

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**GÖMÜLÜ BORU HATLARININ ENTEGRE ANALİZİ: SIVILAŞABİLİR  
ZEMİNLERDE SAYISAL MODELLEME VE PVC BORU BİRLEŞİMLERİ  
ÜZERİNDE EKSENEL YÜKLEME DENEYLERİ**

**MUHAMMET CEYLAN**

**DOKTORA TEZİ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**  
**DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN: PROF. DR. SELÇUK TOPRAK**

**OCAK 2025**

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**GÖMÜLÜ BORU HATLARININ ENTEGRE ANALİZİ: SIVILAŞABİLİR  
ZEMİNLERDE SAYISAL MODELLEME VE PVC BORU BİRLEŞİMLERİ  
ÜZERİNDE EKSENEL YÜKLEME DENEYLERİ**

**MUHAMMET CEYLAN**

**DOKTORA TEZİ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**  
**DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN: PROF. DR. SELÇUK TOPRAK**

**OCAK 2025**

**T.R.**  
**GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL**

**INTEGRATED ANALYSIS OF BURIED PIPELINES: NUMERICAL  
MODELING IN LIQUEFIABLE SOILS AND AXIAL LOADING TESTS ON  
PVC JOINTS**

**MUHAMMET CEYLAN**

**A THESIS OF DOCTORATE**  
**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**EARTHQUAKE AND STRUCTURAL ENGINEERING**  
**PROGRAM**

**ADVISOR: PROF. DR. SELÇUK TOPRAK**

**JANUARY 2025**

## DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 13/01/2025 tarih ve 2025/05 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 30/01/2025 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Muhammet CEYLAN'ın tez çalışması İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Deprem ve Yapı Mühendisliği Programında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

### JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Selçuk TOPRAK

ÜYE

: Prof. Dr. Ayşe EDİNÇLİLER

ÜYE

: Prof. Dr. Ferit ÇAKIR

ÜYE

: Doç. Dr. Hadi KHANBABAZADEH

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Engin NACAROĞLU

### ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun  
...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR



*Türk Milletine...*

## ÖZET

Depremler boru hatlarının gömülü olduğu zeminlerde geçici ve kalıcı deformasyonlara yol açarak, boruların performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedirler. Kalıcı yer deformasyonlarından biri olan sıvılaşma, zeminlerin davranışını değiştirerek ve şekil değiştirmeleri arttırarak boruların daha fazla hasar görmesine neden olabilmektedir. Bu bağlamda, sıvılaşma olayının boru hatları üzerindeki etkisini anlamak, boru hatlarının deprem performansını değerlendirmek için kritik öneme sahiptir.

Çalışmada, 2011 Christchurch depreminde meydana gelen hasar verileri, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak analiz edilmiştir. Bu analiz kapsamında asbestli çimento (AC), dökme demir (CI) ve polivinil klorür (PVC) boru türlerinin sıvılaşma etkileri değerlendirilmiştir. Boru hatlarının doğrultusu, zemin deformasyonları ve sıvılaşma bölgeleri CBS aracılığıyla detaylı şekilde haritalandırılmış ve farklı boru türlerinin sismik performansı hasar ilişkileri üzerinden karşılaştırılmıştır. Çalışmada sıvılaşmaya bağlı zemin deformasyonlarının boru hatlarının dayanıklılığı üzerindeki etkileri incelenmiş ve bu bölgeler için yeni boru hasar ilişkileri geliştirilmiştir.

Sıvılaşma, zemin dayanımını azaltarak oturmaların ve zemin deformasyonlarının artmasına yol açmakta, bu da gömülü boru hatları üzerinde ciddi yükler oluşturmaktadır. Bu etkileri tahmin etmek amacıyla PM4Sand ve UBC3D-PLM gibi bünye modelleri kullanılarak Plaxis 2D ile nümerik simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına dayanarak, Christchurch depremi sırasında hasar gören 150 mm çapındaki PVC boru için FLAC3D V9.0 yazılımıyla vaka analizi yapılmıştır. Bu analizde, PVC borunun maruz kaldığı yükler, FLAC3D'nin P2PSand davranış modeli kullanılarak üç boyutlu olarak değerlendirilmiş ve sıvılaşma kaynaklı oturmaların boru performansına etkileri ayrıntılı şekilde incelenmiştir.

