

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

**İÇME SUYU BORU HASARLARININ DETAYLI
İNCELENMESİ: CHRISTCHURCH DEPREMİ ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMET CEYLAN

DENİZLİ, TEMMUZ - 2020

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



**İÇME SUYU BORU HASARLARININ DETAYLI
İNCELENMESİ: CHRISTCHURCH DEPREMİ ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMET CEYLAN

DENİZLİ, TEMMUZ - 2020

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Koordinasyon Birimi tarafından 2019FBE013 nolu proje ile desteklenmiştir.**

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

MUHAMMET CEYLAN



ÖZET

**İÇME SUYU BORU HASARLARININ DETAYLI İNCELENMESİ:
CHRISTCHURCH DEPREMİ ÖRNEĞİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MUHAMMET CEYLAN
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI:DR. ÖĞR. Ü. ENGİN NACAROĞLU)
DENİZLİ, HAZİRAN-2020**

İnsan popülasyonunun son yüzyıllarda artmasıyla birlikte yol, köprü, kanal ve boru sistemleri gibi mühendislik yapılarına ihtiyaç artmıştır. Özellikle gelişmiş ülkelerde altyapı yoğunluğunun artmış olması ve bu altyapı maliyetleri düşünüldüğünde, altyapı sistemlerinin her türlü doğal olaya karşı hazırlıklı olması gerekmektedir. Canterbury deprem dizisinin en büyük depremlerinden biri olan $M_w6,2$ büyüklüğündeki 22 Şubat 2011 Christchurch depremi Christchurch'te bulunan içme suyu boru hattı sistemi üzerinde ciddi hasarlara yol açmıştır. Deprem sonrası oluşan boru hasarları altyapı sistemlerinin önemini bir kez daha ortaya koymuştur. Bölgede oluşan boru hasarlarının çok büyük bir kısmı deprem sebebiyle yoğun bir şekilde gözlenen sıvılaşma ve farklı oturmalarından kaynaklanmaktadır.

Tez kapsamında 22 Şubat 2011 Christchurch depremi sebebiyle içme suyu boru hatları üzerinde bölgesel analizler ve belirli hasar noktaları için kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Christchurch depremi sonrası bölgede geniş çaplı sıvılaşmalar gözlenmiştir. Uzaktan algılama sistemlerinden olan LiDAR ile deprem öncesi ve sonrası yapılan ölçümler yardımıyla sıvılaşma bölgesinde zeminin yanal yer hareketleri hesaplanarak yatay şekil değiştirmeler elde edilmiştir. Elde edilen yatay şekil değiştirmeler ile bölgede içme suyu boru hattını oluşturan AC, CI ve PVC boru tipleri için hasar ilişkileri ortaya konmuştur. Böylelikle sıvılaşma etkisine maruz kalan boru tiplerinin yanal yayılma etkisi altında davranış farklılıkları incelenmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında nümerik analiz yöntemlerinden olan sonlu elemanlar yöntemi ile AC, CI ve PVC boru tipleri üzerinde vaka analizleri yapılmıştır. Christchurch depreminin her bir boru tipi üzerinde neden olduğu sismik aktivitenin borular üzerinde oluşturduğu yer değiştirmeler ve kuvvetler incelenmiştir. Yapılan çalışmalar ile boru tipleri üzerinde hem bölgesel hem de belirli hasar noktalarındaki deprem etkileri boru tipine bağlı olarak ayrıntılı şekilde incelenmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Hasar ilişkileri, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Christchurch, Deprem

ABSTRACT

ASSESSMENT OF DRINKING WATER PIPELINE DAMAGES: EXAMPLE OF CHRISTCHURCH EARTHQUAKE

MSC THESIS

MUHAMMET CEYLAN

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

CIVIL ENGINEERING

(SUPERVISOR:ASISST. PROF. DR. ENGİN NACAROĞLU)

DENİZLİ, JUNE 2020

With the increasing in population in recent centuries, the need for engineering structures such as road systems, bridges, canals and pipes has increased. Especially in developed countries, infrastructure density must be increased and infrastructure systems prepared for all types of natural phenomena. One of the biggest earthquakes in the Canterbury earthquake series, the magnitude 6.2, 22 February 2011 Christchurch earthquake caused serious damage to the drinking water pipeline system in Christchurch. Pipe damages after the earthquake once again revealed the importance of infrastructure systems. Most of the pipe damage in the area is caused by liquefaction and different settlements, which are observed intensively due to the earthquake.

In this thesis, extensive regional and local studies were conducted on damage to drinking water pipelines resulting from the Christchurch earthquake on February 22, 2011. Extensive liquefaction was observed in the area after the Christchurch earthquake. With the help of LiDAR, which is one of the remote sensing systems, before and after the earthquake horizontal ground movements of the ground were calculated in the liquefaction zone and lateral ground strain were obtained. Damage relationships were determined for the types of AC, CI and PVC pipes that make up the drinking water pipeline in the area with the obtained lateral ground strain. Thus, behavioral differences under the effect of lateral spreading of pipe types exposed to liquefaction were investigated. Moreover, in this study, case analyzes were performed on AC, CI and PVC pipe types by finite element method, which is one of the numerical analysis methods. The deformations and forces caused by the seismic activity caused by the Christchurch earthquake were examined on each type of pipe. With this conducted study, the earthquake effects on the pipe types at both regional and specific damage points were examined in detail depending on the pipe type.

KEYWORDS: Damage relationships, Finite Element Method, Christchurch, Earthquake

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
TABLO LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR	3
3. CHRISTCHURCH İÇME SUYU BORU HATTI SİSTEMİ VE NZGD	12
3.1 İçme Suyu Boru Hattı ve Hasarı Veri Tabanı	14
3.2 Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanı.....	19
4. HASAR İLİŞKİLERİ.....	22
4.1 LiDAR 4m Uzaktan Algılama Sistemi ve Yüzey deplasmanları	22
4.2 Yatay Asal Şekil Değişiklikleri ve Eksenel Şekil Değişiklikleri	25
4.3 LiDAR 4m Uzaktan Algılama Yöntemi Kullanılarak Hesaplanan Yatay Yer Hareketi Hasar İlişkileri.....	28
5. Plaxis 2D ile Gömülü Boru Hatlarında Sismik Vaka Analizleri.....	34
5.1 Plaxis 2D Programının ve Sonlu Elemanlar Yönteminin Tanıtılması	34
5.1.1 AC Tipi Boru Sismik Vaka Analizi	40
5.1.1.1 Zemin Parametreleri.....	41
5.1.1.2 AC Boru Elemanı Parametreleri	44
5.1.1.3 Deprem Veri Seti.....	47
5.1.1.4 AC Vaka Analizi Sonuçları.....	48
5.1.2 CI Tipi Boru Sismik Vaka Analizi	52
5.1.2.1 Zemin Parametreleri.....	53
5.1.2.2 CI Boru Elemanı Parametreleri.....	55
5.1.2.3 Deprem Veri Seti.....	57
5.1.2.4 CI Vaka Analizi Sonuçları	58
5.1.3 PVC Tipi Boru Sismik Vaka Analizi.....	62
5.1.3.1 Zemin Parametreleri.....	63
5.1.3.2 PVC Boru Elemanı Parametreleri	65
5.1.3.3 Deprem Veri Seti.....	67
5.1.3.4 PVC Vaka Analizi Sonuçları	69
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	73
7. KAYNAKLAR.....	76
8. ÖZGEÇMİŞ	86

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Yanal yayılımın karakteristik davranışı (O'Rourke ve Liu 1999)	5
Şekil 2.2: a) Eksenel, b) Enine KYD etkisi ve c) KYD'nin şematik gösterimi (IITK-GSDMA 2007).	6
Şekil 3.1: Canterbury Deprem Dizisinin 11 Nisan 2014'e kadar gerçekleşen sismik aktiviteleri (GNS 2014)	12
Şekil 3.2: PVC tipi boruda basınç etkisi ile eklem bölgesi hareketi (O'Callaghan 2014).....	14
Şekil 3.3: Eksenel olarak bozulmuş ancak çalışır durumdaki PVC tipi boru (O'Callaghan 2014).....	14
Şekil 3.4: Boru hattı sistemi ve boru hasarları.....	15
Şekil 3.5: Christchurch boru hatları, farklı tipteki boru hasarları, sıvılaşma ve LiDAR ölçüm bölgesi	17
Şekil 3.6: Christchurch depreminin neden olduğu PVC boru hasarı (O'Callaghan 2014).....	18
Şekil 3.7: Christchurch Depremi etkisi altında AC tipi boruda meydana gelen çekme (sol) ve basınç (sağ) etkisi (O'Callaghan 2014)	18
Şekil 3.8: Dökme demir (CI) boru kırılma hasarı (Black, 2013).....	18
Şekil 3.9: NZGD Ana sayfa.....	20
Şekil 3.10: Örnek coğrafi konuma bağlı araştırma dosyaları sayıları	21
Şekil 3.11: NZGD örnek bir çalışma bölgesi	21
Şekil 4.1: LiDAR 4m ölçüm bölgesi	23
Şekil 4.2: LiDAR 4m bölgeleri, boru hattı, boru hasarı ve sıvılaşma bölgesi..	24
Şekil 4.3: Yüzey deplasmanları ile yatay şekil değiştirmelerin ve yatay asal şekil değiştirmelerin hesaplanma aşamaları	25
Şekil 4.4: Boru doğrultusuna göre yatay şekil değiştirmelerin şeması.....	26
Şekil 4.5: Boru doğrultusu açısı (α) dağılımı	27
Şekil 4.6: Yatay şekil değiştirmeleri için mohr çemberi	27
Şekil 4.7: Boru doğrultuları ile yatay asal düzlem arasındaki açı dağılımı	28
Şekil 4.8: Hasar ilişkileri hesabı akış diyagramı (Nacaroglu 2017)	30
Şekil 4.9: AC tipi boru için hesaplanan hasar ilişkileri	31
Şekil 4.10: CI tipi boru için hesaplanan hasar ilişkileri.....	31
Şekil 4.11: PVC tipi boru için hesaplanan hasar ilişkileri	32
Şekil 4.12: AC, CI ve PVC boru tipleri için hesaplanan hasar ilişkileri	33
Şekil 5.1: Üç eksenli basınç deneyi ile <i>E50ref</i> ve <i>Eurref</i> hesabı	37
Şekil 5.2: Free field sınır şartı.....	38
Şekil 5.3: Plaxis 2D plate eleman malzeme parametreleri giriş ekranı	39
Şekil 5.4: AC vaka analizi için kullanılan CPT verisi	43
Şekil 5.5: AC boru hasarı analizi için oluşturulan model kesiti	46
Şekil 5.6: AC boru hasarı analizi için oluşturulan sonlu elemanlar ağı.....	46
Şekil 5.7: Deepsoil ile AC boru hasarı için model derinliğinde elde edilen ivme-zaman kaydı	47
Şekil 5.8: AC tipi boru analizinde boru yer değiştirmesi	48
Şekil 5.9: AC tipi boru a)yatay, b)düşey ve c) toplam yer değiştirmeler	49
Şekil 5.10: Düşeyde AC boru merkezini kesen A-A eksenli zemin deformasyonu	50

Şekil 5.11: AC boru üzerinde seçilen noktalar	50
Şekil 5.12: Plate eleman üzerinde oluşan pozitif yönde normal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti (Plaxis material models manual 2018).....	51
Şekil 5.13: Boru üzerinde oluşan kuvvetlerin şematik gösterimi	51
Şekil 5.14: CI vaka analizi için kullanılan CPT verisi.....	54
Şekil 5.15: CI boru hasarı analizi için oluşturulan model kesiti.....	56
Şekil 5.16: CI boru hasarı analizi için oluşturulan sonlu elemanlar ağı	56
Şekil 5.17: SHLC yer hareketi ölçüm istasyonu zemin profili CPT verileri (Wotherspoon ve diğ. 2014).....	57
Şekil 5.18: Deepsoil ile CI boru hasarı analizi için model derinliğinde elde edilen ivme-zaman kaydı	58
Şekil 5.19: CI tipi boru analizi boru yer değiştirmesi.....	59
Şekil 5.20: CI tipi boru a) yatay, b) düşey ve c) toplam yer değiştirmeler.....	60
Şekil 5.21: Düşeyde CI boru merkezini kesen A-A eksenli zemin deformasyonu	61
Şekil 5.22: CI boru üzerinde seçilen nokta isimleri.....	61
Şekil 5.23: PVC vaka analizi için kullanılan CPT verisi.....	64
Şekil 5.24: PVC boru hasarı analizi için oluşturulan model kesiti	66
Şekil 5.25: PVC sismik analizi için sonlu elemanlar ağı.....	66
Şekil 5.26: CCCC yer hareketi ölçüm istasyonu zemin profili CPT veri (Wotherspoon ve diğ. 2014).....	67
Şekil 5.27: Deepsoil’de oluşturulan zemin profili giriş ekranı	68
Şekil 5.28: Deepsoil ile PVC boru analizi için model derinliğinde elde edilen ivme-zaman kaydı	68
Şekil 5.29: Plaxis ve CCCC istasyonu bileşke ivme karşılaştırması	69
Şekil 5.30: PVC tipi boru analizi boru yer değiştirmesi	69
Şekil 5.31: PVC tipi boru a) yatay, b) düşey ve c) toplam yer değiştirme	70
Şekil 5.32: PVC tipi boru analizinde A-A eksenli boyunca zemin deformasyonu	71
Şekil 5.33: PVC boru üzerinde seçilen nokta isimleri.....	71

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: 22 Şubat 2011 Christchurch depreminin bazı istasyonlarda ölçülen sismik aktivitesi	13
Tablo 3.2: Çalışma bölgesinde yer alan AC, CI ve PVC boru tipleri için boru uzunlukları ve hasar sayıları.....	16
Tablo 3.3: Boru tipi ve boru çapına bağlı hasar sayıları (Bouziou ve diğ. 2019).....	19
Tablo 4.1: Farklı şekil değiştirmeler için eleme kriterinde kullanılan güvenli aralıklar.....	29
Tablo 5.1: AC hasarı analizi için seçilen hasar, sondaj ve istasyon bilgileri ...	41
Tablo 5.2: Brinkgreve (2010) tarafından kumlu zeminler için önerilen bazı eşitlikler.....	44
Tablo 5.3: AC tipi boru sismik analizi için oluşturulan zemin modeli parametreleri	44
Tablo 5.4: AC boru elemanı parametreleri (Stephens ve diğ. 2005).....	45
Tablo 5.5: AC boru üzerinde seçilen noktalar için normal, kesme ve eğilme momentleri	52
Tablo 5.6: CI hasarı analizi için seçilen hasar, sondaj ve istasyon bilgileri.....	52
Tablo 5.7: CI tipi boru hasarı sismik analizi için oluşturulan idealize zemin modeli parametreleri	55
Tablo 5.8: CI boru parametreleri (Rajani ve Tesfamariam, 2007).....	55
Tablo 5.9: CI boru üzerinde seçilen noktalar için normal, kesme ve eğilme momentleri	62
Tablo 5.10: PVC hasar analizi için seçilen hasar, sondaj ve yer hareketi ölçüm istasyonu bilgileri	63
Tablo 5.11: PVC tipi boru hasarı sismik analizi için oluşturulan zemin modeli ve parametreleri	65
Tablo 5.12: PVC boru elemanı parametreleri (Larock ve diğ., 2000)	65
Tablo 5.13: PVC boru üzerinde seçilen noktalar için normal, kesme ve eğilme momentleri.....	72

SEMBOL LİSTESİ

M_w	:	Moment Magnitüdü
q_c	:	Koni Uç Direnci
f_s	:	Sürtünme Direnci
D_r	:	Rölatif Sıkılık
ϵ_x	:	Doğu-Batı Yönündeki Şekil Değişirme
ϵ_y	:	Kuzey-Güney Yönündeki Şekil Değişirme
ϵ_ξ	:	Boru Doğrultusunda Eksenel Şekil Değişirme
ϵ_η	:	Boruya Dik Doğrultudaki Şekil Değişirme
$\epsilon_{1,2}$:	Asal Şekil Değişirmeler
ϵ_{HP}	:	En Büyük Mutlak Asal Şekil Değişirme
u	:	Doğu-Batı Yönündeki Yer Değişirme
v	:	Kuzey-Güney Yönündeki Yer Değişirme
z	:	Derinlik
x	:	Eleme Kriteri
α	:	Boru Doğrultu Açısı
Θ	:	Boru ile Asal Şekil Değişirme Düzlemi Açısı
G_0^{ref}	:	Referans Kayma Modülü
$\gamma_{0.7}$:	Kayma Şekil Değişirme Seviyesi
ϕ'	:	İçsel Sürtünme Açısı
ψ	:	Genleşme Açısı
c'	:	Efektif Kohezyon
ν	:	Poisson Oranı
γ	:	Birim Hacim Ağırlık
E_{50}^{ref}	:	Sekant Rijitliği
E_{oed}^{ref}	:	Tanjant Rijitliği
E_{ur}^{ref}	:	Yükleme-Boşaltma Rijitliği
m	:	Malzeme Katsayısı
K_0^{nc}	:	Sükunet Durumunda Toprak Basıncı Katsayısı
C	:	Sönümlenme Matrisi
M	:	Kütle Matrisi
K	:	Rijitlik Matrisi
H	:	Tabaka Kalınlığı
V_s	:	Kayma Dalgası Hızı
EA	:	Normal Rijitlik
EI	:	Eğilme Rijitliği
d	:	Kalınlık
w	:	Birim Ağırlık
R_{int}	:	Arayüzey Katsayısı
α	:	Rayleigh Sönümlenme Parametresi
β	:	Rayleigh Sönümlenme Parametresi
N	:	Normal kuvvet
Q	:	Kesme kuvveti
M	:	Eğilme momenti
t	:	Boru et kalınlığı
σ_y	:	Çekme Akma Dayanımı

KISALTMA LİSTESİ

AC	: Asbestli Çimento
AI	: Arias Şiddeti
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
CCC	: Christchurch Şehir Komisyonu
CES	: Canterbury Deprem Dizisi
CGD	: Canterbury Geoteknik Veri Tabanı
CI	: Dökme Demir
CPT	: Konik Penetrasyon Deneyi
DB	: Doğu-Batı
GNS	: Jeolojik ve Nükleer Bilimler Enstitüsü
GYD	: Geçici Yer Deformasyonu
HS	: Hardening Soil
HS SS	: Hardening Soil Small Strain
KG	: Kuzey-Güney
KYD	: Kalıcı Yer Deformasyonu
LADWP	: Los Angeles Su ve Elektrik İdaresi
LiDAR	: Light Detection and Ranging (Lazer Görüntüleme Algılama ve Sınırlama)
LPI	: Sıvılaşma potansiyeli indeksi
LSN	: Sıvılaşma şiddeti katsayısı
MMI	: Mercalli İndeksi
NZAM	: Yeni Zelanda Hava Haritacılığı
NZGD	: Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanı
PGA	: En Büyük Yer İvmesi
PGD	: En Büyük Yer Deformasyonu
PGV	: En Büyük Yatay Yer Hızı
PVC	: Polivinil Klorür
RR	: Onarım Oranı
SA	: Spektral İvme
SCIRT	: Daha Güçlü Christchurch Altyapı İnşa Takımı
SCPT	: Sismik Konik Penetrasyon Deneyi
SI	: Spektrum Şiddedi
SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi

ÖNSÖZ

Hayatım boyunca bana yol gösteren ve çalışmalarım için desteklerini hiç esirgemeyen başta annem Saliha CEYLAN olmak üzere aileme çok teşekkür ederim. Lisanüstü hayatımda her konuda yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Engin NACAROĞLU ve Prof. Dr. Selçuk TOPRAK'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarımda tavsiyelerine başvurduğum Dr. Öğr. Üyesi Hadi KHANBABAZADEH'a katkılarından dolayı teşekkür ederim. Ayrıca jüri üyesi Doç. Dr. Devrim Alkaya'ya değerli katkıları için teşekkür ederim.

Lisansın ilk senesinden bu yana yanımda olan arkadaşım Gizem DÜNDAR ve Cafer DEĞİRMENCİ'ye ve ayrıca çalışmalarım boyunca her türlü desteği sağlayan iş arkadaşlarım Türkan ÇİMENCİ ve Gülcan ÇİMENCİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

İnsan popülasyonunun son yüzyıllarda artmasıyla birlikte yol, köprü, kanal ve boru sistemleri gibi mühendislik yapılarına ihtiyaç artmıştır. Oluşan bu ihtiyacı karşılayabilmek toplumların ticari ve sosyal ihtiyaçlarını karşılayabilmesi açısından hayati öneme sahiptir. Tarih boyunca mühendislik yapılarının inşa edilmesinde birçok faktör göz önüne alınmaktadır. Bunların başında mühendislik yapılarının toplumlar için oluşan ihtiyaca hizmet etmesi, oluşacak inşa maliyeti ve bu yapıların uzun yıllar boyunca hizmet edebilmesi için güvenli şekilde inşa edilmesi gelmektedir. İnsanlık tarihi boyunca mühendislik yapılarının deprem, yangın, sel gibi doğal afetlerden etkilenmesi toplum hayatı üzerinde ciddi etkiler oluşturmuştur. Özellikle altyapı sistemlerinde meydana gelen hasarlar insan hayatını önemli derecede etkilemektedir. Doğal afetler nedeniyle meydana gelen altyapı sistemi arızaları afet sonrası toplum hayatının normale dönmesini ve afet sonrası acil müdahaleyi geciktirmektedir. Bu nedenle gömülü boru hattı sistemleri gibi hayati öneme sahip yapıların çalışmaya devam edebilmesi için deprem gibi dünyanın bir gerçeği olan doğal olaya karşı güvenli şekilde tasarlanması gerekmektedir. 19. Yüzyıldan bu yana geçmiş depremler nedeniyle meydana gelmiş birçok boru hattı hasarı rapor edilmiştir.

Tez kapsamında altyapı sistemlerinin güvenli şekilde inşa edilmesinin ve afet durumlarında servis hizmetinin devam etmesinin önemi dikkate alınarak Christchurch içme suyu boru hattı sisteminin büyük çoğunluğunu oluşturan AC, CI ve PVC boru tipleri üzerinde çalışmalar yapılacaktır. 22 Şubat 2011 Christchurch depremi sebebiyle Christchurch şehrinde geniş çaplı sınırlanmalar gözlenmiştir. Bölgede büyük çoğunluğunun sınırlanma etkisiyle meydana geldiği yatay yüzey hareketleri uzaktan algılama sistemlerinden olan LiDAR 4m ölçümleri ile elde edilmiştir. Yatay yüzey deplasmanlarından çeşitli korelasyonlar yardımıyla yatay şekil değiştirmeler elde edilmiştir. Çalışma kapsamında AC, CI ve PVC boru tipleri için onarım oranı (RR) ile yatay şekil değiştirmeler arasında hasar ilişkileri ortaya konmuştur. Yatay şekil değiştirmeler her bir boru tipi için aksel (boru doğrultusu)

şekil değil değiştirme ve yatay maksimum asal şekil değiştirmeler açısından ele alınarak boru oryantasyonu ile alakalı değerlendirmelere yer verilmiştir.

Ayrıca alışma kapsamında sismik etkiler altında meydana gelen yatay şekil değiştirmeler ile içme suyu iletim hattı boru hasarları arasında geliştirilen hasar ilişkilerinin yanında nümerik analiz yöntemlerinden biri olan sonlu elemanlar yöntemi ile dinamik vaka analizleri gerçekleştirilmiştir. Christchurch şehrinde yer alan AC, CI ve PVC boru hatları üzerinde $M_w6,2$ Christchurch depreminin neden olduğu hasar noktaları için sonlu elemanlar kodunu kullanan Plaxis 2D programı ile dinamik vaka analizleri gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜR

Depremler tarih boyunca altyapı sistemleri üzerinde ciddi hasarlar oluşmasına sebep olmuştur. Ülkelerin gelişmişlik durumuna göre altyapı sistemi yoğunluğu değişiklik göstermektedir. Altyapı sistemleri için yapılan yatırımların yüksek maliyeti ve çeşitli afetler sonucu altyapı sistemlerinin servis hizmetlerine devam edebilmesinin hayati öneme sahip olması altyapı sistemlerinin güvenli dizaynını zorunlu hale getirmektedir. 19. Yüzyıldan bu yana geçmiş depremler nedeniyle meydana gelmiş birçok boru hattı hasarı rapor edilmiştir. Bu hasar oluşturan depremlerden başlıcaları San Francisco (1906), California (1933), Niigata (1964), Mexico (1985), Loma Prieta (1989), Northridge (1994), Kobe (1995) depremleri ve 22 Şubat 2011 Christchurch depremidir.

22 Şubat 2011 tarihinde Christchurch şehir merkezinin 10 km güneydoğusunda doğrudan atımlı fay kırılması nedeniyle $M_w6,2$ büyüklüğünde Christchurch depremi meydana gelmiştir. Depremi odak noktasının sığ derinliği ve Christchurch şehir merkezine yakınlığı nedeniyle Canterbury bölgesine yerleştirilen 33 kayıt istasyonu tarafından yüksek yer hareketleri kaydedilmiştir (Bertelli ve diğ. 2019). Deprem sonrası bölgede gözlemlenen önemli kum kaynaması, yanal hareketler ve oturmalar da dâhil olmak üzere sıvılaşma belirtileri dünya çapında bildirilen en geniş ve ciddi olanlardan biridir (Taylor 2015). Sıvılaşma Christchurch için iyi bilinen bir tehlikedir ve tarihsel olarak Christchurch depreminden önce 2010 Darfield depremi sırasında daha az yoğunlukta da olsa çeşitli noktalarda sıvılaşmalar gözlenmiştir. 1869'da Avon ve Heatchcate nehirlerinin kıyılarında, 1901 yılındaki Cheviat depremi sırasında Kaipai kıyı bölgelerinde ve 1922 yılında Motunau depremlerinde de benzer durumlar gözlenmiştir (Brackley 2012).

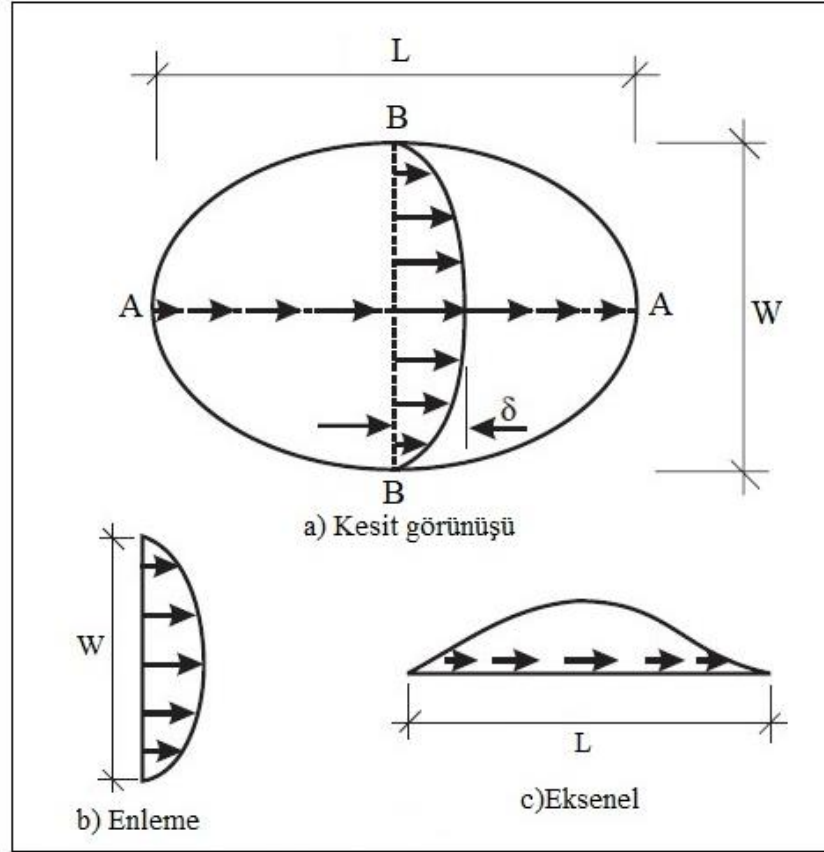
Sıvılaşmanın özellikle belirli lokasyonlarda meydana gelmesinden dolayı sıvılaşma ile ilişkili kalıcı yer değiştirme deformasyonları altyapı sistemleri için önem arz etmektedir. Hamada ve çalışma arkadaşlarının (Hamada ve diğ. 1986, Hamada ve O'Rourke 1992) deprem öncesi ve deprem sonrası hava fotoğrafları ile oluşturulan yatay ve düşey deplasmanların yer deformasyonları analizinde kullanılması literatürde bu konuda başarılı çalışmalar arasında gösterilmektedir.

Ayrıca Hamada ve diğ. (1986) 1964 Niigata 1983 Nihankai-Chuba depremlerinde gözlemlenen kırılmaları göz önüne alarak sıvılaşmaya bağlı yanal yayılmaların neden olduğu yatay yer hareketini tahmin etmek için ampirik bir eşitlik önermiştir. Tez kapsamında kullanılan boru, hasar, geoteknik veri tabanı ve sıvılaşma haritası veri seti ile alakalı bilgilere 3. Bölümde ayrıntılı olarak yer verilmiştir.

Sismik etkiler altında boru hasarları oluşumu literatürde kalıcı yer deformasyonu (KYD), geçici yer deformasyonu (GYD) ve ikincil hasar oluşumu olarak üç ana başlıkta değerlendirilmektedir. Kalıcı yer deformasyonlar fay hareketi, heyelan ve sıvılaşma etkisi gibi deprem sonrası gerişi dönüşü olmayan yer değiştirmelerdir (Toprak ve Yoshizaki 2003). Geçici yer deformasyonu ise deprem dalgası yayılımı sırasında zeminin dinamik tepkisidir ve boru hattı sistemlerinin büyük bir kısmında etkili olur. KYD genellikle boru hattı sistemlerinde belirli lokasyonlarda etkili olmasına rağmen boruda hasar oluşturma potansiyeli çok yüksektir. Dolayısıyla sismik dalga yayılımı sonucu oluşan boru hattı hasarları KYD dolayısıyla oluşan boru hattı hasarlarından daha az meydana gelmektedir (Nair ve diğ. 2018). Ancak her iki hasar türünde de altyapı sistemlerine ciddi hasarlar verdiği birçok araştırmacı tarafından ortaya konmuştur. Örneğin 1971 San Fernando depreminde heyelan ve yüzeysel faylanma içme suyu ve atık su boru hatlarında yüksek yoğunlukta boru hasarı oluşturmuştur ancak bu durumun aksine 1969 San Rosa depreminde boru hattı hasarları dalga yayılımı ile ilişkiliydi (O'Rourke ve Trautmann 1980).

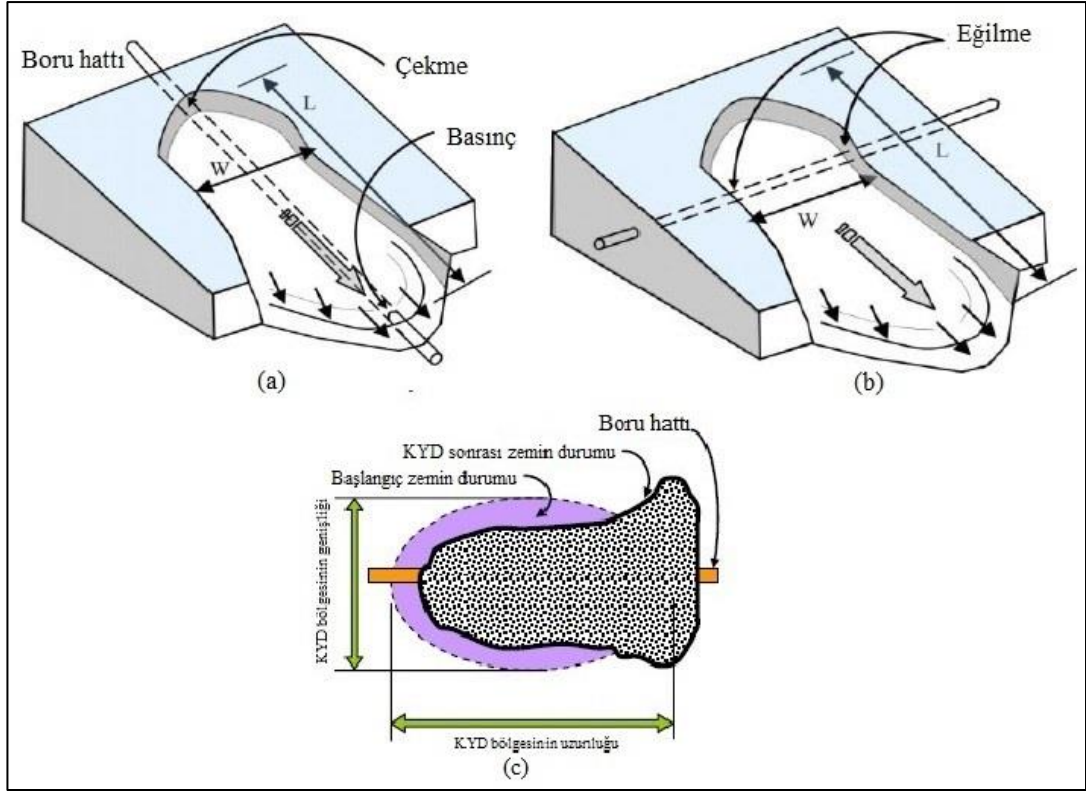
Literatürde kalıcı yer deformasyonu (KYD) sonucu oluşmuş boru hattı hasarları ile alakalı birçok çalışma mevcuttur. Newmark ve Hall (1975), Kennedy ve diğ. (1977), Wells ve Coppersmith (1994), Takada ve diğ. (1998), Vazouras ve diğ. (2010,2015) çalışmalarında fay hareketi sonucu oluşan gömülü boru hattı hasarları üzerinde incelemelerde bulunmuşlardır. Suzuki ve diğ. (1988), Kobasyashi ve diğ. (1989), Liu ve O'Rourke (1997) çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemi ile kalıcı yatay şekil değiştirmeye maruz kalan gömülü boru hatları üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Takada ve diğ. (1987), Wang ve Zhang (1992) sıvılaşma etkisine maruz kalan gömülü boru hatları üzerinde çalışmalarda bulunmuşlardır. O'Rourke ve Liu (1999) çalışmalarında gömülü boru hattı hasarlarını faylanma, heyelan ve sıvılaşma dolayısıyla oluşmuş yanal yayılmalar açısından ele alarak geniş

değerlendirmelere yer vermişlerdir. Şekil 2.1’de çeşitli etkiler altında oluşan yanıl yayılım hareketinin karakteristik davranışı yer almaktadır.



