

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KOCAELİ GÖMÜLÜ BORU HATLARININ DALGA YAYILIMI
KAYNAKLI HASARININ DEĞERLENDİRMESİ

DERYA ŞİMŞEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMAN: DOÇ.DR. ABDULLAH CAN ZÜLFİKAR

EKİM 2024

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KOCAELİ GÖMÜLÜ BORU HATLARININ DALGA YAYILIMI
KAYNAKLI HASARININ DEĞERLENDİRMESİ

DERYA ŞİMŞEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMAN: DOÇ.DR. ABDULLAH CAN ZÜLFİKAR

EKİM 2024

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**ASSESSMENT OF WAVE PROPAGATION-INDUCED
DAMAGE OF BURIED PIPELINES IN KOCAELI**

DERYA ŞİMŞEK

**A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
EARTHQUAKE AND STRUCTURAL ENGINEERING
PROGRAM**

ADVISOR: ASSOC. PROF. DR. A.CAN ZÜLFİKAR

OCTOBER 2024

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 04/07/2024 tarih ve 2024/34 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 18/10/2024 tarihinde tez savunma sınavı yapılan DERYA ŞİMŞEK'in tez çalışması İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Deprem ve Yapı Mühendisliği Programında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : DOÇ. DR. ABDULLAH CAN ZÜLFİKAR

ÜYE

: PROF.DR. FERİT ÇAKIR

ÜYE

: DR. ÖĞR.ÜYESİ OKAN İLHAN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR



Biricik Aileme ve

depremlerde hayatını kaybeden

tüm insanlara...

ÖZET

Bu tez, Kocaeli bölgesindeki tarihsel depremleri ve bu depremlerin sismik aktivitelerinin etkilerini incelemektedir. Kocaeli, Türkiye'nin deprem açısından en aktif bölgelerinden biri olduğu için bu çalışma büyük önem taşımaktadır. Çalışmanın amacı, bölgedeki tarihsel depremlerin analizini yaparak, bu depremlerin kentsel altyapı üzerindeki etkilerini ve gelecekteki olası riskleri değerlendirmektir.

Tezde, Kocaeli'ndeki büyük depremler tarihsel olarak ele alınmış ve bu depremlerin kentsel altyapı üzerindeki etkileri detaylı biçimde incelenmiştir. Literatür taraması ve tarihsel veri analizi yöntemleriyle, mevcut çalışmalar gözden geçirilmiş ve deprem tehlikesi ile ilgili haritalar ve raporlar değerlendirilmiştir. Ayrıca, bölgedeki zemin özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Dijital Yükselti Haritası (DEM) verileri ve V_{s30} (ortalama zemin hızı) değerleri hesaplanmış, bu veriler boru hatlarının onarım oranlarını tahmin etmek için kullanılmıştır. Fay kesmesi, sıvılaşma ve heyelana maruz kalabilecek pilot çalışma alanı olarak belirlenen Kocaeli İli sınırları içerisindeki gömülü boru hatları tespit edilerek, boru hatlarıyla birlikte bu elemanları çevreleyen zemin özellikleri sayısallaştırılmıştır.

Bu çalışma, Kocaeli bölgesinde meydana gelen depremlerin kentsel altyapı üzerindeki etkilerini inceleyerek, altyapı sistemlerinin depreme karşı dayanıklılığını artırmaya yönelik stratejilerin belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Bölgedeki zemin özelliklerinin ve sismik risklerin analiz edilmesi, boru hatlarının hasar oranlarını tahmin etmede kritik bir rol oynamaktadır. Elde edilen veriler, deprem tehlikesi ve riskinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmakta, olası depremler için alınması gereken önlemler konusunda değerli bilgiler sunmakta ve bu bilgilerin kentsel altyapının güçlendirilmesi sürecinde rehberlik etmesi beklenmektedir. Bu tez, Kocaeli bölgesindeki tarihsel depremler ve bunların altyapı üzerindeki etkileri üzerine kapsamlı bir değerlendirme sunarak, gelecekteki olası depremlere karşı alınabilecek önlemler için önemli katkılar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kentsel Altyapı ,Boru Hatları, Deprem Tehlike, Deprem Risk Analizi, Deprem Hasarı.

ABSTRACT

This thesis examines historical earthquakes in the Kocaeli region and the impact of seismic activities on the area. As one of the most seismically active regions in Turkey, Kocaeli is a critical location for such a study. The primary aim of the research is to analyze the historical earthquakes in the region, assess their impacts on urban infrastructure, and evaluate potential future risks.

The thesis discusses major historical earthquakes in Kocaeli and explores their effects on urban infrastructure in detail. Literature review and historical data analysis methods were employed, with existing studies being reviewed and earthquake hazard maps and reports evaluated. Additionally, Digital Elevation Model (DEM) data and Vs30 (average shear wave velocity) values were used to determine the region's soil properties. These data were also utilized to predict the repair rates of pipelines. Embedded pipelines within the Kocaeli province boundaries were identified, and the surrounding soil properties were digitized, focusing on areas potentially affected by faulting, liquefaction, and landslides.

This study contributes to understanding the effects of earthquakes on urban infrastructure in Kocaeli and helps formulate strategies to enhance the seismic resilience of infrastructure systems. The analysis of soil characteristics and seismic risks plays a crucial role in predicting the damage rates of pipelines. The data obtained from this study are valuable for understanding earthquake hazards and risks, offering essential insights for future preventive measures and guiding the process of strengthening urban infrastructure. This thesis provides a comprehensive assessment of historical earthquakes in Kocaeli and their impact on infrastructure, making significant contributions to determining measures for future earthquakes.

Keywords: Urban Infrastructure, Pipelines, Earthquake Hazard, Earthquake Risk Analysis, Earthquake Damage.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, kendisine ne zaman danışsam bana kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan, her sorun yaşadığımda yanına çekinmeden gidebildiğim, güler yüzünü ve samimiyetini benden esirgemeyen ve kendisinden çok şey öğrendiğim gibi gelecek mesleki hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağımı düşündüğüm kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Abdullah Can ZÜLFİKAR'a sonsuz saygılarımla teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam ve hayatım boyunca yaptığım her işte yanımda olan maddi ve manevi desteğini esirgemeyen biricik aileme, dostluğu ve desteğiyle beni her zaman motive eden arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerim ile en içten sevgi, saygılarımı sunarım.

Son olarak, bu çalışmanın ve hayatımın her anında bana güç ve esenlik veren Yüce Allah'a hamd ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
TABLolar/ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ	1
2. DEPREM TEHLİKESİ VE KENTSEL ALTYAPI	2
2.1. Deprem Tehlikesi,Riski ve Hasar Görebilirlik Kavramları	2
2.2. Kentsel Altyapının Önemi	3
2.3. Geçmiş Depremler ve Altyapı Üzerindeki Etkileri	5
2.3.1. 1906 San Francisco Depremi (ABD)	5
2.3.2. 1964 Alaska Depremi (ABD)	6
2.3.3. 1971 San Fernando Depremi (ABD)	7
2.3.4. 1989 Loma Prieta Depremi (ABD)	8
2.3.5. 1990 Manjil Depremi (İran)	8
2.3.6. 1994 Northridge Depremi (ABD)	9
2.3.7. 1995 Kobe Depremi (Japonya)	10
2.3.8. 1999 İzmit Depremi (Türkiye)	11
2.3.9. 1999 Chi Chi Depremi (Tayvan)	12
2.3.10. 2010 Port-au-Prince Depremi (Haiti)	13
2.3.11. 2011 Christchurch Depremi (Yeni Zelanda)	13
2.3.12. 2011 Tohoku Depremi ve Tsunamisi (Japonya)	15
2.3.13. 2023 Kahramanmaraş Depremi (Türkiye)	15
2.4. Gömülü Boru Hatlarının Deprem Tasarım Yönetmelikleri	16
2.4.1. ABD Yönetmeliği	16
2.4.2. Çin Yönetmeliği	17
2.4.3. Hindistan Yönetmeliği	18
2.4.4. Meksika Yönetmeliği	19
2.4.5. Japonya Yönetmeliği	19
2.4.6. Türkiye Yönetmeliği	20

3. GÖMÜLÜ BORU HATLARI VE BİLEŞENLERİ	21
3.1. Boru Hatlarının Türleri	21
3.1.1. Su Boru Hatları	21
3.1.2. Doğalgaz Boru Hatları	21
3.1.3. Petrol Boru Hatları	21
3.1.4. Atık Su Boru Hatları	22
3.2. Boru Hatlarının Özellikleri	22
3.2.1. Malzeme Özellikleri	23
3.2.2. Bağlantı ve Montaj Detayları	24
3.2.3. İzolasyon ve Koruma	24
3.3. Gömülü Boru Hatlarında Hasara Neden Olan Faktörler	24
3.3.1. Deprem Yüklerinin Boru Hatlarına Etkisi	25
3.3.2. Hasara Neden Olan Faktörler	26
3.4. Boru Hatlarının Deprem Dayanıklılığı	27
3.4.1. Malzeme Seçimi	27
3.4.2. Boru Bağlantıları	27
3.4.3. Yerleşim Derinliği ve Zemin İyileştirmesi	28
3.5. Boru Hatlarının Deprem Performansı Değerlendirme Yöntemleri	28
3.5.1. Yapısal Analiz ve Modelleme	28
3.5.2. Sismik Dalga Yayılımı Analizleri	29
3.5.3. DeneySEL Yöntemler	30
3.5.4. Hasar Gözlem ve Değerlendirme	30
3.6. Kocaeli Örneğinde Boru Hatları ve Altyapı Sistemleri	31
4. KOCAELİ BÖLGESİ DEPREM TEHLİKE ANALİZİ	33
4.1. Kocaeli'nin Deprem Tarihçesi	33
4.1.1. Tarihsel Dönem Depremleri (1900 Öncesi)	33
4.1.2. Aletsel Dönem Depremleri (1900 Sonrası)	36
4.2. Kocaeli Bölgesinin Jeolojik Özellikleri	36
4.2.1. Çaycuma Formasyonu	36
4.2.2. Kartal Formasyonu	37
4.2.3. Kızılçay Formasyonu	37
4.2.4. Tüf Formasyonu	37
4.3. Kocaeli Bölgesinin Tektonizması	37
4.4. Olasılıksal Sismik Tehlike Modelleri	41
4.4.1. Bölgesel Olasılıksal Sismik Tehlike Haritaları ve Modelleri	41
4.4.2. 2020 Avrupa Sismik Tehlike Modeli-ESHM20	47
4.4.2.1. Homojen (Birleştirilmiş) Deprem Kataloğu	47
4.4.2.2. Ayırıştırma Analizi	51
4.4.2.3. Tamamlılık Analizi	52
4.4.2.4. Sismojenik Kaynak Modeli	54
4.5. Kocaeli Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi	59
4.5.1. HücreSEL Zemin Bilgilerinin Elde Edilmesi	59
4.5.2. Şebeke Elemanlarının Envanter Bilgilerinin Elde Edilmesi	64
4.5.3. Zemin Koşulunun Belirlenmesi	66
4.5.4. Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi ve Sonuçları	67
4.5.4.1. Sismik Tehlike Haritaları	71
4.5.4.2. Tehlike Spektrumları	72
4.5.4.3. Deprem Spektrumlarının Kıyaslanması	75

5.GÖMÜLÜ BORU HATLARINDA HASAR DEĞERLENDİRMESİ	78
5.1. Dalga Yayılımına Bağlı Hasar Değerlendirmesi	79
5.1.1. Sismik Dalgaların Türleri ve Dinamik Etkileri	79
5.1.2. Zemin Özelliklerinin Dalga Yayılımına Etkisi	80
5.1.3. Dalga Frekansı ve Rezonans Etkisi	80
5.2. Kalıcı Zemin Deformasyonu(PSD) Bağlı Hasar Değerlendirmesi	81
5.3. Boru Hattı Hasarı İçin Mevcut Ampirik Kırılgenlık Eğrileri	86
5.4. Kocaeli Boru Hatlarının Hasar Değerlendirmesi	96
6. SONUÇLAR	100
KAYNAKLAR	102
ÖZGEÇMİŞ	115
TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR	116



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

a	: Yamaç eğimi
a_c	: Kritik ivme seviyesi
AD	: Ortalama fay yer değiştirmesi
A_m	: Dalga yayılım yönüne dik maksimum yer değiştirme ivmesi
$B\mathcal{S}D$	: Birim şekil değiştirme
C	: Deprem dalgasının yayılma hızı
C_d	: Boru çapı katsayısı
C_g	: Zemin durumu katsayısı
C_l	: Sıvılaşma katsayısı
C_p	: Boru malzemesi katsayısı
δ	: PSD miktarı
DH	: Yatay zemin depolaması
DN	: Kayma bloğunun yer değiştirmesi
DY	: Dalga yayılımı
ε_g	: Zemindeki büyük deformasyon miktarı
FY	: Plastik davranış halindeki eksenel kuvvet
g	: Yer çekimi ivmesi
H	: Serbest yüzey yüksekliği
I_0	: Episentral şiddeti
I_a	: Aria şiddeti
κ_g	: Zemindeki eğrilik miktarı
K_H	: Zemin rijitliği
L	: PSD bölgesinin boyuna genişliği
L_H	: Fay ile ankraj noktası arasındaki mesafe
$\log \log (S)$	: Fayın boyutu (logaritmik ölçekte)
M	: Deprem moment büyüklüğü
M_b	: Cisim dalgası büyüklüğü
M_c	: Tamamlanma büyüklüğü
M_l	: Yerel (Lokal) büyüklük
M_{max}	: Maksimum deprem büyüklüğü
M_s	: Yüzey dalgası büyüklüğü
M_w	: Moment büyüklüğü
PGA	: Maksimum yatay yer ivmesi
PGD	: Pik sismik deformasyon
PGV	: Pik yer değiştirme ivmesi
PGV_{GM}	: Yatay yönlerde ait PGV'lerin geometrik ortalaması
PGV_{MVM}	: PGV'nin maksimum vektör büyüklüğü
PSD	: Pik saha deformasyonu
PSD_{FH}	: Yanal atımlı fayından kaynaklanan yatay yer değiştirme
R	: Sismik enerji kaynağına en yakın uzaklık
R_m	: Su borularında meydana gelen hasar oranı (<i>hasar sayısı /km</i>)
RR	: Onarım oranı
s	: Fayın boyutu (uçtan uca uzunluk)
S	: Yüzde olarak yüzey eğimi

S_a	: Spektral İvme
T	: Periyot
θ	: Fay eğimi ile boru hattı eksenini arasındaki açı
V_m	: Dalga geçiş yönünde maksimum yer değiştirme hızı
V_{max}	: Pik yer değiştirme hızı
V_s	: Kayma hızı dalgası
w	: PSD bölgesinin enine genişliği
W	: Yüzde olarak serbest yüzey oranı
ALA	: American Lifelines Alliance (Amerikan Yaşam Hatları İttifakı)
API	: American Petroleum Institute (Amerikan Petrol Enstitüsü)
ASCE	: American Society of Civil Engineers (Amerikan İnşaat Mühendisleri Derneği)
ASME	: American Society of Mechanical Engineers (Amerikan Makine Mühendisleri Derneği)
ANSI	: American National Standard Institute (Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü)
ASZ	: Area Source Zone (Alan Kaynak Modeli)
BŞD	: Birim Şekil Değiştirme
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemi
CSZs	: Completion Spatial Zones (Tamamlılık Bölgeleri)
CPTI15	: Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (İtalyan Deprem Parametrik Kataloğu)
DAFZ	: Doğu Anadolu Fay Zonu
DLH	: Demiryolları, Limanlar, Havaalanı Yapılarının Deprem Dayanımı Yönetmeliği
DY	: Differential Ground Movement (Diferansiyel Yer Hareketi)
EDSF	: European Database of Seismogenic Faults (Avrupa Sismojenik Faylar Veritabanı)
EFZ	: Eskişehir Fay Zonu
ELER Rutini)	: Earthquake Loss Estimation Routine (Deprem Kaybı Tahmin Rutini)
EMEC	: European-Mediterranean Earthquake Catalogue (Avrupa-Akdeniz Deprem Kataloğu)
EMME	: Earthquake Model of the Middle East (Orta Doğu Deprem Modeli)
EPICA	: Earthquake Parameter and Intensity Calculation Algorithm (Deprem Parametre ve Şiddet Hesaplama Algoritması)
ESHM	: European Seismic Hazard Model (Avrupa Sismik Tehlike Modeli)
ESHM13	: European Seismic Hazard Model 2013
ESHM20	: European Seismic Hazard Model 2020
ETDF	: European-Mediterranean Earthquake Database (Avrupa-Akdeniz Deprem Veritabanı)
F-CAT	: French Catalogue of Earthquakes (Fransız Deprem Kataloğu)
FEMA	: Federal Emergency Management Agency (Federal Acil Durum Yönetim Ajansı)
FSBG	: Fault Source Background Seismicity (Fay Kaynak ve Arka Plan Sismisite)
GIS	: Geographical Information System (Coğrafi Bilgi Sistemi)
GDAFZ	: Güneydoğu Anadolu Fay Zonu

GSHAP	: Global Seismic Hazard Project (Küresel Sismik Tehlike Projesi)
GR	: Gutenberg-Richter
GreDaSS	: Greek Database of Seismogenic Sources (Yunanistan Deprem Kaynak Veritabanı)
GYD	: Geçici Yer Deformasyonları
HAZUS	: Hazards U.S. Multi-Hazard (FEMA'nın bir deprem hasar tahmin programı)
IGDAS	: İstanbul Doğal Gaz Ağı
IGRAS	: İstanbul Doğal Gaz Dağıtım Ağı Deprem Riskinin Azaltılması Projesi
INFP	: Institutul National de Fizica Pamantului (Romanya Ulusal Deprem Fiziği Enstitüsü)
KAF	: Kuzey Anadolu Fay Hattı
KAFZ	: Kuzey Anadolu Fay Zonu
KOERI	: Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü
MFD	: Magnitüt-Frekans Dağılımı
MMI	: Mercalli Intensity (Değiştirilmiş Mercalli Şiddet Ölçeği)
ODTA	: Olasılıksal Deprem Tehlike Analizi
OO	: Onarım Oranı
PGA	: Peak Ground Acceleration (Pik Yer İvmesi)
PGV	: Peak Ground Velocity (Pik Yer Hızı)
PGD	: Permanent Ground Deformation (Kalıcı Yer Deformasyonu)
PE	: Polietilen
PVC	: Polivinil Klorür
QGIS	: Quantum GIS (Açık kaynaklı bir CBS yazılımı)
SBDTA	: Senaryo Bazlı Deprem Tehlike Analizi
SEIFA	: Kernel Smoothed Earthquake Intensity Frequency Assessment (Kernel Düzleştirilmiş Deprem Şiddet Frekans Değerlendirmesi)
SESAME	: Unified Hazard Model for the European-Mediterranean Region (Avrupa-Akdeniz Bölgesi için Birleşik Tehlike Modeli)
SHARE	: Seismic Hazard Harmonization in Europe (Avrupa'da Sismik Tehlike Uyumlaştırma)
SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi
TECTO	: Büyük Ölçekli Tektonik Zonlar
TEFER	: Turkey Emergency Flood and Earthquake Recovery Project (Türkiye Acil Sel ve Deprem Kurtarma Projesi)
T-SHM	: Turkish Seismic Hazard Map (Türkiye Sismik Tehlike Haritası)
USGS	: United States Geological Survey (Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar Kurumu)
YHTİ	: Hareketi Tahmin İlişkileri
ZB	: Daha sert ve az deformasyona uğrayan zemin koşullarını temsil eden zemin sınıfı
ZC	: Vs30 değeri 180-360 m/s arasında olan zeminleri içerir ve orta derecede zayıf zemin koşullarını temsil eden zemin sınıfı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: Sacramento Caddesi ve yaklaşan yangın (San Francisco,1996).	6
Şekil 2.2: Dalga ve yangın hasarından sonra petrol tank sahası	7
Şekil 2.3: San Fernando depreminden sonra doğalgaz boru hattında burkulma.	7
Şekil 2.4: Loma Prieta depremi (ABD 1989).	8
Şekil 2.5: Ters faylanma nedeniyle oluşan boru hattı hasarı (Manjil 1990).	9
Şekil 2.6: Kaynaklı çelik boru hasarı (Los Angeles 1994).	10
Şekil 2.7: Kobe depremi (1995).	11
Şekil 2.8: Kocaeli depreminde Boru Hasarı.	12
Şekil 2.9: Chi Chi depremi (Tayvan 1999).	13
Şekil 2.10: Christchurch depremi (Canterbury,2011).	14
Şekil 2.11: Maraş depreminde boru hasarları (Gölbaşı,2023).	16
Şekil 4.1: Marmara bölgesinde son 300 yılda oluşmuş depremlerin olası ve gözlemlenen kırılma uzanımları (Utkucu, 2011).	38
Şekil 4.2: KAF sisteminin Marmara Bölgesindeki kolları ve üzerinde meydana gelen depremler (Utkucu, 2011).	39
Şekil 4.3: a) 1939 Depreminden sonra büyük depremlerin batıya göçü ve b) Batıya göç eden depremlerin atım dağılımı (Kalafat, 2016).	40
Şekil 4.4: 17 Ağustos 1999-31 Aralık 2000 tarihleri arası Marmara Bölgesi Depremleri artçı şoklarının dağılımı.	41
Şekil 4.5: 1996 yılı Türkiye deprem tehlike haritası.	41
Şekil 4.6: SHARE projesi kapsamında Türkiye için geliştirilen 50 yılda 10% aşılma olasılığını gösteren PGA deprem tehlike haritası.	44
Şekil 4.7: EMME projesi kapsamında 475 yıllık dönüş periyoduna tekabül eden 50 yılda 10% aşılma olasılığını gösteren PGA deprem tehlike haritası.	45
Şekil 4.8: 475 yıllık dönüş periyoduna tekabül eden 50 yılda 10% aşılma olasılığını gösteren güncellenmiş Türkiye deprem tehlike haritası; PGA dağılımı.	46
Şekil 4.9: 475 yıllık dönüş periyoduna tekabül eden ortalama PGA dağılımı.	47
Şekil 4.10: ESHM20 modeli veri derleme için EMEC bölgeleri.	49
Şekil 4.11: 1900-2014 sonu periyodunu kapsayan EMEC deprem veri kataloğu.	49
Şekil 4.12: EFSM20 modeli kapsamında sismojenik bölgelere göre farklı renklerde gösterilen birleştirilmiş fay veritabanı.	50
Şekil 4.13: Uyumlaştırılmış fay-kaynak modelinin farklı özelliklerini gösteren haritala	51
Şekil 4.14: Tamamlılık süper-bölgelerinin sınırları ve kimlikleri numaraları; her bir tamamlılık bölgesi rengi katalog içinde raporlanan olayların sayısının logaritması ile ölçeklendirilmiştir.	54
Şekil 4.15: ESHM20: Sığ kabuk sismisitesini tanımlamak için Alan Kaynak Modeli.	55
Şekil 4.16: Aktif faylar ve sismisitenin iki katına çıkmasını	57

engellemek için kullanılan arka plan tampon bölgeleri.	
Şekil 4.17: ESHM20: Aktif sığ kabuk depremleri için belirlenen sismojenik kaynak mantık ağacının şematik gösterimi.	58
Şekil 4.18: Çalışma alanı olan Kocaeli İli sınırları.	59
Şekil 4.19: Kocaeli ili için topografik eğime dayalı V_{s30} dağılımı (Sert,2024)	60
Şekil 4.20: Çalışma alanında yer alan sondajların lokasyon bilgisi.	61
Şekil 4.21: Sondaj verisi kapsamında sayısallaştırılmış litoloji bilgisi.	61
Şekil 4.22: Sondaj verisi kapsamında sayısallaştırılmış SPT-N vuruş sayıları.	62
Şekil 4.23: Kocaeli ili potansiyel sıvılaşma bölgeleri.	63
Şekil 4.24: Çalışma alanı ve civarına ait heyelan envanter haritası (Duman vd., 2011).	64
Şekil 4.25: Çalışma alanı içerisine envanteri çıkarılan sayısallaştırılmış gömülü boru hatları.	65
Şekil 4.26: Gömülü boru hattı envanteri öznitelik tablosu.	65
Şekil 4.27: Sayısallaştırılmış boru hattı elemanlarının envanter bilgisinin harita üzerinde gösterimi.	66
Şekil 4.28: Zemin ve boru hatları envanter verilerinin çalışma alanı boyunca gösterimi.	67
Şekil 4.29: Pilot bölge olarak seçilen Kocaeli İlinin içerisinde yer aldığı 150 km yarıçaplı çalışma alanı.	68
Şekil 4.30: 150 km yarıçaplı dairesel çalışma alanı içerisinde yer alan depremlerin magnitüt dağılımı.	69
Şekil 4.31: 150 km yarıçaplı dairesel çalışma alanı içerisinde yer alan ve Kocaeli'ni etkileyen alan kaynaklar.	70
Şekil 4.32: 150 km yarıçaplı dairesel çalışma alanı içerisinde yer alan ve Kocaeli'ni etkileyen çizgisel kaynaklar.	70
Şekil 4.33: Kocaeli İli için elde edilen PGA dağılımı.	71
Şekil 4.34: Kocaeli İli için elde edilen $T=0.2$ sn için elde edilen S_a dağılımı.	71
Şekil 4.35: Kocaeli İli için elde edilen $T=1.0$ sn için elde edilen S_a dağılımı.	72
Şekil 4.36: Kocaeli İli kapsamında uniform tehlike eğrisi karşılaştırmasını yapmak için temsili seçilen lokasyonlar.	73
Şekil 4.37: 50 yıllık aşılma olasılığını gösteren PGA tehlike eğrisi.	73
Şekil 4.38: 50 yıllık aşılma olasılığını gösteren S_a ($T=0.2$ sn) tehlike eğrisi.	74
Şekil 4.39: 50 yıllık aşılma olasılığını gösteren S_a ($T=1.0$ sn) tehlike eğrisi.	74
Şekil 4.40: 1 numaralı lokasyon için elde edilen uniform tehlike spektrumu ve TBDY (2018) karşılaştırması.	75
Şekil 4.41: 2 numaralı lokasyon için elde edilen uniform tehlike spektrumu ve TBDY (2018) karşılaştırması.	75
Şekil 4.42: 3 numaralı lokasyon için elde edilen uniform tehlike spektrumu, TBDY (2018) ve ESHM20 karşılaştırması.	76
Şekil 4.43: 4 numaralı lokasyon için elde edilen uniform tehlike spektrumu, TBDY (2018) ve ESHM20 karşılaştırması.	76
Şekil 5.1: Farklı fay mekanizmalarına maruz kalan boru hatları (Karamanos vd., 2014).	82
Şekil 5.2: Boru hattının, θ açılı yatay bir fay hareketi sebebiyle deforme oluşunun şematik temsili (Karamanos vd., 2014).	83
Şekil 5.3: Yanal yayılma parametreleri (O' Rourke ve Liu (1999)).	84
Şekil 5.4: Yüzey eğiminin ve serbest-yüzey oranının cephe görünüşü (O' Rourke ve Liu (1999)).	86

Şekil 5.5: Dökme demir su borusu hasar oranı ile pik yer ivmesi (PGV) arasındaki ilişki.	88
Şekil 5.6: Kaynaklı çelik gaz boru hattı ile pik yer ivmesi (PGV) arasındaki ilişki.	89
Şekil 5.7: Boru hatlarının çaplarına göre dağılımı (Chen vd., 2002).	92
Şekil 5.8: Boru hattı hasar verisi ve denklem (5.26) (O'Rourke (2009)).	95
Şekil 5.9: O'Rourke vd. (2015)' de sunulan denklem, denklem üzerindeki 95% güven aralığı ve çalışmada kullanılan boru hattı hasarı veritabanı.	95
Şekil 5.10: Kocaeli ili için elde edilen PGV dağılımı (DD2).	96
Şekil 5.11: Kocaeli ili için elde edilen PGV dağılımı (DD1).	97
Şekil 5.12: Kocaeli ili boru hatları için elde edilen onarım oranı dağılımı (DD2).	98
Şekil 5.13: Kocaeli ili boru hatları için elde edilen onarım oranı dağılımı (DD1).	99



TABLolar/ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 5.1: Pik yer hızı (PGV) veri tabanındaki depremler ve boru hattı hasar noktaları (ALA (2001)).	90
Tablo 5.2: PSD veri tabanındaki depremler ve boru hattı hasar noktaları (ALA (2001)).	90
Tablo 5.3: Kırılabilirlik eğrisi için K1 katsayıları (ALA (2001)).	90
Tablo 5.4: Kırılabilirlik eğrisi için K2 katsayıları (ALA (2001)).	91
Tablo 5.5: Taiwan' daki doğal gaz boru hatları için kırılabilirlik eğrileri (Onarım oranı (OO) vs. Sismik şiddet parametresi, Chen et al., 2002).	92
Tablo 5.6: Taiwan' daki su boru hatları için kırılabilirlik eğrileri (Onarım oranı (OO) vs. Sismik şiddet parametresi, Chen et al., 2002).	92

1. GİRİŞ

Bu tezin amacı, Kocaeli bölgesinde meydana gelen tarihsel depremlerin incelenmesi, bu depremlerin sismik aktivitelerinin ve altyapı üzerine etkilerinin analiz edilmesidir. Kocaeli bölgesi, Türkiye'nin deprem açısından en aktif bölgelerinden biridir ve bu nedenle bölgedeki depremlerin incelenmesi, gelecekteki deprem risklerinin azaltılmasında ve afet yönetim stratejilerinin geliştirilmesinde büyük önem taşımaktadır.

Tez, Kocaeli bölgesinde gerçekleşen büyük depremleri tarihsel olarak inceleyerek, bu depremlerin bölgedeki kentsel altyapı üzerindeki etkilerini analiz etmektedir. Çalışma, deprem tehlikesi, riski ve hasar görülebilirlik kavramları ile kentsel altyapının deprem performansı üzerine odaklanmaktadır. Ancak, çalışma sadece belirli bir zaman diliminde gerçekleşen depremleri kapsamakta olup, tüm zaman dilimlerini içermemektedir. Ayrıca, deprem sonrası iyileştirme ve güçlendirme çalışmalarına dair detaylı bir inceleme yapılmamaktadır.

Bu çalışma, literatür taraması ve tarihsel veri analizi yöntemlerini kullanarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, Kocaeli bölgesindeki tarihsel depremler ve bu depremlerin etkileri ile ilgili literatür taranmıştır. Daha sonra, elde edilen veriler analiz edilerek, depremlerin kentsel altyapı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, deprem tehlikesi ve riski ile ilgili mevcut haritalar ve raporlar incelenmiştir. Bu analizler sonucunda, Kocaeli bölgesindeki depremlerin kentsel altyapı üzerindeki etkilerine dair bir değerlendirme yapılmıştır.

Literatürde, Kocaeli bölgesinde meydana gelen depremler ve bu depremlerin etkileri üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Özellikle 1999 İzmit Depremi, bölgedeki kentsel altyapının dayanıklılığı ve kırılganlığı konusunda önemli dersler sunmuştur. Geçmiş depremler, altyapı sistemlerinin nasıl etkilendiğini ve bu etkilerin toplumsal, ekonomik ve çevresel sonuçlarını anlamak açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmalar, Kocaeli bölgesindeki kentsel altyapının depreme dayanıklılığının artırılması ve risk azaltma stratejilerinin belirlenmesi açısından önemli bilgiler sunmaktadır.

2. DEPREM TEHLİKESİ VE KENTSEL ALTYAPI

Deprem tehlikesi ve riski kavramları, sismik olayların meydana gelme olasılığı ve bu olayların insan yaşamı, altyapı ve ekonomi üzerindeki potansiyel etkilerini ifade eder. Kentsel altyapı, şehirlerde yaşayan insanların günlük yaşamlarını sürdürebilmeleri için gerekli olan temel hizmetleri sağlayan sistemlerdir. Bu altyapı sistemleri, enerji, su, kanalizasyon, iletişim ve ulaşım gibi hayati hizmetleri içerir. Gömülü boru hatları, özellikle su, doğalgaz ve kanalizasyon sistemlerinin omurgasını oluşturur ve bu nedenle depremler sırasında ve sonrasında kritik öneme sahiptir. Depremler, gömülü boru hatlarına ciddi zararlar verebilir, bu da su ve gaz temininde aksamalara ve çevresel felaketlere yol açabilir. Geçmiş depremler, altyapı sistemlerinin kırılganlığını ve bu sistemlerin dayanıklılığının artırılması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu bölümde, deprem tehlikesi ve riski kavramları, kentsel altyapının önemi ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

2.1. Deprem Tehlikesi, Riski ve Hasar Görebilirlik Kavramları

Deprem tehlikesi ve riski, afet yönetimi ve planlamasında kritik öneme sahip iki temel kavramdır. Bu kavramlar, deprem öncesi, sırası ve sonrasında alınacak önlemler ile zarar azaltma stratejilerinin belirlenmesinde anahtar rol oynar.

Deprem tehlikesi, belirli bir bölgede belirli bir zaman diliminde bir depremin meydana gelme olasılığı olarak tanımlanır. Bu tehlike, depremin büyüklüğü, oluş sıklığı ve yer kabuğunun özelliklerine bağlı olarak değişir. Deprem tehlikesi değerlendirmesi, sismik aktivitenin analiz edilmesi, tarihsel deprem verilerinin incelenmesi ve yerel jeolojik yapıların incelenmesi gibi yöntemlerle gerçekleştirilir. Deprem tehlikesi haritaları, belirli bir bölgedeki sismik tehlikeyi görselleştirmek için kullanılır ve bu haritalar, yapılaşma ve şehir planlamasında önemli rehberlik sağlar. Tehlike kavramı, deprem sırasında beklenen yer hareketlerinin şiddetini ve frekansını içerir ve genellikle mühendislik tasarımlarında temel bir girdidir.

Deprem riski ise, bir depremin meydana gelmesi durumunda ortaya çıkacak olası zarar ve kayıpların büyüklüğünü ifade eder. Risk, tehlike ile maruziyet ve kırılganlık

bileşenlerinin bir fonksiyonudur. Maruziyet, belirli bir bölgede yaşayan insanların, yapıların ve altyapının depreme karşı duyarlılığını temsil eder. Kırılğanlık ise, bu maruz kalan unsurların deprem sırasında ve sonrasında zarar görme potansiyelidir. Örneğin, depreme dayanıklı olmayan binaların bulunduğu bir bölge, yüksek risk taşıyan bir bölge olarak değerlendirilir.

Deprem riski değerlendirmesi, yapıların ve altyapının deprem dayanıklılığı, nüfus yoğunluğu, ekonomik değerler ve acil durum müdahale kapasitesi gibi faktörleri dikkate alır. Bu değerlendirme, afet yönetimi politikalarının ve risk azaltma stratejilerinin belirlenmesinde temel oluşturur. Risk azaltma stratejileri, yapıların depreme dayanıklı hale getirilmesi, acil durum müdahale planlarının geliştirilmesi ve toplumsal farkındalığın artırılması gibi önlemleri içerir.

Deprem tehlikesi ve riski arasındaki temel fark, tehlikenin doğrudan deprem olayının fiziksel özellikleri ile ilgili olması, riskin ise bu olayın topluma, yapılara ve ekonomiye olan etkilerini içermesidir. Bir başka deyişle, deprem tehlikesi kaçınılmaz bir doğa olayıyken, deprem riski bu olayın yol açacağı zararların minimize edilmesi ile ilgilidir. Dolayısıyla, deprem tehlikesi azaltılamaz ancak deprem riski, alınacak önlemler ve stratejiler ile önemli ölçüde azaltılabilir.

Kentsel altyapıda depremlerde hasar görebilirlik kavramı, şehirlerde bulunan yapıların ve sistemlerin deprem sırasında ve sonrasında ne ölçüde zarar görebileceğini belirler. Bu kavram, binalar, köprüler, yollar, su ve gaz boru hatları gibi çeşitli altyapı bileşenlerinin sismik dayanıklılığını inceler. Hasar görebilirlik, deprem büyüklüğü, yer hareketi özellikleri, zemin yapısı, inşaat malzemeleri ve yapı tasarımı gibi faktörlere bağlıdır. Yüksek hasar görebilirlik, altyapının deprem etkilerine karşı daha savunmasız olduğunu ve büyük ölçüde hasar görebileceğini gösterir. Bu değerlendirme, potansiyel riskleri önceden belirleyerek, yapıların güçlendirilmesi, acil durum planlarının oluşturulması ve deprem sonrası iyileştirme çalışmalarının planlanması için önemlidir. Amaç, can ve mal kaybını en aza indirmek, kentsel hizmetlerin sürekliliğini sağlamak ve toplumun genel güvenliğini artırmaktır.

2.2. Kentsel Altyapının Önemi

Kentsel altyapı, modern şehirlerin yaşanabilirliğini, ekonomik canlılığını ve sosyal refahını sürdürebilmesi için temel bir unsurdur. Bu altyapı, su, kanalizasyon, enerji,

ulaşım ve iletişim gibi temel hizmetlerin sunulmasında kritik bir rol oynar. şehirlerin büyümesi ve gelişmesi, sağlıklı bir altyapıya dayanır ve bu altyapı, günlük yaşamın devamlılığı için vazgeçilmezdir. Ancak, kentsel altyapının dayanıklılığı ve güvenilirliği, doğal afetler gibi öngörülemeyen durumlar karşısında büyük bir sınav verir. Özellikle depremler, altyapı sistemlerinde ciddi hasarlara yol açabilir ve şehirlerin işleyişinde büyük aksaklıklara neden olabilir. Bu bağlamda, kentsel altyapının deprem dayanıklılığı ve genel dirençliliği, şehir planlamasının ve mühendislik çalışmalarının öncelikli hedefleri arasında yer almalıdır.

Kentsel altyapının deprem dayanıklılığı konusu, şehirlerin gelecekteki sürdürülebilirliğini etkileyen kritik bir unsurdur. Depremlerin yarattığı şiddetli yer hareketleri, binaların, köprülerin, yolların ve diğer yapıların ciddi yapısal hasarlar görmesine neden olabilir. Bu yapısal hasarlar, sadece maddi kayıplarla sınırlı kalmaz; aynı zamanda insan kayıplarına, toplumsal travmalara ve ekonomik durgunluğa da yol açabilir. Örneğin, 1994 Northridge Depremi, Los Angeles'ta milyarlarca dolarlık hasara ve çok sayıda insan kaybına neden olmuş ve bu durum, şehirde uzun yıllar süren toparlanma süreçleri gerektirmiştir. Benzer şekilde, 2011 Tohoku Depremi, Japonya'da büyük bir tsunamiye ve Fukushima nükleer santrali felaketine yol açmış, ülkenin enerji altyapısında büyük çapta kesintilere ve uluslararası ekonomik etkilere sebep olmuştur.

Depremlerin etkileri sadece yapısal hasarlarla sınırlı değildir. Gömülü boru hatları, su, kanalizasyon, doğalgaz ve iletişim gibi kritik altyapı sistemleri de depremlerden önemli ölçüde etkilenir. Su ve kanalizasyon hatlarındaki hasarlar, su temini ve atık yönetimi sistemlerinde büyük kesintilere yol açabilir ve sağlık risklerini artırabilir. Örneğin, 2010 Haiti Depremi'nde, Port-au-Prince'teki su şebekelerinin çoğu kullanılamaz hale gelmiş ve bu durum, salgın hastalıkların yayılmasına zemin hazırlamıştır. Ayrıca, doğalgaz ve iletişim hatlarındaki hasarlar, günlük yaşamın devamlılığını sağlamada büyük zorluklar yaratabilir ve acil durum müdahalelerini olumsuz etkileyebilir.

Enerji altyapısı da depremlerin etkilerinden önemli bir şekilde etkilenir. Elektrik iletim hatları ve trafo merkezleri, depremlerin yarattığı yer değiştirmeler ve zemin hareketleri nedeniyle hasar görebilir ve elektrik kesintilerine yol açabilir. Bu durum hem evlerde hem de ticari işletmelerde ciddi aksaklıklara ve ekonomik kayıplara sebep olabilir. Örneğin, 1995 Kobe Depremi sırasında, Japonya'daki birçok bölgede elektrik

kesintileri yaşanmış ve bu durum, kurtarma ve yardım operasyonlarının koordinasyonunu olumsuz etkilemiştir.

Gömülü boru hatları, su, doğalgaz, petrol ve atık su gibi temel hizmetlerin taşınmasında hayati bir rol oynar ve modern kentlerin altyapısının vazgeçilmez bileşenleridir. Ancak, depremler sırasında gömülü boru hatları ciddi zarar görebilir ve bu da toplumsal ve ekonomik açıdan büyük kayıplara yol açabilir. Bu nedenle, gömülü boru hatlarının deprem performansının incelenmesi ve dayanıklılığının artırılması, afet yönetimi ve altyapı güvenliği açısından kritik öneme sahiptir.

Sonuç olarak, kentsel altyapının deprem dayanıklılığı ve genel dirençliliği, şehirlerin sadece günlük işleyişini sağlamakla kalmaz; aynı zamanda şehirlerin gelecekteki sürdürülebilirliğini de belirler. Esnek ve dayanıklı yapı malzemeleri, zemin iyileştirme teknikleri, akıllı şebeke sistemleri ve düzenli bakım ve izleme faaliyetleri gibi önlemler, kentsel altyapının depremlere karşı direncini artırabilir. Ayrıca, toplumun deprem riskleri ve alınabilecek önlemler konusunda bilinçlendirilmesi ve acil durum planlarının geliştirilmesi de büyük önem taşır. Bu çabalar, depremlerin yıkıcı etkilerini azaltabilir ve şehirlerin daha güvenli, yaşanabilir ve sürdürülebilir olmasını sağlayabilir.

2.3. Geçmiş Depremler ve Altyapı Üzerindeki Etkileri

Geçmiş depremler, kentsel altyapının dayanıklılığını ve kırılganlığını ortaya koyarak, afet yönetimi ve mühendislik pratikleri için önemli dersler sunmuştur. Tarihsel olarak incelenen depremler, altyapının çeşitli bileşenlerinin nasıl etkilendiğini ve bu etkilerin toplumsal, ekonomik ve çevresel sonuçlarını anlamak açısından kritik öneme sahiptir. Bu bölümde, farklı depremler sırasında altyapının maruz kaldığı hasar ve bu hasarın nedenleri, sonuçları ve gelecekteki iyileştirme stratejileri ele alınacaktır.

2.3.1. 1906 San Francisco Depremi (ABD)

1906 yılında meydana gelen San Francisco Depremi, modern mühendislik ve afet yönetimi uygulamalarını şekillendiren en önemli depremlerden biridir. Depremin ardından çıkan yangınlar (**Şekil 2.1**), şehirde büyük bir yıkıma yol açmış ve altyapının büyük kısmı zarar görmüştür. Su dağıtım sistemleri, doğalgaz hatları ve iletişim ağları

ciddi şekilde hasar görmüş, bu durum yangınlarla mücadeleyi zorlaştırmıştır. Deprem, özellikle boru hatlarının ve köprülerin depreme karşı dayanıklılığının artırılması gerektiğini göstermiştir.



Şekil 2.1: Sacramento Caddesi ve yaklaşan yangın (San Fransisco, 1906).

2.3.2. 1964 Alaska Depremi (ABD)

1964 yılında meydana gelen Alaska Depremi, altyapı üzerindeki etkileri açısından önemli bir başka olaydır. Depremın büyüklüğü ve süresi, geniş bir alanda yıkıma neden olmuş, özellikle su ve kanalizasyon sistemleri, enerji hatları ve ulaşım altyapısı ciddi zarar görmüştür (**Şekil 2.2**). Deprem sonrası yapılan incelemeler, zemin sıvılaşmasının boru hatları ve temeller üzerindeki yıkıcı etkilerini ortaya koymuştur. Bu deprem, zemin iyileştirme tekniklerinin ve sismik tasarım kriterlerinin önemini vurgulamıştır.



Şekil 2.2: Dalga ve yangın hasarından sonra petrol tank sahası (Alaska,1964).

2.3.3. 1971 San Fernando Depremi (ABD)

San Fernando Depremi, 9 Şubat 1971'de San Fernando Vadisi, Los Angeles, Kaliforniya'da meydana gelmiştir. Magnitudü 6.6 olan bu deprem, 64 kişinin hayatını kaybetmesine ve yaklaşık 2.000 kişinin yaralanmasına neden olmuştur. Maddi hasar 500 milyon dolar olarak tahmin edilmiştir. Deprem, gaz ve su boru hatlarında ciddi hasarlara yol açmış, bu da yangınlara ve su kesintilerine neden olmuştur (Şekil 2.3).



Şekil 2.3: San Fernando depreminden sonra doğalgaz boru hattında burkulma (Jennings, 1971).