Bu doktora çalışması sırasında, 2023 yılında Türkiye'de meydana gelen büyük depremler, altyapı sistemlerinde ciddi hasarlara yol açmıştır. 6 Şubat 2023 tarihinde gerçekleşen Kahramanmaraş depremleri (Mw 7.7 ve Mw 7.6), özellikle Hatay, Gölbaşı ve İskenderun gibi bölgelerde sıvılaşma olaylarının yaygın bir şekilde görülmesine neden olmuştur. Tez kapsamında, bu depremlerin ardından saha gözlemleri gerçekleştirilmiş ve İskenderun'da sıvılaşma nedeniyle hasar gören 1 No'lu yağmur suyu yükseltme tesisine yönelik detaylı sıvılaşma analizleri yapılmıştır. Bu analizler sırasında kullanılan yöntemler ve elde edilen sonuçlar, sahadan elde edilen bulgularla uyumlu bulunmuş, altyapı sistemlerinin sıvılaşma etkileri altındaki performansı hakkında önemli veriler sağlamıştır.

Sıvılaşabilir zeminlerde boruların dayanıklılığını artırmak amacıyla, yeni nesil bağlantı contasına sahip PVC boruların performansı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, boruların deprem yükleri altındaki bağlantı davranışlarını değerlendirmek için eksenel çekme ve tekrarlı yükleme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler, boru bağlantılarının kuvvet ve deplasman kapasitelerini belirlemeyi hedeflemiştir. Bu çalışmalar, Colorado Boulder Üniversitesi (ABD) ile yapılan iş birliği çerçevesinde gerçekleştirilmiş ve yeni nesil bağlantı contasına sahip PVC boruların dayanımına ilişkin önemli bulgular elde edilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma, sıvılaşma ve zemin deformasyonlarının boru hatları üzerindeki etkilerini anlamak için coğrafi bilgi sistemleri, nümerik yöntemler ve deneysel analizler ile kapsamlı bulgular sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler: Boru, Deprem, Hasar, Nümerik Modelleme, Sıvılaşma**

## ABSTRACT

Earthquakes can cause temporary and permanent deformations in the soils where pipelines are buried, which can adversely affect the performance of the pipes. This study investigates how pipelines are affected by liquefaction-induced displacements during earthquakes. Liquefaction can cause further damage to pipes by changing the behavior of soils and increasing deformations. In this thesis, understanding the impact of liquefaction on pipelines is critical for assessing the earthquake performance of pipelines.

In this study, damage data from the 2011 Christchurch earthquake was analyzed using Geographic Information Systems (GIS). The liquefaction effects of asbestos cement (AC), cast iron (CI) and polyvinyl chloride (PVC) pipe types were evaluated. The orientation of pipelines, ground deformations and liquefaction zones were mapped in detail through GIS and the seismic performance of different pipe types were compared through damage relationships. In addition, the effects of ground deformations due to liquefaction on the durability of pipelines were analyzed and new pipe damage relations were developed for these regions.

Within the scope of the research, the processes by which liquefaction causes ground settlements are discussed in detail. Liquefaction reduces the soil strength and leads to increased settlements and ground deformations, which in turn impose severe loads on buried pipelines. In order to predict these effects, numerical simulations were performed using finite element method using constitutive models such as PM4Sand and UBC3D-PLM. Based on the simulation results, a case analysis was performed using FLAC3D V9.0 software for a 150 mm diameter PVC pipe damaged during the Christchurch earthquake. In this analysis, the loads experienced by the PVC pipe were evaluated in three dimensions using P2PSand behavior model and the effects of liquefaction induced settlements on the pipe performance were investigated in detail.

During this PhD study, major earthquakes in Turkey in 2023 caused severe damage to infrastructure systems. On February 6, 2023, the Kahramanmaraş earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6) caused widespread liquefaction events, especially in regions such as Hatay, Gölbasi and İskenderun. Within the scope of this thesis, field observations were carried out after these earthquakes and detailed liquefaction analyses were carried out for the rainwater pump station 1 in İskenderun, which was damaged due to liquefaction. The methods used and the results obtained during these analyses were found to be consistent with the field findings and provided important data on the performance of infrastructure systems under liquefaction effects.

To improve the durability of pipes in liquefiable soils, studies were conducted on the performance of PVC pipes with new generation joint gaskets. In this context, axial tensile and cyclic loading tests were carried out to evaluate the bell and spigot joint behavior of the pipes under earthquake loads. These tests aimed to determine the force and displacement capacities of the pipe joints. In addition, the performance of pipelines against additional loads that may occur as a result of natural disasters such as liquefaction, fault rupture and landslides was investigated by experimental methods. These studies were carried out in collaboration with the University of Colorado Boulder (USA) and significant findings were obtained on the strength of PVC pipes with new generation joint gaskets.

In conclusion, this study presents comprehensive findings through geographic information systems, numerical methods, and experimental analysis to understand the

effects of liquefaction and subsequent ground deformations on pipelines. The results provide important guidance to improve pipeline resilience against future earthquakes and minimize the adverse effects of liquefaction on pipelines.



**Keywords: Damage, Earthquake, Liquefaction, Numerical Modeling, Pipe Experiments**

## TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim boyunca deneyimi ve bilgisi ile beni yönlendiren, tez danışmanım Prof. Dr. Selçuk TOPRAK'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam boyunca gösterdiği destek ve tavsiyelerden dolayı kendisinden çok şey öğrendiğim Dr. Öğr. Ü. Engin NACAROĞLU'na şükranlarımı sunarım. Nümerik analiz çalışmalarımda ve tez izleme süreçlerinde verdiği destek için Doç. Dr. Hadi KHANBABAZADEH'a teşekkürlerimi sunarım. Tez değerlendirme jüri üyesi olan hocalarım Prof. Dr. Ayşe EDİNÇLİLER ve Prof. Dr. Ferit ÇAKIR'a katkılarından dolayı çok teşekkür ederim. Tez kapsamında Colorado Boulder Üniversitesi'nde yürütülen çalışmalarda danışmanlığımı yürüten Prof. Brad Parker WHAM'a teşekkürlerimi sunarım. Ciest laboratuvar ekibine ve bu süreçte desteklerini esirgemeyen Sina Golmohammadi SENJİ ve Enes DURAK'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması TÜBİTAK-BİDEB 2214-A Doktora Sırası Araştırma Projesi kapsamında deneysel çalışmalar yürütülmek üzere desteklenmiştir. Destekleri için TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca FLAC3D yazılımını doktora çalışmam için sağlayan ITASCA şirketine ve Dr. Zhao CHENG'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca sonsuz destek ve sevgilerinden dolayı babam Mitat CEYLAN'a, annem Saliha CEYLAN'a ve kardeşim Usame CEYLAN'a en derin şükranlarımı ve sevgilerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

|                                                                                        | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| ÖZET                                                                                   | vi           |
| ABSTRACT                                                                               | vii          |
| TEŞEKKÜR                                                                               | ix           |
| İÇİNDEKİLER                                                                            | x            |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ                                                         | xii          |
| ŞEKİLLER DİZİNİ                                                                        | xiv          |
| TABLolar DİZİNİ                                                                        | xviii        |
| <br>                                                                                   |              |
| 1. GİRİŞ                                                                               | 1            |
| 1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği                                                   | 2            |
| 1.2. Literatür                                                                         | 4            |
| 2. BORU HATTI HASARI ÜZERİNDEKİ DEPREM ETKİLERİ VE HASAR İLİŞKİLERİ                    | 13           |
| 2.1. Çalışma Alanı ve CBS Veri Tabanı                                                  | 13           |
| 2.2. Boru Hattı Üzerinde Yatay Şekil Değiştirme Etkileri                               | 20           |
| 2.3. Düşey, Yatay ve Birleştirilmiş Açısal Bozulmaların Boru Hattı Üzerindeki Etkileri | 25           |
| 2.4. Düşey Açısal Bozulma ve Yatay Şekil Değiştirmelerin Birleştirilmiş Etkileri       | 26           |
| 3. SIVILAŞMA NEDENİYLE MEYDANA GELEN ALTYAPI HASARLARI İÇİN NÜMERİK ANALİZLER          | 33           |
| 3.1. Vaka çalışması I: Christchurch PVC Boru Hasarı                                    | 34           |
| 3.1.1. LiDAR Ölçümleri                                                                 | 34           |
| 3.1.2. Nümerik Modeller                                                                | 35           |
| 3.1.2.1 Başlangıç Koşulları                                                            | 37           |
| 3.1.2.2 UBC3D-PLM                                                                      | 39           |
| 3.1.2.3 PM4Sand                                                                        | 41           |
| 3.1.2.4 Nümerik Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması                                  | 45           |
| 3.1.3. Ampirik Yaklaşımlar                                                             | 47           |
| 3.2. Vaka çalışması II: Kahramanmaraş Depremi                                          | 48           |
| 3.2.1. İskenderun Yağmur Suyu Pompa İstasyonu Vaka Çalışması                           | 50           |
| 3.2.1.1 Nümerik Model                                                                  | 52           |
| 3.2.1.2 Nümerik Model Sonuçları                                                        | 55           |
| 4. SONLU FARKLAR YÖNTEMİYLE SIVILAŞAN ZEMİNLERDE PVC BORU HATTI DAVRANIŞI              | 57           |
| 4.1. P2PSand Model Özellikleri ve Parametreleri                                        | 57           |
| 4.2. Boru Elemanı                                                                      | 61           |
| 4.3. Nümerik Model                                                                     | 63           |
| 4.4. Nümerik Analiz Sonuçları                                                          | 65           |
| 5. YENİ NESİL PVC BORU BİRLEŞİMİ İÇİN EKSENEL YÜKLEME DENEYLERİ                        | 70           |
| 5.1. Eksenel Testler                                                                   | 72           |
| 5.1.1. Eksenel Testlerin Kurulumu                                                      | 72           |
| 5.1.2. Boru Numunesi Kurulum Prosedürü                                                 | 73           |

|                                                       |     |
|-------------------------------------------------------|-----|
| 5.1.3. Test Aparatları                                | 76  |
| 5.2. Eksenel Test Prosedürleri                        | 76  |
| 5.2.1. Test Öncesi                                    | 76  |
| 5.2.2. Çekme Testi                                    | 77  |
| 5.2.3. Tekrarlı Yükleme Testi                         | 77  |
| 5.3. Eksenel Çekme Testleri                           | 78  |
| 5.3.1. Çekme Testi (PT44)                             | 79  |
| 5.3.2. Çekme Testi (PT45)                             | 82  |
| 5.3.3. Çekme Testi (PT46)                             | 84  |
| 5.3.4. Çekme Testi (PT50)                             | 86  |
| 5.3.5. Çekme Testi (PT51)                             | 88  |
| 5.3.6. Çekme Testi (PT52)                             | 90  |
| 5.3.7. Çekme Testlerinin Değerlendirilmesi            | 92  |
| 5.4. Eksenel Tekrarlı Yükleme Testleri                | 94  |
| 5.4.1. Tekrarlı Yükleme Testi (PS47)                  | 94  |
| 5.4.2. Tekrarlı Yükleme Testi (PS48)                  | 97  |
| 5.4.3. Tekrarlı Yükleme Testi (PS49)                  | 99  |
| 5.4.4. Tekrarlı Yükleme Testi (PS53)                  | 101 |
| 5.4.5. Tekrarlı Yükleme Testi (PS54)                  | 104 |
| 5.4.6. Tekrarlı Yükleme Testi (PS55)                  | 107 |
| 5.4.7. Tekrarlı Yükleme Testlerinin Değerlendirilmesi | 110 |
| 6. SONUÇLAR                                           | 113 |
| KAYNAKLAR                                             | 118 |
| ÖZGEÇMİŞ                                              | 125 |
| TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR             | 126 |

