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas Fault Zones, J. Geophys. Res. vol. 89, pp.5681-5698.
- Scordilis, E. M.: 2006, Empirical global relations converting M_S and m_b to moment magnitude, J. Seismol., 10: 225-236.
- Selçuk, A. S. and Yüçemen, M. S.: 1999, Reliability of Lifeline Networks under Seismic Hazard, Reliability Engineering and System Safety, vol. 65, pp. 213-227.
- Selçuk, A.S. and Yüçemen, M.S: 2000a, Reliability of Lifeline Networks with Multiple Sources Under Seismic Hazard, Natural Hazards, Kluwer Academic Publishers, vol. 21, pp. 1-18.
- Selçuk, A.S. ve Yüçemen, M.S.: 2000b, Mekanda Yayılı Enterkonekte Sistemlerin Deprem Güvenirliği, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, vol. 24, pp. 143-160.

Shimazaki, K. and Nakata, T.: 1980, Time-Predictable Recurrence for Large Earthquakes, *Geophys. Res. Letters*, vol. 86, no. 4, pp. 279-282.

SSHAC Report: 1997, Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts, NUREG/CR-6372, vol. 1, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.

Stepp, J.C.: 1973, Analysis of the Completeness of the Earthquake Sample in the Pudget Sound Area, in *Contributions to Seismic Zoning*, S. T. Handing (Ed.), National Oceanic and Atmospheric Technical Report EERL 267-ESL 30.

Suzuki, S. and Kiremidjian, A. S. : 1991, A Random Slip Rate Model for Earthquake Occurrences with Bayesian Parameters, *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 81, pp. 781-795.

Thenhaus, P. C. and Campell, K. W.: 2003, *Seismic Hazard Analysis*, Chapter 8, *Earthquake Engineering Hand Book*, Wai-Fah Chen and Charles Schawthorn (editors), CRC Press. Turkish Natural Committee for International Decade for Natural Disaster Reduction:1989, National Plan of Turkey : 1990-2000, Ministry of Public Works and Settlement, Ankara.

Tibi, R., Blanco, J. and Fatehi, A.: 2011, An Alternative and Efficient Cluster-Link Approach for Declustering of Earthquake Catalogs, *GeoScience World*, vol. 82, no. 4, pp. 509-518.

Ulusay, R., Tuncay, E., Sönmez, H. and Gökçeoğlu, C.: 2004, An Attenuation Relationship Based on Turkish Strong Motion Data and Iso-Acceleration Map of Turkey, *Engineering Geology*, 74, pp. 265-291.

Utsu, T., Ogata, Y., Matsu'ura, R. S.: 1995, The Centenary of the Omori Formula for a Decay Law of Aftershock Activity, *Journal of Physics of the Earth*, Vol. 43, 1-33.

Van Dyck, J. F. M.: 1985, *Statistical Analysis of Earthquake Catalogs*, Ph.D. Thesis, Civil Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

Vanmarcke, E. H.: 1983, *Random Fields: Analysis and Synthesis*, MIT Press, Cambridge, MA.

Veneziano, C. and Cornell, C. A. : 1974, Earthquake Models with Spatial and Temporal Memory for Engineering Seismic Risk Analysis, Rep. R74-18, Dept. Civil Eng. MIT, Cambridge, Mass, p. 61.

Vere Jones, D. and Smith, E. G. C. : 1981, *Statistics in Seismology*, *Commun. Statist. Meth.*, vol. A10, no. 15, pp. 1559-1585.

Wells, D. L. and Coppersmith, K. J. : 1994, New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 84, no. 4, pp. 974-1002.

Wu, S.-C., Cornell, C. A. and Winterstein, S. R.: 1995, A Hybrid Model and Its Implication on Seismic Hazard Results, *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 85, pp. 1-16.

Yarar, R., Ergünay, O. Erdik, M. and Gülkan, P.:1980, A Preliminary Probabilistic Assessment of the Seismic Hazard in Turkey, *Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering*, İstanbul, vol. 1, pp. 309-316.

Yegulalp, T. M. and Kuo, J. T.: 1974, Statistical Prediction of the Occurrence of Maximum Magnitude Earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., vol. 64, no. 2, pp. 393-414.

Youngs, R. R. and Coppersmith, K. J.: 1985, Implications of Fault Slip rates and Earthquake Recurrence Models to Probabilistic Seismic Hazard Estimates, Bull. Seism. Soc. Am., vol. 75, pp. 939-964.

Yüccemen, M. S.: 1977, Yapı Sistemlerinde Güvenirlik Değerlendirilmesi, Uygulamalı İstatistik Seminer Bildirileri, Gelişme Dergisi, Özel Sayı, pp: 269-305.

Yüccemen, M. S. and Gülkan, P.: 1981, The Analysis of Parameter Uncertainties in the Assessment of Seismic Hazard for Nuclear Power Plants, Transactions of the Sixth Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, vol. K(a), Paris.

Yüccemen, M.S.: 1982, Sismik Risk Analizi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 160 s.

Yüccemen, M. S. : 1989, A Random Field Model for the Estimation of Earthquake Hazard due to Active Faults, in Reliability and Optimization of Structural Systems'88, Ed. Thoft-Christensen, P., Springer Verlag, Berlin, pp. 401- 409.

Yüccemen, M. S.: 1993, A Random Field Model for the Estimation of Seismic Hazard, Structural Safety, vol. 12, Springer Verlag, pp. 187-203.