2.3.4. 1989 Loma Prieta Depremi (ABD)

Loma Prieta Depremi, 17 Ekim 1989'da Santa Cruz Dağları, Kaliforniya'da meydana gelmiştir. Magnitüdü 6.9 olan bu deprem, San Francisco Körfez Bölgesi'nde büyük hasara neden olmuştur (**Şekil 2.4**). Deprem sonucunda 63 kişi hayatını kaybetmiş ve yaklaşık 3.800 kişi yaralanmıştır. Maddi hasar yaklaşık 6 milyar dolar olarak tahmin edilmiştir. Boru hatlarındaki hasarlar, su temininde aksamalara ve doğal gaz sızıntılarına neden olmuştur.



Şekil 2.4: Loma Prieta Depremi (ABD 1989).

2.3.5. 1990 Manjil Depremi (İran)

Manjil Depremi, 20 Haziran 1990 tarihinde İran'ın Manjil şehri yakınlarında meydana gelen büyük bir depremdir. Bu deprem, magnitüdü 7,4 olarak ölçülmüş ve Kuzey İran'da geniş çaplı yıkıma neden olmuştur.

Depremi etkisiyle Manjil şehrindeki altyapı sistemleri, özellikle su temini, atık su yönetimi ve gaz boru hatları gibi gömülü boru hatları büyük zarar görmüştür. Su dağıtım hatları kırılmış, kanalizasyon sistemleri çökmüş ve gaz boru hatları hasar

görmüştür (**Şekil 2.5**). Bu durum, Manjil'deki yaşam standartlarını derinden etkilemiş ve acil onarım ihtiyacını ortaya koymuştur.



Şekil 2.5: Ters faylanma nedeniyle oluşan boru hattı hasarı (**Manjil, 1990**).

2.3.6. 1994 Northridge Depremi (ABD)

Northridge Depremi, 17 Ocak 1994'te Los Angeles, Kaliforniya'da meydana gelmiştir. Magnitüdü 6.7 olan bu deprem, Los Angeles bölgesinde büyük hasara neden olmuştur. Deprem sonucunda 57 kişi hayatını kaybetmiş ve 8.700'den fazla kişi yaralanmıştır. Tahmini maddi hasar 20 milyar dolardan fazladır. Deprem, doğal gaz, su ve kanalizasyon hatlarında ciddi hasarlara yol açmıştır (**Şekil 2.6**). Doğal gaz sızıntıları yangınlara neden olmuş ve su hatlarındaki hasar yangın söndürme çalışmalarını zorlaştırmıştır.



Şekil 2.6: Kaynaklı çelik boru hasarı (Los Angeles, 1994).

2.3.7. 1995 Kobe Depremi (Japonya)

Japonya'nın Kobe şehrinde 17 Ocak 1995'te meydana gelen deprem, altyapı üzerindeki etkileri ve bu etkilerin toplumsal sonuçları açısından dikkat çekicidir. Magnitüdü 6.9 olan bu deprem, Kobe şehrinde büyük yıkıma neden olmuş, yaklaşık 6.434 kişi hayatını kaybetmiş ve 300.000'den fazla insan evsiz kalmıştır. Maddi hasar yaklaşık 100 milyar dolar olarak tahmin edilmiştir.

Deprem, köprüler, yollar, liman tesisleri ve su dağıtım sistemleri gibi kritik altyapı bileşenlerinde büyük hasara neden olmuştur. Özellikle gaz ve su boru hatlarındaki ciddi hasarlar, yangınlara ve su temininde büyük aksamalara yol açmıştır (Şekil 2.7). Kobe Depremi, Japonya'nın deprem mühendisliği uygulamalarında köklü değişikliklere gitmesine neden olmuş ve sismik izolasyon teknolojilerinin geliştirilmesi için önemli bir dönüm noktası olmuştur.



Şekil 2.7: Kobe Depremi (Japonya,1995).

2.3.8. 1999 İzmit Depremi (Türkiye)

İzmit Depremi, 17 Ağustos 1999'da Türkiye'nin İzmit şehrinde meydana gelmiştir. Magnitüdü 7.4 olan bu deprem, yaklaşık 17.000 kişinin hayatını kaybetmesine ve 250.000 kişinin evsiz kalmasına yol açmıştır. Maddi hasar 6,5 milyar dolar olarak tahmin edilmiştir. Deprem, petrol boru hatları ve diğer altyapılar üzerinde ciddi şekilde etkili olmuş, petrol boru hatlarındaki hasar çevresel felaketlere ve enerji temininde büyük aksamalara neden olmuştur.

Marmara Depremi olarak da bilinen bu deprem, özellikle İstanbul, İzmit ve Bursa gibi yoğun nüfuslu şehirleri etkilemiştir. Deprem sırasında, doğalgaz ve petrol boru hatları, elektrik hatları ve ulaşım ağları ciddi şekilde hasar görmüştür (Şekil.2.8). Adapazarı'ndaki zemin sıvılaşması özellikle su ve doğalgaz boru hatlarında büyük tahribat yaratmıştır. İzmit ve Marmara Depremleri, altyapının deprem dirençliliğinin artırılması ve acil durum müdahale planlarının geliştirilmesi gerekliliğini bir kez daha ortaya koymuştur.

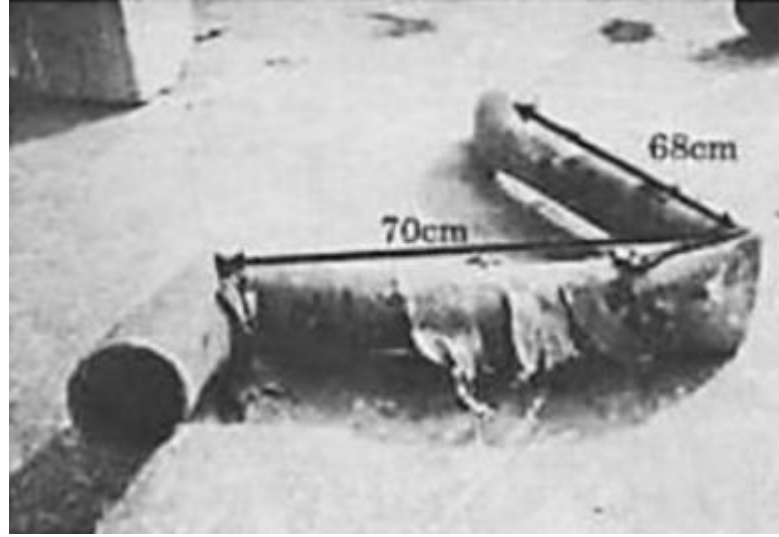


Şekil 2.8: Kocaeli depreminde boru hasarı (Kocaeli, 1999).

2.3.9. 1999 Chi Chi Depremi (Tayvan)

Chi Chi depremi, 21 Eylül 1999 tarihinde Tayvan'ın merkezinde meydana gelen büyük bir depremdir. Bu deprem, magnitüdü 7,6 olarak ölçülmüş ve Tayvan'ın altyapı sistemleri üzerinde önemli etkilere sahip olmuştur.

Depremi şiddeti ve neden olduğu yıkım, özellikle su temini, atık su yönetimi ve diğer boru hatları sistemlerinde ciddi hasarlara yol açmıştır (Şekil 2.9). Su temini ve kanalizasyon gibi kritik altyapı bileşenlerindeki hasarlar, su kesintileri, çevresel kirlilik ve sağlık riskleri gibi sorunlara neden olmuştur. Bu durum, deprem sonrası acil onarımların yanı sıra uzun vadeli altyapı güçlendirme çabalarını da beraberinde getirmiştir. Chi Chi depremi, gömülü boru hatları ve benzer altyapı sistemlerinin dayanıklılığının artırılması gerekliliğini vurgulamış ve deprem sonrası iyileştirme süreçlerine önemli bir katkıda bulunmuştur.



Şekil 2.9: Chi chi depremi (Tayvan, 1999).

2.3.10. 2010 Port-au-Prince Depremi (Haiti)

Haiti, Karayip Denizi'nde bulunan ve sıklıkla depremlerle sarsılan bir ada ülkesidir. 12 Ocak 2010 tarihinde Haiti'nin başkenti Port-au-Prince civarında meydana gelen 7,0 büyüklüğündeki deprem, ülkenin tarihinin en yıkıcı doğal felaketlerinden biri olarak kaydedilmiştir. Depremde resmi rakamlara göre 230.000'den fazla kişi hayatını kaybetmiş, yüz binlerce kişi evsiz kalmış ve milyonlarca insan doğrudan etkilenmiştir. Maddi hasarın boyutu ise 8-14 milyar dolar arasında tahmin edilmektedir.

Depremin etkisiyle Haiti'nin zaten zayıf olan altyapısı büyük zarar görmüştür. Su temini, atık su yönetimi, elektrik ve iletişim gibi kritik altyapı sistemleri ciddi şekilde zarar görmüş ve işlevini yitirmiştir. Özellikle su dağıtım sistemlerindeki hasarlar, su sıkıntısının yanı sıra sağlık sorunlarına da yol açmıştır. Ayrıca, yıkılan binaların enkazı altında kalan insanların kurtarılması ve sağlık hizmetlerinin sunulması gibi acil ihtiyaçlar da altyapının yetersizliğini daha da ortaya koymuştur. Haiti Depremi, ülkenin altyapı yönetimi ve deprem risk yönetimi stratejilerini gözden geçirmesine ve uluslararası yardımın önemini vurgulamasına zemin hazırlamıştır.

2.3.11. 2011 Christchurch Depremi (Yeni Zelanda)

Christchurch, 22 Şubat 2011 tarihinde Yeni Zelanda'nın ikinci büyük şehri olan Canterbury bölgesinde, magnitüdü 6.3 olan bir depremle sarsıldı. Bu deprem, önceki

Eylül 2010 depremi sonrası şehirdeki altyapıyı zaten zayıflatmıştı ve 2011'deki depremle birlikte büyük yıkımlara neden oldu. Depremde 185 kişi hayatını kaybetti, binlerce kişi yaralandı ve şehrin merkezi ile banliyö bölgelerinde geniş çaplı hasarlar oluştu.

Christchurch depremi, özellikle su temini, atık su yönetimi, elektrik ve telekomünikasyon gibi altyapı sistemlerinde önemli hasarlara yol açtı. Gömülü boru hatları da bu hasarların önemli bir parçasını oluşturdu. Su dağıtım hatları kırıldı, kanalizasyon sistemleri çöktü ve gaz boru hatları patladı (**Şekil 2.10**). Bu durum, şehirdeki yaşam kalitesini ve toplumsal düzeni derinden etkiledi. Deprem sonrası onarım ve yeniden yapılanma süreçleri, altyapı sistemlerinin güçlendirilmesi ve deprem risklerine karşı daha hazırlıklı olunması gerektiği konusunda önemli bir ders vermiştir.

Bu deprem, Yeni Zelanda'da afet yönetimi ve altyapı planlaması konularında köklü değişikliklerin yapılmasına yol açtı. Şehir, deprem sonrası dayanıklılık ve sürdürülebilirlik açısından yeni stratejiler geliştirdi ve altyapı sistemlerini depreme karşı daha dirençli hale getirmek için çalışmalarını sürdürmektedir.



Şekil 2.10: Christchurch depremi (Canterbury, 2011).

2.3.12. 2011 Tohoku Depremi ve Tsunamisi (Japonya)

Tohoku Depremi, 11 Mart 2011'de Japonya'nın doğu kıyısında, Sendai yakınlarında meydana gelmiştir. Magnitüdü 9.0 olan bu deprem, ardından gelen tsunami ile birlikte büyük yıkıma neden olmuştur. Deprem ve tsunami sonucunda 15.897 kişi hayatını kaybetmiş, 2.533 kişi kaybolmuş ve 6.157 kişi yaralanmıştır. Maddi hasar 235 milyar dolar olarak tahmin edilmiştir.

Tsunami, Fukushima Daiichi Nükleer Santrali'nde nükleer felakete neden olmuş ve boru hatları büyük zarar görmüştür. Özellikle su temini ve kanalizasyon sistemleri ciddi şekilde etkilenmiştir. Tsunami, enerji hatları, su temin sistemleri ve ulaşım ağlarında büyük tahribata yol açmış, bu durum uzun süreli enerji kesintileri ve su sıkıntıları gibi ciddi toplumsal sorunlara neden olmuştur. Ayrıca, nükleer güvenlik ve altyapı dayanıklılığı konularında küresel bir farkındalık yaratmıştır. Tohoku Depremi, çoklu afet senaryolarına karşı altyapı planlamasının önemini vurgulamıştır.

2.3.13. 2023 Kahramanmaraş Depremi (Türkiye)

Kahramanmaraş Depremi, 6 Şubat 2023'te Türkiye'nin güneydoğusunda, Kahramanmaraş'ta meydana gelmiştir. Bu deprem, 7.8 ve 7.5 büyüklüğünde artçı şoklarla birlikte büyük yıkıma neden olmuştur. Deprem sonucunda 50.000'den fazla kişi hayatını kaybetmiş, yüzbinlerce kişi yaralanmış ve milyonlarca kişi evsiz kalmıştır. Deprem, büyük ölçüde altyapı hasarına yol açmış, özellikle doğal gaz, su ve kanalizasyon boru hatları ciddi şekilde etkilenmiştir (**Şekil 2.11**). Boru hatlarındaki hasarlar, enerji ve su temininde büyük aksamalara neden olmuş ve birçok bölgede yangınlar çıkmıştır.



Şekil 2.11: Maraş Depreminde Boru Hasarları (Gölbaşı 2023).

Geçmiş depremler, kentsel altyapının depreme karşı dayanıklılığının artırılması gerektiğini açıkça göstermiştir. Bu depremlerden alınan dersler, mühendislik tasarımlarının ve afet yönetim stratejilerinin geliştirilmesine yardımcı olmuştur. Geçmiş deneyimler, gelecekteki depremlere karşı daha hazırlıklı ve dirençli toplumlar oluşturma yolunda önemli bir rehber sunmaktadır.

2.4. Gömülü Boru Hatlarının Deprem Tasarım Yönetmelikleri

2.4.1. ABD Yönetmeliği

Amerika'da, gömülü boru hatları için standartlar AWWA (American Water Works Association), API (American Petroleum Institute), ASCE (American Society of Civil Engineers), ASME (American Society of Mechanical Engineers) ve ANSI (American National Standard Institute) tarafından belirlenmektedir. Ayrıca, Federal Emergency Management Agency (FEMA) ve ASCE'nin ortak çalışması olan American Lifelines Alliance (ALA) tarafından da gömülü boru hatları için tasarım şartnamesi oluşturulmuştur.

Amerika Birleşik Devletleri'nde gömülü boru hatlarının sismik tasarımı, özellikle deprem risklerinin ve boru hatlarının bu durumlara karşı dayanıklılığının değerlendirilmesi üzerine odaklanır. Yönetmelikte gömülü boru hatlarının karşılaşılabileceği potansiyel deprem tehlikeleri arasında, yüzey faylanması, yanıl

yayılma, tetiklenmiş heyelan yer değiştirmesi ve sıkışma veya sıvılaşma nedeniyle yerleşme gibi kalıcı zemin yer değiştirmeleri bulunur. Deprem dalgası yayılımı ile oluşan eksenel gerinim hesaplamalarında, gömülü boru hatlarının eksenel gerinimi, yer hareketi hızına ve boru-zemin arayüzündeki sürtünmeye bağlı olarak belirlenir. Bu hesaplamalar, boru-zemin arayüzündeki sürtünme kuvveti ve boru çapı gibi parametreler dikkate alınarak yapılır.

Bu tasarım prensiplerine ek olarak, kalıcı zemin yer değiştirmelerinin etkileri, özellikle faylanma ve yanal yayılma gibi durumlar, sonlu elemanlar analizi teknikleri kullanılarak değerlendirilir. Bu analizler, boru hatlarının bu tür yer değiştirmelere nasıl tepki verdiğini ve boru-soil etkileşim modelleri kullanılarak tahmin edilen gerinim seviyelerini içerir. Ayrıca, el hesaplamaları da basit ve idealize edilmiş koşullar altında boru hatlarının kalıcı zemin yer değiştirmelerine tepkisini değerlendirmek için kullanılabilir. Bu yöntemler, boru hatlarının deprem sonrası güvenli ve işlevsel kalmasını sağlamak amacıyla, tasarımda dikkate alınan güvenlik maręlarını ve performans standartlarını belirlemeye yardımcı olur.

2.4.2. in Yönetmeliği

in'de gömülü boru hatlarının sismik tasarımı üzerine yapılan çalışmalar, kentsel gaz tedarik ağının deprem hasarlarına karşı savunmasızlığını analiz etmeyi hedeflemektedir. Bu analiz, deprem hasar oranı, hasar türü, arıza modeli ve etkileyen faktörler olmak üzere dört ana başlıkta ele alınmaktadır. Özellikle yer altı boru hatlarının sismik güvenilirlik değerlendirmesi, iki durumlu arıza kriterine dayanmaktadır. Deprem hasar oranı, kilometre başına düşen hasar sayısı olarak tanımlanmakta ve bu oran, kentsel gaz tedarik ağlarının güvenilirliğini belirlemede önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır. alışmalar, özellikle yüksek tehlike bölgelerinde bulunan şehirlerde gaz tedarik sisteminin deprem hasarlarına karşı daha savunmasız olduğunu göstermektedir.

Deprem hasar türleri, çevresel hasar ve yanıt hasarı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Çevresel hasar, yer yüzeyindeki deformasyonlardan kaynaklanırken, yanıt hasarı yer yüzeyinin hareketinden kaynaklanmaktadır. Boru hatlarındaki arıza modelleri ise bağlantı elemanlarının, boru milinin ve boru tesisatlarının hasar görmesi olarak üç ana başlıkta incelenmektedir. Bu tür hasarların en yaygın olanı bağlantı elemanlarının

hasarıdır. Deprem sırasında boru hatlarının güvenilirliği, boruların malzemesi, bağlantı şekli, hizmet süresi ve korozyon durumu gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Örneğin, esnek bağlantılar sismik direnci artırırken, çelik borular dökme demir borulara göre daha dayanıklıdır. Bu tür detaylı analizler, kentsel gaz tedarik ağlarının tasarım ve inşasında önemli bir rehber niteliği taşımaktadır.

2.4.3.Hindistan Yönetmeliği

Hindistan'da gömülü boru hatlarının sismik tasarımı, dalga yayılımı, fay geçişi ve sıvılaşma nedeniyle kalıcı zemin deformasyonu gibi çeşitli deprem risklerini kapsamaktadır. Ancak, tsunami, tektonik çökme ve yükselme gibi belirli deprem riskleri bu tasarım standartlarında ele alınmamaktadır. Bu standartlar, özellikle demir ve çelik boru hatları için detaylı tasarım kriterleri sunmaktadır. Diğer malzemelerden yapılan boru hatları da benzer şekilde ele alınabilir, ancak bu boruların gerilme-gerinme davranışları ve izin verilen gerinme/deformasyon kapasiteleri farklılık gösterebilir. Çeşitli diğer etkiler ve kategoriler için (örneğin, deniz altı gömülü boru hatları vb.) analiz ve tasarım için özel literatüre başvurulması önerilmektedir. Ayrıca, eski boru hatları yetersiz dayanıklılık ve korozyon veya kaynak hataları nedeniyle mevcut standartları karşılamayabilir. Bu nedenle, eski borular için gerinme kabul kriterleri duruma göre geliştirilmelidir.

Hindistan'da boru hatları işlevsel gereksinimlerine göre dört sınıfa ayrılmaktadır. Sınıf-I, deprem sonrası yanıt için gerekli olan ve tasarım depremi sırasında ve sonrasında işlevsel ve operasyonel kalmayı amaçlayan çok önemli su boru hatları ile yüksek basınçlı petrol ve gaz boru hatlarını kapsamaktadır. Sınıf-II, büyük bir topluluğa hizmet eden ve başarısızlık durumunda topluluğa önemli ekonomik etkisi olan kritik su boru hatları ile orta basınçlı petrol ve gaz boru hatlarını içermektedir. Sınıf-III, normal kullanım için su temin eden çoğu su boru hattı ile düşük basınçlı petrol ve gaz boru hatlarını kapsamaktadır. Sınıf-IV ise başarısızlık durumunda insan hayatı ve toplum üzerinde düşük veya çok az öneme sahip olan su boru hatları ile deprem sonrası hızlı onarım gerektirmeyen boru hatlarını içermektedir. Bu sınıflandırma, boru hatlarının sismik dayanıklılığını artırmak ve deprem sonrası işlevselliği sağlamak amacıyla yapılmıştır.

2.4.4. Meksika Yönetmeliği

Meksika'da gömülü boru hatlarının sismik tasarımı, ülkenin deprem riskinin yüksek olması nedeniyle büyük önem taşımaktadır. 1985 Meksiko Depremi, gömülü boru hatlarının deprem sırasında ve sonrasında maruz kaldığı risklerin ve hasarların anlaşılması açısından önemli bir ders niteliğindedir. Bu deprem sırasında su, gaz ve kanalizasyon boru hatlarında meydana gelen yaygın hasarlar, şehir altyapısının ne kadar savunmasız olduğunu göstermiştir. Boru hatlarının sismik tasarımında dikkate alınması gereken en önemli faktörler arasında, zemin hareketlerinin neden olduğu kalıcı deformasyonlar ve sismik dalga yayılımı yer almaktadır. Bu etkiler, boru hatlarının yapısal bütünlüğünü ciddi şekilde tehlikeye atabilir ve geniş çaplı su ve gaz sızıntılarına neden olabilir.

Meksika'da gömülü boru hatlarının sismik tasarımı, bu tür riskleri minimize etmek amacıyla çeşitli mühendislik yaklaşımlarını içermektedir. Özellikle, boru hatlarının esnekliği ve mukavemeti artırılarak, zemin hareketleri ve yer değiştirmelere karşı dayanıklılığı sağlanmaya çalışılmaktadır. Tasarım sürecinde, boru hatlarının yerleştirileceği zemin özelliklerinin detaylı bir şekilde analiz edilmesi ve potansiyel zemin deformasyonlarının tahmin edilmesi önemlidir. Ayrıca, boru malzemelerinin seçiminde ve bağlantı noktalarının tasarımında sismik dayanıklılığın göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu bağlamda, 1985 Meksiko Depremi sonrası yapılan çalışmalar ve geliştirilen yeni teknikler, gelecekte benzer olaylar karşısında boru hatlarının daha dayanıklı olmasını hedeflemektedir.

2.4.5. Japonya Yönetmeliği

Japonya'da gömülü boru hatlarının sismik tasarımı, özellikle 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) Depremi sonrasında önemli bir gelişim göstermiştir. 1978 Miyagiken-Oki Depremi'nden sonra 1982 yılında ilk olarak yayınlanan "Depreme Dayanıklı Gaz Boru Hatlarının Tasarımı İçin Önerilen Uygulama", 1995'teki Hyogoken-Nanbu Depremi'nden sonra büyük ölçüde revize edilmiştir. Japonya Gaz Birliği, bu büyük depremin ardından yüksek basınçlı gaz boru hatlarının sismik tasarımını yeniden gözden geçirmiş ve 2000 yılında yeni bir tasarım yöntemi sunmuştur. Bu yeni yöntem, Düzey 2 sismik hareketlere, yani düşük olasılıkla meydana gelen ancak çok güçlü olan depremlere karşı boru hatlarının dayanıklılığını artırmayı amaçlamaktadır.

Gömülü boru hatlarının sismik tasarımı iki ana seviye üzerinden yapılmaktadır: Düzey 1 ve Düzey 2 sismik hareketler. Düzey 1, boru hattının hizmet ömrü boyunca bir veya iki kez meydana gelmesi muhtemel olan genel sismik hareketleri içerirken, Düzey 2, iç tip depremler veya büyük ölçekteki levha sınırı depremlerinin neden olduğu çok güçlü sismik hareketleri kapsamaktadır. Düzey 1 sismik hareketlerde boru hattının herhangi bir onarım gerektirmeden hemen tekrar işleme alınabilmesi hedeflenirken, Düzey 2 sismik hareketlerde boru hattının deformasyona uğrasa bile sızıntı yapmaması beklenmektedir. Bu tasarım prensipleri, boru hattının güvenliğini, ekonomik faaliyetlere etkisini ve ikinci dereceden felaketlerin önlenmesini göz önünde bulundurarak belirlenmiştir.

2.4.6. Türkiye Yönetmeliği

Ülkemizde zemine gömülü boru hatlarının deprem dayanıklı tasarımı için özel bir şartname bulunmamaktadır. Mevcut Türk standartları ve yönetmelikleri genellikle boruların yer altına yerleştirilmesi, taşınması ve depolanması gibi operasyonel detaylara odaklanmaktadır. Örneğin, TS-2170 (Su ve gaz borularının yer altına yerleştirilmesi kuralları) gibi standartlar, hendek derinliği ve donma derinliği gibi kriterleri belirleyerek boru hatlarının güvenli bir şekilde yerleştirilmesini sağlamaktadır. Ancak, deprem etkilerine karşı boru hatlarının dayanıklılığını artırmak için özel olarak hazırlanmış bir düzenleme veya şartname bulunmadığından Türkiye'de gömülü boru hatlarının deprem dayanıklı tasarımı genellikle Amerikan ve Japon standartlarına dayandırılmaktadır.

3. GÖMÜLÜ BORU HATLARI VE BİLEŞENLERİ

3.1. Boru Hatlarının Türleri

Boru hatları, taşınacak malzemenin türüne ve kullanım amacına bağlı olarak çeşitli türlere ayrılır. Boru hatları genellikle su, doğal gaz, petrol ve atık su gibi maddelerin taşınmasında kullanılır ve her bir türün kendine özgü özellikleri ve gereksinimleri vardır.

3.1.1.Su Boru Hatları

Su boru hatları, içme suyu, endüstriyel su ve sulama suyu gibi farklı türde suyu taşımak için tasarlanır. Bu borular genellikle çelik, dökme demir, polietilen (PE) veya polivinil klorür (PVC) gibi malzemelerden yapılır. Çelik borular, yüksek dayanıklılık ve basınca karşı direnç sağlar, ancak korozyona karşı korunmaları gerekir. Polietilen ve PVC borular ise korozyona dayanıklıdır ve esnek yapıları sayesinde yer hareketlerine karşı daha dirençlidir. Su boru hatlarının tasarımında, suyun kalitesi ve hijyenik gereksinimler de önemli rol oynar.

3.1.2.Doğal Gaz Boru Hatları

Doğal gaz boru hatları, doğal gazın şehir merkezlerine, endüstriyel tesislere ve diğer tüketim noktalarına güvenli ve verimli bir şekilde taşınmasını sağlar. Bu borular genellikle çelik veya yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemelerden yapılır. Çelik borular, yüksek basınç altında gaz taşımak için uygundur ve uzun mesafelerde kullanılabilir. HDPE borular ise daha düşük basınç uygulamaları için uygundur ve esnek yapıları sayesinde yer hareketlerine karşı dirençlidir. Doğal gaz boru hatları, gazın patlayıcı doğası nedeniyle sıkı güvenlik standartlarına tabi tutulur.

3.1.3. Petrol Boru Hatları

Petrol boru hatları, ham petrol ve rafine petrol ürünlerinin taşınmasında kullanılır. Bu borular genellikle çelik malzemelerden yapılır ve yüksek basınca karşı dayanıklıdır. Petrol boru hatlarının korozyona karşı korunması için çeşitli kaplama ve katodik

koruma yöntemleri kullanılır. Ayrıca, petrol boru hatlarının güvenliğini artırmak için sızıntı tespit sistemleri ve düzenli bakım gereklidir. Petrol boru hatları, genellikle uzun mesafelerde büyük miktarlarda petrol taşır ve çevresel etkilerin minimize edilmesi için dikkatli bir şekilde yönetilmelidir.

3.1.4. Atık Su Boru Hatları

Atık su boru hatları, evsel ve endüstriyel atık suların toplanması ve arıtma tesislerine taşınmasında kullanılır. Bu borular genellikle beton, PVC veya polietilen malzemelerden yapılır. Beton borular, yüksek dayanıklılık ve uzun ömür sağlar, ancak ağır ve taşınması zordur. PVC ve polietilen borular ise daha hafif ve esnek olup, kurulum ve bakım açısından avantaj sağlar. Atık su boru hatlarının tasarımında, sızdırmazlık ve dayanıklılık gibi faktörler önemlidir, çünkü bu hatlar çevresel kirliliği önlemek için kritik bir rol oynar.

Boru hatlarının türleri, belirli uygulama alanları ve seçim kriterlerine göre özenle belirlenmelidir. Bu seçim sürecinde dikkate alınması gereken başlıca faktörler şunlardır: Taşınacak malzemenin kimyasal özellikleri, sıcaklık ve basınç koşulları, uygun malzeme seçimini doğrudan etkiler. Ayrıca, boru hattının kurulacağı yerin iklim koşulları, zemin özellikleri ve çevresel etkiler de malzeme seçiminde önemli rol oynar. Maliyet unsuru, hem malzeme hem de kurulum maliyetlerini içermekle birlikte, uzun vadeli dayanıklılık ve bakım maliyetlerinin de göz önünde bulundurulması gereklidir. Boru hatlarının dayanıklılığı ve güvenilirliği, özellikle kritik altyapı uygulamalarında büyük önem taşır. Çelik, plastik, beton, bakır ve kompozit borular, çeşitli taşıma ve altyapı ihtiyaçlarına yönelik çözümler sunar. Bu nedenle, doğru malzeme ve tasarım seçimi, boru hatlarının güvenli, verimli ve uzun ömürlü olmasını sağlar.

3.2. Boru Hatlarının Özellikleri

Boru hatlarının türlerine göre farklı özellikleri bulunur. Bu özellikler, boru hatlarının taşıdığı malzeme, çalışma basıncı, çevresel koşullar ve boru hattının yer aldığı coğrafi bölge gibi faktörlere bağlı olarak değişir.

3.2.1.Malzeme Özellikleri

Boru hatlarının yapımında kullanılan malzemeler, boru hattının dayanıklılığını, esnekliğini ve korozyona karşı direncini belirler. Çelik borular, yüksek dayanıklılık ve basınca karşı direnç sağlar, ancak korozyona karşı korunmaları gerekir. Polietilen ve PVC borular, korozyona dayanıklıdır ve esnek yapıları sayesinde yer hareketlerine karşı daha dirençlidir. Bu malzemeler, boru hattının ömrünü uzatır ve bakım maliyetlerini azaltır. Boru hatları, modern altyapının temel bileşenlerinden biridir ve çeşitli sıvı ve gazların taşınmasında kullanılır. Boru hatlarının türleri, taşıdıkları malzeme, uygulama alanı ve çevresel koşullar gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu bölümde, boru hatlarının farklı türleri ve bu türlerin özellikleri incelenecektir. Bu inceleme, boru hatlarının doğru seçimi ve uygulanmasında kritik bir öneme sahiptir.

Boru hatları, genellikle yapıldıkları malzemeye göre sınıflandırılır. Her malzeme, belirli uygulamalar ve koşullar için avantajlar ve dezavantajlar sunar.

Çelik Borular: Çelik borular, yüksek mukavemetleri ve uzun ömürleriyle su, petrol, doğalgaz ve kimyasal maddeler gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Yüksek basınç ve sıcaklıklara dayanıklı olmaları ve büyük çaplı üretim imkânı sunmaları avantaj sağlar. Ancak korozyona karşı hassas olmaları ve bu nedenle koruyucu kaplamalar veya katodik koruma gerektirmeleri, ayrıca ağırlıkları nedeniyle taşınmaları zor olabilir.

Plastik Borular (PVC, HDPE): Plastik borular, su dağıtım sistemleri, kanalizasyon hatları ve tarımsal sulama gibi alanlarda kullanılır. Korozyona ve kimyasal etkilere karşı dirençli olmaları, hafif ve esnek olmaları montajlarını kolaylaştırırken düşük maliyetleri avantaj sağlar. Ancak mekanik darbelere karşı hassas olmaları ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılıklarının sınırlı olması dezavantaj teşkil eder.

Beton Borular: Beton borular genellikle büyük çaplı kanalizasyon ve drenaj sistemlerinde kullanılır. Yüksek basınca, zemin hareketlerine ve kimyasallara karşı dayanıklılığıyla bilinirler. Dayanıklı ve uzun ömürlü olmaları avantaj sağlarken, ağırlıkları nedeniyle taşınmaları ve montajlarının zorluğu maliyet artışına yol açabilir.

Bakır Borular: Bakır borular genellikle içme suyu ve ısıtma sistemlerinde tercih edilir. Yüksek ısı iletim kapasiteleri ve antimikrobiyal özellikleri sağlık açısından

avantajlar sunarken, yüksek maliyetleri ve mekanik streslere karşı hassasiyetleri dezavantaj olarak öne çıkar.

Kompozit Borular: Kompozit borular, cam elyafı veya karbon elyafı ile güçlendirilmiş plastik borulardır. Yüksek mukavemet ve düşük ağırlık avantajları sunarlar. Korozyona dayanıklı olmaları ve yüksek basınç/sıcaklıklara dayanabilme özellikleri taşıma ve montaj kolaylığı sağlar. Ancak yüksek üretim ve malzeme maliyetleri ile özel montaj gereksinimleri dezavantaj olabilir.

Çap ve Duvar Kalınlığı: Boru hatlarının çapı ve duvar kalınlığı, taşıyacağı malzemenin miktarına ve boru hattının çalışacağı basınca göre belirlenir. Daha büyük çaplı ve kalın duvarlı borular, yüksek basınç altında daha fazla miktarda malzeme taşımak için uygundur. Bu özellikler, boru hattının güvenliğini ve uzun ömürlü olmasını sağlar. Örneğin, yüksek basınç altında çalışan doğal gaz boru hatları, daha kalın duvarlı borular gerektirir.

3.2.2. Bağlantı ve Montaj Detayları

Boru hatlarının bağlantı ve montaj detayları, boru hattının genel performansını ve dayanıklılığını etkiler. Esnek bağlantılar ve uygun montaj teknikleri, boru hattının deprem ve diğer dış etkenlere karşı dayanıklılığını artırır. Bağlantı noktalarının doğru tasarımı, boru hattının yer değişikliklerine uyum sağlamasını ve sızdırmazlık sağlamasını sağlar. Ayrıca, boru hatlarının düzenli bakım ve onarımı, bağlantı noktalarının güvenliğini sağlar.

3.2.3. İzolasyon ve Koruma

Boru hatlarının korozyona karşı korunması için çeşitli izolasyon ve koruma yöntemleri kullanılır. Kaplama ve katodik koruma sistemleri, boru hatlarının korozyona karşı dayanıklılığını artırır. Ayrıca, boru hatlarının güvenliğini sağlamak için sızıntı tespit sistemleri ve düzenli bakım gereklidir. İzolasyon yöntemleri, boru hatlarının ömrünü uzatır ve çevresel etkileri minimize eder. Özellikle petrol ve doğal gaz boru hatları için korozyon koruma sistemleri hayati öneme sahiptir.

3.3. Gömülü Boru Hatlarında Hasara Neden Olan Faktörler

Depremler, yer kabuğundaki ani enerji boşalmaları sonucu meydana gelen sismik olaylardır ve yerleşim alanlarında büyük yıkımlara neden olabilir. Gömülü boru hatları, su, gaz ve petrol gibi önemli altyapı hizmetlerini sağlamak için kullanıldığından, bu hatların depremlerden etkilenmesi, toplumsal ve ekonomik açıdan büyük riskler taşır. Deprem sonrası boru hatlarındaki hasarlar, yangın, su baskını ve çevresel kirlilik gibi ikincil afetlere yol açabilir. Bu durum, hızlı ve etkin müdahaleyi zorlaştırarak, hasar gören bölgelerdeki iyileşme süreçlerini olumsuz etkiler. Bu bölümde, depremlerin gömülü boru hatlarına olan etkileri ve hasara neden olan faktörler incelenecektir.

3.3.1. Deprem Yüklerinin Boru Hatlarına Etkisi

Deprem yükleri, geçici yer deformasyonları (GYD) ve kalıcı yer deformasyonları (KYD) olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. GYD, deprem dalgalarının geçişi sırasında zeminin dinamik tepkisi olarak tanımlanırken, KYD, deprem sonrası zeminde oluşan ve geri dönmeyen deformasyonları ifade eder. Her iki deformasyon türü de boru hatlarında gerilme ve deformasyonlara neden olabilir. GYD genellikle kısa süreli ve anlık etkiler yaratırken, KYD daha kalıcı ve ciddi yapısal hasarlara yol açabilir. Bu nedenle, boru hatlarının her iki tür deformasyona karşı da dayanıklı olması kritik önem taşır.

Geçici Yer Deformasyonları (GYD): GYD, deprem dalgalarının geçişi sırasında oluşan zemin hareketleri sonucu meydana gelir. Bu hareketler, genellikle kısa süreli olup, boru hatlarında geçici gerilmelere neden olabilir. Deprem dalgalarının frekansı ve genliği, bu geçici deformasyonların şiddetini belirler. Yüksek frekanslı dalgalar, boru hatlarında daha kısa süreli ancak yüksek genlikli gerilmelere neden olabilir. Bu tür deformasyonlar, boru hatlarının esnekliği ve dayanıklılığına bağlı olarak, çoğu zaman büyük hasarlara yol açmaz.

Kalıcı Yer Deformasyonları (KYD): KYD, deprem sonrası zeminde meydana gelen kalıcı yer değiştirmeleri içerir. Bu deformasyonlar, fay hatlarının hareketi, şev kaymaları, sıvılaşma sonucu yer değiştirmeler ve kohezyonsuz topraklarda oluşan farklı oturmalar gibi çeşitli nedenlerden kaynaklanabilir. Boru hatları, KYD etkisi

altında büyük gerilmelere maruz kalabilir ve bu durum ciddi yapısal hasarlara neden olabilir. Kalıcı deformasyonlar, boru hatlarının uzun süreli işlevselliğini tehlikeye atarak, su ve enerji arzında kesintilere yol açabilir. Bu nedenle, KYD'nin etkilerini azaltmak için uygun mühendislik önlemleri alınmalıdır.

3.3.2. Hasara Neden Olan Faktörler

Depremler sırasında gömülü boru hatlarının hasar görmesine neden olan başlıca faktörler şunlardır:

Fay Hattı Hareketleri: Fay hatlarının hareketi, boru hatlarının çekme veya basınç gerilmelerine maruz kalmasına neden olabilir. Normal faylar çekme gerilmelerine, ters faylar ise basınç gerilmelerine yol açar. Çekme gerilmeleri, boru hatlarının uzunlamasına ekseninde uzamalara ve muhtemel çatlamalara yol açabilir. Basınç gerilmeleri ise boru hatlarının sıkışmasına ve burkulmasına neden olabilir. Fay hattı hareketleri, boru hatlarının maruz kaldığı gerilme türünü belirler ve bu gerilmeler, hatların yapısal bütünlüğünü ciddi şekilde etkileyebilir.

Şev Kaymaları ve Sıvılaşma: Deprem sırasında meydana gelen şev kaymaları ve sıvılaşma olayları, boru hatlarının eğilme ve uzama gerilmelerine maruz kalmasına neden olabilir. Şev kaymaları, boru hatlarının yer değiştirmesine ve eksenel olmayan kuvvetlere maruz kalmasına neden olur. Bu durum, özellikle dağlık ve yamaç bölgelerde yer alan boru hatları için ciddi risk oluşturur. Sıvılaşma, zeminin katı halden sıvı hale geçmesiyle meydana gelir ve boru hatlarının desteklenmesini sağlayan zemin özelliklerini kaybetmesi sonucu hatlarda büyük deformasyonlar ve çöküntüler oluşur. Sıvılaşma ve şev kaymaları, boru hatlarında ani ve büyük hasarlara neden olabilir, bu nedenle bu tür olaylar için özel tasarım ve mühendislik önlemleri gereklidir.

Yer Hareketleri ve Zemin Özellikleri: Depremin büyüklüğü, yer hareketlerinin şiddeti ve zemin özellikleri, boru hatlarının maruz kaldığı gerilme ve deformasyon miktarını belirler. Özellikle yumuşak ve sıvılaşma eğilimli zeminlerde boru hatları daha fazla hasar görmektedir. Yer hareketlerinin frekansı ve genliği, boru hatlarının farklı şekillerde etkilenmesine neden olabilir. Zemin sertliği, kohezyon, içsel sürtünme açısı ve su içeriği gibi faktörler, deprem dalgalarının yayılımını ve zemin tepkisini belirler. Özellikle yumuşak zeminlerde ve suya doygun topraklarda, boru hatları daha büyük deformasyonlara ve hasarlara maruz kalabilir.

3.4. Boru Hatlarının Deprem Dayanıklılığı

Boru hatlarının deprem dayanıklılığı, malzeme özellikleri, boru bağlantıları ve yerleşim derinliği gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Deprem dayanıklılığını artırmak için boru hatlarının esnek malzemelerden yapılması, uygun bağlantı elemanlarının kullanılması ve zemin koşullarına uygun olarak yerleştirilmesi gerekmektedir. Esnek malzemeler, boru hatlarının yer hareketlerine uyum sağlamasına ve deformasyonları absorbe etmesine yardımcı olur. Boru bağlantılarının dayanıklılığı, hatların maruz kaldığı gerilmelerin düzgün bir şekilde dağıtılmasını sağlar. Yerleşim derinliği ve zemin iyileştirmesi, boru hatlarının yer hareketlerinden daha az etkilenmesini sağlar ve bu sayede hasar riski azalır.

3.4.1. Malzeme Seçimi

Boru hatlarının yapımında kullanılan malzemeler, deprem dayanıklılığını doğrudan etkiler. Çelik, dökme demir, PVC ve polietilen gibi malzemeler farklı mekanik özelliklere sahiptir. Çelik borular, yüksek mukavemetleri ve esneklikleri nedeniyle deprem yüklerine karşı dayanıklıdır. Ancak, kaynak noktalarında kırılma riski bulunur. Polietilen borular ise yüksek esneklikleri nedeniyle yer deformasyonlarına daha iyi uyum sağlar. Bu nedenle, boru hatlarının malzeme seçiminde, deprem bölgelerindeki potansiyel yer hareketleri ve zemin koşulları dikkate alınmalıdır.

3.4.2. Boru Bağlantıları

Boru hatlarındaki bağlantı noktaları, deprem sırasında en zayıf noktalar olarak değerlendirilir. Bu nedenle, boru bağlantılarının esnek ve dayanıklı olması, deprem dayanıklılığını artırmak için kritik öneme sahiptir. Flanş bağlantıları, kaynaklı bağlantılar ve contalı bağlantılar gibi farklı yöntemler, farklı gerilme ve deformasyon senaryolarına göre seçilmelidir. Esnek bağlantı elemanları, boru hatlarının yer hareketlerine karşı daha dayanıklı olmasını sağlar. Bu tür bağlantılar, boru hatlarının yer hareketlerine uyum sağlamasına ve deformasyonların yayılmasını önlemesine yardımcı olur.

3.4.3.Yerleşim Derinliği ve Zemin İyileştirmesi

Boru hatlarının yerleşim derinliği, deprem sırasında maruz kalacakları gerilmelerin büyüklüğünü etkiler. Daha derine yerleştirilen borular, yüzeydeki yer hareketlerinden daha az etkilenir. Ayrıca, zemin iyileştirme teknikleri kullanılarak, boru hatlarının geçtiği zeminin özellikleri iyileştirilebilir ve bu sayede deprem dayanıklılığı artırılabilir. Zemin stabilizasyonu, sıkıştırma ve drenaj gibi yöntemler, zemin özelliklerini iyileştirir ve boru hatlarının dayanıklılığını artırır. Yerleşim derinliği ve zemin iyileştirmesi, boru hatlarının deprem sonrası işlevselliğini korumasına yardımcı olur ve hasar riskini azaltır.

3.5. Boru Hatlarının Deprem Performansı Değerlendirme Yöntemleri

Boru hatları, su, doğalgaz, petrol ve kanalizasyon gibi kritik altyapı hizmetlerinin taşınmasında hayati öneme sahiptir. Ancak, özellikle deprem gibi doğal afetler sırasında boru hatlarının bütünlüğü ve işlevselliği ciddi tehdit altına girebilir. Bu nedenle, boru hatlarının deprem performansını değerlendirmek ve dayanıklılıklarını artırmak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

Boru hatlarının deprem performansını değerlendirmek için kullanılan başlıca yöntemler şunlardır:

3.5.1. Yapısal Analiz ve Modelleme

Yapısal analiz ve modelleme, boru hatlarının deprem sırasında nasıl davrandığını anlamak için kullanılan temel yöntemlerden biridir. Boru hatlarının 2D veya 3D geometrik modellemesini içerir. Bu modeller, boru hattının uzunluğu, çapı, duvar kalınlığı gibi geometrik özellikleri ile malzeme özelliklerini (elastik modül, akma dayanımı vb.) içerir. Matematiksel modeller, boru hattının hem normal işletme koşullarında hem de olası deprem gibi yüksek yüklere maruz kaldığı senaryolarda nasıl davranacağını simüle etmek için kullanılır. Bu analizler, bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) gibi ileri mühendislik araçları kullanılarak gerçekleştirilir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM): Bu yöntem, boru hatlarının karmaşık geometrik ve yük koşullarını modellemek için kullanılır. FEM, boru hattının deprem sırasında maruz kalacağı gerilmeleri, deformasyonları ve potansiyel zayıf noktaları belirlemeye yardımcı olur.

Dinamik Analizler: Deprem sırasında boru hatlarının dinamik davranışlarını incelemek için kullanılır. Bu analizler, boru hatlarının titreşim modlarını, doğal frekanslarını ve sismik dalgalara karşı tepkilerini belirler.

3.5.2. Sismik Dalga Yayılımı Analizleri

Sismik dalga yayılımı analizleri, boru hatlarının deprem gibi sismik yükler altında nasıl davranacağını anlamak için kullanılan önemli bir yöntemdir. Bu analizler, boru hatlarının yer hareketlerinin neden olduğu sismik dalgalara karşı tepkisini değerlendirir ve boru hatlarının güvenliği için kritik bir rol oynar.

Spektral Analiz: Bu yöntem, boru hatlarının farklı frekanslardaki sismik dalgalara nasıl tepki vereceğini değerlendirir. Sismik dalga spektrumu, depremin oluşturduğu yer hareketlerinin frekans içeriğini temsil eder. Spektral analiz, boru hatlarının bu farklı frekanslardaki sismik dalgalara karşı dinamik tepkisini hesaplamak ve değerlendirmek için kullanılır. Bu sayede, boru hatlarının belirli frekanslardaki sismik yükler altında nasıl davranacağı öngörülebilir ve tasarım sürecinde güçlendirme gereksinimleri belirlenebilir.

Zemin-Boru Etkileşimi Analizi: Bu analiz, boru hattının zeminle etkileşimini ve yerel zemin koşullarının boru hattı üzerindeki etkilerini değerlendirir. Zeminin dinamik özellikleri, boru hattının sismik dalgalara karşı tepkisini büyük ölçüde etkileyebilir. Zemin-boru etkileşimi analizi, zeminin dinamik tepkilerini modeller ve boru hattının üzerine iletilen sismik yüklerin nasıl değişebileceğini belirler. Bu analiz, boru hatlarının tasarımında ve yerleşiminde zemin koşullarının dikkate alınmasını sağlar ve boru hatlarının sismik performansını artırmak için önemli veriler sağlar.

Dinamik Analizler: Boru hatlarının deprem sırasında dinamik davranışlarını anlamak için çeşitli dinamik analiz yöntemleri kullanılır. Bu analizler, boru hatlarının titreşim modlarını, doğal frekanslarını ve sismik dalgalara karşı tepkilerini belirlemek için yapılan hesaplamaları içerir. Dinamik analizler, boru hatlarının deprem sırasında nasıl hareket edeceğini ve potansiyel hasar bölgelerini öngörmeye yardımcı olur. Sismik

dalga yayılımı analizleri, boru hatlarının deprem gibi doğal afetlerde nasıl davranacağını anlamak ve bu davranışı optimize etmek için önemli bir araçtır. Bu analizler, boru hatlarının güvenliği ve dayanıklılığı için tasarım sürecinde hayati bir rol oynar ve boru hatlarının sismik performansını artırmak amacıyla geliştirilen güçlendirme stratejilerinin temelini oluşturur

3.5.3. Deneysel Yöntemler

Deneysel yöntemler, boru hatlarının deprem performansını laboratuvar ortamında test etmek için kullanılır. Bu yöntemler, boru hatlarının gerçek deprem koşullarına nasıl tepki verdiğini doğrudan gözlemlemeye olanak tanır.

Sarsma Masası Testleri: Bu testler, boru hatlarının küçük ölçekli modellerinin sismik dalgalara maruz bırakılarak davranışlarını incelemek için kullanılır. Sarsma masası testleri, boru hatlarının dinamik tepkilerini ve potansiyel zayıf noktalarını belirler.

Tam Ölçekli Testler: Gerçek boyutlu boru hatlarının deprem simülasyonlarına maruz bırakıldığı testlerdir. Bu testler, boru hatlarının gerçek dünya koşullarında nasıl davrandığını ve hangi faktörlerin boru hattının bütünlüğünü etkilediğini anlamak için kullanılır.

3.5.4. Hasar Gözlem ve Değerlendirme

Geçmiş depremlerde meydana gelen boru hattı hasarlarının gözlemlenmesi ve değerlendirilmesi, boru hatlarının deprem performansını anlamak için önemli bir yöntemdir. Bu yöntem, boru hatlarının hangi koşullar altında hasar gördüğünü ve bu hasarların nedenlerini belirlemeye yardımcı olur.

Hasar Veri tabanları: Geçmiş depremlerden elde edilen boru hattı hasar veri tabanları, hasar türlerini, yaygınlıklarını ve nedenlerini belirlemek için kullanılır. Bu veri tabanları, boru hattı tasarım ve güçlendirme stratejilerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynar.

Saha İncelemeleri: Deprem sonrası saha incelemeleri, boru hattı hasarlarının yerinde değerlendirilmesini ve hasarın nedenlerinin belirlenmesini sağlar. Bu incelemeler, boru hattı performansını artırmak için gerekli iyileştirmelerin belirlenmesine yardımcı olur.

Boru hatlarının deprem performansını değerlendirme yöntemleri, bu kritik altyapıların güvenilirliğini ve dayanıklılığını artırmak için hayati öneme sahiptir. Yapısal analiz ve modelleme, sismik dalga yayılımı analizleri, deneysel yöntemler ve hasar gözlem ve değerlendirme yöntemleri, boru hatlarının deprem sırasında nasıl davrandığını anlamak ve bu davranışı iyileştirmek için kullanılır. Bu yöntemlerin etkin bir şekilde kullanılması, boru hatlarının deprem riski altındaki bölgelerde güvenli ve dayanıklı olmasını sağlar.

3.6. Kocaeli Örneğinde Boru Hatları ve Altyapı Sistemleri

Kocaeli, Türkiye'nin sanayi ve ticaret açısından en önemli bölgelerinden biridir ve aynı zamanda Marmara Depremi gibi büyük depremlerle sarsılmıştır. İstanbul'a yakınlığı ve stratejik konumu nedeniyle yoğun bir sanayi ve yerleşim bölgesidir. Bölge, Türkiye'nin en büyük sanayi alanlarından biri olmasıyla öne çıkmakta ve altyapı sistemleri açısından büyük bir öneme sahiptir. Bölgede yer alan çok sayıda fabrika, rafineri ve sanayi tesisi, doğalgaz, su ve kimyasal maddelerin taşınması amacıyla geniş bir boru hattı ağına ihtiyaç duymaktadır. Bunun yanı sıra, hızla artan nüfus, su, doğalgaz ve kanalizasyon sistemleri gibi temel altyapı ihtiyaçlarının da sürekli bir şekilde artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, Kocaeli'nin limanları, petrol ve diğer sıvı maddelerin taşınması açısından boru hatlarıyla entegre bir lojistik sistem sunarak deniz ulaşımında stratejik bir rol oynamaktadır.

17 Ağustos 1999 Marmara Depremi, altyapının depreme karşı savunmasızlığını ortaya koymuş ve ciddi hasarlara yol açmıştır. Deprem sırasında birçok su borusu kırılmış, sızıntılar meydana gelmiş ve bu durum su kesintilerine ve su kaynaklarının kirlenmesine neden olmuştur. Doğalgaz boru hatlarında oluşan hasarlar, gaz sızıntıları ve yangın risklerini artırırken kanalizasyon hatlarının zarar görmesi, atık suyun çevreye yayılmasına ve sağlık sorunlarına yol açmıştır. 1999 Marmara Depremi'nin ardından, altyapı sistemlerinin depreme karşı dirençli hale getirilmesi için gerçekleştirilen çalışmalar hem yapıların güçlendirilmesini hem de operasyonel iyileştirmeleri kapsamaktadır. Boru hatları ve altyapı elemanları, dayanıklı malzemelerle güçlendirilmiş ve depremde oluşabilecek sarsıntılara karşı esneklik sağlayacak şekilde yeniden yapılandırılmıştır. Bunun yanı sıra, afet öncesi ve sonrasında devreye giren teknolojik sistemler, su ve doğalgaz akışının kontrolünü

sağlayarak olası hasarları minimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, yerel yönetimler ve ilgili kuruluşlar, altyapıların düzenli olarak izlenmesi ve yenilenmesi için sıkı bir bakım programı uygulamaktadırlar. Altyapı sistemlerinin dirençli hale getirilmesi, bölgedeki afetlere karşı hazırlığı artırarak toplumun güvenliğini sağlamada önemli bir adım olmuştur.



4. KOCAELİ BÖLGESİ DEPREM TEHLİKE ANALİZİ

4.1. Kocaeli'nin Deprem Tarihçesi

Kocaeli, Türkiye'nin Marmara Bölgesi'nde yer alan önemli bir sanayi ve ticaret merkezidir. Coğrafi konumu, özellikle Kuzey Anadolu Fay Hattı (KAF) üzerinde bulunması nedeniyle sık sık depremlerle karşı karşıya kalmaktadır.

Bu nedenle Kocaeli bölgesi içinde meydana gelen veya bölgeyi etkilemiş depremlerin çoğu 6'dan fazladır. Bu nedenle il içinde ve il merkezine yakın bölgelerde gerek tarihi (1900 öncesi) gerekse araşsal (1900 sonrası) dönemlerde yüzey faylanmasına neden olacak depremler yaşanmıştır. Tarihi depremler cihazlar vasıtasıyla kaydedilmediğinden, bu depremlerin yerleri sadece tarihi kayıtlardan ve hasarın dağılımına bakılarak ve kesin olmayan bir şekilde tahmin edilmektedir. Bu bölümde, Kocaeli'nin tarih boyunca maruz kaldığı önemli depremler ele alınacak ve bu depremlerin bölgedeki etkileri incelenecektir.

4.1.1 Tarihsel Dönem Depremleri (1900 Öncesi)

Tarihsel belgelere göre İzmit ve çevresini etkileyen önemli depremler arasında MS 69, 325, 358, 362, 488, 526, 530, 553, 554, 557, 715, 740, 989, 1419, 1509, 1530, 1567, 1719, 1764, 1766, 1866, 1878, 1894 depremleri en önemlileridir. Bunlardan bazıları ilin farklı bölgelerini etkilerken, bazıları doğrudan il merkezini etkilemiştir. Örneğin, 358 Büyük Depremi bir tsunami de yaratmış ve kayıtlara göre şehri neredeyse yok etmiştir. İzmit ve Çevresindeki Tarihsel Depremler ve Tsunamiler

MS 69 Depremi: Roma İmparatoru Vitellus Germanicus döneminde İzmit'te güçlü bir deprem meydana gelmiştir. Bu depremin şiddeti ve etkileri hakkında sınırlı bilgi bulunmaktadır ancak bölgedeki yapıların hasar gördüğü bilinmektedir (Soysal, 1985).

325 Depremi: İzmit Körfezi'nde bir tsunamiye neden olmuştur. Bu olay, Marmara Bölgesi'nde sıkça karşılaşılan sismik aktivitelerin bir örneğidir (Soysal, 1985).

24 Ağustos 358 Depremi: "Büyük Deprem" olarak bilinen bu olay, İstanbul'u daha fazla etkilemesine rağmen İzmit'te büyük yıkıma neden olmuştur. Bu deprem sonucu oluşan tsunami, İzmit'te büyük zarara yol açmıştır. Yaklaşık yüz bin kişinin ölümüne

neden olan bu deprem, İzmit tarihindeki en büyük depremdir (**Umar, 2004**). Umar (2004), bu depremin İzmit tarihindeki en büyük deprem olduğunu belirtmiştir.

362 Depremi: 358'deki büyük depremin ardından kalan binalar da yıkılmıştır. Bu depremler, İzmit'in mimari yapısında büyük değişimlere neden olmuştur (**Soysal, 1985**).

26 Eylül 488 Depremi: İzmit Körfezi'nde tsunami olayları meydana gelmiştir. Bu tsunami, bölgedeki deniz seviyesinin değişmesine ve kıyı yapılarının zarar görmesine neden olmuştur (**Soysal, 1981**).

20 Mayıs 526 Depremi: İzmit Körfezi kıyılarında IX şiddetinde bir deprem olmuştur. Deprem, bölgedeki yerleşim yerlerinde büyük yıkıma neden olmuştur (**Ambraseys, 2006**).

Kasım 530 Depremi: İstanbul ve komşu illerde hissedilen bu deprem İzmit'i de etkilemiştir. Deprem, bölgedeki yapıların dayanıklılığını test etmiştir (**Ambraseys, 2006**).

15 Ağustos 553 Depremi: İzmit Körfezi'nde meydana gelen deprem sırasında deniz suları yaklaşık 2 mil karaya doğru hareket etmiştir. Bu olay, bölgedeki kıyı yapılarının zarar görmesine neden olmuştur (**Soysal, 1981**).

15 Ağustos 554 Depremi: İzmit'te büyük yıkıma neden olan X şiddetinde bir depremdir. Deprem, bölgedeki yapıların büyük çoğunluğunu yıkmıştır (**Soysal, 1981**).

14 Aralık 557 Depremi: İzmit Körfezi'nde yaklaşık 3 mil karaya doğru hareket eden deniz suları tsunamiye neden olmuştur. Bu tsunami, kıyı bölgelerinde büyük yıkıma neden olmuştur (**Soysal, 1981**).

715 Depremi: İzmit Körfezi'nde tsunamiye neden olmuştur. Bu olay, bölgedeki deniz seviyesinin ve kıyı yapılarının zarar görmesine neden olmuştur (**Soysal, 1981**).

26 Ekim 740 Depremi: İzmit Körfezi'nde tsunami olayları gözlenmiştir. Deprem, İzmit ve çevresindeki yapıların büyük kısmını yıkmıştır (**Sakin, 2002**).

26 Ekim 989 Depremi: İzmit, IX şiddetindeki bu depremden büyük zarar görmüştür. Bu deprem, bölgedeki yapıların dayanıklılığını test etmiştir (**Soysal, 1981**).

25 Mayıs 1419 Depremi: İzmit Körfezi kıyılarında yıkıma neden olmuştur ve bir yıl süren artçı sarsıntılar devam etmiştir. Bu deprem, bölgedeki yerleşim yerlerinde büyük yıkıma neden olmuştur (Soysal, 1981).

10 Eylül 1509 Depremi: "Küçük Kıyamet" olarak bilinen bu deprem İzmit şehir merkezinde büyük yıkıma neden olmuştur. Deprem, bölgedeki yapıların büyük çoğunluğunu yıkmıştır (Sakin, 2002).

1530 Depremi: Bedreddin Al-Ghazi, İzmit'te birçok enkazın olduğunu belirtmiştir. Bu deprem, bölgedeki yapıların büyük kısmını yıkmıştır (Soysal, 1981).

1 Ekim 1567 Depremi: İzmit'te birçok ev yıkılmıştır. Bu deprem, bölgedeki yapıların dayanıklılığını test etmiştir (Soysal, 1981).

24 Mayıs 1719 Depremi: İzmit şehir merkezinde ve çevresinde büyük yıkıma neden olmuştur. Bu deprem, bölgedeki yerleşim yerlerinde büyük yıkıma neden olmuştur (Genç & Mazak, 2001).

1754 Depremi: İzmit şehir merkezindeki önemli binaların çoğu yıkılmıştır. Bu deprem, bölgedeki yapıların büyük kısmını yıkmıştır (Ambraseys, 2006).

22 Mayıs 1766 Depremi: İzmit'te büyük yıkıma neden olmuştur. Bu deprem, bölgedeki yerleşim yerlerinde büyük yıkıma neden olmuştur (Ambraseys, 2006).

3 Haziran 1766 Depremi: İzmit Körfezi'ndeki bazı yerleşim yerleri hasar görmüştür. Bu deprem, bölgedeki yapıların dayanıklılığını test etmiştir (Ambraseys, 2006).

5 Ağustos 1766 Depremi: İzmit'te büyük yıkıma neden olmuştur. Bu deprem, bölgedeki yerleşim yerlerinde büyük yıkıma neden olmuştur (Ambraseys, 2006).

2 Şubat 1866 Depremi: İzmit Körfezi'nde tsunamiye neden olmuştur. Bu olay, bölgedeki kıyı yapılarının zarar görmesine neden olmuştur (Soysal, 1981).

19 Nisan 1878 Depremi: İzmit Körfezi'nde tsunamiye neden olmuştur. Bu olay, bölgedeki kıyı yapılarının zarar görmesine neden olmuştur (Soysal, 1981).

10 Temmuz 1894 Depremi: İzmit, Karamürsel ve Gebze büyük zarar görmüştür. Bu deprem, bölgedeki yapıların büyük kısmını yıkmıştır (Soysal, 1981).

4.1.2. Aletsel Dönem Depremleri (1900 Sonrası)

Aletsel dönemde kaydedilen en yıkıcı deprem, 17 Ağustos 1999'da meydana gelen İzmit depremidir. Bu deprem, Marmara Bölgesi'nde 7.4 büyüklüğünde olup, Ankara'dan İzmir'e kadar geniş bir alanda hissedilmiştir. Resmi kayıtlara göre, bu depremde 17.480 kişi hayatını kaybetmiş, 23.781 kişi yaralanmış, 285.211 ev ve 42.902 iş yeri hasar görmüştür. Depremin endüstriyel olarak gelişmiş ve yoğun nüfuslu bir bölgede meydana gelmesi, bu olayı doğal afetin ötesinde bir felakete dönüştürmüştür.

17 Ağustos 1999 Depremi: Aletsel ölçümlerin ardından Kocaeli bölgesinde meydana gelen en yıkıcı deprem, halk arasında “17 Ağustos depremi”, “Gölcük depremi” ve “İzmit depremi” olarak da bilinmektedir. Richter ölçeğine göre büyüklüğü 7.4 olarak belirlenmiştir. Bu depremde can ve mal kaybı yüksek olmuştur. Depremin gecenin ilerleyen saatlerinde meydana gelmesi gözlemleri zorlaştırmışsa da, yapılan incelemelerde Gölcük ilçesi Kavaklı sahilinde tsunami izlerine rastlanmıştır.

Gölcük Depremi, Kocaeli'nin yanı sıra Türkiye genelinde derin etkiler yaratmıştır. Kentteki birçok bina yıkılmış, altyapı büyük zarar görmüş ve binlerce insan hayatını kaybetmiştir. Depremin ardından kurtarma çalışmaları yoğun bir şekilde sürmüş ve Türkiye, uluslararası toplumdan da büyük destek görmüştür.

4.2. Kocaeli Bölgesinin Jeolojik Özellikleri

Kocaeli bölgesi, Türkiye'nin kuzeybatısında, Marmara Bölgesi'nde yer almakta olup, jeolojik yapısı oldukça karmaşıktır. Bölgenin jeolojisi çeşitli formasyonlar tarafından şekillendirilmiştir. Aşağıda Kocaeli bölgesinin başlıca jeolojik formasyonları özetlenmiştir:

4.2.1. Çaycuma Formasyonu

Çaycuma Formasyonu, Kocaeli bölgesinde Paleojen yaşlı bir formasyon olup, genellikle kırmızımsı renkli, kilaşı, marn, kumtaşı ve konglomera litolojilerine sahiptir. Formasyon, denizel ortamda çökelmiş olup, içeriğinde fosil kalıntıları barındırmaktadır. Çaycuma Formasyonu'nun Kocaeli'ndeki varlığı, bölgenin tarihsel olarak denizel etkiler altında olduğunu göstermektedir.

4.2.2. Kartal Formasyonu

Kartal Formasyonu, Eosen yaşı olup, genellikle kireçtaşı ve dolomit litolojilerinden oluşmaktadır. Bu formasyonun yayılımı, bölgenin karasal ve denizel süreçler tarafından etkilenmiş olduğunu göstermektedir. Kartal Formasyonu, çeşitli mikrofauna fosilleri içermesi nedeniyle paleontolojik açıdan da önem taşımaktadır.

4.2.3. Kızılçay Formasyonu

Kızılçay Formasyonu, genellikle kırmızımsı renkli kilaşı, kumtaşı ve konglomera birimlerinden oluşur. Bu formasyon, bölgenin karasal çökme ortamlarında oluştuğunu işaret eder ve genellikle üst Paleosen ile alt Eosen yaşıdır. Kızılçay Formasyonu, bölgenin jeolojik tarihinin anlaşılmasında önemli bir role sahiptir.

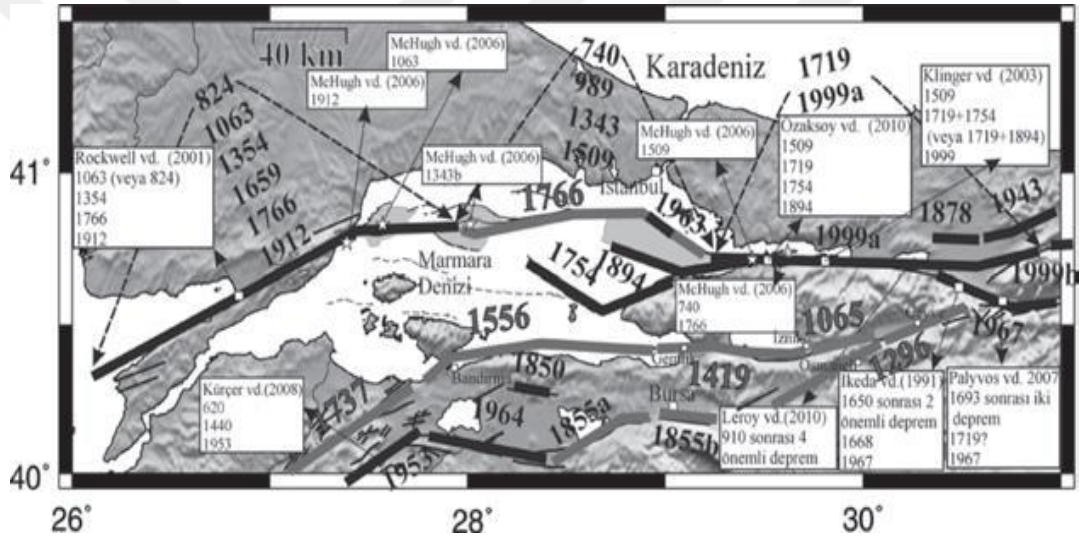
4.2.4. Tüf Formasyonu

Tüf Formasyonu, volkanik aktivite sonucu oluşmuş birimlerden biridir. Genellikle volkanik küllerin çökmesi sonucu oluşan bu formasyon, bölgenin volkanik faaliyetler tarafından da etkilendiğini göstermektedir. Tüf Formasyonu, genellikle Eosen yaşı olup, bazaltik ve andezitik bileşimler içermektedir.

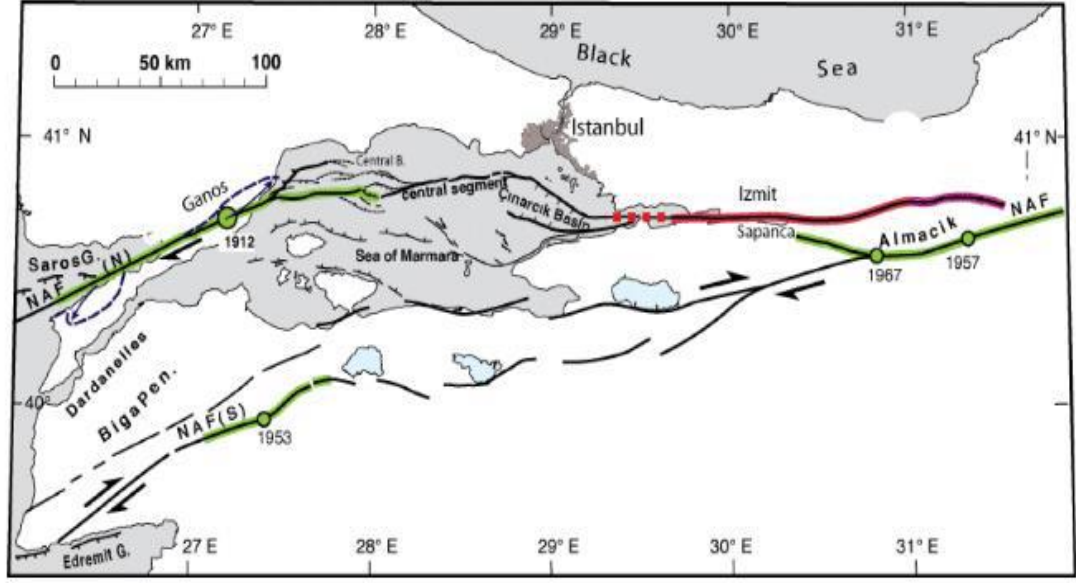
4.3. Kocaeli Bölgesinin Tektonizması

Birçok sanayi tesisini barındıran çalışma alanı Kocaeli İl'inin sağ yanal atımlı Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde, sismik açıdan aktif sığ kıtasal kabukta yer alması ve çeşitli tektonizmalar etkisi altında olması, bölge için olasılıksal sismik tehlike analizi yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Kocaeli Bölgesi, KAFZ'nun üzerinde yer almasının yanı sıra, güneyden Eskişehir Fay Zonu (EFZ), kuzeyden ise çökme etkisi altındaki Karadeniz Havzası etkisi altında kalmaktadır. Avrasya ve Anadolu levhaları arasındaki sınır bölgeyi oluşturan, Karadeniz'in güney sahiline paralel olarak uzanan yıllık ortalama 25 mm hızla sağ yanal atımlı olarak hareket eden 1500 km uzunluğundaki Kuzey Anadolu Fayı (KAF), Marmara Bölgesi'nin morfolojik ve tektonik süreçlerinde etkili olmuş ve olmaya devam etmektedir. İçerisinde birçok fay segmentini barındıran bir zon niteliğinde olan KAFZ üzerinde son 300 yılda meydana gelmiş olan depremlerin olası ve gözlemlenen kırılım uzanımları farklı araştırmacılar

tarafından paleosismik çalışmalarla belirlenmiştir (Utkucu, 2011), (Şekil 4.1). 17.08.1999 Kocaeli ($M_s=7.8$) ve 12.11.1999 Düzce ($M_s=7.5$) depremleri ise KAF'nın kuzey kolunun etkisiyle meydana gelmiş son ve büyük depremlerdir. Bolu'ya kadar kesintisiz olarak gözlemlenebilen KAFZ, Bolu İli'nin batısından başlayarak Marmara Bölgesi'nde üç ana kola ayrılmaktadır. Güney kolu Gemlik Körfezi ile Almacık Dağı arasında uzanırken, Orta kol Adapazarı'ndan Kuzeydoğu-Güneybatı doğrultusuyla Geyve yönüne doğru uzanmakta ve Kuzey kolu ise Bolu-Mudurnu'dan başlayıp İzmit körfezi ve Sapanca'dan geçip, Marmara çukuruna uzanıp Ganos Fayı'na bağlanmakta, Saros Körfezi'nden Ege Denizi'ne ulaşmaktadır (Şaroğlu vd., 1992, Kalafat 2000, 2003; Kalafat vd., 2001) (Şekil 4.2).

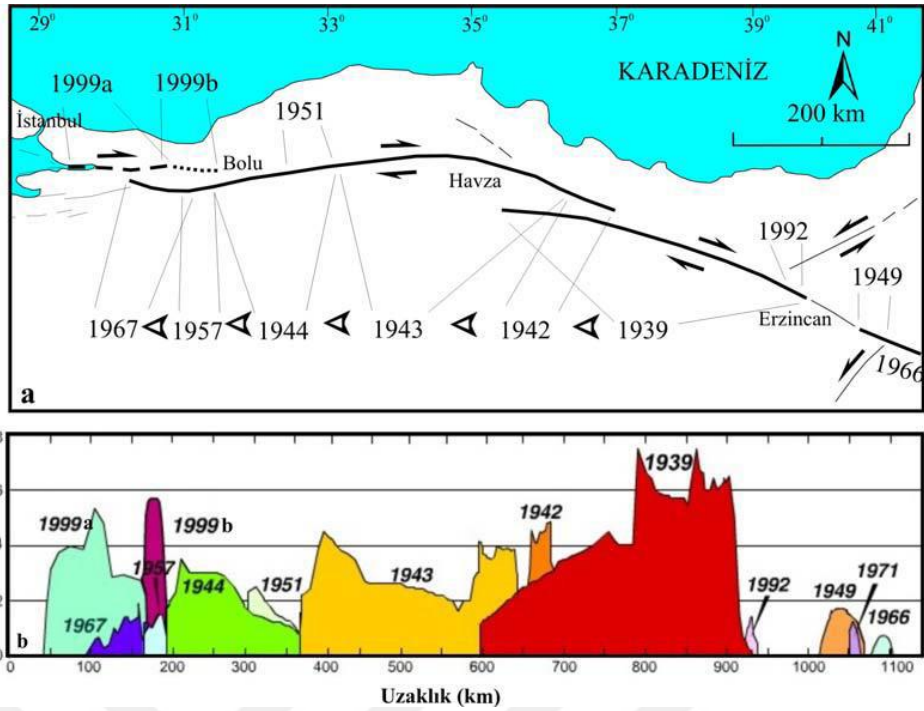


Şekil 4.1: Marmara bölgesinde son 300 yılda oluşmuş depremlerin olası ve gözlemlenen kırılma uzanımları (Utkucu, 2011).



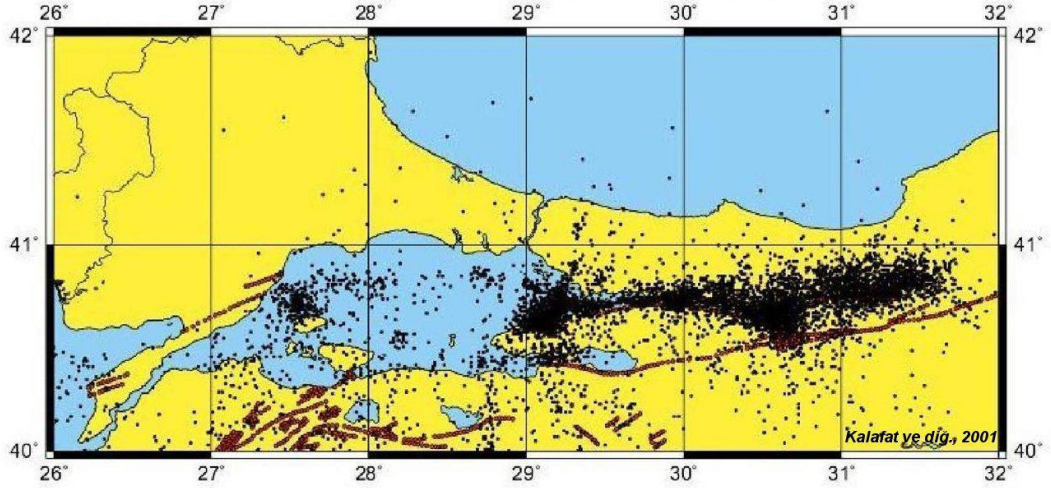
Şekil 4.2: KAF sisteminin Marmara Bölgesindeki kolları ve üzerinde meydana gelen depremler (Utkucu, 2011).

Türkiye'nin en önemli tektonik yapılarından biri olan KAFZ ilk defa 1939 Erzincan depreminden sonra bilimsel olarak tanımlanmış ve sağ yönlü doğrultu atımlı olarak literatüre girmiştir (Ketin, 1948; 1966; 1968). KAFZ'nun ana segmentleri üzerinde belirli periyotlar ile 1939 Erzincan Depremi sonrası Doğudan Batıya doğru göçen büyük depremler dizisi meydana gelmiştir. Bunlar sırası ile 1939 Erzincan ($M_s=7.9$), 1942 Erbaa-Tokat ($M_s=7.0$), 1943 Ladik-Samsun ($M_s=7.2$), 1944 Gerede-Bolu ($M_s=7.2$), 1957 Abant-Bolu ($M_s=7.1$), 1967 Mudurnu ($M_s=6.8$), 1999 Kocaeli ($M_s=7.7$) ve 1999 Düzce ($M_s=7.4$) depremleridir (Barka ve diğ., 2002; Holzer ve diğ., 2000; Kalafat, 2016) (Şekil 4.3).



Şekil 4.3: a) 1939 Depreminden sonra büyük depremlerin batıya göçü ve b) Batıya göç eden depremlerin atım dağılımı (Kalafat, 2016).

KAFZ üzerinde meydana gelen 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinden sonra, kırılan fay segmentinin Hersek Burnu'nu geçmediği yönündeydi, fakat $M > 4$ olan artçı şokların dağılımı, arazi gözlemleri, ivme kayıtları ve İstanbul-Yalova arasındaki Türk Telekom (TT) deniz tabanı fiber kablolarının hasar görmesi bunun aksini göstermekte ve kırılmanın hem güneye Çınarcık hem de kuzeye Yalova açıklarından Hersek Burnu'nu geçerek Prens adalarının önlerine doğru devam ettiğini kanıtlamaktadır (Kalafat vd., 2001, Kalafat, 2016) (Şekil 4.4). Bu bilgiler doğrultusunda çalışma alanının aktif tektonik bir rejim altında bulunduğu ve deprem tehlikesinin olasılıksal olarak belirli dönüş periyotlarına karşılık gelecek şekilde hesaplanması gerektiği uygun görülmektedir.



Şekil 4.4: 17 Ağustos 1999-31 Aralık 2000 tarihleri arası Marmara Bölgesi Depremleri artçı şoklarının dağılımı.

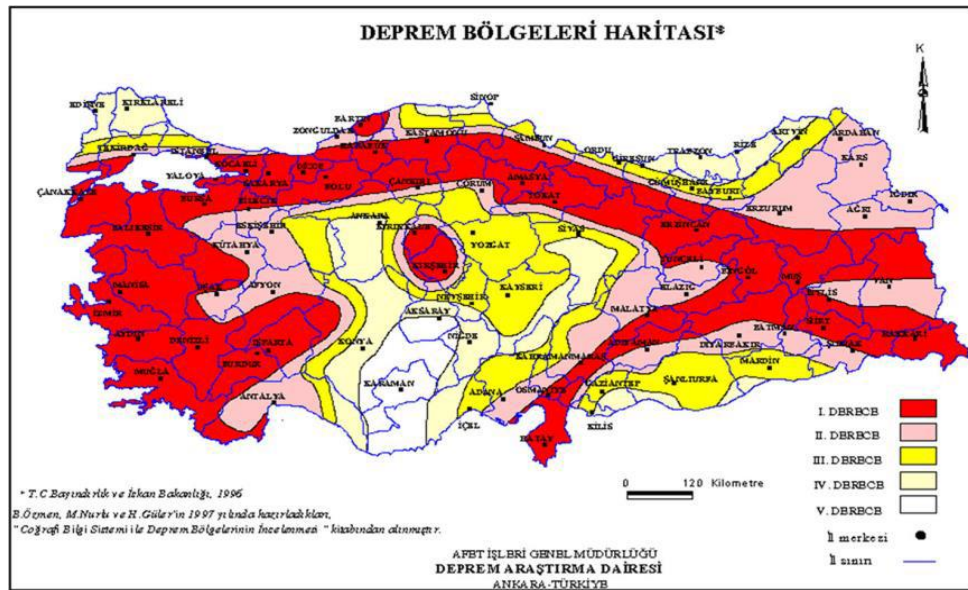
4.4. Olasılıksal Sismik Tehlike Modelleri

Olasılıksal sismik tehlike analizinde kullanılmak üzere en uygun bölgesel sismik tehlike modelinin seçimi literatür incelemesinde araştırılmış, bölgenin tektonik özellikleri ve sismik aktivitesi gözetilerek en güncel model olan 2020 yılında yayınlanan Avrupa Sismik Tehlike Modeli (ESHM20) açık kaynak kodlu OpenQuake (Pagani vd., 2014) yazılımı ile çalışılmıştır.

4.4.1. Bölgesel Olasılıksal Sismik Tehlike Haritaları ve Modelleri

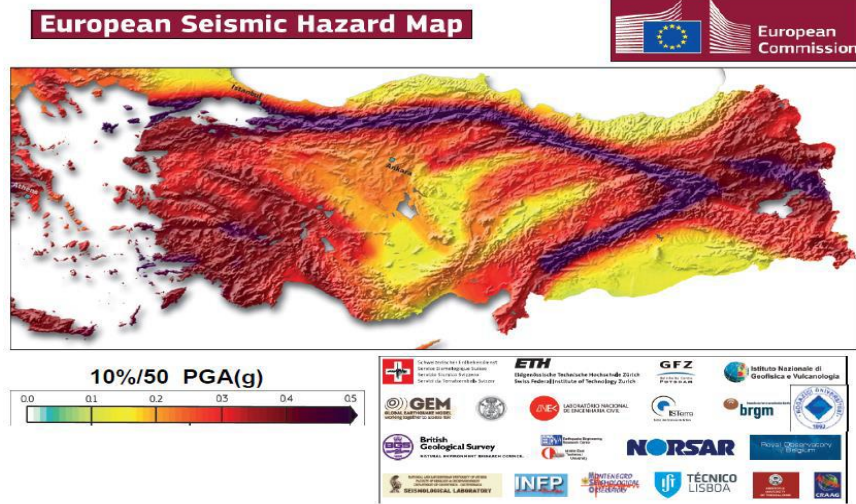
Anadolu levhası üzerinde yer alan Türkiye, güneyden Arap ve Afrika levhaları tarafından dalma-batma mekanizması ile sıkıştırılmakta ve batıya doğru kaçma tektoniği geliştirmektedir (Özmen, 2000). Anadolu levhasının batıya doğru hareketi bölgenin en uzun ve etkili fay mekanizması olan sağ yanal atımlı Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) boyunca meydana gelmekte ve bölgenin aktif tektonizmasında büyük rol oynamaktadır. KAFZ'nun yanı sıra Ege grabenleri, Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) ve Güneydoğu Anadolu Bindirme Kuşağı da (GDAFZ) Anadolu levhasında yoğun depremselliğe sebep olmaktadır. Özmen (2000), Türkiye'de 1900-1999 yılları arasında 149 adet hasar oluşturan deprem meydana geldiğini ve bu depremlerin 578.544 binanın yıkılmasına veya ağır hasar görmesine ve 97.203 can kaybına yol açtığını belirtmiştir. Aletsel dönemin başlangıcı ile sismoloji biliminde analitik yaklaşımlar

benimsenmiş, deprem mühendisliği branşı gelişmeye başlamış, deprem tehlikesini gösteren bölgesel haritalar üzerinde çalışılmaya başlanmıştır. Gayri resmi olarak bölgedeki ilk deprem tehlike haritaları **Sieberg (1932)** tarafından oluşturulmuştur (**Özmen, 2012**). KAFZ’unda meydana gelen, büyük can kaybı ve yıkıma sebep olan sırasıyla 1939 Erzincan ve 1944 Bolu-Gerede depremlerinden sonra 1945 yılında ilk resmi deprem tehlike haritası yayınlanmıştır (**Akkar ve diğ., 2018**). Daha sonra 1945 ve 1947 yılında yayınlanan deprem tehlike haritaları, geçmiş depremlerin eş şiddet haritaları tektonik haritalar ve çeşitli literatür çalışmaları (**Pamir 1948; Pınar ve Lahn 1952; Omote ve İpek 1959**) ve makro sismik şiddet skalaları (Medvedev-Sponheuer-Karnik) birleştirilerek 1963 yılında ve ardından 1972 yılında tekrar yenilenmiştir (**Akkar ve diğ., 2018**). Türkiye için çeşitli ulusal ve uluslararası araştırma ve projeler kapsamında yürütülen olasılıksal deprem tehlike çalışmaları 1980 sonrası hız kazanmış, sırasıyla **Yarar ve diğ., (1980)**, **Erdik ve Öner (1982)**, ve ardından **Erdik ve diğ., (1985a, b)** şiddet ve maksimum yatay yer hareketi dağılımını içeren çeşitli dönüş periyotlarına karşılık gelen olasılıksal deprem tehlike haritaları oluşturmuşlardır. Sonrasında ise **Gülkan ve diğ.’nin (1993)** 100, 225, 475 ve 1000 yıllık dönüş periyotları için yapmış olduğu olasılıksal deprem tehlike analizi ile elde edilen maksimum yatay yer ivmesi (PGA) değerlerine dayanarak deprem tehlike haritası 1996 yılında tekrar güncellenmiştir (**Şekil 4.5**).



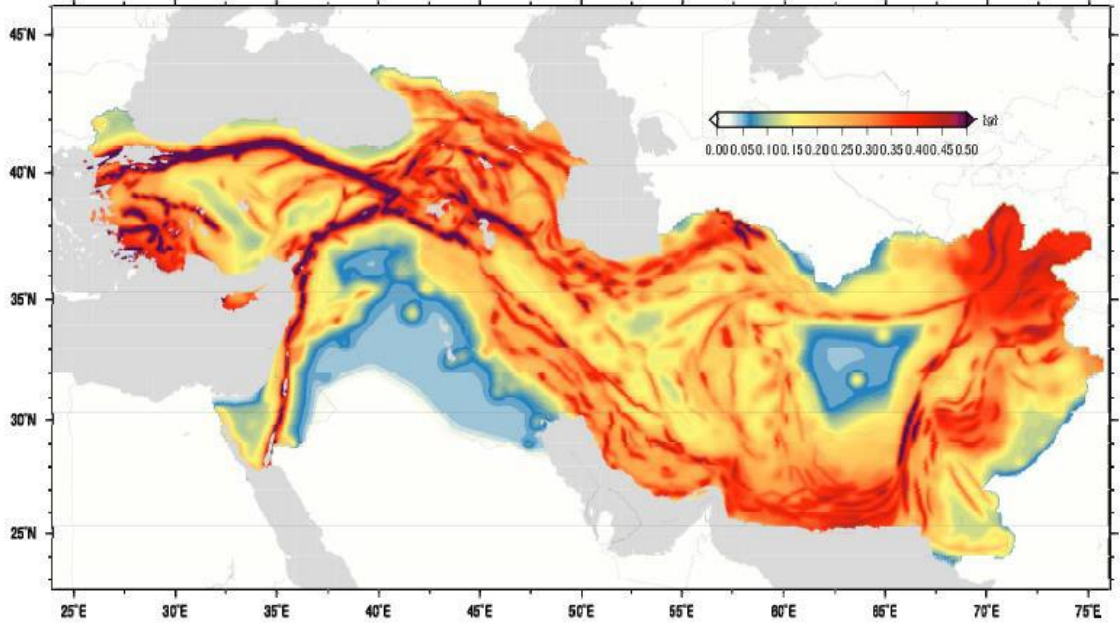
Şekil 4.5: 1996 yılı Türkiye deprem tehlike haritası.

Çalışmalar **Onur, (1997)** ile devam etmiş, sonrasında Türkiye ve komşu bölgelerin dahil olduğu birçok ulusal ve uluslararası projeler kapsamında olasılıksal deprem tehlike haritaları üretilmiştir. **Erdik ve diğ., (1999)** ve **Giardini, (1999)** GSHAP (Global Seismic Hazard Project) projesi kapsamında Türkiye ve komşu bölgeler için alan kaynak modeline dayanarak ana kaya için 100, 225, 475 ve 1000 yıllık dönüş periyotları için PGA dağılım haritaları oluşturmuştur. **Jimenez ve diğ., (2001)**, tarafından çalışılan SESAME (Unified Hazard Model for the European-Mediterranean Region) projesi Avrupa ülkeleri ile Türkiye'yi de kapsamaktadır. Projede alan kaynak modeli kullanılmış olup ana kayada 475 yıllık dönüşüm periyoduna karşılık gelen PGA ve $T=0.3$ sn ve $T=1.0$ sn'deki spektral ivme (SA) değerleri hesaplanmıştır. **Bommer ve diğ., (2002)**, TEFER (Turkey Emergency Flood and Earthquake Recovery Project) projesi kapsamında alan kaynak modeline dayanan, yer hareketi tahmin ilişkilerinde (YHTİ) mantık ağacı kullanılarak, ana kayadaki 475 ve 2475 yıllık dönüş periyotlarına karşılık gelen PGA ve $T=0.3$ sn ve $T=1.0$ sn'deki spektral ivme (SA) dağılımlarını elde etmiştir. **Demircioğlu ve diğ., (2007)**, demiryolları, limanlar, havaalanı yapılarının deprem dayanım yönetmeliğine altlık oluşturan DLH projesi kapsamında Türkiye için alan kaynak ve çizgi kaynak modeli oluşturmuş, YHTİ'nde mantık ağacı kullanarak 475 ve 2475 dönüş periyoduna karşılık gelen PGA ve $T=0.2$ sn ve $T=1.0$ sn'deki spektral ivme (SA) dağılımlarını ana kayada elde etmiştir. **Woessner ve diğ., (2015)**, SHARE (Seismic Hazard Harmonization in Europe) projesi kapsamında Avrupa-Akdeniz bölgelerinin deprem tehlike modelini güncellemeyi hedeflemişler, üç farklı sismik kaynak modeli (1. Alan kaynak-AS, 2. Kernel düzleştirilmiş sismisite-SEIFA, 3. Fay kaynak ve arka plan sismisite-FSBG) kullanarak farklı dönüş periyodlarına karşılık gelen PGA ve spektral ivme dağılımı haritaları oluşturmuşlardır (**Şekil 4.6**). Çalışma farklı tektonik bölgeler için geliştirilen YHTİ'lerini mantık ağacı ile uygulamış, FSBG için **Anderson and Luco (1983)** tekrarlama modeli kullanılırken AS için Guttenberg-Richter tekrarlama modeli kullanılmıştır.



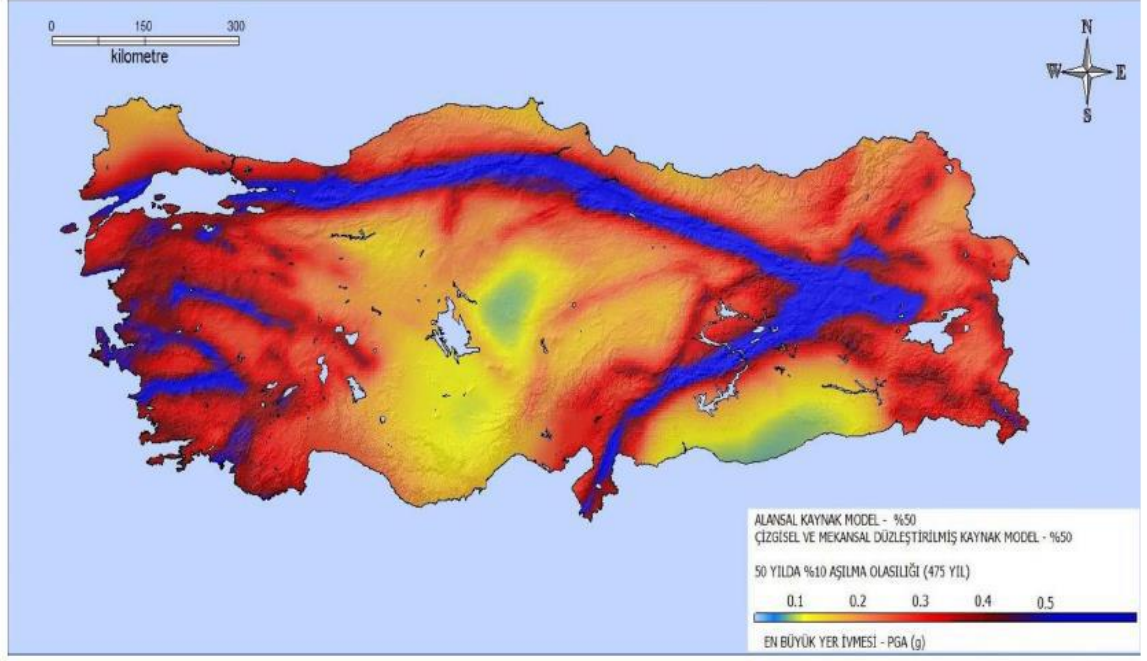
Şekil 4.6: SHARE projesi kapsamında Türkiye için geliştirilen 50 yılda 10% aşılma olasılığını gösteren PGA deprem tehlike haritası.

Şeşetyan ve diğ., (2018) ise Ortadoğu, Kafkaslar ve Pakistan bölgelerini kapsayan EMME (Earthquake Model of Middle East) projesi kapsamında Türkiye için olasılıksal deprem tehlike riski, yapı hasarı ve ekonomik kayıp değerlendirmesi yapmıştır. Alan kaynak ve düzleştirilmiş alan modelinin birleştirilmesi ile çizgi kaynak kullanılmış, YTHİ için mantık ağacı uygulaması yapılmış ve 72, 475, 975, 2575 ve 4975 dönüş periyotlarına karşılık gelen PGA ve $T=0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.50, 0.75, 1.0$ ve 2.0 sn'ler deki SA dağılımları hesaplanmıştır (**Şekil 4.7**).



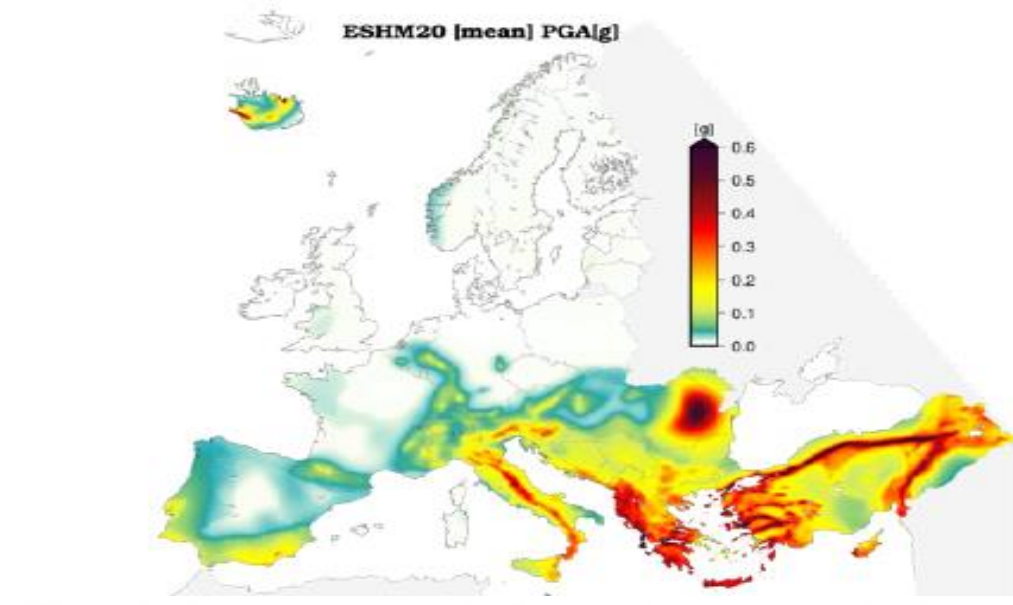
Şekil 4.7: EMME projesi kapsamında 475 yıllık dönüş periyoduna tekabül eden 50 yılda 10% aşılma olasılığını gösteren PGA deprem tehlike haritası.

T-SHM (Turkish Seismic Hazard Map) ise UDAP-Ç-13-06 projesi kapsamında Türkiye için oluşturulan olasılıksal deprem tehlike haritalarını içeren bir çalışmadır ve bu haritalar 2018'de yayınlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY, 2018) kullanılmaya başlanmıştır. Çalışmada alan kaynak ve arka plan deprem aktivitesini göz önüne alan düzleştirilmiş sismisite (smoothed seismicity) ile birleştirilmiş çizgi kaynak modeli kullanılarak 43 yıllık (50 yılda aşılma oranı 69%), 72 yıllık (50 yılda aşılma oranı 50%), 475 yıllık (50 yılda aşılma oranı 10%), 2475 yıllık (50 yılda aşılma oranı 2%) dönüş periyotlarına karşılık gelen PGA, S_a ($T=0.2$ sn), S_a ($T=1.0$ sn) haritaları oluşturulmuştur (**Şekil 4.8**). Çalışmada 1900-2012 yılları arasında meydana gelen depremlerden, 41 adet ulusal ve uluslararası kaynaktan elde edilen yaklaşık 37.000 olayın değerlendirilmesiyle oluşturulan deprem kataloğu kullanılmıştır (**Akkar ve diğ., 2018**). Çalışmada aktif sığ ve dalma-batma bölgeleri için farklı azalım ilişkileri kullanılarak mantık ağacı uygulanmıştır.



Şekil 4.8: 475 yıllık dönüş periyoduna tekabül eden 50 yılda 10% aşılma olasılığını gösteren güncellenmiş Türkiye deprem tehlike haritası; PGA dağılımı.

Son olarak 2020 yılında Avrupa-Akdeniz bölgesini kapsayan ESHM (European Seismic Hazard Model) olasılıksal deprem tehlike modeli yayınlanmıştır. Model, güncel olarak derlenmiş deprem kataloglarını, aktif fayları, yer hareketi kayıtlarını ve sismojenik kaynakları içermektedir. Çalışmada alan kaynak ve hibrit fay kaynak-düzleştirilmiş sismisite modelini kullanarak YTHİ'ler ve kaynak modelleri için mantık ağacı uygulaması yapılmış, farklı dönüş periyotlarına tekabül eden PGA ve SA dağılım haritaları oluşturulmuştur (Şekil 4.9).



Şekil 4.9: 475 yıllık dönüş periyoduna tekabül eden ortalama PGA dağılımı.

4.4.2. 2020 Avrupa Sismik Tehlike Modeli-ESHM20

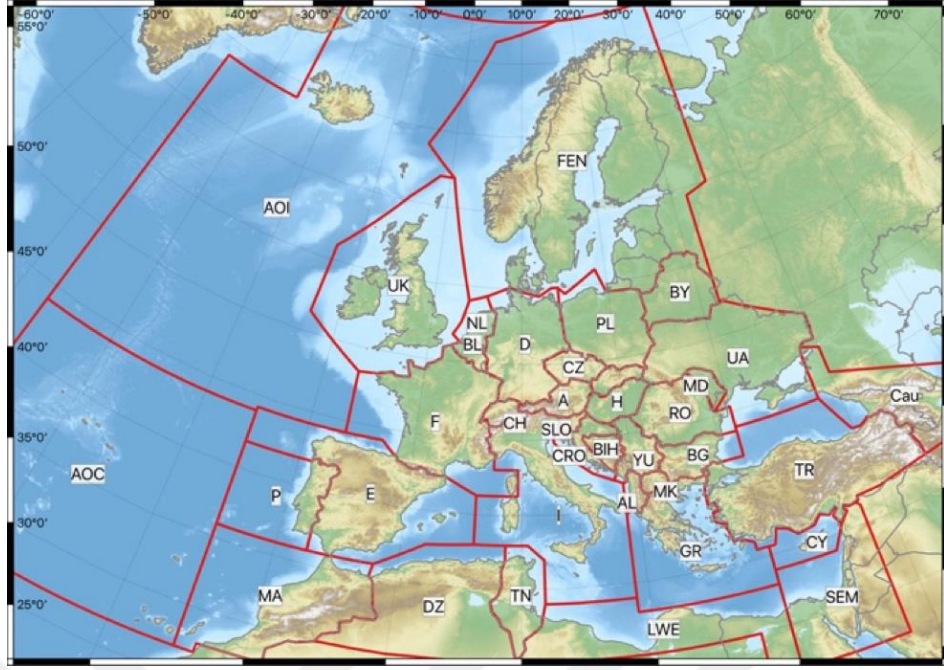
Çalışma alanında uygulanacak olasılıksal sismik tehlike analizinde en güncel deprem kataloğu ve tektonik yapıları içeren 2020 Avrupa Sismik Tehlike Modelinin (ESHM20) kullanılması uygun görülmüştür. Bu model kapsamında araştırmacılar tarafından oluşturulan veri setleri ve OpenQuake girdi dosyaları açık erişim olarak paylaşılmış olup, bu tez kapsamında çalışma alanının sınırlarına göre modifiye edilerek kullanılmıştır. Analiz aşamasına geçmeden önce ESHM20 modelinde kullanılan deprem katalogları, aktif faylar, tektonik bölgeselleştirme, sismojenik kaynaklar, yer hareketi tahmin ilişkileri ve sismojenik kaynaklar için kullanılan mantık ağacı uygulaması ve girdi veri setleri açıklanmıştır.

4.4.2.1. Homojen (Birleştirilmiş) Deprem Kataloğu

Olasılıksal deprem tehlike analizinin önemli bir bileşeni olan deprem katalogları yerel ve uluslararası kaynaklara dayanan aletsel ve tarihsel verilerin birleştirilmesi ile oluşturulur. ESHM20’de tarihsel deprem verileri kataloğu, 1000-1899 dönemini kapsayan EPICA kataloğuna dayanmaktadır (**Rovida ve Antonucci, 2021a**). EPICA v1.1 kataloğu, şiddeti ≥ 5 veya moment magnitüdü (M_w) ≥ 4.0 olan 5703 adet deprem içermektedir. Aletsel dönemi tanımlayan aletsel deprem kataloğu ise ESHM13

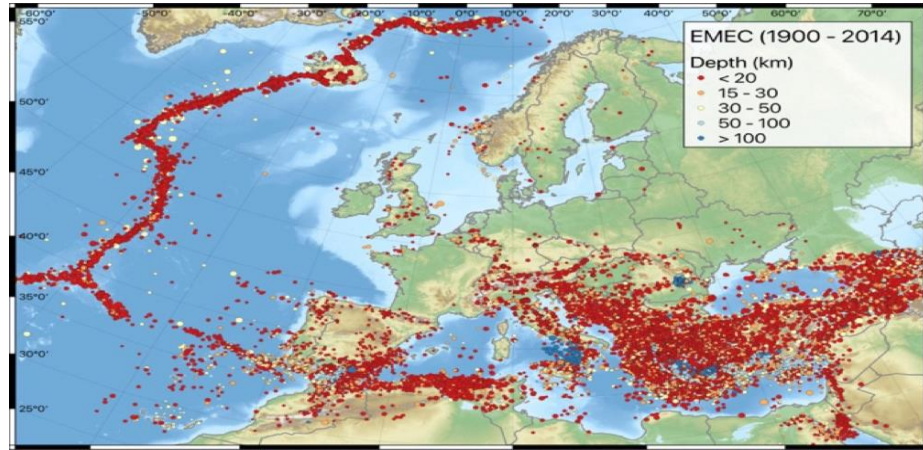
(Grünthal ve diğ. 2013) kataloğunun güncellenmesi sonucu 1900-2014 sonu arasındaki dönemi kapsamaktadır. ESHM13 deprem veri kataloğu ise Grünthal ve Wahlström (2012)'nin Avrupa-Akdeniz Deprem kataloğunun (EMEC-European-Mediterranean Earthquake Catalogue) güncellenmesi ile oluşturulmuştur. Dolayısıyla, ESHM20'de birleştirilmiş deprem kataloğu, ESHM2013'ten farklı olarak 2006 yılından sonra ek 8 yıllık veriyi içermekle beraber her ikisinde de aynı olan 1000-2007 periyodunda bile daha fazla sayıda deprem verisi içermektedir ve bu hali ile 1000-2014 sonu yılları arasındaki dönemi kapsamaktadır. Fakat, bu deprem kataloglarındaki magnitütler, lokal magnitüt-ML, cisim dalgası magnitüdü-Mb, yüzey dalgası magnitüdü-Ms, moment magnitüt-Mw, maksimum şiddet-IMAX veya episentral şiddet-I0 gibi farklı ölçeklerde derlendiğinden, tek bir ölçeğe çevrilip kullanılması tavsiye edilmektedir (Yüçemen, 2011). ESHM20 modelinde, olasılıksal deprem tehlike analizi için deprem büyüklüklerini gösteren magnitütlerin farklı dönüşüm ilişkileri ile harmonize (uyumlaştırma) edilerek ortak Mw ölçeği ile ifade edilmiştir.

EMEC kataloğu için veri toplama ve bölgelere ayırma, Avrupa'nın coğrafi/politik bölgeselleştirilmesine dayanmaktadır. Türkiye'nin de görülebileceği bölgeselleştirme Şekil 4.10'da verilmiştir. Güncellenmiş EMEC veri tabanına entegre edilen için yeni veri kaynakları arasında uyumlaştırılmış İtalya (CPTI15, Rovida ve diğ., 2020), Fransa (F-CAT, Manchuel ve diğ., 2018), Türkiye (Kadirioglu ve diğ., 2018), Slovenya (Zivcic, 2018) ve Romanya (INFP, 2018) deprem veri katalogları bulunmaktadır.



Şekil 4.10: ESHM20 modeli veri derleme için EMEC bölgeleri.

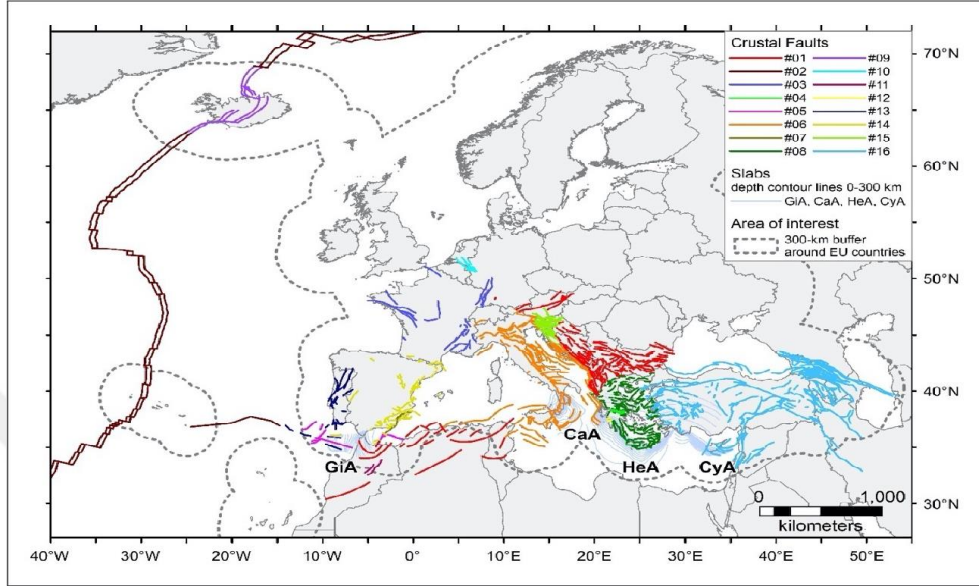
Güncellenen Avrupa-Akdeniz deprem kataloğu 1900-2014 sonu dönemine ait $M_w \geq 3.5$ olan 55.732 adet deprem içermektedir (Şekil 4.11). 2006 yılı sonrasında meydana gelen depremlerden yeni verilerin eklenmesi ile, Güney Avrupa'daki minimum magnitüt $M_w=4.0$ 'ten 3.5'a güncellenmiştir.



Şekil 4.11: 1900-2014 sonu periyodunu kapsayan EMEC deprem veri kataloğu.

ESHM modeli kapsamında geliştirilen Avrupa Fay-Kaynak Modeli 2020 (EFSM20-European Fault-Source Model), Avrupa Sismojenik Faylar Veritabanı 2013'ün (EDSF13; Basili ve diğ., 2013) güncellenmesi ile geliştirilmiştir. EFSM20'de

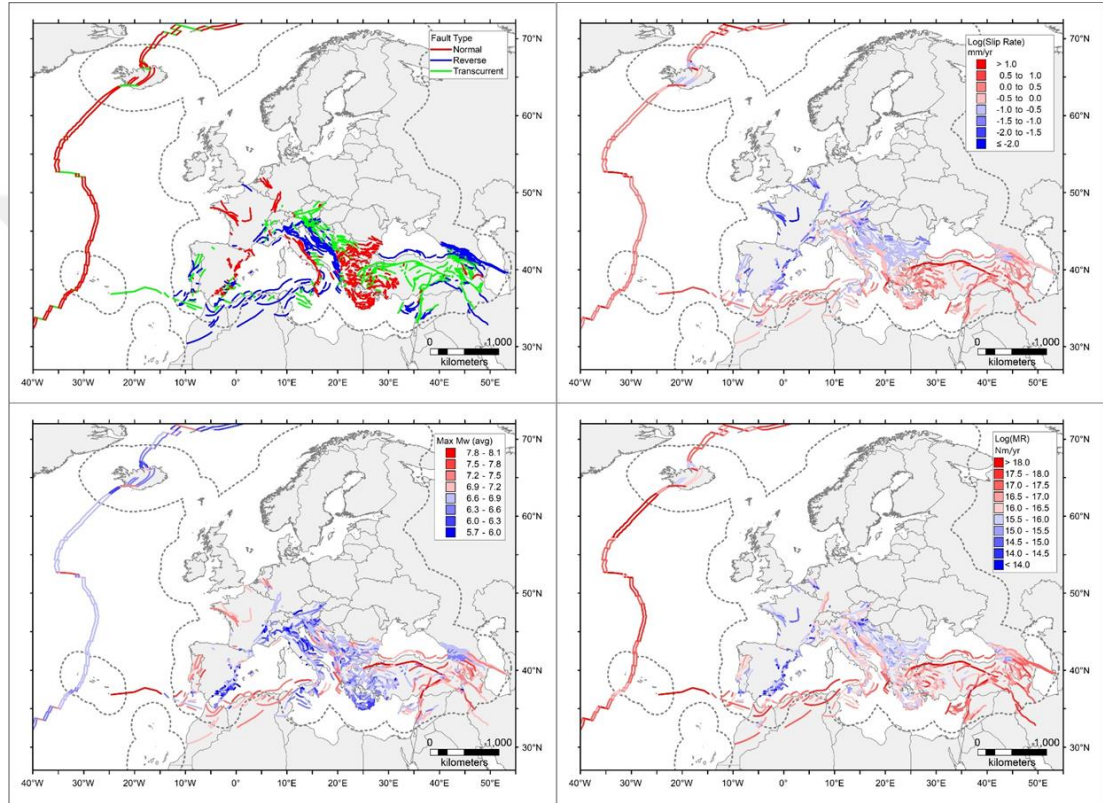
sismojenik fayların iki ana kategorisi göz önünde bulundurulmuştur: 1) kabuk fayları ve 2) dalma-batma zonları. Birleştirilmiş tüm sismojenik kaynaklar **Şekil 4.12**'de sunulmuştur.



Şekil 4.12: EFSM20 modeli kapsamında sismojenik bölgelere göre farklı renklerde gösterilen birleştirilmiş fay veritabanı.

Türkiye sınırları içerisinde yer alan kabuk fayları Ege Bölgesi'nde GreDaSS kapsamında (**Caputo ve Pavlides, 2013**) oluşturulan kısmi olarak 8 numaralı veritabanında, Türkiye'nin diğer bölgelerindeki kabuk faylar ise EMME projesi ve Türkiye Deprem Tehlike Haritasının Güncellenmesi Projesinde (T-SHM) geliştirilen 16 numaralı veri tabanında tanımlanmıştır (**Danciu ve diğ., 2018; Demircioğlu ve diğ., 2018; Emre ve diğ., 2018**). Fay geometrileri, tipi ve özellikleri coğrafi bilgi sistemi (GIS-Geographical information system) ortamında tanımlandıktan sonra, farklı fay tipi (eğim-atım ve doğrultu atım) ve tektonik bölge (levhalar arası ve sabit kabuk bölgeler) kategorilerinde kayma oranı yüzdelerinin olasılıksal göreceli belirsizliklerini belirlemek için istatistiksel analiz yapılmıştır. Kabuk faylarının maksimum deprem magnitüdü, moment magnitüd ölçeğinde, bir fayın boyutlarına ve magnitüd ölçekleme ilişkilerine dayalı olarak barındırabileceği olası en büyük kırılmaya karşılık gelen magnitüd değeri olarak tahmin edilir (**Leonard, 2010, 2014**). Kullanılan ölçekleme ilişkileri $M_w = a + b \cdot \log(S)$ şeklindedir; burada S herhangi bir fayın boyutu, uçtan uca uzunluğu, genişliği, alanı veya yer değiştirmesi olabilir.

Eşitlikle yer alan "a" ve "b" parametreleri S'ye, atım tipine (eğim-atımlı veya doğrultu-atımlı) ve sismotektonik yapıya (levhalar arası veya sabit kıta) bağlı olarak farklı değerler alır. Her bir fayın aktivite seviyesinin karakterizasyonu, fay alanı ile kayma hızının çarpımının üst kabuğun varsayılan sertliği (veya kayma modülü) ile çarpılmasıyla elde edilebilen tektonik moment oranı ile sağlanır. EFSM20'deki kabuk faylarının parametrelendirilmesi **Şekil 4.13**'de sunulan haritalarda görselleştirilmiştir.



Şekil 4.13: Uyumlaştırılmış fay-kaynak modelinin farklı özelliklerini gösteren haritalar.

Şekil 4.13, yukarıdan aşağıya ve soldan sağa, dört panel faylanma türlerini (normal, ters, çarpaz), maksimum magnitüd, kayma oranlarını ve moment oranlarını göstermektedir.

4.4.2.2. Ayırıştırma Analizi

Poisson modeli depremlerin zamansal ve mekânsal açısından birbirinden bağımsız şekilde oluştuğunu kabul eden ve olasılıksal tehlike analizinde oldukça sık kullanılan

bir varsayımdır. Bu nedenle, Poisson modelindeki bu bağımsızlık koşulunu sağlayabilmek için deprem verilerindeki artçı ve öncü deprem verileri ayıklanmalıdır (**Yüçemen, 2011**). Her bir deprem magnitüdü seviyesinde bulunan ana şoka belli bir uzaklık ve zaman penceresinde olan tüm depremlerin ana şokun artçı depremleri olduğu varsayılır ve depremin öncü sayılabilmesi içinde kendi magnitüt seviyesinde belirlenmiş uzaklık ve zaman penceresinde kendinden büyük depremin var olması gerekmektedir (**Yüçemen, 2011**). Bu durumlarda magnitüdü büyük olan ikinci depremin ana şok olduğu kabul edilir fakat istisnai bir durum olarak magnitüdü 6.0 ‘dan büyük olan tüm depremler ana şok olarak kabul edilir (**Yüçemen, 2011**). ESHM20’de üç farklı ayrıştırma analizi araştırılmıştır; i. Gruenthal, Gardner ve **Knopoff, (1974)**, ve **Uhrhammer, (1986)** tarafından tanımlanan zaman ve uzaklık penceresine dayalı sırasıyla winGT, winGK ve winUH olarak isimlendirilen pencereleme teknikleri. ii. **Reasenber (1985)** tarafından önerilen kümeleme yöntemi. iii. Bir korelasyon metriğine dayalı ayrıştırma (**Zaliapın ve diğ., 2008**). Farklı ayrıştırma analizi seçiminin ayrıştırılmış olay sayısı üzerindeki hassasiyetini belirlemek için hassasiyet analizi yapılmış, ayrıştırmadan sonra en büyük deprem veri sayısını üreten yöntem 43563 adet ana şok ile Reasenber yöntemi, ardından 30982 ana şok ile Zaliapın yöntemi ve 22708 ana şok ile ESHM’de kullanılan varsayılan zaman pencereleri tekniği olarak görülmüştür. Bu istatistiksel veri analizine göre Reasenber tekniğinin WT-Grünthal yöntemine alternatif bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

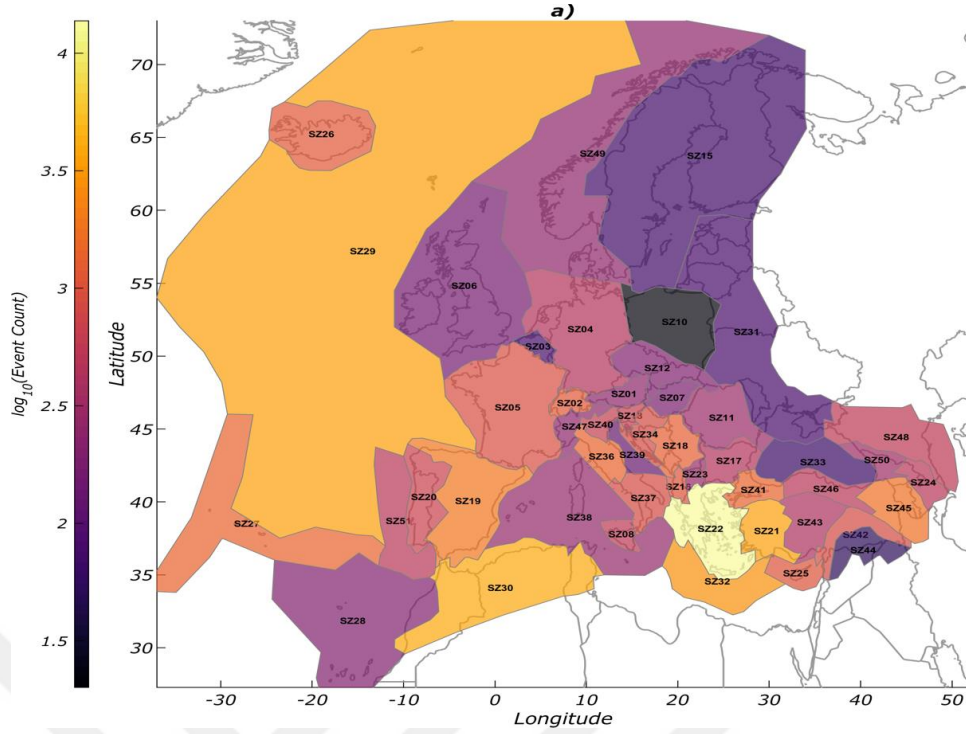
4.4.2.3. Tamamlılık Analizi

Deprem kataloğunun tamamlılığı magnitüt ve mekânın (dışmerkez) bir fonksiyonudur. Magnitüt tamamlılığı (Mc) teorik olarak belli zaman diliminde, mekân-zaman hacminde tespit edilen depremlerin 100% olduğu yerde en küçük magnitüt olarak tanımlanır (**Zare ve diğ., 2014**). Aletsel deprem kataloglarında Mc belirlenmesi olasılıksal deprem tehlike analizi için gerekli ve zorunlu bir adımdır. Üssel olasılıksal yoğunluk fonksiyonunda parametrelerin belirlenmesinde kullanılan deprem katalog bilgilerinin her magnitüt düzeyinde eksiksiz olmalıdır. Zamanda geriye doğru gidildiğinde deprem kataloğundaki deprem kayıtlarının hem sayısı hem de kalitesi düşmekte, zamansal ve mekânsal olarak veri eksikliği görülmektedir. Dolayısı ile belli bir magnitüt aralığına tekabül eden depremlerin doğru şekilde kayda geçtiği zaman

aralığı belirlenmelidir. Magnitüd aralığında oluşan deprem sıklığı sadece belirlenen zaman aralığında oluşan deprem göz önüne alınarak belirlenir (**Yücemen, 2011**).

Deprem kataloğunda bahsedilen eksikliklerin giderilmesi için **Stepp, (1973)** tarafından geliştirilmiş olan bir yöntem yaygın şekilde kullanılır. Bu metot verilen magnitüt ve zaman aralığında oluşan depremlerin ortalama oranının varsayımına dayanan ilk analitik yaklaşımdır (**Ullah, 2016**). Stepp yönteminde öncelikle depremler belirlenmiş olan büyüklüklere göre gruplandırılır. Ayrıca her gruptaki depremin meydana gelmesi noktasal bir süreç olarak varsayılır. Bu yöntemde esas temel örneklem ortalamasının varyansının, örneklem sayısı ile ters orantılı olduğu belirten istatistik bir kuraldır (**Yücemen, 2011**). Buna göre gözlem sayısı artırılarak varyans istenildiği gibi küçültülebilir. Bunun içinde kayıtların zaman içinde eksiksiz ve durağan olması gerektiğine dikkat edilmelidir. Bir kataloğun tamamlılık tahmini için geleneksel ve yaygın metot olan **Gutenberg and Richter, (1944)** ve **Richter, (1958)**'in kümülatif sıklık-magnitüt dağılımı kullanılmaktadır (**Zare ve diğ., 2014**). Buna göre, $\log N = a - b \cdot M$, eşitliğinde N, M magnitüdüne eşit veya daha büyük magnitüdlü depremlerin sayısını; a ve b parametreleri ise sismisite ve bölgesel sabitlerini ifade etmektedir. Gutenberg Richter (GR) denkleminin parametrelerinin doğru hesaplanması Mc'nin güvenilirliğine bağlıdır.

Çalışmada Mc'nin uzamsal-zamansal değişiminin tahmin edilmesi problemini basitleştirmek için, ilk adım olarak, çalışma alanı tamamlılık bölgelerine (CSZs) ayrılmıştır (**Şekil 4.14**). Mc'yi bulmadan önce (**Gruenthal, 1985**) ölçekleme ilişkileri ile pencere tabanlı ayırıştırma yaklaşımı kullanılarak katalog ayırıştırılmıştır. Bu prosedürü takiben, ayırıştırılmış katalog magnitüt aralıklarına bölünerek, her bir magnitüt aralığı için kümülatif deprem sayısının zaman serisi belirlenmiştir. Her bir tamamlılık zonu için, belirli zaman aralıklarını ifade eden tamamlılık magnitüdleri belirlenmiştir.

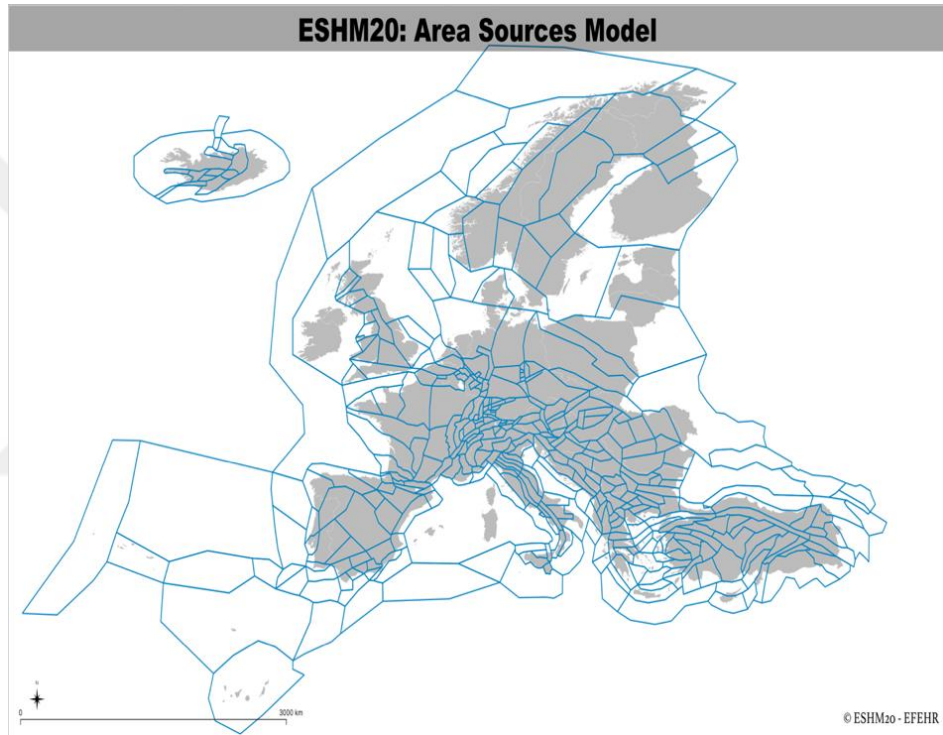


Şekil 4.14: Tamamlılık süper-bölgelerinin sınırları ve kimlikleri numaraları; her bir tamamlılık bölgesi rengi katalog içinde raporlanan olayların sayısının logaritması ile ölçeklendirilmiştir.

4.4.2.4. Sismojenik Kaynak Modeli

ESHM20 sismojenik kaynak modeli ESHM13 (Woessner ve diğ., 2015)'ün yerel ve bölgesel sismojenik kaynak ile zenginleştirilmesi ile elde edilmiştir. Ana sismojenik kaynak modeli dört ayrık kaynak modelinden oluşmaktadır; alan kaynak modeli, arka plan düzleştirilmiş sismisite ile birleştirilmiş aktif fay kaynak modeli, dalma-batma kaynakları ve derin sismisite kaynak modeli şeklindedir. Alan kaynaklar en yaygın sismojenik kaynak gösterimidir (Grunthal ve diğ., 1999a, 1999b, 2018; Jimenez ve diğ., 2003; Meletti ve diğ., 2008; Vilanova ve diğ., 2014; Danciu ve Giardini, 2015; Danciu ve diğ., 2018; Sesetyan ve diğ., 2018; Pagani ve diğ., 2018). ESHM20 alan kaynak modeli, ESHM13'ün ulusal tehlike modelleri ile güncellenmesi sonucu oluşturulmuştur. Avrupa genelinde, Belçika, Bulgaristan, İsviçre, Almanya, Makedonya, Romanya, Slovenya, İspanya, İsviçre, Türkiye ulusal düzeyde sismik tehlike değerlendirmesi yaparak sismojenik kaynakların güncellemelerini sağlamıştır. Alan kaynak modeli, sık kabuk, volkanik, levha içi yitim ve derin sismisite olarak

sınıflandırılan homojen sismisite bölgelerini tanımlamaktadır. Sınır ötesi kaynaklar, mevcut ise sismotektonik kanıtlar, aktif faylar ve büyük jeolojik/tektonik özellikler ile tanımlanırken, mevcut değil ise tarihsel deprem konumları veya yakın zamandaki sismisite kümeleri ile tanımlanmaktadır. Her bir alan kaynak modeli tektonik yapı, faylanma tipi parametreleri, derinlik dağılımı, maksimum magnitüt aralığı ve alt-üst sismojenik derinlik gibi çeşitli parametrelerle karakterize edilir. Bunların bir kısmı ESHM13'den alınmıştır. **Şekil 4.15'**de Avrupa ve Türkiye'deki sığ kabuk alanının coğrafi dağılımı görülmektedir.



Şekil 4.15: ESHM20: Sığ kabuk sismisitesini tanımlamak için Alan Kaynak Modeli.

Münferit alan kaynakların aktivite oranları, bölgesel sismisitenin Gutenberg-Richter modeli gibi üstel bir dağılımla tanımlanan durağan bir ortalama oluş ile karakterize edilen hafızasız bir Poisson sürecini takip ettiği varsayımına dayalı olarak tahmin edilmektedir. Gutenberg Richter eşitliğindeki ($\log_{10} N = a_{GR} - b_{GR} * M$) N, bir M (Bu modelde M_w -moment magnitüdü kullanılmıştır) magnitüdüne eşit veya daha büyük olan depremlerin yıllık kümülatif sayısıdır, a_{GR} ve b_{GR} ise sabitlerdir. Sabitlerden a_{GR} -değeri belirli bir kaynağın toplam sismik üretkenliğini temsil eder ($M \geq 0$ olan olayların sayısının logaritması); ve b_{GR} -değeri ise üstel dağılımlı küçük ve büyük

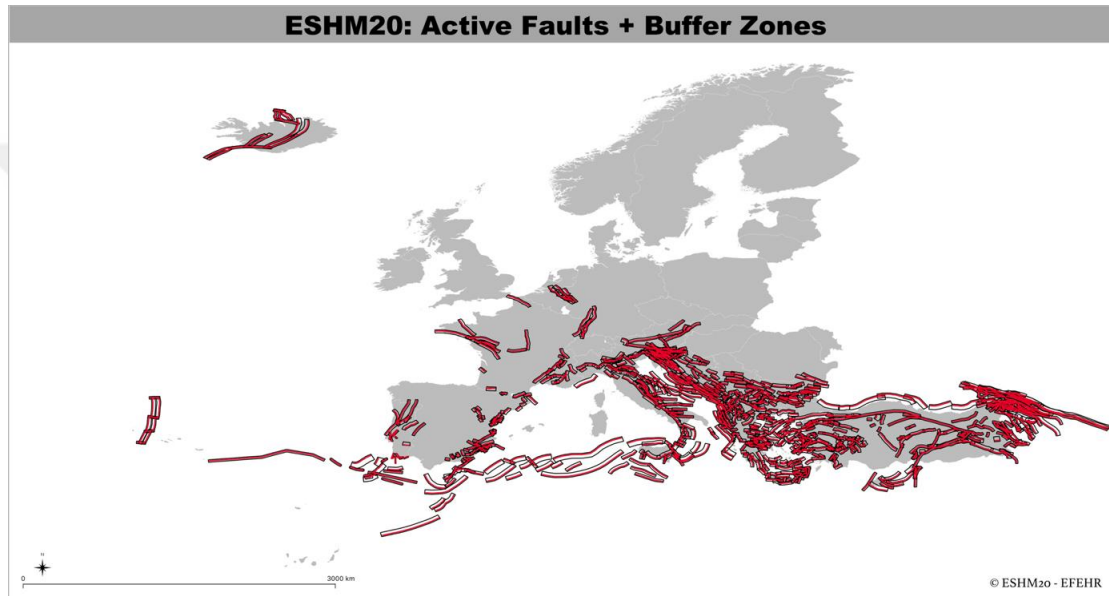
magnitüdlü depremlerin ortalama oranını ifade eden tekrarlamaya eğrisinin negatif eğimidir. Her bir alan kaynağının deprem yinelenme parametreleri, bir önceki bölümde anlatılan ayrıştırılmış deprem kataloğundaki her tamamlılık kaynak zonu-CSZ için tamamlılık aralıkları kullanılarak elde edilmiştir. Aktivite parametreleri tamamlılık bölgeleri (CSZ), büyük ölçekli tektonik zonlar (TECTO) ve alan kaynak modeli (ASZ) için belirlenmiştir. Farklı magnitüt aralıklarındaki (düşükten yüksek magnitüt sınırlarına doğru) yıllık oluş oranlarının azalmasını ifade etmek için Gutenberg-Richter magnitüt frekans dağılımı kullanılmış, ek olarak büyük magnitütlere doğru tekerrür modelinin hızlı azalmasını ifade etmek için alternatif bir model olan Pareto dağılımı (**Kagan 1993, Utsu 1999**) kullanılmıştır.

Aktif faylar ve arka plan sismisitesi kavramı, bölgesel sismik kaynak modelleri için tercih edilen bir çözüm haline gelmiştir :EMME14 için (**Danciu ve diğ., 2018**), Türkiye için (**Şeşetyan ve diğ., 2018**) ve GEM'in küresel tehlike modelleri mozaigi, (**Pagani ve diğ., 2018**). ESHM20'de aktif faylar ve arka plan alan kaynakları için ESHM13 modeli kullanılmamıştır. Bunun iki nedeni mevcuttur: 1) Arka plan alan kaynakları, alan kaynak modeliyle eşleşecek şekilde tanımlanmıştır, bu yaklaşım alternatif sismojenik kaynak modellerinin bağımsızlık varsayımına engel teşkil etmektedir, 2) Arka plan alan kaynakları içindeki fayların düzensiz uzamsal bütünlüğü. Güncellenmiş ESHM20 versiyonunda, aktif faylar ve arka plan düzleştirilmiş sismisitesi birleştirilmiştir.

ESHM20 fay tabanlı kaynak modeli, Avrupa Sismojenik Faylar Veritabanı (EDSF) ve Avrupa-Akdeniz bölgelerindeki diğer bazı yeni aktif fay derlemelerinin (**Basili ve diğ., 2020**) güncellenmesi ile oluşturulan Avrupa Fay-Kaynak Modeli 2020'ye dayanmaktadır. Kabuk fayları, yerkabuğundaki üç boyutlu düzlemi tanımlayan aşağı-yönlü eğimli düzlemsel geometri ile temsil edilmektedir. Sismojenik bir kaynak modeli oluşturmak için gerekli minimum temel fay parametreleri seti Geometri (Konum: Enlem, Boylam, Derinlik; Boyut: Uzunluk, Genişlik; Yönelim: Doğrultu, Eğim) ve Davranış (Atım ve Kayma Oranı)'dan oluşmaktadır. Bu nitelikler kümesi her bir coğrafi özellik ile ilişkilendirilir ve ardından her bir fay kaynak için bir magnitüt-frekans dağılımı (MFD) üretilir.

Düzleştirilmiş sismisite modeli, TECTO zonlamaya dayanan, ayrıştırılmış ve tamamlılık analizi yapılmış deprem kataloğundan aktivite parametrelerinin (aGR ve bGR-değerleri) belirlenmesi ve **Nandan ve diğ. (2021)**'nin düzleştirme algoritması

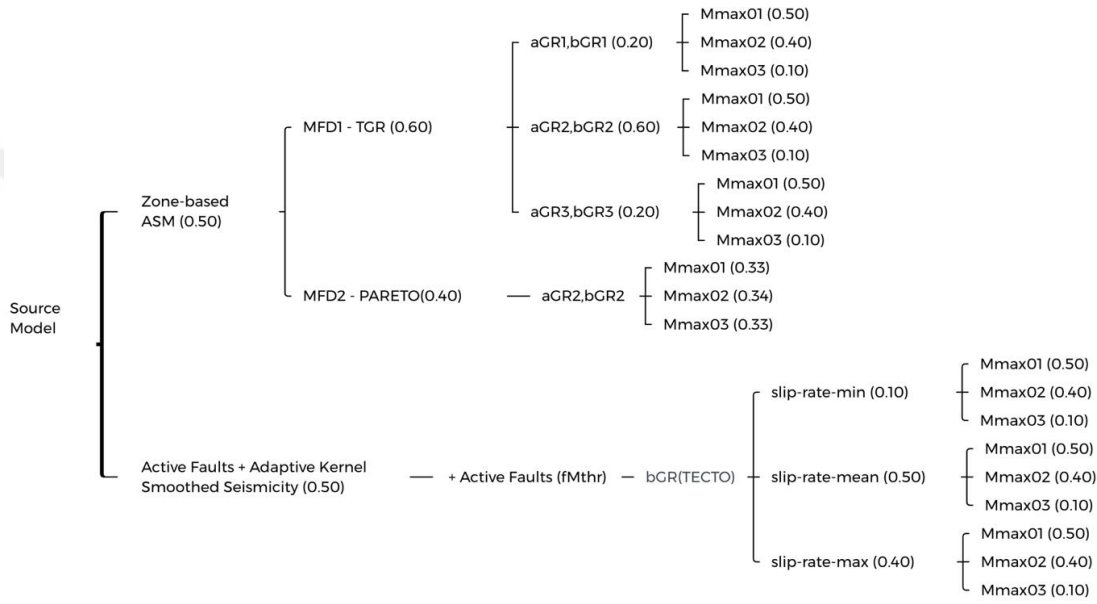
kullanılması ile elde edilmiştir. Aktif fayların yakınında, arka planda yer alan düzleştirilmiş sismisite, faylarla birlikte sismik üretkenliğini tamamlayıcı nitelikte, fayların olmadığı bölgelerde ise düzleştirilmiş sismisitealan kaynak modeline bir alternatif (Kuzey Avrupa) olarak sunulmuştur. Aktif faylar ile arka plan sismisitesini modellerken karşılaşılan temel zorluk fayın yakın çevresindeki sismisitenin iki katına çıkarılmasının engellenmesi için yer yüzeyindeki fay izlerinin 5 km genişliğindeki doğrultusu boyunca tampon bölgeler oluşturulmuştur (Şekil 4.16).



Şekil 4.16: Aktif faylar ve sismisitenin iki katına çıkmasını engellemek için kullanılan arka plan tampon bölgeleri.

Deprem tehlike modelinin değerlendirilmesinde parametrelerin belirsizliğinin ele alınabilmesi için mantık ağacı uygulamasına gidilmiştir. Mantık ağacı uygulaması farklı parametrelerin farklı opsiyonlarını dikkate alarak epistemik belirsizliğin değerlendirilmesine olanak sağlar. Mantık ağacı iki ana dallanma seviyesinden oluşmaktadır, bunlar alan kaynak modeli ve düzleştirilmiş sismisite ile birleştirilmiş artı fay modeli şeklindedir (Şekil 4.17). Her iki dallanma seviyesi de birleştirilmiş deprem kataloğuna, tamamlılık bölgelerine ve TECTO modele dayanan bölgesel bGR temsil parametrelerine dayanmaktadır. Aktif fay modeli ve alan kaynağı modeli bağımsız olarak ele alınmakta, ancak alan kaynak modelinin bazı bölümlerinde kaynak tanımlarken fay konumları kullanılmıştır. Sismojenik kaynak modelinin mantık ağacı

yapısı asimetrik olarak görülmektedir. İlk dallanma seviyesi iki ana bölgesel kaynak modelini içermektedir: alan kaynakları modeli ve arka plan düzleştirilmiş sismisite ile birleştirilmiş aktif fay kaynak modeli. İkinci dallanma seviyesi ise iki alternatif magnitüt-frekans dağılımını içeren bireysel alan kaynaklarını ayrı dallar olarak ele almaktadır; üstel çift kesmeli (double truncated) GR ve konik (tapered) Pareto dağılımı şeklindedir. Bireysel düzeyde alan kaynakları ana dallanma seviyelerinde, a ve b -değerleri ve alan kaynak için maksimum magnitütler, aktif fay kaynaklar için ise kayma hızlarındaki belirsizlik ve maksimum magnitüt belirsizlikleri dikkate alınmıştır.



Şekil 4.17: ESHM20 Aktif sığ kabuk depremleri için belirlenen sismojenik kaynak mantık ağacının şematik gösterimi.

Alan kaynakların maksimum magnitüt belirsizliğini uygularken sabit bir sismik oran (belirli bir magnitüt üzerinde), ve aktif fayların maksimum magnitüt belirsizliğini uygularken ise sabit bir sismik moment oranı dikkate alınmıştır. M_{max} için üç dallanma seviyesi tüm modellere farklı ağırlıklarla simetrik olarak uygulanmıştır. Alan kaynakları için M_{max} ağırlıkları, üstel çift kesilmiş GR dağılımı ve konik Pareto dağılımı ESHM13'teki ile aynıdır. Aktif faylar için, yalnızca bir adet bGR -değeri (TECTO'dan) kullanılmıştır çünkü magnitütü-frekans-dağılımları belirsizliklerinde b -değeri etkisi fay kayma hızı ve M_{max} belirsizliklerinin etkilerinden daha düşüktür.

4.5. Kocaeli Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi

Marmara Bölgesi örneği kapsamında Kocaeli İli pilot çalışma alanı olarak seçilmiş ve il sınırları içerisinde yer alan gömülü gaz boru hatları envanteri çıkarılarak ve yerel zemin koşulları belirlenerek hem boru hattı elemanları hem de bu elemanları çevreleyen zemin tipleri bir CBS yazılımı olan QGIS yardımıyla sayısallaştırılmıştır (Şekil 4.18).



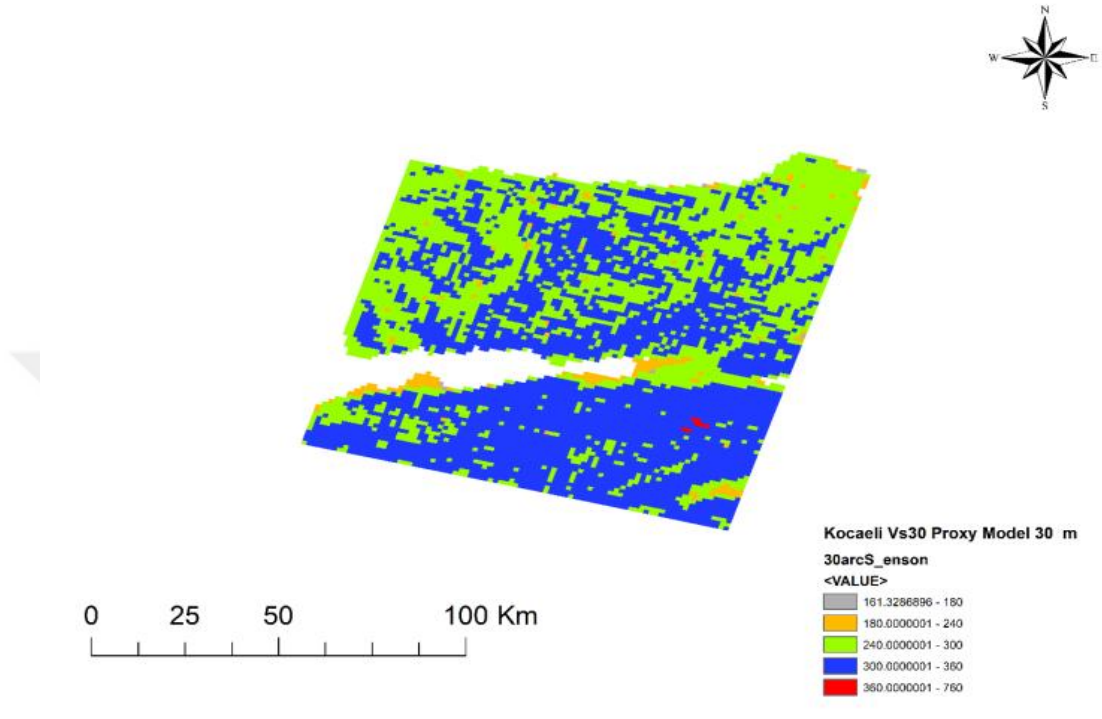
Şekil 4.18: Çalışma alanı olan Kocaeli İli sınırları.

4.5.1. Hücresel Zemin Bilgilerinin Elde Edilmesi

Hücresel zemin bilgisi, çalışma alanının grid bazlı jeolojik (litoloji-zemin sınıfı) ve sismik (kayma dalgası hızı- V_s) özelliklerini içermekle birlikte, heyelan ve sıvılaşma potansiyelini de kapsamaktadır. Bu çalışmada, Kocaeli bölgesi için geliştirilen V_{s30} Proxy Modeli (Sert, 2024) kullanılarak, 30 arc-saniye çözünürlüğe sahip dijital yükselti haritalarından (DEM) hücresel V_{s30} değerleri elde edilmiştir.

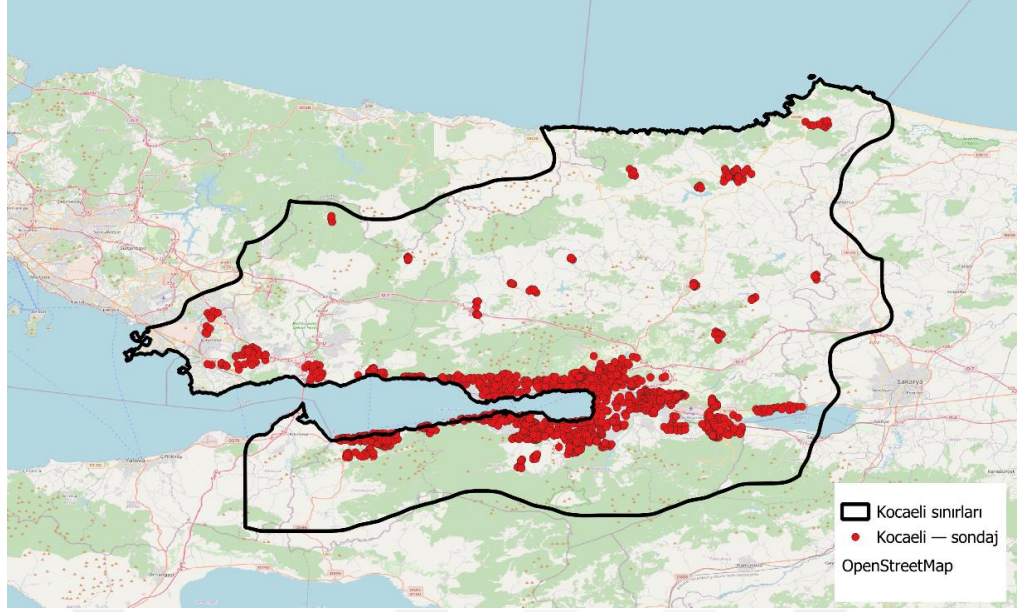
Bu yöntem kapsamında, topografik eğim verileri kullanılarak V_{s30} değerleri tahmin edilmiş ve bu tahminler, bölgesel jeolojik özelliklerle uyumlu bir şekilde modellenmiştir. Bu bağlamda, çalışma alanı olarak seçilen Kocaeli ili için topografik eğime dayalı V_{s30} değerlerinin 161 m/s ile 760 m/s aralığında olduğu Şekil 4.19'da verilen dağılımda görülmektedir Buna göre yerleşimin ve sanayi tesislerinin yoğun

olarak bulunduğu bölgelerde düşük V_{s30} değerleri dikkat çekmekte, Marmara Denizi sahil şeridine paralel uzanan Botaş gömülü boru hattının özellikle denize yakın kesimlerde zayıf zemin koşulları ile çevrili olduğu görülmektedir.



Şekil 4.19: Kocaeli ili için topografik eğime dayalı V_{s30} dağılımı (Sert,2024).

Çalışma alanı kapsamında yürütülmüş olan sondaj çalışmaları (Kocaeli Büyükşehir Belediyesi İmar Daire Başkanlığı Deprem Zemin Şube Müdürlüğü'nden temin edilmiştir) uygulandığı lokasyonun koordinat bilgilerine göre sayısallaştırılmış ve harita üzerinde işaretlenmiştir (Şekil 4.20). Sondaj verisi, sondajın uygulandığı mevkiyi, topografik yüksekliği, sondaj derinliğini, zemine ait litoloji bilgisini, tabaka kalınlıklarını, yer altı su seviyesini ve sondaj sırasında uygulanan standart penetrasyon deneyi (SPT) N vuruş sayısını içermektedir (Şekil 4.21 ve Şekil 4.22).



Şekil 4.20: Çalışma alanında yer alan sondajların lokasyon bilgisi.

Kocaeli — sondaj — Features Total: 1212, Filtered: 1212, Selected: 0																		
	BOREHOLE	X_Coor	Y_Coor	mekvi	Height	Depth	Water_ta	Lith1	Lith1_DS	Lith2	Lith2_DS	Lith3	Lith3_DS	Lith4	Lith4_DS	Lig5	Lith5_DS	Lith6
1	SK-830	496400	4504800	YUVACIK	0	16	0	bitkisel toprak	0.5	killi silt	1.5	killi kumlu cakil	2.25	aluyyon	4.25	aluyyon	6.2	bazalt
2	SK-392	495887	4515910	BEKIRPASA	23	19.5	5.5	dolgu	2.2	siltli kil	5.5	cakilli kum	7.1	siltli kil	11.7	siltli kil	17.5	cakil
3	SK-161	487029	4506327	HISAREYN	73.4	15.5	2.2	kumlu kil	2.5	kil	8.3	killi kum	10.2	kil	13.2	kum	13.8	cakil
4	SK-165	487543	4506768	HISAREYN	48.5	15.5	2.2	dolgu	0.2	kil	4	kumlu kil	8.4	kum	10.3	kumlu silt	14.2	cakil
5	SK-799	496001	4506851	YUVACIK	0	15.45	0	dolgu	0.3	kiltasi kumtasi	2.6	kumtasi	4.1	cakiltasi kumtasi	5.7	kiltasi	7.1	cakil
6	SK-944	471808	4516199	HEREKE	4.9	19.95	4	dolgu	0.3	killi kumlu c...	5.8	killi cakilli kum	8.3	kumlu cakil	11.7	cakilli siltli kil	13.8	cakilli kil
7	SK-183	485946	4506670	IHSANIYE	50	30.45	5.5	bitkisel toprak	0.8	cakilli kum	7.2	kil	8.3	siltli kil	15	killi silt	29.5	cakilli kil
8	SK-706	489486	4514002	SARAYBAHCE	1	31.45	4	bitkisel toprak	0	siltli kil	2.5	killi cakilli kum	5.5	siltli kil	16	siltli kil	25	cakilli kil
9	SK-957	467637	4516946	HEREKE	5.8	40.05	0	dolgu	1.2	siltli kil	6.8	killi kumlu cakil	9	cakilli kil	11.2	cakilli kil	14	cakilli kumlu kil
10	SK-530	516576	4510949	ESME	0	15.33	5.25	dolgu	0.3	killi siltli kum	3	siltli kumlu kil	5	siltli kumlu kil	9	siltli kil	10	cakilli kumlu sil
11	SK-157	487837	4506988	HISAREYN	68.5	15.5	1.7	bitkisel toprak	0.2	kumlu kil	4.6	kum	5.2	cakil	7.7	silt	10.4	kil
12	SK-751	496189	4512809	SARAYBAHCE	2	27.45	2	dolgu	2	siltli kil	5.5	kum	8.1	kumlu siltli kil	10	siltli kil	20	killi cakil
13	SK-367	498688	4517110	BEKIRPASA	16	19.95	2.8	bitkisel toprak	0.4	killi silt	2.7	siltli kil	8.3	kumlu kil	11.7	siltli kil	18.9	killi kum
14	SK-158	487848	4506661	HISAREYN	69	20	2.75	kil	3.5	killi cakil	4.1	killi silt	7.8	killi kum	11.5	killi silt	12.6	killi kum
15	SK-202	486776	4509168	IHSANIYE	13	40.6	4.1	cakil	20.5	siltli kil	28	kumlu silt	31	cakilli kum	34	siltli kil	37	killi silt
16	SK-712	490397	4515514	SARAYBAHCE	8	19.95	0	dolgu	2.1	siltli kil	5.15	siltli kum	8.2	siltli kil	10.2	killi siltli kum	14	killi siltli kum
17	SK-803	495300	4508900	YUVACIK	106.9	15.27	0	bitkisel toprak	0.35	killi siltli kum	2.45	siltli kil	4.8	killi kumlu cakil	5.7	siltli kiltasi	7.05	kiltasi silttasi ku
18	SK-357	495930	4514627	BEKIRPASA	4	31.45	3	bitkisel toprak	0	killi silt	5	siltli kil	8	kiltasi	9	killi silt	18.5	kum
19	SK-360	497987	4516260	BEKIRPASA	12	20.95	3	bitkisel toprak	0	siltli kil	3.1	siltli kil	6.7	kum	10.9	siltli kil	14	kum
20	SK-159	487856	4506288	HISAREYN	86	15.5	4.5	bitkisel toprak	0.9	kumlu kil	7.3	silt	8.1	kil	10.2	silt	10.8	kum
21	SK-7	510340	4509599	ACISU	85	21	3.85	cakilli kil	2	sert kil	4	siltli kil	6	sert kil	9	siltli kil	12	kumlu kil
22	SK-163	486844	4506988	HISAREYN	67.67	10.5	10.5	dolgu	0.2	kumlu kil	2.2	kum	2.2	kumlu cakil	5.0	kum	7.7	kumlu silt

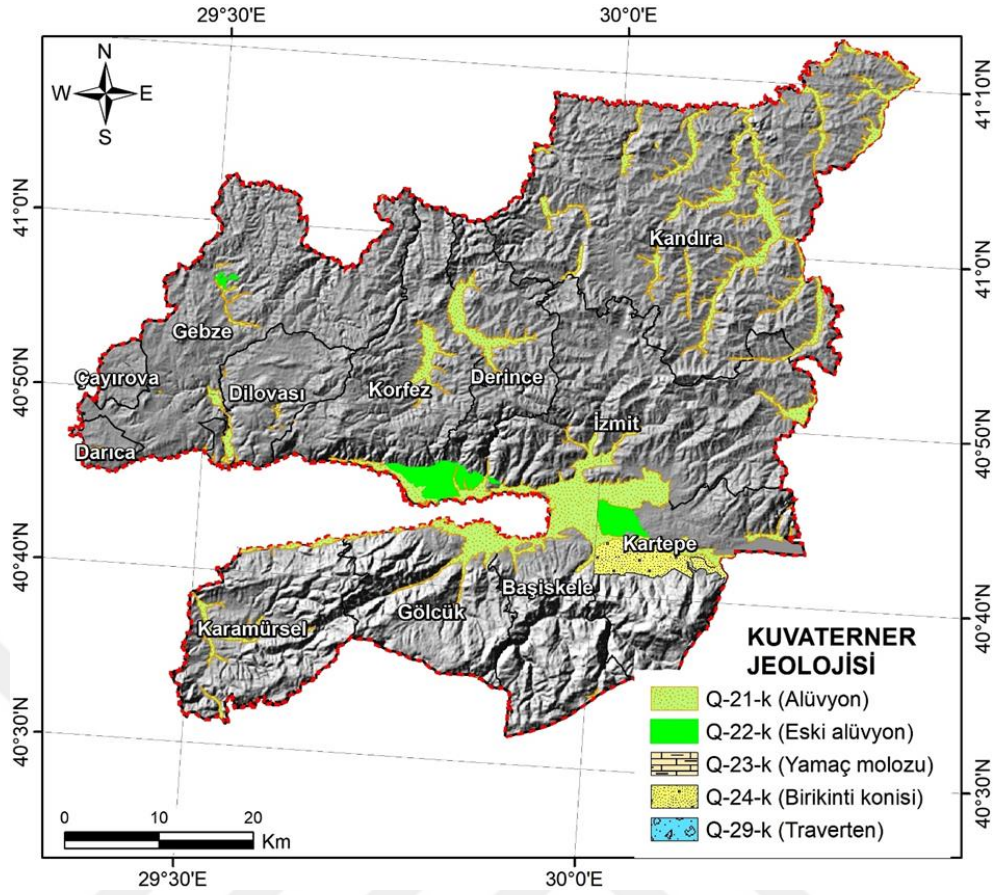
Şekil 4.21: Sondaj verisi kapsamında sayısallaştırılmış litoloji bilgisi.

Kocaeli — sondaj — Features Total: 1212, Filtered: 1212, Selected: 0

	BOREHOLE	X_Coor	Y_Coor	mevki	Height	Depth	Water ta	SPT_1_5	SPT_3	SPT_4_5	SPT_6	SPT_7_5	SPT_9	SPT_10_5	SPT_12	SPT_13_5	SPT_15	SPT_16_5
623	SK-1200	492428	4535052	TERZILER	255	11	0	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
624	SK-1201	492181	4535215	TERZILER	297	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
625	SK-43	509662...	4506604...	DERBENT	217.7	12.45	0	500	500	38	51	54	59	65	70	0	0	0
626	SK-350	489650	4507900	YENIKOY	25	18.5	3.5	7	5	6	8	7	11	13	12	14	14	16
627	SK-405	496190	4517645	BEKIRPASA	140	10	0	0	16	500	0	0	0	0	0	0	0	0
628	SK-582	501762	4513487	KOSEKOY	0	15	2.5	16	15	0	0	30	43	0	45	0	500	0
629	SK-583	502336	4513380	KOSEKOY	0	15	2.5	46	0	500	0	47	500	0	35	0	0	0
630	SK-587	501392	4513577	KOSEKOY	0	15.5	1.5	16	0	26	0	32	0	22	14	0	46	0
631	SK-590	502116	4512970	KOSEKOY	0	15	1.5	26	0	29	0	16	0	28	30	0	500	0
632	SK-593	502022	4512848	KOSEKOY	0	15	1.5	26	0	29	0	16	0	28	30	0	500	0
633	SK-594	501427	4513144	KOSEKOY	0	30	2.5	9	0	16	0	19	0	23	0	26	0	27
634	SK-597	500981	4513195	KOSEKOY	0	30	2.5	20	0	12	0	11	0	21	0	0	18	14
635	SK-598	500787	4513491	KOSEKOY	0	15	2.7	20	23	19	28	24	0	28	34	0	37	0
636	SK-613	501113	4511802	KOSEKOY	0	30	2.7	50	0	50	0	50	0	50	0	0	29	0
637	SK-615	501827	4511611	KOSEKOY	0	15	5.5	33	0	41	0	500	500	500	500	0	500	0
638	SK-617	500858	4511595	KOSEKOY	0	15	4.7	40	0	14	0	500	0	30	27	0	44	0
639	SK-618	499814	4511508	KOSEKOY	0	15	4	36	0	30	0	28	0	500	500	0	500	0
640	SK-619	499677	4512003	KOSEKOY	0	15	3.5	13	0	8	0	11	0	500	500	0	500	0
641	SK-630	501546	4511319	KOSEKOY	0	30	5	33	0	41	0	22	21	23	500	0	500	500
642	SK-631	501444	4510633	KOSEKOY	0	15	5	31	0	29	0	34	0	30	42	0	500	0
643	SK-40	509790...	4506573...	DERBENT	232.2	12.45	0	500	49	54	39	42	38	40	55	0	0	0

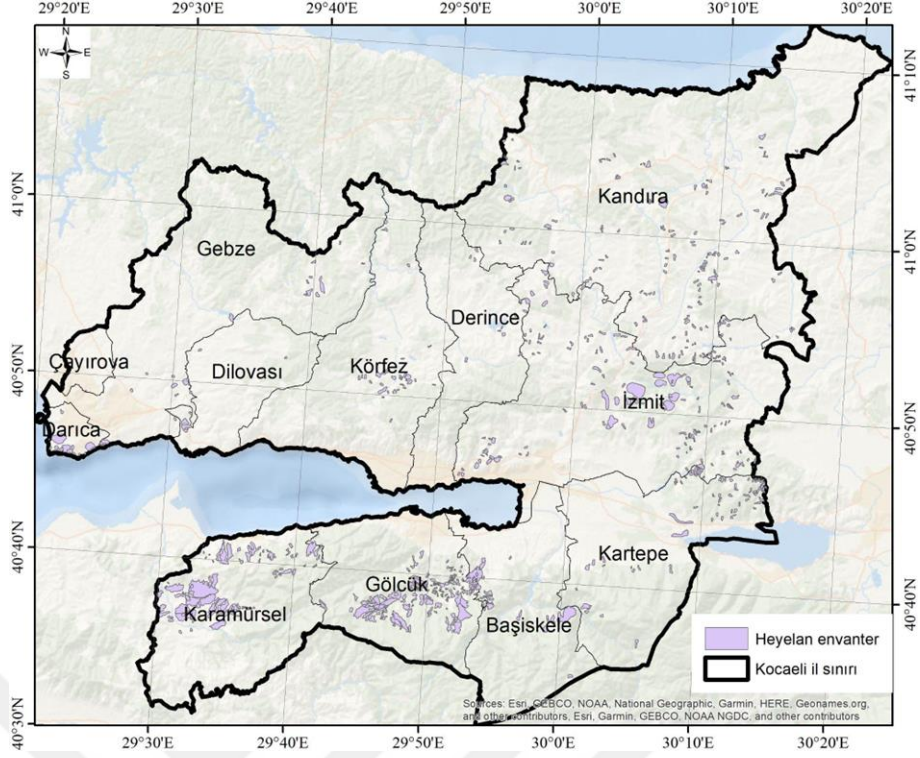
Şekil 4.22: Sondaj verisi kapsamında sayısallaştırılmış SPT-N vuruş sayıları.

Bu sondaj verilerinden faydalanarak ve bölgede yer alan Kuvaterner yaşlı güncel alüvyon birimleri detaylı olarak incelenerek bölgedeki sıvılaşma potansiyeli TBDY (2018)'e göre belirlenmiştir. Sıvılaşma, deprem gibi dinamik yüklemeler altında, gevşek taneli zeminlerde (kumlu-siltli zeminler) görülen zeminin mukavemetini kaybederek viskoz sıvı gibi davrandığı depremle eş zamanlı meydana gelen bir olaydır. Sıvılaşma potansiyelini belirlemek için çalışma alanındaki kuvaterner birimleri, alüvyon, eski alüvyon, yamaç molozu, birikinti konisi ve traverten olmak üzere 5 ayrı sınıfta incelenmiş, bu birimler içerisinde zemin sıvılaşması gelişmesi muhtemel bölgeler geniş ölçekte belirlenmiştir. Daha sonra Kocaeli Büyükşehir belediyesinden temin edilen derin (45 sondaj logu) ve sığ sondaj (1216 sondaj logu) verileri tek tek incelenmiş, tüm sondaj loglarında yer altı su seviyesinin altında olan kumlu-siltli birimlerden oluşan 33 sondaj lokasyonunda potansiyel sıvılaşma bölgeleri olacağı belirlenmiştir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23: Kocaeli ili potansiyel sıvılaşma bölgeleri.

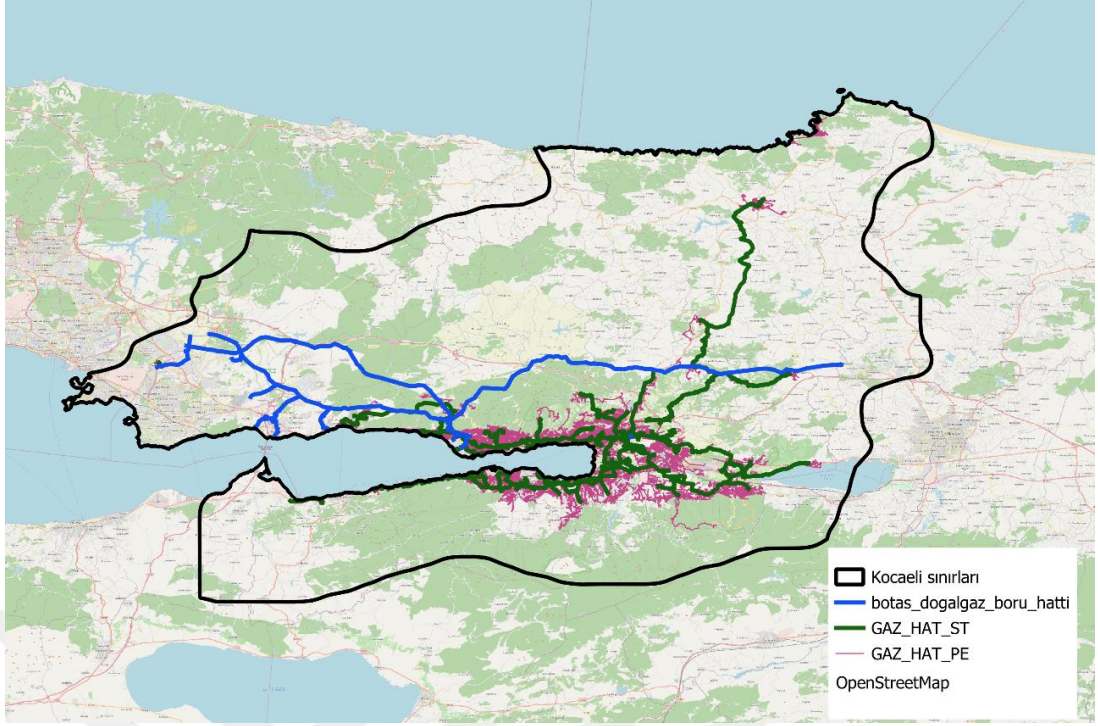
Tarihsel heyelan envanter haritasına göre (Duman vd., 2011) çalışma alanı civarında toplam 776 heyelan bulunmaktadır (Şekil 4.24). Heyelanların, Özellikle Miyosen – Pliyosen yaşlı birimler ile karasal, kırıntılı sedimanter birimlerden meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.24: Çalışma alanı ve civarına ait heyelan envanter haritası (Duman vd, 2011).

4.5.2. Şebeke Elemanlarının Envanter Bilgilerinin Elde Edilmesi

Gömülü doğalgaz boru hattı envanterinde boru hattının bağlı olduğu firma, hat türü (ST-standart çelik veya PE-polietilen) gaz hattı kimlik numarası (ID no), boru hattı konfigürasyonu, elemanların tipi ve boyutları (çap, uzunluk vb.), koordinat bilgisi, yapım tarihi, imalatçı bilgisi vb. envanter bilgileri çıkarılarak farklı katmanlarda haritalanmıştır (Şekil 4.25 ve Şekil 4.26).



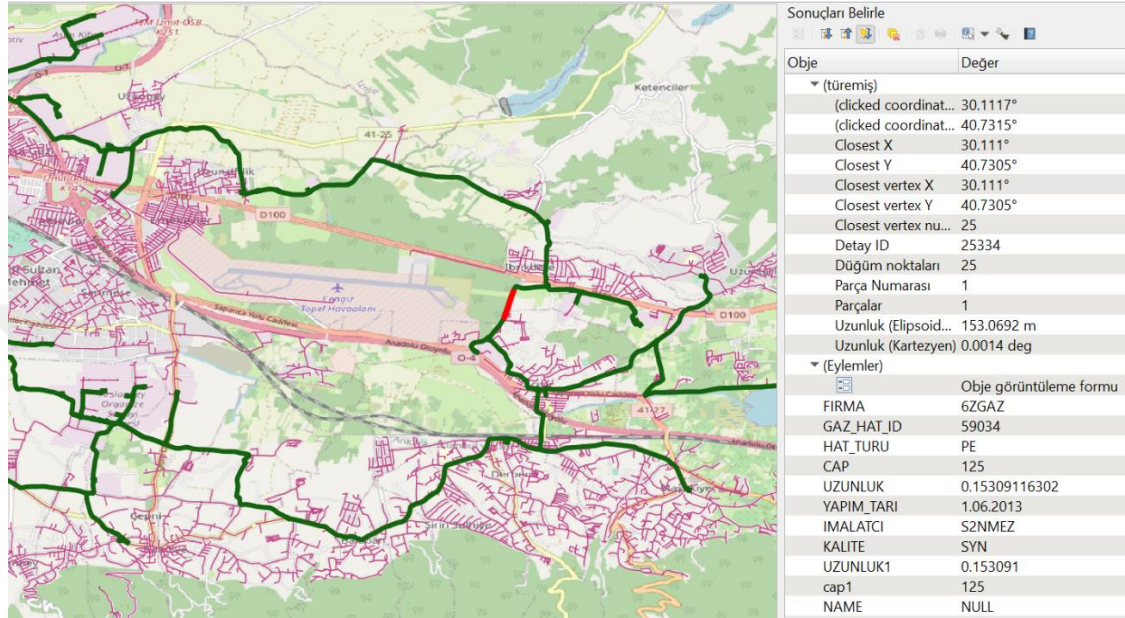
Şekil 4.25: Çalışma alanı içerisine envanteri çıkarılan sayısallaştırılmış gömülü boru hatları.

GAZ_HAT_ST — Features Total: 2476, Filtered: 2476, Selected: 0

	FİRMA	GAZ_HAT_ID	HAT_TURU	CAP	UZUNLUK	YAPIM_TARI	IMALATCI	KALITE
1	1ZGAZ	66866	ST	2	0.00087851490...	1.06.2000	mpc	mYc
2	6ZGAZ	66867	ST	2	0.00089041103...	1.06.2000	mpc	mYc
3	mZGAZ	66868	ST	2	0.00083871245...	1.06.2000	mpc	mYc
4	mZGAZ	66869	ST	2	0.00077029680...	1.06.2000	mpc	mYc
5	mZGAZ	66870	ST	2	0.00061028148...	1.06.2000	mpc	mYc
6	mZGAZ	66871	ST	2	0.00065851650...	1.06.2000	mpc	mYc
7	1ZGAZ	69544	ST	12	0.019961361282	31.08.2016	ATOM ISI	AYO
8	6ZGAZ	27014	ST	6	0.00816162328...	1.06.2000	6ZGAZ	6YG
9	6ZGAZ	27054	ST	6	0.023624264519	1.06.2000	6ZGAZ	6YG
10	6ZGAZ	27079	ST	4	0.00328174504...	1.06.2007	4ZGAZ	4YG
11	6ZGAZ	30661	ST	2	0.24429125243	1.06.2000	mpc	mYc
12	mZGAZ	30663	ST	2	0.047615602045	7.01.2010	mpc	mYc
13	6ZGAZ	60632	ST	8	0.00164642973...	1.06.2000	mpc	mYc
14	mZGAZ	60633	ST	4	0.00101788234...	8.01.2010	4ZGAZ	4YG
15	4ZGAZ	60634	ST	4	0.00389931758...	8.01.2010	4ZGAZ	4YG
16	4ZGAZ	60641	ST	4	0.007333264205	8.01.2010	4ZGAZ	4YG
17	4ZGAZ	30716	ST	8	0.00091288128...	1.06.2000	mpc	mYc
18	mZGAZ	30717	ST	3	0.038930779817	1.06.2000	mpc	mYc
19	mZGAZ	30718	ST	3	0.00848931015...	1.06.2000	mpc	mYc
20	6ZGAZ	67798	ST	8	0.00850411629...	1.06.2000	mpc	mYc
21	mZGAZ	67799	ST	3	0.00087837524...	1.06.2000	mpc	mYc

Şekil 4.26: Gömülü boru hattı envanteri öznitelik tablosu.

CBS ortamı, katmansal olarak sayısallaştırılan boru hattı elemanlarının harita üzerinde seçim yapılarak koordinat bilgisine ve envanter bilgisine erişime imkan sağlamaktadır. **Şekil 4.27**'de kırmızı işaretli boru hattı elemanına ait koordinat bilgisi ve özellikler sağ pencerede görülmektedir.

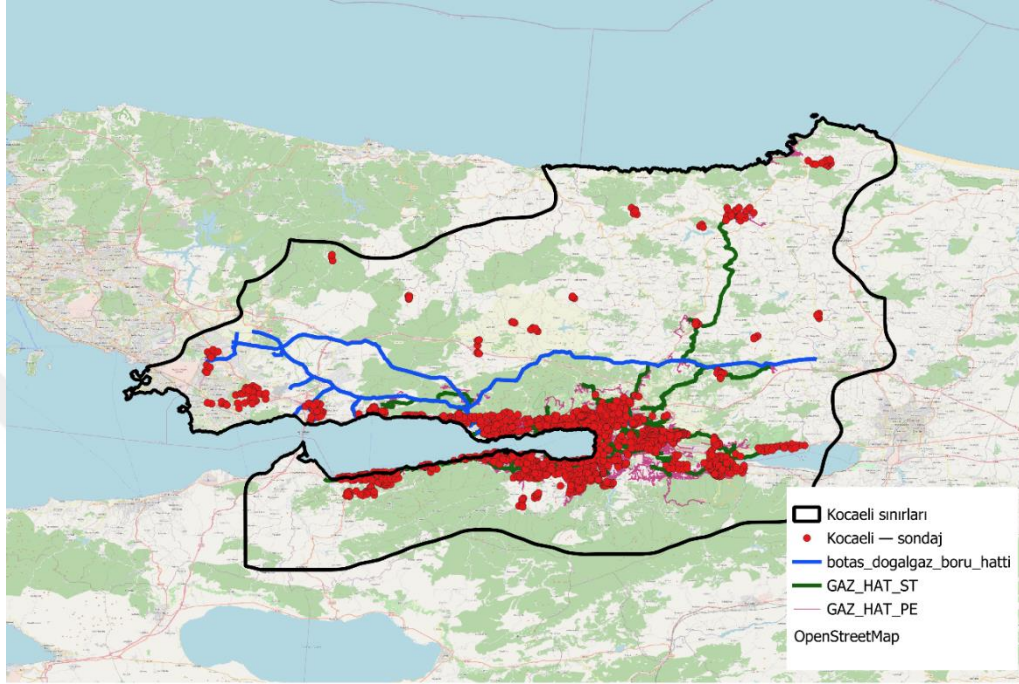


Şekil 4.27: Sayısallaştırılmış boru hattı elemanlarının envanter bilgisinin harita üzerinde gösterimi.

4.5.3. Zemin Koşulunun Belirlenmesi

Sayısallaştırılan zemin ve şebeke envanter verileri farklı katmanlarda depolanarak üst üste çizdirilmiş, tüm verilerin grid bazında birleştirilmesi hedeflenmiştir (**Şekil 4.28**). Çalışma alanı 5 km x 5 km boyutlarında gridlere ayrılmış, her bir griddeki şebeke elemanı belirlenerek bu elemanı çevreleyen zemin koşulu sondaj verisi veya topografik eğime dayalı Vs30 verisi kullanılarak ilgili gride atanmıştır. Olasılıksal deprem tehlike analizinde kullanılacak olan Yer hareketi tahmin ilişkilerinde (YHTİ) zemin koşulları Vs30 değeri ile temsil edilmektedir. Dolayısıyla, eğer sondaj verisi mevcut ise sondajlar sırasında zemine uygulanan standart penetrasyon deneyinden (SPT) elde edilen N-penetrasyon vuruş sayılarından elde edilen **Sert, (2024)** korelasyonlar kullanılarak zemin tabakaları için kayma dalgası hızı-Vs tespit edilmiş ve ilk 30 m ağırlıklı ortalama kayma dalgası hız değeri hesaplanarak ilgili gride

atanmıştır. Eğer sondaj verisi mevcut değilse topografik eğime dayalı Vs30 verisi ilgili gride atanmıştır. Grid içerisinde birden fazla sondaj olması durumunda ise bu sondajlardan boru hattı elemanına en yakın olan Vs30 verisi ilgili gride atanmıştır.

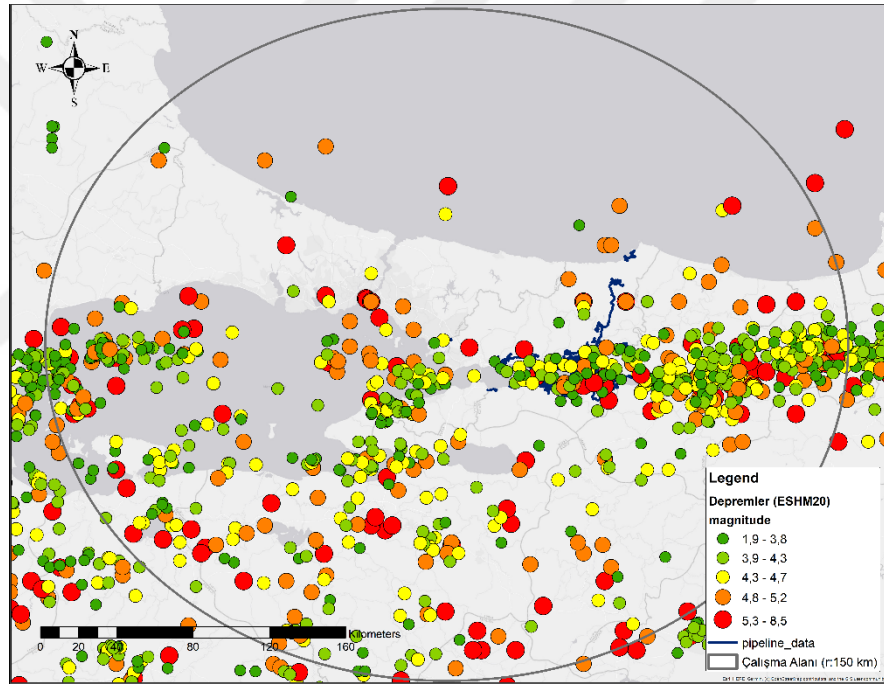


Şekil 4.28: Zemin ve boru hatları envanter verilerinin çalışma alanı boyunca gösterimi.

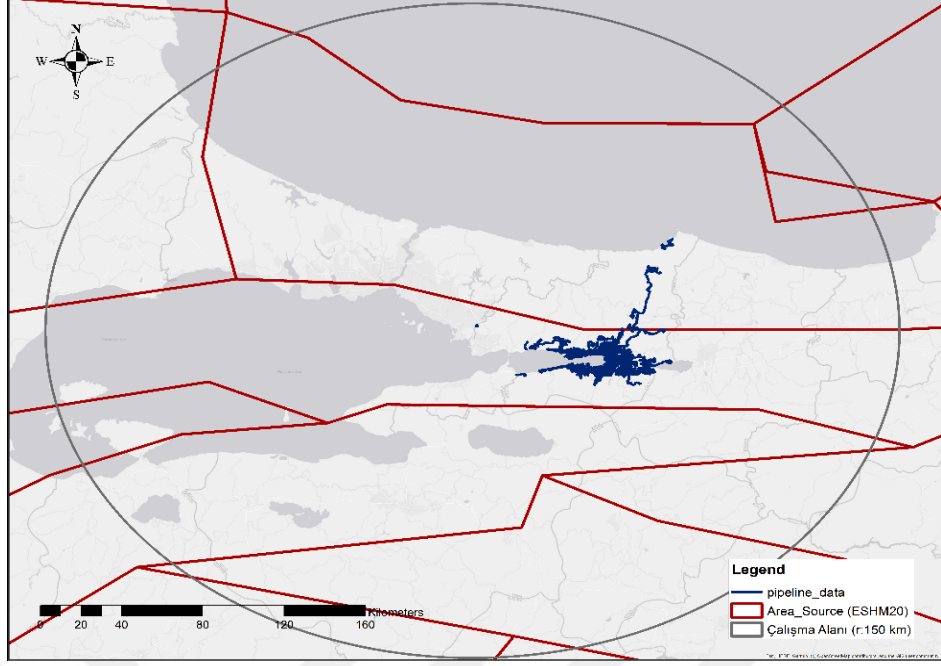
4.5.4.Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi ve Sonuçları

Çalışma alanı için ve eğim bazlı Vs30 verisine dayanarak ve önceki bölümde detaylı olarak anlatılan ESHM20 sismik modeli alan kaynak ve arka plan düzleştirilmiş sismisite ile birleştirilen fay kaynak sismojenik kaynakların, mantık ağacı uygulaması ile kabuk sismisitesi için **Kotha ve diğ. (2020)**'nin geliştirdiği yer hareketi tahmin modeli (YHTİ) kullanılarak OpenQuake yazılımı ile olasılıksal sismik tehlike analizi yapılmıştır. Bu YHTİ modelinde, girdi olarak deprem büyüklüğünü ve hiposantral derinliği, Joyner-Boore mesafesini ve Vs30 parametresini kullanmaktadır. Açık kaynak kodlu Python tabanlı bir yazılım olan OpenQuake' in tehlike ve risk hesapları için kullanılan iki modülü bulunmaktadır. Tehlike analizi için senaryo bazlı deprem tehlike analizi (SBDTA), Monte Carlo yönteminin kullanıldığı event-based tehlike analizi ve

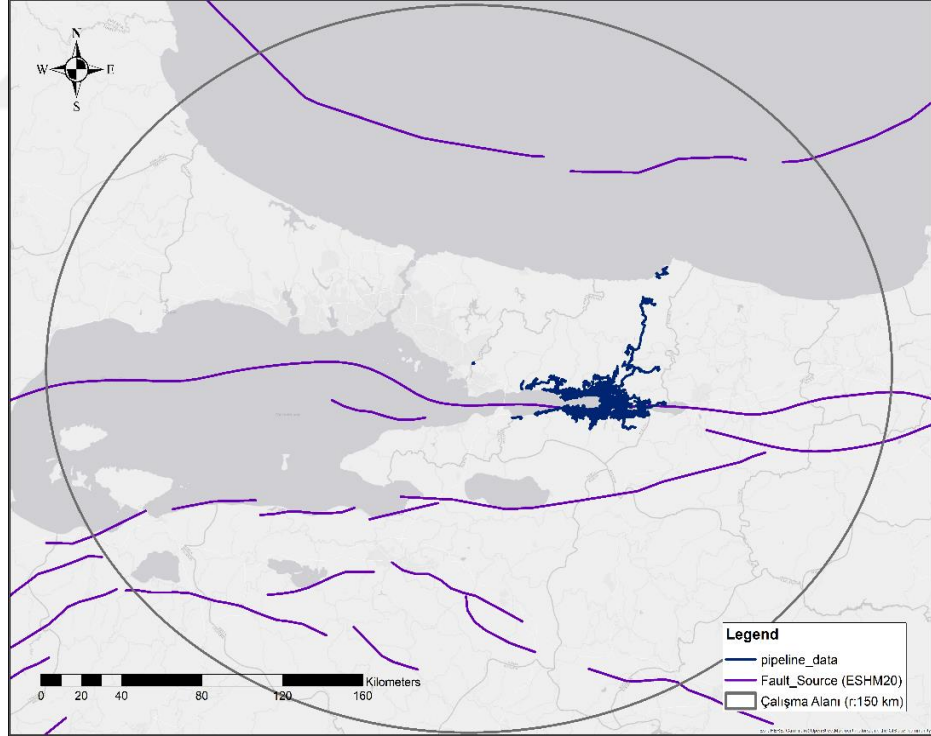
sn) ve S_a ($T=1.0$ sn) parametreleri TBDY (2018)' de tanımlanan 50 yıl içinde %2, %10 ve %50 aşılma olasılıkları için hesaplanmış, bu çalışma kapsamında %10 aşılma olasılığına karşılık gelen DD-2 deprem düzeyi için dağılım haritaları oluşturulmuştur (Şekil 4.33, 4.34, 4.35). Buna göre, Kocaeli İl'inden geçerek İzmit Körfezi açıklarından Batı Marmara'ya doğru uzanan KAF hattı ve görece zayıf zemin koşullarının görüldüğü denize paralel sahil kesimlerinde en yüksek PGA ve S_a ($T=0.2$ sn) değerleri gözlemlenmektedir. Bunun yanında, uzun periyottaki S_a ($T=1.0$ sn) değerleri ise zemin koşullarına bağlı olarak aynı bölgelerde kısmi olarak azalmaktadır. Marmara denizinden kuzeye ve güneye doğru uzaklaştıkça PGA, S_a ($T=0.2$ sn) ve S_a ($T=1.0$ sn) değerlerinin orta kısımlara nazaran azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.30: 150 km yarıçaplı dairesel çalışma alanı içerisinde yer alan depremlerin magnitüt dağılımı.



Şekil 4.31: 150 km yarıçaplı dairesel çalışma alanı içerisinde yer alan ve Kocaeli’ni etkileyen alan kaynaklar.

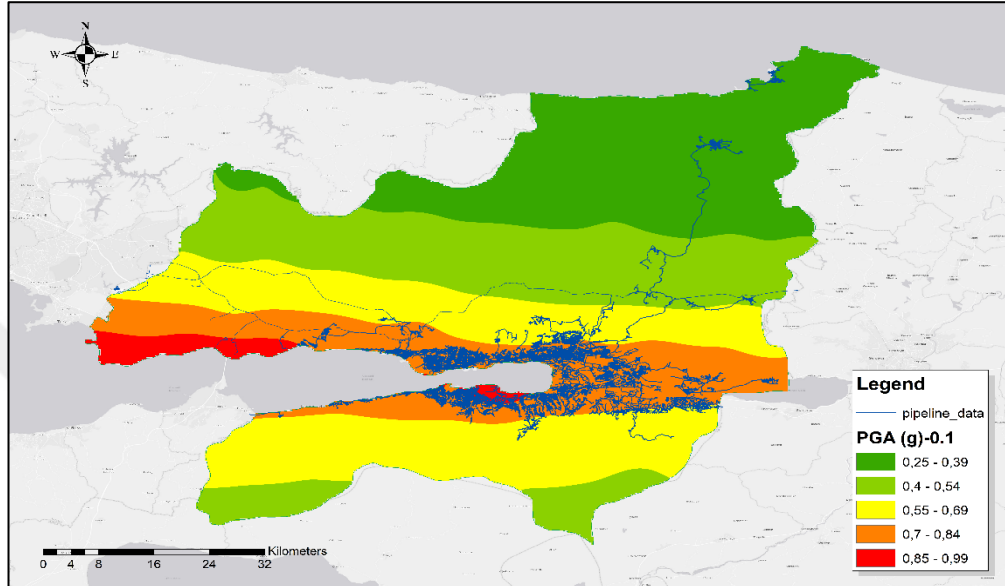


Şekil 4.32: 150 km yarıçaplı dairesel çalışma alanı içerisinde yer alan ve Kocaeli’ni etkileyen çizgisel kaynaklar.

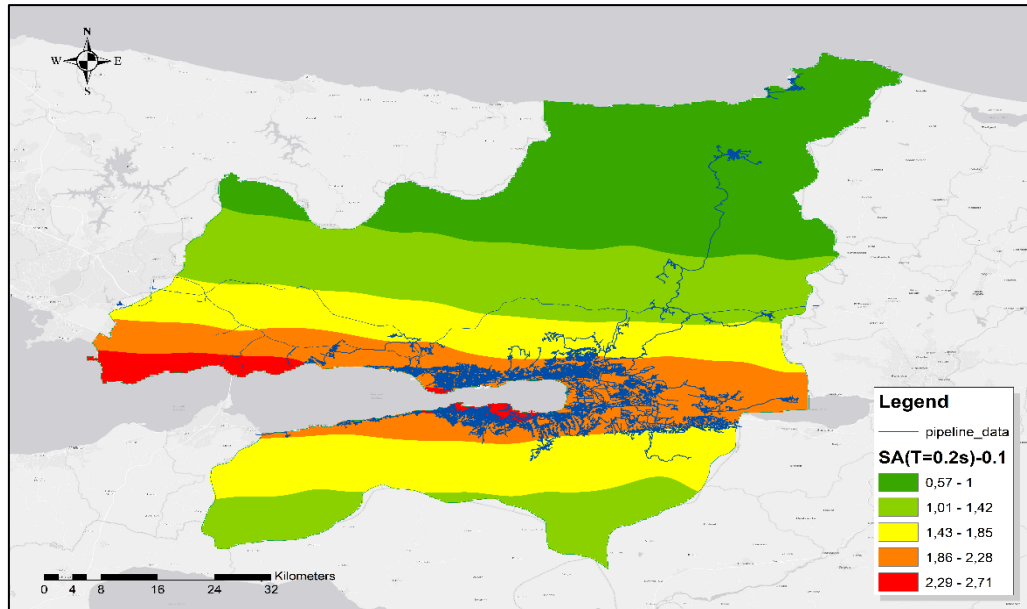
4.5.4.1.Sismik Tehlike Haritaları

Çalışma alanı için PGA, Sa (T=0.2 sn) ve Sa (T=1.0 sn) parametreleri elde edilmiştir.

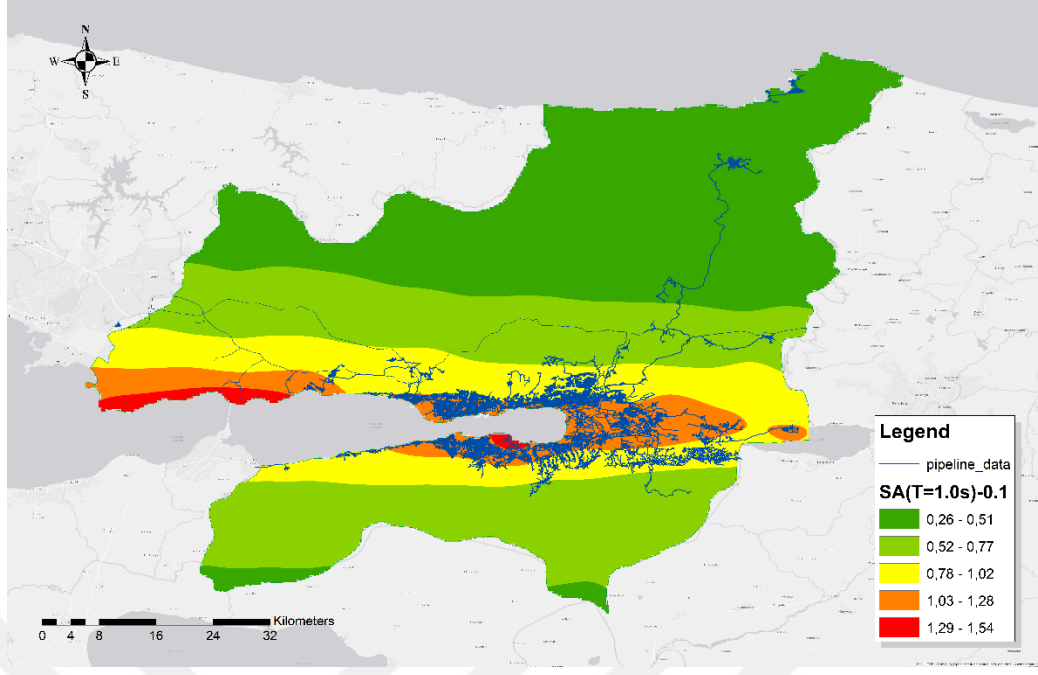
Dağılım haritaları sırasıyla **Şekil 4.33**, **Şekil 4.34** ve **Şekil 4.35**'te verilmiştir.



Şekil 4.33: Kocaeli İli için elde edilen PGA dağılımı.



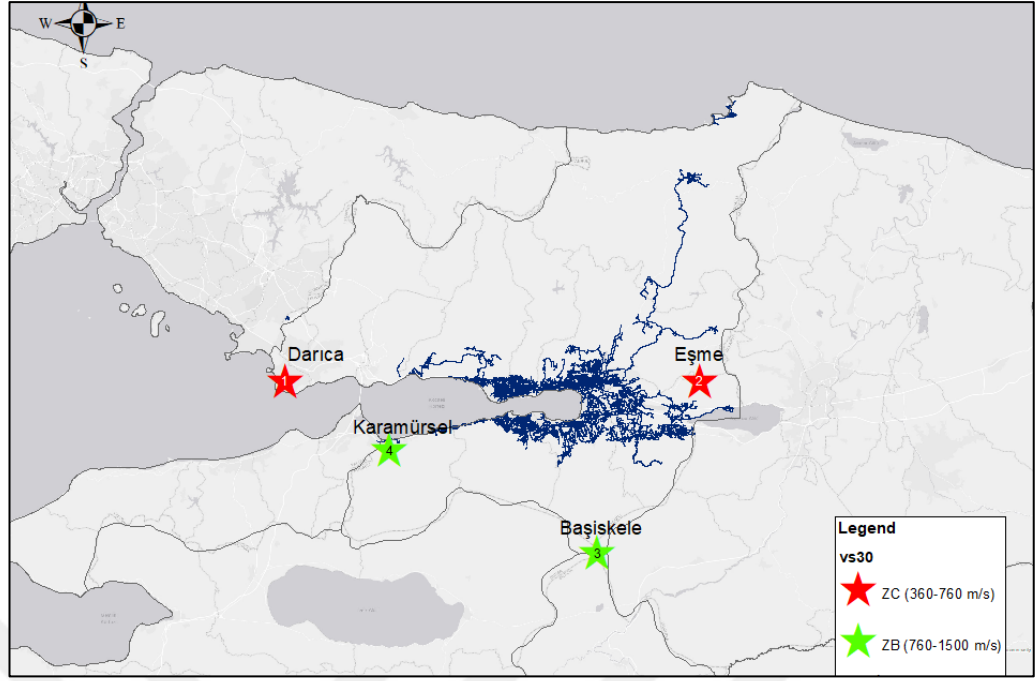
Şekil 4.34: Kocaeli İli için elde edilen $T=0.2$ sn için elde edilen S_a dağılımı.



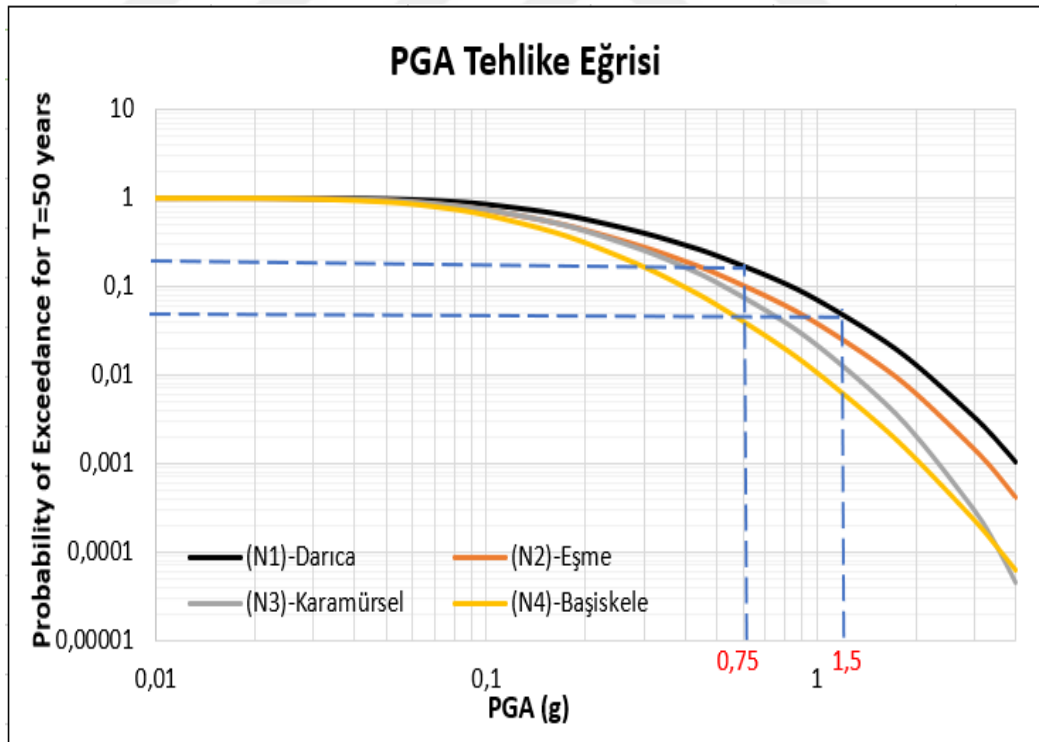
Şekil 4.35: Kocaeli İli için elde edilen $T=1.0$ sn için elde edilen S_a dağılımı.

4.5.4.2. Tehlike Spektrumları

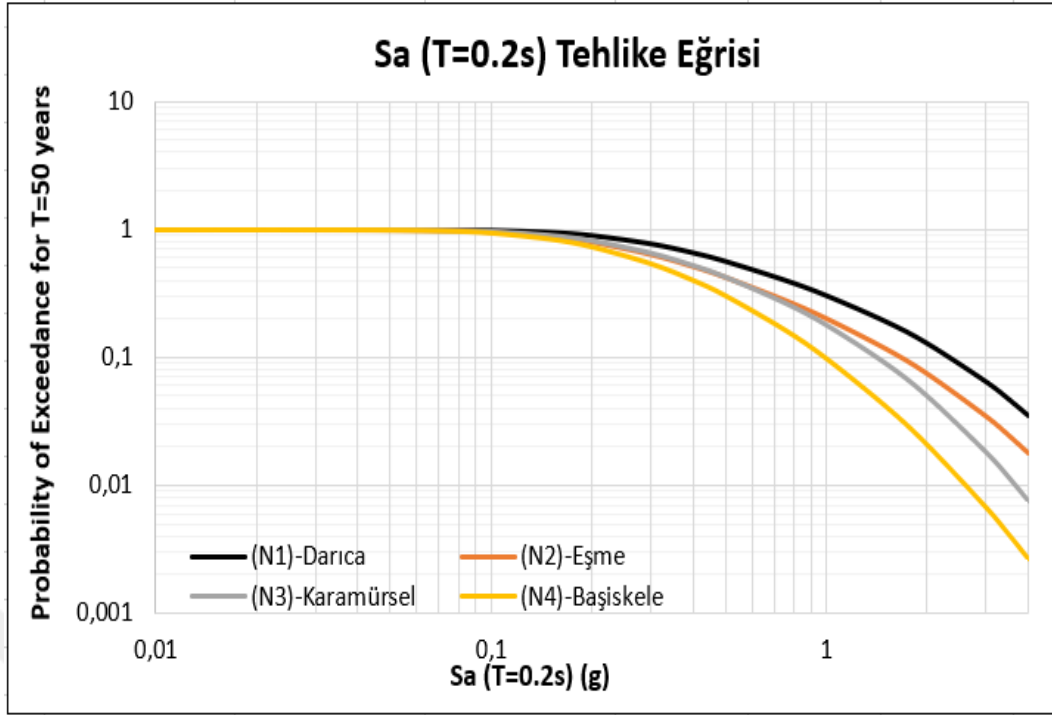
Çalışma alanı içerisinde temsili seçilen birbirinden uzak farklı zemin koşullarında seçilen 4 farklı lokasyon için PGA, S_a ($T=0.2$ sn) ve S_a ($T=1.0$ sn)'yı gösterir tehlike eğrileri elde edilmiştir (Şekil 4.36).



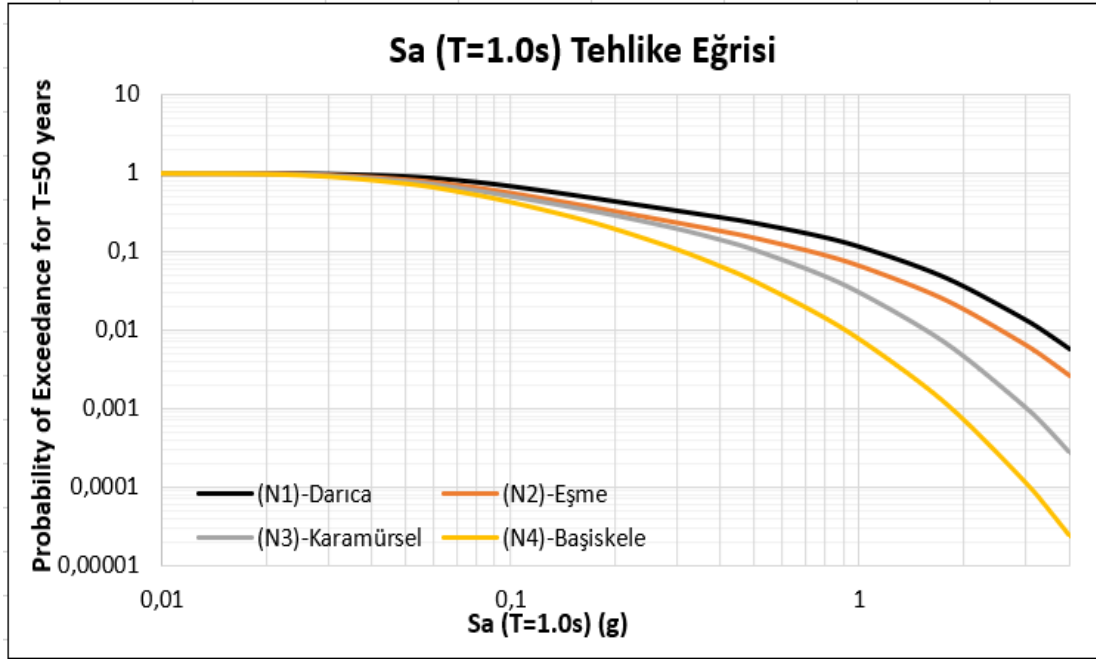
Şekil 4.36: Kocaeli İli kapsamında uniform tehlike eğrisi karşılaştırmasını yapmak için temsili seçilen lokasyonlar.



Şekil 4.37: 50 yıllık aşılma olasılığını gösteren PGA tehlike eğrisi.

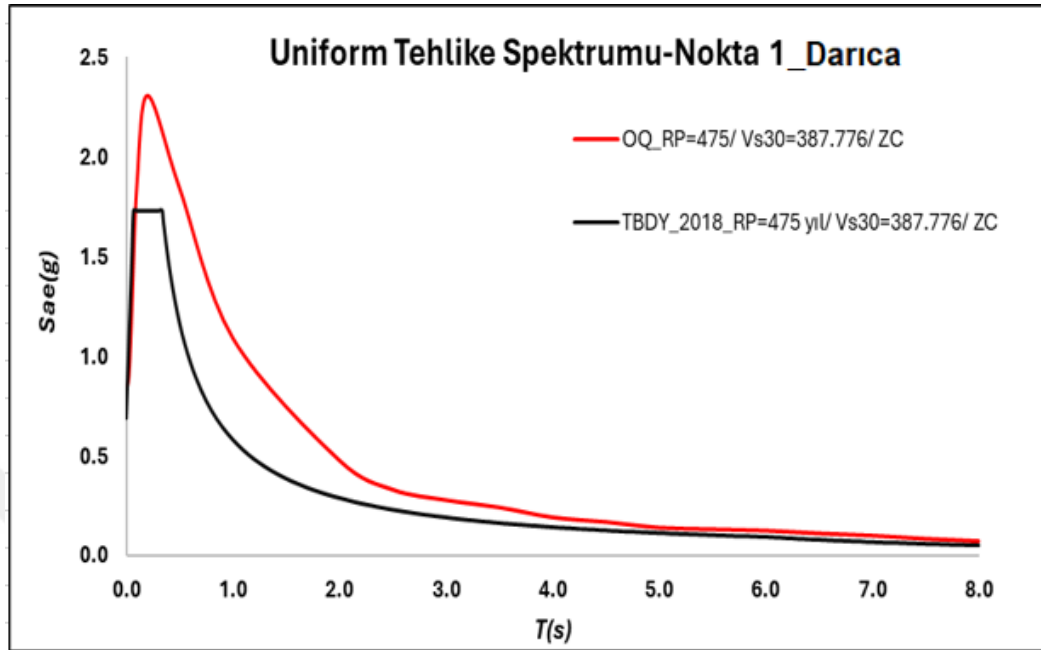


Şekil 4.38: 50 yıllık aşılma olasılığını gösteren Sa (T=0.2 sn) tehlike eğrisi.

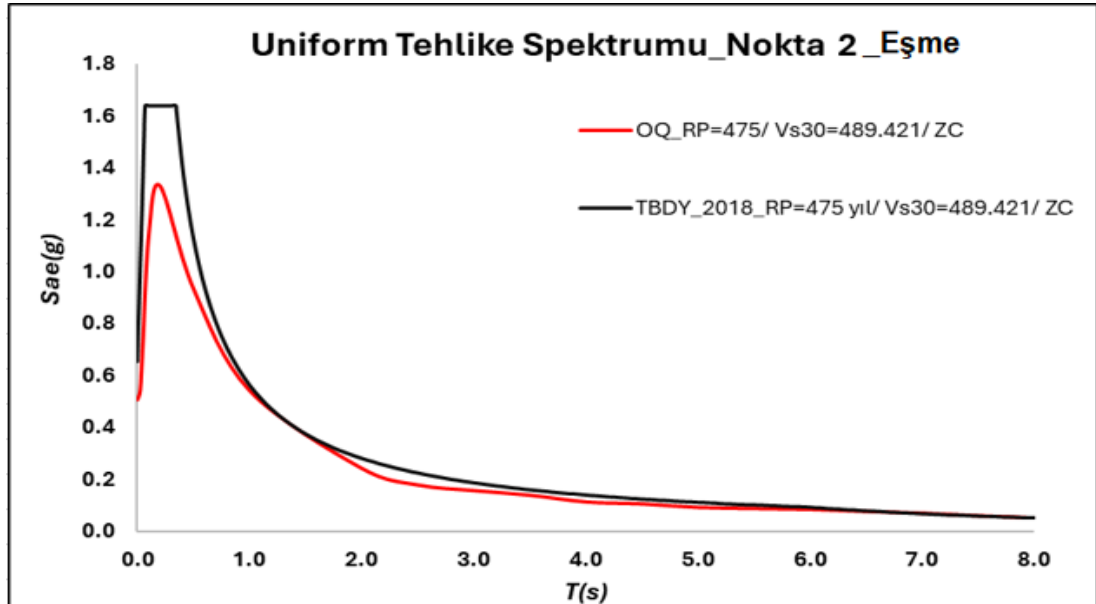


Şekil 4.39: 50 yıllık aşılma olasılığını gösteren Sa (T=1.0 sn) tehlike eğrisi.

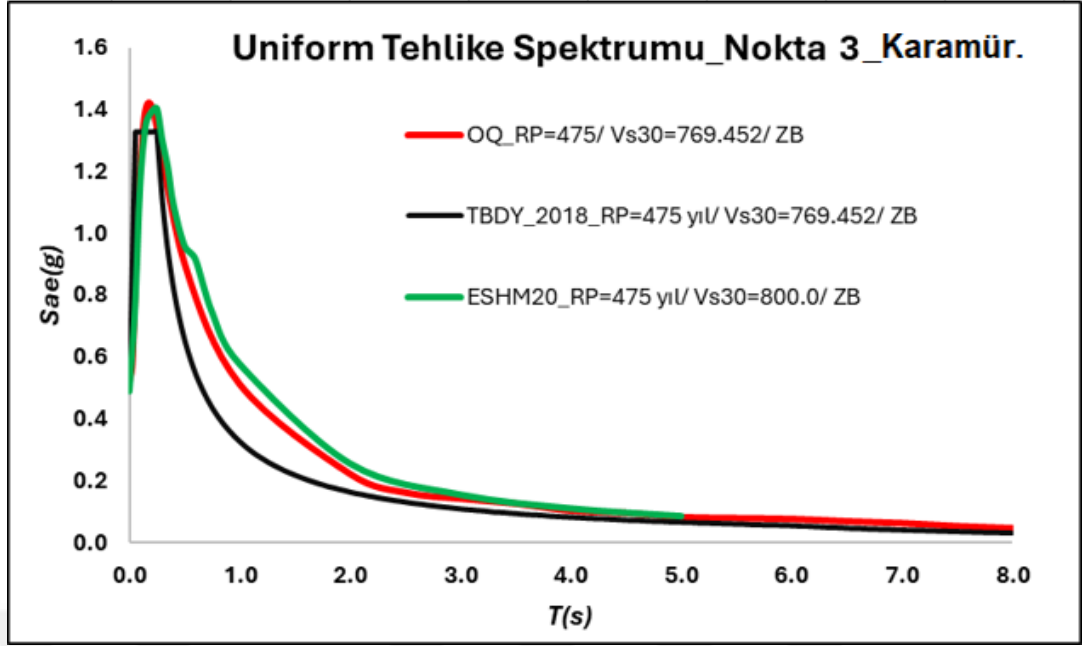
4.5.4.3. Deprem Spektrumlerinin Kıyaslanması



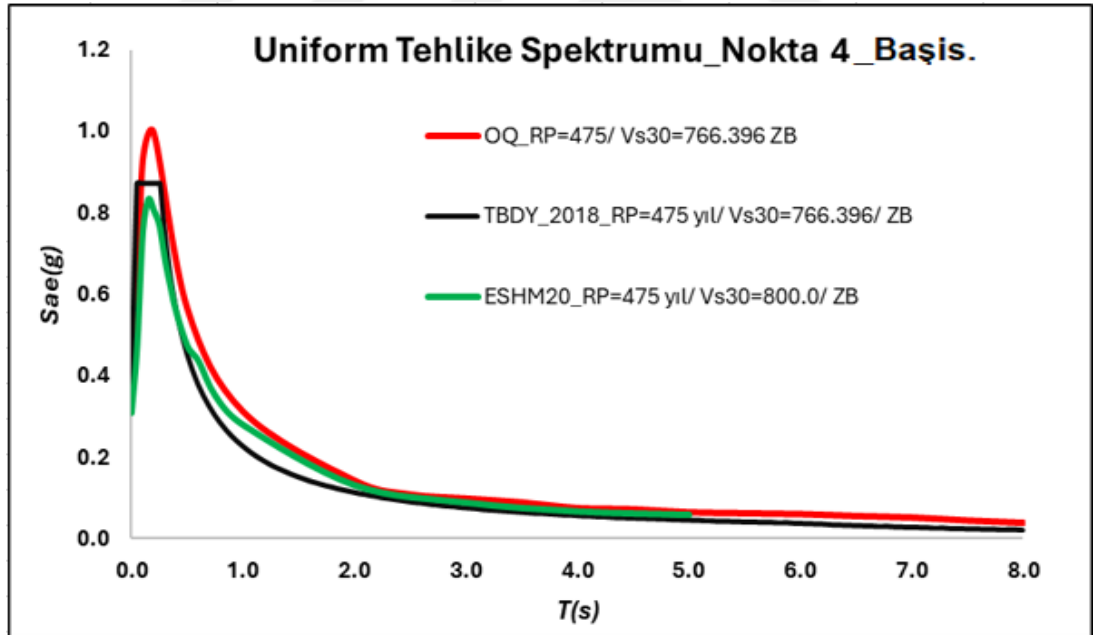
Şekil 4.40: 1 numaralı lokasyon için elde edilen uniform tehlike spektrumu ve TBDY (2018) karşılaştırması.



Şekil 4.41: 2 numaralı lokasyon için elde edilen uniform tehlike spektrumu ve TBDY (2018) karşılaştırması.



Şekil 4.42: 3 numaralı lokasyon için elde edilen uniform tehlike spektrumu, TBDY (2018) ve ESHM20 karşılaştırması.



Şekil 4.43: 4 numaralı lokasyon için elde edilen uniform tehlike spektrumu, TBDY (2018) ve ESHM20 karşılaştırması.

Şekil 4.37, Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’da deprem tehlike eğrileri, Şekil 4.36’da verilen 4 farklı lokasyonda PGA, $S_a (T=0.2 \text{ sn})$ ve $S_a (T=1.0 \text{ sn})$ parametreleri için elde edilmiştir.

Şekil 4.40, Şekil 4.41, Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'te ise seçilen 4 farklı lokasyon için 50 yılda 10% aşılma olasılığına sahip (DD2) eş tehlike spektrumları elde edilmiş ve sonuçlar TBDY 2018 sonuçları ile karşılaştırılmıştır. **Şekil 4.40 ve Şekil 4.41**'de sırası ile Nokta 1 ve Nokta 2 için -ZC- Zemin Sınıfı dikkate alınmış, **Şekil 4.42 ve Şekil 4.43**'de ise sırası ile Nokta 3 ve Nokta 4 için -ZB- Zemin sınıfı dikkate alınmıştır. **Şekil 4.40** Nokta 1'de analiz sonuçları tüm periyot aralıklarında TBDY 2018'den daha yüksek değerler vermektedir. **Şekil 4.41** Nokta 2'de ise TBDY 2018 yapılan analiz sonuçlarına göre hem kısa periyot bölgesinde hem de uzun periyot bölgesinde daha yüksek değerler vermiştir. Sonuçlar 0.8sn-1.5sn periyot aralığında örtüşmektedir. **Şekil 4.42** Nokta 3 ve **Şekil 4.43** Nokta 4'te ise analiz sonuçları TBDY 2018 sonuçları ile daha uyumlu görülmekle birlikte analiz sonuç değerlerinin özellikle kısa periyot bölgesi platodan itibaren daha yüksek değer verdiği gözlemlenmiştir. TBDY 2018 ve yürütülen analiz sonuçları arasındaki bu farklılık kullanılan deprem kataloğu, sismik kaynaklar ve azalım ilişkilerindeki farklılıklardan ileri gelmekle beraber -ZB- Zemin Sınıfında yer alan Nokta 3 ve Nokta 4'ün, -ZC- Zemin sınıfında yer alan Nokta 1 ve Nokta 2'ye göre TBDY 2018 sonuçları ile daha uyumlu çıkması zemin etkisinin olmadığı -ZB- Zemin Sınıfı noktalarında yürütülen analizlerin TBDY 2018 ile daha uyumlu olduğunu göstermektedir. Zemin etkisinin dikkate alındığı -ZC- Zemin Sınıfı noktalarında ise yürütülen analizler ile TBDY 2018 sonuçları arasında farklılıklar gözlenmiştir.

5. GÖMÜLÜ BORU HATLARINDA HASAR DEĞERLENDİRMESİ

Gömülü boru hatları üzerindeki deprem kaynaklı hasarlar genellikle iki kategori kapsamında incelenir: (i) dalga yayılımı (DY) sebebiyle meydana gelen hasarlar ve (ii) pik saha deformasyonu (PSD) nedeniyle oluşan hasarlar ve (iii) DY ve PSD tehlikelerinin ortaklaşa neden olduğu hasar tipleri (**O'Rourke ve Liu, 1999**). DY tehlikeleri, deprem dalgalarının sahada sebep olduğu gerilme ve birim şekil değiştirmelerin (BŞD) etkilerinden kaynaklanmaktadır. PSD tehlikeleri, toprak kaymaları, sıvılaşma nedeniyle yanal yayılma ve deprem yer değiştirmesi olarak sınıflandırılır ve genellikle PSD alanının miktarı, geometrisi ve mekânsal yayılımı ile tanımlanır.

Su ve doğal gaz boru hatlarının gömülü derinliğinin 1 ila 3 m olduğu dikkate alındığında, DY etkileri nedeniyle sahada meydana gelecek BŞD'lerin hesaplanmasında yüzey ve gövde dalgalarının dikkate alınması önem arz etmektedir. **Newmark (1967)**, sabit desene sahip basit bir dalga ve yayılma yönüne paralel hareket eden parçacığın neden olduğu zemin BŞD'sini (ε_g) ve eğrilik (κ_g) ilişkilerini aşağıdaki şekilde ifade etmiştir.

$$\varepsilon_g = \frac{V_m}{C}, \kappa_g = \frac{A_m}{C^2} \quad (5.1)$$

Burada, A_m ve V_m , dalga yayılım yönüne dik maksimum yer ivmesi ve dalga geçiş yönünde maksimum yatay yer hızı olarak sırasıyla ifade edilir. C , deprem dalgasının yayılma hızıdır. Eğer S-dalgaları dikkate alınacaksa, denklem (1)'in paydası, CS olarak ifade edilen S-dalgası görünür yayılma hızının 2 katı olarak ifade edilir.

Boru hattı ağları için kilometre başına onarım oranını hesaplamak amacıyla denklem (5.1)'de verilen ε_g parametresine veya PGV'ye bağlı birçok deneysel kırılma ilişkisi geliştirilmiştir.

5.1.Dalga Yayılımına Bağlı Hasar Değerlendirmesi

Deprem dalga yayılımı, yer kabuğunda fay hatlarında biriken enerjinin ani hareketle açığa çıkması sonucu oluşan sismik dalgaların, zemin boyunca belirli bir hız ve özelliklerle ilerlemesini ifade eder. Bu dalgalar, zemin yapısı, tabaka özellikleri ve mesafe gibi faktörlere bağlı olarak değişken etkilere sahiptir. Gömülü boru hatları, dalga etkisi ile zemin deformasyonlarına bağlı olarak çeşitli mekanik zorlanmalara maruz kalabilir. Deprem dalgalarının özelliklerinin detaylı bir şekilde incelenmesi, altyapı tasarımında risklerin azaltılmasına yönelik stratejilerin geliştirilmesini sağlar.

5.1.1.Sismik Dalgaların Türleri ve Dinamik Etkileri

Deprem dalgaları, hareket mekanizmalarına ve yayıldıkları ortama göre iki temel gruba ayrılmaktadır: cisim dalgaları ve yüzey dalgaları. Cisim dalgaları, yer kabuğunun iç kısımlarında yayılan dalgalardır ve P dalgaları ile S dalgaları olmak üzere iki ana türe ayrılır. Sıkışma-genleşme hareketi ile yayılan P dalgaları, deprem kaynağından en hızlı ilerleyen dalgalardır ve hem katı hem de sıvı ortamlarda yayılabilir. Bu dalgalar, boru hatlarında genellikle eksenel gerilmelere yol açarak bağlantı elemanlarında veya boru hattının zayıf noktalarında çatlak ve kırık oluşma riskini artırır. Buna karşılık, kesme hareketi ile yayılan S dalgaları yalnızca katı ortamlarda ilerleyebilir ve P dalgalarından daha yavaş hareket eder. Boru hatlarında, özellikle yatay deplasmanlar ve bükülme kuvvetleri sonucu şekil bozulmalarına neden olur. Bu dalgaların enerjisi, boru hattının geometrisi ve zemin özelliklerine bağlı olarak farklı tepkiler oluşturabilir.

Cisim dalgalarının aksine, yüzey dalgaları deprem dalgalarının yeryüzüne ulaşmasıyla oluşur ve genellikle daha yavaş hareket etmelerine rağmen enerjileri oldukça yoğunudur. Bu nedenle yüzeye yakın altyapılar üzerinde ciddi hasar etkileri yaratabilirler. Yüzey dalgalarının bir türü olan Love dalgaları, yatay doğrultuda ilerleyerek zemin yüzeyindeki yer değiştirmelere neden olur ve yüzeye yakın boru hatlarında yoğun zorlanmalar yaratır. Bu etkiler genellikle boru hattı ekseninde kıvrılma ve burkulma şeklinde kendini gösterir. Diğer bir yüzey dalgası türü olan Rayleigh dalgaları ise eliptik hareketlerle ilerler ve düşey ile yatay hareketlerin birleşimiyle hem boru hatlarında hem de zeminle olan etkileşimlerinde ciddi hasar potansiyeline sahiptir.

Deprem dalgalarının etkisi, özellikle gevşek zemin koşullarında, boru hatlarının yataklanma özelliklerini önemli ölçüde zorlaştırabilir ve bu durum, altyapının stabilitesini ciddi şekilde tehdit edebilir. Gevşek zeminlerde deprem dalgalarının şiddetinin artması, boru hatlarının zeminle etkileşiminde daha yüksek deformasyon ve gerilme birikimlerine yol açabilir.

5.1.2.Zemin Özelliklerinin Dalga Yayılımına Etkisi

Zemin özellikleri, deprem dalgalarının hızını, genliğini ve enerji yayılımını doğrudan etkileyerek boru hatları üzerinde oluşacak zorlanmaların şiddetini belirler. Yüksek yoğunluklu ve sert zeminler, dalgaların hızını artırırken genliklerini düşürür. Bu tür zeminlerde boru hatlarında deformasyon daha sınırlı olabilir. Ancak, dalgaların yüksek hızla yayılması, bağlantı elemanlarının ani yüklenmelere maruz kalma riskini artırabilir ve bu durum, özellikle bağlantı noktalarında hasar potansiyelini yükseltebilir.

Düşük yoğunluklu ve gevşek zeminler ise dalga genliklerini artırarak boru hatlarında daha büyük deformasyonlara yol açabilir. Bu zeminlerde çökme ve sıvılaşma gibi etkilerin görülme olasılığı da yüksektir ve bu durum, boru hatlarının stabilitesini ciddi şekilde tehdit edebilir. Özellikle sıvılaşma, zemin dayanımını büyük ölçüde azaltarak boru hatlarının hareket kabiliyetini ve yapısal bütünlüğünü olumsuz etkiler.

Bununla birlikte, farklı yoğunluk ve sertlikteki zemin tabakalarının bir arada bulunduğu bölgelerde, deprem dalgaları yansıma ve kırılma etkileriyle yön ve enerji dağılımında değişikliklere uğramaktadır. Bu kompleks dalga davranışları, belirli bölgelerde enerji yoğunlaşmasına yol açarak, boru hatlarının belirli kesimlerinde artan hasar potansiyeli ortaya çıkarabilmektedir.

5.1.3.Dalga Frekansı ve Rezonans Etkisi

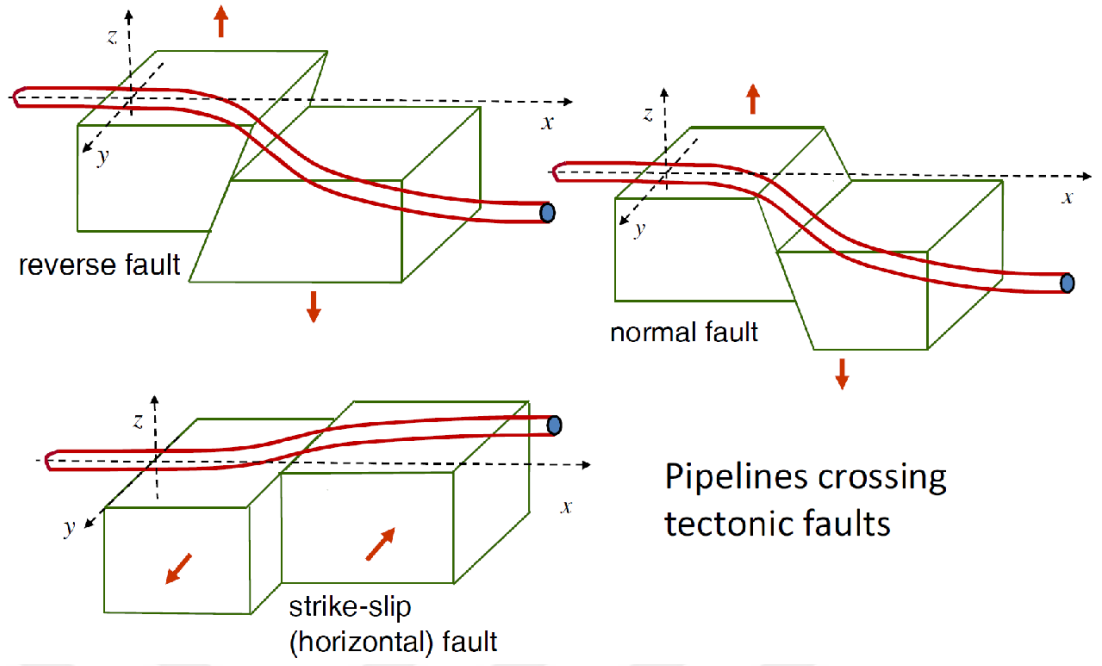
Deprem sırasında oluşan dalgaların frekans özellikleri, altyapı elemanlarının, özellikle de gömülü boru hatlarının dayanıklılığını önemli ölçüde etkiler. Dalga frekansı, bir saniyede oluşan dalga titreşim sayısını ifade eder ve genellikle Hertz (Hz) birimiyle ölçülür. Frekans, dalga boyu ve yayılma hızı ile ters orantılıdır. Deprem dalgaları, farklı frekans aralıklarına sahip olabilir: Düşük frekanslı dalgalar genellikle uzun dalga boylarına sahiptir ve daha geniş alanları etkiler. Bu dalgalar, özellikle uzun

mesafeli boru hatlarında kritik bir etki yaratır ve boru hattının genel yapısal deformasyonu üzerinde baskı oluşturarak büyük ölçekli hasara neden olabilir. Yüksek frekanslı dalgalar ise daha kısa dalga boylarına sahiptir ve küçük yapısal elemanlar üzerinde yoğun etkiler yaratır. Bu tür dalgalar, boru bağlantı elemanları, dirsekler ve bağlantı noktaları gibi hassas bileşenlerde çatlaklara ve kopmalara yol açabilir.

Rezonans, bir boru hattının doğal frekansının, deprem dalgalarının frekansına denk gelmesi durumunda oluşan fiziksel bir olgudur. Bu durumda sistem, dalgaların enerji transferini maksimum düzeyde absorbe ederek kontrolsüz şekilde salınım yapar. Rezonans etkisi, boru hattının yapısal bütünlüğünü ciddi şekilde tehlikeye atabilir. Boru hattının doğal frekansı, malzeme özellikleri, boru çapı, uzunluğu, zemin koşulları ve yerleşim derinliği gibi faktörlere bağlıdır. Sert ve kısa boru hatları daha yüksek doğal frekanslara sahipken, esnek ve uzun boru hatları daha düşük doğal frekanslar sergiler. Rezonans etkisiyle, boru hattı üzerindeki yer değiştirme ve gerilme miktarı kontrol edilemez seviyelere ulaşır. Bu durum, özellikle boru hattının eksenel ve çevresel çatlamasına, bağlantı noktalarında kopmalara, borunun yataklandığı zeminde stabilite kaybına ve boru hattının bütünüyle işlevsiz hale gelmesine yol açabilir.