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

|                     |                                                     |
|---------------------|-----------------------------------------------------|
| $\epsilon_x$        | : Doğu-Batı Yönündeki Şekil Değiştirme              |
| $\epsilon_y$        | : Kuzey-Güney Yönündeki Şekil Değiştirme            |
| $\epsilon_{HP}$     | : Maksimum Asal Şekil Değiştirme                    |
| $\epsilon_{1,2}$    | : Asal Şekil Değiştirmeler                          |
| $\epsilon_{\xi}$    | : Eksenel Mutlak Şekil Değiştirme                   |
| $\epsilon_{\xi(+)}$ | : Eksenel Çekme Şekil Değiştirme                    |
| $\epsilon_{\xi(-)}$ | : Eksenel Basınç Şekil Değiştirme                   |
| $\beta$             | : Açısal Bozulma                                    |
| $\gamma_{xy}$       | : Yatay Açısal Bozulma                              |
| $\beta_{vd}$        | : Düşey Açısal Bozulma                              |
| $\beta_{com}$       | : Birleşik Açısal Bozulma                           |
| $u$                 | : Doğu-Batı Yönündeki Yer Değiştirme                |
| $v$                 | : Kuzey-Güney Yönündeki Yer Değiştirme              |
| $\alpha$            | : Boru Doğrultu Açısı                               |
| $\Theta$            | : Boru ile Asal Şekil Değiştirme Düzlemi Açısı      |
| $G_0^{ref}$         | : Referans Kayma Modülü                             |
| $E_{ur}^{ref}$      | : Yükleme-Boşaltma Rijitliği                        |
| $E_{oed}^{ref}$     | : Tanjant Rijitliği                                 |
| $E_{50}^{ref}$      | : Sekant Rijitliği                                  |
| $c'_{ref}$          | : Kohezyon                                          |
| $\phi'$             | : İçsel Sürtünme Açısı                              |
| $\gamma$            | : Birim Hacim Ağırlık                               |
| $\gamma_{0.7}$      | : Kayma Şekil Değiştirme Seviyesi                   |
| $k_G^e$             | : Elastik Kayma Modülü Faktörü                      |
| $k_B^e$             | : Elastik Bulk Modülü Faktörü                       |
| $k_G^p$             | : Plastik Kayma Modülü Faktörü                      |
| $EA$                | : Normal Rijitlik                                   |
| $EI$                | : Eğilme Rijitliği                                  |
| $V_s$               | : Kayma Dalgası Hızı                                |
| $H$                 | : Tabaka Kalınlığı                                  |
| $w$                 | : Birim Ağırlık                                     |
| $z$                 | : Derinlik                                          |
| $q_t$               | : Uç Direnci                                        |
| $f_s$               | : Sürtünme Oranı                                    |
| $(N_1)_{60}$        | : Düzeltilmiş SPT(N)                                |
| $u$                 | : Boşluk Suyu Basıncı                               |
| $ne$                | : Elastik Kayma Modülünün Gerilime Bağımlılık Oranı |
| $me$                | : Elastik Bulk Modülünün Gerilime Bağımlılık Oranı  |
| $np$                | : Plastik Kayma Modülünün Gerilime Bağımlılık Oranı |
| $e$                 | : Boşluk Oranı                                      |
| $\phi_{cv}$         | : Sabit Hacim Sürtünme Açısı                        |
| $\phi_p$            | : Pik Sürtünme Açısı                                |
| $h_{p0}$            | : Sıkışma Oranı                                     |
| $R_u$               | : Boşluk Suyu Basıncı Oranı                         |
| $D_r$               | : Rölatif Sıkılık                                   |