Yüccemen, M. S. and Gülkan, P.: 1994, Seismic Hazard Analysis with Randomly Located Sources, Natural Hazards, vol. 9, Kluwer Academic Publishers, pp. 215-233.

Yüccemen, M.S.: 1995, Assessment of Seismic Hazard for Jordan Considering the Uncertainty in the Location of Seismic Sources, Proceedings, International Conference on Earthquake Engineering, Vol. I, Amman, Jordan, pp. 135-144.

Yüccemen, M. S. and Akkaya, A.: 1995, A Comparative Study of Stochastic Models for Seismic Hazard Estimation, Land Based and Marine Hazards: Scientific and Management Issues, Kluwer Academic Publishers, pp. 5-24.

Yüccemen, M. S. and Yılmaz, Ç.: 2004, Probabilistic Assessment of Earthquake Insurance Premium Rates for the Gümüşova-Gerede Motorway Section, Proceedings, Creating the Future, 3rd FAE International Symposium, Lefke, TRNC, pp.123-128.

Yüccemen, M. S., Koçyiğit, A., Yakut, A. ve Gencoğlu, S.: 2006, Deprem Tehlike Haritalarının Hazırlanması İçin Kılavuz, Teknik Rapor, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.

Yüccemen, M. S., Yılmaz C, and Erdik, M.: 2008, Probabilistic assessment of earthquake insurance rates for important structures: Application to Gumusova–Gerede motorway, Structural Safety 30 (2008) 420–435.

Zerva, A., Hirata, K. and Shinozuka, M.: 1990, Random Source Affects on Seismic Ground Motions, Jour. Eng. Mechanics, vol. 116, pp. 1198-1219.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. MEHMET SEMİH YÜCEMEN
Proje No:	111M798
Proje Başlığı:	Karbon Yakalama ve Depolama için CO2 Taşımalarının Risk Tayini
Proje Türü:	Uluslararası
Proje Süresi:	26
Araştırmacılar:	HAFİZE ŞEBNEM DÜZGÜN
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü. MÜHENDİSLİK F. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/12/2011 - 15/02/2014
Onaylanan Bütçe:	164175.0
Harcanan Bütçe:	114370.75
Öz:	<p>Bu proje BLACK SEA - ERA.NET çerçevesinde gerçekleştirilmiş ve TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. 111M798 Kod nolu Karbon Yakalama ve Depolama için CO2 Taşımalarının Risk Tayini başlıklı proje kapsamında Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi konusunda çalışmalar yürütülmüştür. BS-ERA.NET projesinde Türkiye'nin yanında Yunanistan, Romanya ve Bulgaristan da bu projenin ortakları olmuşlardır. Bu ülkelerin projede yer alan ilgili kurumları şunlardır:</p> <p>Yunanistan: National Technical University of Athens (NTUA) ? Proje koordinatörü. Romanya: Institute for Studies and Power Engineering (ISPE) ? Projenin 1. ortağı. Bulgaristan: Technical University of Sofia (TUS) ? Projenin 2. ortağı. Türkiye: Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) ? Projenin 3. ortağı.</p> <p>Orta Doğu Teknik Üniversitesi olarak projenin Çoklu-Tehlike Risk Analizi başlıklı 2. İş Paketindeki Sismik Tehlikenin Tahmini konusunda görev alınmıştır.</p> <p>Boru hatları, geniş coğrafi alanlara yayılmış altyapı sistemleridir. Deprem tehlikesine maruz boru hattı şebekelerinin sismik güvenilirliğinin hesaplanması, bu tür dağıtım şebekelerinin hasar verici bir deprem sırasında ya da sonrasında işlevlerini yerine getirebilmelerinin önemi nedeni ile gereklidir. Karbondioksit (CO2) ya da doğal gaz taşıma ve dağıtım boru hatları gibi sistemlerin deprem güvenilirliğinin tahmini, sismik tehlike analizinin ve sistem güvenilirliği değerlendirmesinin yapılmasını gerektirmektedir. Projede özellikle projenin esas amacı olan sismik tehlikenin olasılıksal yöntemlerle tahmini üzerinde durulmuştur. Sismik tehlike analizindeki aşamaların her birinin içerdiği rassal değişkenliklerden (aleatorik) ve bilgi eksikliğinden (epistemik) kaynaklanan belirsizlikler göz önünde tutulduğunda, sismik tehlike tahmininin olasılık ve istatistik yöntemlerinin kullanılarak yapılması kaçınılmaz olmaktadır.</p> <p>Projede boru hattının inşa edileceği bölgedeki sismik tehlikenin belirlenmesi için uygulanacak olan olasılıksal sismik tehlike analizi (OSTA) modelinin başlıca aşamaları ayrıntılı bir şekilde ortaya konulmuş ve bu aşamalarının uygulanması bir örnek çalışma ile gösterilmiştir. Bu örnek çalışmada Bursa ili ve yakın çevresi pilot bölge ve Bursa ilinin kuzeybatısından geçen doğal gaz boru hattı segmenti de pilot boru hattı olarak seçilmiştir. Seçilen doğal gaz boru hattı segmentinin deprem güvenilirliğinin tahmini için bir model sunulmuş ve uygulaması da bu boru hattı segmenti için gösterilmiştir.</p>
Anahtar Kelimeler:	Sismik tehlike, doğal gaz boru hattı, CO2 taşıma riski, sistem güvenilirliği, boru hattı şebekesi
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır