

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BORU HATLARINDA GÜVENİLİRLİK ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ÖMER YAŞAR ÇIRMIKTILI**

**DENİZLİ, AĞUSTOS - 2019**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**BORU HATLARINDA GÜVENİLİRLİK ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ÖMER YAŞAR ÇIRMIKTILI**

**DENİZLİ, AĞUSTOS - 2019**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**Ömer Yaşar ÇIRMIKTILI** tarafından hazırlanan “**BORU HATLARINDA GÜVENİLİRLİK ANALİZİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 26.08.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Prof. Dr. Abdullah Cem KOÇ



Üye  
Prof. Dr. Gürkan ÖZDEN  
Dokuz Eylül Üniversitesi



Üye  
Dr. Öğr. Üyesi Engin NACAROĞLU  
Pamukkale Üniversitesi



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun **04/09/2019** tarih ve **35/23** sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 114M258 No'lu proje ve Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinasyon Birimi tarafından PAUBAP 113O232 No'lu proje ile desteklenmiştir.**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**ÖMER YAŞAR ÇIRMIKTILI**



## ÖZET

**BORU HATLARINDA GÜVENİLİRLİK ANALİZİ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**ÖMER YAŞAR ÇIRMIKTILI**  
**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ABDULLAH CEM KOÇ)

**DENİZLİ, AĞUSTOS - 2019**

Depremler dünyanın varoluş sürecinden bu yana insanlığı ve içerisinde yer aldığımız çevresel yapıyı etkileyen önlenemez doğal afetlerden biridir. Bu afet sonucunda, eğer deprem meydana gelmeden önce gerekli önlemler alınmaz ise, depremin canlılar üzerinde oluşturduğu maddi ve manevi hasar artış gösterir. Meydana gelen depremler sonucunda üst yapıların gördüğü hasarlardaha çok göz önünde yer almakta ve insanların dikkatini çekmektedir. Buna rağmen geçmişten günümüze kadar meydana gelmiş olan büyük depremlerin alt yapı sistemleri üzerinde oluşturduğu hasarlar ve sonuçları küçümsenmeyecek seviyelerdedir.

Bu çalışmada, sismik etkiler sonucu oluşan kalıcı yer deformasyonlarının boru hatları üzerindeki etkisi güvenilirlik analizleri kullanılarak incelenmiştir. Güvenilirlik analizleri, muhtemel bir etki altında sistemlerin nasıl davranış göstereceğini önceden tahmin edilmesine yardımcı olan, uygulama, işlem ve hesap adımları bakımından farklılık gösteren yöntemlerden oluşur. Tez kapsamında probabilistik yaklaşıma sahip ve performans fonksiyonu temelli güvenilirlik analizi yöntemlerinden Ortalama Değer Birinci Mertebe İkinci Moment, Geliştirilmiş Birinci Mertebe İkinci Moment ve Monte Carlo Simülasyonu yöntemleri gömülü boru hatları üzerine uygulanmıştır.

Çalışma alanı ABD'nin Los Angeles şehrinde bulunan Balboa bulvarıdır. 1994 yılında meydana gelen Northridge depreminde Balboa bulvarında hasar gören ve hasar görmeyen boruların risk analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde; analiz sonuçları ile deprem sonrasında gözlenen sonuçların birebir uyum sağladığı görülmüştür. Çalışma sonucunda boru hatlarının sismik güvenilirliğine etki eden zemin ve boru parametreleri belirlenmiş olup bu bilgiler deprem etkisiyle oluşabilecek risklerin azaltılmasında faydalı olacaktır.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Boru Hatları, Güvenilirlik Analizleri, Deprem, Ortalama Değer Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi, Geliştirilmiş Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi, Monte Carlo Simülasyonu

# **ABSTRACT**

**RELIABILITY ANALYSIS OF PIPELINES**  
**MSC THESIS**  
**OMER YASAR CIRMIKTILI**  
**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**  
**CIVIL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: PROF. DR. ABDULLAH CEM KOC)**

**DENİZLİ, AUGUST 2019**

Earthquakes are one of the irrepressible natural disasters that have affected humanity and the environmental structure we involved in since the world's existence. As a result of this natural disaster; if the necessary precautions are not taken before the earthquake occurs, the pecuniary and spiritual damages caused by the earthquake on the living things will increase. As a result of the occurred earthquakes, the damages on the superstructures are more considered and attract the attention of the people. However, the damage and consequences of the major earthquakes that have occurred from the past to the present on the infrastructure systems are on a level that can not be underestimated.

In this study, permanent ground deformations, which occur as a result of seismic effects, effect on pipelines has been studied by using reliability analysis. Reliability analysis consists of methods that differ in application, transaction, and computation steps that help predict how systems will behave under a possible influence. In the scope of the thesis, with probabilistic approach and performance function-based reliability analysis methods; Mean Value First Order Second Moment, Advanced First Order Second Moment and Monte Carlo Simulation methods were applied on embedded pipelines.

The area of study is Balboa boulevard in Los Angeles, USA. Risk analyses of damaged and undamaged pipes in Balboa boulevard during the Northridge earthquake occurred in 1994 were conducted. When the results were examined, it was observed that the results of the analysis and the results observed in the application area after the earthquake matched exactly. As a result of the study, ground and pipe parameters affecting the seismic reliability of the pipelines were determined and this information will be useful for reducing the risks that may occur due to the earthquake.

**KEYWORDS:** Pipeline, Reliability Analysis, Earthquake, Mean Value First Order Second Moment Method, Advanced First Order Second Moment Method, Monte Carlo Simulation

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	2
1.2 Tezin Kapsamı.....	2
1.3 Materyal ve Yöntem .....	4
1.4 Tezin Organizasyonu .....	5
<b>2. GÜVENİLİRLİK ANALİZLERİ</b> .....	<b>6</b>
2.1 Güvenilirlik Analizi Yöntemlerinin Sınıflandırılması.....	6
2.2 Performans Fonksiyonu .....	9
2.3 Çalışmada Kullanılan Güvenilirlik Analizi Yöntemleri.....	11
2.3.1 Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi .....	11
2.3.1.1 Ortalama Değer Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi.....	11
2.3.1.2 Geliştirilmiş Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi .....	13
2.3.2 Monte Carlo Simülasyonu Yöntemi .....	15
<b>3. DEPREMLER VE BORU HASARLARI</b> .....	<b>18</b>
3.1 Geçici ve Kalıcı Yer Deformasyonları .....	18
3.1.1 Fay Hatları .....	19
3.1.2 Şev Kaymaları.....	20
3.1.3 Sıvılaşma Sonucu Oluşan Yer Değiştirmeler .....	22
3.2 Yanal Zemin Yayılması ve Eksenel Boru Deformasyonları .....	26
3.2.1 Sürekli Boru Hatları.....	26
3.2.1.1 Çekmeden Kaynaklı Hasar.....	27
3.2.1.2 Burkulmadan Kaynaklı Hasar .....	28
3.2.1.3 Kaynaklı Ek Hasarı .....	30
3.2.2 Parçalı Boru Hatları .....	31
3.3 Boru Hattına Paralel Yönde KYD Etkisi.....	32
<b>4. BORULARIN RİSK ANALİZLERİ</b> .....	<b>35</b>
4.1 Ortalama Değer Birinci Mertebe İkinci Moment Yönteminin Boru Hatlarına Uygulanması .....	35
4.2 Geliştirilmiş Birinci Mertebe İkinci Moment Yönteminin Boru Hatlarına Uygulanması.....	38
4.3 Monte Carlo Simülasyonu Yönteminin Boru Hatlarına Uygulanması.....	38
<b>5. ÖRNEK ÇALIŞMA</b> .....	<b>40</b>
5.1 Çalışma Alanının Depremselliği ve Northridge Depremi .....	40
5.2 Balboa Bulvarında Yer Hareketleri ve Boru Hatları .....	44
<b>6. SONUÇ ve ÖNERİLER</b> .....	<b>51</b>
6.1 Analiz Sonuçları .....	51



6.1.1	MVFOSM Yöntemine Göre Analiz Sonuçları .....	51
6.1.2	AFOSM Yöntemine Göre Analiz Sonuçları .....	53
6.1.3	MCS YöntemineGöre Analiz Sonuçları .....	55
<b>7.</b>	<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>57</b>
<b>8.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>64</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 2.1:</b> Güvenilirlik analizi yöntemleri .....	8
<b>Şekil 2.2:</b> Limit durumu gösteren başarısızlık yüzeyi, güvenli ve güvensiz bölgeler.....	10
<b>Şekil 3.1:</b> Fay hatlarının hareket çeşitlerinin gösterilmesi .....	20
<b>Şekil 3.2:</b> Şev kayması ile ilgili zemin yenilmeleri .....	21
<b>Şekil 3.3:</b> Yanal zemin yayılması 1. etki - zemin yüzeyi ile sınıvlaşma yüzeyinin aynı olması durumu .....	23
<b>Şekil 3.4:</b> Yanal zemin yayılması 2. etki - zemin yüzeyi ile sınıvlaşma yüzeyinin farklı olması durumu .....	23
<b>Şekil 3.5:</b> Depremin oluşturduğu KYD sonucunda zemin-boru hattı etkileşimi .....	25
<b>Şekil 3.6:</b> Eksenel yükler etkisi altında boruda oluşan gerilmeler.....	26
<b>Şekil 3.7:</b> Boruda bölgesel burkulma.....	29
<b>Şekil 3.8:</b> Borularda dikey yönde oluşan çubuk burkulma.....	29
<b>Şekil 3.9:</b> İçten kaynaklı boru.....	31
<b>Şekil 3.10:</b> Hasar görmüş çeşitli parçalı borular.....	32
<b>Şekil 3.11:</b> Boru eksenine paralel yönde KYD durumunda, KYD etkileri için kayan blok modeli .....	34
<b>Şekil 4.1:</b> Uniform dağılım ve normal ters dağılım grafikleri .....	39
<b>Şekil 5.1:</b> Northridge depremi merkezüssü .....	41
<b>Şekil 5.2:</b> Depremin bölgedeki hasar ve sarsıntı şiddeti haritası .....	42
<b>Şekil 5.3:</b> Northridge depremi ivme kaydı .....	43
<b>Şekil 5.4:</b> Northridge depremi ardından bölgenin durumu .....	45
<b>Şekil 5.5:</b> Balboa bulvarının güncel uydu görüntüsü.....	46
<b>Şekil 5.6:</b> Boru hatlarının bölgedeki yerleşim haritası .....	46
<b>Şekil 5.7:</b> Kaynaklı eklemde borunun a) Birleşim detayı b) Şematik, c) Geometrik ve d) Kosinüs eğrisi gösterimi .....	49
<b>Şekil 6.1:</b> Granada ve Rinaldi boru hatları için MVFOSM sonuçları grafiği... 52	
<b>Şekil 6.2:</b> Mobil Petrol ve Yeni Hat 120 boru hatları için MVFOSM sonuçları grafiği.....	52
<b>Şekil 6.3:</b> Granada ve Rinaldi boru hatları için AFOSM sonuçları grafiği .....	54
<b>Şekil 6.4:</b> Mobil Petrol ve Yeni Hat 120 boru hatları için AFOSM sonuçları grafiği.....	54
<b>Şekil 6.5:</b> Granada ve Rinaldi boru hatları için MCSM sonuçları grafiği .....	55
<b>Şekil 6.6:</b> Mobil Petrol ve Yeni Hat 120 boru hatları için MCSM sonuçları grafiği.....	56

# TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 3.1:</b> Yumuşak ve X sınıfı çelikler için Ramberg-Osgood parametreleri.....	28
<b>Tablo 5.1:</b> Analizlerde kullanılan boru hatlarının karakteristik özellikleri.....	48
<b>Tablo 5.2:</b> Analizlerde kullanılan parametre değerleri.....	50
<b>Tablo 6.1:</b> MVFOSM yöntemine göre çekme ve basınç durumu için borularda oluşan risk sonuçları .....	51
<b>Tablo 6.2:</b> AFOSM yöntemine göre çekme ve basınç durumu için borularda oluşan risk sonuçları .....	53
<b>Tablo 6.3:</b> MCS yöntemine göre çekme ve basınç durumu için borularda oluşan risk sonuçları .....	55

## SEMBOL LİSTESİ

$P_f$	:	Risk, Başarısızlık olasılığı
$P_s$	:	Güvenirlilik
$Z$	:	Performans fonksiyonu
$X$	:	Arz
$Y$	:	Talep
$g$	:	Sınır durum fonksiyonu
$G$	:	Sınır durum
$X_i$	:	Fonksiyonu sağlayan değişken değerler
$\bar{X}_i$	:	Fonksiyonun ortalama noktası
$d$	:	Çökme yüzeyine en yakın uzaklık
$X_i^*$	:	En olası çökme noktası
$a_i$	:	AFOSM yönteminde kullanılan katsayı
$C_i^*$	:	AFOSM yönteminde kullanılan sınır durum fonksiyonunun fonksiyonu sıfır yapan değere oranı
$\beta$	:	Güvenirlilik indeksi
$f_x(X)$	:	Bileşik olasılık
$G(X)$	:	Düzensiz alan
$N_f$	:	Analizlerde çıkan göçme adedi
$N$	:	Toplam analiz adedi
$J$	:	Temsili rasgele vektör
$G(J)$	:	Olasılık yoğunluk fonksiyonu
$g_J(X)$	:	Önem örnekleme fonksiyonunun etkisi
$s_d$	:	Eğim atılım
$s_s$	:	Yanal atılım
$s_v$	:	Düşey yer değiştirme
$s_h$	:	Yatay yer değiştirme
$\varepsilon$	:	Borunun yer değiştirmesi
$\sigma$	:	Tek eksenli çekme gerilmesi
$E$	:	Elastisite modülü
$n, r$	:	Ramberg - Osgood parametreleri
$\sigma_y$	:	Akma dayanımı
$W$	:	Borunun birim uzunluk başına düşen ağırlığı
$L_b$	:	Burkulma uzunluğu
$L_s$	:	Burkulmanın devamındaki boru uzunluğu
$\delta$	:	Kayan blok modelinde hareket eden bölge ile boru hattının eksenli arasındaki mesafe
$f_m$	:	Zeminle boru arasındaki birim sürtünme kuvveti
$c$	:	Zemin kohezyonu
$\mu$	:	Sürtünme katsayısı
$\gamma$	:	Efektif zemin birim ağırlığı
$H$	:	Yüzeyden borunun ortasına olan gömülme derinliği
$D$	:	Borunun nominal dış çapı
$k$	:	Sürtünme ile ilgili parametre
$\phi$	:	Zeminin içsel sürtünme açısı
$\varepsilon_{max}$	:	Maksimum gerilme
$\beta_p$	:	Boru gömme parametresi
$L_e$	:	Efektif uzunluk

- $t$  : Borunun et kalınlığı  
 $z$  : Olasılığa karşılık gelen standart normal dağılım değeri  
 $\bar{X}$  : Hesabı yapılan parametrenin ortalama değeri  
 $M_w$  : Deprem moment büyüklüğü



## KISALTMALAR

FORM	:	Birinci Dereceden Güvenilirlik
SORM	:	İkinci Dereceden Güvenilirlik
PEM	:	Nokta Tahmini Yöntemi
MVFOSM	:	Ortalama Değer Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi
AFOSM	:	Geliştirilmiş Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi
Var	:	Varyans
Std(Z)	:	Hesabı Yapılan Sistemin Standart Sapması
Std <sub>i</sub>	:	Hesabı Yapılan Parametrenin Standart Sapması
HLM	:	Hasofer-Lind Yöntemi
MCSM	:	Monte Carlo Simülasyonu Yöntemi
c.o.v.	:	Varyasyon Katsayısı
GYD	:	Geçici Yer Deformasyonları
KYD	:	Kalıcı Yer Deformasyonları
API	:	Amerika Petrol Enstitüsü
ASME	:	Amerika Makine Mühendisleri Birliği
ANSI	:	Amerika Ulusal Standartlar Enstitüsü
ASTM	:	Amerika Test Malzemeleri Birliği
SMYS	:	Belirtilen Minimum Akma Dayanımı Gerilmesi
D*	:	Değişim Göstermeyen Varyasyon Katsayısı Değerleri
USGS	:	Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmaları Kurumu
Caltech	:	Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü

## ÖNSÖZ

Bu çalışma Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

“Boru Hatlarında Güvenilirlik Analizi” başlıklı bu çalışmayı bana önererek, katkı, emek ve vaktini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Abdullah Cem KOÇ ve değerli hocam Prof. Dr. Selçuk TOPRAK'a sonsuz teşekkür ederim. Yüksek lisans süresi boyunca yanlarında çalışmaktan onur duyduğum, insani ve ahlâki değerleri ile de örnek edindiğim hocalarıma minnettarlığımı belirtmek isterim. Her daim tecrübe ve bilgilerini bana aktarırlarken göstermiş oldukları hoşgörü ve sabırdan dolayı kendilerine şükranlarımı sunarım.

Beni her zaman daha iyiye teşvik edip, cesaretlendiren Prof. Dr. Fevziye ÇELEBİ TOPRAK'a ayrıca teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca ihtiyacım olduğu her an bana yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Engin NACAROĞLU, Araş. Gör. Gökhan İMANÇLI, Öğr. Gör. Ertuğrul KARAKAPLAN ve çalışmaların bir bölümünde aynı odayı paylaşmaktan mutluluk duyduğum Dr. Öğr. Üyesi Yasemin MANAV'a teşekkür ederim.

Hayatımın her anında desteklerini esirgemeyen, bu günlere gelmem için her türlü fedakârlığı gösterip "Sen yeterki kendini geliştir, ülkene ve insanlığa faydalı ol" diyen babam, annem ve kıymetli kardeşime herşey için sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez çalışması 114M258 nolu proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Destek ve katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim. Çalışma, yüksek lisans eğitimim sırasında Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinasyon Birimi tarafından PAUBAP 113O232 nolu proje ile de desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Ağustos 2019

Ömer Yaşar ÇIRMIKTILI



**AILEME...**



# 1. GİRİŞ

Eski çağlardan buyana insanların zemin üstüne veya zemin yüzeyinin altına döşedikleri borular vasıtasıyla ihtiyaçlarını giderdikleri bilinmektedir. Bu boruların kimi zaman temiz ve atık su taşıması için, kimi zaman ise daha farklı amaçlar için kullanıldığı görülmüştür. Örneğin, Mısırlılar inşa ettikleri yapılardan suyu drene etmek amacıyla kilden yapmış oldukları boruları kullanmışlardır. Romalılar ise 1000 yıldan daha uzun bir süre önce Roma'nın su ihtiyacını karşılamak için su kemerleri ve içerisine döşedikleri boruları kullanmışlardır. Borular, ulaşılması zor olan bölgelere su iletiminin kolaylaştırılmasına, taşıdığı suyun tat, koku ve renk gibi özelliklerinin korunmasına olanak sağladığından dolayı, bölgenin ihtiyacını karşılaması amacıyla tercih edilmişlerdir. Bu anlatılanların yanı sıra atık suyun insan sağlığına zarar vermeden bölgeden uzaklaştırılma işlemi de borular sayesinde sağlanmaktadır.

İlk zamanlarda bu iletim sistemlerinin çok ilkel bir şekilde uygulanmasına ve kullanım alanlarının kısıtlı olmasına rağmen ilerleyen zamanlarda teknolojinin gelişmesi ile birlikte boruların kullanım alanları da bir hayli genişlemiştir. Genişleyen alan sayesinde borular, su iletim sistemlerinin yanı sıra doğalgaz ve petrol taşıma sistemleri, drenaj kanalları, menfezler, deniz deşarj sistemleri, telefon, internet ve elektrik hatları, atık su arıtma kanalları ve ısı dağıtım sistemleri gibi farklı kullanım alanlarında da kullanılmaya başlanmıştır. Bu kadar fazla uygulama alanı olan ve kritik öneme sahip gömülü boru sistemlerinin herhangi bir unsur etkisi ile kullanım dışı kalıp sistemi aksatması veya zarar görüp sızıntı yapması günlük yaşantımızı olumsuz yönde etkileyecektir. Sistemlerin insan faktöründen kaynaklanan hatalardan dolayı aksamaması için tasarım aşamasının başından montaj aşamasının sonuna kadar her adım özenle takip edilmeli, oluşabilecek aksaklıkların önüne geçebilmek için titizlikle çalışılmalıdır.

## 1.1 Tezin Amacı

Medeniyetin gelişmesinde büyük önemi olan boru hatları doğal afetlerden ve özellikle depremlerden etkilenmektedir. Depremlerin üst yapıya verdiği hasarlar genellikle daha çok göz önündedir ancak geçmişten günümüze kadar meydana gelmiş büyük depremlerin altyapı sistemlerine verdiği zararlar küçümsenemeyecek seviyelerdedir. Örneğin, Kocaeli ( $M_w=7.5$ ) ve Düzce ( $M_w=7.2$ ) depremlerinden dolayı Adapazarı, Gölcük, Sapanca ve Düzce gibi yerleşim bölgelerinde içme suyu şebekesinin neredeyse tamamına yakını çalışamaz hale gelmiştir (Toprak 2007). Bu hasarlar sonucu şehirlerde önemli maddi kayıplar olduğu gözlenmiştir. Son yıllarda ülkemizde yapılan akademik çalışmalarda altyapılara da ilgi gösterilmesine rağmen yapılan çalışmalar halen yeterli seviyeye ulaşmamıştır.

Bu tezin temel amacı sismik etkiler altında yer hareketlerine maruz kalan gömülü boru hatlarının güvenilirlik analizlerinin gerçekleştirilmesi ve bu kapsamda analizlerde etkili olan parametrelerin belirlenmesidir. Analizlerin sonucunda risk hesaplarını etkileyen parametrelerin incelemesinin yapılması amaçlanmıştır.

Bu çalışma sayesinde olabilecek muhtemel depremlere hazırlık, bu depremler esnasında meydana gelebilecek hasarın önceden tahmin edilip oluşturulacak alt yapı sistemlerinin imalata geçilmeden önce sanal ortamda risk faktörlerinin hesaplanması ve bunların yanı sıra dikkat edilmesi gereken kritik parametrelerin belirlenmesine olanak sağlamak hedeflenmiştir. Analizler sonucu belirlenen kritik parametreler ile imalat aşamasında dikkat edilecek noktalar göz önünde bulundurulmalı ve ileride oluşabilecek hasarların en az seviyelere indirilmesi için hassasiyetle üzerlerinde çalışılmalıdır. En aza indirilen hasar seviyesi sayesinde muhtemel can kayıplarının önüne geçilmesi ve yaşanılacak krizde maddi zararın da en aza indirilmesi amaçlanmaktadır.

## 1.2 Tezin Kapsamı

Depremlere maruz kalma ihtimali olan bölgelerdeki gömülü boru hatları farklı biçimlerde yüklerle karşı karşıya kalmaktadırlar. Yüklemele maruz kalan borular eğer kalıcı zemin deformasyon bölgelerinde yer alıyorsa yatay ve dikey yer hareketleri

ile karşılaşılabirler. Yükleme koşulları hakkında belirsizlikler kalıcı zemin deformasyon bölgesinin yanal zemin deplasman ve uzunluk deplasman büyüklüklerini içerir. Sismik yer hareketleri etkisiyle oluşan kalıcı yatay yer deformasyonlarının gömülü boru hatları üzerine etkisi tezin konusunu oluşturmaktadır. Sismik hareketler altında boru hatlarının güvenilirliğini etkileyen parametreler ve oluşması muhtemel bir depremin boru hatlarına vereceği hasarları en aza indirmek, depremin taşıma sistemlerinde oluşturabileceği hasarları önceden tahmin edip yapım aşamasında gerekli önlemleri almak geçmişte yapılan hataların önüne geçmemizi sağlayacaktır.