Şekil 2.1: Yanıl yayılımının karakteristik davranışı (O'Rourke ve Liu 1999)

Şekil 2.2’de kalıcı yer deformasyonu etkisi altında boru hattı üzerinde oluşan eksenel ve enine etkiler ve kalıcı yer deformasyonu (KYD) etkisinin şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.2: a) Eksenel, b) Enine KYD etkisi ve c) KYD'nin şematik gösterimi (IITK-GSDMA 2007).

Boru hattı kırılma yükü taşıma kapasitesini ortaya koymak için geliştirilen hasar ilişkileri sağlamlık ve güvenilirlik analizleri için önemli olduğu kadar ileriye dönük olası deprem zarar tahmini çalışmalarının tamamında yer almaktadır (Toprak ve diğ. 2011). Hasar ilişkileri hesaplanırken onarım oranı (RR) parametresi literatürde sıklıkla kullanılan, hasarı boru uzunluğuyla normalize ederek sunan ve kırılma yükü taşıma kapasitesi için iyi bir gösterge parametresidir (Toprak ve diğ. 2009, Toprak ve diğ. 2011). Boru hatları hasar ilişkileri yaygın olarak RR ile yatay ve düşey yer değiştirme, PGA, PGV MMI ve Pineda-Porras and Ordaz (2007) tarafında geliştirilen PGV^2/PGA parametreleri arasında geliştirilmiştir. Toprak (1998) ve Toprak ve Taşkın (2007) boru hasarlarının tarihsel gelişimi hakkında detaylı literatür taraması sunmuşlardır. Literatürde deprem parametreleri ile boru hattı hasarlarını ele alan çalışmalar Katayama ve diğ.'nin (1975) en büyük yer ivmesi (PGA) deprem parametresini kullanmasıyla başlamaktadır. Katayama ve diğ. (1975), asbestli çimento (AC) ve dökme demir (CI) tipi borular için hasar ilişkilerini altı farklı deprem senaryosunu ele alarak PGA parametresi ile hesaplamıştır. Eguchi (1991) çalışmasında, Eguchi (1983) çalışmasında değişiklikler yaparak AC, CI ve PVC tipi boruları için RR ile MMI arasında hasar ilişkileri geliştirmiştir. Geliştirilen hasar ilişkilerine göre AC tipi

ve beton borular PVC tipi borulardan daha savunmasız olduğuna, ayrıca AC tipi boruların CI ve kaynaklı çelik boruların ek bölgelerindeki kısımlarından daha hassas olduğunu MMI ile RR arasındaki hasar ilişkisi ile ortaya koymuştur. Barenberg (1988) üç farklı deprem veri seti ile CI tipi borular için RR ile PGV arasında ilk kez hasar ilişkisi geliştirmiştir. O'Rourke ve Ayala (1993) daha sonra Barenberg (1988) çalışmasına 1983 Coalinga ve 1985 Michoacan depremlerini ekleyerek PGV için yeni bir kırılma ilişkisi tanımlamıştır. Eidinger ve diğ. (1995, 1998) çalışmalarında yedi deprem veri setini göz önüne alarak RR ile PGV arasında kırılma ilişkisi tanımlamıştır. Tromans (2004) çalışmasında CI tipi borular için Hwang ve Lin (1997) tarafından sunulan RR ile PGA arasındaki kırılma eğrilerine kendi çalışmasını ekleyerek sunmuştur. Küçük büyüklükteki depremler büyük pik ivmelere neden olabilir ancak yapılar üzerinde çok az etkisi vardır. Çünkü zemin sarsılma süresi çok kısıtlıdır. Boru hatları söz konusu olduğunda yüksek PGA bölgelerinde meydana gelen hasarların kalıcı yer deformasyonundan kaynaklanan boru hattı hasarı olduğu görülmüştür (O'Rourke ve Toprak 2007).

O'Rourke ve diğ. (1998) ve Toprak (1998), 1994 Northridge depremi sonrası coğrafi bilgi sisteminleri (CBS) kullanarak Los Angeles Su ve Elektrik İdare'sine (LADWP) ve Metropolitan Su Kuruluşu'na (MWD) ait suyu şehir içerisine taşıyan iletim borularında 'MMI, PGA, PGV, en büyük yer deformasyonu (PGD), arias şiddeti (AI), spektral ivme (SA) ve spektrum şiddeti (SI)' parametreleriyle geliştirilen hasar ilişkileri ile PGV ve onarım oranı arasındaki ilişkinin en iyi sonucu ortaya çıkardığını göstermişlerdir. Bu kapsamda Toprak ve diğ. (2007) ve Nacaroglu (2010, 2017) çalışmalarında deprem sebebiyle oluşan boru hasarı ve boru ilişkilerini ayrıntılı olarak değerlendirmişlerdir.

Toprak ve Yoshizaki (2003), çalışmalarında boru hatlarının deprem öncesinde olduğu kadar deprem sonrasında da görevlerini yerine getirebilmesinin ve ayrıca depremi takip eden günlerde de toplumun yaşamı ve endüstri için doğal gaz, su ve atık su gibi sistemlerin sağlıklı çalışmasının önemini vurgulamışlardır. Çalışmalarında deprem etkisinin gömülü boru hatları üzerindeki etkisini inceleyebilmek için onarım oranının (RR) geçici yer deformasyonları (GYD) etkisiyle ya da kalıcı yer deformasyonları (KYD) etkisiyle yüksek olduğu farklı bölgelerdeki depremleri inceleyerek muhtemel deprem senaryolarına en iyi şekilde

hazırlanılabilmesi için bu çalışmaların önem arz ettiğine dikkat çekmişlerdir. Toprak ve Koç (2007), çalışmalarında KYD için içme suyu ve kanalizasyon boru hatlarının deprem performansının değerlendirilebilmesi amacıyla coğrafi bilgi sistemlerini (CBS) analiz, geleceğe dönük hasar tahminleri ve deprem etkisi altındaki performansının belirlenmesinde kullanılmasının etkili sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır. CBS ile gerçekleştirilen bu analizler sonucunda her bir deprem parametresi ile onarım oranı (RR) arasındaki ilişkiyi incelemişler ve bu parametreler arasında PGV, boru hattı onarım oranı (RR) ile en iyi korelasyonu vermiştir.

22 Şubat 2011 Christchurch depremi sonrası, önceki depremlerden kazanılan birikimler ile depremin etkisinin doğru bir şekilde anlaşılabilmesi ve sonraki depremlere hazırlıklı olunabilmesi için birçok keşif çalışması yürütülmüştür. Özellikle sivilaşmanın neden olduğu yüzey hareketlerini olabildiğince hızlı yakalamak ve etkilerini tutarlı ve sistematik bir şekilde ölçmek için 22 Şubat'ı takip eden günlerde Canterbury Üniversitesi tarafından keşif çalışması (Hava fotoğrafı vb.) gerçekleştirilmiştir (Taylor 2015). Bölgede oluşturulan geniş boru-hasar veri seti ve ayrıca Canterbury Deprem Dizisi (CES) sonrası başlangıçta Canterbury Geoteknik Veri Tabanı (CGD, 2012) adıyla oluşturulan ve adı Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanı (NZGD) olarak düzenlenen geoteknik veri tabanı bölgede yapılan altyapı araştırmalarında önemli bir yer tutmaktadır. Literatürde Canterbury deprem dizisi olarak bilinen, birçok büyük ve sayısız artçı şoktan oluşan deprem dizisi verisini içermesi nedeniyle akademisyenler, mühendisler vb. kişiler tarafından eşsiz bir veri tabanı olarak tanınmaktadır. Yapılan çalışma kapsamında kullanılan verilerin temelini Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanı (NZGD) oluşturmaktadır.

Mevcut literatürde Canterbury deprem dizisi ve bu depremlerin gömülü boru hatları üzerindeki etkisi ile alakalı birçok çalışma yer almaktadır. O'Rourke ve diğ. (2012, 2014) ve Bouziou (2015) çalışmalarında, $M_w6,2$ büyüklüğündeki Christchurch depreminin bölgede bulunan boru hasarları üzerindeki etkisini yatay ve düşey yönde yer hareketleri ile incelemişlerdir. Toprak ve diğ. (2014, 2015^{a,b,c}, 2016) ve Nacaroglu (2017) çalışmalarında, 2011 Christchurch depreminin Avonside bölgesindeki gömülü boru hattı sistemine olan etkisini incelemişlerdir. Son yıllarda hasar ilişkilerinin geliştirilmesinde deprem parametrelerinin yerine sivilaşma parametrelerinin kullanımı artmaktadır. Toprak ve diğ. (2017), sivilaşma şiddeti

parametrelerinden sıvılaşma şiddeti katsayısı (LSN) ile deprem sebebiyle hasar gören boru hatları arasındaki ilişkiyi literatürde ilk kez ortaya koymuşlardır. Nacaroğlu (2017) çalışmasında sıvılaşma şiddeti parametrelerini kullanarak boru hasarlarıyla ilişkileri hakkında kapsamlı bir çalışma yapmıştır.

Gömülü boru hatlarının deprem ve statik performanslarının incelenmesi için fiziksel deneyler, analitik, ampirik ve nümerik analizler gibi birçok analiz yöntemi birçok araştırmacı tarafından yaygın şekilde uygulanmaktadır. Nümerik analiz yöntemlerinden sonlu elemanlar yöntemi 1940'lı yıllarda ortaya çıkmış olup 1980'li yıllardan sonra bilgisayar teknolojisinin gelişimiyle birlikte birçok mühendislik probleminin modellenmesinde kullanılmaya başlanmıştır. Geoteknik mühendisliği problemlerinde nümerik analiz yöntemlerinden biri olan sonlu elemanlar yönteminin kullanımı son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler ile yaygın hale gelmiştir. Literatürde gömülü boru hatlarının dinamik ve statik yükler altındaki davranışlarını sonlu elemanlar yöntemi ile inceleyen birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışma kapsamında sonlu elemanlar kodu ile çalışan Plaxis 2D paket programında Christchurch depreminde hasar rapor edilen AC, CI ve PVC boru hattı hasar noktalarında dinamik vaka analizleri gerçekleştirilmiştir. Modellerin oluşturulması ve zemin parametrelerinin elde edilmesi ile alakalı ayrıntılı bilgiler Bölüm 5'te yer almaktadır.

Saeedzadeh ve Hataf (2011) çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemi ile sismik yükler altında dilatansi açısı, rölatif sıkılık (D_r), boru çapı, gömme derinliği, yer altı su seviyesi ve doymuş zemin tabakası kalınlığının boru hattı yüzdürme etkisi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Doymuş toprak tabakasının artışı ile deprem kaynağı ile boru tabanı arasındaki mesafeyi artıracığından depremin etkisinin azalacağını ve sonuç olarak yüzdürme etkisinin azalacağını ortaya koymuşlardır. Ayrıca çalışma sonuçlarını Ling ve diğ. (2008)'in çalışmaları ile kıyaslamalarda bulunmuştur. Ling ve diğ. (2008) DIANA-SWANDYNE-II sonlu elemanlar programı ile doymuş zemin tabakasının borulu ve borusuz şartlar altında sismik tepkisini simüle etmiş ve oluşturulan modelin sıvılaşma öncesi deformasyon durumunu başarılı şekilde temsil ettiğini ancak sıvılaşma sonrası için yeterli olmadığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca bu çalışmada toprak-boru etkileşimi göz

ardı edilmiş olmasına rağmen nümerik sonuçlar ile deney sonuçları uyum sağlamıştır.

Terzi ve diğ. (2007) çalışmalarında 250,87 m boyunca uzanan PVC içme suyu boru hattı üzerinde Lefkas 2003 depreminin neden olduğu 7 noktada oturma ve yanal yayılma gözlem değerlerini sonlu elemanlar yöntemi ile kurulan modeller ile başarılı şekilde karşılaştırmalarda bulunmuşlardır.

Chaudhari ve diğ. (2013) çalışmasında sonlu elemanlar kodu ile çelik borular üzerinde etkili olan sismik yüklerin boru çapı, et kalınlığı, gömme derinliği ve fay açısı etkilerini araştırmıştır. Malzeme davranışı yanında fay hareketlerine maruz kalan borular üzerinde geometrik davranışın önem kazandığını ortaya koymuştur. Vazouras ve diğ. (2010) doğrultu atımlı fay kırılma bölgelerinde kalıcı yer deformasyonuna maruz kalan boru hatları üzerinde sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmiştir. Lonzano (2014) çalışmasında Plaxis 2D ile çelik boruların hem statik hem de dinamik davranışlarını ortaya koymuştur. Vural ve diğ. (2011) çalışmalarında nümerik analiz yöntemlerinden olan sonlu farklar yöntemi ile literatürde kabul edilen tek tabakalı zemin modelini esas alarak borulu/borusuz statik ve dinamik analizler yaparak deprem sonrası oluşan yatay ve düşey yer hareketlerinin zemin kesiti içindeki gömülü borunun deformasyona uğratmasının beklenildiğini ortaya koymuşlardır.

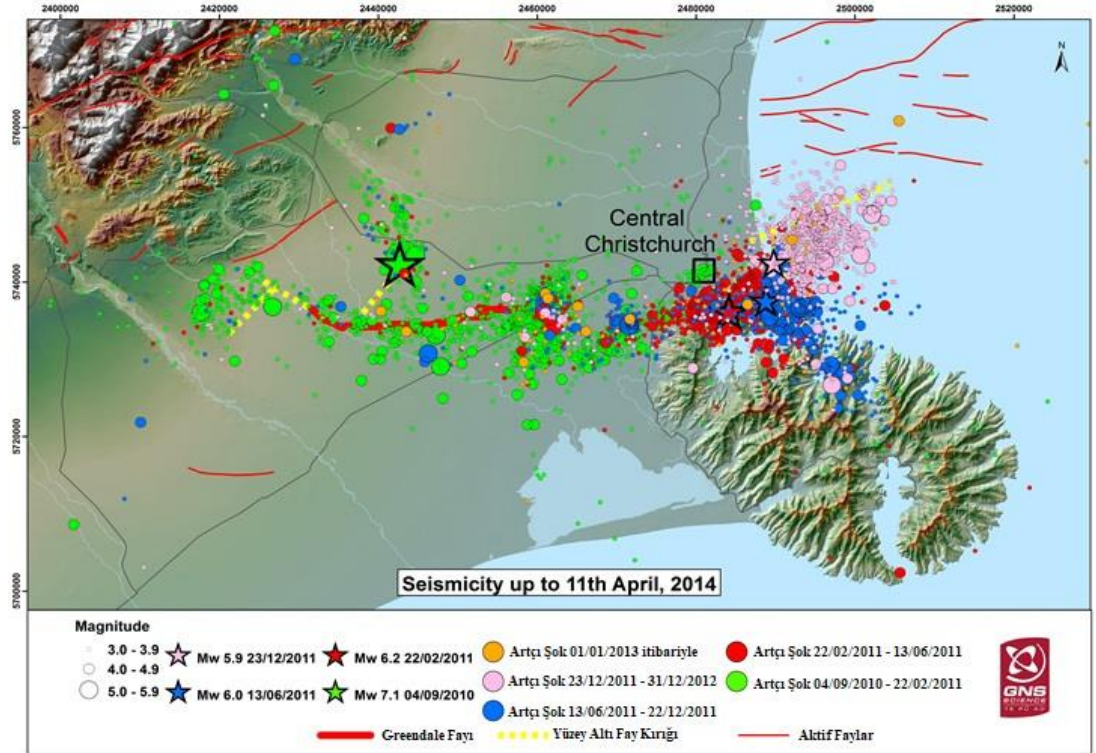
Gömülü boru hatlarının stabilitesi ve performansı aşırı geostatik yüklemeler ve deprem yükleri ile doğrudan ilişkilidir. Edinçliler ve Toksoy (2016) çalışmalarında Kobe, El Centro ve Kocaeli depremlerine maruz kalan çelik boruların hendekli ve hendeksiz inşa durumları için toplamda 6 adet sonlu elemanlar modeli oluşturmuştur. Analiz sonuçlarına göre hendek ile inşa edilen boru hatları doğal zemin içinde bulunan boru hattına göre daha az deplasmana maruz kalmıştır. İşkan (2001), çalışmasında sonlu elemanlar yöntemiyle yataklama malzemesinin, yataklama tipi seçiminin, boru çapının ve geri dolgu yüksekliğinin gömülü boru üzerine etkileyen yüklerde ciddi değişimlere sebep olduğunu ortaya koymuştur.

Tez kapsamında Canterbury deprem dizisinin en büyük depremlerinden biri olan, 22 Şubat 2011 tarihinde meydana gelen $M_w6,2$ büyüklüğünde ki Christchurch depremi sebebiyle içme suyu boru hatlarında meydana gelen hasarların boru tipine

bağlı olarak yatay Şekil değiştirme değerleri ile RR arasında hasar ilişkileri hesaplanmıştır. Elde edilen hasar ilişkileri ile sismik etkiler sebebiyle oluşan yatay Şekil değiştirmelerin boru tipleri üzerindeki etkisi hakkında değerlendirmelerde bulunulmuŐtur. Ayrıca tez kapsamında çalışma bölgesinde yer alan AC, CI ve PVC boru tipleri üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile dinamik vaka analizleri gerçekleştirilmiştir.

3. CHRISTCHURCH İÇME SUYU BORU HATTI SİSTEMİ VE NZGD

Yeni Zelanda bölgesi Canterbury Deprem Dizisi (CES) olarak bilinen bir dizi deprem ve artçılarının yoğun bir şekilde etkisi altında kalmıştır. Bu depremlerin en büyüklerinden biri 22 Şubat 2011 Salı günü $M_w=6,2$ büyüklüğünde gerçekleşen Christchurch depremidir. Şekil 3.1’de bölgede 11 Nisan 2014’e kadar gerçekleşen sismik aktiviteler görülmektedir. Deprem sonrası bölgede gözlemlenen önemli kum kaynaması, yanıl hareketler ve oturmalar da dâhil olmak üzere sivilaşma belirtileri dünya çapında bildirilen en geniş ve ciddi olanlardan biridir (Taylor 2015). Geniş çaplı oluşan sivilaşmadan kaynaklı yatay ve düşey yer hareketleri bölgede bulunan altyapı sistemleri üzerinde ciddi hasar oluşumuna neden olmuştur. Christchurch depremi birçok araştırmacı tarafından altyapı hasarlarına yoğun şekilde sebep olan depremlerden biri olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.1: Canterbury Deprem Dizisinin 11 Nisan 2014’e kadar gerçekleşen sismik aktiviteleri (GNS 2014)

Tablo 3.1’ de 22 Şubat 2011 Christchurch depreminin bazı istasyonlarda ölçülen sismik aktivitesi yer almaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan 22 Şubat 2011 Christchurch deprem veri setleri PEER Ground Motion Database web sayfasından temin edilmiştir.

Tablo 3.1: 22 Şubat 2011 Christchurch depreminin bazı istasyonlarda ölçülen sismik aktivitesi

İstasyon kodu	İstasyon	Bileşenleri	Odak derinliği [km]	PGA [g]
CMHS	Christchurch Cashmere High School	N10E	6.0	0,40
		S80E	6.0	0,34
CHHC	Christchurch Hospital	N01W	8.0	0,34
		S89W	8.0	0,36
CBGS	Christchurch Botanic Gardens	N89W	9.0	0,55
		S01W	9.0	0,45
CCCC	Christchurch Cathedral College	N64E	6.0	0,47
		N26W	6.0	0,38
SHLC	Shirley Library	S40W	9.0	0,31
		S50E	9.0	0,34

Sıvılaşmanın özellikle belirli bölgelerde ve belirli şartlar altında meydana gelmesinden dolayı, aynı bölgede bulunan altyapı sistemleri için sıvılaşma ile ilişkili yatay ve düşey yer değiştirme deformasyonları önem arz etmektedir. Christchurch depremi sebebiyle Christchurch şehrinde yaklaşık 90 km² gibi geniş bir alanda sıvılaşma meydana gelmiştir. Sıvılaşma sebebiyle yaklaşık 60000 yerleşim yeri zarar görürken Christchurch altyapı sisteminin büyük bir kısmı etkilenmiştir. 30 milyar dolarlık (Yeni Zelanda Doları) toplam ekonomik kaybın yarısı doğrudan sıvılaşmanın neden olduğu hasardan kaynaklanmaktadır (Nacaroglu 2017). Deprem sonrası yapılan araştırmalarda tüm bölgede bulunan yaklaşık 1730 km içme suyu şebekesinde 1502 hasar tespit edilmiştir. Şekil 3.2’de bölgede oluşan basınç etkisiyle PVC-U tipi boruda eklem bölgesi hareketi görülmektedir. Şekil 3.3’de yanal yayılma etkisine maruz kalmış ancak çalışır durumda olan PVC tipi boru yer almaktadır.



Şekil 3.2: PVC tipi boruda basınç etkisi ile eklem bölgesi hareketi (O'Callaghan 2014)

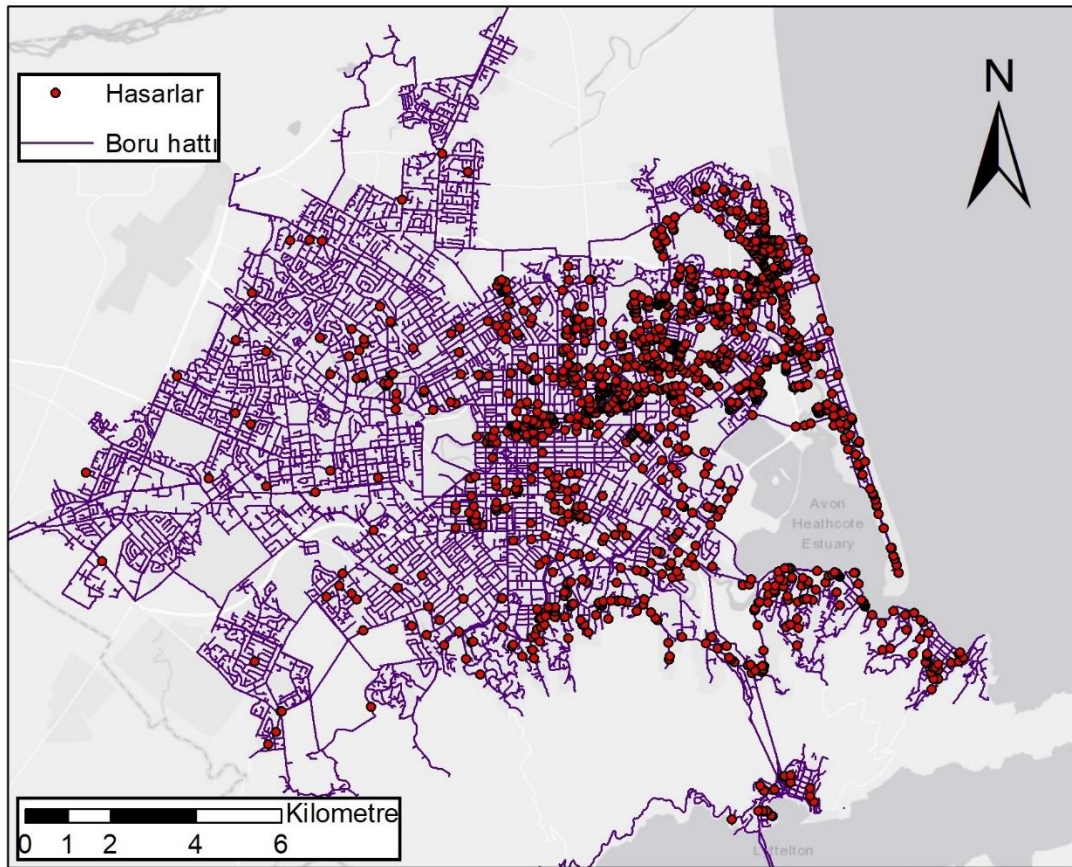


Şekil 3.3: Eksenel olarak bozulmuş ancak çalışır durumdaki PVC tipi boru (O'Callaghan 2014)

3.1 İçme Suyu Boru Hattı ve Hasarı Veri Tabanı

Tez kapsamında 22 Şubat 2011 Christchurch depreminin hasar görmesine yol açtığı boru hattı ve boru hasarları veri seti kullanılmıştır. Avustralya Hava Haritacılığı (AAM) ile Yeni Zelanda Hava Haritacılığı (NZAM) öncülüğünde Christchurch depremi öncesi ve sonrası LiDAR ölçümleri yapılmıştır. Canterbury deprem dizisinin Christchurch'te sebep olduğu yatay ve düşey yer hareketlerinin

ortaya konmasında Jeolojik ve Nükleer Bilimler Enstitüsü (GNS) ve bu kurum ile anlaşmalı olarak Tonkin ve Taylor şirketi tarafından kullanılarak elde edilmiştir (Nacaroğlu 2017). Boru hattı hasar verileri SCIRT (The Stronger Christchurch Infrastructure Rebuild Team) tarafından sağlanmış olup birçok araştırmacı (O'Rourke, Toprak, Bouziou, Ballegooy, Nacaroğlu, Dündar) tarafından kullanılmıştır. Bu veri seti, Bouziou (2015) çalışmasındaki güncellenmiş Christchurch depreminden kaynaklı hasar veri setidir. Şekil 3.4'de Christchurch şehrinde yer alan farklı tiplerdeki içme suyu boru hattı sistemi ve Christchurch depreminin sebep olduğu boru hasarları yer almaktadır.



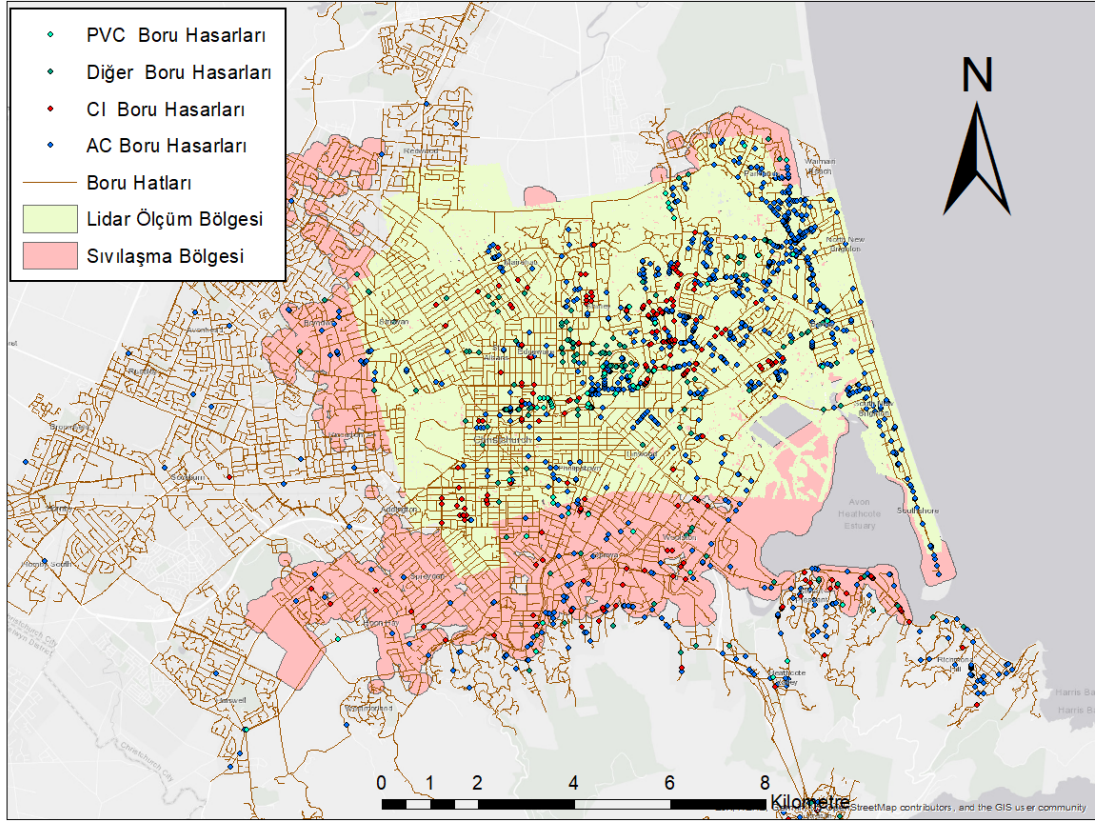
Şekil 3.4: Boru hattı sistemi ve boru hasarları

LiDAR 4m ölçüm bölgesinin geniş bir alanı kapsamasından dolayı oluşan büyük veri setinin kullanılacak olduğu programların verimli ve doğru bir şekilde çalışması için çalışma alanı 31 bölgede incelenmiştir. Çalışma bölgesi içerisinde AC, CI ve PVC tipi borular için toplam boru uzunlukları ve boru hasarları Tablo 3.2'de yer almaktadır.

Tablo 3.2: Çalışma bölgesinde yer alan AC, CI ve PVC boru tipleri için boru uzunlukları ve hasar sayıları

	Boru (km)	Hasar (Adet)	Ortalama Onarım Oranı (RR)(Hasar/km)
AC	232,8	703	3,01
CI	89,8	162	1,80
PVC	80,1	48	0,59
Diğer	117,6	108	0,91
Toplam	520,3	1021	1,96

22 Şubat 2011 Christchurch depreminin neden olduğu sıvılaşma bölgesi alanları deprem sonrası gerçekleştirilen hava fotoğrafları ve bölgesel gözlemler ile oluşturulmuştur. Dolayısıyla Christchurch depremi sonrası oluşan sıvılaşma bölgesi sıvılaşmanın yüzey özellikleri dikkate alınarak elde edilmiştir. NZGD içerisinde online olarak ulaşılabilen sıvılaşma bölgesi, yeraltı boru hatlarını etkileyen sıvılaşma etkilerini hesaba katacak şekilde genişletilmiş ve oluşturulan sıvılaşma bölgesi O'Rourke ve diğ. (2012,2014) çalışmalarında kullanılmıştır. Sıvılaşmanın gömülü boru hattı sistemleri üzerindeki etki bölgesi, bir yerleşim bölgesinde tipik bir cadde uzunluğunun yaklaşık yarısı olan 125 m alınarak sıvılaşma bölgesinin sınırları elde edilmiştir. Şekil 3.5'de Christchurch şehrinde yer alan farklı tiplerdeki içme suyu boru hattı sistemi, LiDAR 4m ölçüm bölgesi, Christchurch depreminin AC, CI, PVC ve farklı boru tipleri üzerinde sebep olduğu boru hasarları ve sıvılaşma bölgesi gösterilmektedir.



Şekil 3.5: Christchurch boru hatları, farklı tipteki boru hasarları, sızılaşma ve LiDAR ölçüm bölgesi

Kullanılan bölgesel boru hattı veri seti her boru tipi için çap, malzeme, uzunluk ve inşa yılı gibi bilgileri içermektedir. Çalışma kapsamında içme suyu dağıtım sistemi içerisinde çapları 75 mm ile 600 mm arasında olan, sistemdeki en büyük akışları ileten ana hatlar üzerinde durulmuştur. Daha küçük çaplı ikincil boru hatları çalışmaya dâhil edilmemiştir. Böylece birçok ülkede su dağıtım sistemleri ikincil boru hatlarını içermemesinden dolayı çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar geniş çapta uygulanabilir hale gelmektedir (Bouziou ve diğ. 2019). Şekil 3.6’da bölgede oluşan yanal yayılma sonrası oluşan basınç etkisi ile PVC tipi boruda meydana gelen hasar görülmektedir. Şekil 3.7’de AC tipi borularda çekme ve basınç etkisi altında oluşan hasarlar, Şekil 3.8’de CI tipi boruda oluşan kırılma hasarı görülmektedir.