5.2. Kalıcı Zemin Deformasyonuna (PSD) Bağlı Hasar Değerlendirmesi

Deprem kaynaklı pik saha deformasyonu (PSD), faylanma, toprak kayması, deprem-kaynaklı oturma ve zemin sıvılaşması nedenli yanal yayılma gibi sebeplerle meydana gelebilir. Fay bölgesinden geçen boru hatları, önemli yer değiştirmelere neden olabilecek ani bir fay hareketine maruz kalabilir (**Şekil 5.1**). Yanal atımlı fay hareketine maruz kalan boru hatlarında, fay ve boru malzemesi arasındaki açığa bağlı olarak boru hatları gerilme veya basınç oluşabilir. Normal ve ters faylanma halinde ise, boru hattı dikey yer değiştirmeye maruz kalır.



Şekil 5.1: Farklı fay mekanizmalarına maruz kalan boru hatları
(Karamanos vd., 2014).

Fay hareketinin boru hattı üzerindeki etkilerini tahmin etmek için farklı fonksiyonel formlar bulunmaktadır. **Well ve Coppersmith (1994)**, 1857'den 1993'e kadar meydana gelen 244 depremi kullanarak, ortalama fay yer değiştirme (AD) ile moment büyüklüğü (M_w) arasında aşağıdaki gibi bir ilişki önermiştir.

$$\begin{aligned}
 \log(AD) &= -6.32 + 0.90 \times M_w \text{ for Strike - Slip Fault} \\
 \log(AD) &= -4.45 + 0.63 \times M_w \text{ for Normal Fault} \\
 \log(AD) &= -0.74 + 0.08 \times M_w \text{ for Reverse Fault}
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

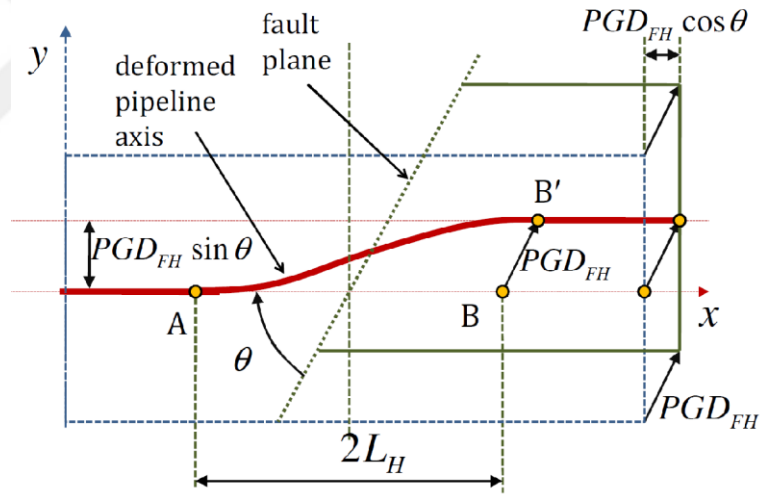
Karamanos vd. (2014), Kennedy vd. (1977) metodolojisini takip ederek, yanal atımlı fayından kaynaklanan yatay yer değiştirmeye (PSD_{FH}) bağlı olarak boru çeperinin deneyimlediği maksimum eksenel gerilimi tahmin etmek için analitik bir form önermiştir.

$$\varepsilon = \frac{PSD_{FH}}{L_H} \times \cos(\theta) + \left(\frac{PSD_{FH}}{3L_H} \times \sin(\theta) \right)^2 \quad (5.3)$$

Burada, θ , fay eğimi ile boru hattı eksenini arasındaki açıyı temsil ederken, L_H , fay ile ankraj noktası arasındaki mesafeyi ifade eder ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$L_H = \sqrt{\left(\frac{F_Y}{k_H} \right) \times \sin(\theta)} \quad (5.4)$$

Burada, sırasıyla k_H ve F_Y yatay zemin rijitliğini ve plastik davranış halindeki eksenel kuvveti temsil etmektedir. Denklem (5.3) ve (5.4)' de verilen her bir parametre **Şekil 5.2**'te gösterilmiştir.



Şekil 5.2: Boru hattının, θ açılı yatay bir fay hareketi sebebiyle deforme oluşunun şematik temsili (Karamanos vd., 2014).

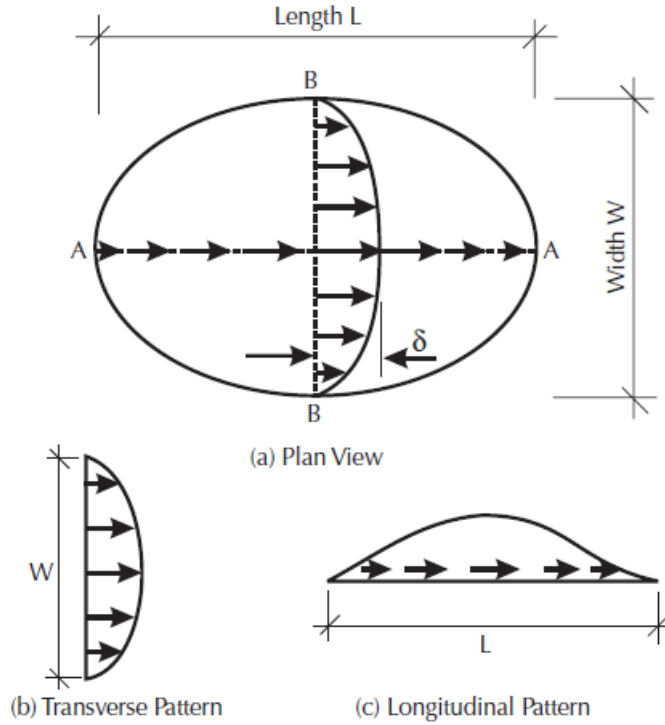
Boru hattında PSD tehlikesi, yamaç göçmesi, sıvılaşma kaynaklı yan yayılma ve deprem-kaynaklı oturma gibi durumlardan kaynaklanabilir. Kayma bloğunun yer değiştirmesini (D_N) tahmin etmek için **Jibson ve Keefer (1993)**, kayma bloğunu rijit bir sürtünme bloğu olarak ele alan **Newmark (1965)** modeline dayalı olarak aşağıdaki ilişkiyi önermiştir.

$$\log(D_N) = 1.460 \times \log(I_a) - 6.642 \times a_c + 1.54 \quad (5.5)$$

Burada a_c kritik ivme seviyesini, I_a ise aria şiddetini temsil etmektedir.

$$a_c = g \times (FS - 1) \times \sin(\alpha) \quad (5.6)$$

Burada, g yer çekimi ivmesini, α de yamacın eğimini temsil etmektedir.



Şekil 5.3: Yanal yayılma parametreleri (O' Rourke ve Liu (1999)).

PGD tehlikesinin bir diğer türü, depremle oluşan sıvılaşmaya maruz kalan gevşek doymuş kumlu zeminlerde meydana gelen yanar yayılma dır. Boru hattının yatay yöndeki tepkisini etkileyebilecek yanar yayılma etkisinin sahaya ait özellikleri, **Şekil 5.3**'te sunulmuştur. Burada W , L ve δ sırasıyla PSD bölgesinin enine genişliği, PSD bölgesinin boyuna uzunluğu ve PSD miktarını temsil etmektedir. **Youd vd. (2002)**, yanar yayılmaya maruz kalan birçok sahadan alınan sondaj verisi yardımıyla yatay

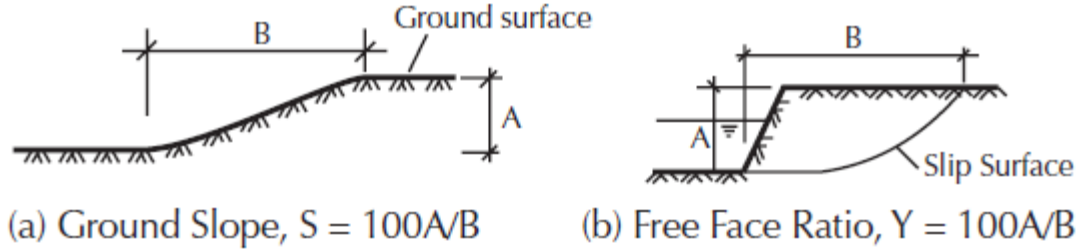
zemin deplasmanı miktarının (DH) tahminin etmek için aşağıdaki denklemi önermiştir. **Şekil 5.4'**te gösterilen serbest-yüzey koşulları için denklem (5.7) ve hafif eğimli zemin koşulları için denklem (5.8) önerilmiştir:

$$\begin{aligned} \log(D_H) = & -16.713 + 1.532 \times M - 1.406 \times \log(R^*) - 0.012 \times R \\ & + 0.592 \times \log(W) + 0.540 \times \log(T_{15}) + 3.413 \\ & \times \log(100 - F_{15}) - 0.795 \times \log(D50_{15} + 0.1mm) \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} \log(D_H) = & -16.213 + 1.532 \times M - 1.406 \times \log(R^*) - 0.012 \times R \\ & + 0.338 \times \log(S) + 0.540 \times \log(T_{15}) + 3.413 \\ & \times \log(100 - F_{15}) - 0.795 \times \log(D50_{15} + 0.1mm) \end{aligned} \quad (5.8)$$

Burada M, depremin moment büyüklüğünü; R, sismik enerji kaynağına en yakın uzaklığı; T₁₅, SPT-(N₁)₆₀ vuruş sayısı 15' den düşük olan suya doymuş granüler tabakaların kümülatif kalınlığını; F₁₅, T₁₅ hesabına dahil edilen tabakalar için ortalama ince tane içeriğini (No. 200 eleğinden geçen ortalama zemin örneği yüzdesi); D50₁₅, T₁₅ e dahil edilen granüler malzemeler için ortalama dane boyutunu; S, yüzde olarak yüzey eğimini; W; serbest yüzey yüksekliğinin (H), hesaplama için dikkate alınan bölgenin serbest yüzeyin tabanına olan uzaklığına oranı olarak tarif edilen serbest-yüzey oranını (yüzde olarak) temsil etmektedir. R* ise aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.

$$R^* = R_0 + R, R_0 = 10^{(0.89M-5.64)} \quad (5.9)$$



Şekil 5.4: Yüzey eğiminin ve serbest-yüzey oranının cephe görünüşü (**O' Rourke ve Liu (1999)**).

5.3. Boru Hattı Hasarı İçin Mevcut Ampirik Kırılganlık Eğrileri

Deprem kaynaklı boru hattı hasarı, birim uzunluk boru hattı başına yapılan onarım sayısı olarak tanımlanan onarım oranı ile hesaplanır. Onarım oranı parametresi, genellikle bir yer hareketi parametresi korele edilerek (örneğin, PGA, PGV veya zemin birim şekil değiştirmesi) bir kırılganlık ilişkisi önermek için hem deneysel (örneğin, deprem sonra boru hasarlarının belirlenmesi yoluyla) hem de analitik olarak (örneğin, karmaşık sonlu eleman modelleri veya basitleştirilmiş boru kirişi-zemin yayı çözümleri yoluyla) elde edilebilir.

Gömülü su boru hattı hasarı için önerilen en erken deneysel kırılganlık fonksiyonlarından biri (**Katayama vd., 1975**), pik yer ivmesi (PGA) kullanılarak DY ve PSD tehlikelerinden kaynaklanan boru hasarını kilometre başına tahmin etmek için üretilmiştir. **Barenberg (1988)**, 1965 Puget Sound, 1969 Santa Rosa, 1971 San Fernando (MMI = VIII'den IX'a kadar) ve 1971 San Fernando (MMI = VII) depremlerinden kaynaklanan dökme demir su borularındaki hasarı kullanarak, DY ve PSD tehlikeleri için farklı kırılganlık eğrileri öne sürmüştür. **O'Rourke ve Ayala (1993)**, **Barenberg (1988)**' in geliştirdiği boru hattı hasarı veritabanını güncellemiş ve DY kaynaklı boru hattı hasarı için aşağıdaki ilişkileri öne sürmüştür.

$$RR = 3.3 \times 10^{-5} \times V_{max}^{2.63} \quad (5.10)$$

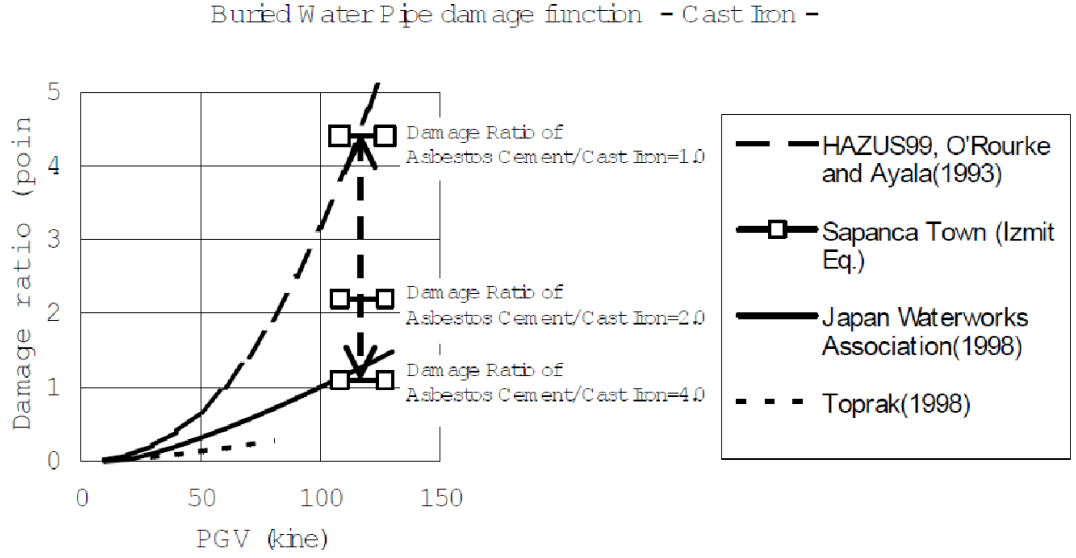
Burada RR, onarım oranını, V_{max} ise pik yer hızını temsil etmektedir. Benzer denklem, **O'Rourke ve Jeon (1999)** tarafından 1994 Northridge depremindeki DY tabanlı dökme demir tipli boru hatlarındaki hasarı kullanarak aşağıdaki gibi yeniden uygulanmıştır.

$$RR = 1.09 \times 10^{-3} \times V_{max}^{1.22} \quad (5.1)$$

Japan Waterworks Association (1998), su borularında meydana gelen hasar oranını (R_m , hasar sayısı/km) tahmin etmek aşağıdaki kırılma fonksiyonunu önermiştir.

$$R_m = 3.11 \times 10^{-3} \times (PGV - 15)^{1.3} \times C_p \times C_d \times C_g \times C_l \quad (5.12)$$

Burada, C_p beton ve galvanizli demir için 1.0, çelik ve dökme demir için 0.3, polietilen için 0.1 ve yüksek yoğunluklu polietilen için 0.0 olarak boru malzemesi katsayısıdır. C_d , boru çapı katsayısıdır ve 90 mm'den az için 1.6, 100 mm ile 175 mm arası için 1.0, 200 mm ile 450 mm arası için 0.8 ve 500 mm üzeri için 0.5 olarak belirlenmiştir. C_g , zemin durumu katsayısıdır ve Y_d , S_d , Y_m için 1.5, Q_{al} , K_{sf} , O_a , Q için 1.0 ve diğerleri için 0.4 olarak belirlenmiştir. C_l , sivilaşma katsayısıdır ve T_m , Y_d , S_d , Q_{al} , K_{sf} , O_a , Q için 2.0 ve diğerleri için 1.0 olarak belirlenmiştir. **Şekil 5.5'**de, Kocaeli 1999 depremi sırasında Sapanca Kasabası'nda gözlemlenen hasar oranları, **O'Rourke ve Ayala (1993)**, **Japan Waterworks Association (1998)** ve **Toprak (1998)** tarafından üretilen hasar oranı tahminleri ile karşılaştırılmıştır. Sapanca kasabasındaki hasar oranı verilerinin, **O'Rourke ve Ayala (1993)** ile **Japan Waterworks Association (1998)** tahminleri arasında olduğu görülmektedir.

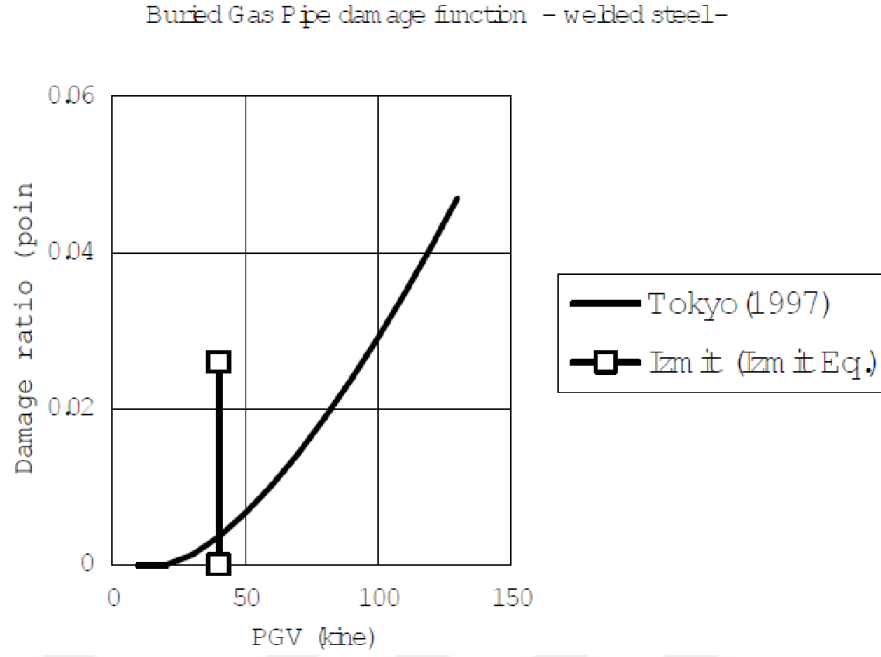


Şekil 5.5: Dökme demir su borusu hasar oranı ile pik yer ivmesi (PGV) arasındaki ilişki.

Denklem (5.12)' e benzer şekilde, **Japan Waterworks Association (1998)**, gaz borularındaki hasar oranını tahmin etmek için aşağıdaki gibi bir kırılgenlik fonksiyonu önermiştir.

$$R_m = 3.11 \times 10^{-3} \times (PGV - 15)^{1.3} \times C_p \times C_g \times C_l \quad (5.13)$$

Burada, C_g ve C_l , denklem (5.12)' de verilenlerle aynıdır ve C_p , boru malzemesi katsayısı olarak tanımlanmış ve çelik ve polietilen için sırasıyla 0.01 ve 0.0 olarak belirlenmiştir. **Şekil 4.9'**da denklem (5.13)' den elde edilen hasar oranı tahminleri ile Kocaeli 1999 depremi sırasında Kocaeli (İzmit)' deki kaynaklı çelik gaz borularında gözlemlenen hasar oranları karşılaştırılmıştır. Görüldüğü üzere, **Japan Waterworks Association (1998)**, 45 cm/sn civarındaki hasar oranı verilerini düşük tahmin etmektedir.



Şekil 5.6: Kaynaklı çelik gaz boru hattı ile pik yer ivmesi (PGV) arasındaki ilişki.

ALA (2001), Tablo 5.1 ve Tablo 5.2' deki verileri kullanarak, sırasıyla, su boru hattı elemanları üzerindeki dalga yayılımı (DY) ve pik sismik deformasyon (PGD) hasarları için ayrı kırılabilirlik fonksiyonları önermiştir.

$$DY: RR \left(\frac{\text{hasar sayısı}}{1000} ft \right) = K_1 \times 0.00187 \times PGV \quad (5.14)$$

$$PSD: RR \left(\frac{\text{hasar sayısı}}{1000} ft \right) = K_2 \times 1.06 \times PSD^{0.319} \quad (5.15)$$

Burada PGV ve PSD sırasıyla inç/saniye ve inç olarak ifade edilir. Farklı boru tiplerinin DY ve PSD etkileri altındaki davranışını hesaba katmak için K1 ve K2 katsayıları sırasıyla **Tablo 5.3** ve **Tablo 5.4'**de sunulmuştur. Eşitliklerdeki lognormal standart sapmaları sırasıyla 1.15 ve 0.74 olarak önerilmiştir. Ayrıca, **ALA (2001)**, boru malzemelerindeki fay kesişme hasarını aşağıdaki algoritma aracılığıyla hesaplamayı önermiştir:

Tablo 5.1: Pik yer hızı (PGV) veritabanındaki depremler ve boru hattı hasar noktaları (ALA (2001)).

Earthquake	Data Points	Percentage
1995 Hyogoken-nanbu (Kobe)	9	11%
1994 Northridge	35	43%
1989 Loma Prieta	13	16%
1971 San Fernando	13	16%
Other Earthquakes (8)	11	14%
Total	81	100%

Tablo 5.2: PSD veritabanındaki depremler ve boru hattı hasar noktaları (ALA (2001)).

Earthquake	Number of Data Points	Percentage	Ground Failure Type
1989 Loma Prieta	12	28%	Liquefaction vertical settlement
1983 Nihonkai-Chubu	20 ¹	48%	Liquefaction lateral spread
1971 San Fernando	5	12%	Local tectonic uplift
1906 San Francisco	5	12%	Liquefaction lateral spread
Total	42	100%	

Note 1. Excludes 14 data points for gas pipes listed in database but not used in statistical analysis.

Tablo 5.3: Kırılabilirlik eğrisi için K1 katsayıları (ALA (2001)).

Pipe Material	Joint Type	Soils	Diam.	K ₁	Reference Sections
Cast iron	Cement	All	Small	1.0	4.4.2
Cast iron	Cement	Corrosive	Small	1.4	4.4.2
Cast iron	Cement	Non-corrosive	Small	0.7	4.4.2
Cast iron	Rubber gasket	All	Small	0.8	4.4.2
Welded steel	Lap - Arc welded	All	Small	0.6	4.4.4
Welded steel	Lap - Arc welded	Corrosive	Small	0.9	4.4.4
Welded steel	Lap - Arc welded	Non-corrosive	Small	0.3	4.4.4
Welded steel	Lap - Arc welded	All	Large	0.15	4.4.4
Welded steel	Rubber gasket	All	Small	0.7	4.4.6
Welded steel	Screwed	All	Small	1.3	4.4.6 A.3.11
Welded steel	Riveted	All	Small	1.3	4.4.6
Asbestos cement	Rubber gasket	All	Small	0.5	4.4.3 4.4.5
Asbestos cement	Cement	All	Small	1.0	4.4.3
Concrete w/Stl Cyl.	Lap - Arc Welded	All	Large	0.7	4.4.6
Concrete w/Stl Cyl.	Cement	All	Large	1.0	4.4.6
Concrete w/Stl Cyl.	Rubber Gasket	All	Large	0.8	4.4.6
PVC	Rubber gasket	All	Small	0.5	4.4.6
Ductile iron	Rubber gasket	All	Small	0.5	4.4.5 4.4.6

Fay boyunca ortalama fay hareketinin belirlenmesi (Wells and Coppersmith, 1994)

Hasar algoritması:

Sürekli boru hattı (kaynaklı çelik):

$$R_m = 3.11 \times 10^{-3} \times (PGV - 15)^{1.3} \times C_p \times C_g \times C_l \quad (5.16)$$

Segmentli boru hattı (Çimentolanmış kaynaklı dökme demir tipi boru hattı):

$$P_{no\ failure} = 1.0, PGD = 1.0$$

$$P_{no\ failure} = 0.5, PGD = 1\ to\ 12\ inches \quad (5.17)$$

$$P_{no\ failure} = 0.20, PGD = 13\ to\ 24\ inches$$

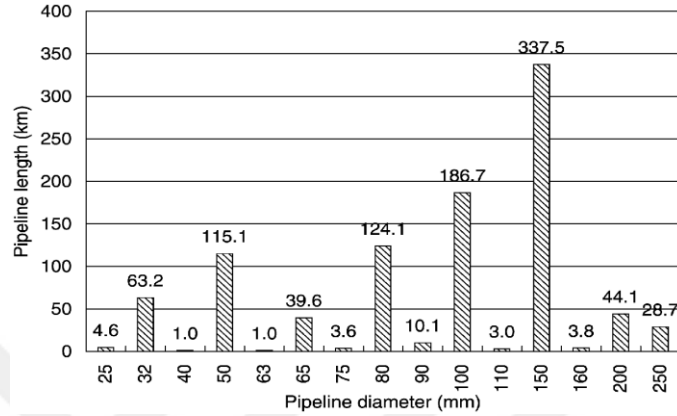
$$P_{no\ failure} = 0.05, PGD = over\ 24\ inches$$

Tablo 5.4: Kırılmalık eğrisi için K2 katsayıları (ALA (2001)).

Pipe Material	Joint Type	K ₂	Reference Sections
Cast iron	Cement	1.0	4.4.2
Cast iron	Rubber gasket	0.8	4.4.2
Cast iron	Mechanical restrained	0.7	4.4.2
Welded steel	Arc welded, lap welds (large diameter, non corrosive)	0.15	4.4.4
Welded steel	Rubber gasket	0.7	4.4.3
Asbestos cement	Rubber gasket	0.8	4.4.3
Asbestos cement	Cement	1.0	4.4.6
Concrete w/Stl Cyl.	Welded	0.6	4.4.6
Concrete w/Stl Cyl.	Cement	1.0	4.4.6
Concrete w/Stl Cyl.	Rubber Gasket	0.7	4.4.6
PVC	Rubber gasket	0.8	4.4.6
Ductile iron	Rubber gasket	0.5	4.4.6

Chen vd. (2002), 21 Eylül 1999'da meydana gelen Chi-Chi depremi sırasında doğal gaz ve su boru hatlarının performansını değerlendirmiştir. İlgili çalışmada göz önünde bulundurulan doğal gaz boru hattı ağı **Şekil 5.7**'de boru hatlarının çap dağılımıyla beraber sunulduğu üzere, polietilen (PE), çelik ve dökme demir borular olmak üzere üç farklı malzeme türünden oluşmaktadır. Doğal gaz ve su boru hatları için tüm

kırılmalık eğrilerinin fonksiyon formları sırasıyla **Tablo 5.5** ve **Tablo 5.6**'da sunulmuştur. **Chen vd. (2002)**, verilen kırılmalık modellerinin geliştirilmesinde dikkate alınan tüm parametreler arasında PGA'nın boru hasarı ile en güçlü korelasyona sahip olduğunu belirtmiştir.



Şekil 5.7: Boru hatlarının çaplarına göre dağılımı (**Chen vd., 2002**).

Tablo 5.5: Taiwan' daki doğal gaz boru hatları için kırılmalık eğrileri (Onarım oranı (OO) vs. Sismik şiddet parametresi, Chen et al., 2002).

PGA*	PGV**	SI***	Pipeline Diameter
$0.00036 \times PGA^{1.59}$	$0.02 \times PGV^{1.23}$	$0.00032 \times SI^{2.32}$	$\phi \leq 65 \text{ mm}$
$0.0064 \times PGA^{0.87}$	$0.48 \times PGV^{0.11}$	$0.144 \times SI^{0.41}$	$65 < \phi < 150 \text{ mm}$
$0.00054 \times PGA^{1.2}$	$0.092 \times PGV^{0.25}$	$0.0066 \times SI^{0.99}$	$\phi \geq 150 \text{ mm}$

* PGA (cm/s²), ** PGV (cm/s), *** SI (cm/s).

Tablo 5.6: Taiwan' daki su boru hatları için kırılmalık eğrileri (Onarım oranı (OO) vs. Sismik şiddet parametresi, (**Chen et al., 2002**)).

PGA*	PGV*	SI*	Pipeline Diameter
$49.90PGA^{5.39}$	$1.90 \times 10^{-8}PGV^{4.42}$	$1.80 \times 10^{-11}SI^{6.47}$	$20 \leq \phi \leq 50$ mm

$3.97PGA^{4.54}$	$2.26 \times 10^{-13}PGV^{6.34}$	$0.50SI^{0.15}$	$65 \leq \Phi \leq 600$ mm
------------------	----------------------------------	-----------------	-------------------------------

* PGA (cm/s²), ** PGV (cm/s), *** SI (cm/s).

O'Rourke ve Deyoe (2004), DY ve PSD tehlikelerinden kaynaklanan gömülü segmentli boru hasarları için birim şekil değiştirmeye bağlı farklı ilişkiler önermiştir. Veri seti, DY için **O'Rourke ve Ayala (1993)** ve **O'Rourke ve Jeon (1999)** tarafından, PSD için ise **Sano vd. (1999)** ve **Hamada ile Akioka (1997)** tarafından sağlanan boru hasarı verilerinden oluşmaktadır. Onarım oranı verileri için kabul kriteri, örnekleme onarım oranının (RR gerçek değer $\pm$ %50'si içinde kalma olasılığının %95 olması şeklinde önerildi. Diğer bir deyişle,

$$n \approx 15.36 \times \frac{(1 - RR)}{RR} \quad (5.18)$$

Burada n, onarım oranının, 95% güven aralığı ile tanımlanan gerçek onarımın 50%' si içinde kalması için gereken boru hattı uzunluğudur (km). DY hasarı için üretilen ilişki aşağıdaki gibidir:

$$RR = 513 \times \varepsilon^{0.89} \quad (5.19)$$

Denklem (5.19)' a ek olarak, DY ve PSD için boru hattı hasar veri tabanı birleştirilerek aşağıdaki kırılma eğrisi denklemi öne sürülmüştür.

$$RR = 724 \times \varepsilon^{0.92} \quad (5.20)$$

Denklem (5.20)' deki kırılma eğrisi, BŞD-PGV (pik yer hızı) ilişkisi yardımıyla PGV' ye bağlı olarak yeniden yazılabilir. Aşağıdaki iki denklem, sırasıyla, yüzey dalgaları (ör., Rayleigh dalgası) ve bünye dalgaları (ör., S dalgası) yayılımı için PGV' ye bağlı kırılma eğrilerini göstermektedir.

$$RR_R = 0.034 \times V_{max}^{0.92} \quad (5.21)$$

$$RR_S = 0.0035 \times V_{max}^{0.92} \quad (5.22)$$

1994 Northridge depreminin su dağıtım boruları ve konut binaları üzerindeki etkisi, **Jeon ve O'Rourke'un (2005)** tarafından geliştirilen ve bu tesisler üzerindeki hasar oranları ile kuvvetli yer hareketi karakteristikleri ilişkilendiren korelasyonlar aracılığıyla değerlendirilmiştir. Toplam 142 güçlü hareket istasyonundan elde edilen kayıtlar, PGV ve SI konturlarıyla birlikte 1100 su boru onarımını içeren bilgilerle ilişkilendirilerek, dökme demir boruları için aşağıda sunulduğu üzere kırılma eğrileri geliştirilmiştir.

$$\begin{aligned} \ln \ln (RR) &= 1.05 \times \ln \ln (PGV) - 6.20, \ln \ln (RR) \\ &= 1.21 \times \ln \ln (PGV) - 6.78 \end{aligned} \quad (5.23)$$

$$\ln \ln (RR) = 1.30 \times \ln \ln (PGV_{MVM}) - 7.21 \quad (5.24)$$

$$\ln \ln (RR) = 1.09 \times \ln \ln (PGV_{GM}) - 6.12 \quad (5.25)$$

Burada PGV cm/sn cinsinden ifade edilmekte olup, PGV_{MVM} (cm/sn) PGV'nin maksimum vektör büyüklüğüdür ve x ve y yönlerindeki hız zaman geçmişlerinin karelerinin toplamının karekökünün maksimum değeridir. PGV_{GM} ise yatay yönlere ait PGV'lerin geometrik ortalamasıdır.

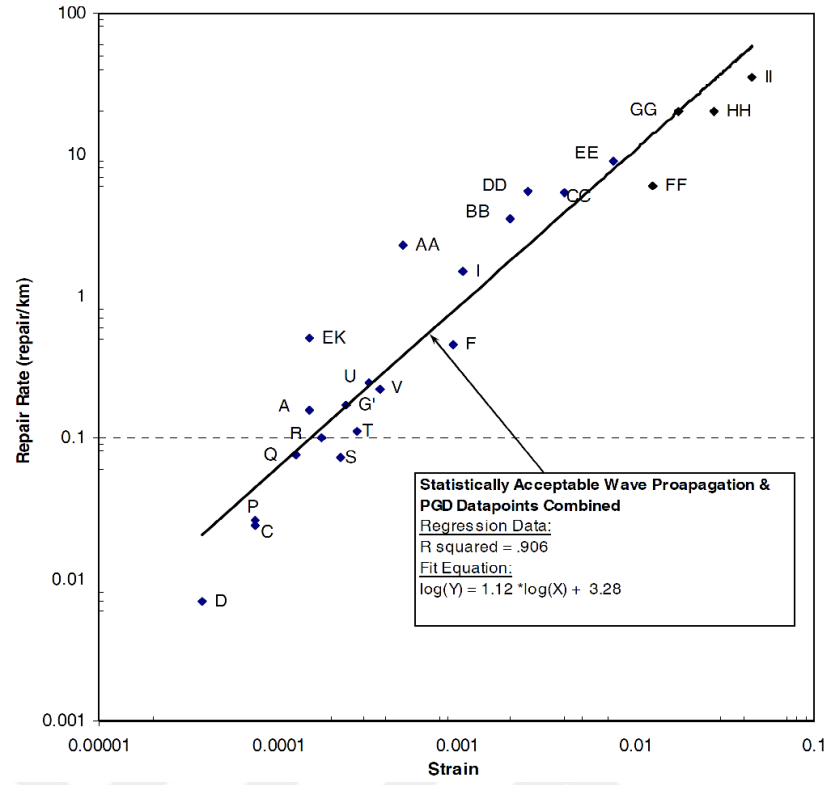
O'Rourke (2009), denklem (5.20)'yi R dalgalarının görünür hızı yerine S dalgalarının görünür hız değerini kullanarak aşağıdaki biçimde güncellemiştir. İlgili denklemin geliştirilmesi için kullanılan boru hattı hasarı veri seti **Şekil 5.8**'de sunulmuştur.

$$RR = 1905 \times \varepsilon_g^{1.12} \quad (5.26)$$

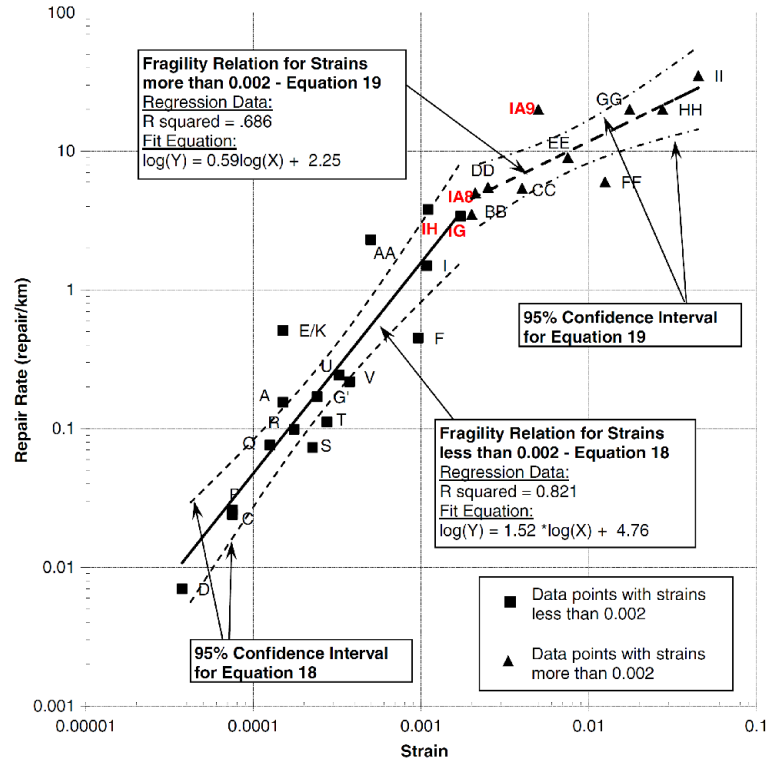
Burada ε_g , zeminde oluşan birim şekil değiştirme değerine karşılık gelmektedir.

O'Rourke vd. (2015), denklem (5.20) ve (5.26)'nın geliştirilmesi için kullanılan verisini 17 Ağustos 1999 tarihinde Kocaeli'de meydana gelen M_w 7.4 depreminde Hersek, Gölcük ve Adapazarı şehirlerinde gözlemlenen boru hasarlarıyla zenginleştirerek aşağıdaki denklemi öne sürmüştür. Denklem (5.27) ve ilgili boru hattı hasar veri seti **Şekil 5.9**'da sunulmuştur.

$$RR = \{56,970 \times \varepsilon_g^{1.52} \quad 178 \times \varepsilon_g^{0.59} \quad \varepsilon_g < 0.002 \quad \varepsilon_g > 0.002 \quad (5.27)$$



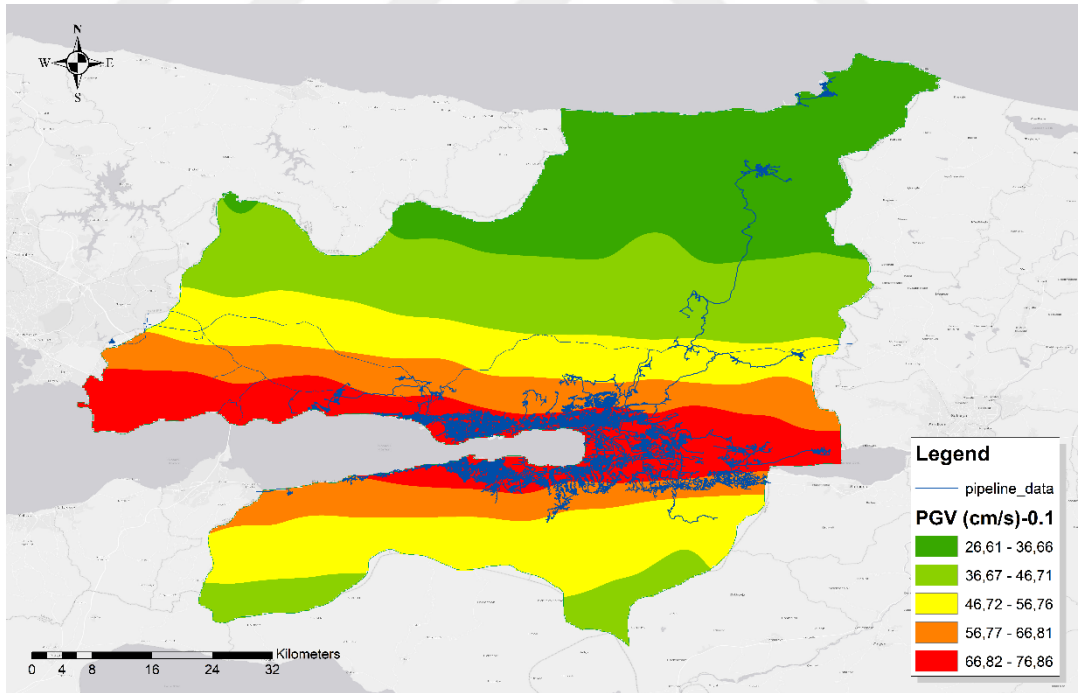
Şekil 5.8: Boru hattı hasar verisi ve denklem (5.26) (O'Rourke (2009)).



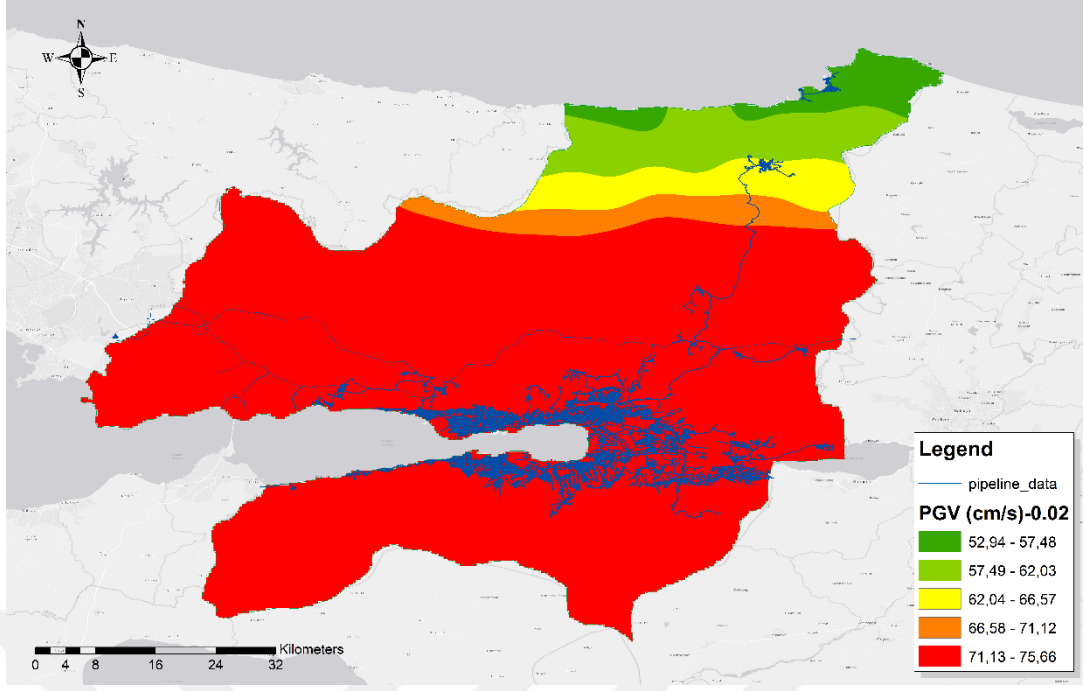
Şekil 5.9: O'Rourke vd. (2015)' de sunulan denklem, denklem üzerindeki 95% güven aralığı ve çalışmada kullanılan boru hattı hasarı veritabanı.

5.4. Kocaeli Boru Hatlarının Hasar Değerlendirmesi

Kocaeli boru hatlarının sismik hasar değerlendirilmesi için gerçekleştirilen analiz, sistematik ve ayrıntılı bir yöntem izlenerek gerçekleştirilmiştir. İlk adımda, boru hatlarının mevcut envanteri detaylı bir şekilde Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ortamına aktarılarak analiz edilmiştir. Bu süreçte, boru hatları segmentlere ayrılmış ve her bir segmentin uzunluğu, yönelimi ve geometrik özellikleri detaylandırılmıştır. Segmentler, sismik etkilerle ilişkilendirmeyi kolaylaştırmak için koordinat bazlı olarak temsil edilmiş ve her bir segmentin orta noktası belirlenmiştir. Orta nokta, segmentin sismik etki altında hasar görme ihtimalini temsil eden kritik bir referans noktası olarak değerlendirilmiştir. Orta noktaların hesaplanmasının ardından, bu noktaların yer aldığı grid hücrelerine karşılık gelen Pik Yer Hızı (PGV) değerleri atanmıştır. Bu işlem, bölgedeki sismik tehlike haritalarından alınan grid tabanlı PGV verilerinin kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Kocaeli ili için elde edilen PGV dağılımları Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de gösterilmiştir.



Şekil 5.10: Kocaeli ili için elde edilen PGV dağılımı (DD2).



Şekil 5.11: Kocaeli ili için elde edilen PGV dağılımı (DD1).