Zemin hareketlerinin gömülü borular üzerindeki etkilerini belirlemek için aşağıda belirtilen bazı hususlar dikkate alınmalıdır:

- Zemin hareketinin gerçekleştiği alanın büyüklüğü,
- Zemin hareketinin altyapı sisteminin konumuna göre yönü
- Zeminde bulunan boru hatlarının süneklik özelliği ve mukavemeti
- Zeminde bulunan boru hatlarının zemin hareketi ile etkileşimi
- Boruların etrafında bulunan zeminin süneklik özelliği ve mukavemeti
- Boruların bağlantı bölgelerinde bulunan sistem elemanlarının süneklik özelliği ve mukavemeti

Hattın ve içerisinde bulunduğu zeminin analizi için yukarıda belirtilen maddeler ayrı ayrı değil bir bütün olarak dikkate alınmalı ve düşünölmeli, maddelerin birinde olabilecek aksaklığın bütün sistemi aksatacağı ve olumsuz yönde etkileyeceği unutulmamalıdır.

Bu çalışmada güvenilirlik analizleri kullanılacaktır. Borunun yerleştirildiği andan servis hayatını tamamlayacağı ana kadar geçen sürede gerek yükler gerekse kapasite açısından değişkenliklerin (belirsizliklerin) varlığı boru hattının sağlamlığı ve güvenilirliği değerlendirmelerinde olasılıksal ve istatistiksel yöntemlere başvurmayı gerekli kılmaktadır. Klasik tasarım ve değerlendirme yaklaşımlarında bahsi geçen belirsizlikler güvenlik ve yük katsayılarının kullanımını gerektirmektedir (ASCE 1984). Ancak gerek talep gerekse kapasite açısından var olan belirsizlikler ve bunların boru sistemlerinin güvenliği üzerine olan etkileri tutarlı bir şekilde yalnızca olasılık yöntemleri ile çözümlenebilir. Bu nedenle gömülü boru sistemlerinin tasarım ve değerlendirme ilkeleri de olasılık yöntemleri çerçevesinde geliştirilmelidir. Bu konuda

Türkiye’de çok az çalışma yapılmış, konu ancak son yıllarda önem kazanmaya başlamıştır. 2013 yılında tamamlanan “Deprem Etkilerine Maruz Gömülü Sürekli Boru Hatlarının Emniyetlerinin Güvenilirlik Esaslı Değerlendirilmesi” başlıklı tez bu açıdan bir örnek olarak verilebilir (Yavuz 2013). Bununla birlikte tez çalışması yalnızca sürekli gaz boru hatlarını kapsamış, eklemli boruları değerlendirmemiş ve boruyu tek bir hat olarak ele almıştır.

Depremlerde altyapıda oluşan hasarların sismik, zemin ve boru parametrelerinden ne derece etkilendiğini belirleyebilmek, hem mevcut durumdaki altyapının deprem karşısındaki davranışını anlamaya hem de gelecekteki olası depremlere göre altyapıyı tasarlamak açısından önemlidir. Bu boruların güvenilirlik analiz sonuçları Ortalama Değer Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi ve Monte Carlo Simülasyonu ile hesaplanabilmektedir (Abramson ve diğ. 2002). Bu tezde kullanılacak 1994 Northridge depreminin dolaylı hasar gören boruların veri tabanı O’Rourke ve Toprak (1997), Toprak (1998), O’Rourke ve diğ. (1998) yayınlarında literatüre girmiştir.

### **1.3 Materyal ve Yöntem**

Tez kapsamında 1994 yılında Amerika Birleşik Devletlerinin Los Angeles şehri yakınlarında meydana gelen Northridge depreminin yol açtığı boru hasarları gözönüne alınmıştır. Depremin neden olduğu hasarlar nedeniyle zarar gören alt yapı sistemleri, olası muhtemel başka depremlerde hasar görmemeleri ve güvenli durumda kalabilmeleri için risk hesapları yapılmıştır. Hesaplamalar için gerekli olan parametreler (boru gömü derinliği, boru kalınlığı, zeminlerin birim hacim ağırlığı vb.) Excel programına girilerek, maksimum gerilmeyi bulmada kullanılan formüller ile Ortalama Değer Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi, Geliştirilmiş Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi ve Monte Carlo Simülasyonu vasıtasıyla hatlara uygulanmıştır. Yöntemlerde uygulanan ve maksimum gerilmenin bulunmasını sağlayan formüldeki parametrelerin borulardaki gerçek değerleri kullanılmaktadır (Toprak 1998). Monte Carlo Simülasyonunda ise belli sayıda simülasyon yapılarak her bir parametre için standart sapma ve ortalamaya göre hesap yapılmakta ve buna göre gerilmeler bulunup ortalamaları alınmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre boru

hatlarının güvenilirliği kontrol edilmiş olup, güvenilirliği sağlama konusunda etkili parametreler elde edilmiştir.

#### **1.4 Tezin Organizasyonu**

Tez çalışmasının;

1. Bölümünde teze ait genel bilgiler, tezin amacı ve çalışma sonucunda varılmak istenilen nokta, tezin kapsamı, kullanılan materyal ve yöntemler verilmiştir.

2. Bölümünde güvenilirlik analizi yöntemlerinin sınıflandırılması yapılarak bu tez kapsamında da gözönüne alınan performans fonksiyonu kullanarak risk hesabı yapan yöntemler hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

3. Bölümde depremler sonucu oluşan geçici ve kalıcı yer deformasyonları açıklanmış, kalıcı yer deformasyonlarının boru hatlarına etkileri ile oluşturduğu hasarlar incelenmiştir.

4. Bölümünde boruların risk analizleri ve etkili faktörler anlatılmış, boru hattına paralel yönde etki eden kalıcı yer deformasyonları verilmiştir. Northridge depreminin (17 Ocak 1994) etkilediği boru hatları, bu hatları incelemede kullanılan yöntemler hakkında bilgi verilmiştir.

5. Bölümünde boruların risk analizlerinde etkili faktörler ele alınmış ve çalışma alanındaki boru hatlarına uygulamaları incelenmiştir.

6. Bölümünde analizlerde kullanılan yöntemler sayesinde boruların risk analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuş, ileriki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

## 2. GÜVENİLİRLİK ANALİZLERİ

En kısa tanımıyla, bir mühendislik sisteminde istenilen performansı karşılama olasılığına güvenilirlik denir (Bayazit 2007). Belirsizliklerin etkisiyle ortaya çıkabilecek başarısızlık durumlarından dolayı ise risk faktörü meydana gelir. Risk ( $P_f$ ) ile güvenilirlik ( $P_s$ ) birbirini tamamlayan durumların olasılıkları olduğundan Eşitlik (2.1) ile ifade edilir.

$$P_f = 1 - P_s \quad (2.1)$$

Güvenirlik, sistemlerdeki arz ve talebe bağlı olarak değişir. Arz için verilebilecek genel örnekler yapıların direnci, temel zemininin güvenle taşıyabileceği yük, etki eden yükler altında temellerde izin verilebilecek oturma miktarı, boruların deprem etkisiyle hasar görmeden yapabileceği şekil değiştirme miktarıdır. Talep için ise hareketli veya ölü yükler, deprem yüklemesi, boru hatlarında oluşan şekil değiştirmelerdir. Geleneksel tasarımda minimum arzın maksimum talepten büyük olmasına çalışılır. Bir sistemin arz değişkeni  $X$ , talep değişkeni  $Y$  ile gösterilirse ve belirsizlikler nedeniyle gerek  $X$ , gerekse  $Y$ 'nin rastgele değişkenler olduğu düşünülürse sistemin güvenilirliği ve riski sırası ile (2.2) ve (2.3) Eşitlikleriyle tanımlanır.

$$P_s = Z(X > Y) \quad (2.2)$$

$$P_f = Z(X < Y) = 1 - P_s \quad (2.3)$$

### 2.1 Güvenilirlik Analizi Yöntemlerinin Sınıflandırılması

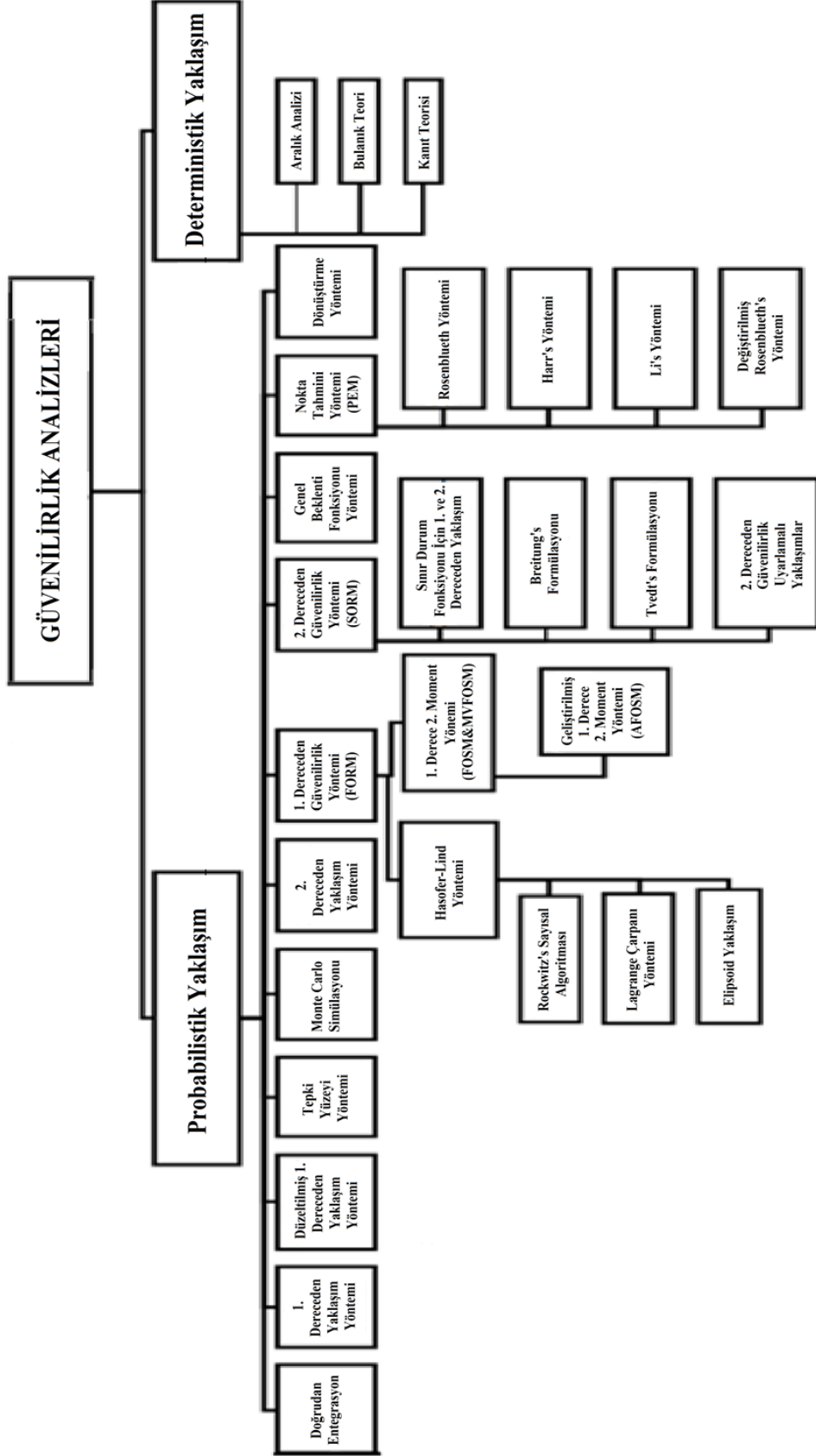
Sağlamlık ve güvenilirlik, sistemler ve bileşenlerin en önemli özelliklerindedir. Sağlamlık; sistemin yapısının ve işlevselliğinin dış müdahalelere karşı (çekmeye, basınca, perturbasyona vb.) direnci olarak tanımlanır. Güvenilirlik ise; bir sistemde istenilen performansın karşılanma olasılığı olarak tanımlanır. Daha makul olarak ise bir sistemin güvenilirliği, söz konusu sistemin belirli bir zaman aralığında başarılı olarak çalışma olasılığıdır. Teorik olarak güvenilirlik, başarı olasılığı

(güvenilirlik=1-başarısızlık olasılığı), başarısızlık frekansı olarak tanımlanır. Matematiksel olarak ise, mevcut akışın talebe oranı olarak tarif edilir. Güvenilirlik sistemlerin maliyete olan etkinliğinde önemli bir rol oynar (Ostfeld ve diğ. 2002; Smith ve Simpson 2004; Huang ve diğ. 2005; Todinov 2006; Zio 2007).

Yapıların eleman ve sistem bazında güvenilirliğini kontrol etmek için günümüzde belirsizlik analizleri adı altında uygulanan güvenilirlik analizleri bulunmaktadır. Bu analizler kullanılarak yapılarda risk değerlendirmeleri yapılır. Risk değerlendirmeleri sonucunda yapının incelenen kısmının (bu kısım komple yapının kendisi veya özel bir bölümü olabilir) güvenilirliği veya göçme riski hesaplanır. Bahsedilen risk hesaplarının yapılmasına olanak sağlayan belirsizlik analizleri probabilistik ve deterministik yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Probabilistik ve deterministik yöntemlerin tablo halinde sınıflandırılması Şekil 2.1'de gösterildiği gibidir.

Belirli bir düzene sahip olmayan, davranışları daha önceden tamamen belirlenemeyen sistemler probabilistik sistemler olarak adlandırılır. Probabilistik sistemlerde bilinmeyen unsurların bilinen bir sıklık dağılımına uygun hareket edeceği kabul edilir ve rastgele değerler matematiksel yöntemlerle değerlendirmeye alınır. Probabilistik yöntemlere; Doğrudan Entegrasyon, Birinci Dereceden Yaklaşım Yöntemi, Düzeltilmiş Birinci Dereceden Yaklaşım Yöntemi, Tepki Yüzeyi Yöntemi, Monte Carlo Simülasyonu, İkinci Dereceden Yaklaşım Yöntemi, Birinci Dereceden Güvenilirlik Yöntemi (FORM), İkinci Dereceden Güvenilirlik Yöntemi (SORM), Nokta Tahmini Yöntemi örnek olarak gösterilebilir.

Probabilistik olmayan sistemlere ise deterministik sistemler adı verilir. Deterministik sistemlerin gerçekleşmesi muhtemel senaryoların belirlenmesinde hiçbir yönden rastgele bir davranış sergilenmez. Tam anlamıyla başarılı modellenmiş bir deterministik sistem aynı şartlar ve aynı başlangıç durumları için her zaman aynı sonucu verir. Deterministik sistemlere örnek olarak; Aralık Analizi, Bulanık Teori ve Kanıt Teorisi gösterilebilir.



Şekil 2.1: Güvenilirlik analizi yöntemleri



Güvenilirlik analizi yöntemlerinin herbirinin uygulama ve sonuç bakımından diğer yöntemlere göre avantaj ve dezavantajları vardır. Dolayısıyla analizi yapılacak problemin öncelikle hangi yönteme uygun olduğunun belirlenmesi gerekmektedir. İlerleyen çalışmalarda yöntemlerin kendi içlerinde iyileştirmeler yapılarak dezavantajları minimuma indirilmiştir. Buna rağmen her bir yöntemin hesaplama şekli, hesaplama hızı, hassasiyet seviyesi ve kullanılan parametrelerin etkileri diğer yöntemlere göre farklılık gösterir.

## 2.2 Performans Fonksiyonu

Güvenilirlik analizi yöntemlerindeki sınır durum terimi aynı zamanda performans fonksiyonu olarak adlandırılır. Bir sistemin güvenilirliği iki rastgele değişkene bağlıdır. Bu değişkenler arz (X) ve talep (Y)'dir. Performans fonksiyonu (davranış fonksiyonu) ya da durum fonksiyonu teriminin çok sayıda değişkene bağlı olduğu ve Z ile temsil edildiği düşünülürse Eşitlik (2.4)'te olduğu şekilde ifade edilir.

$$Z = g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_m) \quad (2.4)$$

Burada, X, sistemin temel ya da tasarım değişkenlerinin vektörel bileşkesini; Z, sistemin performansını tanımlayan fonksiyonu ifade etmektedir. Performans fonksiyonu X ve Y'ye bağlı olarak Log-normal dağılım için Eşitlik (2.5)'te ve Normal dağılım için Eşitlik (2.6)'da ifade edilmiştir.

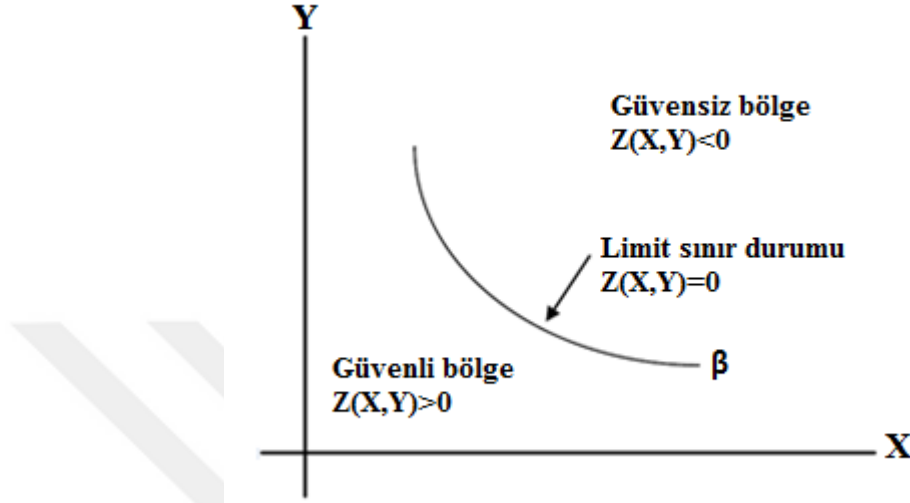
$$Z = g(X_i) = \ln(X) - \ln(Y) = \ln\left(\frac{X}{Y}\right) \quad (2.5)$$

$$Z = g(X_i) = X - Y \quad (2.6)$$

Burada; g, sınır durum fonksiyonu; X, arz ve Y, talebi ifade eder.

Eşitlik (2.5) ve (2.6)'da performans fonksiyonu  $Z > 0$  ise güvenli durum,  $Z < 0$  ise güvensiz durum (göçme durumu) olarak tanımlanır.  $Z = 0$  ise limit durumu ifade eder. Başarısızlık yüzeyi veya limit durum  $g = 0$  olarak tanımlanabilir. Dolayısıyla anılan yüzey güvenli bölgeyi güvensiz bölgeden ayırır. Bu tasarım parametresi olarak kararlı

ve kararsız durumlar arasındaki sınır olmanın ve bir yapı tasarlamının ötesinde işlevini, performansını temsil eder. X (arz, dayanma gücü, direnç) ve Y (talep, yük) iki temel değişkenleri için başarısızlık yüzeyi, güvenli ve güvensiz bölgeler Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Limit durumu gösteren başarısızlık yüzeyi, güvenli ve güvensiz bölgeler

Güvenilirlik analizlerinde amaç, limit durumun aşılmış aşılmadığının sistem veya eleman bazında belirlenmesidir. Limit durum aşıldığı anda uygulama alanı güvensiz bölgeye geçer ve risk faktörü artış gösterir. Limit durumun altında olduğu durumlarda ise sistemin güvenilirliği sağlanmıştır. Sağlanan güvenilirlik minimum 0 ve maksimum 1 arasında değişen değerler alır. Bir mühendislik uygulamasında, yapım aşamasına geçilmeden önce henüz proje aşamasında iken güvenilirlik analizleri ile sistemin test edilmesi ve incelenmesi ciddi maddi kayıpları ve doğabilecek kazaları engeller. Bunun yanı sıra sistemi hangi parametrelerin ne ölçüde olumlu veya olumsuz etkilediğinin anlaşılmasını sağlar.

Çeşitli metotlar kullanarak hesap yapan güvenilirlik analizi yöntemleri güvenilirlik faktörü değerini sağlar. Yöntemlerden bir kısmı başarısızlık olasılığını (probability of failure) elde etmek için performans fonksiyonu kullanarak işlem yapar. Performans fonksiyonu kullanarak güvenilirlik analizi yapan yöntemler Nokta Tahmini Yöntemi (PEM), Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi, Hasofer–Lind Yöntemi (HLM) ve Monte Carlo Simülasyonu Yöntemidir.

## 2.3 Çalışmada Kullanılan Güvenilirlik Analizi Yöntemleri

Bu tez kapsamında kullanılan Güvenilirlik Analizi yöntemleri probabilistik yaklaşım ve performans fonksiyonu kullanılan Ortalama Değer Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi (MVFOSM), Geliştirilmiş Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi (AFOSM) ve Monte Carlo Simülasyonu Yöntemidir (MCSM). Aşağıda tez kapsamında kullanılan Güvenilirlik Analizi yöntemleri detaylı olarak açıklanmıştır.

### 2.3.1 Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi

Birinci Mertebe İkinci Moment yöntemi hesap adımlarındaki farklılıklardan dolayı “Ortalama Değer Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi” ve “Geliştirilmiş Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi” olmak üzere iki bölüme ayrılır.

#### 2.3.1.1 Ortalama Değer Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi

Performans fonksiyonunun beklenen değerini ve varyansını tahmin etmek için, performans fonksiyonunun Taylor serisine açılımı ile işleme başlanır. İkinci Moment Yöntemi denilmesinin sebebi varyansın ikinci istatistik moment ile hesaplanmasıdır. Sistemdeki belirsiz değişkenlerin sayısı  $M$  ise, sistemi temsil eden denklemin  $M$  adet kısmi türevi veya  $2M+1$  noktada sayısal tahmini kullanılarak performans fonksiyonu hesaplanır.

Yöntemi uygulamak için fonksiyonumuz olan  $Z$  fonksiyonu  $\bar{X}_i$  ortalama noktası yakınında 1. mertebe Taylor serisine açılırsa:

$$Z = g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_m) \cong g(\bar{X}_i) + \sum_{i=1}^m \bar{C}_i (X_i - \bar{X}_i) \quad (2.7)$$

burada  $\bar{C}_i = \partial g / \partial X_i |_{\bar{X}_i}$   $Z$ 'nin beklenen değeri ve varyansı:

$$E(Z) = g(\bar{X}_i), \quad \text{Var}(Z) = \sum_{i=1}^m \bar{C}_i^2 \text{Var}(X_i) \quad (2.8)$$

$X_i$  değişkenlerinin bağımsız olduğu kabul edilmektedir.