Şekil 3.6: Christchurch depreminin neden olduğu PVC boru hasarı (O'Callaghan 2014)



Şekil 3.7: Christchurch Depremi etkisi altında AC tipi boruda meydana gelen çekme (sol) ve basınç (sağ) etkisi (O'Callaghan 2014)



Şekil 3.8: Dökme demir (CI) boru kırılma hasarı (Black, 2013)

Christchurch içme suyu boru hattı sisteminde yer alan boru hatları genellikle 800 mm'yi aşmayan sığ derinliklerde ve boru çapından 200 mm ila 300 mm daha geniş hendeklere döşenmektedir (Cubrinovski ve diğ. 2014). AC tipi borular II. Dünya Savaşı'ndan sonra ki 10 yıl içerisinde Christchurch'te inşa edilen ana boru hattı olmuştur ve 1986 yılına kadar üretimi devam etmiştir. 22 Şubat 2011 Christchurch depremi meydana geldiğinde içme suyu boru hattı sisteminin büyük çoğunluğunu AC tipi borular oluşturmaktaydı. CI tipi borular 1890'lara kadar uzanan inşa süreciyle Christchurch içme suyu iletim sistemindeki en eski borular arasındadır. CI tipi boruların inşası PVC tipi boruların içme suyu sistemindeki ana boru malzemesi haline geldiği 1990'larda durdurulmuştur. PVC tipi borular 1960'lı yılların başlarında Christchurch içme suyu iletim sistemine dâhil edilmiştir (Bouziou ve diğ. 2019). Christchurch içme suyu boru hattı sisteminin büyük çoğunluğunu oluşturan AC, CI ve PVC tipi boruların büyük çoğunluğunun boru çapları 100 mm ile 200 mm arasında değişmektedir. Tablo 3.3' de Christchurch depremi sebebiyle tüm bölgede görülen AC, CI ve PVC tipi borularda çapa bağlı hasar sayıları yer almaktadır.

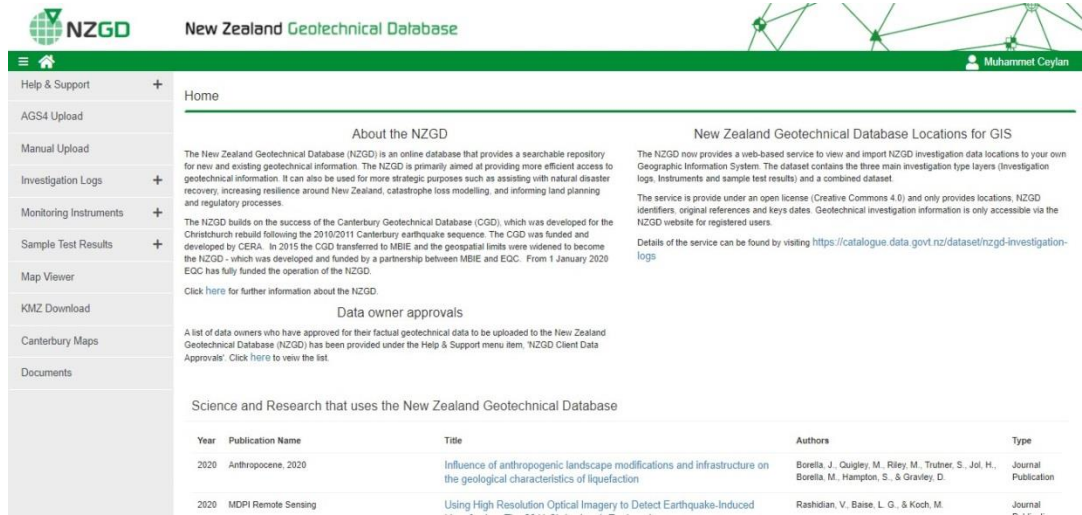
Tablo 3.3: Boru tipi ve boru çapına bağlı hasar sayıları (Bouziou ve diğ. 2019)

Çap (mm)	Boru hasarları		
	AC	CI	PVC
50-100	1	9	0
100-150	670	145	49
150-200	202	55	11
200-250	117	44	5
250-300	2	0	0
300-350	32	2	3
350-400	0	0	0
400-450	0	0	0
450-500	0	0	0
500-550	0	0	0
550-600	0	0	0

3.2 Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanı

Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanı (NZGD), yeni ve mevcut geoteknik bilgiler için aranabilir bir zengin kaynak sağlayan çevrimiçi bir veri tabanıdır. Christchurch şehrinin tekrar inşası için kurulan Canterbury Geoteknik Veri tabanının (CGD) başarısını ardından kurulan Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanı daha önce

Watercare tarafından kurulan Auckland Geoteknik Veri tabanında tutulan verileri de içermektedir. Şekil 3.9'da NZGD ana sayfası yer almaktadır.



The screenshot shows the NZGD homepage with a green header. The navigation menu includes: Home, Help & Support, AGS4 Upload, Manual Upload, Investigation Logs, Monitoring Instruments, Sample Test Results, Map Viewer, KMZ Download, Canterbury Maps, and Documents. The main content area is titled 'Home' and contains several sections:

- About the NZGD**: A paragraph describing the NZGD as an online database for geotechnical information, mentioning its development by CERL and funding by MBIE and EOC.
- New Zealand Geotechnical Database Locations for GIS**: A section explaining the web-based service for viewing and importing NZGD data into a GIS, including a URL for more information.
- Data owner approvals**: A section listing data owners who have approved their data for upload to the NZGD.
- Science and Research that uses the New Zealand Geotechnical Database**: A table listing publications from 2020.

Year	Publication Name	Title	Authors	Type
2020	Anthropocene	Influence of anthropogenic landscape modifications and infrastructure on the geological characteristics of liquefaction	Borella, J., Quigley, M., Riley, M., Trutner, S., Jol, H., Borella, M., Hampton, S., & Gravley, D.	Journal Publication
2020	MDPI Remote Sensing	Using High Resolution Optical Imagery to Detect Earthquake-Induced	Rashidian, V., Baise, L. G., & Koch, M.	Journal

Şekil 3.9: NZGD Ana sayfa

Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanı (NZGD) mevcut veri tabanlarını kapsamasından dolayı, şu anda NZGD içerisinde bulunan geoteknik veriler Canterbury, Hawke'n Körfezi ve Auckland'da yoğunlaşmaktadır. NZGD'nin bulundurduğu geoteknik verilerin Yeni Zelanda'nın diğer bölgelerini de kapsayacak şekilde genişlemesi amaçlanmaktadır. Kayıtlı kullanıcıların geoteknik bilgileri coğrafi olarak aramalarına ve ardından veri tabanından veri indirmelerine olanak tanıyan bir web portalı üzerinden verilere online olarak erişime olanak sağlamaktadır. Ayrıca kmz dosyası oluşumuna izin vererek Google Earth programı ile entegre çalışma imkânı sunmaktadır. Portal ayrıca NZGD onayından geçen kullanıcıların veri yüklemesine izin vermektedir. NZGD, gönüllü olan kullanım koşulları aracılığıyla yürütülmekte olup, kayıtlı kullanıcılar projeleri için bilgi indirebilir, ancak karşılığında bu projeler için oluşturulan yeni geoteknik bilgileri veri tabanına sağlamaları beklenmektedir.

Tez kapsamında sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen dinamik vaka analizleri için gerekli olan tüm geoteknik verilere NZGD'nin sağlamış olduğu saha ve laboratuvar araştırma sonuçlarından ulaşılmıştır. Halihazırda NZGD içerisinde Mayıs 2020 itibari ile yaklaşık olarak 39000 Konik Penetrasyon Testi (CPT), 21000 sondaj logu ve 1000 piyezometre testi olmak üzere diğer araştırma sonuçları ile birlikte toplamda yaklaşık 122000 veri dosyası bulunmaktadır. Şekil 3.10'da çalışma

kapsamında en sık kullanılan Map Viewer penceresi altında görüntülenen coğrafi konuma bağlı araştırma dosyaları sayıları, Şekil 3.11’de ise örnek bir çalışma bölgesi görülmektedir.



Şekil 3.10: Örnek coğrafi konuma bağlı araştırma dosyaları sayıları



Şekil 3.11: NZGD örnek bir çalışma bölgesi

4. HASAR İLİŞKİLERİ

Sismik etkiler altında gömülü boru sistemlerinde meydana gelen hasarı tanımlamak için kullanılan hasar ilişkileri, sağlamlık ve güvenilirlik analizleri için önemli olduğu kadar ileriye dönük deprem zarar tahminlerinin yapılmasında da kullanılmaktadır (Toprak ve diğ. 2011). Bu çalışma kapsamında sismik etkilere maruz kalan içme suyu boru hattı sistemlerindeki hasar analizleri ile alakalı detaylı değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışmada 22 Şubat 2011 (Mw6.2) Christchurch depreminin sebep olduğu yatay yer hareketleri veri seti kullanılmıştır. Christchurch depreminin yol açtığı yatay yer hareketleri veri seti, uzaktan algılama sistemlerinden olan LiDAR 4m ölçümleri ile yatay doğu-batı ve yatay kuzey-güney yer hareketi raster verisi olarak elde edilmiştir. ArcGIS programı yardımıyla yapılan analizler ve ampirik hesaplar ile LiDAR 4m veri setinden elde edilen yatay yüzey deplasmanlarından yatay şekil değiştirme verilerine ulaşılmıştır.

4.1 LiDAR 4m Uzaktan Algılama Sistemi ve Yüzey deplasmanları

Yüzey deplasmanları hesabında kullanılan veri seti, uzaktan algılama sistemlerinden olan LiDAR 4m ile raster verisi olarak elde edilmiştir. Uzaktan algılamanın ilk tarihi uygulaması 1858 yılında Gaspard Tournachon isimli bir Fransız araştırmacının balon yardımıyla Paris yakınlarındaki bir bölgenin, fotoğrafını çekmesiyle gerçekleşmiştir (Kavak 1998). Bu çalışmada LiDAR 4x4 m uzaktan algılama metodu ile elde edilen raster veri setinden sırasıyla yüzey deplasmanları, yatay şekil değiştirmeler ve 4x4 m'lik hücreler içinde bulunan boru doğrultu verileri elde edilmiştir.

LiDAR 4m bölgesi yaklaşık 12*9 km² alanı kapsayan ve net alanı yaklaşık 74 km² olan toplam 4270841 deplasman noktasından oluşan bir veri setidir. Şekil değiştirmeleri bulmak için söz konusu deplasman verilerinden yararlanılmaktadır. Deplasman noktaları arasında yatay ve düşey yönde olmak üzere 4m mesafe bulunmaktadır. Deplasman ölçümleri yatay ve düşey yönde çok nadir olarak sürekli değildir, yani herhangi bir deplasman noktasından yatay ve/veya düşey 4m mesafede

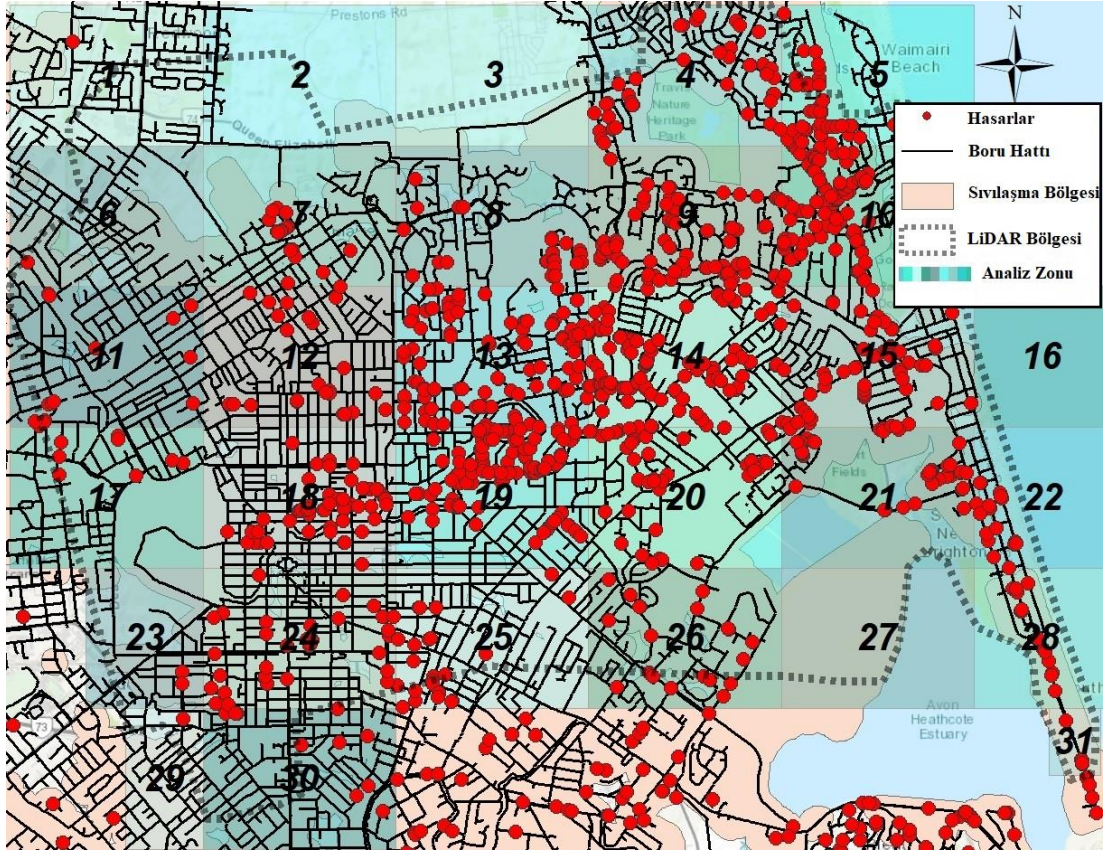
başka bir deplasman noktası bulunmayabilir. Bu noktalarda veri olmamasının sebepleri deniz, dağ vb. coğrafi sebepler veya LiDAR okumalarından kaynaklanan sebeplerdir. Şekil değiştirmeler dört deplasman noktasının oluşturduğu 16 m^2 bir alan için hesaplanmaktadır. Dolayısıyla süreksizliklerden ötürü bu alan oluşmuyorsa şekil değiştirme hesaplanamamaktadır. Şekil 4.1'de temsili LiDAR ölçüm bölgesi görülmektedir.



Şekil 4.1: LiDAR 4m ölçüm bölgesi

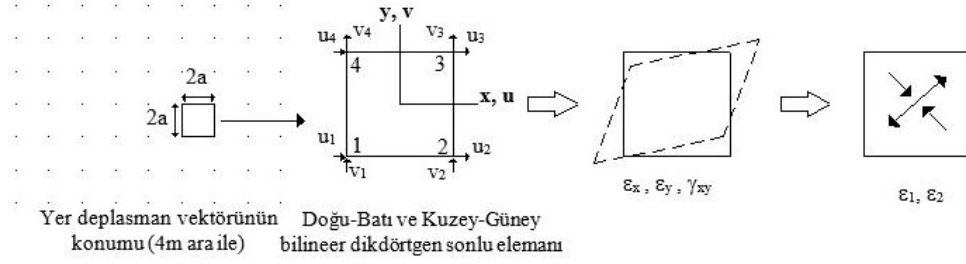
Tüm alan için tek seferde şekil değiştirmeleri hesaplamak program kısıtlamaları nedeniyle imkânsız olmaktadır. Bu sorunu çözmek için LiDAR 4m bölgesini kapsayacak şekilde daha küçük 31 alt bölgeye ayrılmış, bu bölgeler için ayrı analizler yapılmış ve daha sonra bu analizler birleştirilmiştir. Hemen hemen tüm alt bölgelerin alanları birbiriyle eşit olarak oluşturulmuştur. 31 bölgeden 26 tanesi aynı alana sahiptir ve diğer 5 bölgeden büyüktür. 5 bölgenin sınırdaki olması nedeniyle daha küçük bölgeler elde edilmiştir. 26 bölgenin her biri, boyutları X yönünde 2188 m, Y yönünde 1596 m olan ve toplam 3492048 m^2 alana sahip bir bölge olarak oluşturulmuştur. Bu alt bölgelerin her biri $4 \times 4 \text{ m}$ 'lik toplam 218253 kare elemandan oluşmaktadır. Bu bölgeyi LiDAR 4m deplasmanlarıyla karşılaştırıp her bir karenin

köşesindeki deplasmanları elde etmek için oluşturulan nokta cinsinden shapefile dosyası yaklaşık 1.000.000 noktadan oluşmaktadır. Bu veri setinin bile oluşması uzun süre alabilmektedir. Bunun yanında Excel'in 1.048.576 satır sınırlaması olduğu düşünülürse bu yazılımlar ile söz konusu analizlerin tüm bölge için yapılması mümkün olmamaktadır. Şekil 4.2'de LiDAR 4m ölçüm bölgesini kapsayan 31 bölge, sıvılaşma bölgesi, boru hattı ve hasarlar yer almaktadır.



Şekil 4.2: LiDAR 4m bölgeleri, boru hattı, boru hasarı ve sıvılaşma bölgesi

Elde edilen veri setini oluşturan kare elemanlar, bilineer dörtgen elemanlardan meydana gelen sonlu elemanlar ağı olarak kabul edilebildiğinden eleman merkezlerinde oluşan yatay şekil değiştirmeler sonlu elemanlar formülleri ile elde edilmiştir. Kare elemanların merkezlerinde oluşan yatay şekil değiştirmeler literatürde sıkça kullanılan ve Cook (1995) çalışmasında bahsettiği sonlu elemanlar formülü olan (4.1) eşitliği ile hesaplanmıştır. Şekil 4.3'de yatay şekil değiştirmelerin hesap aşamaları yer almaktadır.



Şekil 4.3: Yüzey deplasmanları ile yatay şekil değiştirmelerin ve yatay asal şekil değiştirmelerin hesaplanma aşamaları

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{(2a)^2} \begin{bmatrix} -(a-y) & 0 & (a-y) & 0 & \dots \\ 0 & -(a-x) & 0 & -(a+x) & \dots \\ -(a-x) & -(a-y) & -(a+x) & (a-y) & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_4 \end{Bmatrix} \quad (4.1)$$

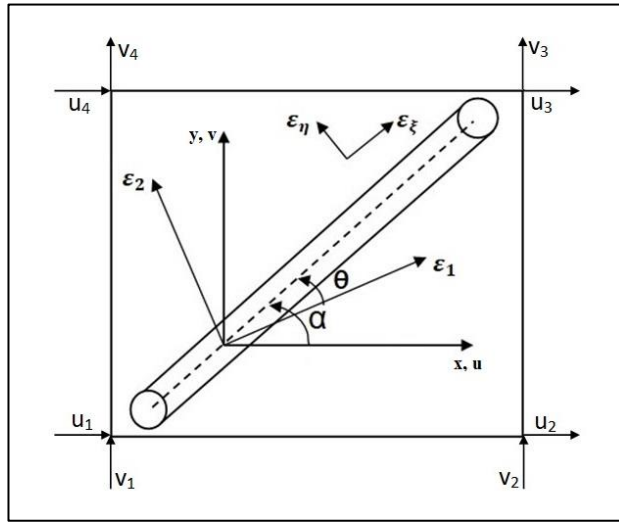
Burada $u_1, v_1, u_2, v_2, \dots, v_4$ köşe deplasmanları, x ve y iki boyutlu uzaydaki koordinatları, $2a$ ise kare elemanın kenar uzunluğunu temsil etmektedir. Analizler sonucunda ilk olarak yatay ve dişey deplasmanlar yardımıyla doğu-batı (DB) ve kuzey-güney (KG) yönlerindeki şekil değiştirmeler (ϵ_x ve ϵ_y) ve kayma şekil değiştirmesi (γ_{xy}) bulunduktan sonra asal şekil değiştirmeler (ϵ_1 ve ϵ_2) ve boru doğrultusu şekil değiştirmeler hesaplanmaktadır.

4.2 Yatay Asal Şekil Değiştirmeler ve Eksenel Şekil Değiştirmeler

LiDAR 4m uzaktan algılama sistemi ölçümleri ile edilen raster veri seti yardımıyla yatay yer deplasmanlarından yatay şekil değiştirmeler elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen hasar ilişkileri; asal şekil değiştirmeler ($\epsilon_{1,2}$) ve boru doğrultusu şekil değiştirmeler (ϵ_ξ) ile onarım oranı (RR) arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Asal gerilmeler bilineceği üzere kayma gerilmelerinin olmadığı kesitteki gerilmelerdir ve yatay asal şekil değiştirmeler literatürde yaygın olarak kullanılan (4.2) eşitliği ile hesaplanmıştır.

$$\epsilon_{1,2} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (4.2)$$

Asal şekil değiştirmelerin yanı sıra boru doğrultusuna paralel şekil değiştirmeler (ϵ_ξ) için de hasar ilişkileri elde edilmiştir. Boru doğrultusu şekil değiştirme (ϵ_ξ) hesabı için (formüllerden görüleceği üzere) boru doğrultu açısına (α) açısına ihtiyaç vardır. Bu açı LiDAR 4m uzaktan algılama sistemi ile elde edilen ve 4x4 m'lik hücrelerden oluşan veri seti kullanılarak hesaplanmıştır. Her hücrenin içerisinde bulunan boru doğrultusu açısı CBS programı olan ArcMAP yardımıyla her hücre için hesaplanmıştır. Daha sonra boru doğrultusuna paralel şekil değiştirmeler (ϵ_ξ) (4.3) eşitliği ile hesaplanmıştır. Şekil 4.4'de boru doğrultusu ve yatay şekil değiştirme şeması yer almaktadır.



Şekil 4.4: Boru doğrultusuna göre yatay şekil değiştirmelerin şeması

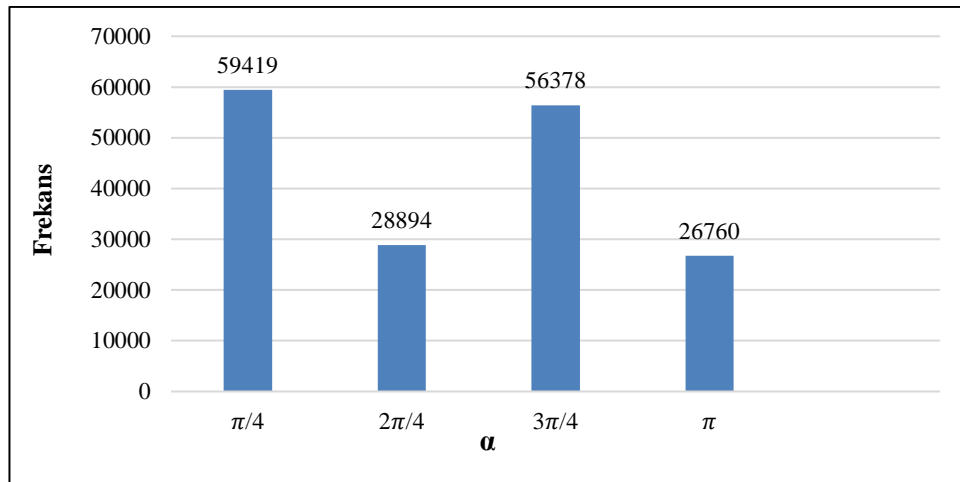
$$\epsilon_\xi = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\alpha + \frac{1}{2} \gamma_{xy} \sin 2\alpha \quad (4.3)$$

Çalışma kapsamında yapılan analizler LiDAR 4m tüm ölçüm bölgesi ve LiDAR 4m sıvılaşma bölgesi olarak incelenmiştir. LiDAR 4m bölgesinde yer alan 31 bölge için elde edilen yatay şekil değiştirmeler ve diğer veriler (boru doğrultusu gibi) NZGD tarafından sağlanan sıvılaşma bölgesi ile ArcMAP programı yardımıyla çakıştırılmıştır. Böylelikle Christchurch depreminin neden olduğu sıvılaşma bölgesinin büyük bir kısmı için önemli bir veri seti elde edilmiştir.

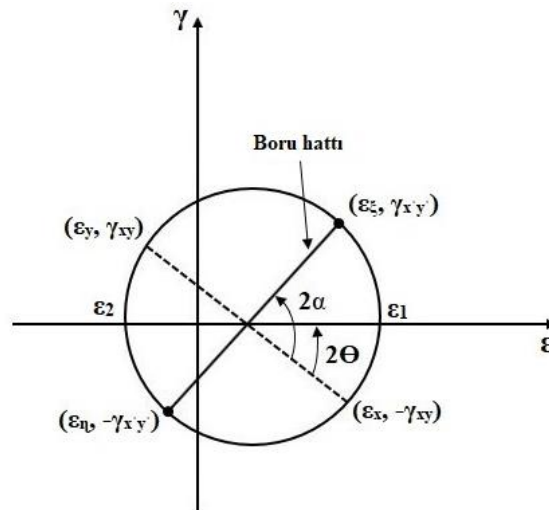
Boru hasarları sıklıkla onarım oranları (RR) ile ele alınırlar. Boru onarım oranları belirli bir bölgedeki boru onarım sayısının aynı bölgedeki boru hattı uzunluğuna bölünmesiyle bulunmaktadır. Boru hasarları üzerinde geliştirilen hasar

ilişkileri AC, CI ve PVC boru tipleri için elde edilmiştir. Her bir boru tipi için onarım oranı (RR) ile maksimum yatay asal şekil değiştirme (ϵ_{HP}) ve boru doğrultusuna paralel şekil değiştirme (ϵ_{ξ}) arasındaki hasar ilişkileri hesaplanmıştır.

Ayrıca tez kapsamında LiDAR 4m ölçüm bölgesinin sıvılaştırma bölgesinde yer alan tüm içme suyu boru hatlarının açısal olarak oryantasyonu hem düzlem ekseninde hem de asal şekil değiştirme ekseninde değerlendirilmiştir. Şekil 4.5’de çalışma bölgesinde bulunan içme suyu boru hatlarının doğrultu açısı olan alfa (α) açısının $0 - \pi$ aralığındaki dağılımı görülmektedir. Bölgede bulunan boru doğrultuları $0 - \pi/4$ aralığı ile $2\pi/4 - 3\pi/4$ açı aralığında yoğunlaşmaktadır. Şekil 4.6’da yatay şekil değiştirmeler için mohr çemberi yer almaktadır.



Şekil 4.5: Boru doğrultusu açısı (α) dağılımı

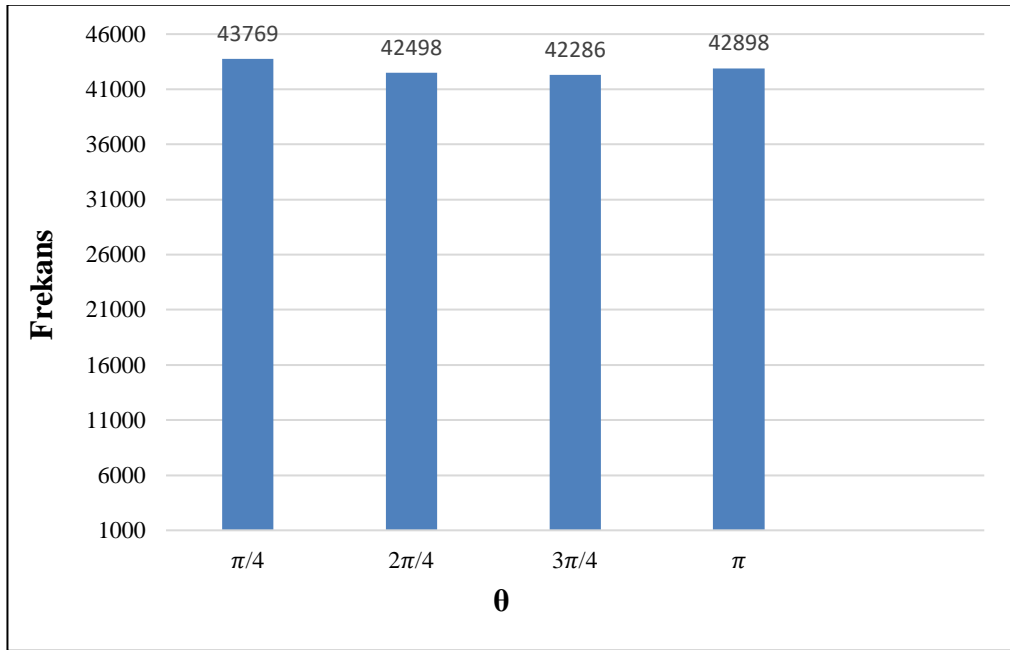


Şekil 4.6: Yatay şekil değiştirmeleri için mohr çemberi

Bouziou (2015) çalışmasında Christchurch içme suyu boru hattı sistemini oluşturan boruların asal şekil değiştirme eksenini ile boru eksenini arasında bulunan teta (θ) açısının $0 - \pi$ açı aralığındaki dağılımını normal dağılıma uygun olduğunu kabul ederek boru oryantasyonu ile ilgili değerlendirmelere yer vermiştir. Bu çalışma kapsamında (4.4) eşitliği ile, elde edilen yatay şekil değiştirmelerden teta (θ) açısı hesaplanmıştır.

$$\tan(2\theta) = \frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} \quad (4.4)$$

Şekil 4.7’de θ açısının $0 - \pi$ aralığındaki dağılımı görülmektedir. Elde edilen teta (θ) dağılımı üniform bir dağılım göstermektedir.



Şekil 4.7: Boru doğrultuları ile yatay asal düzlem arasındaki açı dağılımı

4.3 LiDAR 4m Uzaktan Algılama Yöntemi Kullanılarak Hesaplanan Yatay Yer Hareketi Hasar İlişkileri

Çalışma bölgesinde 22 Şubat 2011 Christchurch depreminin neden olduğu yatay yer hareketleri LiDAR 4m uzaktan algılama metodu kullanılarak elde edilmiştir. Yatay şekil değiştirmeler sonlu elemanlar formülleri yardımıyla bulunmuştur. ArcGIS programı kullanılarak, daha önce sınılaşma bölgesi için

hesaplanan yatay şekil değiştirmeler sınırlama bölgesinde yer alan boru hasarlarıyla ve boru hattı sistemi ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen veri seti ile çalışma bölgesinde bulunan boru hatları üzerinde ve hasar noktalarında oluşan maksimum yatay asal şekil değiştirme (ε_{HP}) ve boru doğrultusu şekil değiştirme (ε_{ξ}) değerleri elde edilmiştir. Ayrıca boru doğrultusunda oluşan şekil değiştirme (ε_{ξ}) için yön ayrımı yapılarak çekme ve basınç değerleri için AC, CI ve PVC tipi borularda hasar ilişkileri hesaplanmıştır.