|                 |                                                                                                   |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $S_{V1D}$       | : Bir Boyutlu Oturma                                                                              |
| $p_A$           | : Atmosfer Basıncı                                                                                |
| cm              | : Santimetre                                                                                      |
| km              | : Kilometre                                                                                       |
| s               | : Saniye                                                                                          |
| $\varepsilon_v$ | : Hacimsel Deformasyon Oranı                                                                      |
| AAM             | : Avustralya Hava Haritacılığı                                                                    |
| AC              | : Asbestli Çimento                                                                                |
| AD              | : Birleşik Açısal Bozulma Sabiti                                                                  |
| AFAD            | : Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı                                                          |
| CBS             | : Coğrafi Bilgi Sistemleri                                                                        |
| CDSS            | : Çevrimli Basit Kesme                                                                            |
| CERA            | : Canterbury Deprem İyileştirme Komisyonu                                                         |
| CH              | : Yüksek Plastisiteli Kil                                                                         |
| CI              | : Dökme Demir                                                                                     |
| CIEST           | : Center for Infrastructure, Energy, and Space Testing (Altyapı, Enerji ve Uzay Testleri Merkezi) |
| CPT             | : Konik Penetrasyon Deneyi                                                                        |
| CRR             | : Çevrimsel Kayma Mukavemeti Oranı                                                                |
| CSR             | : Çevrimsel Kayma Gerilmesi Oranı                                                                 |
| DB              | : Doğu-Batı                                                                                       |
| FS              | : Güvenlik Faktörü                                                                                |
| GYD             | : Geçici Yer Deformasyonu                                                                         |
| HS              | : Hardening Soil (Pekleşen Zemin)                                                                 |
| HSSS            | : Hardening Soil Small Strain (Küçük Şekil Değiştirme Pekleşen Zemin)                             |
| KG              | : Kuzey-Güney                                                                                     |
| KYD             | : Kalıcı Yer Deformasyonu                                                                         |
| LiDAR           | : Lazer Görüntüleme Algılama ve Sınırlama                                                         |
| LP              | : Yükleme Protokolü                                                                               |
| LPI             | : Sıvılaşma potansiyeli İndeksi (Liquefaction Potential Index)                                    |
| LS              | : Eksenel Şekil Değiştirme Sabiti                                                                 |
| $LS^a AD^b$     | : Eksenel Şekil Değiştirme ve Birleşik Açısal Bozulma Parametresi                                 |
| LSN             | : Sıvılaşma Şiddeti Katsayısı (Liquefaction Severity Number)                                      |
| $M_w$           | : Moment Büyüklüğü                                                                                |
| NZAM            | : Yeni Zelanda Hava Haritacılığı                                                                  |
| NZGD            | : Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanı                                                              |
| PGA             | : En Büyük Yer İvmesi                                                                             |
| PGV             | : En Büyük Yer Deformasyonu                                                                       |
| PS              | : Tekrarlı Yükleme Testi                                                                          |
| PT              | : Çekme Testi                                                                                     |
| PVC             | : Polivinil Klorür                                                                                |
| RR              | : Onarım Oranı                                                                                    |
| S               | : Toplam Oturma                                                                                   |
| SG              | : Şekil Değiştirme Ölçer                                                                          |
| SM              | : Siltli Kum                                                                                      |
| SP              | : Kötü Derecelenmiş Kum                                                                           |
| SP              | : Potansiyometre                                                                                  |
| SPT             | : Standart Penetrasyon Deneyi                                                                     |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <u>Sayfa</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>Şekil 1.1:</b> Christchurch depreminin neden olduğu a) AC tipi boruda çevresel hasar ve b) Kırık CI tipi boru [Cubrinovski vd., 2014].                                                                                                                                                       | 6            |