Sistemin varyansını bulmak için ise; parametrelerin kendi içerisinde ortalama değeri, varyasyon katsayısı ve kısmi türevleri alınmış halleri çarpılıp karesi alınması gerekir. Bu işlem sistemde bulunan her bir parametreye uygulanır ve son olarak genel toplam bulunur.

$$\text{Var}(Z) = \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial g}{\partial x_i} \bar{X}_i \text{c. o. v.}_{X_i} \right)^2 \quad (2.9)$$

Burada  $\text{Var}(Z)$ , sistemin varyansıdır. Varyansın karekoku alınarak sistemin standart sapması bulunur:

$$\text{std}(Z) = \sqrt{\text{Var}(Z)} \quad (2.10)$$

Varyansı bulurken uyguladığımız eşitliğin içerisinde yer alan c.o.v. değeri ise varyasyon katsayısı olarak adlandırılır ve standart sapmanın ortalamaya oranı ile hesaplanır:

$$\text{c. o. v.} = \frac{\text{std}(Z)}{\bar{X}_i} \quad (2.11)$$

Orijinin  $Z=0$  kritik yüzeyine (okme yüzeyi) uzaklığı Eşitlik (2.12) ile hesaplanır.

$$d = \frac{E(Z)}{\text{std}(Z)} \quad (2.12)$$

Böylece  $d$  performans fonksiyonunun ( $Z$ )  $\bar{X}_i$  ortalama noktasındaki değerine ve bu noktadaki türevlerine bağlı olarak hesaplanmaktadır (Bayazıt 2007).

Taylor açılımının yukarıda anlatıldığı üzere  $\bar{X}_i$  ortalama noktasında yapılması işlemine Ortalama Değer Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi (MVFOSM) denir.

### 2.3.1.2 Geliştirilmiş Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi

Geliştirilmiş Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi daha doğru ve net sonuçlar bulunması amacıyla Ortalama Değer Birinci Mertebe İkinci Moment Yönteminin hassasiyetinin geliştirilmesi, iyileştirilmesi ile ortaya çıkmış bir risk hesaplama yöntemidir. MVFOSM'ye göre daha doğru sonuçlar vermesinin sebebi; çökme yüzeyinin üzerinde bulunan orijine en yakın uzaklığın göz önüne alınıp, hesaplamaların bu uzaklığa göre yapılmasından kaynaklanmaktadır. En olası çökme noktası olarak adlandırılan bu uzaklık  $X_i^*$  ile gösterilir.

Z fonksiyonunun  $X_i^*$  'ye göre Taylor açılımı yapılır ise:

$$Z = g(X_i^*) + \sum_{i=1}^m C_i^* (X_i - X_i^*) \quad (2.13)$$

burada bulunan  $C_i^* = \frac{\partial g}{\partial X_i}$  noktasında  $g(X_i^*) = 0$  olduğundan dolayı:

$$E(Z) = \sum_{i=1}^m C_i^* (\bar{X}_i - X_i^*) \quad (2.14)$$

$$\text{Var}(Z) = C_i^{*2} \text{Var}(X_i) \quad (2.15)$$

bu noktada

$$\text{std}(Z) = [\text{Var}(Z)]^{1/2} = \sum_{i=1}^m a_i C_i^* \text{std}_i \quad (2.16)$$

eşitliği elde edilir.

Eşitlik (2.16) içerisinde yer alan  $a_i$ 'yi bulmak için kısmi türevi alınan parametre ile o parametrenin standart sapması çarpılıp kesrin pay kısmına yazılır. Bu işlemin ardından sistemde yer alan diğer bütün parametrelerin kısmi türevleri ve parametreleri kendi içlerinde çarpılıp, hepsinin ayrı ayrı kareleri alınır. Son olarak paydada bulunan sonucun karekökü alınır. Payın paydaya olan oranı ise bize  $a_i$  değerini verir (Eşitlik 2.17).

$$a_i = \frac{C_i^* \text{std}_i}{\left[ \sum_{j=1}^m (C_j^* \text{std}_j)^2 \right]^{1/2}} \quad (2.17)$$

Orijinin  $Z=0$  kritik yüzeyine (çökme yüzeyine) uzaklığı:

$$d = \frac{E(Z)}{\text{std}Z} = \frac{\sum_{i=1}^m C_i^* (\bar{X}_i - X_i^*)}{\sum_{i=1}^m a_i C_i^* \text{std}_i} \quad (2.18)$$

bulunur ve

$$\sum_{i=1}^m C_i^* (\bar{X}_i - X_i^* - a_i d \text{std}_i) \quad (2.19)$$

şeklinde düzenlenir.

Eşitlik içerisinde yer alan  $X_i$  değişkenleri bağımsız olduğundan dolayı:

$$X_i^* = \bar{X}_i - a_i d \text{std}_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2.20)$$

sonucuna ulaşılır.

Eşitlik (2.20)'de bulunan her bir parametre için  $X_i^*$  'ler bulunurken ortalamadan ( $\bar{X}_i$ )  $a_i$ ,  $d$  ve standart sapmanın çarpımı çıkarılır. Burada bilinmeyen  $X_i^*$  (1,2,3, ..., m) ve  $d$  nokta değeri  $g(X_i^*) = 0$  ve  $X_i^* = \bar{X}_i - a_i d \text{std}_i$  eşitliklerinin bir arada çözülmesi ile elde edilir. Bu çözüm elde edilirken bilinmeyen en olası çökme noktasındaki ( $X_i^*$ )  $C_i^*$  değerleri gereklidir. Bundan dolayı eşitlik çözümünde sonucun sıfır olarak elde edilmesini sağlayan en yakın değer bulunur. Elde edilen sonuçlar ile sistem tekrardan düzenlenir ve sonuca varılır (Bayazıt 2007).

Taylor açılımının yukarıda anlatıldığı üzere en olası çökme noktası ( $X_i^*$ ) yapılması işlemine ise Geliştirilmiş Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi (AFOSM) denir.

### 2.3.2 Monte Carlo Simülasyonu Yöntemi

Monte Carlo Simülasyonu yöntemi mühendislik uygulamalarında karar verme aşamasında kullanılan yaygın bir analiz yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Monte Carlo Simülasyonu II. Dünya savaşı sırasında Atom bombasının geliştirilmesi aşamasında Polonya asıllı matematikçi Stanislaw Ulam ve Macar asıllı matematikçi John VonNeuman tarafından önerilmiş bir yöntemdir (Toprak 2018).

Yöntem birçok karmaşık olasılıksal problemin değerlendirilmesinde kolaylıklar getirdiği için tercih edilmektedir. Monte Carlo Simülasyonunun temelini, belirlenmiş olan bir limit denge fonksiyonunun yapay olarak üretilmiş birçok sayıda rastsal değişken ile tekrarlı çözümlenmesi oluşturmaktadır (Thomopoulos 2013). Yöntemin uygulanabilmesi için öncelikle performans fonksiyonu (Z) veya bir başka ifadeyle limit denge fonksiyonunun tanımlanması gerekmektedir. Performans fonksiyonu genel olarak sistemin stabilitesini sağlayan direnç kuvvetleri ile stabilizeyi bozan yüklerin farkı olarak ifade edilebilir. Üretilen yapay değişkenlerin hangi dağılım fonksiyonuna uyduğu, ortalama değeri ve standart sapması önemlidir (Choi ve diğ. 2007). Bu yöntemde değişkenlerin uydukları dağılım fonksiyonlarının analizlerde dikkate alınabilmesi doğru karar vermede büyük bir önem taşımaktadır. Limit denge fonksiyonuna etkileyen değişkenler üretilirken analize giren parametrelerin birbirleri ile bağımlı veya bağımsız olmasına dikkat edilmelidir (Rubinstein 1981; Abramson ve diğ. 2002; Baecher ve Christian 2003). Eğer bağımlı veya bağımsız parametreler tespit edilmezse simülasyon sonucunda elde edilecek sonuç sağlıklı olmayacaktır. Yapılan tekrarlı analiz sonuçlarına göre  $P_f$  (göçme, yenilme olasılığı) ve buna bağlı olarak  $\beta$  (güvenilirlik indeksi) doğrudan hesaplanabilir.

Monte Carlo Simülasyonunda göçme olasılığı:

$$Z = g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_m) = 0 \quad (2.21)$$

$$P_f = \int_{G(x \leq 0)} f_x(X) dX \quad (2.22)$$

burada  $f_x(X)$  bileşik olasılığı ve  $G(X)$  doğrusal olmayan düzensiz alanı göstermektedir. Başarısızlık olasılığının ( $P_f$ ) ortalama değerini bulmak için:

$$\bar{P}_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(X_i) \quad (2.23)$$

burada bulunan  $I(X_i)$  için:

$$I(X_i) = \begin{cases} G(X_i) \leq 0 & \text{ise} & 1 \\ G(X_i) > 0 & \text{ise} & 0 \end{cases} \quad (2.24)$$

şeklinde sonuçlar elde edilir.

Eğer sonuç  $G(X_i) \leq 0$  ise sonuç başarılı olarak kabul edilir. Aksi durum oluşup  $G(X_i) > 0$  sonucu alınır ise sonuç başarısız olarak adlandırılır. Başarılı ve başarısız olarak değerlendirilmeye alınan çıkan sonuçlar ortalama göçme olasılığını hesaplamada kullanılır.

Ortalama göçme olasılığı;

$$\bar{P}_f = \frac{N_f}{N} \quad (2.25)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $N_f$  simülasyonda meydana gelen göçme sayısını,  $N$  ise toplam simülasyon sayısını temsil eder.

Monte Carlo Simülasyonu yönteminde metodun içerisinde yer alan istatistiksel hataları azaltıp hesabın etkinliğini arttırmak ve minimum gerekli analiz sayısını hesaplamak amacıyla sistem içerisinde tutarsızlık azaltma yöntemleri olarak adlandırılan yaklaşımlar geliştirilmiştir (Fenton ve Griffiths 2008). Bu yaklaşımlardan Önem Örneklemesi en çok kullanılanlardandır.

Önem Örneklemesi, simülasyonun hesap-sonuç kalitesini arttırmak için en verimli olduğu kabul edilen verilerin kullanılıp, gereksiz tekrar yapıp analiz sayısını çoğaltan ve işlemlerde gerekli adımı ve süreyi uzatan verilerin elenmesi için geliştirilen bir azaltma tekniğidir.  $J$  ile temsil edilen ikinci bir rasgele vektör ve  $G(J)$  ile tanımlı olasılık-yoğunluk fonksiyonu kullanılarak Eşitlik (2.22) tekrar düzenlenirse:



$$J = g(J_1, J_2, J_3, \dots, J_m) \quad (2.26)$$

$$P_f = \int_{G(x \leq 0)} \frac{f_x(X)}{g_J(X)} g_J(X) dx \quad (2.27)$$

burada  $g_J(X)$  önem örnekleme fonksiyonunun etkisini temsil eder.

$$\bar{P}_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(X_i) \frac{f_x(X_i)}{g_J(X_i)} \quad (2.28)$$

burada  $X_i$ ,  $g_J(X_i)$  ifadesine göre yazılır. Eşitlik (2.28) için Monte Carlo Simülasyonu Eşitlik (2.29) şeklinde ifade edilir.

$$\bar{P}_f = \sum_{i=1}^N \frac{N_f}{N} \quad (2.29)$$

burada bulunan  $N_f$  için:

$$N_f = \begin{cases} G \leq 0 & \text{ise} & \frac{f_x(X_i)}{g_x(X_i)} \\ G > 0 & \text{ise} & 0 \end{cases} \quad (2.30)$$

sonuçları dikkate alınır.

Önem örnekleme işleminin başarılı bir şekilde seçilmesi ve sonuçlandırılması gereksiz işlemlerin varlığına engel olacak ve buna bağlı olarak daha az adımda sonuca ulaşılmasını sağlayacaktır (Papadrakakis ve diğ 1995).

Farklı yapılar ve sistemler için öngörölmüş limit güvenilirlik indeksleri veya yenilme olasılıkları, yönetmeliklerde ve literatürde verilmiştir (U.S ArmyCorps of Engineers 1997; ISO 2394 2015). Analizlere, sonuçlar belirli bir yakınsamaya ulaşınca kadar devam edilmelidir. Çoğu zaman tekrarlanması gereken analiz sayıları on binleri ve yüzbinleri bulduğu için yüksek kapasiteli bilgisayarlara ihtiyaç olabilmektedir.

### **3. DEPREMLER VE BORU HASARLARI**

Dünyadaki en önemli doğa olaylarından biri olan depremlerin büyük bir çoğunluğu yeraltındaki tektonik hareketler sonucu açığa çıkmaktadır. Sismik yönden aktif halde bulunan bölgelerde, gerilmelerin etkisiyle yer kabuğunda meydana gelen çatlamlar ve kırılmalar sonucu zaman zaman irili ufaklı sarsıntılar meydana gelir. Tektonik hareketler sonucu oluşan bu sarsıntıların yeryüzüne yansması ve hissedilmesine deprem adı verilir. Tektonik depremlerin yanı sıra oluşan depremlerin küçük bir bölümünü de oluştursa; volkanik püskürmeler sonucu oluşan volkanik depremler ve yeraltında bulunan mağaraların, tuz ve jipsli katmanların erimesi sonucu boşlukların çökmesi ile oluşan çöküntü depremleri de vardır.

Konveksiyonel akımlar sonucu dünyamızda bulunan levhalar birbirlerine yaklaşır veya uzaklaşır. Birbirinden uzaklaşan levhalar sonucunda oluşan boşluktan sıcak magma üst katmanlara doğru sızar ve katılaştır. Levhaların birbirine yaklaştığı yerlerde ise sıkışmalar sonucu levhalardan biri mantoya doğru ilerleyip erir. Yerkabuğunu oluşturan levhaların sınırlarında oluşan bu hareketler sonucunda dünyada depremlerin oldukları yerler ortaya çıkmaktadır. Bu hareketler sırasında oluşan çatlaklara ise fay hatları denir. Dünyadaki depremlerin büyük çoğunluğu bu levhaların çekme-basınç etkisi altında gerilmeye maruz kaldıkları levha sınırlarında (faylarda) oluşmaktadır.

Oluşan depremlerin etkisi ile yeryüzeyinde geçici ve kalıcı yer deformasyonları ismini alan çeşitli deformasyonlar, bozukluklar ve hasarlar oluşmaktadır. Bu deformasyonlar yerüstünde ve yeraltında bulunan yapılara etki eder. Bu tez kapsamında kalıcı yer deformasyonları etkisi altındaki boru hatlarının güvenilirlik analizleri gözönüne alınmıştır.

#### **3.1 Geçici ve Kalıcı Yer Deformasyonları**

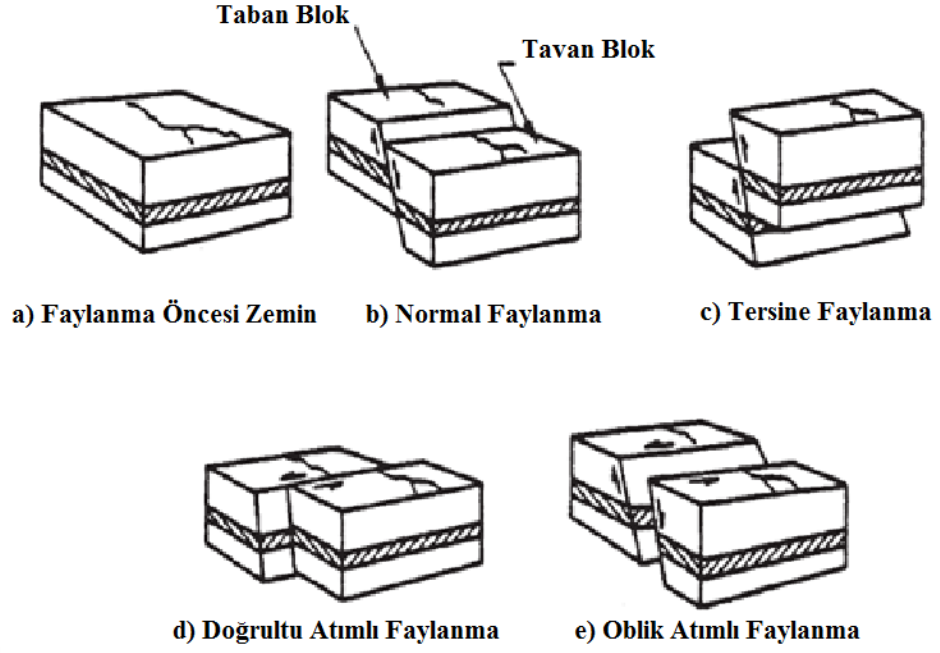
Boru hatlarının sismik yükler etkisi yönünden değerlendirilmesindeki adımlar, potansiyel depremler esnasında meydana gelecek etkilerin belirlenmesi ve bunlardan kaynaklanacak olan hasarın, mevcut sistemlerde bulunan olası hasar noktalarının tespiti ve hasar miktarının değerlendirilmesi şeklinde sınıflandırılır. Depremlerin

gömülü boru hattı taşıma sistemleri üzerine olan etkileri, geçici yer deformasyonlarıyla (GYD) ya da kalıcı yer deformasyonlarıyla (KYD) meydana gelmektedir. GYD, deprem dalgalarının geçişi veya yerin sarsılması sırasında meydana gelen, zeminin dinamik tepkisidir. KYD ise depremden sonra zeminde oluşan ve geri dönmeyen son yer değiştirmelerdir. Geçici yer deformasyonları bazı zamanlar küçük miktarlarda kalıcı deformasyonlar oluşturabilir. Fakat oluşan bu deformasyonlar genellikle yüzeyseldir. Bu sebepten dolayı ya tolere edilebilir ya da ufak çalışmalar sonucu deformasyon etkisi kolaylıkla ortadan kaldırılabilir. Kalıcı yer deformasyonlarının etkileri genellikle büyük olmakta, örneğin fay hatlarının hareketlerini, şev kaymalarını, sıvılaşma sonucu oluşan yer değiştirmeleri ve kohezyonsuz topraklarda oluşan farklı oturmaları içine almaktadır (O'Rourke 1993; Toprak ve Yoshizaki 2003; Aydan 2009).

### **3.1.1 Fay Hatları**

Gözle görülür hareketlerin meydana gelebileceği yer kabuğunu oluşturan levhaların birbiri arasındaki süreksizliğinden kaynaklanır. Bu süreksizlikler gerilme ve sıkışmalar sonucu meydana gelir ve bu hareketlerin etkisi ile yüzyıllar boyu bölgede biriken potansiyel enerji açığa çıkar.

Faylar oluşumlarına göre sınıflandırılırsa; a) normal faylar, b) tersine faylar, c) doğrultu atımlı faylar olarak gruplanır. Atımlarına göre sınıflandırılırsa; a) eğim atımlı, b) doğrultu atımlı ve c) oblik atımlı faylar olarak gruplanır. Doğru atımlı fayların aynı zamanda normal veya tersine faylanma hareketi ile birlikte görülmesine oblik atımlı faylanma denir. Temel fay hareketi türleri Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

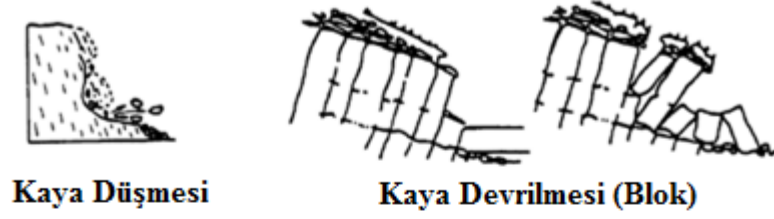


Şekil 3.1: Fay hatlarının hareket çeşitlerinin gösterilmesi (O'Rourke 1999)

Doğrultu atımlı faylarda hareketin büyük kısmı yatay yönde gerçekleşir. Bu yüzden boru hattı öncelikle çekme veya basınca bağlı hasar görür. Normal ve tersine faylanmalarda ise yer hareketi dikeydir. Normal faylanmada tavan bloğu aşağı doğru hareket ettiğinde bu hareket yatay borularda öncelikle çekmeye bağlı, tersine faylanmada tavan bloğu yukarı doğru hareket ettiğinde ise öncelikle basınca bağlı hasara sebep olur.

### 3.1.2 Şev Kaymaları

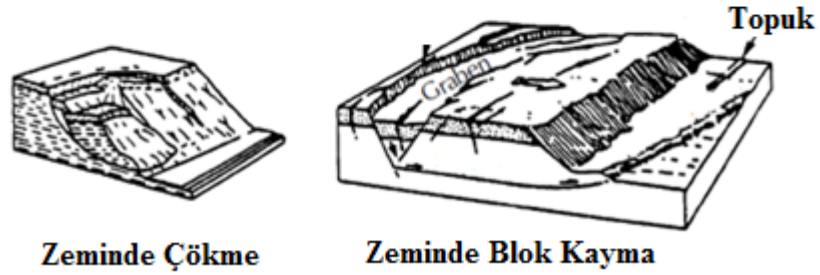
Sismik sarsıntılar sonucu tetiklenip harekete geçebilecek zeminin kütle biçiminde gerçekleştirdiği hareketlerdir. Diğer bir deyişle heyelanlar olarak adlandırılırlar. Şev kaymalarının boru hatları üzerindeki farklı etkilerine dayanarak Meyersohn 1991 yılında Şekil 3.2'de gösterildiği gibi 3 tür toprak kayması modeli oluşturdu.



a) Tip I



b) Tip II



c) Tip III

Şekil 3.2: Şev kayması ile ilgili zemin yenilmeleri (Meyersohn 1991)

Tip I'de gösterildiği gibi kaya düşmesi veya devrilmesi ancak toprak üstü boru hatlarına zarar verebilecek potansiyeldedir. Bu tip şev kaymaları gömülü boru hatları üzerinde çok az bir etkiye sahip olma potansiyeli taşır.

Tip II'de zemin kayması durumunda hareket eden bloğun içerisinde yer aldığı zemin adeta yapışkan bir sıvı gibi davranış gösterir. Bu sebepten dolayı zeminin akış hareketi yavaştır ve uzun sürede tamamlanır. Çığ durumunda ise tehlike arz eden bölge kimi zaman bir tetikleyici etkisiyle kimi zamanda üzerinde bulunan zeminin aşırı yüklenmesi (aşırı yüzey doygunluğu), yıpranması gibi etkilerden dolayı birden bire

boşalım gösterir. Bu sebeplerden dolayı boru hatları üzerinde olumsuz yönde etkili sonuçlar doğurabilecek zemin hareketi sınıfına dâhil edilir.

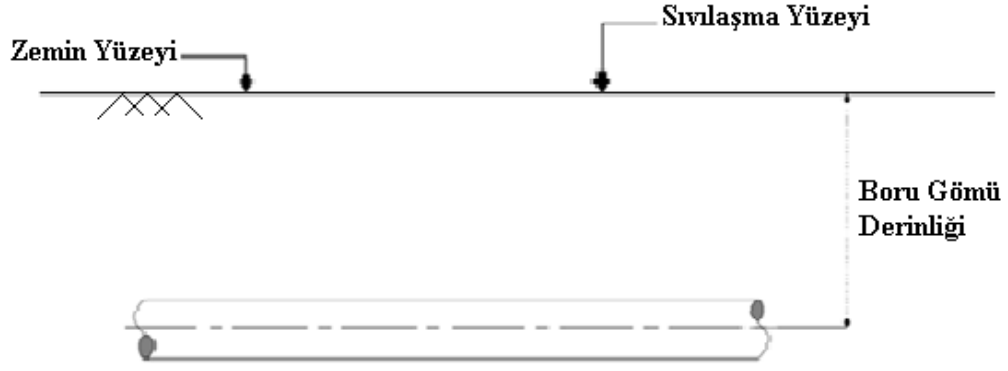
Tip III ise zeminin blok şeklinde çökme ve kayması üzerine tasarlanmıştır. Boru hatları için en tehlikelisi ve en çok hasara sebep olan şev kayma hareketi şeklindedir. Durumun yaşandığı bölgelerde eğer bir altyapı sistemi mevcut ise sistem ciddi darbeye maruz kalır. Bu tip zemin hareketleri genellikle doğal yamaçlarda, nehir kanallarında ve bentlerde görülür.