Hasar ilişkileri, belirli şekil değiştirmeler aralıklarına karşılık gelen onarım oranı (RR) değerleri yardımıyla bulunan noktaların regresyon analizleri sonucuyla geliştirilmektedir. Bu şekil değiştirme aralıkları belirlenirken ise hem anlamlı korelasyonlar üretmek hem de yeterli boru uzunluğunu bulmayı hedefleyen bir eleme kriteri parametresi kullanılmaktadır. Eleme kriteri (x), O'Rourke ve diğ. (2014) tarafından oluşturulmuş ve aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

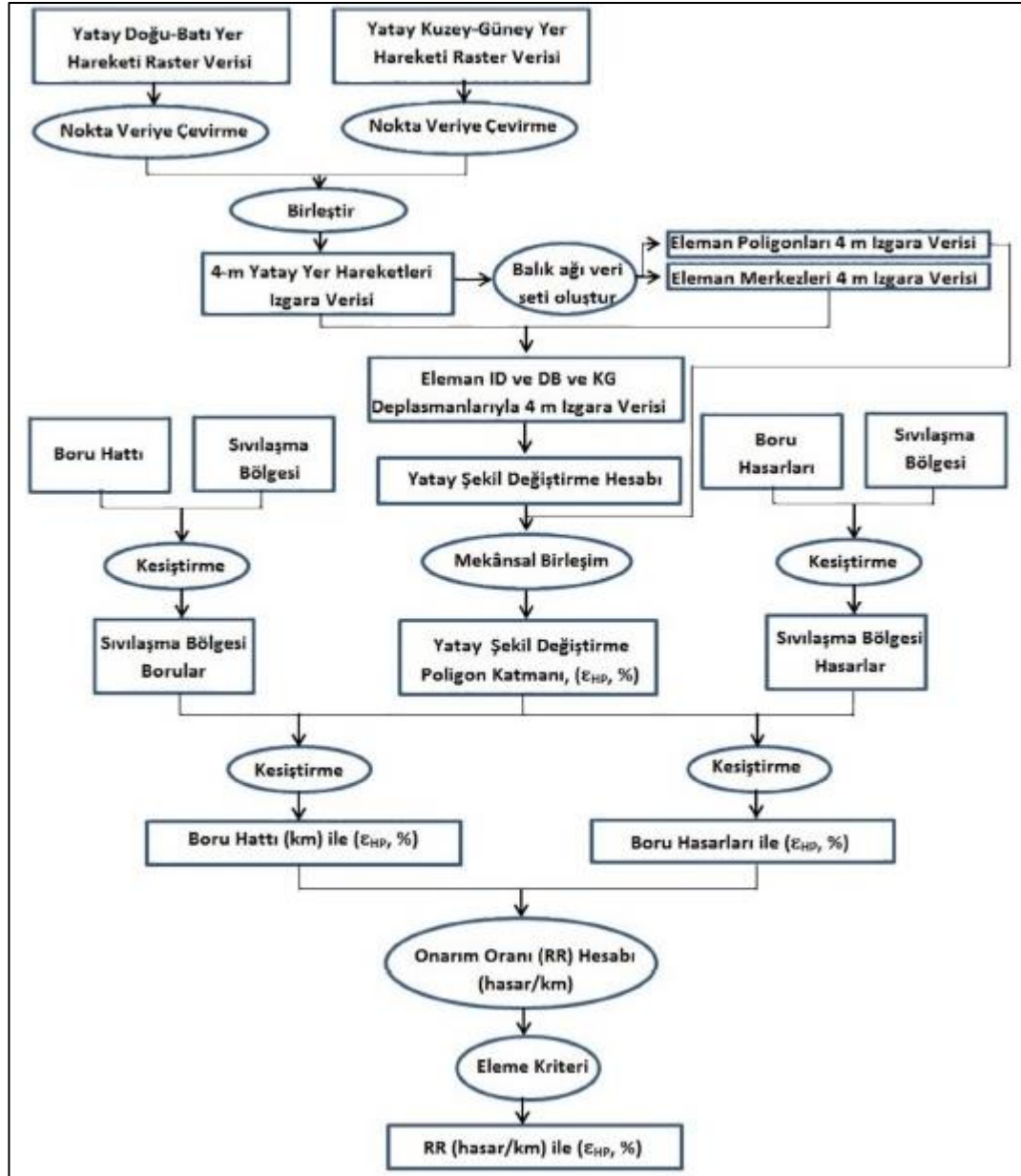
$$x \geq [\phi^{-1}(\beta_c)]^2 / \alpha^2 (RR) \quad (4.5)$$

Eşitlikte x örnek uzunluğunu; $\phi^{-1}(\beta_c)$, β_c 'nin güvenli aralığını ve standart normal sapmayı; α gerçek değer yüzdesini ve RR onarım oranını göstermektedir. Formülde verilen örnek kriteri, örnek aralığından bağımsız olup herhangi bir onarım oranı değerine göre uyarlanabilmektedir. Böylece hem geçici yer deformasyonlarının (GYD) etkisindeki küçük onarım oranı (RR) değerleri için hem de kalıcı yer deformasyonlarının (KYD) etkisindeki büyük RR değerleri için kullanılabilir. Ayrıca nispeten daha küçük bölgeleri ele alan çalışmalarda çok yararlı olmaktadır. Örneğin güvenli aralığı %90, $\alpha = 0.5$ ve RR=2 hasar/km değerleri dikkate alınarak, $\phi^{-1}(90\%) = 1.645$ bulunur. Daha sonra eleme kriteri formülü kullanılarak 5.41 km boru uzunluğu elde edilir. Elde edilen bu uzunluk belirli bir şekil değiştirme, aralığında RR=2 ise o parametre aralığındaki toplam boru uzunluğu minimum 5.41 km uzunluğunda olmalıdır. Tablo 4.1'de her bir boru tipi için hasar ilişkilerinde kullanılan güvenli aralığı değerleri görülmektedir.

Tablo 4.1: Farklı şekil değiştirmeler için eleme kriterinde kullanılan güvenli aralıklar

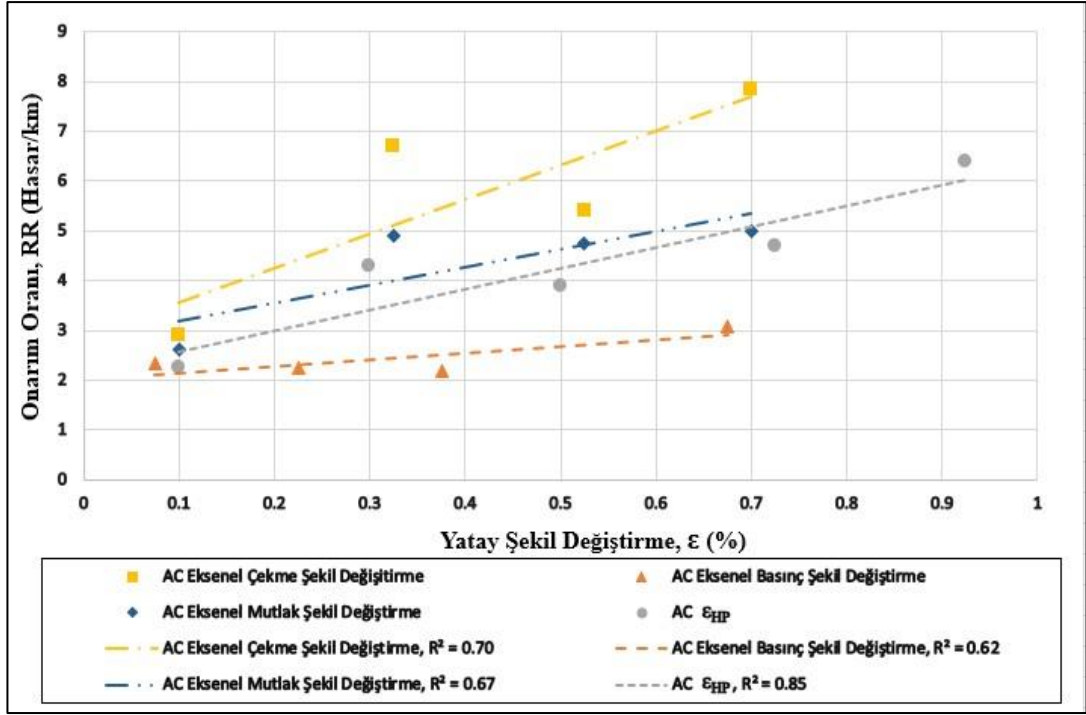
	Mutlak Değer			Çekme			Basınç		
	AC	CI	PVC	AC	CI	PVC	AC	CI	PVC
$\max[\varepsilon_{1,2}]$	%90	%85	%70	-	-	-	-	-	-
ε_{ξ}	%90	%85	%70	%90	%75	%65	%85	%70	%50

Şekil 4.8’de yatay şekil değiştirmeler ile onarım oranı (RR) arasında geliştirilen hasar ilişkilerinin hesaplama aşamalarını gösteren akış şeması yer almaktadır.



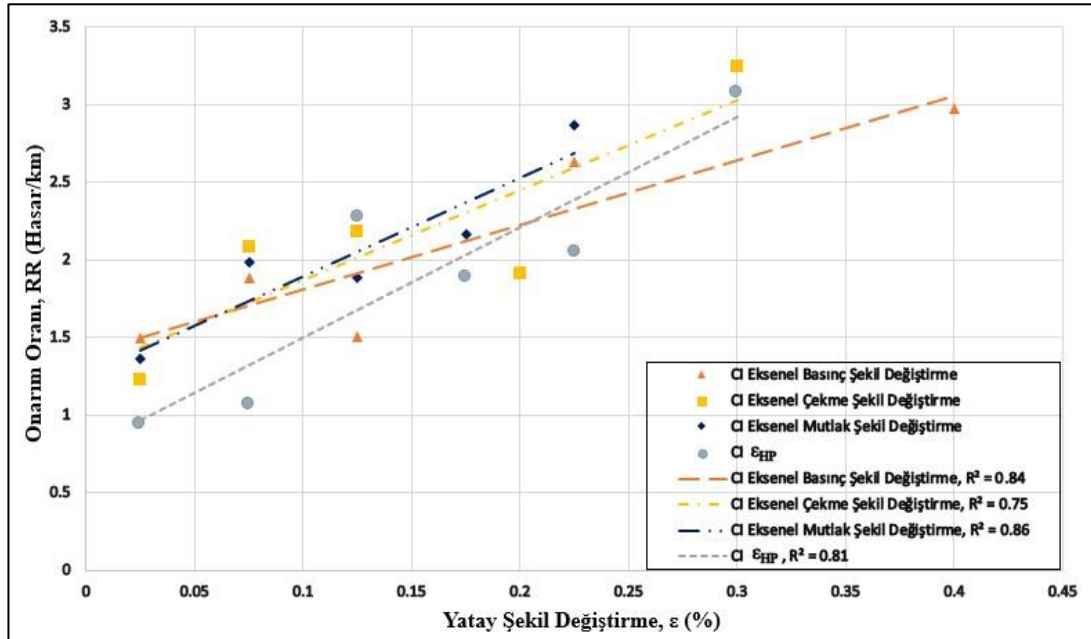
Şekil 4.8: Hasar ilişkileri hesabı akış diyagramı (Nacaroglu 2017)

Şekil 4.9’da sıvılaşma bölgesinde yer alan AC tipi borular için yatay eksenel şekil değiştirmeler ve yatay maksimum asal şekil değiştirmeler ile onarım oranı (RR) arasında geliştirilen hasar ilişkileri yer almaktadır. AC tipi borular için eksenel basınç şekil değiştirmelerde daha düşük onarım oranı ve en düşük R^2 değeri elde edilmiştir. AC tipi borular için en yüksek onarım oranı değerleri eksenel çekme şekil değiştirme için elde edilmiştir.



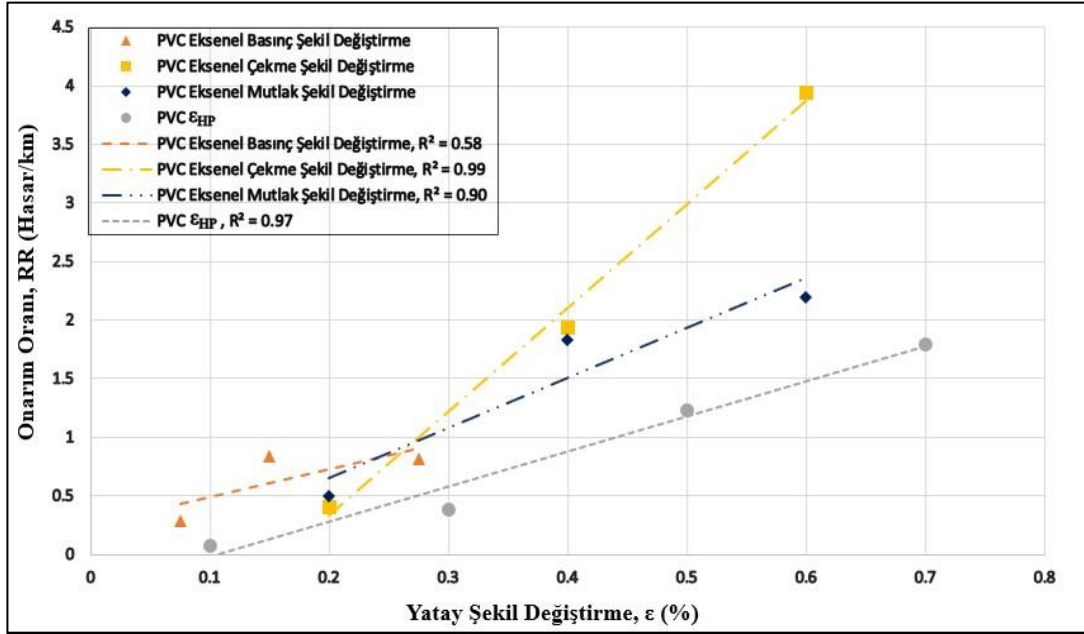
Şekil 4.9: AC tipi boru için hesaplanan hasar ilişkileri

Şekil 4.10'da sıvılaşma bölgesinde yer alan CI tipi borular için yatay şekil değiştirmeler ile onarım oranı (RR) arasında geliştirilen hasar ilişkileri yer almaktadır. CI tipi borular için yatay maksimum asal şekil değiştirme ve eksenel (boru doğrultusu) şekil değiştirmeler için benzer onarım oranları elde edilmiştir.



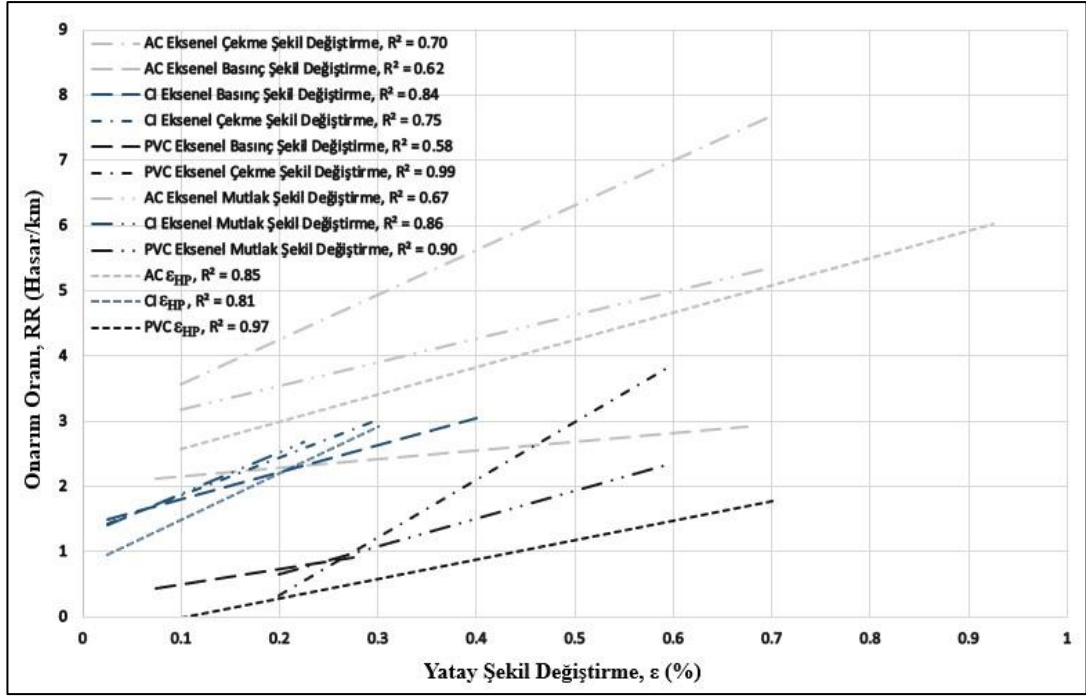
Şekil 4.10: CI tipi boru için hesaplanan hasar ilişkileri

Şekil 4.11’de sıvılaşma bölgesinde yer alan PVC tipi borular için yatay şekil değiştirmeler ile onarım oranı (RR) arasında geliştirilen hasar ilişkileri yer almaktadır. PVC tipi borular için eksenel çekme şekil değiştirmesi ile onarı oranı arasındaki hasar ilişkisinde yüksek bir R^2 değeri (0,99) elde edilmiştir. AC tipi borularda olduğu gibi PVC tipi borular içinde eksenel basınç şekil değiştirmesi için düşük R^2 değeri (0,58) elde edilmiştir.



Şekil 4.11: PVC tipi boru için hesaplanan hasar ilişkileri

Şekil 4.12’de AC, CI ve PVC tipi boruların yatay maksimum asal şekil değiştirme, eksenel çekme şekil değiştirme, eksenel basınç şekil değiştirme ve eksenel mutlak şekil değiştirmeler ile onarım oranı (RR) arasında geliştirilen hasar ilişkileri yer almaktadır. Görüleceği üzere her boru tipi için farklı oranlarda onarım oranları elde edilmiştir. Kırılabilirliği en yüksek olarak gösterilen AC tipi borular için en yüksek onarım oranı elde edilirken AC tipi boruları sırasıyla CI ve PVC tipi borular takip etmektedir.



Şekil 4.12: AC, CI ve PVC boru tipleri için hesaplanan hasar ilişkileri

5. Plaxis 2D ile Gömülü Boru Hatlarında Sismik Vaka Analizleri

2011 yılında Yeni Zelanda’da literatüre adını Canterbury deprem dizisi olarak yazdırmış bir dizi deprem yaşanmıştır. Canterbury deprem dizisinin en büyüklerinden olan $M_w6,2$ büyüklüğündeki 22 Şubat 2011 Christchurch depremi içme suyu boru hatlarında geniş çaplı hasarlar oluşmasına sebep olmuştur. Tez kapsamında Christchurch şehrinin içme suyu boru hatlarının büyük çoğunluğunu oluşturan AC, CI ve PVC tipi borularda meydana gelen hasarlar göz önüne alınmıştır. Boru hasarları genellikle kalıcı yer deformasyonu (KYD) ve geçici yer deformasyonu (GYD) sonucu oluşan hasarlar olarak ele alınırlar. Bölüm 4’te sınıvlaşma bölgesinde yer alan AC, CI ve PVC tipi borular için geliştirilen hasar ilişkileri kalıcı yer deformasyonu (KYD) nedeniyle oluşan hasarlardan faydalanılarak elde edilmiştir. Plaxis 2D sonlu elemanlar programı ile ise 22 Şubat 2011 Christchurch depremi sebebiyle gerçekleşen içme suyu boru hasarlarının üzerindeki etkiler araştırılmıştır.

Bu bölümde yatay şekil değiştirmeler ile geliştirilen bölgesel hasar ilişkilerine ek olarak sonlu elemanlar yöntemini esas alan Plaxis 2D programı ile 22 Şubat 2011 Christchurch depremi sebebiyle AC, CI ve PVC tipi borularda meydana gelen boru hasarları için vaka analizleri gerçekleştirilmiştir.

5.1 Plaxis 2D Programının ve Sonlu Elemanlar Yönteminin Tanıtılması

Sonlu elemanlar yöntemi 1940’lı yıllarda ortaya çıkmış olup 1980’li yıllardan sonra bilgisayar teknolojisinin gelişimiyle birlikte birçok mühendislik probleminin modellenmesinde kullanılmaya başlanmıştır. Geoteknik mühendisliği problemlerinde, nümerik analiz yöntemlerinden biri olan sonlu elemanlar yönteminin kullanımı son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler ile yaygın hale gelmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile geoteknik modellerde başlangıç gerilme durumları, malzeme bünye davranışı, uzun ve kısa dönem yükleme koşulları,

anizotropik modeller ve karmaşık sınır koşulları gibi birçok karmaşık problem gerçeğe yakın şekilde temsil edilebilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi temel olarak bir mühendislik probleme sayısal bir çözüm getirmenin bir yoludur. Diferansiyel denklemler ile temsil edilen mühendislik problemlerinin analizi için geliştirilen bir nümerik analiz yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi esas alınarak oluşturulan mühendislik modelleri yeterince basit değil ve karmaşık ise elde edilecek olan sonuçlar da yaklaşık olacaktır (Cook 1995).

Sonlu elemanlar yönteminin basit bir açıklaması, herhangi bir sürekli ortamın çeşitli elemanlara (ortamın parçalarına) ayrılması, her bir elemanın davranışını basit bir şekilde tanımlanması ve daha sonra oluşan her elemanın birbirine düğüm noktalarından bir diğer elemana bağlanmasıdır. Bu işlem sayesinde sürekli bir ortam sonlu elemanlara bölünerek denklemler bir eleman için elde edilir ve elemanlar birbirlerine entegre edilerek sistem denklemleri elde edilir. Sonuç olarak sürekli bir ortam için değerlendirilen diferansiyel denklem lineer bir denklem takımına indirgenir. Gerilme analizlerinde bu denklemler düğümlerin denge denklemleridir. Birkaç yüz veya birkaç bin denklem olabilir, bu da bilgisayar uygulamasının zorunlu olduğu anlamına gelmektedir (Cook 1995).

Plaxis 2D programı sonlu elemanlar yöntemini esas alarak; karmaşık model geometrisi, karmaşık sınır koşulları, karmaşık yükleme koşulları, ileri düzey malzeme modelleri ve oluşturulan modellerin kademeli olarak inşaa simülasyonu gibi özellikleri sayesinde birçok ileri düzey nümerik analize olanak sağlamaktadır. Plaxis 2D (2019) sonlu elemanlar programı INPUT ve OUTPUT olarak iki ana bölümden oluşmaktadır. Input ana bölümü sırasıyla zemin, yapı, mesh, akış koşulları ve kademeli inşaat olmak üzere beş pencereden oluşmaktadır. Modellemelere açılış sayfasında geometri idealizasyonu (ilk yaklaşım olarak düzlem şekil değiştirme), model boyutları, düğüm noktası sayısı ve birim tercihleri tanımlanarak başlanır. Sonlu elemanlar ağı üretilirken oluşturulan kapalı alanlar 6 veya 15 düğüm noktasından oluşan üçgen elemanlara bölünürler. İlk yaklaşım olarak 15 düğüm noktalı elemanlar kullanılmaktadır. Yer değiştirmeler oluşturulan düğüm noktalarında hesaplanmaktadır. 15 düğüm noktalı bir üçgen elemanda 12 gerilme noktası vardır. 15 düğüm noktalı elemanlar, gerilmelerin ve özellikle eksenel simetrik problemlerde yenilme yükünün daha hassas olarak hesaplanmasına olanak sağlar. Input ana bölümünde yer alan zemin penceresinde ilk olarak sondaj

derinliği tanımlanır ve modeli oluşturan zemin tabaka boyutları oluşturulur. Ayrıca yer altı su seviyesi de bu kısımda tanımlanır. Oluşturulan zemin tabakalarına malzeme özellikleri atanır. Geometrik modelde zemin tabakalarının, yapısal elemanların, yapı aşamalarının ve yüklemelerin tanımlanması gerekir.

Hem zemin hem de yapı elemanları malzeme özellikleri zemin, yapı, arayüzey, ankraj ve geogrid başlıkları altında tanımlanır. Plaxis 2D sonlu elemanlar modeli bünyesinde zemin özelliklerini tanımlamak için Mohr Cloumb, Hardening Soil, Hardening Soil Small Strain, Soft Soil, Soft Soil Creep, Jointed Rock gibi birçok ileri düzey zemin modeli bulundurmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi gibi nümerik analiz yöntemleri oluşturulan geoteknik problemlerin analizlerinde zemin modelinin seçimi, mühendislik probleminin ne olduğu ve probleme göre zemin modeli seçimi doğru modellemeler için büyük öneme sahiptir. Örneğin bazı geoteknik problemlerde kısa dönem analizleri (drenajsız analiz) kritik durumu oluştururken bazı problemlerde uzun dönem (drenajlı analiz) analizleri kritik durumu oluşturabilir. Ayrıca zemin modelinin seçiminde yükleme koşullarının da göz önünde bulundurulması önem arz etmektedir. Çalışma kapsamında sismik etkiler altında boru hasar analizleri için oluşturulan sonlu elemanlar modellerinin gerçeğe yakın şekilde temsil edilebilmesi için, dinamik analizlerde göz önüne alınması gereken çevrimli yükleme durumunu içeren Pekleşen zemin (Hardening Soil, HS) ile küçük Şekil değiştirmeler için Pekleşen zemin modelleri (Hardening Soil Small, HS SS) tercih edilmiştir. HS model zemin davranışının simülasyonu için gelişmiş bir model olup elastoplastik bir hiperbolik modeldir. HS SS model ise HS modelden farklı olarak küçük birim deformasyon rijitliğinde zeminin artan rijitliğini de dikkate almaktadır (Benz 2007). Çalışma kapsamında yalnızca HS ve HS SS modelini oluşturan parametreler üzerinde durulmuştur. HS SS model Pekleşen zemin modelinde bulunan parametrelere ek olarak iki rijitlik parametresi içermektedir. Bunlar çok küçük Şekil değiştirmeler için referans kayma modülü (G_0^{ref}) ve kayma modülünün değerinin küçük Şekil değiştirme kayma modülüne göre başlangıçtaki değerinin %70 azaldığı durumdaki kayma Şekil değiştirme seviyesidir ($\gamma_{0.7}$).

Pekleşen zemin modeli (HS) parametreleri olarak; içsel sürtünme açısı(ϕ'), genleşme (dilatansi) açısı (ψ), kohezyon (c), poisson oranı (ν_{ur}), kuru ve doygun

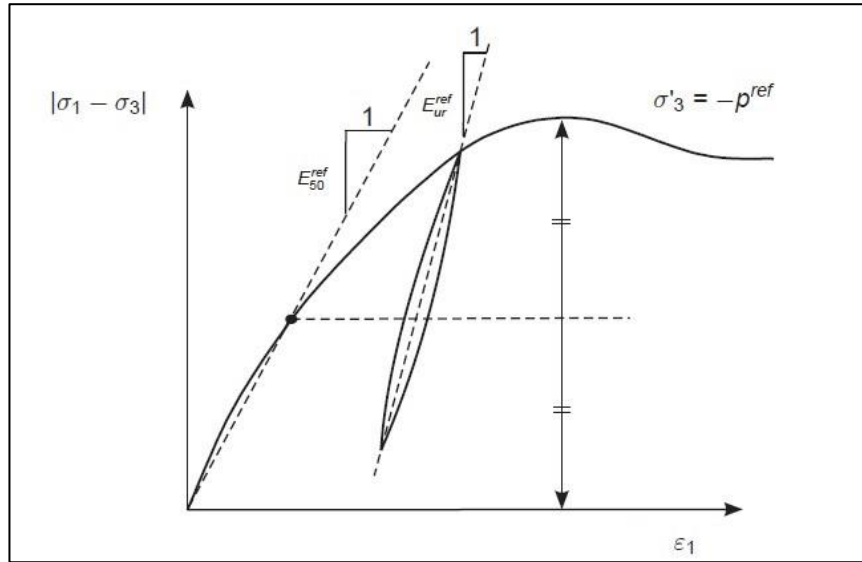
birim hacim ağırlık (γ), sekant rijitliği (E_{50}^{ref}), tanjant rijitliği (E_{oed}^{ref}), yükleme boşaltma rijitliği (E_{ur}^{ref}), gerilme seviyesine bağlı malzeme katsayısı (m) ve normal konsolidasyon için K_0^{nc} değeri girilmelidir. Drenajlı analiz koşulları geçerli ise k_x ve k_y permeabilite katsayıları tanımlanmalıdır.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos\varphi - \sigma'_3 \sin\varphi}{c \cos\varphi + p^{ref} \sin\varphi} \right)^m \quad (5.1)$$

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cos\varphi - \frac{\sigma'_3}{K_0^{nc}} \sin\varphi}{c \cos\varphi + p^{ref} \sin\varphi} \right)^m \quad (5.2)$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cos\varphi - \sigma'_3 \sin\varphi}{c \cos\varphi + p^{ref} \sin\varphi} \right)^m \quad (5.3)$$

Burada c kohezyon, φ içsel sürtünme açısı, m gerilme seviyesine bağlı malzeme katsayısı, $p^{ref} = 100 \text{ kPa}$ referans gerilme ve $K_0^{nc} = 1 - \sin\varphi$ normal konsolidasyon katsayısıdır. Şekil 5.1'de üç eksenli basınç deneyi ile E_{50}^{ref} ve E_{ur}^{ref} hesap grafiği yer almaktadır.



Şekil 5.1: Üç eksenli basınç deneyi ile E_{50}^{ref} ve E_{ur}^{ref} hesabı

Çalışma kapsamında sismik dalgaların zemin tabakaları içerisindeki yayılımını ve sönümlenmesini gerçeğe yakın şekilde temsil edilebilmesi için Rayleigh sönümlenmesi kullanılmıştır. Rayleigh sönümlenme matrisi (C), kütle matrisinin (M) ve rijitlik matrisinin (K) bir kısmından oluşan bir fonksiyondur.

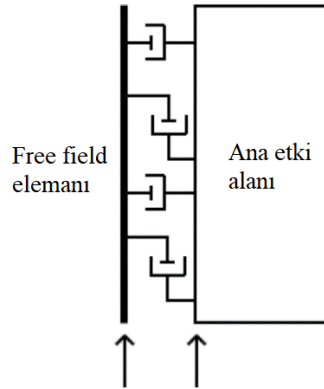
$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (5.4)$$

Rayleigh sönümlenme parametreleri olan α ve β katsayıları sönümlenme oranı ile ilişkilidir. α değerinin büyük olmasının anlamı düşük frekansların o kadar güçlü sönümlendiği, β değerinin büyük olmasının ise yüksek frekansların güçlü sönümlendiği anlamına gelir (Plaxis 2D Reference 2018). α ve β katsayılarını tanımlamak için Target 1 ve Target 2 de yer alan sönümlenme oranlarına (ξ) ek olarak f_1 ve f_2 frekans değerleri tanımlanmalıdır. Rayleigh sönümlenmesi oranı genellikle mühendisler tarafında 0,5-2 aralığında alınmaktadır.

Literatürde frekanslarının belirlenmesi için birçok yöntem mevcuttur. Bu çalışma kapsamında frekansları Hudson ve diğ. (1994) tarafından önerilen frekans eşitliklerine dayanmaktadır.

$$f_1 = \frac{V_s}{4H}, \quad f_2 = \frac{f_p}{f_1} \quad (5.5)$$

Burada V_s kayma dalgası hızı, H tabaka kalınlığını ve f_p giriş sinyalinin baskın frekansını ifade etmektedir. f_2 frekans değeri kendisinden büyük ilk tek sayı şeklinde tanımlanmaktadır (Plaxis 2D Reference 2018). Ayrıca oluşturulan modellerde sınır koşullarının seçimi model içerisine oluşan sismik dalgaların sınırlardan tekrar yansımalarına engel olmak için dikkat edilmesi gereken bir durumdur. Çalışma kapsamında tüm modellerde düşeyde yer alan sınır şartları free field, yatayda model tabanında ise 'compliant base' sınır şartı oluşturulmuştur. Şekil 5.2'de 'free field' sınır şartı şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 5.2: Free field sınır şartı

Yapı sekmesinde geoteknik modelin içerisinde yer alacak yapı elemanları (plate, anchor, embedded beam row, fixed-and anchor, node-to-node anchor ve interface gibi), noktasal ve yayılı yükler (point load ve line load) ayrıca noktasal ve yayılı deplasmanlar (point displacement ve line displacement) tanımlanabilir. Tünel problemlerinde kesit modellemesi için Tünel komutu kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında boru analizleri için yapı elemanı kesiti olarak tünel komutu kullanılmış olup malzeme özellikleri ise 'plate' eleman ile modellenmiştir. Bu yüzden tez kapsamında yalnızca plate eleman malzeme özelliklerine yer verilmiştir. Şekil 5.3'de Plaxis 2D plate eleman malzeme özellikleri giriş ekranı yer almaktadır.

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		<NoName>
Comments		
Colour		RGB 0, 0, 255
Material type		Elastic
Properties		
Isotropic		<input checked="" type="checkbox"/>
EA ₁	kN/m	0,000
EA ₂	kN/m	0,000
EI	kN m ² /m	0,000
d	m	0,000
w	kN/m/m	0,000
v (nu)		0,000
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Prevent punching		<input type="checkbox"/>

Şekil 5.3: Plaxis 2D plate eleman malzeme parametreleri giriş ekranı

Boru elemanı (Plate eleman) malzeme parametreleri olarak; normal rijitlik (EA), eğilme rijitliği (EI), et kalınlığı (d), ağırlık (w) ve poisson oranı (v) değerleri tanımlanmalıdır. Zemin özellikleri ve yapı elemanları tanımlandıktan sonra sürekli ortamı grid elemanlara bölmek için mesh sekmesine geçilir. Oluşturulan mesh boyutları analiz türüne göre belirlenmelidir. Özellikle yapı elemanları etrafında daha yoğun analizler yapılabilmesi için yapı elemanları çevresi daha küçük gridler

oluşturulması tavsiye edilir. Ayrıca gömülü elemanlarda yapı-zemin etkileşiminin gerçekçi bir şekilde temsil edilmesi gerekmektedir. Gömülü boru elemanın geçici yer değiştirmeler açısından sismik etkiler altında hasar görmesinin sebebi zemin ile aynı yönde ve aynı miktarda hareket edememesinden kaynaklanmaktadır. Bunun sebebi ise zemin ile boru arasındaki sürtünme farkından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için gömülü yapı elemanı ile zemin arasında ara yüzey (interface) tanımlanması gerekmektedir. Yapı elemanları tanımlandıktan sonra malzeme özellikleri elemanlara atanır.

$$R_{\text{int}} = \frac{\tan(\varphi)_{\text{arayüzey}}}{\tan(\varphi)_{\text{zemin}}} \quad (5.6)$$

Plaxis 2D paket programında dinamik analiz gerçekleştirmek için dinamik yük olarak ivme-zaman, deplasman-zaman, hız-zaman değerleri yapı sekmesi altında displacement multiplier seçeneği ile tanımlanabilir. Plaxis 2D sonlu elemanlar programında gerçekleştirilen dinamik analizlerde dikkat edilmesi gereken durumlardan biride modele tanımlanacak olan ivme değerlerinin model derinliğinde ölçülen ivme-zaman değerleri olması gerektiğidir. Model derinliğinde oluşan ivme-zaman değerlerini elde etmek için deprem istasyonlarından alınan sismik değerler DEEPSOIL, SHAKE ve EERA gibi tek boyutlu programlarla elde edilebilir. Bu çalışmada tek boyutlu Deepsoil programı kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda elde edilen ivme değerleri hem lineer hem de eşdeğer lineer analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir. HS SS model kalibrasyonu için yapılacak olan çalışmalarda non-linear analiz metodu ile zaman tanım alanlı analizler yapılmalıdır. Bu tür programların kullanımında kullanıcının bilgi ve deneyimi önemli rol oynamaktadır.