Sismik tehlike haritalarından elde edilen PGV değerleri, her bir boru segmentinin yer birim şekil değiştirmesi (ε) hesaplamaları için temel veri kaynağı olarak kullanılmıştır. Yer birim şekil değiştirmesi, **O'Rourke ve Deyoe'nun (2004)** önerdiği bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır:

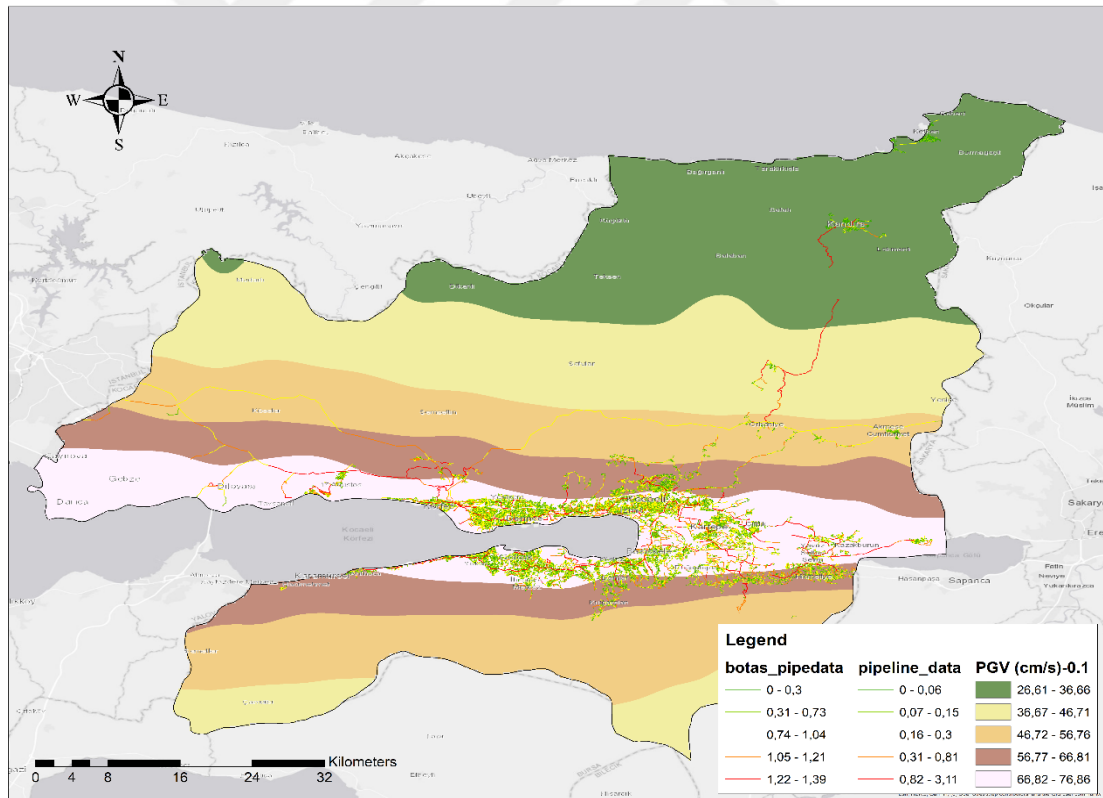
$$\varepsilon = \frac{PGV_R}{C_R} \quad (5.28)$$

Bu hesaplamada, Rayleigh dalgalarının hızı sabit olarak $C_R=500$ m/s alınmıştır. Yer birim şekil değiştirmesi (ε), boru segmentlerinin deformasyon kapasiteleriyle doğrudan ilişkili bir parametre olup, segmentlerin sismik etkiler karşısında maruz kalacağı gerilimi temsil etmektedir.

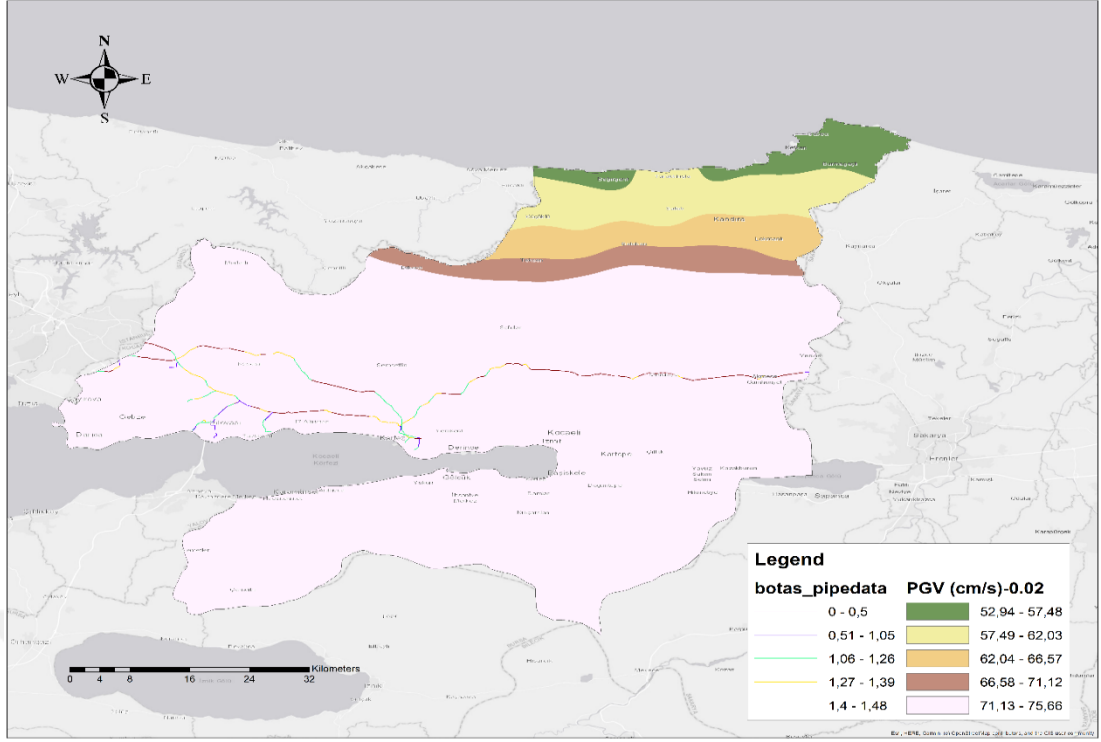
Hesaplanan ε değerleri, boru segmentlerine ait tamir oranlarının belirlenmesi için kullanılmıştır. Tüm durumlar için önerilen denklem (20)'deki bağıntı aracılığıyla, her bir segmentin sismik etkiler altındaki beklenen hasar oranı nicel olarak ifade edilmiştir. Her bir segment için hesaplanan RR değerleri, boru hatlarının sismik etkiler altındaki

dayanıklılığını ve hasar görebilirliğini ortaya koymuştur. Yüksek tamir oranlarına sahip segmentler, boru hatlarının en zayıf noktaları olarak belirlenmiş ve bu segmentlerin detaylı değerlendirilmesi için öncelikli alanlar olarak ele alınmıştır.

Kocaeli il sınırları içerisindeki boru hatlarına ilişkin hasar oranlarının mekânsal dağılımı, haritalar yardımıyla görselleştirilmiştir. Elde edilen veriler ışığında, farklı bölgelerde hesaplanan tamir oranları sismik tehlike düzeyleriyle ilişkilendirilmiştir. **Şekil 5.12** ve **Şekil 5.13**'teki haritalar, sismik etkilerin boru hatları üzerindeki mekânsal farklılıklarını açıkça ortaya koymakta ve yüksek tamir oranlarının yoğunlaştığı bölgeleri belirgin hale getirmektedir. Bu tür bölgeler, genellikle zemin yapısının zayıf olduğu veya sismik titreşimlerin şiddetli hissedildiği alanlarda yer almaktadır. Görselleştirme, boru hatlarının en savunmasız segmentlerini ayırt etmeye olanak tanımış ve öncelikli müdahale gerektiren alanların belirlenmesini desteklemiştir.



Şekil 5.12: Kocaeli ili boru hatları için elde edilen onarım oranı dağılımı (DD2).



Şekil 5.13: Kocaeli ili boru hatları için elde edilen onarım oranı dağılımı (DD1).

6.SONUÇLAR

Bu tez, Kocaeli bölgesinde meydana gelen depremlerden kaynaklanan dalga yayılımı etkilerinin, yerleşik boru hatlarında yol açtığı hasarı incelemeyi ve bu hasarın mekânsal dağılımını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Çalışma, özellikle 30-arc saniye çözünürlüğe sahip Dijital Yükselti Haritası (DEM) verilerini kullanarak, bölgenin zemin özelliklerinin ve sismik tehlike seviyelerinin belirlenmesine odaklanmıştır. Bu kapsamda, bölgedeki zeminlerin V_{s30} (ortalama zemin hızı) değerleri hesaplanmış ve bu veriler, boru hatlarının onarım oranlarını (repair rate) tahmin etmek için kullanılmıştır. Onarım oranları, Pik Yer Hızı (PGV) değerleri ile ilişkilendirilerek, boru hatlarının hasar oranlarının coğrafi dağılımları haritalanmış ve değerlendirilmiştir.

V_{s30} hesaplamalarında kullanılan dijital arazi modeliyle zemin hızı ile yamaç eğimi arasındaki korelasyonu belirlemek amacıyla bir denklem uygulanmıştır. Bu yöntem, geleneksel sondaj verilerine dayalı yaklaşımlara olan bağımlılığı azaltarak, geniş alanlarda homojen zemin yapılarının temsil edilmesini sağlamıştır. Yamaç eğimi ile V_{s30} arasındaki ilişki, özellikle zemin çökme ve sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğu bölgelerin tespitinde önemli bir rol oynamıştır. Bu sayede, Kocaeli bölgesindeki zemin koşulları daha ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiş ve deprem sırasında boru hatlarının davranışlarını daha doğru tahmin etmeye olanak tanımıştır.

Çalışma kapsamında elde edilen veriler, deprem tehlike analizlerinin temel girdisi olarak kullanılmıştır. Gömülü boru hatları boyunca yapılan olasılıksal deprem tehlike analizi ile, TBDY (2018)'de tanımlanan DD-1 ve DD-2 deprem düzeylerine karşılık gelen 50 yıl içinde 2% ve 10% aşılma olasılığıyla boru hattı elemanlarının bulunduğu koordinatlarda deprem tehlike parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler, PGA, PGV gibi kalıcı deformasyon değerlerini içeren literatür çalışmalarıyla desteklenmiştir. Ayrıca, Avrupa Sismik Kaynak Modeli dikkate alınarak, O'Rourke ve Deyoe (2004) tarafından geliştirilen yer sarsıntısına bağlı kırılabilirlik ilişkisi ile hasar tahmini yapılmıştır.

PGV değerleri kullanılarak yapılan boru hattı analizinde, yüksek zemin hızlarının boru hatlarında gerilme ve deformasyon riskini artırdığı gözlemlenmiştir. Yüksek V_{s30}

değerlerine sahip bölgelerde, zemin çökmesi ve sıvılaşma potansiyeli düşükken, düşük V_{s30} değerleriyle karakterize edilen alanlarda bu risklerin arttığı tespit edilmiştir. Deprem tehlike analizi sonucunda, PGV değerlerinin boru hatlarındaki hasar oranlarıyla doğrudan ilişkililiği ortaya çıkmıştır. PGV değerlerinin 50 cm/s'nin üzerinde olduğu bölgelerde, küçük çaplı borularda 475 ve 2475 yıl dönüş periyotları için ortalama hasar oranları sırasıyla %1.05-1.29 arasında değişirken, PGV değerlerinin 70 cm/s'nin üzerinde olduğu alanlarda bu oran %1.48'e kadar çıkmıştır. Yüksek PGV değerlerinin bulunduğu bölgelerde boru hatlarının zemin koşullarına duyarlılığı belirgin şekilde artmıştır. Bu durum, boru hatlarının tasarımında zemin koşullarının ve sismik etkilerin önceden dikkate alınmasının gerekliliğini vurgulamaktadır.

Onarım oranlarının mekânsal dağılımının haritalanması, bölgesel afet yönetimi ile altyapı dayanıklılığını artırmaya yönelik uzun vadeli planlamaların geliştirilmesinde kritik bir kaynak oluşturması beklenmektedir. Çalışma, Kocaeli bölgesindeki boru hatları altyapısının deprem risklerine karşı dirençli hale getirilmesi için zemin etütlerinin ve sismik analizlerin önemini vurgulamakta ve afet öncesi hazırlıkların yapılmasında somut veri ve analizlere dayalı bilgi sunmaktadır.

KAYNAKLAR

Abdusselamoğlu, S. (1963). Geology of the Kocaeli Peninsula. General Directorate of Mineral Research and Exploration Institute (M.T.A.).

Akkar S., Azak T., Çan T., Çeken U., Demircioğlu M., Duman T., Erdik M., Ergintav, S., Kadirioğlu, F., Kalafat D., Kale Ö., Kartal R., Kekovalı K., Kılıç T., Özalp S., Altuncu S., Şeşetyan K., Tekin S., Yakut, A., Zülfikar C., (2018), " Evolution of seismic hazard maps in Turkey", Bulletin of Earthquake Engineering, 16(8), 3197–3228.

Akkar S., Azak T., Çan T., Çeken U., Demircioğlu M., Duman T., Ergintav S., Kadirioğlu F., Kalafat D., Kale Ö., Kartal R., Kılıç T., Özalp S., Şeşetyan K., Tekin S., Yakut A., Yılmaz T., Zülfikar Ö., AFAD National Earthquake Research Program (UDAP-Ç-13-06), (2013), Revision Of Turkish Seismic Hazard Map, Turkey.

Al-Subaih, T., & Dawood, T. S. (2016). Seismic response of buried PVC pipelines. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 7(3), 04016006.

American Lifelines Association. (2001). Seismic fragility formulations for water systems

American Lifelines Alliance (2001), Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe, Reston, VA.

Arablouei, A., & Koohi, A. (2014). Seismic vulnerability of buried polyethylene gas pipelines. Natural Hazards and Earth System Sciences, 14(12), 3231-3240.

Barenberg, M. E. (1988). Correlation of pipeline damage with ground motions. Journal of geotechnical engineering, 114(6), 706-711.

Barka, A., et al. (2000). 1999 Kocaeli depremi sonrası bölgedeki tektonik deformasyonlar.

Barka A., Akyüz H., Altunel E., Sunal G., Çakır Z., Dikbas, A., Yerli B., Armijo R., Meyer B., Bernard de Chaballier J., Rockwell T., Dolan J., Hartleb R., Dawson T., Christofferson S., Tucker A., Fumal T., Langridge R., Stenner H., Lettis W., Bachhuber J., Page W., (2002), "The surface rupture and slip distribution of the 17 August 1999 Izmit earthquake (M 7.4), North Anatolian fault", Bulletin of the Seismological Society of America, 92(1), 43-60.

Basili R, Tiberti MM, Kastelic V et al (2013) Integrating geologic fault data into tsunami hazard studies. Nat Hazards Earth Syst Sci 13:1025–1050

Basili, R., Danciu, L., Beauval, C., Sesetyan, K., Vilanova, S. P., Adamia, S., Arroucau, P., Atanackov, J., Baize, S., Canora, C., Caputo, R., Carafa, M. M. C., Cushing, E. M., Custódio, S., Demircioglu Tumsa, M. B., Duarte, J. C., Ganas, A.,

García-Mayordomo, J., Gómez de la Peña, L., Gràcia, E., Jamšek Rupnik, P., Jomard, H., Kastelic, V., Maesano, F. E., Martín-Banda, R., Martínez-Loriente, S., Neres, M., Perea, H., Šket Motnikar, B., Tiberti, M. M., Tsereteli, N., Tsironi, V., Vallone, R., Vanneste, K., Zupančič, P., and Giardini, D.: The European Fault-Source Model 2020 (EFSM20): geologic input data for the European Seismic Hazard Model 2020, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*

Bommer J., Spence R., Erdik M., Tabuchi S., Aydinoglu N., Booth E., Re D., Peterken O., (2002), "Development of an earthquake loss model for Turkish catastrophe insurance", *Journal Seismological*, 6, 431–466.

Bozorgnia, Y., & Bertero, V. V. (2004). *Earthquake engineering: From engineering seismology to performance-based engineering*. CRC Press.

Brady A. G., Perez, V., *Seismic Engineering Data Report*, Open-File Report 78-941, U.S. Geological Survey, Menlo Park, California, Oct. 1978, 128 pages
California Institute of Technology (Caltech). (1971). *San Fernando Earthquake*.

Caputo, R., & Pavlides, S. (2013). *Greek Database of Seismogenic Sources (GreDaSS): A compilation of potential seismogenic sources ($M_w > 5.5$) in the Aegean Region*. University of Ferrara, Italy.

Celebi, M. (1999). "1999 Izmit (Kocaeli) Earthquake." *Earthquake Spectra*.

Chen, W. W., Shih, B. J., Chen, Y. C., Hung, J. H., and Hwang, H. H. (2002). Seismic response of natural gas and water pipelines in the Ji-Ji earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(9-12), 1209-1214.

Chenna Rajaram, Singh A., Mohan Kapil, Rastogi Bal, Ramancharla Pradeep, 2014/04/03, 24, 33, *Vulnerability Assessment of Buried Pipelines: A Case Study*, 3, *Journal of Frontiers in Geotechnical Engineering*

Comerio, M. C. (2014). "Resilient communities through stronger buildings." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.

Cornell, C. A., & Krawinkler, H. (2000). *Progress and Challenges in Seismic Performance Assessment*. PEER Center News.

Crowley H., Monelli D., Pagani M., Silva V., Weatherill G., (2015,), "OpenQuake Engine User Instruction Manual", *Global Earthquake Model (GEM) Technical Report 2015-05*, Technical Report No: Version 1.4.0, GEM

Danciu, L., & Giardini, D. (2015). *Global Seismic Hazard Assessment Program-GSHAP legacy*. *Annals of Geophysics*, 58.

Danciu L., Şeşetyan K., Demircioglu M., Gülen L., Zare M., Basili R., Elias A., Adamia S., Tsereteli N., Yalçın H., Utkucu M., Khan M., Sayab M., Hessami K., Rovida A., Stucchi M., Burg J., Karakhanian A., Babayan H., Giardini D., (2018),

"The 2014 Earthquake Model of the Middle East: seismogenic sources", Bulletin of Earthquake Engineering, 16(8), 3465–3496

Danciu L, Nandan S, Reyes C, Basili R, Weatherill G, Beauval C, Rovida A, Vilanova S, Sesetyan K, Bard PY, Cotton F, Wiemer S, Giardini D (2021) The 2020 update of the European Seismic Hazard Model: Model Overview. EFEHR Technical Report 001, v1.0.0.

Das, B. M., & Shukla, S. K. (2013). Earth Anchors. J. Ross Publishing.

Demircioğlu M., Sesetyan K., Durukal E., Erdik M., (2007), "Assessment of earthquake hazard in Turkey", In Proceedings of the 4th international conference on earthquake geotechnical engineering, 1427, Thessaloniki, Greece, June 2007.

Demircioğlu, M. B., Şeşetyan, K., Duman, T. Y., Çan, T., Tekin, S., & Ergintav, S. (2018). A probabilistic seismic hazard assessment for the Turkish territory: part II— fault source and background seismicity model. Bulletin of Earthquake Engineering, 16(8), 3399–3438.

Disaster and Emergency Management Authority (AFAD). (2023). Kahramanmaraş Earthquake. Retrieved from <https://www.afad.gov.tr>

Duman, T.Y., T. Çan ve Ö. Emre, 2011, 1/1.500.000 Türkiye Heyelan Envanteri Haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayınlar Serisi -27, Ankara, Türkiye. ISBN:978-605-4075-85.

Düzgün, M. (2001). 1999 İzmit Depremi Sonrası Altyapı Sistemlerinde Yapılan İyileştirmeler. Afet ve Deprem Araştırmaları Dergisi, 14(2), 45-60.

Eidinger, J., 1998. "Seismic fragility formulations for water systems." American Lifelines Alliance.

ELER v3.1 (2010) Earthquake loss estimation routine, technical manual and users guide. Bogazici University, Department of Earthquake Engineering, Istanbul.

Emre, O., et al. (2013). Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın detaylı haritalaması ve tektonik analizi.

Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Şaroğlu, F., Olgun, Ş., Elmacı, H., & Çan, T. (2018). Active fault database of Turkey. Bulletin of Earthquake Engineering, 16(8), 3229–3275.

Erdik, M. (2001). "Report on 1999 Kocaeli and Duzce (Turkey) Earthquakes." Structural Control and Health Monitoring.

Erdik, M. (2004). Report on 1999 Kocaeli and Düzce (Turkey) Earthquakes. Structural Control and Health Monitoring.

Erdik, M., & Durukal, E. (2008). "Deprem ve Tsunami Riskleri: Kocaeli Örneği". Deprem Araştırma Enstitüsü Yayınları.

Erdik M., Öner S., (1982), "A rational approach for the probabilistic assessment of the seismic risk associated with the North Anatolian Fault", In: Işıkara A., Vogel (eds) Multi-disciplinary approach to earthquake prediction, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 115.

Erdik M., Doyuran V., Akkas N., Gülkan P., (1985a), "A probabilistic assessment of the seismic hazard in Turkey", *Tectonophysics*, 117, 195–344.

Erdik M., Doyuran V., Akkas N., Gülkan P., (1985b), "A probabilistic assessment of the seismic hazard Turkey", *Tectonophysics*, 117, 295–344

Erdik M., Biro Y., Onur T., Şeşetyan K., Birgören G., (1999), "Assessment of earthquake hazard in Turkey and neighboring regions—GSHAP", *Ann Geofis*, 42(6), 1125–1138.

FEMA. (2004). NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures. Federal Emergency Management Agency.

FEMA. (2013). HAZUS-MH 2.1: Earthquake Model Technical Manual. Federal Emergency Management Agency.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (1994). Northridge Earthquake: Fact Sheet.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). Hazus Earthquake Model Technical Manual. 2020.

Funabashi, Y. (2012). "Fukushima in review: a complex disaster, a disastrous response." *Bulletin of the Atomic Scientists*. G&E Engineering Systems Inc., 2001. "Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems." American Society of Civil Engineers.

Gardner J., Knopoff L., (1974), "Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian?", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(5), 1363–1367.

Geological Society of America, The 1995 Hanshin-Awaji (Kobe) Japan Earthquake, *GSA Today*, 1995, JAPAN

Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook, R. K. Rowe (Ed.), Springer.

Giardini D (1999) The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP)—1992/1999. *Ann di Geofis* 42:957–974.

Gutenberg B., Richter C., (1944), "Frequency of earthquakes in California", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34(4), 185–188.

Grünthal, G. (1985): The up-dated earthquake catalogue for the German Democratic Republic and adjacent areas-Statistical data characteristics and conclusions for Hazard

assessment, Proc. 3rd International Symp. on the Analysis of Seismicity and Seismic Risk, Liblice Castle, Czechoslovakia, June 17-22, 19-25.

Grünthal, G. and GSHAP Region 3 Working Group (1999a) Seismic hazard assessment for central, north and northwest Europe: GSHAP Region 3. *Annali di Geofisica* 42(6), 999-1011.

Grünthal, G., Bosse, C., Sellami, S., Mayer-Rosa, D., Giardini, D. (1999b) Compilation of the GSHAP regional seismic hazard for Europe, Africa and the Middle East. *Annali di Geofisica* 42(6), 1215-1223.

Grünthal G and Wahlström R (2012) The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium. *Journal of Seismology*. 16: 535 – 570

Grünthal G, Wahlström R, Stromeyer D (2013) The SHARE European Earthquake Catalogue (SHEEC) for the time period 1900 – 2006 and its comparison to the European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC). *Journal of Seismology*. 17: 1339 – 1344.

Grünthal, G., Stromeyer, D., Bosse, C. (2018): The Source Model of the Probabilistic Seismic Hazard Assessment (PSHA) of Germany-Version 2016.

Gülkan P., Koçyiğit A., Yüçemen M., Doyuran V., Başöz N., (1993), "En son verilere göre hazırlanan Türkiye Haritası" Rapor No: METU/EERC 93-01, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi, Ankara, Türkiye.

Hall, J. F. (1994). Northridge earthquake of January 17, 1994: Reconnaissance report. Earthquake Engineering Research Institute.

Hamada, M., and Akioka, Y., 1997. Liquefaction induced ground strain and damage to buried pipes, *Proceedings of Japan Society of Civil Engineers Earthquake Engineering Symposium*, Vol. 1, pp. 1353–1356 (in Japanese).

Hansen, W.R., Eckel, E.B., Schaem, W.E., Lyle, R.E., George, W., and Chance, G. 1966, The Alaska Earthquake of March 27, 1964; field investigations and reconstruction effort: U.S. Geological Survey Professional Paper 541, 111 p.,

Holzer T., Barka A., Carver D., Çelebi M., Cranswick E., Dawson T., Dieterich J., Ellsworth W., Fumal T., Gross J., Langridge R., Lettis W., Meremonte M., Mueller 163 C., Olsen R., Özel O., Parsons T., Phan L., Rockwell T., Safak E., Stein R., Stenner

H., Toda S., Toprak S., (2000), "Implications for earthquake risk reduction in the United States from the Kocaeli, Turkey, Earthquake of August 17, 1999", U.S. Geological Survey Circular 1193, 64.

Honegger, D. G., & Eguchi, R. T. (1992). Seismic Hazards and Pipelines. American Society of Civil Engineers.

Honegger, D. G., & Nyman, D. J. (2004). Guidelines for the Seismic Design and Assessment of Natural Gas and Liquid Hydrocarbon Pipelines. Pipeline Research Council International (PRCI).

Hu, Y., et al. (2008). "Sichuan Earthquake: Impact on Telecommunication Systems." IEEE Communications Magazine.

Hu, Y., & Zhang, L. (2014). Geotechnical Earthquake Engineering. Springer.

INFP (2018) Data file of Romanian earthquakes. National Institute for Earth Physics, Bucharest, Romania

İhsanoğlu, E., et al. (2002). "Izmit (Kocaeli) Turkey Earthquake." US Geological Survey.

Isenberg, J., 1978. "Seismic response of buried pipelines." Earthquake Engineering Research Center.

Isenberg, J., 1979. "Effects of soil-structure interaction on buried pipelines during earthquakes." Earthquake Engineering Research Center.

Isenberg, J., ve Taylor, C.L., 1984. "Seismic behavior of buried pipelines in liquefied soils." Journal of Geotechnical Engineering.

İyisan, R., (1996), Zeminlerde Kayma Dalgası Hızı ile Penetrasyon Deney Sonuçları Arasındaki Bağlılıklar, İMO Teknik Dergi, Yazı 89, s.1187-1199

Japan Water Works Association (1995). "Kobe Earthquake Damage Report." Japan Waterworks Association, 1998, Seismic Damage Estimation Procedure for Water Pipes. (in Japanese)

Jeon, S. S., & O'Rourke, T. D. (2005). Northridge earthquake effects on pipelines and residential buildings. Bulletin of the Seismological Society of America, 95(1), 294-318.

Jose Renato M. S. Oliveira, MSc, DSc Khader I. Rammah, MSc, PhD Pablo C. Trejo, MSc, DSc Marcio S. S. Almeida, MSc, PhD, MICE Maria C. F. Almeida, MPhil, DSc, Modelling of a pipeline subjected to soil mass movements, <https://doi.org/10.1680/jphmg.15.00059>, November 29, 2017

Jimenez M., Giardini D., Grünthal G., Erdik M., Garcia-Fernandez M., Lapajne J., Makropoulos K., Musson R., Papaioannou C., Rebez A., Riad S., Sellami S., Shapira A., Slejko D., van Eck T., El Sayed A., (2001), "Unified seismic hazard modeling throughout the Mediterranean region", Bulletin di Geofisica Teorica ed Applicata, 42, 3-18.

Jiménez MJ, Giardini D, Grünthal G (eds.) (2003) European-Mediterranean Seismic Hazard Map, 1:5.000.000. European Seismological Commission.

Kadirioglu FT, Kartal RF, Kiliç T, et al. (2018) An improved earthquake catalogue ($M \geq 4.0$) for Turkey and its near vicinity (1900 – 2012). *Bulletin of Earthquake Engineering*. 16: 3317 – 3338

Kagan, Y.Y. (1993), Statistics of characteristic earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83 (1),7–24.

Kalafat D., (2000), "17 Ağustos 1999 Marmara ve 12 Kasım 1999 Düzce Depremleri Marmara Denizinin Genel Yapısı, Deprem ve İstanbul ", T.C. İstanbul Valiliği Yayını.

Kalafat D., (2003), "Marmara Depremi bir gerçek mi?", Ölçü Dergisi, TMMOB Yayın Organı.

Kalafat D., Tahaoğlu T., Işıkkara A., (2001), "9 Ağustos 1912 Saros-Marmara Depremi", Türkiye 14. Jeofizik Kurultayı ve Sergisi, Genişletilmiş Sunu Özetleri Kitabı (Extended Abstracts Book), s. 103-106, MTA Kültür Merkezi yayını.

Kalafat, D (2016). Statistical Evaluation of Turkish Earthquake Data (1900-2015): A Case study; *Eastern Anatolian Journal of Science*; Volume II, Issue I, p.14-36.

Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute. (1999). Izmit Earthquake. Karakaş, A., & Çoruk, Ö. (2011). Geology of the Kocaeli Region. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.

Karamanos, S. A., Keil, B., & Card, R. J. (2014). Seismic design of buried steel water pipelines. In *Pipelines 2014: From Underground to the Forefront of Innovation and Sustainability* (pp. 1005-1019).

Katayama, T., Kubo, K., and Sato, N. (1975). "Earthquake damage to water and gas distribution systems." *Proc. U.S. Nat. Conf. Earthquake Engineering, Earthquake Engrg. Res. Inst. (EERI), Oakland, Calif.*, 396-405.

Kazemi, F., & Moghadas, N. (2017). Seismic behavior of buried steel pipelines using simplified analytical approaches. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 97, 45-55.

Kelson, K. I., & Taylor, L. M. (2016). *Earthquake-Induced Ground Failures. Geotechnical and Geological Engineering*.

Ketin İ., (1948), "Über die tektonik-mechanischen Folgerungen aus den grossen Anatolischen Erdbeben des letzten Dezenniums", *Geologische Rundschau*, 36, 77-83.

Ketin İ., (1966), "Tectonic units of Anatolia", *Bulletin Mineral Research Exploration Institution Turkey*, 66, 23-24. 164

Ketin İ., (1968), Türkiye'nin genel tektonik durumu ile başlıca deprem bölgeleri arasındaki ilişkiler, M.T.A.

Kobayashi, K., & Takada, S. (2005). Seismic response of buried pipelines. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 127(2), 176-182.

KOERI. (2000). "17 Ağustos 1999 Depremi Raporu". Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Yayınları.

Kotha SR, Weatherill G, Bindi D, Cotton F (2020) A Regionally Adaptable Ground-Motion Model for Shallow Crustal Earthquakes in Europe *Bulletin of Earthquake Engineering* 18:4091–4125.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.

Leonard, M. (2010). Earthquake Fault Scaling: Self-Consistent Relating of Rupture Length, Width, Average Displacement, and Moment Release. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5A), 1971–1988.

Leonard, M. (2014). Self-Consistent Earthquake Fault-Scaling Relations: Update and Extension to Stable Continental Strike-Slip Faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(6), 2953–2965.

Manchuel K, Traversa P, Baumont D, et al. (2018) The French seismic CATalogue (FCAT-17). *Bulletin of Earthquake Engineering*. 16: 2227 – 2251.

Meletti, C., Galadini, F., Valensise, G., Stucchi, M., Basili, R., Barba, S., Vannucci, G., and Boschi, E.: (2008) A seismic source model for the seismic hazard assessment of the Italian territory, *Tectonophysics*, 450, 85–108.

Medvedev, S. V., Sponheuer, Wilhelm, and Karnik, V: ft, (1963), *Seismische Skala :3d World Conf. Earthquake Eng. Proc.*, 6 p.

Miles, S. B., & Takahashi, T. (2011). "Seismic risk and engineering decisions." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*.

Moser, A. P., & Folkman, S. L. (2008). *Buried Pipe Design*. McGraw-Hill Education.

Nandan, S., Kamer, Y., Ouillon, G., Hiemer, S., and Sornette, D. (2021): Global models for short-term earthquake forecasting and predictive skill assessment, *The European Physical Journal Special Topics*, 230, 425–449.

National Research Council. (2012). "Disaster Resilience: A National Imperative." The National Academies Press.

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED). (1995). *Kobe Earthquake*.

Nakata, T., & Goto, H. (2012). "The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake." *Bulletin of the Earthquake Research Institute*.

Newmark, N. M., 1967. Problems in Wave Propagation in Soil and Rocks, *Proceedings of the International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials*, University of New Mexico Press, 7–26.

Omote S., İpek M., (1959), "Türkiye'nin Sismisitesi", İTÜ Sismoloji Enstitüsü Yayını, 19.

Onur T., (1997), Earthquake hazard in Turkey based on spectral acceleration amplitudes, MSc Thesis.

O'Rourke, M., & Ayala, G. (1993). Pipeline damage due to wave propagation. Journal of Geotechnical Engineering, 119(9), 1490-1498.

O'Rourke, M., & Deyoe, E. (2004). Seismic damage to segmented buried pipe. Earthquake Spectra, 20(4), 1167-1183.

O'Rourke, M. (2009). Analytical fragility relation for buried segmented pipe. In TCLEE 2009: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment (pp. 1-10).

O'Rourke, M., Filipov, E., and Uçkan, E. (2015). Towards robust fragility relations for buried segmented pipe in ground strain areas. Earthquake Spectra, 31(3), 1839-1858.

O'Rourke, M. J., and Liu, X. (1999). Response of buried pipelines subject to earthquake effects (p. 260). New York: Mceer.

O'Rourke, T. D., 1995. "Geotechnical and lifeline earthquake engineering." Springer US.

O'Rourke, T. D., & Jeon, S. S. (1999). Factors affecting the earthquake damage of water distribution systems. In Optimizing Post-Earthquake Lifeline System Reliability (pp. 379-388). ASCE.

O'Rourke, T. D., & Liu, X. (2012). Seismic design and retrofit of pipelines. MCEER Monograph.

O'Rourke, T. D., & Liu, X. (2012). Seismic design of buried and offshore pipelines. MCEER Monograph Series.

Öcal, M. (2002). "Kocaeli'nin Deprem Tarihi". Kocaeli Üniversitesi Yayınları.

Örgün, M., et al. (2004). Kocaeli'nin jeolojik ve stratigrafik yapısının incelenmesi.

Özmen B., (2000), "17 Ağustos 1999 İzmit Körfezi Depremi'nin Hasar Durumu (Rakamsal Verilerle)", In Türkiye Deprem Vakfı Yayını, Ağustos 1999.

Özmen B., (2012), "Türkiye deprem bölgeleri haritalarının tarihsel gelişimi", Türkiye Jeoloji Bülteni, 55(1), 43–55.

Pagani M., Monelli D., Weatherill, G., Garcia J., (2014), "The OpenQuake-engine Book: Hazard", Global Earthquake Model (GEM) Seismological Research Letters, 67

Pamir H., (1948), "Dinamik Jeoloji", İstanbul University Publications, 2, 348- 404.

Pınar N., Lahn E., (1952), "Türkiye depremleri izahlı kataloğu", Bayındırlık Bakanlığı Yapı ve İmar İşleri Reisliği Yayını, 6, 36, 153.

Raul, Flores-Berrones., Xiangyue, Li, Liu. (2003). Seismic vulnerability of buried pipelines. *Geofisica Internacional*, 42(2):237-246.

Raveshi, M., Noorzad, R. Numerical Investigation of Liquefaction Resistance of Buried Pipelines with Sand-Tire Mixture Using Critical State Two-Surface Plasticity Model. *Geotech Geol Eng* 41, 2243–2262 (2023)

Reasenber P., (1985), "Second-order moment of central California seismicity, 1969–1982", *Journal of Geophysical Research: Solid Earthquake* 90(B7), 5479–5495.

Richter C., (1958), "Elementary seismology by C. F. Richter. 768 pp., 205 illus. W. H. Freeman and Company, San Francisco, and Bailey Bros. and Swinfen Ltd., London, 1958", *Geological Journal*, 2(2), 11–13.

Rovida A, Locati M, Camassi R, et al. (2020) The Italian earthquake catalogue CPTI15. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 18: 2953 – 2984.

Živčić M (2018) Data file “Earthquake Catalogue of Slovenia” of the Seismology and Geology Office. Environmental Agency of the Republic of Slovenia, Ljubljana, Slovenia

Rovida A., Antonucci A. (2021a). EPICA- European PreInstrumental Earthquake Catalogue, version 1.1. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)

Rovida A., Antonucci A. (2021b). EPICA- European PreInstrumental Earthquake Catalogue, version 1.1. Technical report Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), in preparation.

Saatcioglu Murat, Mitchell Denis, Tinawi René, Gardner N. (Noel), Gillies Anthony, Ghobarah Ahmed, Anderson Donald, Lau David, 2001/08/01, 715, 737, The August 17, 1999, Kocaeli (Turkey) earthquake - Damage to structures, 28, 10.1139/cjce-28-4-715, *Canadian Journal of Civil Engineering - CAN J CIVIL ENG*

Sano, Y., O'Rourke, T., and Hamada, M., 1999. GIS evaluation of Northridge earthquake ground deformation and water supply damage, *Proceedings of 5th U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering, TCLEE Monograph #16, ASCE*, pp. 832–839.

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of Soil Mechanics and Foundations*.

Sert,M.(2024) Vs30 Proxy Model For Kocaeli Region,Gebze Teknik Üniversitesi,Kocaeli.

Sieberg A., (1932), "Erdbebengeographie", Band IV, Lieferung 3. Verlag von Gebrüder Borntraeger, Berlin.

Silva, V., Crowley, H., Pagani, M. et al. (2014), Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment. *Nat Hazards* 72, 1409-1427

Sun, L., 2001. "Seismic response of buried pipeline systems." *Journal of Pipeline Systems*.

Stepp J., (1972), "Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effects on statistical estimates of earthquake hazard", *Proc. Microzonation Conferance*, 897- 909, Seattle, WA, 1972.

Şeşetyan K., Danciu L., Demircioğlu M., Giardini D., Erdik M., Akkar S., Gülen L., Zare M., Adamia S., Ansari A., Arakelian A., Gündoğan A., Avanessian M., Babayan H., Chelidze T., Durgaryan R., Elias A., Hamzehloo H., Hessami K., Kalafat D., Kale Ö., Karakhanian A., Khan A., Mamadli T., Al-Qaryouti M., Sayab M., Tsereteli N.,

Utkucu M., Yalçın H., Yılmaz M., (2018), "The 2014 seismic hazard model of the Middle East: overview and results", *Bulletin Earthquake Engineering*, 16, 3535-3566.

Şaroğlu F., Emre Ö., Kuşçu İ., (1992), "Türkiye Diri Fay Haritası", MTA Genel Müdürlüğü.

Takada, S., & Hashimoto, T. (1997). Dynamic response analysis of buried pipelines. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 119(2), 173-179.

Timur, N. (2002). Lithological Units of Kocaeli. *Proceedings of the 3rd Symposium on Geology of İstanbul*.

Tokimatsu, K., & Seed, H. B. (1987). Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking. *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(8), 861–878.

Towhata, I. (2008). *Geotechnical earthquake engineering*. Springer.

Turkish Earthquake Code-TBDY (2018). *Specification for Structures to be Built in Disaster Areas*, Ministry of Public Works and Settlement, Ankara, Turkey

Uhrhammer R., (1986), "Characteristics of northern and southern California seismicity", *Earthquake Notes*, 57, 21.

Ullah S., (2016), "Seismic hazard assessment in Central Asia: combining site effects investigations and probabilistic seismic hazard", *Doctoral Thesis, Seismic Hazard, Planen Bauen Umwelt der Technischen Universität Berlin*.

Ural, D. N. (1994). "Performance of Water Distribution Systems during the Northridge Earthquake." *ASCE Journal of Infrastructure Systems*.

Utkucu M., (2011), "Marmara Bölgesinde (KB Türkiye) Depremsellik ve Deprem Tehlikesi Üzerine Bir Tartışma, A Discussion on the Seismicity and Seismic Hazard of the Marmara Region (NW Turkey)", *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni*, 32(3), 187–212.

Utsu, T. 1999. Representation and analysis of the earthquake size distribution: a historical review and some new approaches. *Pure and Applied Geophysics*, 155, 509-535.

Vilanova, S. P., Nemser, E. S., Besana-Ostman, G. M., Bezzeghoud, M., Borges, J. F., Brum da Silveira, A., Cabral, J., Carvalho, J., Cunha, P. P., Dias, R. P., Madeira, J., Lopes, F. C., and Oliveira, C.: Incorporating Descriptive Metadata into Seismic Source Zone Models for Seismic-Hazard Assessment: A Case Study of the Azores-West Iberian Region, *B. Seismol. Soc. Am.*, 104, 1212-1229, <https://doi.org/10.1785/0120130210>, 2014.

Vilanova, S. P., Nemser, E. S., Besana-Ostman, G. M., Bezzeghoud, M., Borges, J. F., Brum da Silveira, A., Cabral, J., Carvalho, J., Cunha, P. P., Dias, R. P., Madeira, J., Lopes, F. C., and Oliveira, C. (2014): Incorporating Descriptive Metadata into Seismic Source Zone Models for Seismic-Hazard Assessment: A Case Study of the Azores-West Iberian Region, *B. Seismol. Soc. Am.*, 104, 1212–1229.

Wang, L. R. L., & Wang, S. T. (1997). *Seismic analysis and design of buried pipelines*. ASCE Press.

Wang, L. R. L., 1990. "Seismic design of buried pipelines." *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice*.

Web1,(2024)<https://usgs.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=8ac19bc334f747e486550f32837578e1/> (Erişim Tarihi: 01/01/2024)

Web 2, (2024) <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/events/1906calif/18april/>, (Erişim Tarihi: 14/01/2024)

Web 3, (2023) <https://ngawest2.berkeley.edu/> (Erişim Tarihi : 29/12/2023).

Web 4,(2023), <https://github.com/gem/oq-engine/#openquake-engine> (Erişim Tarihi: 07/12/2023).

Web 5, (2023), <https://www.globalquakemodel.org/openquake/> (Erişim Tarihi: 07/12/2023)

Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the seismological Society of America*, 84(4), 974-1002.

Woessner J., Laurentiu D., Giardini D., Crowley H., Cotton F., Grünthal G., Valensise, G., Arvidsson R., Basili R., Demircioglu M., Hiemer S., Meletti C., Musson R., Rovida A., Sesetyan K., Stucchi M., (2015), "The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(12), 3553–3596.

World Nuclear Association. (2011). Fukushima Accident.

Yarar R., Ergünay O., Erdik M., Gülkan P., (1980), "A preliminary probabilistic assessment of the seismic hazard in Turkey", *Proc Seventh World Conference Earthquake Eng*, 1:309–316, Istanbul, Turkey, September 1980.

Yılmaz, A., & Kılınç, Y. (2003). Kocaeli Bölgesindeki Altyapı Sistemlerinin Deprem Performansı. İnşaat Mühendisliği Dergisi, 7(1), 12-23.

Youssef, M. A., & Ghobarah, A. (2001). Seismic performance of steel pipelines. Engineering Structures, 23(8), 1209-1219.

Yousife, D. F., Aldefae, A. H., Zubaidi, S. L., Humaish, W. H., and Sinichenko, E. K., "Static and Seismic Performance of Buried Pipelines: A review", in E3S Web of Conferences, 2021, vol. 318.

Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(4), 297–313.

Yüçemen M., (2011), "Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi: Genel Bakış ve İstatiksel Modellemede Dikkat Edilmesi Gerekli Hususlar", 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 1–20, Ankara, Türkiye, 11-14 Ekim 2011.

Zaliapin, I., A. Gabrielov, V. Keilis-Borok, and H. Wong (2008), Clustering Analysis of Seismicity and Aftershock Identification, Phys. Rev. Lett., 101(1), 1–4. 6, 22, 23

Zare M., Amini H., Yazdi P., Sesetyan K., Demircioglu M., Kalafat D., Erdik M., Giardini D., Khan M., Tsereteli N. (2014), "Recent developments of the Middle East catalog", Journal of Seismology, 18(4), 749–772.

Zhang, M. H., Sharif, M. S. H., & Lu, G. (2007). Impact resistance of high-strength fibre-reinforced concrete. Magazine of Concrete Research, 59(3), 199–210. <https://doi.org/10.1680/macr.2007.59.3.199>

Zhang, M. H., Sharif, M. S. H., & Lu, G., 2007. "Impact resistance of high-strength fibre-reinforced concrete." Magazine of Concrete Research, 59(3), 199–210. <https://doi.org/10.1680/macr.2007.59.3.199>.

Živčić M (2018) Data file “Earthquake Catalogue of Slovenia” of the Seismology and Geology Office. Environmental Agency of the Republic of Slovenia, Ljubljana, Slovenia.

Zulfikar, C., Erdik, M., Safak, E., Biyikoglu, H., & Kariptas, C. (2016). Istanbul natural gas network rapid response and risk mitigation system. Bulletin of Earthquake Engineering, 14, 2565-2578.

ÖZGEÇMİŞ

Derya ŞİMŞEK,2021 yılında Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesi ile mezun olmuştur.2021 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Deprem ve Yapı Mühendisliği Programı'nda yüksek lisans eğitime başlamıştır. Beşiktaş Belediyesi'nde halen inşaat mühendisi olarak görev yapmaktadır.



TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR

Şimşek D., ZÜLFİKAR A.C., İLHAN O. (2024), “Kentsel Ölçekte Gömülü Boru Hatlarının Ve Bileşenlerinin Deprem Tehlikesinin Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) İle Değerlendirilmesi: Kocaeli Örneği”, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünün düzenlediği 8. Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu, Gebze, Kocaeli, Türkiye, 30-31 Mayıs.