### **3.1.3 Sıvılaşma Sonucu Oluşan Yer Değişiklikleri**

Kumlu zeminlerde görülen büyük zemin deformasyonları, genellikle sismik sarsıntılar esnasında görülen sıvılaşma sonucu meydana gelmektedir. Sıvılaşma, toprağın kayma mukavemetini yitirmesine neden olduğu için sıvılaşma görülen bölgenin deformasyonuna sebebiyet verir. Sıvılaşmadan dolayı meydana gelen deformasyonların en önemlileri zemin yüzü oturmaları ve yanal zemin yer değişiklikleridir. Zemin yüzü oturmaları hacimsel sıkışmalardan kaynaklanmaktadır. Yanal zemin yer değişiklikleri ise akma ve yayılma olarak iki kısma ayrılmaktadır.

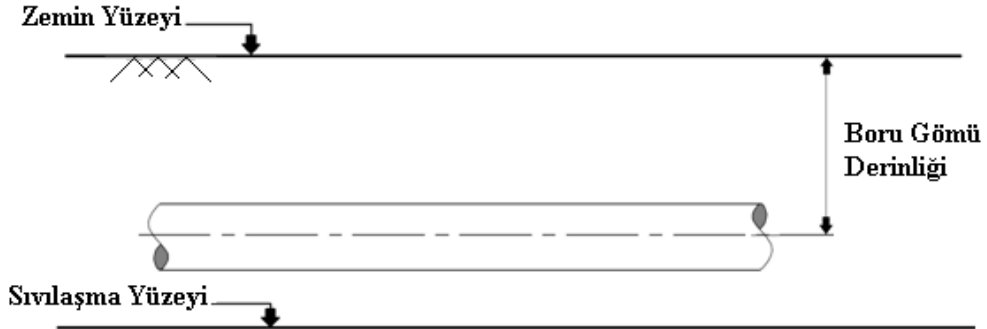
Akma; sıvılaşmış zeminin denge durum dayanımının (rezidüel dayanım), zeminin statik kayma gerilmesi mukavemetinden küçük olduğu durumlarda meydana gelir (Özaydın 2007).

Yayılma; yanal zemin yayılmasının boru hatları üzerinde 2 tür etkisi bulunmaktadır. 1. etki 1964 yılında Niigata olayında olduğu gibi sıvılaşma görülen tabakanın üst yüzeyi zemin yüzeyi ile aynı seviyededir. Bu birinci durum için boru, hat boyunca üstünde ve çevresinde bulunan toprağın akması ile oluşan yatay kuvvetlerin yanı sıra yığdırma kuvvetlerine de maruz kalır (Şekil 3.3).



**Şekil 3.3:** Yanal zemin yayılması 1. etki - zemin yüzeyi ile sıvılaşma yüzeyinin aynı olması durumu

2. etki ise 1906 yılında San Francisco'da gözlemlendiği gibi sıvılaşma görülen tabakanın üst yüzeyi boru hattının altında olduğu durumdur. Yani boru hattı sıvılaşma görülen zemin tabakasının üstünde, sıvılaşma olmayan katmanda yer alır. Bu durumda boru hattı yatay kuvvetlere maruz kalmasına rağmen yüzdürme kuvvetine maruz kalmamaktadır (Şekil 3.4).



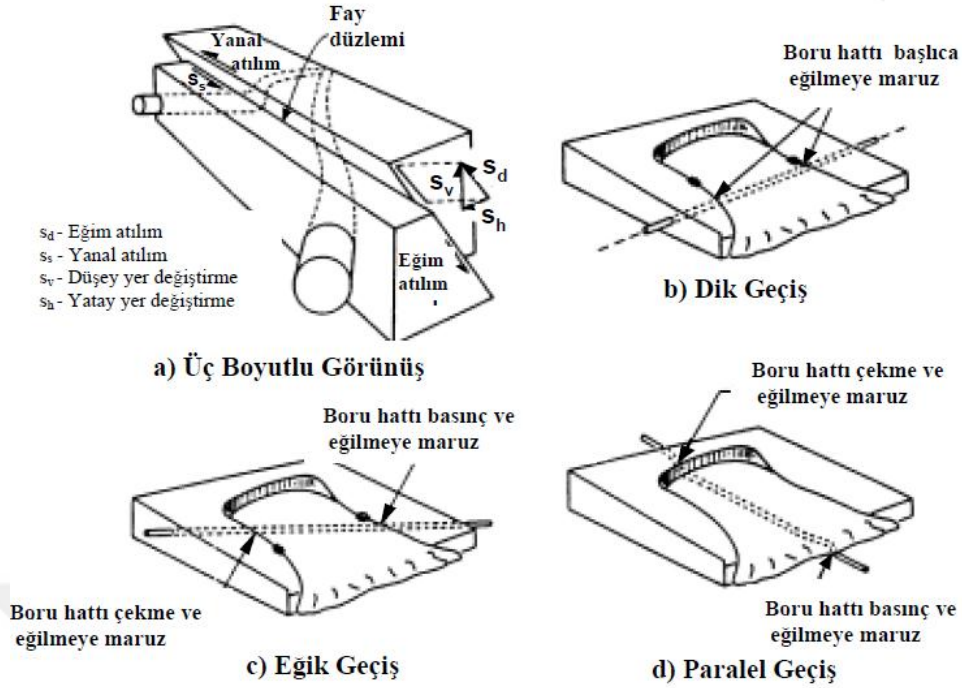
**Şekil 3.4:** Yanal zemin yayılması 2. etki - zemin yüzeyi ile sıvılaşma yüzeyinin farklı olması durumu

KYD etkisiyle borularda oluşan deformasyonlar kalıcı yer hareketinin büyüklüğüne, kalıcı yer hareketinin meydana geldiği alanın büyüklüğüne ve yer hareketinin boru hattı yerleşim güzergâhındaki dağılım şekline bağlıdır. KYD genellikle küçük alanlarda görülmesine rağmen borular üzerindeki etkisi fazladır ve ciddi hasarlar oluşturur. 1964 yılında meydana gelen Alaska depremi, Alaska'nın güney kısmında bulunan Anchorage şehrindeki gaz boru hatlarında 200, su dağıtım boru hatlarında ise 100'den fazla hasara neden olmuştur. Deprem bölgesinde bulunan gaz boru hatlarının koptuğu gözlenmiştir. Burada bulunan boruların birçoğunun hasar görmesine toprak kaymaları ve zeminde meydana gelen çatlaklar sebep olmuştur. Yine

1971 yılında California'da oluşan San Fernando depremi çeşitli boru hatlarında 1400'ün üzerinde hasara neden olmuştur. Oluşan hasarlardan dolayı San Fernando şehri içme suyu, atık su ve doğalgaz servisini kaybetti. Van Norman rezervuarının doğu ve batı kıyılarında sınılaşmadan kaynaklı yanal zemin yayılmasından dolayı su, doğalgaz ve petrol iletim hatları zarar görmüştür. 1987 yılında Güney Amerika'da bulunan Ekvador ülkesinde olan deprem ise 660 mm çapında tarihin en büyük tek iletim hattına zarar vermiştir. Yaşanan kayıpların ve hattın tekrar imarı için harcanan maliyetin ülkeyi soktuğu zarar 850 milyon dolar civarındadır. 1999 yılında Tayvan'da meydana gelen Chi-Chi depreminde su dağıtım ve doğalgaz tedarik sistemleri benzer sebeplerden dolayı etkilenmiştir. Afet bölgesinde bulunan 100.000 civarı doğalgaz kullanıcısı boru hatlarında yaşanan hasar kaynaklı kesinti sonucu hizmet alamamıştır. Bu boru hasarlarının ve kesintilerin bölgeye doğalgaz tedarik eden 5 büyük gaz şirketine ekonomik olarak zararı yaklaşık 25 milyon dolardır.

Hatlardaki boruların etkilendiği kalıcı yer deformasyonları boru eksenine dik, paralel veya eğik doğrultuda olabilir (Şekil 3.5). KYD'ların boru eksenlerine göre konumlanmaları boruların üzerinde oluşan gerilmelerin çeşidini de etkiler. Boruya paralel yönde gerçekleşen zemin hareketleri boru üzerinde sürtünme kuvveti olarak etki göstermektedir. Boruya dik yönde gerçekleşen zemin hareketleri ise boru üzerinde basınç ve çekme etkisi oluşturmaktadır. Şekil 3.5a'da boruların zemindeki yerleşimi ve olası fay hareketi üç boyutlu olarak tasfir edilmiştir. Şekil 3.5b'de gösterildiği gibi hattın konumlandığı bölgeye dik olarak meydana gelen KYD'ları sonucu borularda gösterilen noktalarda eğilmeye maruz deformasyonlar gözlenir. Şekil 3.5c'de borunun yerleşimine eğik yönde gerçekleşen zemin hareketinden dolayı boru üzerinde eğilme, çekme ve basınç kaynaklı deformasyon bölgeleri gösterilmiştir. Şekil 3.5d'de ise zemin hareketi boru hattına paralel yöndedir. Bu sebepten kaynaklı boru üzerinde oluşacak gerilme noktaları gösterilmiştir.





Şekil 3.5: Deprem oluşturduğu KYD sonucunda zemin-boru hattı etkileşimi (O'Rourke 1998)

Bütün bunlara karşın GYD, tesir alanı olarak daha büyük kütleyi kapsamasına rağmen, borular üzerindeki hasarı KYD'ye göre genellikle daha düşüktür. Fakat etkilediği bölgenin alanı büyük olduğu için zamanla paslanma vb. sebepler ile direnci zayıflamış boru parçalarının olduğu kısımlarda hasara sebep olabilir. 1985 yılında Meksika'nın Michoacan eyaletinde meydana gelen deprem sonucunda bu tip bir olay meydana gelmiştir ve Mexico şehrine su taşıyan boru hattı hasar görmüştür. Ayala ve O'Rourke (1989) yaptıkları inceleme ile borularda meydana gelen hasarları rapor etmiş ve sıvılaşma olmadığını söylemişlerdir. Borudaki oluşan zararın esas olarak deprem dalgalarının yayılımı sonucu oluştuğunun sonucuna varmışlardır.

Ülkemizde 15 Şubat 2007 tarihli Resmi Gazete'de sayı: 26435 ile sunulan "Alt Yapılar İçin Afet Yönetmeliği" yer almaktadır. Bu yönetmeliğin amacı, içme-kullanma suyu, kanalizasyon şebeke ve arıtmalarını kapsayan altyapı tesislerinin doğal afetlere karşı güvenli bir biçimde işleyebilmesi için tasarımını sağlamaktır. Mühendislik hesapları ile kullanılacak malzeme seçimi, hattın yapımı, işletilmesi, bakım ve onarımı için gerekli asgari şartlara dair usul ve esasları belirlemektir. Ayrıca etüt, planlama, proje, inşaat ve işletme süreçlerini kapsar (Toprak 2011).

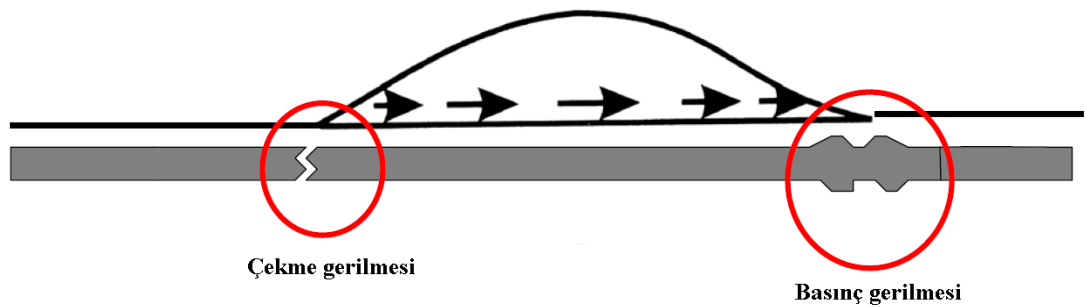
### 3.2 Yanal Zemin Yayılması ve Eksenel Boru Deformasyonları

Altyapı sistemlerinin bir parçası olan boru hatları oluşturulurken boruların birbirlerine eklenmesi yöntem bakımından sürekli ve parçalı olmak üzere iki farklı sınıfa ayrılır. Sürekli boru hatları ile genellikle petrol ve doğalgaz iletimi yapılırken parçalı boru hatları ile genellikle su iletimi yapılmaktadır. Olası bir deprem anında sürekli borular kullanılarak kurulmuş sistemler boruya etkileyen çekme kuvvetinden, borunun burkulma davranışından veya kaynaklı ekin zarar görmesinden dolayı hasara maruz kalıp devre dışı kalabilirler. Parçalı boru hatları kullanılarak kurulmuş sistemler ise genellikle ek yerlerinden hasar görmektedirler.

#### 3.2.1 Sürekli Boru Hatları

Sürekli boru hatları birbirlerine boru çeperinin iç ve dış kısmından yapılan kaynaklama işlemi ile eklenmektedir. Bu ekleme işlemi sonucunda kaynaklı yerin borunun diğer kısımlarından dayanım olarak fark göstermediği yapılan çalışmalar ve uygulanan testler ile bilinmektedir.

Gömülü sürekli boru hatlarının sismik yüklerin etkisi altında başarısızlık durumundaki davranışları eksenel çekme sebebiyle yırtılma, eksenel basınç sebebiyle bölgesel burkulma ve eğilme şeklinde gözlenir. Çekme sebebiyle yırtılma ve basınç sebebiyle burkulma etkileri Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Eksenel yükler etkisi altında boruda oluşan gerilmeler (O'Rourke 1995)

Eğer boruların gömü derinliği yüzeysel ve boru hattı basınç kuvveti etkisi altındaysa genellikle burkulma davranışı sergiler.

### 3.2.1.1 Çekmeden Kaynaklı Hasar

Çelik borular yapı itibari ile oldukça sünek yapıya sahiptirler. Bu yapıdan dolayı boru, üzerine uygulanan kuvvet doğrultusunda hareket eder ve makul miktarda şekil değişimlerine izin verir. Dökme demir ve beton borular yapı itibariyle daha çok gevrek davranış gösterirler. Bu sebepten dolayı gerilmelerden kaynaklı olası şekil değişimlerine çelik borular kadar tolerans gösteremezler.

Alın kaynaklı çelik boru hatlarına çekme gerilme kuvveti etkilediğinde kopmadan önce akma sınırındaki uzama direnci miktarı ile ilgili büyük gerilmeler yapabilirler. Fakat gaz kaynaklı bağlantılara sahip çelik borular yırtılmadan önce genellikle yüksek çekme kuvvetlerine karşı pek dayanım gösteremez. Borulardaki kaynaklı ek yerleri alın kaynak kadar iyi performans sergilememekte ve direnç gösterememektedir.

1994 yılında meydana gelen Northridge depremi bu farklı davranışı görmemize katkı sağladı. O'Rourke (1995)'e göre deprem esnasında Balboa bulvarında bulunan kaynaklı arka sahip çelik borular ve alın kaynaklı borular boru eksenine paralel yönde gelişen KYD'ye maruz kaldılar. Oluşan bu yer değiştirme hareketinden dolayı borulara çekme kuvveti etkiledi ve etkiye maruz kalan borularda kopmalar gözlemlendi. Borularda meydana gelen çekme gerilmeleri için maksimum yer değiştirme miktarı %4 olarak kabul edilir (Newmark ve Hall 1975). Bu değer aşıldığında ise sistemin işlevini yerine getiremediği ve zarar gördüğü düşünülür.

Akma dayanımı öncesi için analitik metot gerilme-şekil değiştirme davranışı ile ilişkilidir. En çok kullanılan yöntemlerden birisi Ramberg ve Osgood (1943) tarafından geliştirilmiş olup, Eşitlik (3.1)'de gösterildiği gibidir.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[ 1 + \frac{n}{1+r} \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^r \right] \quad (3.1)$$

Burada  $\varepsilon$ , borunun yer değiştirmesi (deplasmanı);  $\sigma$ , boru malzemesinin tek eksenli çekme gerilmesi; E, borunun elastisite modülü; n ve r, Ramberg-Osgood parametreleri;  $\sigma_y$ , boru malzemesinin akma dayanımını göstermektedir. Çelik sınıflarına göre yaygın olarak kullanılan  $\sigma_y$ , n ve r değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

**Tablo 3.1:** Yumuşak ve X sınıfı çelikler için Ramberg-Osgood parametreleri

	<b>Grade-B</b>	<b>X-42</b>	<b>X-52</b>	<b>X-60</b>	<b>X-70</b>
<b>Akma Dayanımı (MPa)</b>	227	310	358	413	517
<b>n</b>	10	15	9	10	5.5
<b>r</b>	100	32	10	12	16.6

Çelik borular Amerika Petrol Enstitüsü (API), Amerika Makine Mühendisleri Birliği (ASME), Amerika Ulusal Standartlar Enstitüsü (ANSI) ve Amerika Test Malzemeleri Birliğine (ASTM) göre üretilmektedirler. Bu borular üretilirken akma dayanımı sınırına göre çeşitli sınıflara ayrılırlar. Tablo 3.1'deki çelikler için kısa bilgi vermek gerekirse tabloda bulunmayan ama bilinen bir tür olan A sınıfı çelikler için minimum akma dayanımı sınırı 207 MPa iken B sınıfı çelikler için bu sınır 241 MPa'dır. Özel imalat sınıfına giren X sınıfı çelikler için örnek verecek olursak X-42 sınıfı çelikler minimum 290 MPa, X-52 sınıfı çelikler minimum 358 MPa akma dayanımı olduğunu göstermektedir.

### **3.2.1.2 Burkulmadan Kaynaklı Hasar**

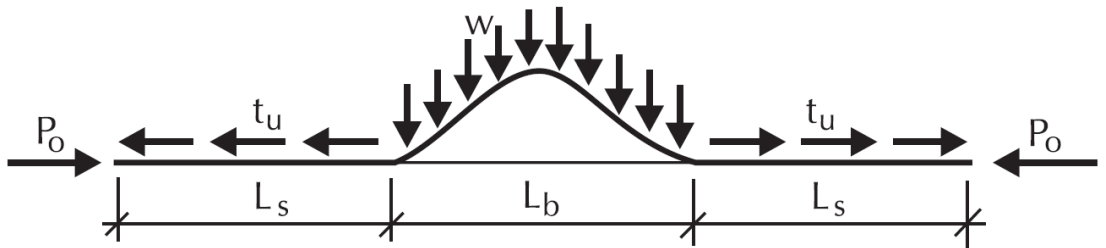
Burkulma, basınç etkisi altında kalan yapı elemanının stabil durumdan istikrarsız duruma aniden geçtiği yapısal değişkenlik durumunu ifade eder ve bölgesel burkulma (buruşma) ve çubuk (kiriş) burkulması olarak ikiye ayrılır.

Bölgesel burkulmada yapısal değişkenlikler sonucunda oluşan eğrilikler boru duvarının çatlamasına ve sızıntıların başlamasına sebep olur. Çelik borularda bu tür arıza çok fazla görülmektedir. KYD 1991 yılında Kosta Rika'da akaryakıt boru hattına ve 1994 yılında ise Northridge'de gaz ve su boru hatlarında bu tür hasara neden oldu. Şekil 3.7'de borularda meydana gelmiş bölgesel burkulmaya ait bir örnek verilmiştir.



Şekil 3.7: Boruda bölgesel burkulma (O'Rourke ve Ballantyne 1992)

Yapılarda görülen diğer bir burkulma çeşidi olan çubuk burkulmalarının ilk çalışmaları Marek ve Daniels tarafından 1971 yılında vinç rayları üzerine başlatılmıştır. Hobbs 1981 yılında yaptığı çalışmalar ile Marek ve Daniels'in başlatmış olduğu çalışmaları denizaltı boru hatlarının problemlerini çözmek için uyarlamıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8: Borularda dikey yönde oluşan çubuk burkulma (Hobbs 1981)

Burada  $w$ , borunun birim uzunluk başına düşen ağırlığı;  $L_b$ , burkulma uzunluğunu ve  $L_s$ , burkulmanın bitişiğindeki boru uzunluğu göstermektedir.

Çubuk burkulmaları boru gömü derinliği, borunun yapısı ve borunun bükülmeye karşı olan direnci gibi birçok faktöre bağlı olarak gelişir. Gömü derinliği

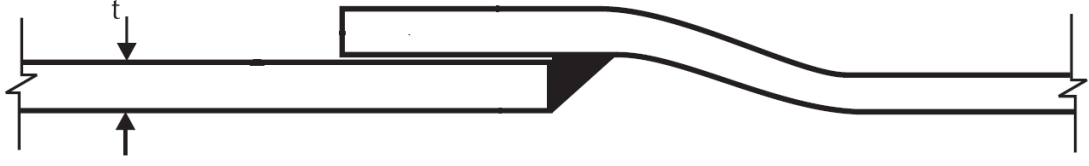
yetersiz olan sıg kanallara gömülmüş veya kanalı dolduran malzemenin gevşek olduğu durumlarda ortaya çıkma olasılığı daha yüksektir. Eğer boru yeterli derinliğe gömülürse çubuk burkulması yerine bölgesel burkulma gözlenir. Çubuk burkulmanın borular üzerindeki çeşitleri birkaç farklı olayda gözlenmiştir.

Örnek olarak 1932 ve 1959 yılları arasında Kalifornia'nın Buena Vista bölgesinde bulunan fayda 360 mm uzunluğunda bir tersine faylanma gözlendi. Oluşan bu zemin hareketi etkisiyle 51 ve 406 mm çap aralığında petrol iletimi yapan boru hatlarında basınç gerilmeleri meydana geldi. Borular orta derecelenmiş gevşek toprağa 0.15 ila 0.30 m derinliğinde gömülü halde bulunuyordu ve bu olay sonucunda borular basınç etkisiyle zemini yerinden kaldırdı. Bir diğer örnek 1979 yılında Kalifornia'nın Imperial Valley bölgesinde ortaya çıktı. 219 ve 273 mm çapındaki iki yüksek basınçlı boru hattı bölgeden geçen fay hareketlerinden benzer şekilde etkilendiği, yapılan denetlemeler esnasında iki borudada yatay olarak yer değiştirip kiriş burkulması hareketi yaptığı anlaşılmıştır.

Çubuk (kiriş) burkulmaları sonrasında boru hatları çekmeden veya diğer etkilerden kaynaklanan yırtılmalarda olduğu gibi görev yapamayacak kadar hasar alma durumuna gelmez. Başka bir deyişle diğer boru hasarlarına göre çubuk burkulması şeklindeki hasarlar hattın iletiminin devam etmesinden dolayı sistemlerimize daha az zarar vermiş olur.

### **3.2.1.3 Kaynaklı Ek Hasarı**

Çelik boru hatlarında başarısızlık kriterleri boru malzemesinin dayanımına bağlıdır. Bunun yanı sıra kaynaklı çelik borularda kriteri etkileyen bir diğer etken gaz kaynaklı birleştirmelerin dayanım kapasitesidir. Çünkü bu birleşimlerin dayanımı boru malzemesinin gösterdiği dayanımdan daha düşük seviyededir (Şekil 3.9).