5.1.1 AC Tipi Boru Sismik Vaka Analizi

22 Şubat 2011 yılında gerçekleşen 6,2M_w büyüklüğündeki Christchurch depremi içme suyu boru hattı sistemlerinde ciddi hasarlara yol açmıştır. İçme suyu hatları deprem sonrası çalışabilir durumda olması, deprem nedeniyle oluşan maddi hasarların giderilmesinde ve oluşabilecek yangın gibi bir dizi afetin önüne geçilmesinde hayati öneme sahiptir. Ayrıca insani ihtiyaçların karşılanması için de

boru hattı sistemlerinin servisi hayati öneme sahiptir. Yeni Zelanda’da geçmiş yıllarda inşa edilen içme suyu boru hatlarının büyük çoğunluğunu AC tipi borular oluşturmaktadır. AC tipi borular yapısal olarak sismik etkilere karşı CI ve PVC tipi borulara göre daha hassas oldukları için Christchurch depremi sırasında AC tipi borularda önemli sayıda hasar meydana gelmiştir. Çalışma kapsamında yapılan analizler deterministik bir yaklaşım gerektirdiği için hasar analiz noktası seçimlerinde iki duruma dikkat edilmiştir. Öncelikli olarak sismik vaka analizi yapılacak boru hasar noktalarının deprem istasyonlarına en yakın noktalarda yer alması ve bu hasar noktalarının yakınında zemin profilini oluşturmaya elverişli CPT, SPT ve araştırma logu vb. bilgilerin olmasına dikkat edilmiştir. Tablo 5.1’de AC boru tipi için seçilen hasar noktası, sondajlar ve deprem istasyon bilgileri verilmiştir.

Tablo 5.1: AC hasarı analizi için seçilen hasar, sondaj ve istasyon bilgileri

Boru Tipi	Hasar Lokasyon kodu	Sondaj Bilgileri (NZGD)	İstasyon kodu
AC	FID_369	CPT_60538 – BH_60523	CCCC

5.1.1.1 Zemin Parametreleri

Tez kapsamında modeller için gerekli tüm zemin etüt çalışmaları Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanından (NZGD) elde edilmiştir. Sonlu elemanlar modellerinde geoteknik problemlerin modellenmesi için sahaya ve yükleme durumuna göre zemin modeli seçimi önemli bir konudur. Çalışma kapsamında yapılan vaka analizlerinde yükleme koşulunun, sismik etki durumunu temsil etmesi gerektiğine dikkat edilmiştir. Oluşturulan modellerde dinamik analiz koşullarında çevrimli yükleme koşulunun temsil edilebilmesi için HS ve HS SS model tercih edilmiştir. Pekleşen zemin modeli (HS) parametrelerinin belirlenmesinde öncelikli olarak NZGD tarafından sağlanan CPT, SPT ve SCPT loglarından faydalanılmıştır. Elde edilen çalışma sahası zemin etüt verilerinden bazı korelasyonlar kullanılarak pekleşen zemin model parametreleri elde edilmiştir. HS SS model için kumlu zemin tabakalarında Brinkgreve (2010) tarafından sunulan rölatif sıklığa (D_r) bağlı çeşitli korelasyonlar kullanılmıştır. Ayrıca çalışma sahasında yapılan zemin etütlerinden elde edilen V_s ve G parametrelerinden elastisite modülü literatürde yaygın olarak kullanılan (5.7) ve (5.8) eşitliği ile hesaplanabilmektedir.

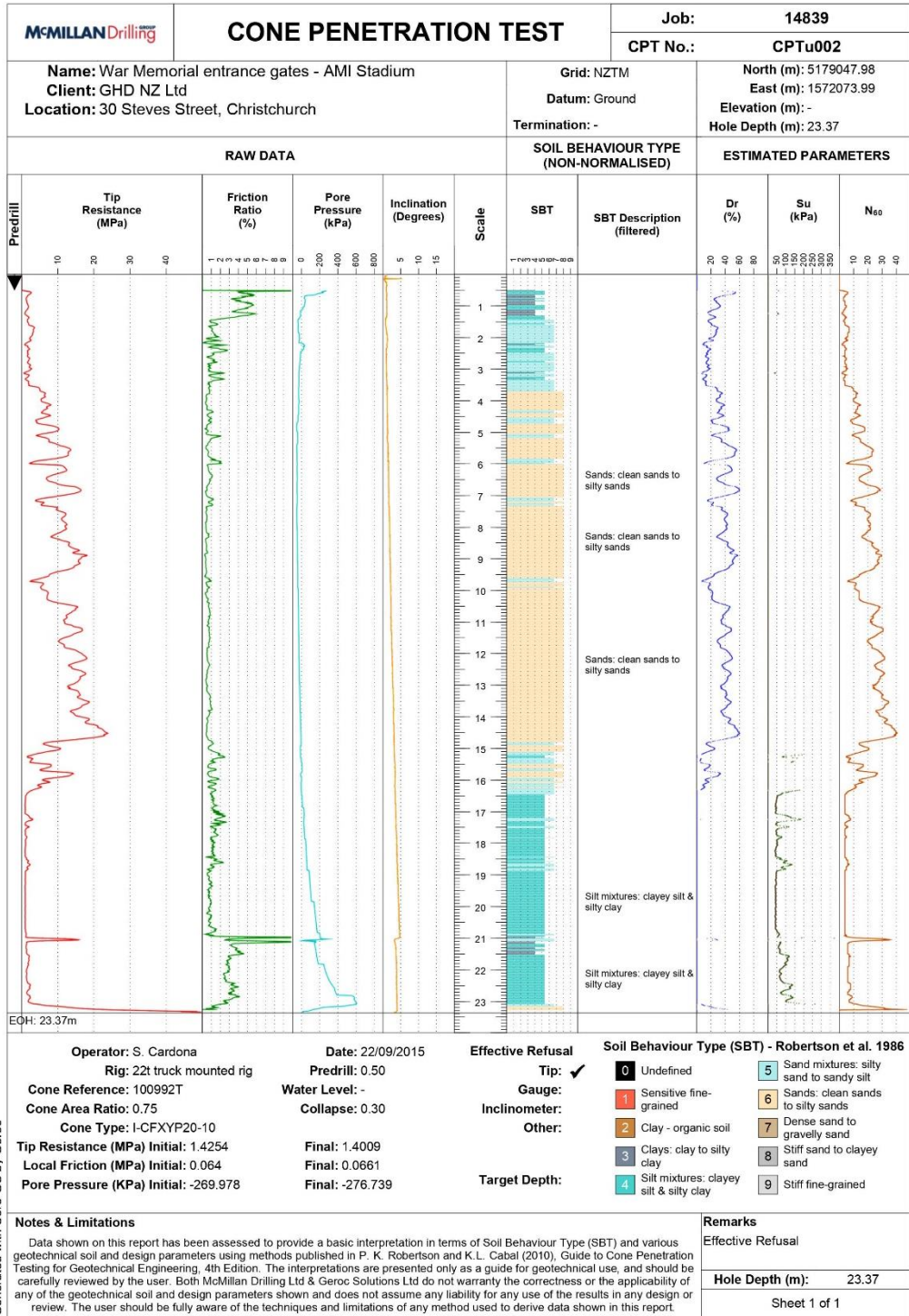
$$G = V_s^2 * \rho \quad (5.7)$$

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (5.8)$$

Burada G kayma modülü, (V_s) kayma dalgası hızı, ρ yoğunluk, ν poisson oranını ifade etmektedir. Sahada kayma dalgası hızı (V_s) belirlenmediği için McGann ve diğ. (2015) tarafından Christchurch zemininde 30 m'den daha sığ zeminler için oluşturulmuş (5.9) eşitliğinde yer alan CPT- V_s arasındaki korelasyon kullanılmıştır.

$$V_s = 18,4q_c^{0,144}f_s^{0,0832}z^{0,278} \quad (5.9)$$

Burada q_c (KPa) uç direnci, f_s (KPa) sürtünme direnci ve z (m) ise yüzeyden itibaren tabaka derinliğidir. Hasar noktasında sonlu elemanlar modelini oluşturmak için NZGD veri tabanında yer alan BH_60523 ve CPT_60538 araştırma verilerinden faydalanılmıştır. Şekil 5.4'de idealize zemin profilini oluşturmak için faydalanılan CPT_60538 verileri yer almaktadır.



Şekil 5.4: AC vaka analizi için kullanılan CPT verisi

Kumlu tabakalarda kullanılan Brinkgreve (2010) tarafından sunulan bazı eşitlikler Tablo 5.2'de yer almaktadır. Tablo 5.3'de AC boru analizi için oluşturulan zemin modeli parametreleri verilmiştir.

Tablo 5.2:Brinkgreve (2010) tarafından kumlu zeminler için önerilen bazı eşitlikler

Parametreler	Eşitlikler [D_r (%)]	
Kuru birim hacim ağırlık:	$\gamma_k = 15 + 4.0D_r/100$ [kN/m^3]	(5.10)
Doygun birim hacim ağırlık:	$\gamma_d = 19 + 1.6D_r/100$ [kN/m^3]	(5.11)
Sekant rijitliği:	$E_{50}^{ref} = 60000D_r/100$ [kN/m^2]	(5.12)
Tanjant rijitliği:	$E_{oed}^{ref} = 60000D_r/100$ [kN/m^2]	(5.13)
Yükleme-boşaltma rijitliği:	$E_{ur}^{ref} = 180000D_r/100$ [kN/m^2]	(5.14)
İçsel sürtünme açısı:	$\varphi = 28 + 12.5 D_r/100$	(5.15)
Kayma modülü:	$G_0 = 60000 + 68000D_r/100$	(5.16)
Kayma deformasyon seviyesi	$\gamma_{0.7} = (2 - D_r/100) \times 10^{-4}$	(5.17)

Tablo 5.3: AC tipi boru sismik analizi için oluşturulan zemin modeli parametreleri

Zemin türü	SM	SP	ML
Malzeme modeli	HS SS	HS SS	HS
Model davranış tipi	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı
Kuru birim hacim ağırlık (γ_k , Kpa)	15,8	16,6	14,75
Doygun birim hacim ağırlık (γ_d , Kpa)	19,32	20,65	17,7
İleri düzey parametreler			
Sekant rijitliği (E_{50}^{ref} , Mpa)	12	24	8,4
Tanjant rijitliği (E_{oed}^{ref} , Mpa)	12	24	8,4
Yükleme-boşaltma rijitliği (E_{ur}^{ref} , Mpa)	36	72	25,2
Kayma modülü (G_0^{ref} , MPa)	73,6	87,2	-
Kayma deformasyon seviyesi ($\gamma_{0.7}$)	1,8E-4	1,6E-4	-
Kohezyon (c'_{ref} , kPa)	1	1	6
İçsel sürtünme açısı (ϕ')	30,5	33	1
Dilatansiyon açısı (ψ)	0,5	3	-
Poisson oranı (ν)	0,2	0,3	0,2

Ayrıca zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınabilmesi için R_{int} arayüzey değerinin tanımlanması gerekmektedir. Gömülü boru elemanı yalnızca SM tabakasında yer aldığı için R_{int} değeri yalnızca bu tabakada tanımlanmıştır.

5.1.1.2 AC Boru Elemanı Parametreleri

22 Şubat 2011 yılında meydana gelen M_w 6,2 büyüklüğündeki Christchurch depremi Christchurch şehrinde içme suyu boru hatlarının büyük çoğunluğunu

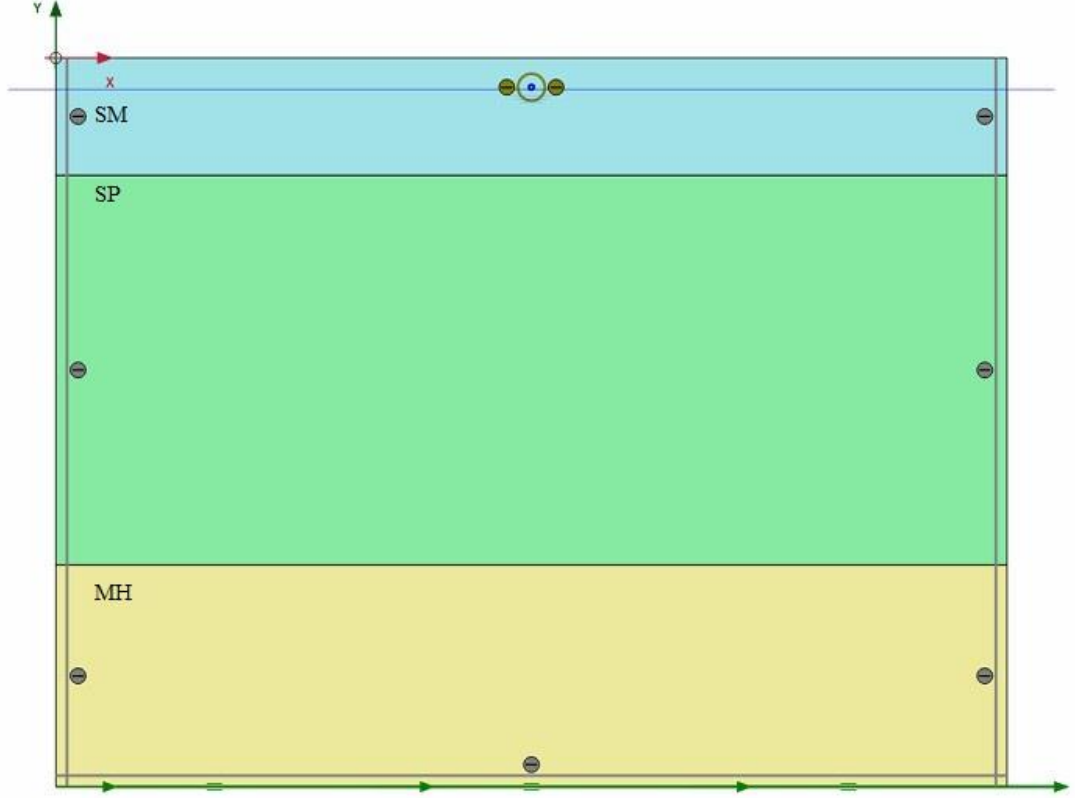
oluşturan AC tipi borularda ciddi hasarlar oluşmasına neden olmuştur. Çalışma sahasında yaklaşık olarak 232,8 km uzunluğunda AC boru hattı sistemi bulunmaktadır. Çalışma sahasında yer alan AC tipi borularda deprem sonrası oluşan hasar sayısı ise 703 olarak belirlenmiştir.

Plaxis 2D paket programında input bölümünde yer alan zemin (Soil) sekmesinde model boyutları ve malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra Yapı (Structure) sekmesine geçilir. Yapı sekmesinde boru elemanı tünel komutu ile kesit modeli oluşturularak plate eleman ile malzeme parametreleri tanımlanmıştır. Tablo 5.4’de AC tipi boru elemanı parametreleri yer almaktadır.

Tablo 5.4: AC boru elemanı parametreleri (Stephens ve diğ. 2005)

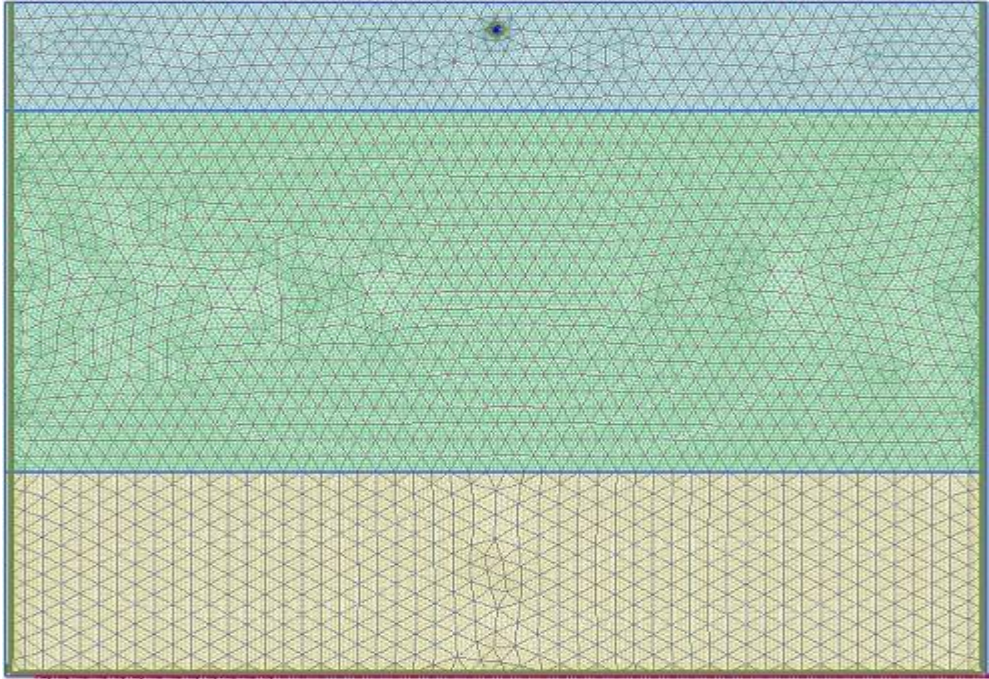
AC	Değer	Birim	Boru çapı	İnşa yılı
Normal rijitlik (EA)	133200	kN/m	150 mm	1984
Eğilme rijitliği (EI)	304	kNm ² /m		
Birim ağırlık (w)	0,12	kN/m		
Poisson oranı(v)	0,15	-		

Materyal sekmesi altında plate eleman olarak malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra ilgili boru elemana malzeme özellikleri atanmıştır. Boru eleman ile zemin arasındaki zemin-yapı etkileşiminin sağlanabilmesi için boru elemanı etrafında interface eleman ile ara yüzey tanımlandı. Sismik analiz için gerekli 22 Şubat 2011 tarihindeki Christchurch depreminin ivme-zaman değerleri ‘dynamic multipliers’ seçeneği ile tanımlandı. Dinamik analiz için gerekli sismik yükü oluşturabilmek için yapı sekmesinde model tabanı boyunca ‘line displacement’ yükü oluşturuldu. Daha sonra oluşturulan yük x yönünde tanımlı y yönünde sabit olarak ayarlanır ve bu yüke modele yüklenen ivme-zaman dosyası atanır. Ayrıca modelin sınır şartları ‘create interface on the boundry’ komutu ile oluşturulmuştur. Şekil 5.5’de yapı elemanları oluşturulduktan sonraki model kesiti yer almaktadır.



Şekil 5.5: AC boru hasarı analizi için oluşturulan model kesiti

Daha sonra Mesh sekmesine geçilerek orta büyüklükte otomatik sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Şekil 5.6'da sürekli ortamın mesh sonrası elde edilen model kesiti yer almaktadır.

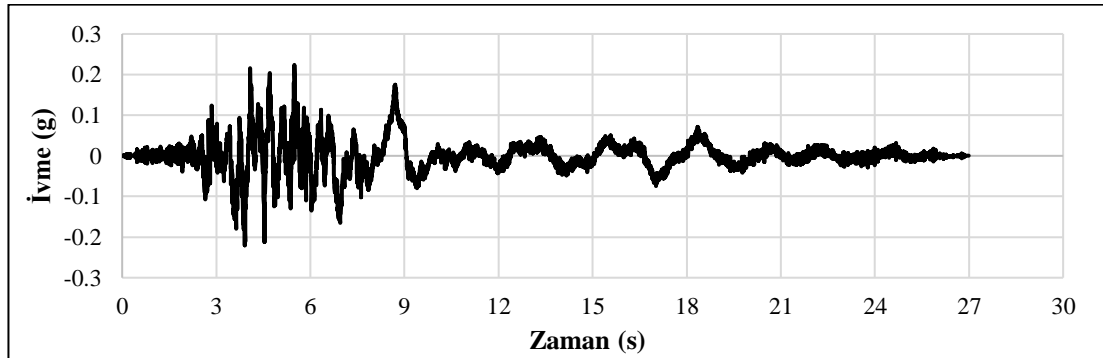


Şekil 5.6: AC boru hasarı analizi için oluşturulan sonlu elemanlar ağı

5.1.1.3 Deprem Veri Seti

Tez kapsamında Canterbury deprem dizisi olarak bilinen biz dizi depremin en büyüklerinden olan $M_w6,2$ büyüklüğündeki 22 Şubat 2011 Christchurch depremi ele alınmıştır. $M_w6,2$ büyüklüğündeki Christchurch depremi içme suyu boru hattı sistemlerinde önemli hasarlara yol açmıştır. Bölgede yapılmış olan deprem öncesi ve deprem sonrası geoteknik çalışmalar eşsiz bir veri seti sunmaktadır.

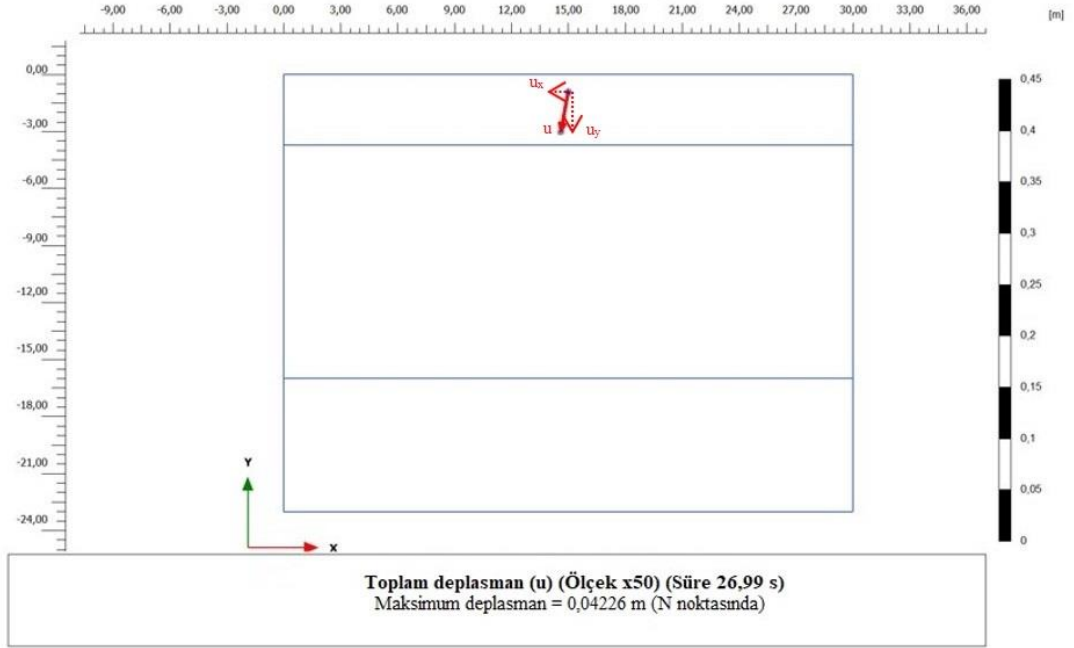
Plaxis 2D sonlu elemanlar programında dinamik analiz için gerekli ivme-zaman veri seti PEER Ground Motion Database web sayfasından temin edilmiştir. Ancak alınan veriler zemin yüzeyinde ölçülen sismik verilerdir. Oluşturulan modellerde tanımlanması gereken ivme-zaman değerleri ise model tabanında oluşan ivme değerleri olması gerekmektedir. AC boru hasarı için yapılan analizde kullanılan ivme-zaman kaydı 22 Şubat 2011 Christchurch depreminin Christchurch Cathedral Collage (CCCC) yer hareketi ölçüm istasyonunda ölçülen sismik değerleridir. CCCC istasyonunun bulunduğu zemin profili AC analiz noktasının zemin profili benzerlik göstermektedir (bkz. Şekil 5.24). Böylelikle azalım ilişkileri formüllerini kullanma zorunluluğu ortadan kalkmıştır. Tez kapsamında yapılan sismik analizler 2 boyutlu olarak ele alınmasından dolayı modelde yer alan boru elemanının maruz kalacağı ivme değeri vektörel olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bileşke ivme Deepsoil programı ile ters evrişim işlemi yapılarak model tabanına indirgenmiştir. Elde edilen ivme kaydı ‘displacement multiplier’ yükü olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.7’de model için oluşturulan ivme-zaman kaydı yer almaktadır.



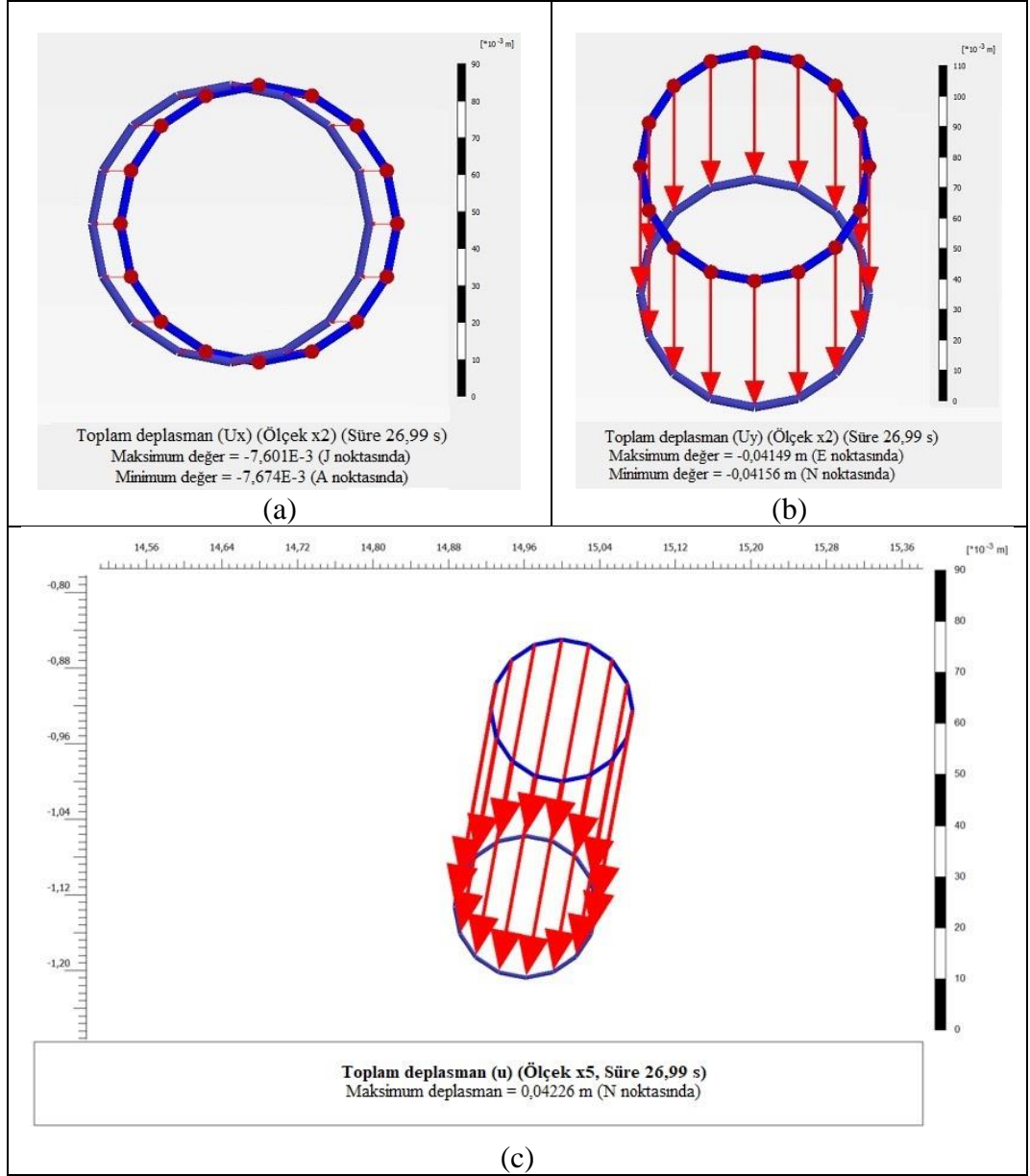
Şekil 5.7: Deepsoil ile AC boru hasarı için model derinliğinde elde edilen ivme-zaman kaydı

5.1.1.4 AC Vaka Analizi Sonuçları

AC boru tipi dinamik vaka analizi kapsamında 22 Şubat 2011 Christchurch depremi sebebiyle hasar görmüş, hasar veri tabanında AC FID_369 kodu ile kayıtlı AC hasar noktası kullanılmıştır. AC vaka analizi için oluşturulan sonlu elemanlar modeli sonuçları dinamik etki ile oluşan yatay, düşey ve toplam yer değiştirmeler olarak ele alınmıştır. Ayrıca Christchurch depremi sismik aktivesi altında AC tipi borunun maruz kaldığı normal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri ortaya konmuştur. Şekil 5.8’de AC vaka analizi için oluşturulan modelin boru yer değiştirmesi görülmektedir. Şekil 5.9’da sismik etkiler altında AC tipi boru üzerinde oluşan yatay, düşey ve toplam yer değiştirme miktarları yer almaktadır.

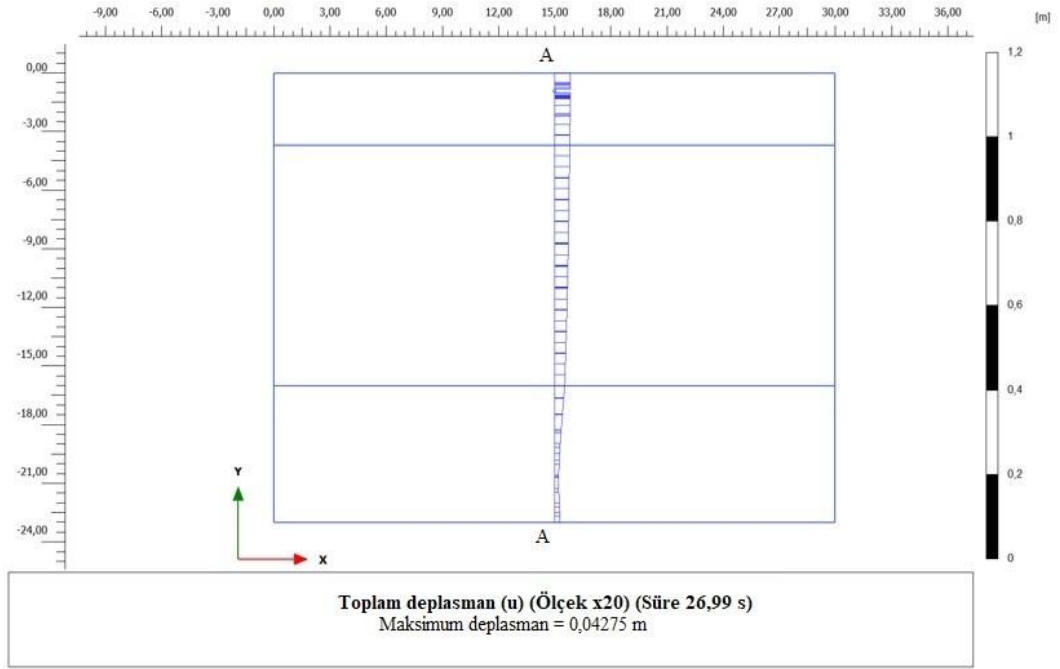


Şekil 5.8: AC tipi boru analizinde boru yer değiştirmesi

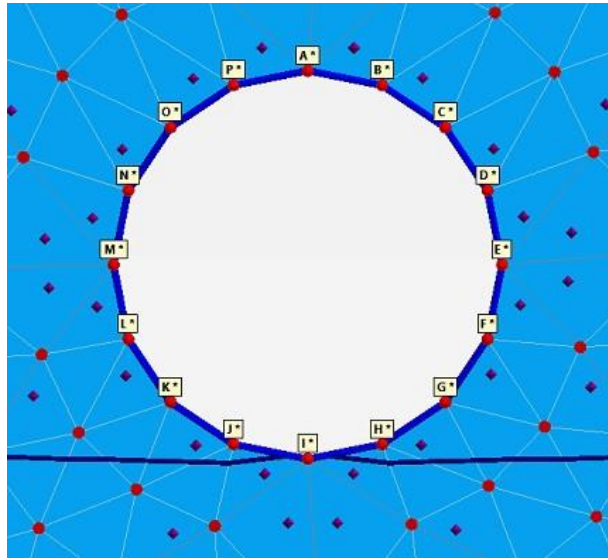


Şekil 5.9: AC tipi boru a)yatay, b)düşey ve c) toplam yer değiştirmeler

Şekil 5.10'da düşeyde AC boru merkezini kesen A-A ekseninde oluşan zemin deformasyonları görülmektedir. Şekil 5.11'de AC tipi boru kesiti üzerinde seçilen analiz noktaları yer almaktadır.

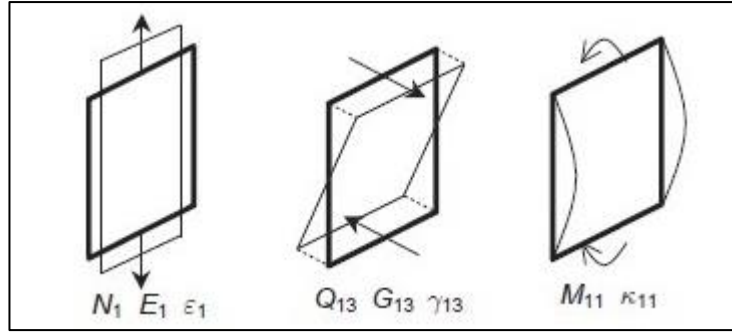


Şekil 5.10: Düşeyde AC boru merkezini kesen A-A eksenli zemin deformasyonu

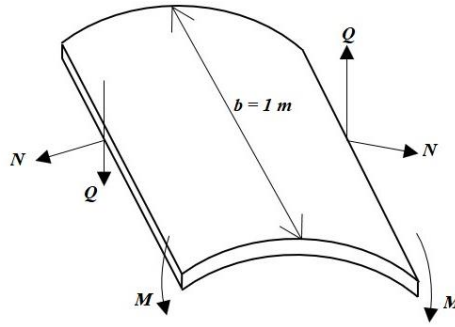


Şekil 5.11: AC boru üzerinde seçilen noktalar

Plaxis ile Output penceresi altında boru üzerinde oluşan normal kuvvetler (N), kesme kuvvetleri (Q) ve eğilme momenti (M) değerleri elde edilebilmektedir. Şekil 5.12'de plate (boru) eleman üzerinde oluşan pozitif yöndeki normal kuvvet (N_1), kesme kuvveti (Q_{13}) ve eğilme momenti (M_{11}) değerlerinin gösterimi yer almaktadır. Boru eleman üzerinde oluşan kuvvetlerin şematik gösterimi Şekil 5.13'de yer almaktadır.



Şekil 5.12: Plate eleman üzerinde oluşan pozitif yönde normal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti (Plaxis material models manual 2018)



Şekil 5.13: Boru üzerinde oluşan kuvvetlerin şematik gösterimi

Ayrıca plate eleman üzerinde analiz süresi boyunca oluşan kuvvetlerin maksimum ve minimum değerlerine ulaşılabilmektedir. Tablo 5.5’de seçilen noktalar üzerinde oluşan normal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri yer almaktadır. Ayrıca boru eleman üzerinde deprem süresi boyunca oluşan kuvvetlerin maksimum ve minimum değerleri görülmektedir. Bu değerlerin boruda hasar oluşturacak seviyelerin altında olduğu görülmektedir.

Tablo 5.5: AC boru üzerinde seçilen noktalar için normal, kesme ve eğilme momentleri

Sembol	N [kN/m]	N _{min} [kN/m]	N _{max} [kN/m]	Q [kN/m]	Q _{min} [kN/m]	Q _{max} [kN/m]	M [kN m/m]	M _{min} [kN m/m]	M _{max} [kN m/m]
A	-4.35E-01	-6.24E-01	0.00E+00	-5.22E-02	-9.16E-02	0.00E+00	-1.03E-02	-1.87E-02	0.00E+00
A	-4.33E-01	-6.24E-01	0.00E+00	1.73E-02	-2.11E-02	6.98E-02	-1.03E-02	-1.87E-02	0.00E+00
B	-5.09E-01	-7.01E-01	0.00E+00	2.35E-01	0.00E+00	2.63E-01	-1.33E-02	-2.10E-02	0.00E+00
C	-7.23E-01	-8.61E-01	0.00E+00	3.22E-01	0.00E+00	3.59E-01	-2.21E-02	-2.68E-02	0.00E+00
D	-9.45E-01	-1.02E+00	0.00E+00	2.38E-01	0.00E+00	2.82E-01	-3.11E-02	-3.28E-02	0.00E+00
E	-1.05E+00	-1.12E+00	0.00E+00	1.02E-02	-2.83E-02	4.42E-02	-3.48E-02	-3.64E-02	0.00E+00
E	-1.04E+00	-1.12E+00	0.00E+00	2.02E-02	-2.70E-02	5.43E-02	-3.48E-02	-3.64E-02	0.00E+00
F	-9.67E-01	-1.04E+00	0.00E+00	-2.21E-01	-2.49E-01	0.00E+00	-3.18E-02	-3.39E-02	0.00E+00
G	-7.50E-01	-8.68E-01	0.00E+00	-3.27E-01	-3.61E-01	0.00E+00	-2.29E-02	-2.67E-02	0.00E+00
H	-5.27E-01	-7.02E-01	0.00E+00	-2.56E-01	-3.00E-01	0.00E+00	-1.38E-02	-2.07E-02	0.00E+00
I	-4.37E-01	-6.18E-01	0.00E+00	-4.77E-02	-8.87E-02	0.00E+00	-1.01E-02	-1.85E-02	0.00E+00
I	-4.37E-01	-6.18E-01	0.00E+00	2.82E-02	-1.26E-02	7.45E-02	-1.01E-02	-1.85E-02	0.00E+00
J	-5.20E-01	-7.04E-01	0.00E+00	2.44E-01	0.00E+00	2.73E-01	-1.33E-02	-2.09E-02	0.00E+00
K	-7.40E-01	-8.72E-01	0.00E+00	3.25E-01	0.00E+00	3.63E-01	-2.23E-02	-2.69E-02	0.00E+00
L	-9.59E-01	-1.04E+00	0.00E+00	2.32E-01	0.00E+00	2.76E-01	-3.13E-02	-3.31E-02	0.00E+00
M	-1.05E+00	-1.12E+00	0.00E+00	9.08E-03	-3.63E-02	4.37E-02	-3.47E-02	-3.64E-02	0.00E+00
M	-1.04E+00	-1.12E+00	0.00E+00	3.46E-04	-4.00E-02	3.47E-02	-3.47E-02	-3.64E-02	0.00E+00
N	-9.50E-01	-1.02E+00	0.00E+00	-2.22E-01	-2.52E-01	0.00E+00	-3.15E-02	-3.37E-02	0.00E+00
O	-7.33E-01	-8.56E-01	0.00E+00	-3.17E-01	-3.54E-01	0.00E+00	-2.28E-02	-2.65E-02	0.00E+00
P	-5.19E-01	-6.99E-01	0.00E+00	-2.48E-01	-2.92E-01	0.00E+00	-1.40E-02	-2.08E-02	0.00E+00

5.1.2 CI Tipi Boru Sismik Vaka Analizi

22 Şubat 2011 yılında gerçekleşen M_w 6,2 büyüklüğündeki Christchurch depremi CI tipi içme suyu boru hattı sistemlerinde ciddi hasarlara yol açmıştır. Geçmiş yıllarda Christchurch için inşa edilen içme suyu boru hatlarının büyük çoğunluğunu AC tipi borulardan sonra CI tipi borular oluşturmaktadır. CI tipi borular Christchurch içme suyu boru hattı sistemini oluşturan en yaşlı borular arasında yer almaktadır. Hasar noktasının seçiminde meydana gelen hasarın yer hareketi ölçüm istasyonuna ve zemin profilini oluşturmaya elverişli CPT, SPT ve sondajlarının bulunduğu noktalara yakın olmasına dikkat edilmiştir. Tablo 5.6'da CI boru tipi için seçilen hasar noktası, sondajlar ve deprem istasyon bilgileri yer almaktadır.

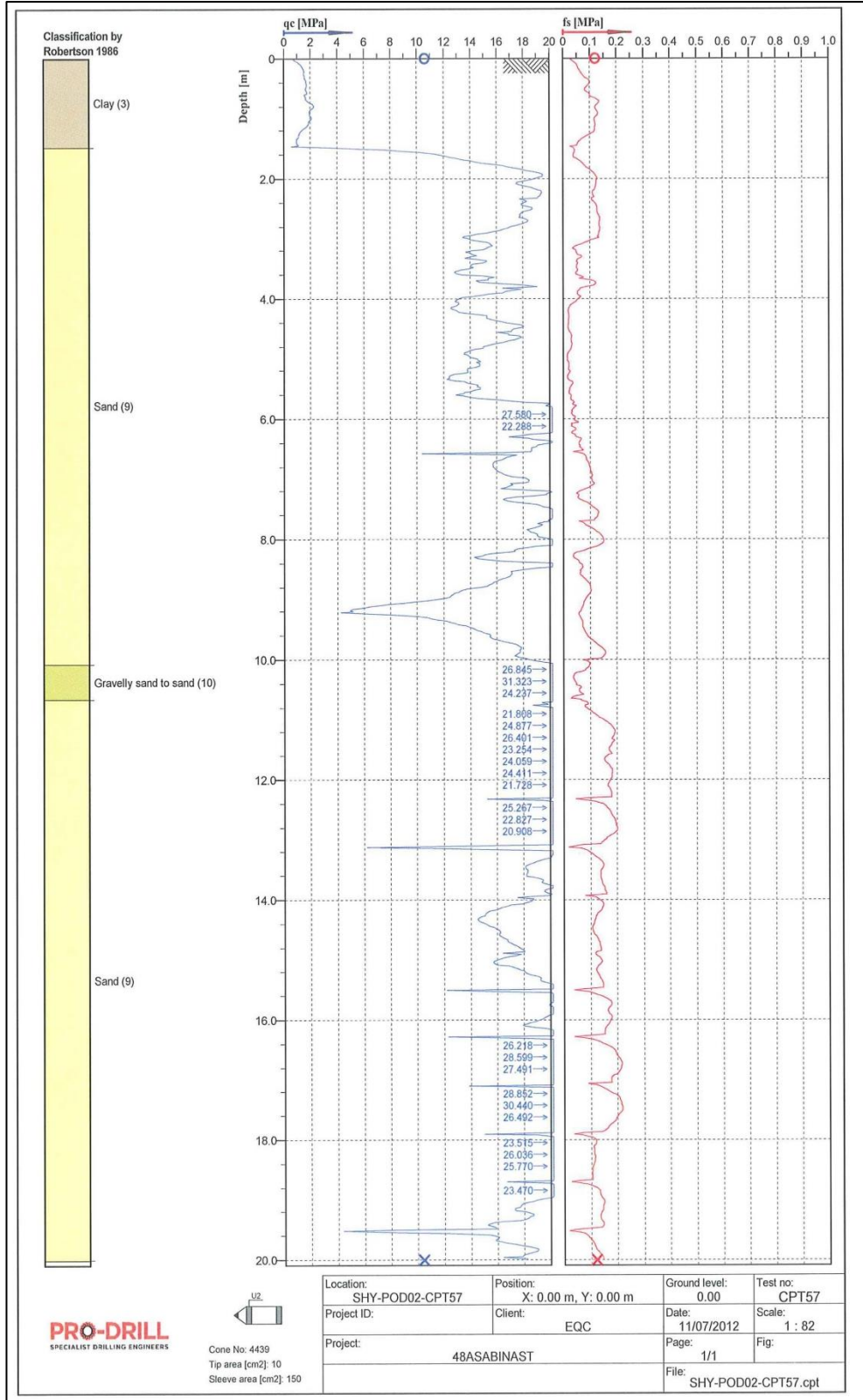
Tablo 5.6: CI hasarı analizi için seçilen hasar, sondaj ve istasyon bilgileri

Boru Tipi	Hasar Lokasyon kodu	Sondaj Bilgileri (NZGD)	İstasyon kodu
CI	FID_1100	SCPT_57346 – CPT_5170	SHLC

5.1.2.1 Zemin Parametreleri

İleri düzey zemin modellerinde parametre seçimi modelin gerçeğe yakın şekilde analiz edilebilmesi için büyük öneme sahiptir. NZGD tarafından sağlanan zemin etüdü saha çalışmalarından modeller için gerekli model parametreleri hesaplanmıştır. CI tipi boru dinamik vaka analizi için oluşturulan sonlu elemanlar modelinde pekleşen zemin modeli (HS) kullanılmıştır.

Hasar noktasında sonlu elemanlar modelini oluşturmak için NZGD veri tabanında yer alan SCPT_57346, BH_57242 ve CPT_3788 araştırma verilerinden faydalanılmıştır. Şekil 5.14'de idealize zemin profilini oluşturmak için faydalanılan CPT_3788 verileri yer almaktadır.



Şekil 5.14: CI vaka analizi için kullanılan CPT verisi

NZGD tarafından sağlanan zemin etüdü saha çalışmaları ile elde edilmiş idealize zemin profili parametreleri Tablo 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.7: CI tipi boru hasarı sismik analizi için oluşturulan idealize zemin modeli parametreleri

Zemin türü	ML	SP1	GW1	SP2	GW2	SP3
Genel						
Malzeme modeli	HS	HS	HS	HS	HS	HS
Model davranış tipi	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı
Kuru birim hacim ağırlık (γ_k , Kpa)	19	16,11	15,83	16,1	15,83	16,52
Doygun birim hacim ağırlık (γ_d , Kpa)	19	19,5	19	19,5	19	20
İleri düzey parametreler						
Sekant rijitliği (E_{50}^{ref} , Mpa)	16,73	50	74,82	91,24	93,04	186,82
Tanjant rijitliği (E_{oed}^{ref} , Mpa)	16,73	50	74,82	91,24	93,04	186,82
Yükleme-boşaltma rijitliği (E_{ur}^{ref} , Mpa)	50,19	150	224,46	273,72	279,12	560,46
Kohezyon (c'_{ref} , Kpa)	20	1	1	1	1	1
İçsel sürtünme açısı (ϕ')	1	32	34	29	30	38
Dilatansi açısı (ψ)	-	2	4	-	-	8
Poisson oranı (ν_{ur})	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Ayrıca zemin-yapı etkileşiminin analizlerde dikkate alınabilmesi için R_{int} arayüz değerinin tanımlanması gerekmektedir. Gömülü yapı elemanı yalnızca ML tabakasında yer aldığı için R_{int} değeri yalnızca bu tabakada tanımlanmıştır.

5.1.2.2 CI Boru Elemanı Parametreleri

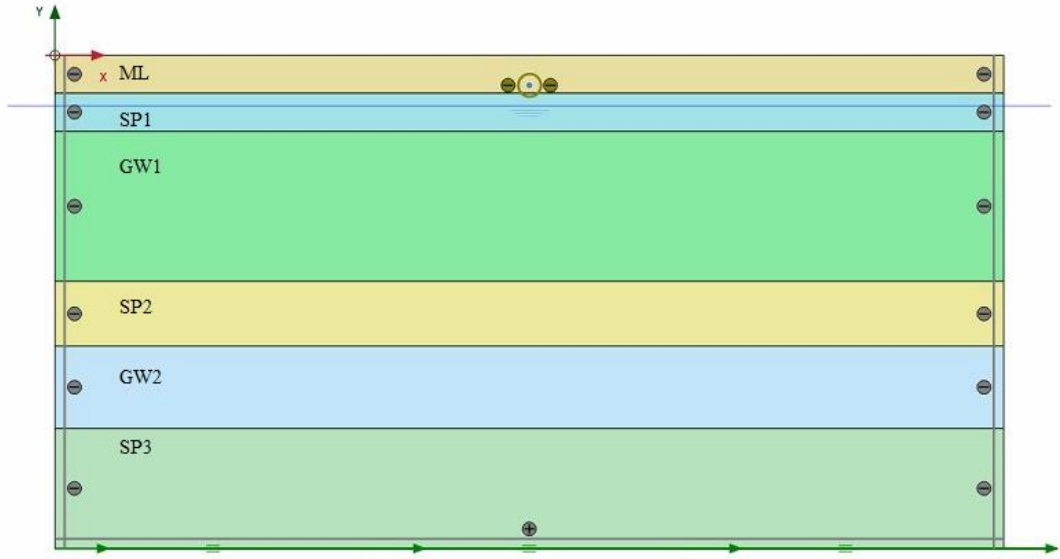
Tez kapsamında çalışma bölgesinde yer alan içme suyu boru hattı sisteminin AC tipi borulardan sonra en uzun boru hattını CI tipi borular oluşturmaktadır. Çalışma bölgesinde yaklaşık olarak 90 km uzunluğunda CI tipi içme suyu boru hattı bulunmaktadır. Çalışma kapsamında 22 Şubat 2011 Christchurch depremi sonrası CI tipi borularda meydana gelen 162 hasar noktası üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Yapı sekmesinde boru elemanı tünel komutu ile kesit modeli oluşturularak plate eleman ile malzeme parametreleri tanımlanmıştır. Tablo 5.8'de CI tipi boru elemanı parametreleri yer almaktadır.

Tablo 5.8: CI boru parametreleri (Rajani ve Tesfamariam, 2007)

CI	Değer	Birim	Boru çapı	İnşa yılı
Normal rijitlik (EA)	235200	kN/m	100 mm	1956
Eğilme rijitliği (EI)	272,86	kNm ² /m		
Birim ağırlık (w)	0,084	kN/m		
Poisson oranı(v)	0,30	-		

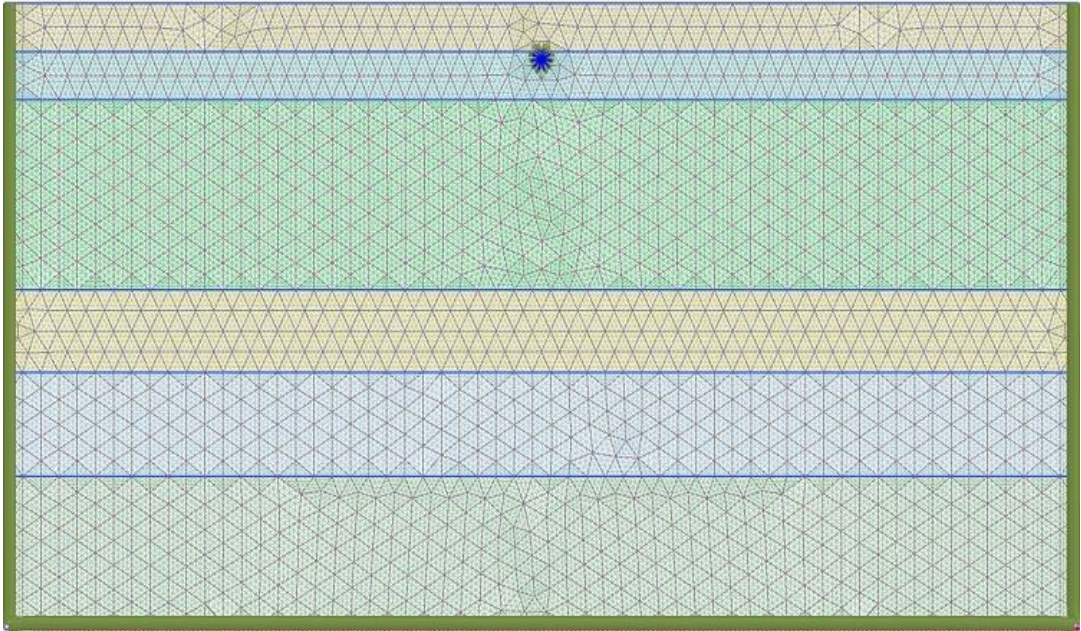
Plate eleman olarak malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra ilgili boru elemana malzeme özellikleri atanmıştır. Daha sonra AC boru tipi için belirtilen

analiz adımları takip edilerek model oluşturulmuştur. Şekil 5.15’de yapı elemanları oluşturulduktan sonra elde edilen model kesiti yer almaktadır.



Şekil 5.15: CI boru hasarı analizi için oluşturulan model kesiti

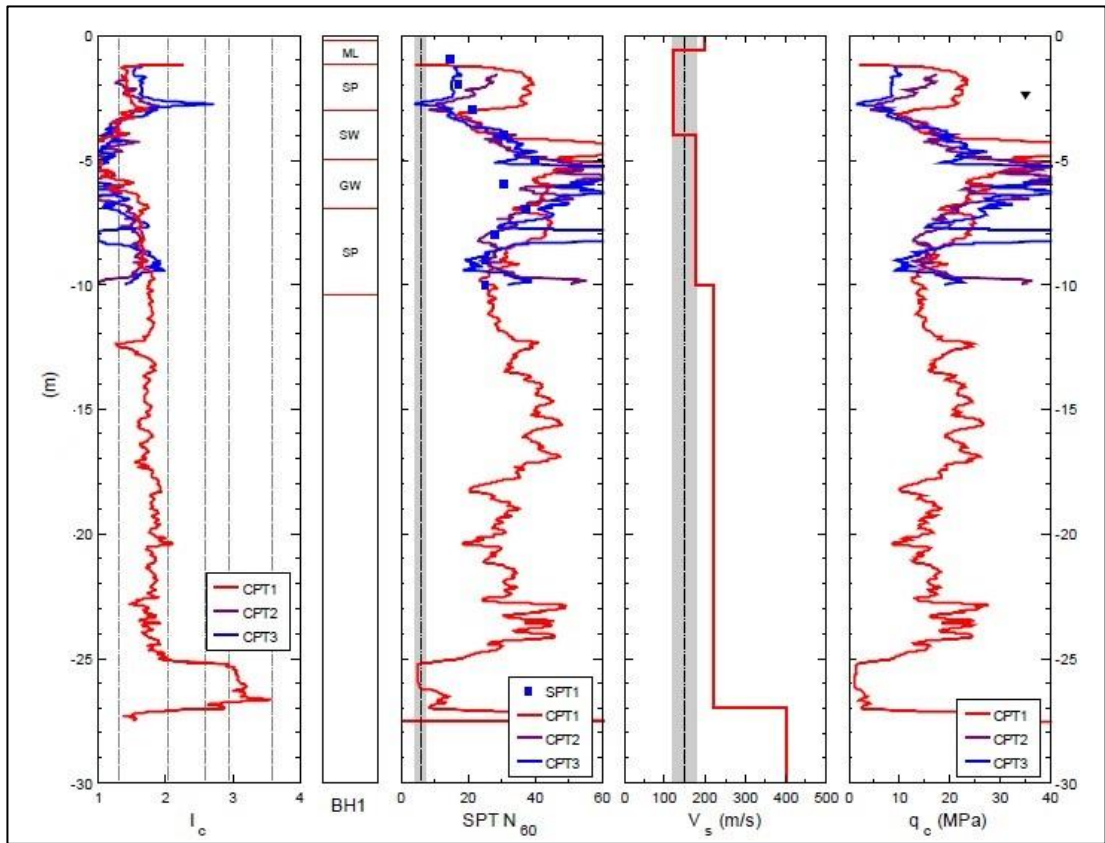
Daha sonra Mesh sekmesine geçilerek orta büyüklükte sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Şekil 5.16’da sürekli ortamın mesh sonrası elde edilen model kesiti yer almaktadır.



Şekil 5.16: CI boru hasarı analizi için oluşturulan sonlu elemanlar ağı

5.1.2.3 Deprem Veri Seti

Dökme demir (CI) boru hasarı analizi için oluşturulan sonlu elemanlar modelinde kullanılan deprem kaydı Shirley Library (SHLC) yer hareketi ölçüm istasyonunda ölçülen $M_w6,2$ büyüklüğündeki 22 Şubat 2011 Christchurch depremidir. Shirley Library (SHLC) yer hareketi ölçüm istasyonundan $M_w6,2$ büyüklüğündeki Christchurch depremi ivme aydı PEER Ground Motion Database web sayfası aracılığıyla alınmıştır. Şekil 5.17’de SHLC yer hareketi ölçüm istasyonunun bulunduğu zemin profili görülmektedir. CI için oluşturulan sonlu elemanlar modelinde yer alan idealize zemin profili ile SHLC yer hareketi ölçüm istasyonunun bulunduğu zemin profili benzerlik göstermektedir.



Şekil 5.17: SHLC yer hareketi ölçüm istasyonu zemin profili CPT verileri (Wotherspoon ve diğ. 2014)

SHLC istasyonundan Christchurch depreminin yatayda oluşturduğu ivme-zaman değerlerinden boru hattı oryantasyonu göz önüne alınarak bileşke ivme düzenlenmiştir. Deepsoil programında zemin profili oluşturularak ters evrişim işlemi ile model tabanında oluşan ivme zaman değerleri elde edilmiştir. Sonlu elemanlar

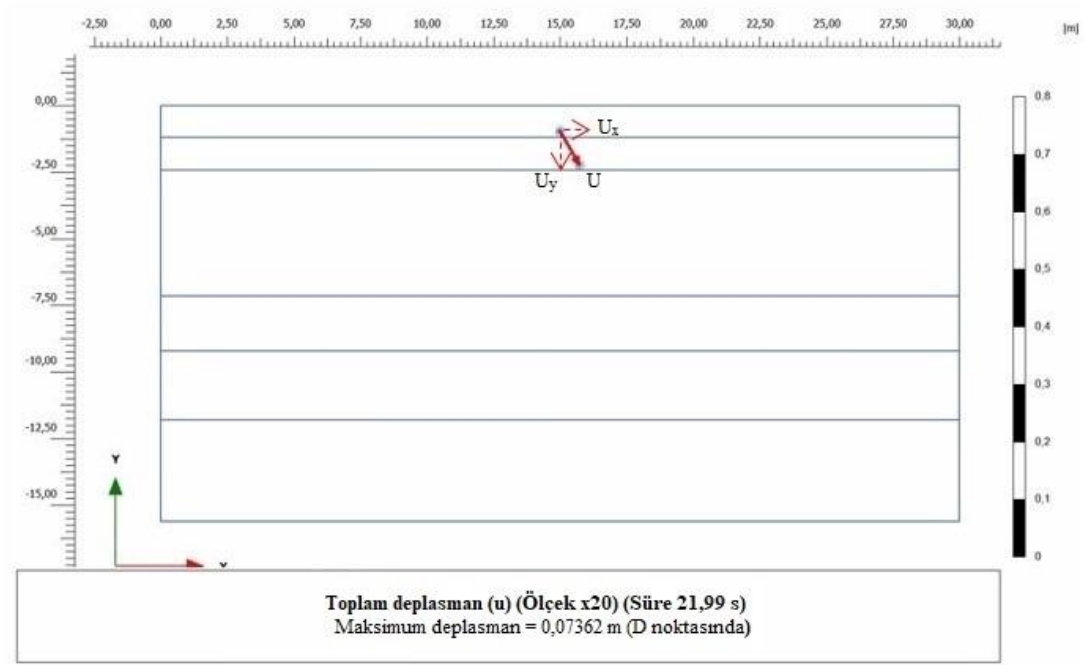
modelinde giriş sinyali modelin tabanından verilmektedir. Elde edilen ivme kaydı ‘displacement multiplier’ yükü olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.18’de CI analiz modeli için oluşturulan ivme-zaman kaydı yer almaktadır.



Şekil 5.18: Deepsoil ile CI boru hasarı analizi için model derinliğinde elde edilen ivme-zaman kaydı

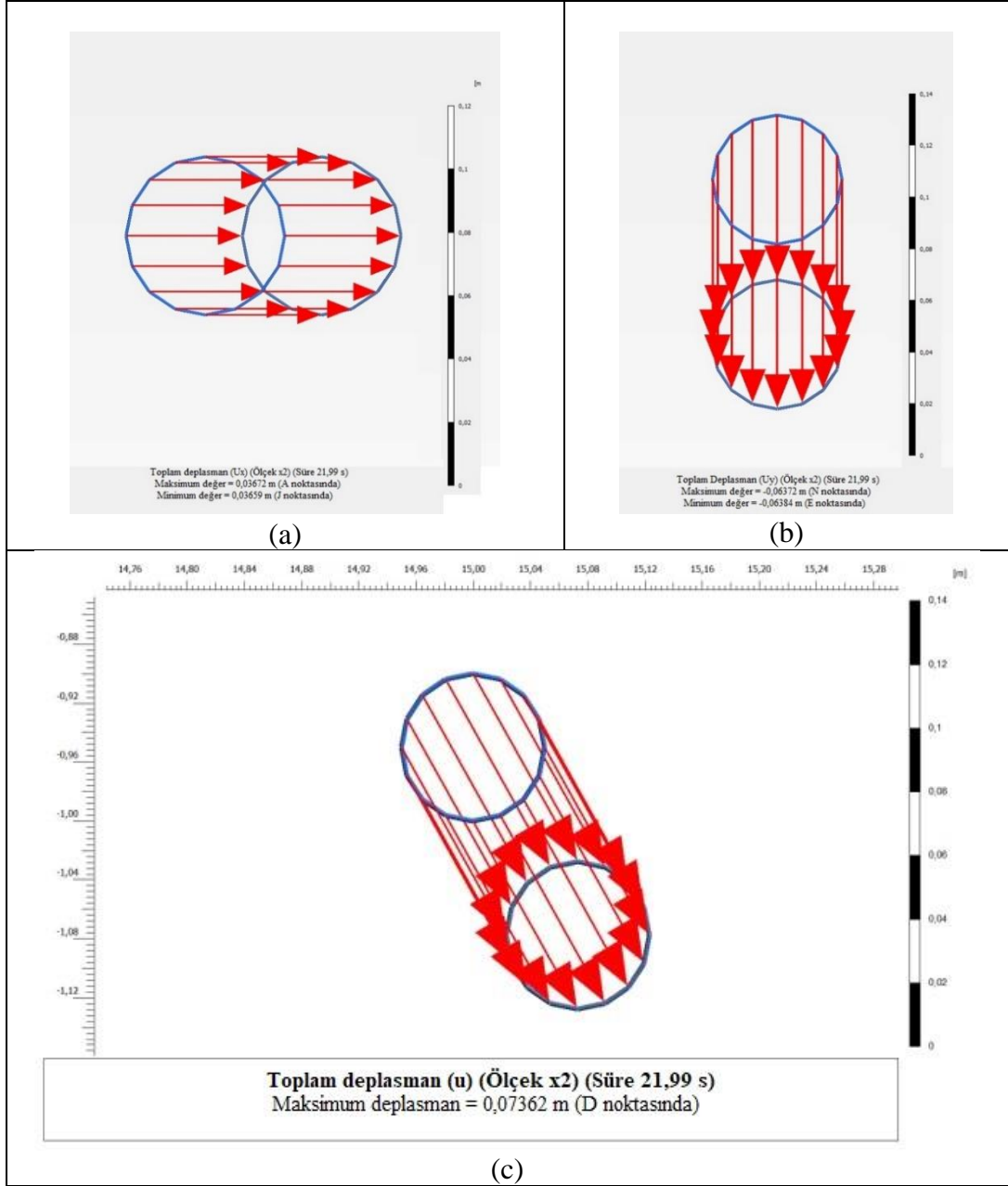
5.1.2.4 CI Vaka Analizi Sonuçları

Dökme demir (CI) tipi boruda dinamik vaka analizi kapsamında 22 Şubat 2011 Christchurch depremi sebebiyle hasar görmüş, hasar veri tabanında CI FID_1100 kodu ile kayıtlı CI hasar noktası kullanılmıştır. CI sismik vaka analizi için oluşturulan sonlu elemanlar modeli sonuçları dinamik etki ile oluşan yatay, düşey ve toplam yer değiştirme olarak ele alınmıştır. Ayrıca Christchurch depremi sismik etkisi altında CI tipi borunun maruz kaldığı aksenal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri ortaya konmuştur. Şekil 5.19’da CI tipi boru analizinde oluşan boru yer değiştirmesi yer almaktadır.

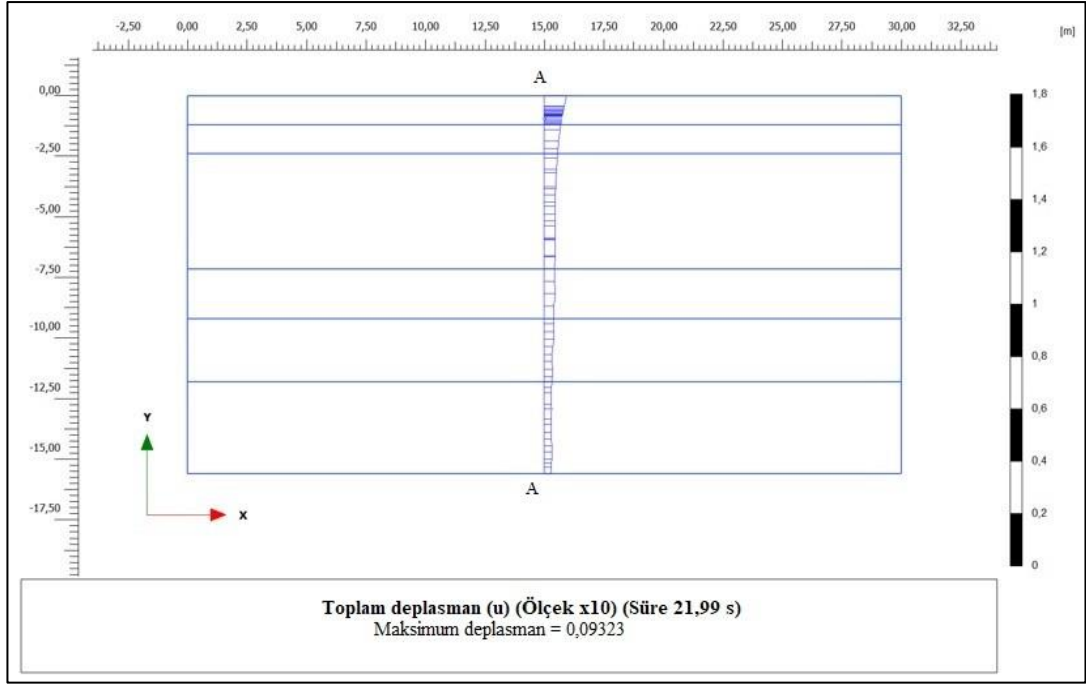


Şekil 5.19: CI tipi boru analizi boru yer değiştirmesi

Şekil 5.20’de sismik etkiler altında CI tipi boru üzerinde oluşan yatay, düşey ve toplam yer değiştirmelerin yön ve miktarları yer almaktadır. Şekil 5.21’de düşeyde CI boru merkezini kesen A-A eksenini üzerinde oluşan zemin deformasyonları görülmektedir.