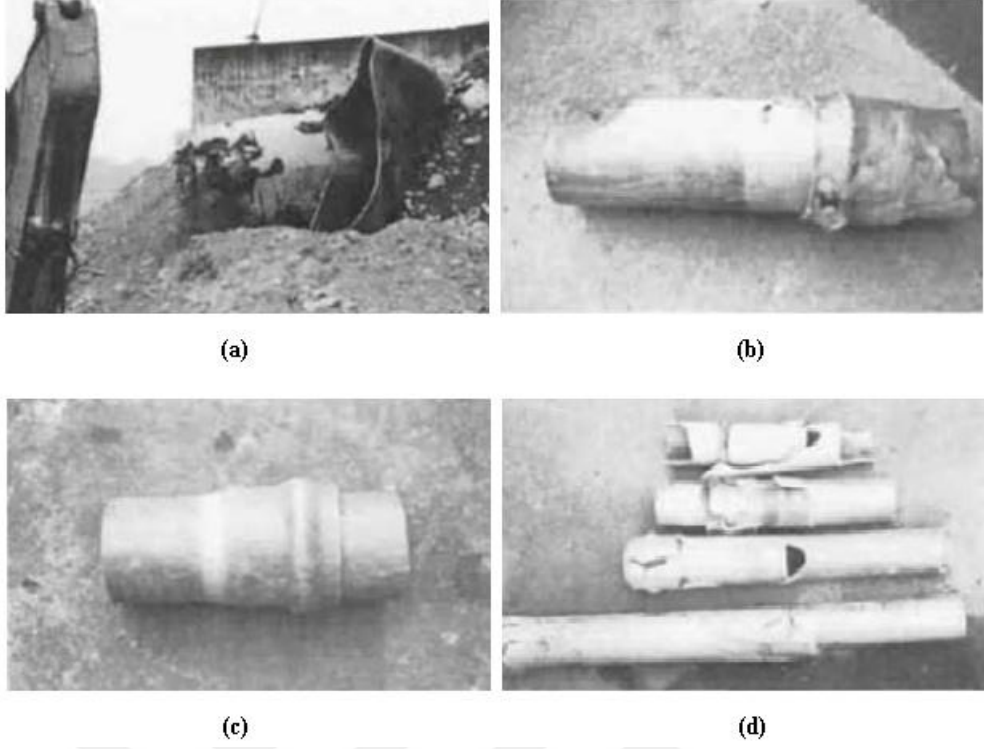
Şekil 3.9: İçten kaynaklı boru (Brockenbrough 1990)

Bu tür birleşime sahip çelik boruların birçoğu geçmiş depremler sırasında eklem yerlerinden hasar almıştır. Örnek olarak 1971 San Fernando depreminde 1260 mm çapındaki Granada ana hattı kaynaklı birleşim noktasından hasar görmüştür (O'Rourke ve Tawfik 1983).

### 3.2.2 Parçalı Boru Hatları

Parçalı boru hatları, hattın uzunluğunu arttırma, dışarıdan ve içeriden hattı etkileyen kuvvetlere karşı dayanımı arttırma gibi sebeplerden dolayı ek yerlerinde çeşitli contalar, parçalar, emniyet kilitleri ve kaynaklar ile birbirlerine eklenerek bir hat oluşturulmasına olanak sağlar.

Daha önceki depremlerde büyük çaplı ve kalın duvarlara sahip parçalı boru hatları üzerinde oluşan hasarların genel olarak boru bağlantılarından kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra boruda ve eklem yerlerinde aksel çekme kuvveti sonucu oluşan gerilmeler, eklemlerde ve boruların uçlarında meydana gelen ezilmeler (çan ve tapa tipi ezilmeler) ve eklemlerden uzak noktalarda boru üzerinde gözlenen eğilme çatlaklarından kaynaklı hasarlar parçalı boru hatlarında çok sık görülen deformasyonlardır. Bu deformasyonlar hattın zarar görmesine ve işlevini yerine getirememesine sebebiyet verir. 1976 yılında Çin'in Tangshan şehrinde meydana gelen depremde boru hatlarını inceleyen Sun ve Shien deprem sonucu borularda oluşan hasarın bu konuya iyi bir örnek teşkil ettiğini gördüler. Yapılan incelemeler sonucu borularda meydana gelen kırılmaların %80'inin boru ek yerlerinden kaynaklandığı tespit edilmiştir (Sun ve Shien 1983). Çeşitli etmenlerin etkisi sonucunda hasar görmüş parçalı borular Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



**Şekil 3.10:** Hasar görmüş çeşitli parçalı borular (Tsai ve diğ. 2000)

Şekil 3.10a'da Chelungpu fayında deprem sırasında hasar görüp yırtılmış 2000 mm çapındaki çelik boru görülmektedir. Şekil 3.10b'de dikey yönde gerçekleşen zemin hareketi sonucu ek yerinden yukarı yönde zorlanmış parçalı boru ve deformasyonu yer almaktadır. Şekil 3.10c'de yatay yönde meydana gelen zemin hareketi sonrasında parçalı borunun daha fazla direnç gösteremeyip basınç etkisi ile ek yerinden içeri girmesi görülmektedir. Şekil 3.10d'de ise yüklemeler sonucu ek yerlerinden kırılmış çeşitli borular yer almaktadır.

### 3.3 Boru Hattına Paralel Yönde KYD Etkisi

Gömülü boru hatları KYD etkisi altında hattın konumuna dik ve paralel olmak üzere iki ana bileşen yönünde yüke maruz kalmaktadır. Borunun paralel yöndeki hareketi boru hattının itmeye çalıştığı zemin ile, dikey yöndeki hareketi ise zemin ve boru hattının sürtünmesi ile sınırlıdır (O'Rourke 1999). Burada boru hattına paralel yönde kalıcı yer deformasyonları etkisi incelenmiştir.



Toprak (2007) deprem sonucu oluşan kalıcı yer deformasyonlarının (KYD) gömülü borular üzerinde etkisini yönetmelikler açısından değerlendirmiş ve bazı analitik yöntemleri sunmuştur. Analitik yöntemler kapsamında KYD'nin boru eksenine paralel olduğu hal için borular üzerinde KYD etkisi, O'Rourke ve Nordberg (1992) tarafından önerilen kayan blok modeliyle değerlendirilebilir. Bu modelde Şekil 3.11 ile gösterilen iki farklı durum göz önüne alınmaktadır. Durum I'de KYD bölgesinin uzunluğu (L), boru ile KYD bölgesi içinde borunun etrafındaki zemin arasında sıfır-kayma geliştirebilecek yeterlikte büyüklüğe sahiptir. Durum II'de KYD bölgesinin uzunluğu (L), sıfır-kayma oluşturacak değerden büyüktür. Bu nedenle borudaki şekil değiştirme Durum I'de KYD bölgesinin uzunluğu, Durum II'de ise KYD miktarı ( $\delta$ ) tarafından kontrol edilmektedir. Borudaki aksenal yer değiştirme, kuvvet ve şekil değiştirme dağılımı, Şekil 3.11'de Durum I ve II için gösterilmiştir. Şekilde  $f_m$ , zemin-boru arayüzünde birim sürtünme kuvvetini ve  $L_e$ , sürtünmenin etki ettiği etkin uzunluğu göstermektedir. Birim sürtünme kuvveti Eşitlik (3.2)'de gösterildiği şekilde ifade edilir.

$$f_m = (c + \mu\gamma H)\pi D \quad (3.2)$$

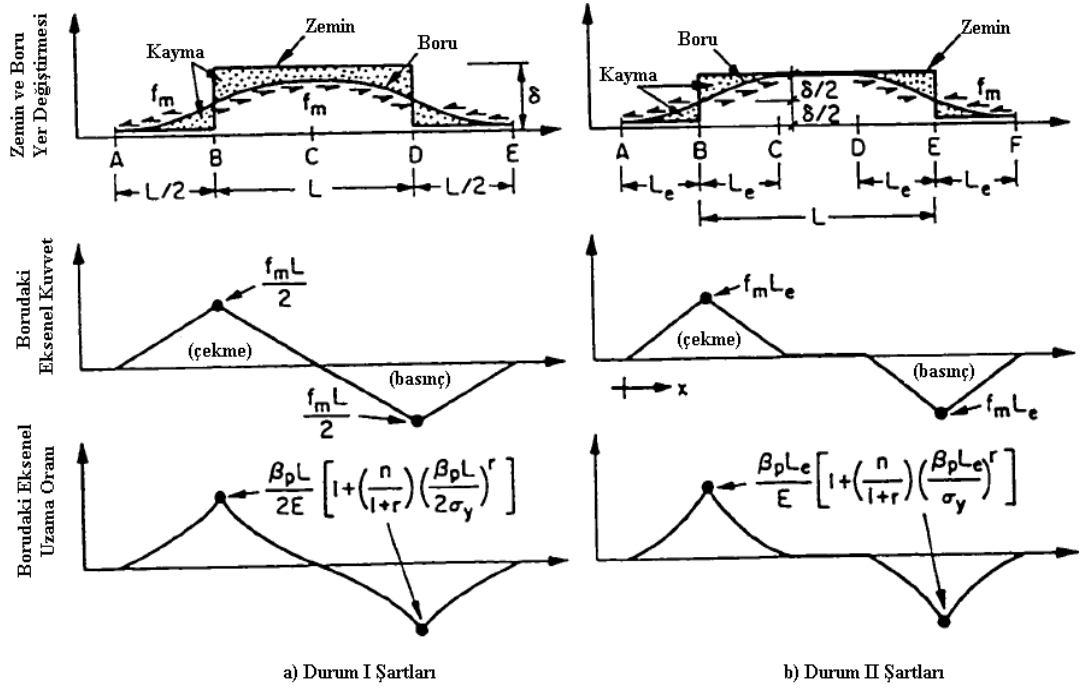
Burada  $c$ , zemin kohezyonu;  $\gamma$ , efektif zemin birim ağırlığı;  $H$ , yüzeyden boru ortasına olan derinliği ve  $D$  borunun dış çapını göstermektedir. Zemin-boru arayüzünde sürtünme kuvveti katsayısını temsil eden  $\mu$  ise  $\mu = k \tan \phi$  olarak hesaplanır. Burada  $\phi$ , zeminin içsel sürtünme açısı;  $k$  ise zemin ile farklı malzemeler (beton, polimer yüzey gibi) arasında olan deneyler sonucu elde edilen ve bu yüzeyler arasında yüzeysel kayma direnci ile alakalı olan bir katsayıdır.

Her iki durum için de, AB kısmı arasında borudaki kuvvet A'dan ölçülen mesafe ile doğrusal ilişkiye sahiptir. Boru malzemesi için Ramberg-Osgood modeli kullanarak, Durum II için maksimum uzama oranı şöyle yazılabilir:

$$\epsilon_{\text{maks}} = \frac{\beta_p L_e}{E} \left\{ 1 + \frac{n}{1+r} \left( \frac{\beta_p L_e}{\sigma_y} \right)^r \right\} \quad (3.3)$$

$$\beta_p = \frac{\mu\gamma H}{t} \quad (3.4)$$

Eşitliklerde bulunan  $n$  ve  $r$ , Ramberg-Osgood parametrelerini;  $E$ , boru için Elastisite Modülünü;  $\sigma_y$ , akma dayanımı gerilmesini;  $\beta_p$ , boru gömme parametresini;  $t$ , borunun et kalınlığını ve  $L_e$  Şekil 3.11'de A noktasından B noktasına olan mesafeyi gösterir. Şekil 3.11'de görüldüğü gibi Eşitlik (3.3) Durum I için  $L_e = \frac{L}{2}$  özel durumu olarak kabul edilip kullanılabilir.



Şekil 3.11: Boru eksenine paralel yönde KYD durumunda, KYD etkileri için kayan blok modeli (O'Rourke ve Nordberg 1992)

## 4. BORULARIN RİSK ANALİZLERİ

### 4.1 Ortalama Değer Birinci Mertebe İkinci Moment Yönteminin Boru Hatlarına Uygulanması

Ortalama Değer Birinci Mertebe İkinci Moment (MVFOSM) yönteminin uygulamaya başlamadaki ilk adımı öncelikle sistemde kullanılan ve sistemin güvenilirliğini etkileyen bütün parametrelerin tespitidir. Eşitlik (4.1)'de bulunan parametreler, deprem kuvvetleri etkisi altında boru hatlarında izin verilebilir maksimum yer değişikliğini bulmamıza olanak sağlamaktadır. Ortalama Değer Birinci Mertebe İkinci Moment yöntemini uygulayabilmemiz için öncelikle bütün parametrelerin kısmi türevlerinin işleme katılması sağlanmalıdır.

Maksimum yer değiştirmeyi bulurken kullanılan formüller:

$$\varepsilon_{\text{maks}} = \frac{\beta_p Le}{E} \left\{ 1 + \frac{n}{1+r} \left( \frac{\beta_p Le}{\sigma_y} \right)^r \right\} \quad (4.1)$$

$$\beta_p = \frac{\mu \gamma H}{t} \quad (4.2)$$

$$\mu = k \tan \Phi \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_{\text{maks}} = \frac{k \tan \Phi \gamma H Le}{tE} \left\{ 1 + \frac{n}{1+r} \left( \frac{k \tan \Phi \gamma H Le}{tE} \right)^r \right\} \quad (4.4)$$

Eşitlik (4.4)'de bulunan parametrelerin kısmi türevleri:

- k parametresi için:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial k} = - \frac{\tan \Phi \gamma Le H \left( \frac{n \left( \frac{\tan \Phi \gamma k Le H}{\sigma_y t} \right)^r}{r+1} + 1 \right)}{tE} - \frac{\tan \Phi \gamma Le n r H \left( \frac{\tan \Phi \gamma k Le H}{\sigma_y t} \right)^r}{(r+1)tE} \quad (4.5)$$

- $\Phi$  parametresi için:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \Phi} = - \frac{\sec \Phi^2 \gamma k L e H \left( \frac{n \left( \frac{\tan \Phi \gamma k L e H}{\sigma y t} \right)^r}{r+1} + 1 \right)}{t E} - \frac{\sec \Phi^2 \gamma k L e n r H \left( \frac{\tan \Phi \gamma k L e H}{\sigma y t} \right)^r}{(r+1) t E} \quad (4.6)$$

- $\gamma$  parametresi için:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \gamma} = - \frac{\tan \Phi k L e H \left( \frac{n \left( \frac{\tan \Phi \gamma k L e H}{\sigma y t} \right)^r}{r+1} + 1 \right)}{t E} - \frac{\tan \Phi k L e n r H \left( \frac{\tan \Phi \gamma k L e H}{\sigma y t} \right)^r}{(r+1) t E} \quad (4.7)$$

- $H$  parametresi için:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial H} = - \frac{\tan \Phi \gamma k L e \left( \frac{n \left( \frac{\tan \Phi \gamma k L e H}{\sigma y t} \right)^r}{r+1} + 1 \right)}{t E} - \frac{\tan \Phi \gamma k L e n r \left( \frac{\tan \Phi \gamma k L e H}{\sigma y t} \right)^r}{(r+1) t E} \quad (4.8)$$

- $L_e$  parametresi için:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial L_e} = - \frac{\tan \Phi \gamma k H \left( \frac{n \left( \frac{\tan \Phi \gamma k L e H}{\sigma y t} \right)^r}{r+1} + 1 \right)}{t E} - \frac{\tan \Phi \gamma k n r H \left( \frac{\tan \Phi \gamma k L e H}{\sigma y t} \right)^r}{(r+1) t E} \quad (4.9)$$

- $t$  parametresi için:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\tan \Phi \gamma k L e H \left( \frac{n \left( \frac{\tan \Phi \gamma k L e H}{\sigma y t} \right)^r}{r+1} + 1 \right)}{t^2 E} + \frac{\tan \Phi \gamma k L e n r H \left( \frac{\tan \Phi \gamma k L e H}{\sigma y t} \right)^r}{(r+1) t^2 E} \quad (4.10)$$

- E parametresi için:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial E} = \frac{\tan \Phi \gamma k L e H \left( \frac{n \left( \frac{\tan \Phi \gamma k L e H}{\sigma_y t} \right)^r}{r+1} + 1 \right)}{t E^2} \quad (4.11)$$

- n parametresi için:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = - \frac{\tan \Phi \gamma k L e H \left( \frac{\tan \Phi \gamma k L e H}{\sigma_y t} \right)^r}{(r+1) t E} \quad (4.12)$$

- r parametresi için:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = - \frac{\tan \Phi \gamma k L e H \left( \frac{\left( \frac{\tan \Phi \gamma k L e H}{\sigma_y t} \right)^r \log \left( \frac{\tan \Phi \gamma k L e H}{\sigma_y t} \right) n \left( \frac{\tan \Phi \gamma k L e H}{\sigma_y t} \right)^r}{(r+1)^2} \right)}{t E} \quad (4.13)$$

- $\sigma_y$  parametresi için:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma_y} = \frac{\tan \Phi \gamma k L e n r H \left( \frac{\tan \Phi \gamma k L e H}{\sigma_y t} \right)^r}{(r+1) \sigma_y t E} \quad (4.14)$$

olarak bulunmuştur.

Bütün parametrelerin kısmi türevleri alındıktan sonra Eşitlik (4.4) kullanılarak sistemin maksimum yer değiştirmesi bulunur. Performans fonksiyonunu hesaplamak için Eşitlik (4.15)'de gösterildiği şekilde basınç ve çekme durumları için ayrı ayrı sınır değerinden maksimum yer değiştirme değeri çıkartılır.

Performans fonksiyonu ise:

$$Z = g(X_i) = \varepsilon_{\text{kritik}} - \varepsilon_{\text{maks}} \quad (4.15)$$

şeklinde yazılır.

Varyans ve standart sapma bulunup oranlandıktan sonra sistemin olası bir tehdit anında güvenilirlik-risk hesabı yapılmış olur.

#### **4.2 Geliştirilmiş Birinci Mertebe İkinci Moment Yönteminin Boru Hatlarına Uygulanması**

Geliştirilmiş Birinci Mertebe İkinci Moment (AFOSM) yöntemi uygulamasında MVFOSM yönteminde bulunan mevcut hesap adımlarının üzerine, orijin noktasına en yakın çökme yüzeyinin dikkate alınıp hesabın daha hassas ve daha net sonuç vermesi için gerekli  $a_i$  parametresi hesabı vardır.

$a_i$  parametresi hesabı için öncelikle parametrelerin kısmi türevleri ve standart sapmaları hesaba katılarak Eşitlik (2.17)'de gösterilen hesap adımları uygulanır ve her bir parametre için ayrı ayrı  $a_i$  değerleri bulunur.  $a_i$  değerleri bulunduktan sonra ise Eşitlik (2.18)'de gösterilen şekilde çökme yüzeyine en yakın uzaklık ( $d$ ) değeri hesaplanır. Ardından parametrelerin ortalama değeri, standart sapması,  $a_i$  değeri ve  $d$  değeri kullanılarak orijine en yakın çökme noktası bulunur. Burada amaç sonucun sıfır olarak sonuçlandığı  $\beta$  (güvenilirlik indeksi) değerini bulmaktır. Orijine en yakın çökme noktası hesabının ardından maksimum yer değiştirme formülü uygulanır. Performans fonksiyonunu hesabı için bir önceki bölümde yer alan Eşitlik (4.15) uygulanır. Performans fonksiyonu değeri bulunduktan sonra sistemin risk faktörü bulunmuş ve güvenilirlik-risk hesabı yapılmış olur.

#### **4.3 Monte Carlo Simülasyonu Yönteminin Boru Hatlarına Uygulanması**

Simülasyon düzgün dağılımdan rastsal değişkenler elde etmek ve bunları uygun olan bir dağılıma taşımak prensipleri üzerine kurulmuştur. Sistem uygulamasında sorunun çözümü için rastgele sayılar üretilip işlem yapılan yaklaşımlara verilen genel bir isimdir. Monte Carlo Simülasyonu yöntemindeki

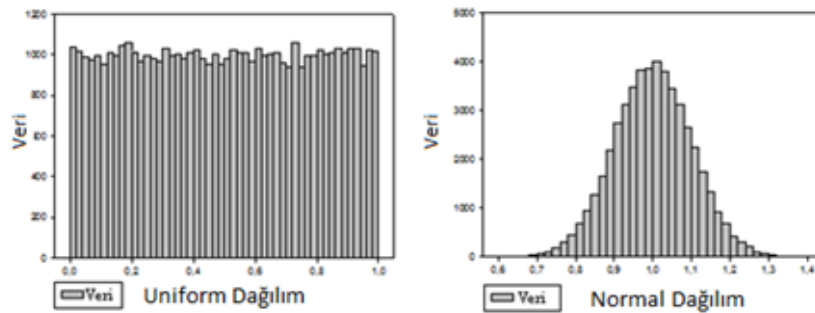
(MCSM) temel amaç sistemdeki problemlerin belirlenmesi ve bütün bir şekilde ele alınıp çözüm bulunmasıdır.

Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de özellikleri verilen boru hatları Monte Carlo Simülasyonu ile incelemek için öncelikle Eşitlik (4.4)'de bulunan parametrelerin her biri için ayrı ayrı 0 ile 1 arasında rastgele sayılar üretilecektir. Üretilecek sayı miktarı yapılan çalışmalar sonucunda Balboa bulvarında bulunan boruların maksimum yer değiştirmeleri için 50.000 olarak tespit edilmiştir.

Monte Carlo Simülasyonları Excel programında yapılmıştır. Excel’de rastgele sayılar üniform dağılıma uygun olarak üretildiği için parametrelerin dağılımlarına uygun olması bakımından normal dağılıma dönüştürülmüştür. Bu amaçla Excelde üretilen ve üniform dağılıma uyan 0 ile 1 arasındaki sayılar normal dağılımdaki olasılıklar gibi ele alınarak ters dönüşüm yapılmıştır (Şekil 4.1). Her parametrenin ortalama ve standart sapması kullanılarak Eşitlik (4.16) ile parametre değerleri hesaplanmıştır.

$$X = z * \text{std}_i + \bar{X} \quad (4.16)$$

Burada z, olasılığa karşılık gelen standart normal dağılım değeri;  $\text{std}_i$ , parametrelerin ortalama ve varyasyon katsayısından elde edilen standart sapması;  $\bar{X}$  ise parametrelerin ortalamasıdır.



Şekil 4.1: Uniform dağılım ve normal ters dağılım grafikleri

Normal dağılıma çevrilen parametreler Monte Carlo Simülasyonu uygulaması için standart sapmaları, ortalamaları ve varyasyon katsayıları hesaba katılarak borularda risk analizleri hesaplanır.

## 5. ÖRNEK ÇALIŞMA

Bu bölümde, Güney Kalifornia bölgesinde gerçekleşen 1994 Northridge depremi incelenmiştir. Northridge, dünyada gerçekleşen depremler arasında en fazla maddi zarara neden olan depremlerden biri olma özelliğini taşımaktadır. Çalışma alanı olan Balboa bulvarındaki Northridge depremi kaynaklı gerilmeler ile bölgede oluşan hasarlara değinilmiştir. Bölgede daha önce yapılan çalışmalarda meydana gelen hasarlarda genellikle KYD'larının ön plana çıktığı görülmüştür (Toprak 1998; Toprak 2010). Son olarak da güvenilirlik hesabı yöntemlerinin çalışma alanımız olan Balboa bulvarındaki hasar gören ve görmeyen boru hatlarına uygulama yöntemleri anlatılmıştır.