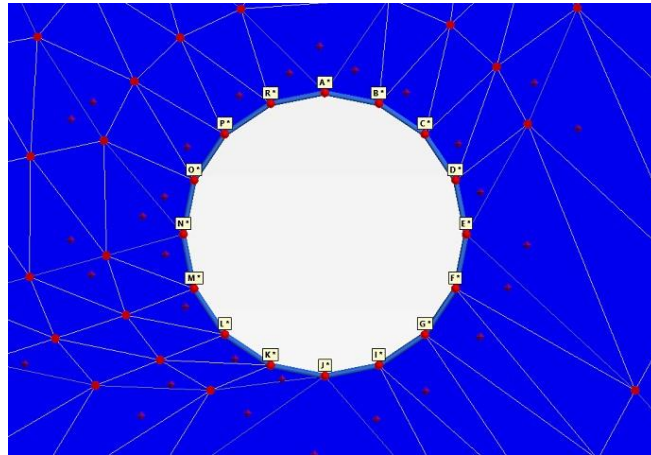


Şekil 5.20: CI tipi boru a)yatay, b)düşey ve c) toplam yer değiştirmeler



Şekil 5.21: Düşeyde CI boru merkezini kesen A-A ekseni zemin deformasyonu

Şekil 5.22’de CI tipi boru analizi için oluşturulan boru kesiti üzerinde seçilen analiz noktaları yer almaktadır. Tablo 5.9’da CI için seçilen analiz noktalarında oluşan normal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri yer almaktadır. Bu değerlerin boruda hasar oluşturacak seviyelerin altında olduğu görülmektedir.



Şekil 5.22: CI boru üzerinde seçilen nokta isimleri

Tablo 5.9: CI boru üzerinde seçilen noktalar için normal, kesme ve eğilme momentleri

Sembol	N [kN/m]	N _{min} [kN/m]	N _{max} [kN/m]	Q [kN/m]	Q _{min} [kN/m]	Q _{max} [kN/m]	M [kN m/m]	M _{min} [kN m/m]	M _{max} [kN m/m]
A	1.06E+00	-1.26E+00	1.13E+00	3.95E-02	-2.76E-01	3.61E-01	3.16E-02	-3.27E-02	3.63E-02
A	1.10E+00	-1.26E+00	1.18E+00	6.07E-02	-3.37E-01	3.75E-01	3.16E-02	-3.27E-02	3.63E-02
B	7.97E-01	-1.26E+00	9.54E-01	9.62E-01	-1.47E-01	1.11E+00	2.19E-02	-3.12E-02	2.75E-02
C	2.25E-02	-1.17E+00	1.51E-01	1.25E+00	-2.04E-01	1.42E+00	-2.09E-03	-2.75E-02	2.67E-03
D	-7.37E-01	-1.10E+00	0.00E+00	8.34E-01	-1.54E-01	1.02E+00	-2.46E-02	-3.03E-02	0.00E+00
E	-9.61E-01	-1.12E+00	0.00E+00	-3.34E-01	-5.76E-01	5.21E-02	-2.98E-02	-3.42E-02	0.00E+00
E	-9.62E-01	-1.12E+00	0.00E+00	-1.61E-02	-3.98E-01	4.76E-01	-2.98E-02	-3.42E-02	0.00E+00
F	-6.92E-01	-1.10E+00	0.00E+00	-8.63E-01	-9.78E-01	1.56E-01	-2.10E-02	-2.93E-02	0.00E+00
G	-1.74E-02	-1.19E+00	5.34E-02	-1.20E+00	-1.36E+00	2.06E-01	7.99E-04	-2.75E-02	3.07E-03
I	6.61E-01	-1.28E+00	7.17E-01	-9.97E-01	-1.20E+00	1.47E-01	2.38E-02	-3.13E-02	2.70E-02
J	9.23E-01	-1.28E+00	1.03E+00	7.05E-02	-3.76E-01	8.00E-01	3.61E-02	-3.29E-02	4.07E-02
J	9.39E-01	-1.28E+00	9.90E-01	-2.07E-01	-5.64E-01	4.21E-01	3.61E-02	-3.29E-02	4.07E-02
K	6.55E-01	-1.28E+00	8.16E-01	1.19E+00	-1.48E-01	1.34E+00	2.28E-02	-3.14E-02	2.93E-02
L	-1.26E-01	-1.19E+00	0.00E+00	1.33E+00	-2.11E-01	1.57E+00	-3.93E-03	-2.75E-02	7.85E-04
M	-8.33E-01	-1.10E+00	0.00E+00	7.49E-01	-1.60E-01	9.75E-01	-2.69E-02	-3.25E-02	0.00E+00
N	-9.91E-01	-1.11E+00	0.00E+00	-1.41E-01	-3.90E-01	7.55E-01	-3.06E-02	-3.51E-02	0.00E+00
N	-8.79E-01	-1.11E+00	0.00E+00	-3.06E-01	-6.43E-01	7.27E-01	-3.06E-02	-3.51E-02	0.00E+00
O	-5.96E-01	-1.10E+00	0.00E+00	-9.70E-01	-1.08E+00	1.64E-01	-1.92E-02	-3.15E-02	0.00E+00
P	1.47E-01	-1.18E+00	2.25E-01	-1.17E+00	-1.32E+00	2.09E-01	3.27E-03	-2.76E-02	5.00E-03
R	8.44E-01	-1.27E+00	9.36E-01	-8.02E-01	-1.03E+00	1.41E-01	2.43E-02	-3.14E-02	2.67E-02

5.1.3 PVC Tipi Boru Sismik Vaka Analizi

Christchurch eyaletinde içme suyu boru hattı sistemin oluşturan borulardan biri de PVC tipi borulardır. Son yıllarda yapılan çalışmalar ve yaşanan depremler hem sağlık hem de yapısal olarak PVC tipi boruların AC ve CI tipi borulara göre daha güvenli olduğu ortaya koymuştur. Mevcut literatürde geçici yer deformasyonu (GYD) sebebiyle oluşmuş PVC boru hattı hasarı bulunmamaktadır. PVC tipi borularda genellikle birleşme bölgelerinde çekme sonucu oluşan hasarlar rapor edilmektedir (Milashuk ve Crane 2012). $M_w6,2$ büyüklüğündeki Christchurch depremi PVC tipi içme suyu boru hattı sistemlerinde ciddi hasarlara yol açmıştır. PVC tipi borular son yıllarda daha fazla tercih edilen boru türüdür. PVC tipi borular için de hasar noktasının seçiminde meydana gelen hasarın deprem ölçüm istasyonuna yakın olmasına ve NZGD veri tabanında zemin profilini oluşturmaya elverişli CPT, SPT ve araştırma sondajlarının bulunmasına dikkat edilmiştir. Tablo 5.10'da PVC

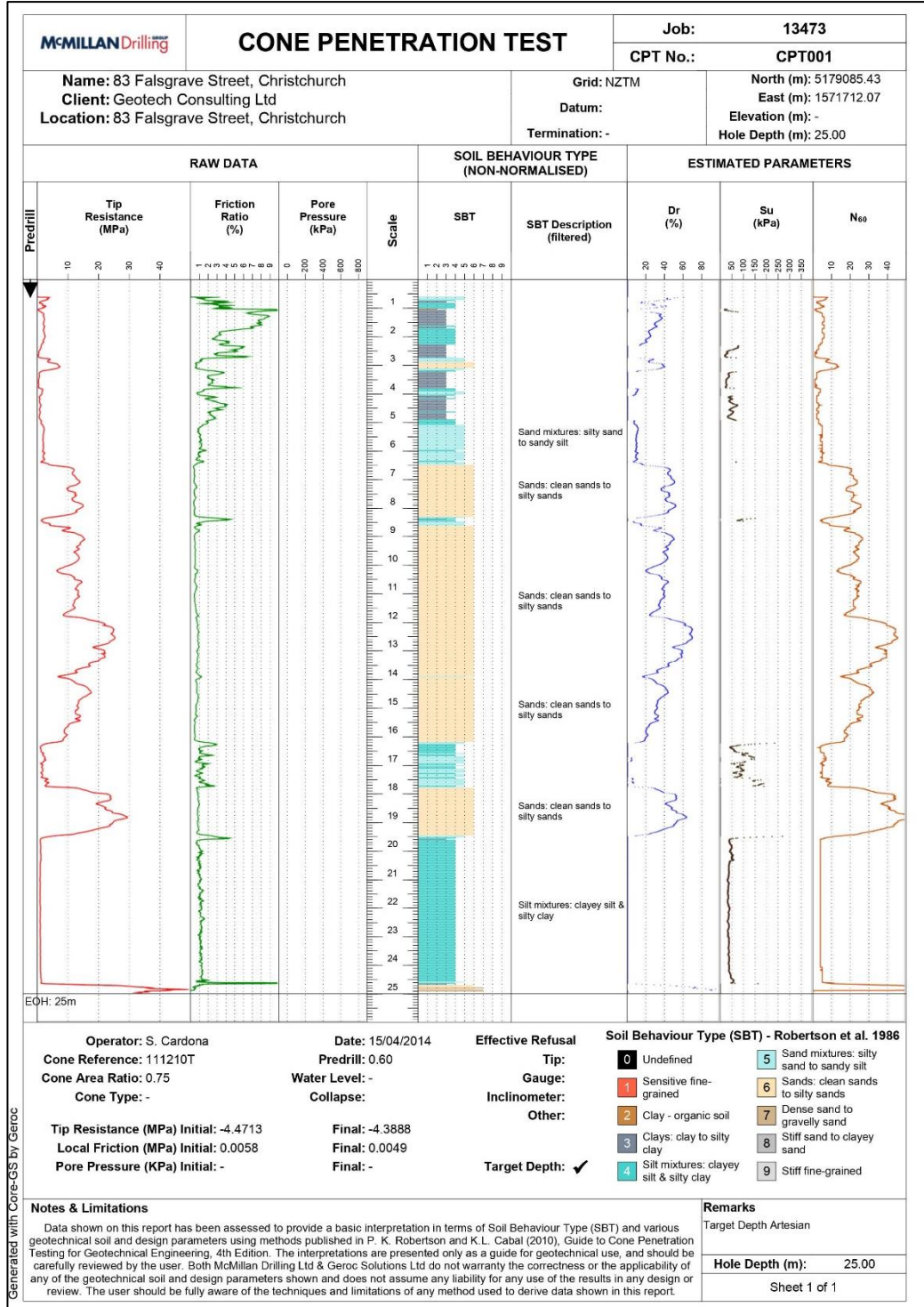
boru tipi vaka analizi için seçilen hasar noktası, kullanılan sondajlar ve yer hareketi ölçüm istasyonu bilgileri verilmiştir.

Tablo 5.10: PVC hasar analizi için seçilen hasar, sondaj ve yer hareketi ölçüm istasyonu bilgileri

Boru Tipi	Hasar Lokasyonu kodu	Sondaj Bilgileri (NZGD)	İstasyon kodu
PVC	FID_366	BH_29551 - CPT_33291 CPT_49679 - SAMP_1776	CCCC

5.1.3.1 Zemin Parametreleri

PVC boru hasarı için oluşturulan sonlu elemanlar modelinde zemin parametreleri bölgede bulunan CPT ve araştırma sondajları verilerinden elde edilmiştir. HS SS modelde kumlu tabakalar için Brinkgreve ve diğ. (2010) tarafından sunulan rölatif sıkılığa bağlı korelasyonlar kullanılmıştır. Deepsoilde ters evrişim işlemi için gerekli olan kayma dalgası hızına McGann ve diğ. (2015) tarafından önerilen CPT- V_s korelasyonu ile geçilmiştir. NZGD tarafından sağlanan zemin etüdü saha çalışmaları ile HS ve HS SS modeli için gerekli diğer model parametreleri elde edilmiştir. Şekil 5.23'de idealize zemin profilini oluşturmak için faydalanılan verilerden biri olan CPT_49679 verileri yer almaktadır.



Şekil 5.23: PVC vaka analizi için kullanılan CPT verisi

NZGD tarafından sağlanan zemin etüdü saha çalışmaları ile elde edilmiş idealize zemin profili parametreleri Tablo 5.11’de verilmiştir.

Tablo 5.11: PVC tipi boru hasarı sismik analizi için oluşturulan zemin modeli ve parametreleri

Zemin türü	CH	SM1	SP1	SM2	CL	SM3
Genel						
Malzeme modeli	HS	HS SS	HS SS	HS SS	HS	HS SS
Model davranış tipi	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı
Kuru birim hacim ağırlık (γ_k , kPa)	17	14,06	14,87	16,1	16	13,6
Doğgun birim hacim ağırlığı(γ_d , kPa)	21,04	18	18	19	19,2	17
İleri düzey parametreler						
Sekant rijitliği(E_{50}^{ref} , Mpa)	5,3	12	27	30	15	24
Tanjant rijitliği (E_{oed}^{ref} , Mpa)	5,3	12	27	30	15	24
Yükleme-boşaltma rijitliği (E_{ur}^{ref} , Mpa)	15,9	36	81	90	45	72
Kayma modülü (G_0^{ref} , MPa)	-	73,6	90,6	94	-	87,2
Kayma deformasyon seviyesi ($\gamma_{0,7}$)	-	1,8E-4	1,55E-4	1,5E-4	-	1,6E-4
Kohezyon (c'_{ref} , Kpa)	10	1	1	1	7	1
İçsel sürtünme açısı (ϕ')	1	35	41	42	1	37
Dilatansi açısı (ψ)	-	5	11	12	-	7
Poisson oranı (ν_{ur})	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınabilmesi için arayüzey (R_{int}) değeri gömülü yapı elemanı yalnızca MH tabakasında yer aldığı için R_{int} değeri yalnızca bu tabakada tanımlanmıştır.

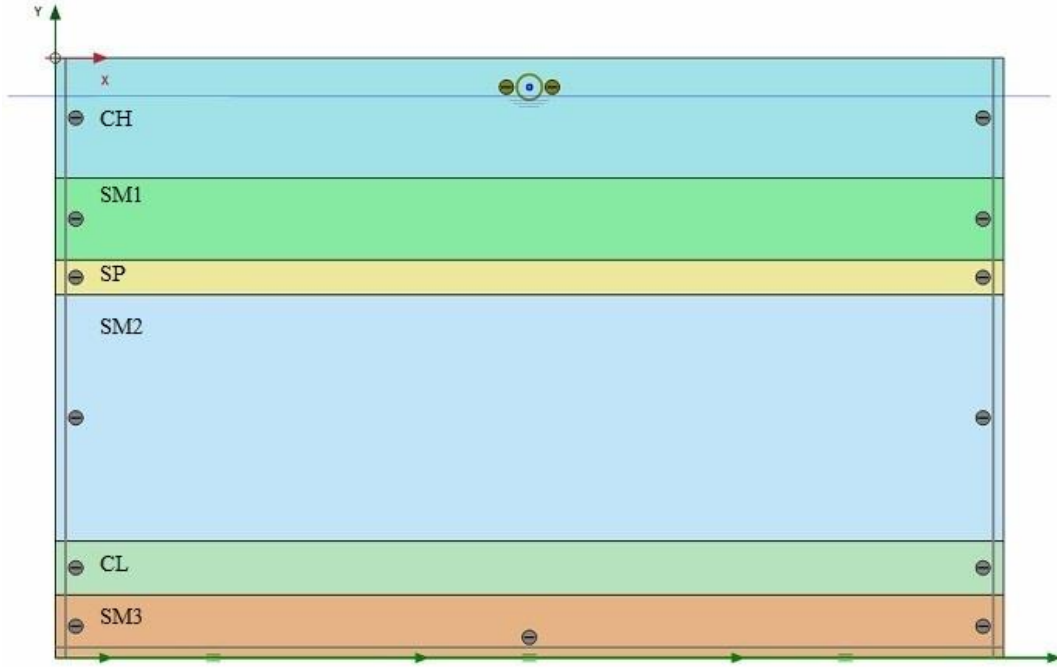
5.1.3.2 PVC Boru Elemanı Parametreleri

Tez kapsamında çalışma bölgesinde yer alan içme suyu boru hattı sistemi içerisinde AC ve CI tipi boru yoğunluğuna göre daha miktarda PVC tipi boru yer almaktadır. Çalışma bölgesinde yaklaşık olarak 80 km uzunluğunda PVC tipi içme suyu boru hattı bulunmaktadır. Çalışma kapsamında 22 Şubat 2011 Christchurch depremi sonrası PVC tipi borularda meydana gelen 48 hasar noktası üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Yapı sekmesinde boru elemanı kesit modeli oluşturularak plate eleman ile malzeme parametreleri tanımlanmıştır. Tablo 5.12'de PVC tipi boru elemanı parametreleri verilmiştir.

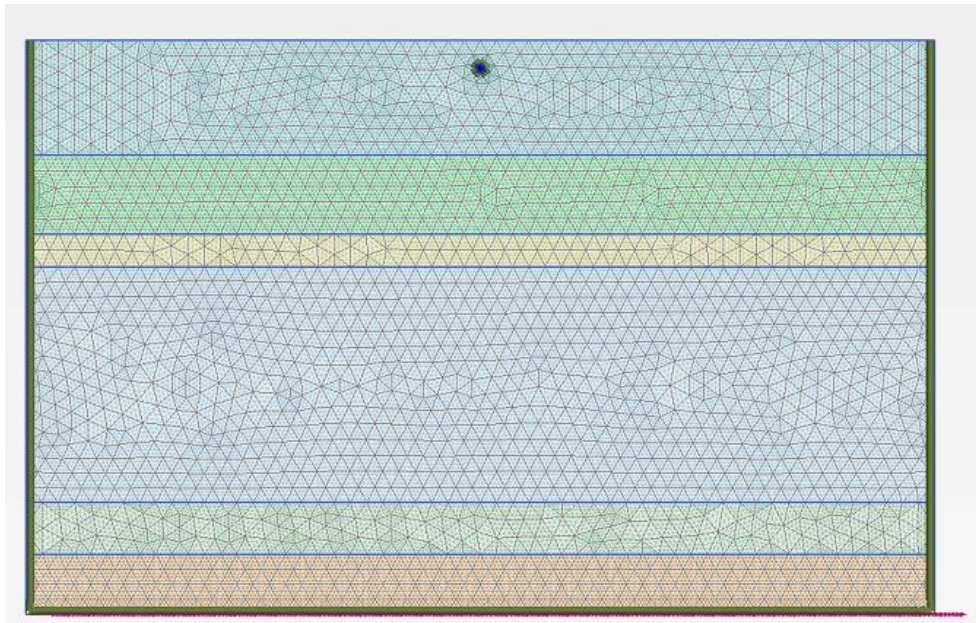
Tablo 5.12: PVC boru elemanı parametreleri (Larock ve diğ., 2000)

PVC	Değer	Birim	Boru çapı	İnşa yılı
Normal rijitlik (EA)	5670,87	kN/m	150 mm	1988
Eğilme rijitliği (EI)	15,02	kNm ² /m		
Birim ağırlık (w)	0,12	kN/m		
Poisson oranı(v)	0,45	-		

Materyal sekmesi altında plate eleman olarak malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra ilgili boru elemana malzeme özellikleri atanır. Daha sonra AC boru tipi için belirtilen analiz adımları tekrar takip edilerek PVC dinamik analiz modeli oluşturulmuştur. Şekil 5.24’de yapı elemanları oluşturulduktan sonraki model kesiti yer almaktadır. Şekil 5.25’de PVC boru analizi için orta büyüklükte oluşturulan sonlu elemanlar ağı yer almaktadır.



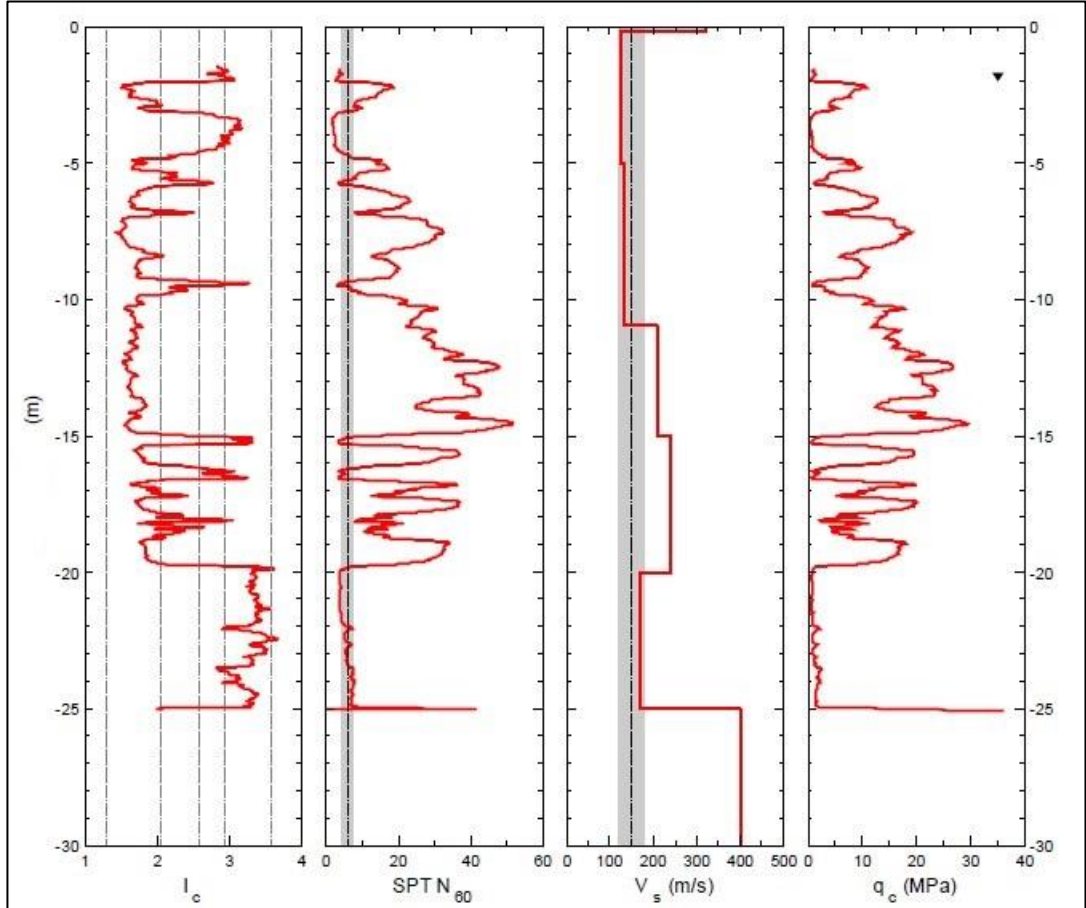
Şekil 5.24: PVC boru hasarı analizi için oluşturulan model kesiti



Şekil 5.25: PVC sismik analizi için sonlu elemanlar ağı

5.1.3.3 Deprem Veri Seti

PVC boru hasarı analizi için oluşturulan sonlu elemanlar modelinde kullanılan ivme-zaman kaydı Christchurch Cathedral College yer hareketi ölçüm istasyonunda ölçülen $6,2M_w$ büyüklüğündeki 22 Şubat 2011 Christchurch depremidir. Christchurch Cathedral College (CCCC) yer hareketi ölçüm istasyonundan $6,2M_w$ büyüklüğündeki Christchurch depremi ivme aydı PEER Ground Motion Database web sayfası aracılığıyla alınmıştır. Şekil 5.26’da CCCC yer hareketi ölçüm istasyonunun bulunduğu zemin profili görülmektedir. PVC dinamik vaka analizi için oluşturulan idealize zemin profili ile özellikle kayma dalgası hızı (V_s) bakımından benzerlik göstermektedir.



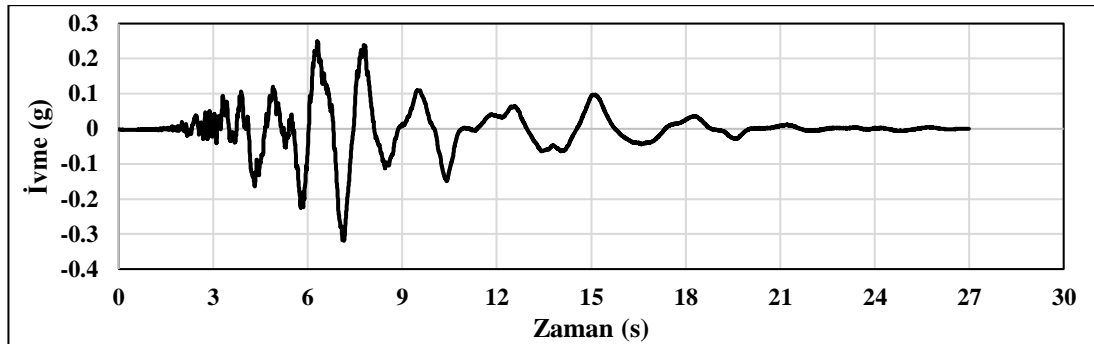
Şekil 5.26: CCCC yer hareketi ölçüm istasyonu zemin profili CPT veri (Wotherspoon ve diğ. 2014)

CCCC istasyonundan alınan yatay yer hareketi ivme-zaman değerlerinden boru hattı oryantasyonu göz önüne alınarak bileşke ivme düzenlenmiştir. Deepsoil programında zemin profili oluşturularak ters evrişim işlemi ile model derinliğinde oluşan ivme zaman değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.27’de Deepsoil ile oluşturulan

zemin profili özellikleri yer almaktadır. Şekil 5.28’de PVC analiz modeli için oluşturulan ivme-zaman kaydı yer almaktadır.

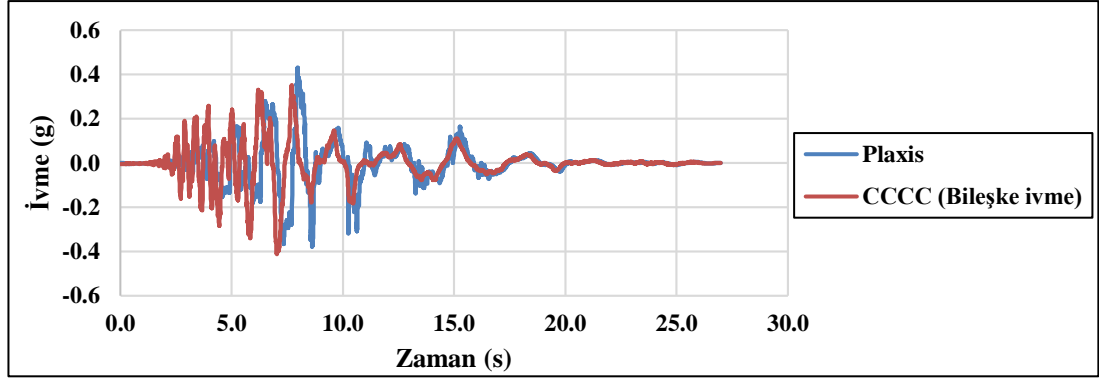


Şekil 5.27: Deepsoil’de oluşturulan zemin profili giriş ekranı



Şekil 5.28: Deepsoil ile PVC boru analizi için model derinliğinde elde edilen ivme-zaman kaydı

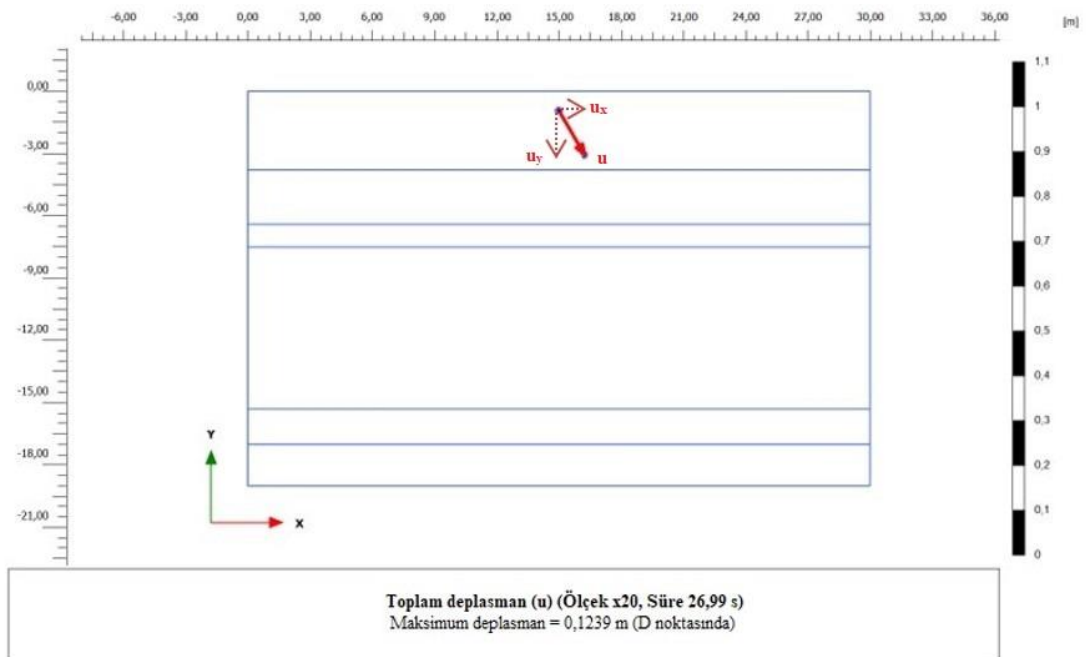
Deepsoil ile elde edilen ivme-zaman kaydı, PVC tipi boru analizi için oluşturulan Plaxis sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmıştır. Bu ivme kaydı öncelikle Plaxis model kalibrasyonunu gerçekleştirmek için zemin profili içerisinde boru olmadan ivme-zaman kaydı olarak alınmıştır. Plaxis ile borusuz analiz sonucu yaklaşık olarak yüzeyde (yüzeyin 20 cm altında) oluşan ivme kaydı, CCCC istasyonundan elde edilen bileşke ivme ile karşılaştırılarak model kalibrasyonu sağlanmıştır. Model kalibrasyonu sınır şartları, sönümlenme değerleri ve zemin modeli parametreleri gibi model özelliklerini içermektedir. Şekil 5.29’da Plaxis analizinde kalibrasyonu sağlanmış modelden elde edilen ivme-zaman değerleri ve CCCC istasyonundan elde edilen bileşke ivme-zaman değerleri karşılaştırması yer almaktadır.



Şekil 5.29: Plaxis ve CCCC istasyonu bileşke ivme karşılaştırması

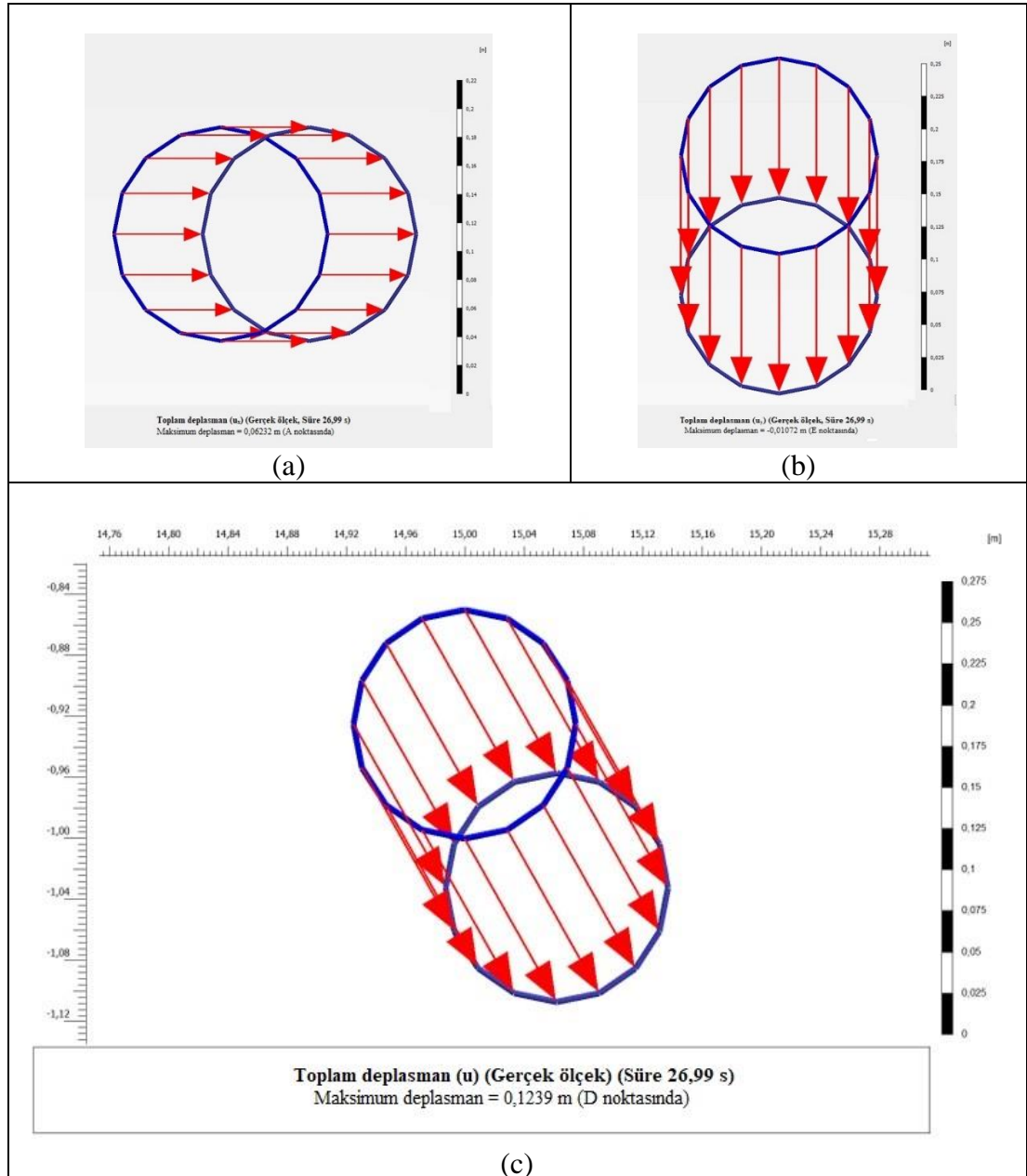
5.1.3.4 PVC Vaka Analizi Sonuçları

Polivinil klorür (PVC) tipi boruda dinamik vaka analizi kapsamında 22 Şubat 2011 Christchurch depremi sebebiyle hasar görmüş, hasar veri tabanında PVC FID_366 kodu ile kayıtlı PVC hasar noktası kullanılmıştır. PVC sismik vaka analizi için oluşturulan sonlu elemanlar modeli sonuçları dinamik etki ile oluşan yatay, dikey ve toplam yer değiştirme olarak ele alınmıştır. Ayrıca Christchurch depremi sismik aktivesi altında PVC tipi borunun maruz kaldığı aksenal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri ortaya konmuştur. Şekil 5.30'da PVC vaka analizi için oluşturulan modelin boru yer değiştirmesi görülmektedir.