### 5.1 Çalışma Alanının Depremselliği ve Northridge Depremi

Yeryüzünde hareketlerin devam etmesinden kaynaklı binlerce aktif fay hattı bulunmaktadır. Bu aktif fay hatlarından Bartlett Spring, Calaveras, Concord, Green Valley, Hayward, Rodgers Creek San Andreas, San Gregorio, West Napa isimli faylar çalışma alanı olan güney California bölgesinde bulunmaktadır. Bu fayların hareketi sonucu oluşan gerilmeler ile bölgede uzun yıllardır depremler meydana gelmektedir. 1915 ve 1994 yılları arasında bölgede meydana gelmiş büyüklüğü  $M_w=5.5$  üstünde olan depremleri incelersek; 1956 yılındaki San Miguel depreminden sonra Los Angeles bölgesinde meydana gelen en güçlü depremlerden birinin Northridge depremi olduğu bilinmektedir (Frank 1995).

Northridge depremi, Kuzey Amerika'nın batı yakasında bulunan San Andreas fayının hareketi sonucu 17 Ocak 1994 tarihinde sabah 04.30 saatinde meydana gelmiştir. Depremin büyüklüğü Richter ölçeğine göre  $M_w=6.7$  olarak kayıtlara geçmiştir. Deprem Los Angeles'ın 30 km kuzeybatısında bulunan ve koordinatları 34.215 K - 118.538 B olan, California'nın Northridge bölgesinde gerçekleşmiştir (Şekil 5.1).

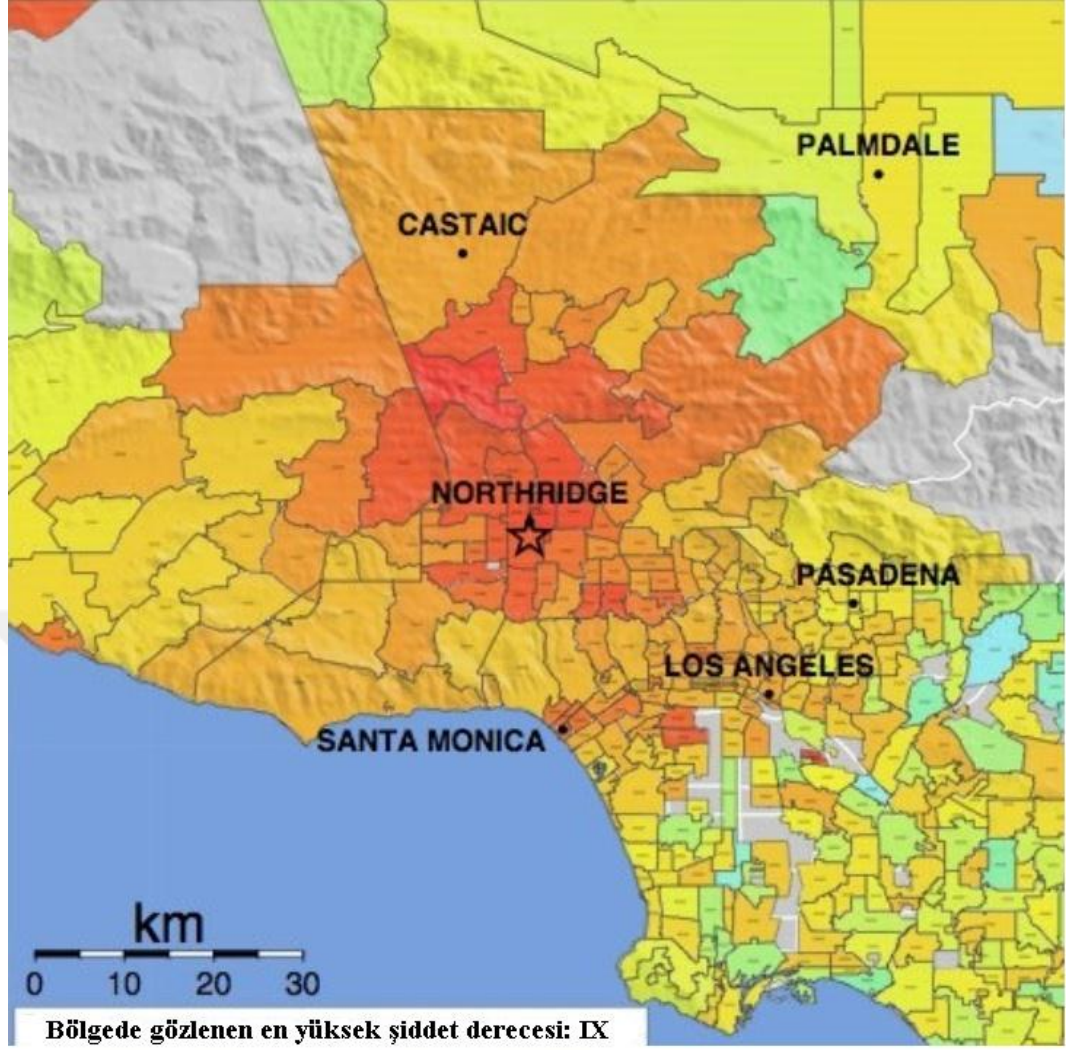




**Şekil 5.1:** Northridge depremi merkezüssü

Zeminde kırılmanın ilk başladığı andan devamındaki 8 saniyelik süre zarfı boyunca kırık yukarı ve kuzeybatı yönüne doğru 3 km/sn hızla ilerlemiştir. Deprem anında oluşan en yüksek yayılma hızları da bu yönde gerçekleşmiş olup, merkez üssünün 15 km kuzey ve batı kısmında ölçülmüştür. Depremin odak derinliği 19 km civarında başlamış ve 5 km derinliğe kadar yükselmiş, ancak yırtılma yüzeye kadar ulaşmamıştır (Wald ve Heaton 1994). Bundan dolayı fay düzleminde bulunan zeminin dikey doğrultuda 40 cm'lik yer değiştirmeleri gözlenmiştir (Hudnut ve diğ. 1994). Bu yer hareketleri sonucunda bölgenin kuzeyinde bulunan Santa Susana dağları 70 cm kadar yükselmiş ve kuzeybatıya doğru 21 cm yer değiştirmiştir. Ayrıca büyüklüğü çok yüksek olmamasına ve USGS kayıtlarına göre sarsıntının 25 saniye civarında devam etmesine rağmen Northridge depremi, yalnızca ABD'nin değil, dünya tarihinin gördüğü en fazla maddi zarara neden olan depremleri arasına girmiştir.

Deprem, 4.000 km<sup>2</sup>'lik bir bölgede zemini şekil değişikliğine zorladı ve 200.000 km<sup>2</sup>'lik bir alanda etkilerini hissettirdi. Depremin sonucunda 12.000 civarı bina, 6 otopan ve 5 anayol hasar gördü. Bunların yanı sıra 22.000 civarı insan evinden oldu. Ölü sayısı 57, yaralı sayısı 9.000 ve toplam hasar miktarı 44 milyar dolar olarak açıklandı. Depremin neden olduğu hasarın bölgelere göre dağılımı Şekil 5.2'de verildiği gibidir.

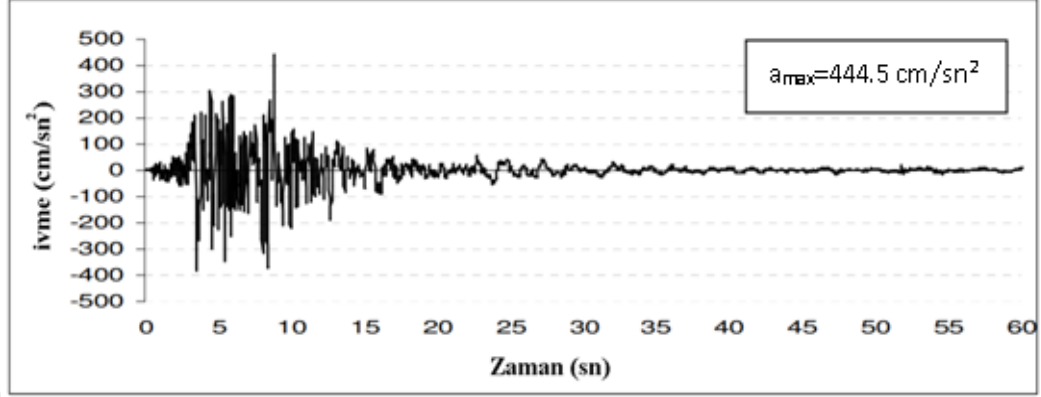


ŞİDDET	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+
Sarsıntı	Yok	Zayıf	Az	Orta	Güçlü	Çok Güçlü	Şiddetli	Çok Şiddetli	Aşırı
Hasar	Yok	Yok	Yok	Çok az	Az	Orta	Orta-Ağır	Ağır	Çok Ağır

Şekil 5.2: Depremın bölgedeki hasar ve sarsıntı şiddeti haritası  
<https://www.nbclosangeles.com/news/local/1994-Northridge-Earthquake-Map-Location-Shaking-Damage-503973951.html>

Araştırmalara göre depremden önce artçı sarsıntıların yaşanmadığı, 10 gün önce ise Los Angeles'ın batı yakasında büyüklüğü  $M_w=3$  ile 3.7 arasında değişen 4 küçük depremin meydana geldiği görülmüştür. Depremden sonra ise artçı sarsıntılar uzun süre devam etmiş, en büyük artçı sarsıntı ise depremden bir dakika sonra  $M_w=5.9$  büyüklüğünde gerçekleşmiştir. Depremden sonra geçen 2 yıl içerisinde bölgede  $M_w=5.0$  ile 5.9 arasında 9 adet,  $M_w=4.0$  ile 4.9 arasında 48 adet,  $M_w=3.0$  ile 3.9 arasında 353 adet artçı deprem yaşanmıştır.

Deprem esnasında etkin ivme  $380 \text{ cm/sn}^2$ , Houser şiddeti 262.22 cm, deprem hücum gücü 42 ve kırılan yüzey alanı büyüklüğü  $300 \text{ km}^2$  olarak belirlenmiştir. Deprem sırasında oluşan ivme kaydı Şekil 5.3'te gösterildiği gibidir.



Şekil 5.3: Northridge depremi ivme kaydı (Pakyürek 2006)

Şekilde yer alan ivme kayıtları incelendiği zaman en büyük ivme değerinin  $444.5 \text{ cm/sn}^2$  ( $\sim 0.45g$ ) olduğu görülmektedir. Deprem esnasında merkez üssünden 5 km uzaklıkta bulunan bölgede  $1.5g$ 'den daha büyük zemin ivmeleri kaydedilmiştir (Shakal ve diğ. 1994). Kaydedilen en büyük ivme değeri ise merkez üssünden 7 km uzaklıkta  $1.78g$  olarak kayda geçmiştir.

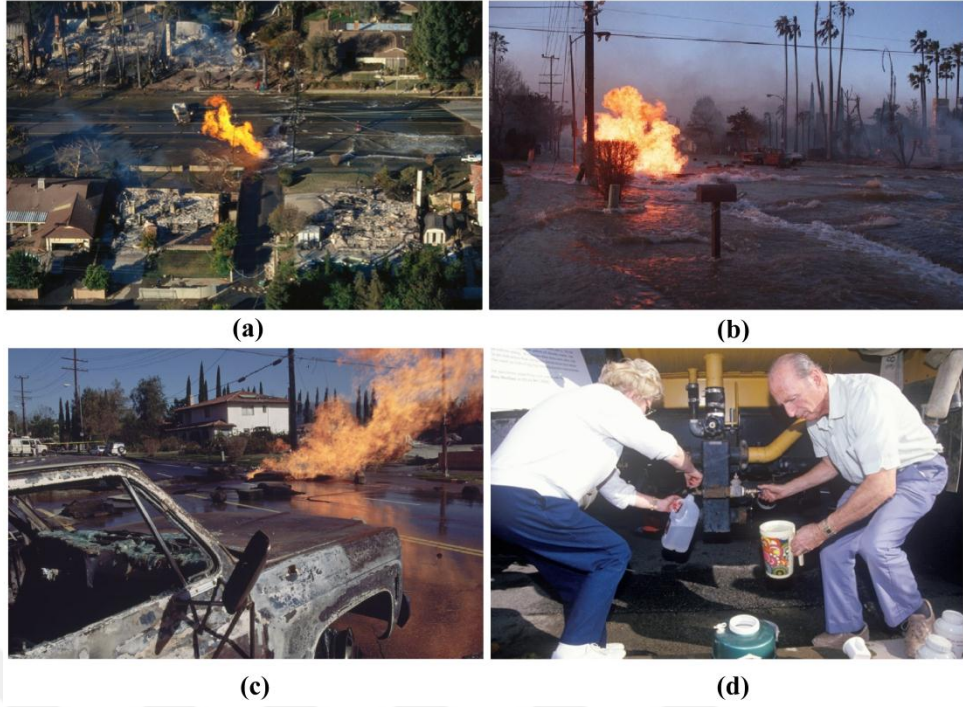
Northridge depreminden sonra, orta büyüklükte meydana gelen bir depremin etki edeceği bölge, fay hattına yakın olmasa bile büyük hasara maruz kalabilme ihtimalinin olduğu anlaşılmış oldu. Depremden sonra USGS ve Caltech, California bölgesindeki çalışmalarını ve sismik incelemelerini yoğunlaştırmış ve sismik potansiyel etki yönünden San Fernando Vadisi'nin kuzeyini Güney California bölgesinde bulunan altı bölgeden en riskli bölge olarak ilan etmişlerdir. USGS yaptığı bir takım çalışmalar sonucunda Los Angeles sakinlerine depremi daha önceden haber verecek bir program (ShakeAlertLA) geliştirdi. Amerika'da ilk olarak Los Angeles'ta uygulanan sistem sayesinde hasarın büyüklüğü önceden tahmin edilecek ve ardından gerekli kurumlara anında uyarı vererek önlem almaları sağlanacaktır. Uyarı sayesinde, deprem meydana gelmeden önce kazanılan kısa sürede bölgede bulunan gaz, petrol vb. hatlarının kesilmesi gibi hayati önem taşıyan tedbirler alınabilecektir.

## 5.2 Balboa Bulvarında Yer Hareketleri ve Boru Hatları

1994 Northridge depreminde, derin ve ince zemin tabakalarında gözlenen sıvılaşma ile birlikte Balboa bulvarı ve etrafındaki bölgelerde bulunan holosen alüvyon tabakalarında kalıcı yer deformasyonları meydana gelmiştir. Bu bölge gözlenen farklı zemin davranışları ve boru hatları performansları açısından pek çok araştırmacı ve mühendis tarafından özellikle incelemeye alınmış ve ayrıntılı yayınlar yapılmıştır (Hecker ve diğ. 1995<sup>a,b</sup>; Holzer ve diğ. 1996; Sano 1998).

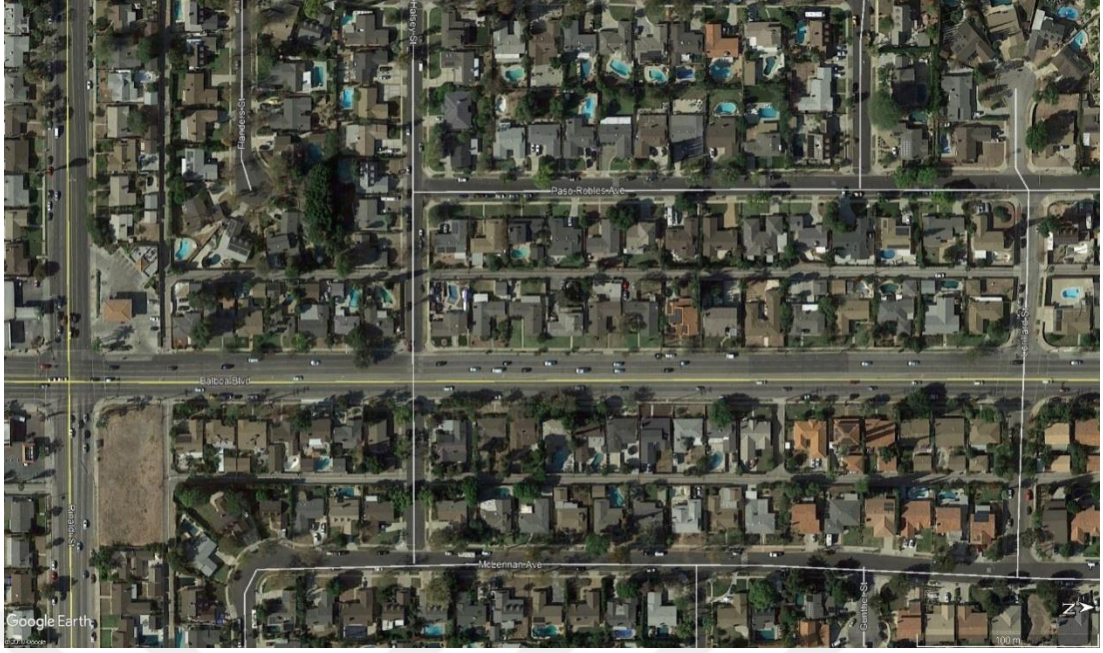
KYD'larının gözleendiği Balboa bulvarı ve paralelinde bulunan McLennon caddesinde 4 adet doğalgaz, 1 adet petrol ve 2 adet su olmak üzere toplamda 7 adet boru iletim hattı bulunmaktaydı (Toprak 1998). Deprem esnasında bölgede bulunan 7 boru hattından 3 tanesi çok ciddi hasar aldı. Hasar gören borulardan 2 tanesi su, 1 tanesi ise doğalgaz iletimi yapmaktaydı. Su iletimi yapan borular; Granada ve Rinaldi, gaz iletimi yapan boru ise Eski Hat 120 ile isimlendirilmiştir. Gaz hattında yaşanan yırtılmalar ve kopmalardan kaynaklı bölgede gaz sızıntıları olmuş ve bunun sonucunda patlamalarla birlikte yangınlar meydana gelmiştir. Su hatlarında gözlenen hasarlardan dolayı ise bölgede su taşkınları görülmüştür (Şekil 5.4 a,b,c). Granada ve Rinaldi hatlarının kırılmasının bir başka dezavantajıysa insanların içme ve kullanma suyu temini konusunda yaşadığı zorluklardır. Depremin üzerinden birkaç hafta geçmesine rağmen 10.000 civarında haneye hala su tedarik edilemiyor ve bölgenin su ihtiyacı tankerlerle gideriliyordu (Şekil 5.4 d). Hasar gören boruların ana iletim hattı olmaları ve boruların gördüğü hasarın büyüklüğünden dolayı depremin sarsıntıdan kaynaklı etkisinin yanına sonradan oluşan bu hasarlarda eklenmiştir.

Fakat aynı bölgede bulunan diğer 4 boruda hasar oluşmamış ve borular deprem sonrasında görevlerini yerine getirip, iletim yapmaya devam etmişlerdir. Hasar görmeyen hatların isimleri; gaz iletimi yapan Hat 3000, Hat 3003 ve Yeni Hat 120, petrol iletimi yapan ise Mobil Petrol'dur.

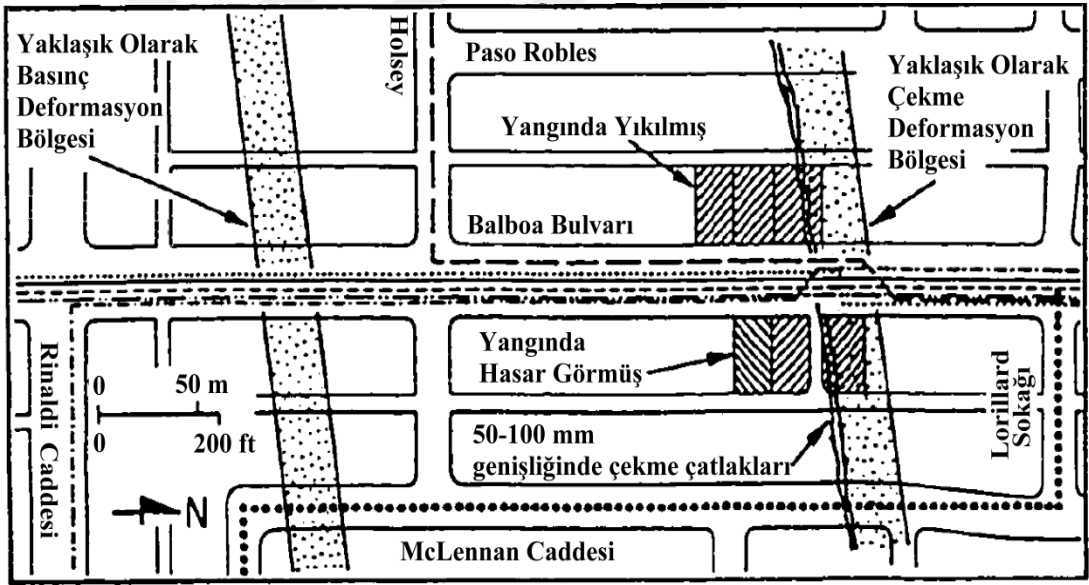


Şekil 5.4: Northridge depremi ardından bölgenin durumu

Boruların konumlandığı bölgenin güncel uydu görüntüsü Şekil 5.5’de verildiği gibidir. Kalıcı yer deformasyonları sonucu Balboa bulvarı ve McLennon caddesinde bulunan hasar gören ve görmeyen bütün boru hatlarının bölgedeki yerleşim haritası ise Şekil 5.6’da verilmiştir. Ayrıca şekilde basınç ve çekme gerilmelerinin olduğu bölgeler gösterilmiştir (O’Rourke ve Palmer 1994). Lorillard ve Halsey sokakları arasında yapılan ölçümlerde Balboa bulvarının çekme bölgesine doğru 540 mm kaydığı görülmüştür. Benzer şekilde Halsey sokağı ve Rinaldi caddesi arasında yapılan ölçümlerde zeminin Balboa bulvarının doğu-batı yönünde 420 mm ve 270 mm’lik sıkıştırmalar yaptığı gözlenmiştir (Hecker ve diğ. 1995b). Buradaki yaklaşık çekme-basınç deformasyon bölgeleri olarak gösterilen alanlar KYD’nın sınırı olarak bilinmektedir. KYD bölgesinin Balboa bulvarı boyunca uzunluğunu 280 m’dir.



Şekil 5.5: Balboa bulvarının güncel uydu görüntüsü (Google Earth 2019)



**İFADELER:**

- |           |                                       |           |   |
|-----------|---------------------------------------|-----------|---|
| — — — — — | 762 mm çapında Hat 3003 Gaz Hattı     | — — — — — | 1245 mm çapında Granada Su İletim Hattı |
| — — — — — | 762 mm çapında Hat 3000 Gaz Hattı     | — — — — — | 1727 mm çapında Rinaldi Su İletim Hattı |
| — — — — — | 559 mm çapında Eski Hat 120 Gaz Hattı | ▨         | Yıkılan Evler                           |
| — — — — — | 610 mm çapında Yeni Hat 120 Gaz Hattı | ▨         | Hasar Görmüş Evler                      |
| — — — — — | 406 mm çapında Mobil Petrol Hattı     |           |   |

Şekil 5.6: Boru hatlarının bölgedeki yerleşim haritası (O'Rourke ve Palmer 1994)

Bu tez kapsamında Şekil 5.6'da yerleşimi gösterilen boru hatları ile aynı doğrultuda hareket eden blok zemin durumu için güvenilirlik analizleri kullanılarak risk hesabı yapıldı. Zemin güney yönünde hareket ettiğinden dolayı boru hatlarının daha güney kısımlarında basınç, kuzey kısımlarında ise çekme gerilmeleri oluşmuştur. Analizler yapılırken bu gerilmelerin yanı sıra mevcut boruların karakteristik özellikleri ve boruların döşeli olduğu zeminin özellikleride dikkate alınmıştır.

Analizlerde, Northridge depreminde Los Angeles şehrinin Balboa bulvarı ve paralelinde bulunan McLennon caddesinde gömülü borulardan hasar gören ve görmeyen ikişer tanesi kullanıldı. Hasar gören borulardan analiz için seçilen iki tanesi Granada ve Rinaldi isimli borulardır. Hasar görmeyen borulardan seçilenler ise Mobil petrol ve Yeni Hat 120 isimli borulardır.

Granada Ana Hattı; çapı 1245 mm'den oluşan borulardan yapılmış bir hattıdır. Hattın üzeri çimento harcı ile kaplıdır. Hat bölgeye su iletimi yapmaktadır. Borunun et kalınlığı  $t = 6.4$  mm, boru gömü derinliği 1.8 m, betonun akma dayanımı 249 MPa'dır. Zeminle boru arasındaki sürtünme katsayısı,  $\mu$  değeri 0.75 olarak hesaplanmıştır. Balboa bulvarı boyunca, bulvara paralel bir şekilde konumlandırılmıştır.

Rinaldi Ana Hattı; 1727 mm çaplı bir hattıdır. Borunun üzeri Granada ana hattında olduğu gibi çimento harcı ile kaplıdır. Rinaldi ana hattını oluşturan borunun et kalınlığı  $t = 9.5$  mm, boru gömü derinliği 2.7 m'dir. Borunun yapısını oluşturan betonun akma dayanımı 249 MPa'dır. Zeminle boru arasındaki sürtünme katsayısı,  $\mu$  değeri 0.75 olarak hesaplanmıştır. Granada ana hattı ve diğer boru hatlarına paralel şekilde yer almaktadır.

Mobil Petrol Hattı; 406 mm çapında ana maddesi çelik olan borulardan oluşan ve petrol iletimi yapan bir hattıdır. Hattın üzeri polietilen ile kaplıdır. Borunun et kalınlığı  $t = 9.5$  mm, çeliğin akma gerilmesi 360 MPa'dır. Zeminle boru arasındaki sürtünme katsayısı,  $\mu$  değeri 0.41 olarak hesaplanmıştır. Granada ve Rinaldi ana hatlarına paralel bir şekilde Balboa bulvarının 1.5 m altında yer almaktadır.

Yeni Hat 120; 610 mm çaplı çelik bir borudur ve epoxy malzeme ile kaplıdır. Borunun et kalınlığı  $t = 6.4$  mm, boru gömü derinliği 1.5 m, çeliğin akma gerilmesi 415 MPa'dır. Zeminle boru arasındaki sürtünme katsayısı,  $\mu$  değeri 0.41 olarak

hesaplanmıştır. Yeni Gaz Hattı 120 borusu, 275 m'lik blok zemin hareketinin kuzey ucuna yaklaşık 100 m mesafede, güney ucuna da yaklaşık 40 m mesafede 90 derecelik kıvrımlara sahiptir. Tablo 5.1 bu boruların analizlerde kullanılan karakteristik özelliklerini göstermektedir.

**Tablo 5.1:** Analizlerde kullanılan boru hatlarının karakteristik özellikleri (Toprak, 1998)

Boru Hattı	Eklem Tipi	D <sup>a</sup> (mm)	t <sup>b</sup> (mm)	Boru Kaplaması	$\mu^c$	SMYS <sup>d</sup> MPa	Gömülme Derinliği (m)
Granada Ana Hattı	Kaynaklı Eklem Ve Mekanik Bağlantı	1245	6.4	Çimento Harcı	0.75	249	1.8
Rinaldi Ana Hattı	Kaynaklı Oynar Eklem	1727	9.5	Çimento Harcı	0.75	249	2.7
Mobil Petrol Hattı	Full Penetrasyon Elektrik Ark	406	9.5	Polietilen	0.41	360	1.5
Yeni Hat 120	Full Penetrasyon Elektrik Ark	610	6.4	Eritilmiş Epoksi	0.41	415	1.5

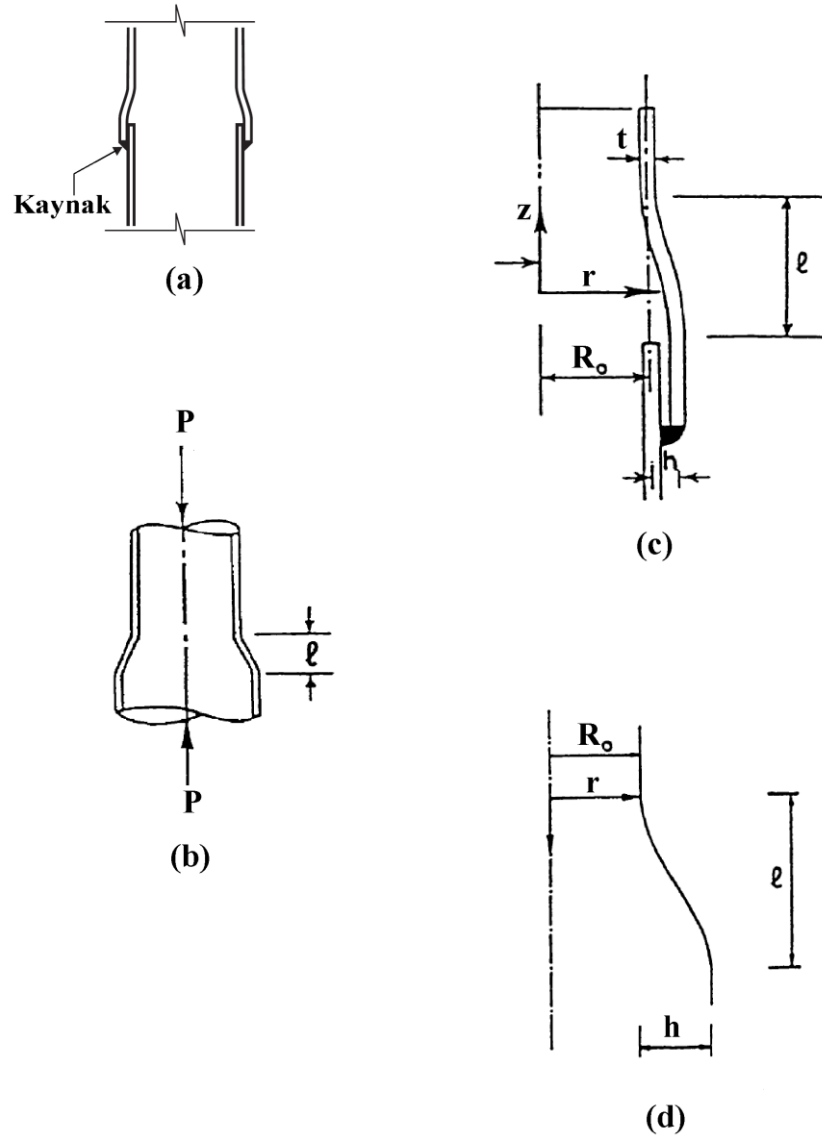
- Nominal Dış Çap
- Boru Et Kalınlığı
- Sürtünme Katsayısı
- Belirtilen Minimum Akma Dayanımı Gerilmesi

Analizler sırasında tabloda verilen borunun çapı, et kalınlığı, borunun kaplamasında kullanılan malzemenin cinsi, boru yapımında kullanılan çeliğinin akma dayanımı ve borunun zemindeki gömü derinliği gibi özelliklerin yanı sıra analizleri etkileyen başka bir faktör hattı oluşturan boruların şekli ve birleşim yerlerinin detayı da dikkate alınmıştır. Boruların şeklinin sistemin dayanımını ve güvenliğini çok ciddi oranda etkilediği daha önce yapılan çalışmalar sonucu görülmüştür. Şekilden kaynaklı iletim hatlarında oluşan dayanım kaybı borular üzerinde azaltma faktörleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

Şekil 5.7'de birleşim yerlerinde farklılık bulunan Granada ve Rinaldi hatlarının ek yerinin detayı gösterilmiştir. Bu tür ekleme sahip boruların kaynaklı olmasına rağmen mevcut şekilden dolayı basınca karşı kapasite kaybı yaşadıklarını Tawfik ve O'Rourke (1985) göstermiştir. Çekme durumu için ise bu tür eklemli boruların gerilme-şekil değiştirme davranışının, üretilmiş oldukları çeliğinkine benzer olduğu bilinmektedir. Böylece Granada ve Rinaldi borularında çekme durumu için akma dayanımları 249 MPa iken basınç durumu için akma dayanımı Granada için 92 MPa



ve Rinaldi için 87 MPa olarak azaltma faktörleri kullanılarak hesaplanmıştır (Toprak 1998).



**Şekil 5.7:** Kaynaklı eklemde borunun a) Birleşim detayı b) Şematik, c) Geometrik ve d) Kosinüs eğrisi gösterimi (Tawfik ve O'Rourke 1985)

İlave olarak Granada borusunun çekme deformasyon bölgesi yakınlarında bir mekanik eklemi bulunmaktaydı ve borudaki ayrılma çekme dayanımının çok zayıf olduğu bu mekanik eklemde meydana gelmiştir. Bu tez kapsamındaki analizlerde mekanik eklem modellenmemiştir. Granada ve Rinaldi çelik boruları için gerilme şekil değiştirme ilişkisini sağlayan Ramberg-Osgood parametreleri sırası ile  $n=10$  ve  $r=11$  olarak belirlenmiştir. Mobil petrol ve Yeni Hat 120 gaz hatları için parametre değerleri sırasıyla:  $n=8$ ,  $r=11$  ve  $n=10$  ve  $r=12$ 'dir.

Analizler esnasında hesaba katılan dört adet boru için ortalama değer ve standart sapmanın ortalamaya oranı ile bulunan varyasyon katsayıları (c.o.v.) değerleri Tablo 5.2'de verilmiştir (Ahammed 1997; Ahammed 1998).

**Tablo 5.2:** Analizlerde kullanılan parametre değerleri

Parametre	Tanım	Ortalama Değer	c.o.v. (%)	
K	Sürtünme Azaltma Katsayısı	Granada ve Rinaldi	0.96	2
		Mobil Petrol ve Yeni Hat 120	0.52	2
$\Phi$	Zeminin İçsel Sürtünme Açısı	37°	15	
$\gamma$	Zeminin Birim Hacim Ağırlığı	19,65 kN/m <sup>3</sup>	9	
H	Boruların Gümü Derinliği	Granada Hattı	1.8m	0,94
		Rinaldi Hattı	2.7m	0,62
		Mobil Petrol, Yeni Hat 120	1.5m	0,96
n,r	Ramberg-Osgood Parametreleri	Granada ve Rinaldi Hattı	n=10 r=11	D*
		Mobil Petrol Hattı	n=8 r=11	D*
		Yeni Hat 120	n=10 r=12	D*
t	Boru Et Kalınlığı	Granada ve Yeni Hat 120	0.0064m	5
		Rinaldi ve Mobil Petrol Hattı	0.0095m	5
E	Borunun Elastisite Modülü	200.000 MPa	3.3	
$\sigma_y$	Akma Dayanımı	Granada Hattı-çekme	249 MPa	5
		Granada Hattı-basınç	92 MPa	5
		Rinaldi Hattı-çekme	249 MPa	5
		Rinaldi Hattı-basınç	87 MPa	5
		Mobil Petrol Hattı	360 MPa	5
		Yeni Hat 120	415 MPa	5

Bu tez kapsamında incelenen tüm boru hatlarının yüklemeye maruz kaldıklarında kopmadan ve güvenli şekilde iletim yapabilmeleri için kritik gerilme değerleri, çekme gerilmeleri için  $\epsilon_{kritik} = 0.03$ , basınç gerilmeleri için ise  $\epsilon_{kritik} = 0.01$  olarak kabul edilmiştir.

## 6. SONUÇ ve ÖNERİLER

### 6.1 Analiz Sonuçları

Uygulamaya sokulan borular ve uygulanan yöntemlerin sonuçlarının karşılaştırıldığı bölümdür. Sonuçlar deprem sonrasında borularda meydana gelen durumlar ile karşılaştırıldığında gözlenen etkiler ile tutarlılık göstermektedir.

#### 6.1.1 MVFOSM Yöntemine Göre Analiz Sonuçları

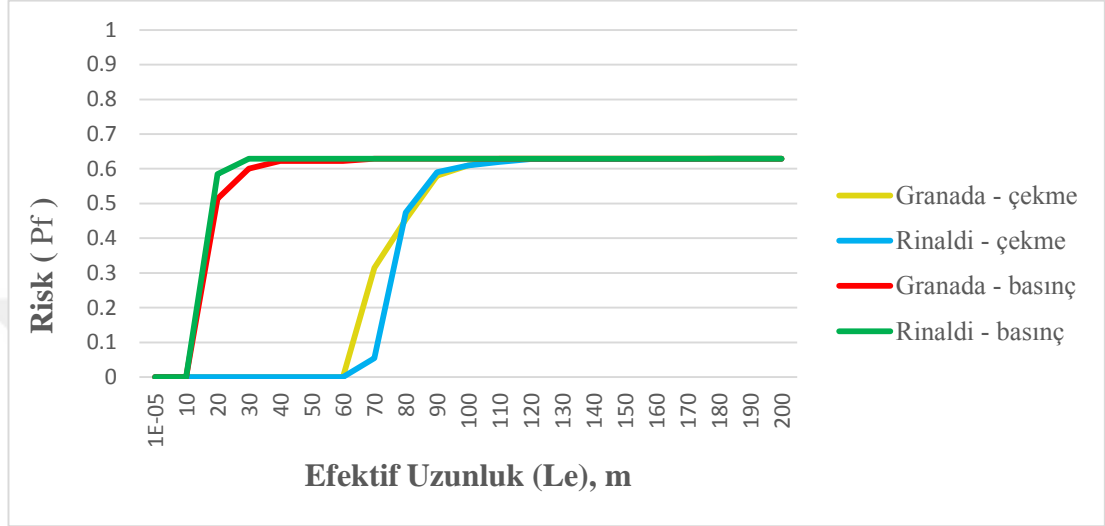
Ortalama değer birinci merteye ikinci moment yöntemi uygulanırken parametrelerin kısmi türevleri ve işlem adımları çok önem teşkil etmektedir. Sismik etkiler sonucu yer hareketleri etkisi ile boru hatları üzerinde gözlenen çekme ve basınç durumu için ayrı ayrı analiz ortamı oluşturuldu. Hasar gören borulardan Granada ve Rinaldi ana hatları için çıkan sonuçlar boruların deprem anında basınç kuvvetin çekme kuvvetine göre daha çok etkilendiğini göstermektedir. Çekme kuvveti Granada ana hattı üzerinde hiç etki yapmamasına karşın Rinaldi hattı üzerinde bir miktar risk teşkil etmektedir. Depremde sağlam kaldığı bilinen Mobil Petrol ve Yeni Hat 120 boruları için yapılan analizlerde ise boruların hasar almadığı tekrar gözlenmiştir. Riskin mevcut bu iki boru karakteristik özelliklerine ve zemin şartlarına göre Northridge depreminde risk teşkil etmediği çekme ve basınç durumları için analizler ile birkez daha görülmüştür (Tablo 6.1). MVFOSM ve AFOSM yöntemleri uygulanırken kullanılan parametre değerleri (ortalama değer, varyasyon katsayısı vb.) Tablo 5.2’de verilmektedir.

**Tablo 6.1:** MVFOSM yöntemine göre çekme ve basınç durumu için borularda oluşan risk sonuçları

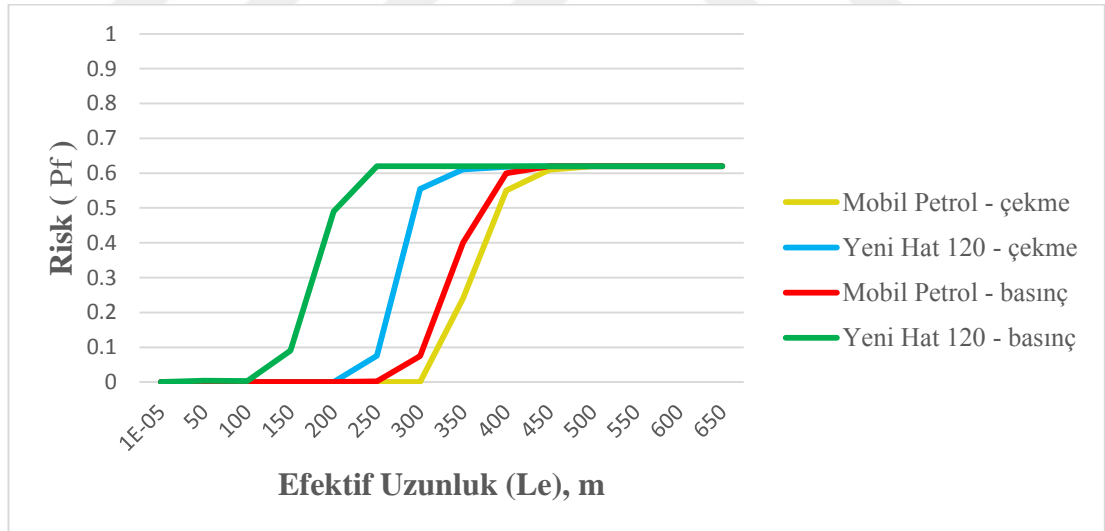
Boru isimleri	Çekme	Basınç
Granada Ana Hattı	0.0000	0.6120
Rinaldi Ana Hattı	0.1553	0.6105
Mobil Petrol Hattı	0.0000	0.0005
Yeni Hat 120	0.0000	0.0000

Şekil 6.1 ve Şekil 6.2 sırasıyla hasar gören ve görmeyen boru hatlarının MVFOSM'ye göre risk değerlerinin grafiklerini vermektedir. Grafiklerde değişken parametre olarak efektif uzunluk ( $L_e$ ) kullanılmıştır. Boruların bulunduğu bölgede yer

hareketleri kapsamlı çalışmalarla belirlendiği için varyasyon katsayısı %10 olarak alınmıştır. Hasar gören ve görmeyen boruların risk değerleri karşılaştırıldığında efektif uzunluk değerlerine göre çok net bir farklılık olduğu görülmektedir. Hasar gören boru hatları, basınç etkisi altında, çok düşük efektif uzunluk değerlerinde en yüksek hasar görme olasılığına ulaşmıştır.



Şekil 6.1: Granada ve Rinaldi boru hatları için MVFOSM sonuçları grafiği



Şekil 6.2: Mobil Petrol ve Yeni Hat 120 boru hatları için MVFOSM sonuçları grafiği

Çekme durumunda ise boru eklerinin çekmeye daha dayanıklı olmasından dolayı daha büyük efektif uzunluk değerlerinde en yüksek hasar seviyesine ulaşılmıştır. Hasar görmeyen boru hatlarında riskin başlangıç değerlerine karşılık gelen efektif uzunluk miktarı, hasar gören boruların en yüksek değerinden daha fazla olmuştur. Diğer bir deyişle hasar gören borularda risk en üst seviyeye çıktığında hasar

görmeyen borular için risk daha sıfır seviyelerindedir. Boruların bulunduğu bölgede yapılan incelemeler ve gerçekleştirilen deterministik analizlere göre efektif uzunluğun ortalama değeri Granada ve Rinaldi borularının çekme kuvveti etkisi altında ortalama 76 m, basınç kuvveti etkisi altında ise 14 m'dir. Mobil Petrol ve Yeni Hat 120 borularında sırasıyla çekme kuvveti için ortalama 328 m ve basınç kuvveti için 173 m'dir. Bu açıdan bakıldığında buradaki sonuçlarla daha önce gerçekleştirilmiş deterministik analizlerin uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

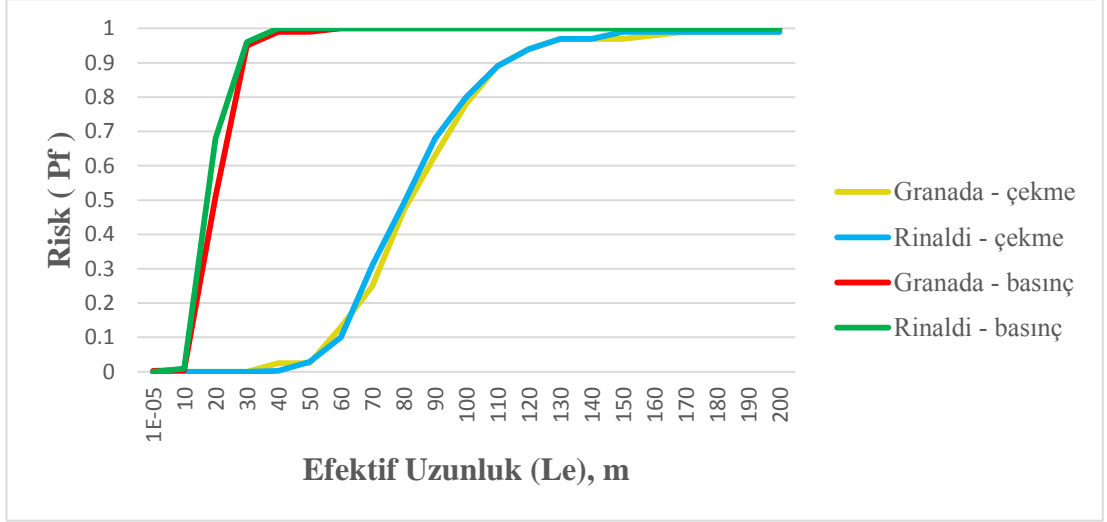
### 6.1.2 AFOSM Yöntemine Göre Analiz Sonuçları

Uygulanan ortalama değer birinci mertebeli ikinci moment yönteminden sonra analizler bir üst adıma taşınmış ve hatlar üzerindeki riskin daha sağlıklı bir şekilde hesaplanması hedeflenmiştir. Geliştirilmiş ortalama değer birinci mertebeli ikinci moment yöntemi uygulandığında Granada ve Rinaldi ana hatlarının basınç etkisi altında risklerinde bir miktar düşme, Rinaldi hattının çekme etkisi altındaki riskinde ise bir miktar artma olduğu gözlenmektedir (Tablo 6.2).