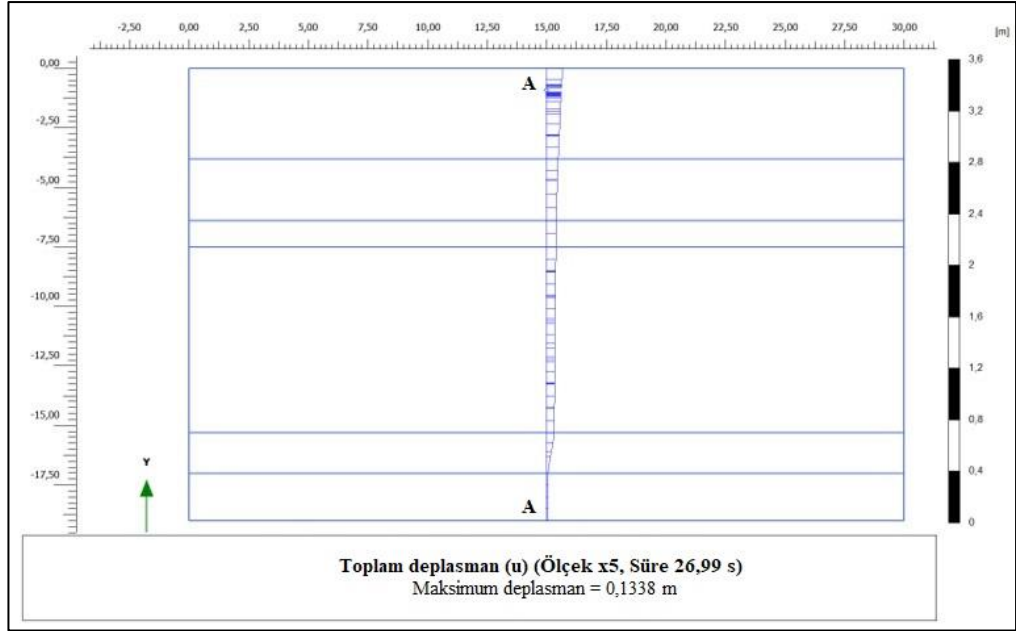


Şekil 5.30: PVC tipi boru analizi boru yer değiştirmesi

Şekil 5.31’de sismik etkiler altında PVC tipi boru üzerinde oluşan yatay, düşey ve toplam yer değiştirmeler yer almaktadır. Şekil 5.32’de düşeyde PVC boru merkezini kesen A-A eksenini üzerinde oluşan zemin deformasyonu yer almaktadır.

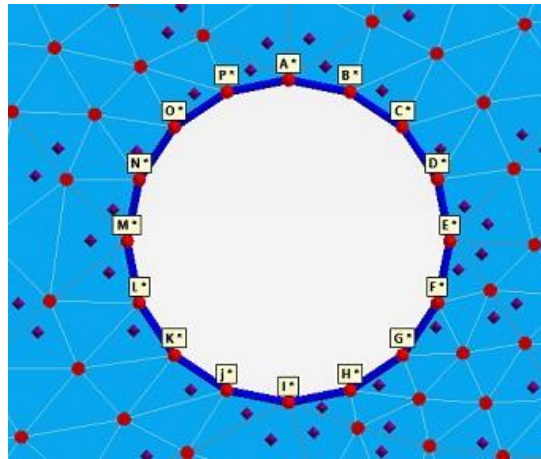


Şekil 5.31: PVC tipi boru a) yatay, b) düşey ve c) toplam yer değiştirme



Şekil 5.32: PVC tipi boru analizinde A-A eksenli boyunca zemin deformasyonu

Şekil 5.33’de boru üzerinde seçilen analiz noktaları görülmektedir. Tablo 5.13’de PVC için seçilen analiz noktalarında oluşan normal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri yer almaktadır. Bu değerlerin boruda hasar oluşturacak seviyelerin altında olduğu görülmektedir.



Şekil 5.33: PVC boru üzerinde seçilen nokta isimleri

Tablo 5.13: PVC boru üzerinde seçilen noktalar için normal, kesme ve eğilme momentleri

Sembol	N [kN/m]	N _{min} [kN/m]	N _{max} [kN/m]	Q [kN/m]	Q _{min} [kN/m]	Q _{max} [kN/m]	M [kN m/m]	M _{min} [kN m/m]	M _{max} [kN m/m]
A	-5.07E-01	-1.08E+00	0.00E+00	-5.61E-02	-2.15E-01	1.40E-01	-1.55E-02	-3.90E-02	0.00E+00
A	-5.05E-01	-1.08E+00	0.00E+00	1.03E-02	-1.68E-01	1.97E-01	-1.55E-02	-3.90E-02	0.00E+00
B	-5.87E-01	-1.15E+00	0.00E+00	3.02E-01	-1.39E-02	3.49E-01	-1.92E-02	-4.28E-02	0.00E+00
C	-8.54E-01	-1.22E+00	0.00E+00	4.30E-01	0.00E+00	4.75E-01	-3.09E-02	-4.58E-02	0.00E+00
D	-1.14E+00	-1.27E+00	0.00E+00	3.34E-01	-3.57E-02	3.83E-01	-4.33E-02	-4.90E-02	0.00E+00
E	-1.27E+00	-1.33E+00	0.00E+00	1.50E-02	-1.76E-01	1.95E-01	-4.85E-02	-4.96E-02	0.00E+00
E	-1.26E+00	-1.32E+00	0.00E+00	4.40E-02	-1.62E-01	1.97E-01	-4.85E-02	-4.96E-02	0.00E+00
F	-1.20E+00	-1.32E+00	0.00E+00	-2.95E-01	-3.47E-01	3.76E-02	-4.48E-02	-4.93E-02	0.00E+00
G	-9.53E-01	-1.25E+00	0.00E+00	-4.36E-01	-4.86E-01	0.00E+00	-3.29E-02	-4.58E-02	0.00E+00
H	-6.88E-01	-1.15E+00	0.00E+00	-3.49E-01	-3.99E-01	1.87E-02	-2.04E-02	-4.14E-02	0.00E+00
I	-5.88E-01	-1.14E+00	0.00E+00	-6.95E-02	-2.41E-01	1.35E-01	-1.50E-02	-3.89E-02	0.00E+00
I	-5.87E-01	-1.14E+00	0.00E+00	-3.05E-03	-1.80E-01	1.87E-01	-1.50E-02	-3.89E-02	0.00E+00
J	-6.58E-01	-1.20E+00	0.00E+00	3.21E-01	-9.06E-03	3.71E-01	-1.89E-02	-4.28E-02	0.00E+00
K	-9.18E-01	-1.26E+00	0.00E+00	4.44E-01	0.00E+00	4.88E-01	-3.11E-02	-4.59E-02	0.00E+00
L	-1.18E+00	-1.30E+00	0.00E+00	3.29E-01	-4.13E-02	3.78E-01	-4.37E-02	-4.93E-02	0.00E+00
M	-1.25E+00	-1.31E+00	0.00E+00	2.88E-02	-1.64E-01	1.98E-01	-4.86E-02	-4.97E-02	0.00E+00
M	-1.24E+00	-1.31E+00	0.00E+00	5.65E-03	-1.73E-01	1.96E-01	-4.86E-02	-4.97E-02	0.00E+00
N	-1.15E+00	-1.28E+00	0.00E+00	-3.05E-01	-3.55E-01	2.88E-02	-4.45E-02	-4.93E-02	0.00E+00
O	-8.77E-01	-1.19E+00	0.00E+00	-4.31E-01	-4.76E-01	0.00E+00	-3.25E-02	-4.56E-02	0.00E+00
P	-6.05E-01	-1.12E+00	0.00E+00	-3.32E-01	-3.81E-01	2.38E-02	-2.04E-02	-4.12E-02	0.00E+00

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Deprem etkisine maruz kalan altyapı sistemlerinin performanslarının değerlendirilmesi ve risk analizlerinin yapılması gelecekte oluşması muhtemel depremlere karşı altyapı sistemlerinin güvenilirliğinin sağlanmasına olanak sağlar. Canterbury deprem dizisi olarak bilinen birçok büyük ve sayısız artçı şoktan oluşan birçok deprem Yeni Zelanda'yı etkisi altına almıştır. Bu depremlerin en büyüklerinden biri olan 6,2M_w büyüklüğündeki Christchurch depremi 22 Şubat 2011 tarihinde meydana gelmiştir. Christchurch depremi sonrası bölgede geniş çaplı sıvılaşmalar gözlenmiştir. Büyük çoğunluğu sıvılaşmadan kaynaklı olan zemin yanal hareketleri bölgede bulunan içme suyu boru hatları üzerinde ciddi hasarlar oluşmasına sebep olmuştur. Deprem sonrası oluşan yanal hareketler uzaktan algılama yöntemlerinden biri olan LiDAR 4m ölçümleri ile elde edilmiştir.

Çalışma kapsamından değerlendirilen bölge, deprem sonrası yapılan LiDAR 4m ölçüm bölgesi ile sıvılaşma bölgesinin çakıştığı bölgeden oluşmaktadır. Bölgede deprem sonrası yapılan keşif çalışmaları ile oluşturulan veri seti dünyada çok az araştırmacının elinde bulunmaktadır. Bu kapsamlı veri seti bölge için geniş çaplı araştırmalar yapmaya olanak sağlamakla birlikte bölge için oluşturulan tasarım kriterleri birçok farklı bölgede benzer boru hattı sistemleri bulunmasından dolayı farklı bölgeler içinde kullanılmaya elverişli olmaktadır.

Tez kapsamında 22 Şubat 2011 Christchurch depremi sebebiyle içme suyu boru hatları üzerinde oluşan hasarlar ile ilgili olarak bölgesel çalışmalar yanında belirlenen hasar noktalarında kapsamlı analizler yapılmıştır. Deprem sonrası uzaktan algılama sistemlerinden olan LiDAR 4m ile yapılan ölçümler sayesinde sıvılaşma bölgesinde zeminin yanal yer hareketleri hesaplanarak yatay şekil değiştirmeler elde edilmiştir. LiDAR 4m ölçümleri 4x4 m'lik kare elemanlardan oluşmasından dolayı bu kare elemanların köşe noktalarında elde edilen yüzey deplasmanlarında Cook (1995) tarafından bahsedilen sonlu elemanlar formülleri ile yatay şekil değiştirmeler elde edilmiştir. Elde edilen yatay şekil değiştirmeler içme suyu sistemini oluşturan AC, CI ve PVC boru tipleri için yatay asal şekil değiştirmeler ve boru doğrultusunda

oluşan şekil değiştirmeler olarak ele alınmıştır. Boru doğrultusunda oluşan yatay şekil değiştirmeler çekme ve basınç etkisi olarak da ele alınmıştır.

Çalışma kapsamında öncelikli olarak sınılaşma bölgesinde bulunan ve Christchurch içme suyu boru hattı sistemi içerisinde boru yoğunluğunun büyük kısmını oluşturan AC, CI ve PVC boru tipleri için yatay şekil değiştirmeler ile onarım oranı (RR) arasında hasar ilişkileri ortaya konmuştur. Böylelikle sınılaşma etkisine maruz kalan boru tiplerinin yanal yayılma etkisi altında davranış farklılıkları incelenmiştir.

Elde edilen hasar ilişkilerine göre deprem etkisi altında birçok araştırmacı tarafından kırılabilirliği en yüksek olarak değerlendirilen AC tipi borular için CI ve PVC'ye göre aksel basınç şekil değiştirmesi dışında tüm yatay şekil değiştirmeler için en yüksek onarım oranları elde edilmiştir. AC tipi borular aynı yatay şekil değiştirme seviyesinde çekme ve basınca maruz kaldığında çekmeye maruz kalan boruların onarım oranının basınca maruz kalanlardan daha yüksek olduğu görülmektedir. Dökme demir (CI) tipi borular için geliştirilen hasar ilişkilerine göre CI tipi borular maksimum yatay asal şekil değiştirme ve aksel şekil değiştirmeler için benzer özellikler göstermektedir.

Polivinil klorür (PVC) tipi boruların sismik etkiler altında AC ve CI tipi borulara göre daha iyi performans gösterdiği birçok araştırmacı tarafından ortaya konmuştur. Ayrıca PVC tipi boruların özellikle KYD etkisi altında hasar almasından dolayı sınılaşma bölgesinde PVC tipi boruların hasar analizlerinin yapılması bu çalışmanın önemli sonuçlarından biridir. PVC tipi borular için elde edilen hasar ilişkilerine göre PVC tipi borular AC ve CI tipi borulara göre daha düşük onarım oranına sahiptir. PVC için maksimum yatay asal şekil değiştirme ve aksel şekil değiştirmeler ele alındığında yaklaşık olarak %0,3 şekil değiştirme değerinin altında tüm onarım oranları 1'in altında olduğu görülmektedir. Artan şekil değiştirme seviyesi ile yatay maksimum asal şekil değiştirme için daha düşük onarım oranları elde edilmiştir. En yüksek onarım oranları yüksek şekil değiştirme seviyelerinde aksel çekme durumunda elde edilmiştir.

Ayrıca çalışma kapsamında nümerik analiz yöntemlerinden olan sonlu elemanlar yöntemi ile AC, CI ve PVC boru tipleri üzerinde sismik vaka analizleri

yapılmıştır. Geoteknik analizlerde sonlu elemanlar yönteminin kullanımı son yıllarda gelişen bilgisayar teknolojisi ile artış göstermektedir. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemini kullanan Plaxis 2D programı ile dinamik vaka analizleri gerçekleştirilmiştir. Christchurch depreminin her bir boru tipi üzerinde neden olduğu sismik aktivitenin borular üzerinde oluşturduğu yer değiştirmeler ve kuvvetler incelenmiştir. Yapılan vaka çalışmasında analiz noktaları Christchurch depremi sebebiyle hasar görmüş boru hatlarıdır. AC, CI ve PVC tipi boruların vaka analizlerinde toplam zemin ve boru yer değiştirmesi sırasıyla 4,2 cm, 7,3 cm ve 12,3 cm'dir. Deprem sarsıntısı esnasında boru ve zemin birlikte hareket etmektedir. Zemin sıvılaşması göz önüne alınmadan gerçekleştirilen boru analizlerinden elde edilen normal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinin boruda hasar oluşturabilecek seviyelerden düşük olduğu gözlenmektedir. Bu da deprem sırasında oluşan hasarların sıvılaşma etkisi ile meydana geldiği gözlemini doğrulamaktadır. Elde edilen sonuçlar ve deneyimler ışığında gelecek çalışmalarda sıvılaşma bölgesinde yer alan her boru tipi için 3 boyutlu nümerik analizler ile zemin sıvılaşması göz önüne alınarak analizler yapılması planlanmaktadır.

7. KAYNAKLAR

Barenberg, M. E., “Correlation of pipeline damage with ground motions”, *J. Geotech. Eng, ASCE*, 114 (6), 706711, (1988).

Bertelli, S., Manzanal, D., Lopez-Querol, S., Rossetto, T., Mira, P., Giovinazzi, S., Ruitter and R. Brackley, H.L., “Numerical Simulation of observed liquefaction phenomena from the 2011 Christchurch (New Zealand)”, *In Proceedings of SECED 2019 Conference: Earthquake risk and engineering towards a resilient world*, SECED, (2019).

Black, J., “Earthquake damage to buried pipelines: a Christchurch perspective”, *ASCE Pipelines 2013 Conference, Fort Worth, Texas*, (2013).

Bouziou, D., “Earthquakeinduced ground deformation effects on buried pipelines” Ph.D Thesis, *Cornell University, Ithaca, New York*, (2015).

Bouziou, D., Van Ballegooy, S., Storie, L. and O’Rourke, T., “Spatial Correlations of Underground Pipeline Damage in Christchurc”, *Cornell University and Tonkin & Taylor Ltd., Liquefaction Report*, (2019).

Brackley, H.L., “Review of liquefaction hazard information in eastern Canterbury, including Christchurch City and parts of Selwyn, Waimakariri and Hurunui Districts”, *GNS Science Consultancy Report 2012/218*, (2012).

Brinkgreve, R. B. J., Engin, E. and Engin, H. K., “Validation of empirical formulas to derive model parameters for sands”, *Numerical methods in geotechnical engineering*, 137-142, (2010).

Chaudhari, V., Kumar P, V. D. and Kumar, R. P., “Finite element analysis of buried continuous pipeline subjected to fault motion”, *International Journal of Structural Engineering*, 4(4), 314-331, (2013).

Cook, R. D., *Finite element modeling for stress analysis*, John Wiley and Sons, (1995).

Cubrinovski, M., Hughes, M., Bradley, B. A., Noonan, J., Hopkins, R., McNeill, S. and English, G., “Performance of horizontal infrastructure in Christchurch city through the 2010-2011 Canterbury earthquake sequence”, University of Canterbury, Civil and Natural Resources Engineering, Engineering: Reports [713], (2014).

Dash, S. R., and Jain, S. K., “IITK-GSDMA Guidelines for seismic design of buried pipelines: provisions with commentary and explanatory examples”, National Information Center of Earthquake Engineering, Kanpur, India (2007).

Dundar, G., “Sismik Etkiler Altında Boru Hasarlarının Kümeleme Analizi İle Değerlendirilmesi”, Yüksek lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2019).

Edinçiler A. and Toksoy, Y. S., “Effects of earthquake characteristics on seismic performance of pipelines”, *4th International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Near East University, Nicosia, North Cyprus, (2016).

Eguchi, R. T., “Seismic hazard input for lifeline systems”, *Struct. Saf.*, 10,193-198, (1991).

Eguchi, R. T., “Seismic vulnerability models for underground pipes”, *Proceedings of Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment*, ASME, PVP 77, New York, 368-373, (1983).

Eidinger, J., Maison, B, Lee, D. and Lau, B., "East Bay Municipal District water distribution damage in 1989 Loma Prieta earthquake", *Proceedings of the Fourth US Conference on Lifeline Earthquake Engineering*, ASCE, TCLEE, Monograph No. 6, 240-247, (1995).

Eidinger, J., Water distribution system, In: Anshel J. Schiff (ed.), *The Loma Prieta, Californai, Earthquake of October 17, 1989 – Lifelines*, USGS

Professional Paper 1552-A, US Government Printing Office, Washington, A63-A78, (1998).

GNS Science, “The most recent aftershock map [online]”, (2020) <http://www.gns.cri.nz/Home/OurScience/NaturalHazards/RecentEvents/Catburyquake/Recentaftershockmap>, (2014).

Hamada, M. and O’Rourke, T. D., “Case studies of liquefaction and lifeline Performance during past earthquakes”, Technical Report NCEER920001, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, NY, February, (1992).

Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R. and Emoto, K., “Study on liquefaction Induced permanent ground displacement”, *Association for the Development of Earthquake Prediction*, Tokyo, Japan, November, (1986).

Hwang, H. and Lin, H., “GIS-based evaluation of seismic performance of water delivery systems”, Center for Earthquake Research and Information, University of Memphis, (1997).

İşkan, E., “Zemine Gömülü Boruların Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2001).

Katayama, T., Kubo, K. and Sato, N., “Earthquake damage to water and gas distribution systems”, *Proceedings of the U.S. National Conference on Earthquake Engineering, EERI*, Oakland, CA, 396405, (1975).

Kavak, K. Ş., “Uzaktan algılamanın temel kavramları ve jeolojideki uygulama alanları”, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 52, 6374, (1998).

Kennedy, R. P., Chow, A. M. and Williamson, R. A., “Fault movement effects on buried oil pipeline”, *Transportation engineering journal of the American Society of Civil Engineers*, 103(5), 617-633, (1977).

Kobayashi, T., Nakane, H., Suzuki, N. and Ishikawa, M., “Parametric Study on flexibility of buried pipeline subject to large ground displacement”, *In*

Proceedings of the Second US-Japan Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifeline Facilities, Technical Report NCEER-89-0032, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York, (1989).

Lanzano, G., de Magistris, F. S., Fabbrocino, G. and Salzano, E., “Numerical modeling of natural gas buried pipelines under seismic shaking”, *Proceedings of the 8th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, NUMGE* (Vol. 2, pp. 1129-1134), (2014).

Larock, B. E., Jeppson, R. W. and Watters, G. Z., *Hydraulics of pipeline systems*, CRC press, New York, (1999).

Ling, H. I., Sun, L., Liu, H., Mohri, Y. and Kawabata, T. “Finite element analysis of pipe buried in saturated soil deposit subject to earthquake loading”, *Journal of earthquake and Tsunami*, 2(01), 1-17, (2008).

McGann, C. R., Bradley, B. A., Taylor, M. L., Wotherspoon, L. M. and Cubrinovski, M., “Applicability of existing empirical shear wave velocity correlation seismic cone penetration test data in Christchurch New Zealand”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 75, 76-86. (2015).

Milashuk, S. and Crane, W., “Pipeline damage caused by transient ground deformation: Case study of 2010 Darfield and 2011 Christchurch earthquakes”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41, 84-88, (2012).

Nacaroğlu, E., “Deprem etkisiyle oluşan boru hasarlarının coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve kümeleme analizi ile değerlendirilmesi”, Yüksek lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2010).

Nacaroğlu, E., “Sismik Etkiler Altında Gömülü Boru Hatlarında Hasar Analizleri”, Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2017).

Nair, G. S., Dash, S. R. and Mondal, G., “Review of Pipeline Performance during Earthquakes since 1906”, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 32(6), 0401808, (2018).

New Zealand Geotechnical Database (NZGD), “Map viewer [online]”, (2020) <https://www.nzgd.org.nz/ARCGISMapView/mapviewer.aspx>, (2020).

Newmark, N. M. and Hall, W. J., “Pipeline Design to Resist Large Fault Displacements”, *U.S. National Conference on Earthquake Engineering Ann Arbor, Michigan*, 416-425, (1975).

O’Callaghan, F. W., “Pipeline performance experiences during seismic events in New Zealand over the last 27 years”, *In: Proceedings of the 17th plastic pipes conference, september 22-24, Chicago, Illinois, USA*, (2015).

O’Rourke, T. D., Jeon, S. S., Toprak, S., Cubrinovski, M., Hughes, M., Ballegooy, S. and Bouziou, D., “Earthquake response of underground pipeline networks in Christchurch, NZ”, *Earthquake Engineering Research Institute, EERI, Vol. 30, No. 1, pp. 183204* (2014).

O’Rourke, T. D., Toprak, S. and Sano, Y., “Factors affecting water supply damage caused by the Northridge earthquake”, *Proceedings, Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, WA*, pp: 112, (1998).

O’Rourke, M. J. and Ayala, G., “Pipeline damage due to wave propagation” *J. Geotech. Eng, ASCE*, 119 (9), 1490-1498, (1993).

O’Rourke, M. J. and Liu, X., “Failure Criterion for buried pipe subjected to longitudinal PGD: Benchmark case history”, *US National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER)*, Buffalo, NY US, (1994).

O’Rourke, M. J. and Liu, X., *Response of buried pipelines subject to earthquake effects*”, MCEER Technical Reports, (1999).

O'Rourke, T. D. and Toprak, S., "GIS assessment of water supply damage from the Northridge Earthquake", *Workshop on Earthquake Engineering Frontiers in Transportation Facilities*, Buffalo, New York, (1997).

O'Rourke, T. D. and Trautmann, C. H., Analytical modeling of buried pipeline response to permanent earthquake displacements, Cornell University School of Civil and Environmental Engineering, (1980).

O'Rourke, T. D., Jeon, S. S., Toprak, S., Cubrinovski, M., and Jung, J. K., "Underground lifeline system performance during the Canterbury earthquake sequence", *15th World Conference in Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, (2012).

PEER Ground Motion Database, "NGA – West2 [online]", (2020), <https://ngawest2.berkeley.edu/spectras/305279/searches/281444/edit>, (2011).

Pineda-Porras, O. and Ordaz, M., "A new seismic intensity parameter testimate damage in buried pipelines due to seismic wave propagation". *Journal of Earthquake Engineering*, 11(5), 773-786, (2007).

Plaxis, B. V., "PLAXIS 2D reference manual connect edition V20", *The Netherlands*, (2018).

Rajani, B. and Tesfamariam, S., "Estimating time to failure of cast-iron water mains", *In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* (Vol. 160, No. 2, pp. 83-88), Thomas Telford Ltd., (2007).

Saeedzadeh, R. and Hataf, N., "Uplift Response of buried pipelines in saturated sand deposits under earthquake loading", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(10), 1378-1384, (2011).

Stephens, M., Lambert, M., Simpson, A., Nixon, J. and Vitkovsky, J., "Water pipeline condition assessment using transient response analysis", *New Zealand Water and Waste Association, Conference 47th*, Auckland, New Zealand, (2005).

Suzuki, N., Arata, O. and Suzuki, I., “Parametric Study of Deformation Analysis of Welded Pipeline Subject to Liquefaction-Induced Permanent Ground”, *Proceeding of first Japan-US Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation And her Effects on Lifeline Facilities*, 155-162, (1988).

Takada, S., Liang, J. W. and Li, T., “Shell-mode response of buried pipelines to large fault movements”, *Journal of Structural Engineering*, 44(1), 1, (1998).

Takada, S., Tanabe, K., Yamajyo, K. and Katagiri, S., “Liquefaction analysis for buried pipelines”, *Structures and Stochastic Methods*, 45, 319, (1987).

Taylor, M. L., “The geotechnical characterisation of Christchurch sands for advanced soil modeling”, Ph.D Thesis, *University of Canterbury, Dept. Civil Engineering*, (2015).

Terzi, V. G., Alexoudi, M. N. and Hatzigogos, T. N., “Numerical assessment of damage state of segmented pipelines due to permanent ground”. *In Proceedings of the tenth international conference on applications of statistics and probability in civil engineering*, Tokyo, Japan (Vol.202), (2007).

Tonkin and Taylor Ltd., “Liquefaction Vulnerability Study”, Report Number:52020.0200/v1.0, (2013).

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

Toprak, S. and Koç, A. C., “İçme Suyu ve Kanalizasyon Boru Hatlarının Deprem Performansının Değerlendirilmesi”, *6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, (2007).

Toprak, S. and Yoshizaki, K., “Boru hatlarına deprem yüklerinin etkisi”, *5. Ulusal Deprem Mühendisliği Kongresi*, İstanbul, (2003).

Toprak, S., “Earthquake effects on buried lifeline systems”, Ph.D Thesis, *Cornell University, Ithaca, NY*, (1998).

Toprak, S., Nacaroglu, E. and Koc, A. C., “How important the ground strain and pipeline orientation for the seismic damages”, *4th International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 24 June, Near East University, Nicosia, North Cyprus*, (2016).

Toprak, S., Nacaroglu, E. and Koc, A. C., “Seismic damage probabilities for segmented buried pipelines in liquefied soils”, *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, New Zealand, (2015c).

Toprak, S., Nacaroglu, E. and Koc, A. C., “Seismic Response of Underground Lifeline Systems”, (Ed: Ansal, A), *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology Vol. 2*, Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, ISBN:9783319169637, (2015b).

Toprak, S., Nacaroglu, E., Ceylan, M., Dundar, G. and Cirmiktili, O. Y., “Pipe type and seismic performance in Christchurch, New Zealand” *5th International Conference on New Advances in Civil Engineering (ICNACE 2019)*, Kyrenia, Cyprus, (2019).

Toprak, S., Nacaroglu, E., Koc, A. C. and Cetin, O. A., “Seismic damage probabilities for segmented buried pipelines”, *11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ETH Zurich*, Switzerland, (2011).

Toprak, S., Nacaroglu, E., Koc, A. C., Van Ballegooy, S., Jacka, M., Torvelainen, E. and O’Rourke, T. D., “Pipeline damage predictions in liquefaction zones using LSN”, *16th World Conference on Earthquake*, Santiago, Chile, (2017).

Toprak, S., Nacaroglu, E., Koç, A. C. Sarı, M., Yıldırım, Ü. S. and Helva, V., “Christchurch, Yeni Zelanda Depreminin Avonside bölgesindeki gömülü borular üzerine etkisi”, *Sekizinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, (2015a).

Toprak, S., Nacaroglu, E., O’Rourke, T. D., Koc, A. C., Hamada, M., Cubrinovski, M. and JEON, S. S., “Pipeline damage assessment using

horizontal displacements from Air photo and LiDAR measurements in Avonside area, Christchurch, NZ”, *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul, (2014).

Toprak, S., Nacaroglu, E., Van Ballegooy, S., Koc, A.C., Jacka, M., Manav, Y., Torvelainen, E. and O’Rourke, T. D., “Segmented pipeline damage predictions using liquefaction vulnerability parameters”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2019).

Toprak, S., Taskin, F. and Koc, A.C., “Prediction of earthquake damage to urban water distribution systems: a case study for Denizli, Turkey”, *Bull. Eng. Geol. Env.*, 68: 499–510, (2009).

Tromans, I. J., “Behaviour of buried water supply pipelines in earthquake zones”, PhD Thesis, *University of London*, (2004).

Vazouras, P., Dakoulas, P. and Karamanos, S. A., “Pipe–soil interaction and pipeline performance under strike–slip fault movements”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 72, 48-65, (2015).

Vazouras, P., Karamanos, S. A. and Dakoulas, P., “Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(11), 1361-1376, (2010).

Vural I., Firat, S., Unutmaz B. and Isik N., “Deprem Etkisi Altında Doğalgaz Boru Hatlarının Nümerik Analizi”, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11)*, Elazığ, Turkey, (2011).

Wang, L. R. and Zhang, H., “Buried pipeline system in a liquefaction environment”, *In Proc. 10 WCEE* (pp. 5529-5534), Madrid, Spain, (1992).

Wells, D. L. and Coppersmith, K. J., “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, (1994).

Wotherspoon, L. M., Orense, R. P., Bradley, B. A., Cox, B. R., Wood, C. M. and Green, R. A., “Geotechnical Characterisation of Christchurch strong motion stations”, Earthquake Commission Biennial Grant Report, Project, (12/629), (2014).

8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : MUHAMMET CEYLAN

Doğum Yeri ve Tarihi : TORBALI – 19/07/1994

Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Elektronik posta : mceylan121@posta.pau.edu.tr

İletişim Adresi : Zeytinlik Mah. Cumhuriyetçi Sok. NO:12 D:8
Bakırköy/İSTANBUL

Konferans listesi :

• Engin Nacaroglu, Selcuk Toprak, Gizem Dunder, Muhammet Ceylan “K-Ortalamlar Kümeleme Analizi Yöntemiyle Boru Hasarlarının İncelenmesi” Ulusal Mühendislik Jeolejisi ve Jeoteknik Sempozyumu, 03–05 Ekim 2019 (Pamukkale Üniversitesi)

• Selcuk Toprak, Engin Nacaroglu, Muhammet Ceylan, Gizem Dunder, Omer Yasar Cirmiktili, “Pipe type and seismic performance in Christchurch, New Zealand” 5th International Conference on New Advances in Civil Engineering (ICNACE 2019), 8-10 November 2019 (Kyrenia, Cyprus)