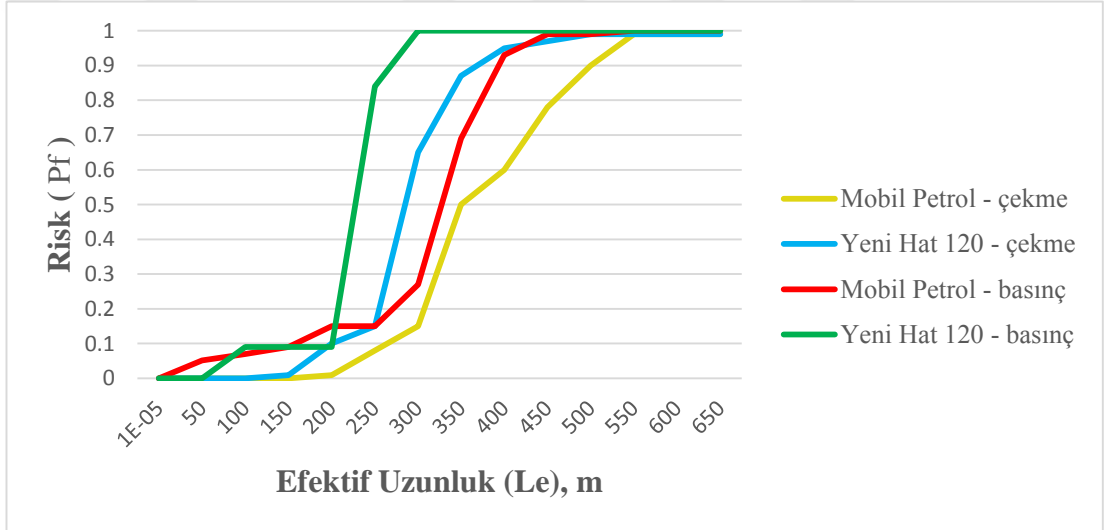
**Tablo 6.2:** AFOSM yöntemine göre çekme ve basınç durumu için borularda oluşan risk sonuçları

Boru isimleri	Çekme	Basınç
Granada Ana Hattı	0.0000	0.5010
Rinaldi Ana Hattı	0.2421	0.5001
Mobil Petrol Hattı	0.0000	0.0000
Yeni Hat 120	0.0000	0.0000

Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 sırasıyla hasar gören ve görmeyen boru hatlarının AFOSM'ye göre risk değerlerinin grafiklerini vermektedir. Grafiklerde değişken parametre olarak efektif uzunluk ( $L_e$ ) kullanılmıştır. Boruların bulunduğu bölgede yer hareketleri kapsamlı çalışmalarla belirlendiği için varyasyon katsayısı 10% olarak alınmıştır. Hasar gören ve görmeyen boruların risk değerleri karşılaştırıldığında efektif uzunluk değerlerine göre çok net bir farklılık olduğu görülmektedir. Hasar gören boru hatları, basınç etkisi altında, çok düşük efektif uzunluk değerlerinde en yüksek hasar görme olasılığına ulaştığı görülmektedir. Çekme durumunda boru hatlarının çekme gerilmelerine olan toleransından dolayı daha yüksek efektif uzunluklara dayandığı görülmektedir.



Şekil 6.3: Granada ve Rinaldi boru hatları için AFOSM sonuçları grafiği



Şekil 6.4: Mobil Petrol ve Yeni Hat 120 boru hatları için AFOSM sonuçları grafiği

Hasar görmeyen boru hatlarında riskin başlangıç değerlerine karşılık gelen efektif uzunluk miktarı, hasar gören boruların en yüksek değerinden daha fazla olmuştur. Boruların bulunduğu bölgede yapılan incelemeler ve gerçekleştirilen deterministik analizlere göre efektif uzunluğun ortalama değeri Granada ve Rinaldi borularının çekme kuvveti etkisi altında ortalama 86 m, basınç kuvveti etkisi altında ise 23 m'dir. Mobil Petrol ve Yeni Hat 120 borularında sırasıyla çekme kuvveti için 331 m, basınç kuvveti için 177 m'dir. Bu açıdan bakıldığında buradaki sonuçlarla daha önce gerçekleştirilmiş deterministik analizlerin uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

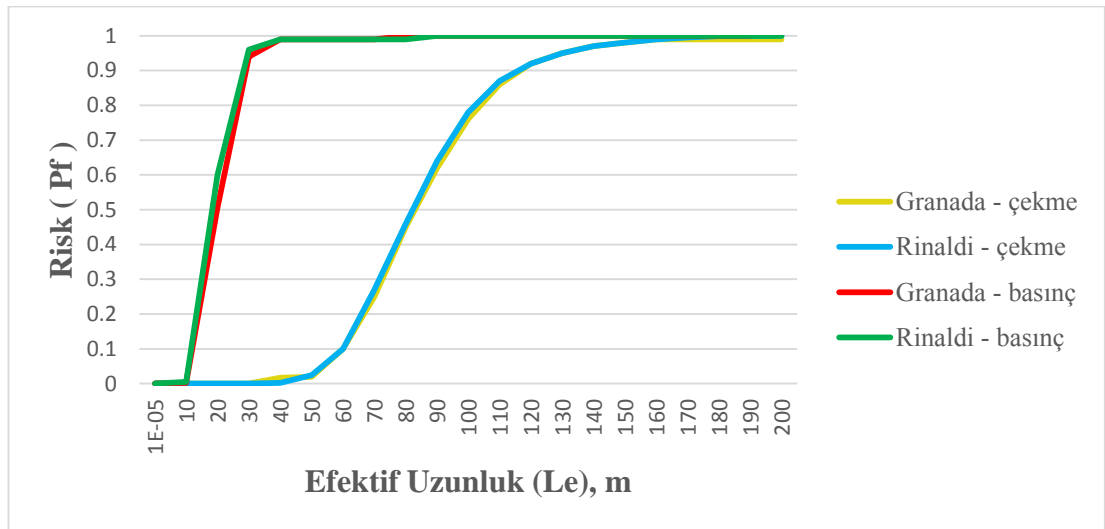
### 6.1.3 MCS YöntemineGöre Analiz Sonuçları

İncelenen boru hatlarının hasar görme olasılıkları (risk) her bir durum için 50.000 Monte Carlo Simülasyonu yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Belirlenen bu simülasyon miktarı önem örnekleme yöntemi ile belirlenmiş ve yapılan çalışmalar ışığında miktarın arttırılmasının sonucu etkilemediği tespit edilmiştir. Simülasyonlarda kullanılan parametre değerleridaha önceki yöntemlerde belirtildiği gibi Tablo 3.5'de verilmektedir. Bu değerler sonucunda borularda çekme ve basınç yönünden oluşan risk faktörü Tablo 6.3'de gösterilmiştir.

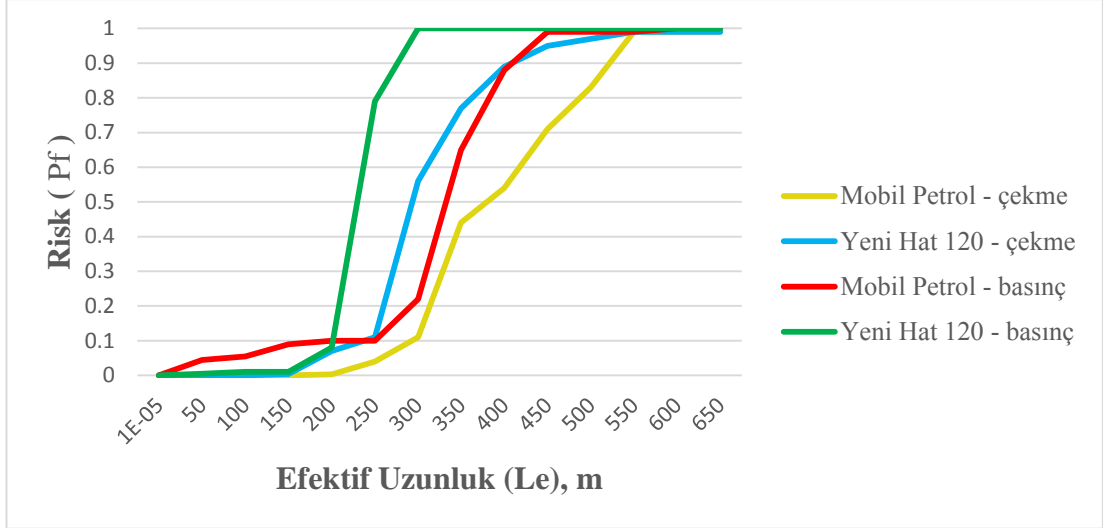
**Tablo 6.3:** MCS yöntemine göre çekme ve basınç durumu için borularda oluşan risk sonuçları

Boru isimleri	Çekme	Basınç
Granada Ana Hattı	0.0000	0.6502
Rinaldi Ana Hattı	0.3078	0.6807
Mobil Petrol Hattı	0.0000	0.0000
Yeni Hat 120	0.0005	0.0000

Monte Carlo Simülasyonu yöntemi sonucu elde edilen veriler değerlendirildiğinde MVFOSM ve AFOSM yöntemlerinde elde edildiği gibi Granada ve Rinaldi ana hatlarının basınç etkisi altında hasar aldığı bu yöntem sonucundada görülmüştür. Hasar görmeyen Mobil Petrol ve Yeni Hat 120 bu yöntemde de sağlamlığını korumaktadır (Şekil 6.5 ve Şekil 6.6).



**Şekil 6.5:** Granada ve Rinaldi boru hatları için MCSM sonuçları grafiği



**Şekil 6.6:** Mobil Petrol ve Yeni Hat 120 boru hatları için MCSM sonuçları grafiği

Boruların bulunduğu bölgede yapılan incelemeler ve gerçekleştirilen deterministik analizlere göre efektif uzunluğun ortalama değeri Granada ve Rinaldi borularının çekme kuvveti etkisi altında ortalama 83 m, basınç kuvveti etkisi altında ise 21 m'dir. Mobil Petrol ve Yeni Hat 120 borularında sırasıyla çekme kuvveti için ortalama 321 m ve basınç kuvveti için 239 m'dir. Bu açıdan bakıldığında buradaki sonuçlarla daha önce gerçekleştirilmiş deterministik analizlerin uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Günümüzde boru hatlarını işleten kurumlar, hatların maruz kaldıkları riskleri belirleme ve azaltma değerlendirmelerinde güvenilirlik analizlerini geçmişteki uygulamalara göre çok daha yaygın olarak kullanmaya başlamışlardır. Boru hatlarının maruz kaldığı riskler doğal afetler gibi nedenlerden olduğu kadar insan merkezli etkilerden de kaynaklanabilir. Güvenilirlik analizleri ise farklı kaynaklardan gelen bütün riskleri birleştirerek toplam riskin belirlenmesi imkânını vererek karar vericilerin önüne önemli seçenekler sunabilmektedir. Yapımı esnasında uygulanan boruların şeklinden kaynaklı yapılan azaltmalar olmasa deprem anında hasar gören bu borular hasar görmeyecek ve işlevlerine devam etme durumunda olacaklardı.



## 7. KAYNAKLAR

Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., Boyce, G. M., "Slope Stability and Stabilization Methods", John Wiley and Sons, Inc, (2002).

Ahammed, M. and Melchers, R. E., "Probabilistic Analysis of Underground Pipelines Subject to Combined Stress and Corrosion", Engineering Structures, Vol. 19, No:12, pp. 998-994, Elsevier, (1997).

Ahammed, M., "Probabilistic Estimation of Remaining Life of a Pipeline in the Presence of Active Corrosion Defects", International Journal of Pressure Vessels and Piping 75, pp. 321–329, Elsevier, (1998)

Ayala, A. G., and O'Rourke, M. J., "Effects of the 1985 Michoacan Earthquake on Water Systems and Other Buried Lifelines in Mexico", NCEER-89-0009, NCEER, Buffalo, NY, March, (1989).

Aydan, Ö., Kumsar, H. ve Toprak, S., "The 2009 L'Aquila Earthquake (Italy): Its Characteristics and Implications for Earthquake Science and Earthquake Engineering", Yerbilimleri, An Earth Science Journal, Vol. 30, No 3, pp 235-258, (2009).

Baecher, G. B., Christian, J. T., "Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering", John Wiley and Sons, Inc, (2003).

Bayazıt, M., "Mühendislikte Güvenilirlik ve Risk Analizi", Birsen Yayınevi, İstanbul, (2007).

Brockenbrough, R. L., "Strength of Bell and Spigot Joints", Journal of Structural Engineering, Vol. 116, No. 7, pp. 1983-1991, (1990).

Businessinsider, "Devastating photos show the damage from the 1994 Northridge earthquake in Los Angeles. It could pale in comparison to the next 'Big One.' [online]", (02.08.2019), <https://www.businessinsider.com/photos-1994-northridge-earthquake-in-los-angeles-2019-1>, (2019).

Choi, S., Grandhi, R. V., Canfield, R. A., "Reliability-Based Structural Design", Springer, (2007).

Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines, "Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems", ASCE, New York, NY, (1984).

Fenton, G. A., Griffiths, D. V., "*Risk Assessment in Geotechnical Engineering*", John Wiley and Sons, Inc, (2008).

Frank, P., Clarence, Allen., "Patterns of Seismic Release in the Southern California Region", Journal of Geophysical Research, Vol. 100, No. B4, pp. 6421-6430, (1995).

Hecker, S., Ponti, D. J., Garvin, C. D., Powers, T. J., Fumal, T. E., Hamilton, J. C., Sharp, R. V., Rymer, M. J., Prentice, C. S. and Cinti, F. R., "Ground Deformation in Granada Hills and Mission Hills Resulting from the January 17, 1994, Northridge, California, Earthquake", Open File Report 95-62, U.S. Geological Survey, Menlo Park, CA, (1995a).

Hecker, S., Ponti, D. J., Garvin, C. D., Hamilton, J. C., "Characteristics and Origin of Ground Deformation Produced in Granada Hills and Mission Hills During the January 17, 1994, Northridge, California, Earthquake", Special Publication 116, M. C. Woods and W. R. Seiple, Eds., Division of Mines and Geology, Sacramento, CA, (1995b).

Hobbs, R. E., "Pipeline Buckling Caused by Axial Loads", Journal of Constructional Steel Research, January, Vol.1, No. 2, pp. 2-10, (1981).

Holzer, T. L., Bennett, M. J., Tinsley, J. C., Ponti, D. J. and Sharp, R. V., "Causes of Ground Failure in Alluvium During the Northridge, California, Earthquake of January 17, 1994", M. Hamada and T. D. O'Rourke, Eds., Technical Report NCEER-96-0012, NCEER, Buffalo, NY, Sept., pp. 345-360, 19, (1996).

Huang, J., McBean, E. A., James, W., "A Review of Reliability Analysis for Water Quality in Water Distribution Systems", *Journal of Water Management Modeling* R223-07. doi: 10.14796/JWMM.R223-07, (2005).

Hudnut, K. W., Murray, M.H., Donnelan, A., Bock, Y., Fang, P., Cline, M., Feng, Y., Shen, Z., Hager, B., Herring, T. ve King, R., "Co-seismic Displacements of the 1994 Northridge, California Earthquake", *Seismological Research Letters*, Vol. 65, No. 1, (1994).

ISO 2394 "General Principles on Reliability for Structures", Fourth Edition, (2015).

Marek, P.J. and Daniels, J.H., "Behavior of Continuous Crane Rails", *Journal of the Structural Division, ASCE*, April, Vol. 97, No. ST4, pp. 1081-1095, (1971).

Meyersohn, W. D., "Analytical and Design Considerations for the Seismic Response of Buried Pipelines", Thesis, Graduate School of Cornell University, January, (1991).

Newmark, N. M. ve Hall, W. J., "Pipeline Design to Resist Large Fault Displacement", *Proceedings of the 1975 U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Ann Arbor, Michigan, pp. 416-425, (1975).

O'Rourke, M. J. and Nordberg, C., "Longitudinal Permanent Ground Deformation Effects on Buried Continuous Pipelines", NCEER-92-0014, NCEER, Buffalo, NY, June, (1992).

O'Rourke, M. J., Liu, X., "Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects", NCEER, Buffalo, NY, (1999).

O'Rourke, M. J., ve Ballantyne, D., "Observations on Water System and Pipeline Performance in the Limon Area of Costa Rica Due to the April 22, 1991 Earthquake", Technical Report NCEER-92-0017, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY, (1992).

O'Rourke, T. D., Palmer, M. C., "The Northridge, California Earthquake of January 17, 1994: Performance of Gas Transmission Pipelines", NCEER, Buffalo, NY, May, (1994).

O'Rourke, T. D., and Toprak, S., "GIS Assessment of Water Supply Damage from the Northridge Earthquake", Frost, J. D. (Ed.) Geotechnical Special Publication, ASCE, New York, pp: 117-131,(1997).

O'Rourke, T. D., "An Overview of Geotechnical and Lifeline Earthquake Engineering", In Geotechnical Special Publication No. 75, ASCE (Pakoulis, P., Yegian, M., Holtz, D. (eds.)), Reston, VA, 1998, II, pp. 1392-1426,(1998).

O'Rourke, T. D., Toprak, S., and Sano, Y., "Factors Affecting Water Supply Damage Caused by the Northridge Earthquake", Proceedings, Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, WA, pp: 1-12,(1998).

O'Rourke, M. J., and Ayala, G., "Pipeline Damage Due To Wave Propagation", *J. Geotech. Eng.*, ASCE, 119 (9), 14901498,(1993).

O'Rourke, M.J., Liu, X.J., and Flores-Berrones, R., "Steel Pipe Wrinkling Due to Longitudinal Permanent Ground Deformation", *Journal of Transportation Engineering*, September/October, Vol. 121, No. 5, pp. 443-451, (1995).

O'Rourke, T.D. and Tawfik, M.S., "Effects of Lateral Spreading on Buried Pipelines During the 1971 San Fernando Earthquake", *Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment*, PVP-77, ASME, New York, June, pp. 124-132, (1983).

Ostfeld, A., Kogan, D., Shamir, U., "Reliability Simulation of Water Distribution System - Single and Multiquality", *Urban Water*, Vol. 4, pp. 53-61, (2002).

Özaydın, K., "Zeminlerde Sıvılaşma", Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim 2007, İstanbul, (2007).

Pakyürek, E. K., "1994 Northridge Depreminde Hasar Görmüş Van Nuys Binasının Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, (2006).

Papadrakakis, M., Papadopoulos, V., Lagaros, N. D., "Structural Reliability Analysis of Elastic-Plastic Structures Using Neural Networks and Monte Carlo Simulation", Institute of Structural Analysis and Seismic Research, National Technical University of Athens, Athens 15773, Greece, (1995).

Ramberg, W. and Osgood, W., "Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters", Technical Note, No. 902, National Advisory Committee for Aeronautics, 28p, (1943).

Rubinstein, R. Y., "*Simulation and the Monte Carlo Method*", John Wiley and Sons, (1981).

Sano, Y., "GIS Evaluation of Northridge Earthquake Ground Deformation and Water Supply Damage", M.Sc Thesis, Cornell University, Ithaca, NY, Jan, (1998).

Shakal, A. F., Huang, M., Darragh, R., Cao, T., Sherburne, R., Malhotra, P., Cramer, C., Syndor, R., Graizer, C., Maldonado, G., Peterson, C. ve Warnpole, J., "CSMIP Strong Motion Records From the Northridge, California Earthquake of 17 January 1994", Report No. OSMS 94-07, California Strong Motion Instrumentation Program, pp. 308, (1994).

Smith, D. J., Simpson, K. G. L., "*Functional Safety*", Elsevier Butterworth-Heinemann, (2004).

Sun, S., Shien, L., "Analysis of Seismic Damage to Buried Pipelines in Tangshan Earthquake", Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment, PVP-77, ASME, NY, June, pp. 365-367, (1983).

Tawfik, M. S.i O'Rourke T. D., "Load-Carrying Capacity of Welding Slip Joints", Journal of Pressure Vessel Technology, ASME, Vol. 107, No. 1, pp. 36-43, (1985).

Thomopoulos, N. T., "*Essentials of Monte Carlo Simulation*", Springer, (2013).

Todinov, M. T., "*Risk Based Reliability Analysis and Generic Principles for Risk Reduction*", Elsevier, (2006).

Toprak, S., "Altyapı Sistemlerinin Deprem Güvenliği, Geoteknik Sorunlar ve Yönetmelikler", Yedinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 30 Mayıs 2011 - 3 Haziran 2011, İstanbul, Türkiye, (2011).

Toprak, S., "Earthquake Effects on Buried Lifeline Systems", Ph.D. Thesis, Cornell University, Ithaca, NY, USA, (1998).

Toprak, S., Koç, A. C., and Taşkın, F., "Evaluation of Water Distribution Pipeline Performance Against Earthquakes", Paper No:1748, 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, June 25-28 2007, Greece, (2007).

Toprak, S., "Gömülü Boru Hattı Sistemlerinin Tasarımında Deprem Etkilerinin Değerlendirilmesi", INGAS-2007, 2. Uluslararası Gaz İşletmeciliği Sempozyumu ve Sergisi, 24-26 Nisan 2007, İstanbul, Türkiye, (2007).

Toprak, S., Çetin, O. A., Nacaroğlu, E., Koç, A. C., "Pipeline Performance Under Longitudinal Permanent Ground Deformation", Paper No: 1407, 14th European Conference on Earthquake Engineering (14th ECEE 2010), 30 August - 3 September 2010, Ohrid, Macedonia, (2010).

Toprak, S., Çırmıktılı, Ö, Y., Koç, A. C., İmançlı, G., Tsakiris, G, and Vangelis, H., "Boru Hatlarının Eksenel Doğrultuda Zemin Hareketleri Etkisi Altında Güvenirlilik Analizi" 17. Ulusal Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Konferansı, (2018).

Toprak, S., Koç, A. C., Güngör, M., Kaya, M., Stathaki, A., Sofotasios, D., Tsakiris, G., Vangelis, H., De Angelis, E., Iacovou, G., Charalambous, B., "Su Dağıtım Borularının Doğal Afetlere Karşı Koruyucu Bakımı: PM4WAT Projesi Uygulaması", Bildiri No: 181, Yedinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 30 Mayıs 2011 - 3 Haziran 2011, İstanbul, Türkiye, (2011).

Toprak, S., Taskin, F., "Estimation of Earthquake Damage to Buried Pipelines Caused by Ground Shaking", Natural Hazards, Springer, the Netherlands, Vol. 40, pp. 1-24, (2007).

Toprak, S., Yoshizaki, K., "Boru Hatlarına Deprem Yüklerinin Etkisi", 5. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 26-30 Mayıs 2003, İstanbul, CD, (2003).

Tsai, J. S., Jou, L. D., Lin, S. H., "Damage to Buried Water Supply Pipelines in the Chi-Chi (Taiwan) Earthquake and a Preliminary Evaluation of Seismic Resistance of Pipe Joints", Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 23, No. 4, (2000).

U.S Army Corps of Engineers ETL 1110-2-547., "Introduction to Probability and Reliability Methods for Use in Geotechnical Engineering", (1997).

Wald, D. ve Heaton, T., " A Multidisciplinary Source Analysis of the 1994 (Mw=6.7) Northridge Earthquake Using Strong Motion, Teleseismic and Geodetic Data", Seismological Research Letters, Vol. 65, No. 1, (1994).

Yavuz, E. A., "Reliability Based Safety Assessment of Buried Continuous Pipelines Subjected to Earthquake Effects", M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, (2013).

Zio, E., "An Introduction to the Basics of Reliability and Risk Analysis", World Scientific, (2007).

## 8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ömer Yaşar ÇIRMIKTILI

Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul - 16/07/1990

Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Elektronik posta : omercirmiktili@hotmail.com

İletişim Adresi : Pamukkale Üniversitesi Mühendislik  
Fakültesi B Blok İnşaat Mühendisliği Bölümü

**Yayın Listesi** :

- Koç, A. C., Demir, Ü. S., Toprak, S., Sarı, M., Nacaroglu, E., **Çırmıklı, Ö, Y.**, “Su Dağıtım Sistemlerinin Sağlık ve Hasar Görebilirliğinin Graf Tabanlı İndislerle Değerlendirilmesi” International Symposium of Water and Wastewater Management, (2016).
- Toprak, S., **Çırmıklı, Ö, Y.**, Koç, A. C., İmançlı, G., Tsakiris, G, and Vangelis, H., “Boru Hatlarının Eksenel Doğrultuda Zemin Hareketleri Etkisi Altında Güvenirlik Analizi” 17. Ulusal Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Konferansı, (2018).