| <b>Şekil 1.2:</b> Gömülü boru hatlarını etkileyen başlıca jeolojik tehlikelerin şematik gösterimi: a) fay hareketi; b-d) sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmalar dahil heyelanlar; e) sıvılaşma etkileri; f) kaya düşmeleri [O'Rourke, 1998; Castiglia vd., 2020; Rao vd., 2022; Toprak vd., 2024]. | 7            |
| <b>Şekil 2.1:</b> Christchurch su dağıtım boru hatları ve 22 Şubat 2011 depremi için boru hasarları [Toprak vd., 2021].                                                                                                                                                                         | 14           |
| <b>Şekil 2.2:</b> Boru hattı doğrultusuna göre farklı yönlerdeki şekil değiştirmelerin hesaplanması (a ve b), boru yönü boyunca düşey açısız bozulmanın (c) ve LiDAR verileri kullanılarak düşey açısız bozulmaların (d) hesaplanması.                                                          | 17           |
| <b>Şekil 2.3:</b> Yatay şekil değiştirmeler için akış diyagramı.                                                                                                                                                                                                                                | 18           |
| <b>Şekil 2.4:</b> Düşey şekil değiştirmeler için akış diyagramı.                                                                                                                                                                                                                                | 19           |
| <b>Şekil 2.5:</b> Boru hattı, hasarlar, sıvılaşma bölgesi, LiDAR bölgesi ve analiz zonu.                                                                                                                                                                                                        | 20           |
| <b>Şekil 2.6:</b> Christchurch boru hatları için şekil değiştirme histogramı ve kümülatif dağılımı.                                                                                                                                                                                             | 21           |
| <b>Şekil 2.7:</b> a) AC ve b) CI boru hatları için onarım oranları.                                                                                                                                                                                                                             | 23           |
| <b>Şekil 2.8:</b> PVC boru hatları için onarım oranları.                                                                                                                                                                                                                                        | 24           |
| <b>Şekil 2.9:</b> AC, CI ve PVC boru hatları için RR regresyon ilişkilerinin karşılaştırılması.                                                                                                                                                                                                 | 24           |
| <b>Şekil 2.10:</b> Boru hattı yönleri dikkate alınarak AC, CI ve PVC boru hatları için RR'ye karşı a) dikey, b) yatay ve c) birleşik açısız bozulmalar.                                                                                                                                         | 26           |
| <b>Şekil 2.11:</b> AC boru hatları için eksenel a) mutlak b) çekme ve c) basınç şekil değiştirmelerine karşı onarım oranı ve açısız bozulma.                                                                                                                                                    | 28           |
| <b>Şekil 2.12:</b> CI boru hatları için eksenel a) mutlak b) çekme ve c) basınç şekil değiştirmelerine karşı onarım oranı ve açısız bozulma.                                                                                                                                                    | 29           |
| <b>Şekil 2.13:</b> Boru hattı doğrultuları ve regresyon denklemleri dikkate alınarak AC (a, c, e) ve CI (b, d, f) boru hatları için ölçeklendirilmiş eksenel şekil değiştirme ve birleştirilmiş açısız bozulma için onarım oranı regresyonları.                                                 | 32           |
| <b>Şekil 3.1:</b> Christchurch depremi sonrası meydana düşey deplasmanlar.                                                                                                                                                                                                                      | 35           |
| <b>Şekil 3.2:</b> Analiz sahası için CPT verisi [NZGD, 2024].                                                                                                                                                                                                                                   | 36           |
| <b>Şekil 3.3:</b> (a) Model geometrisi ve (b) basitleştirilmiş prosedür sonuçları.                                                                                                                                                                                                              | 37           |
| <b>Şekil 3.4:</b> Christchurch depremi için a) giriş hareketi, b) tepki spektrumu, c) Fourier spektrumu ve d) güç genliği.                                                                                                                                                                      | 39           |
| <b>Şekil 3.5:</b> a) Aşırı boşluk suyu basıncı oranı ( $R_u$ ) ve b) Düşey deplasman.                                                                                                                                                                                                           | 41           |
| <b>Şekil 3.6:</b> a) SM-1, b) SP ve c) SM-2 için drenajsız tekrarlı basit kayma gerilmesi testi simülasyon sonuçları.                                                                                                                                                                           | 43           |
| <b>Şekil 3.7:</b> PM4Sand için aşırı boşluk suyu basıncı oranı ( $R_u$ ).                                                                                                                                                                                                                       | 44           |
| <b>Şekil 3.8:</b> PM4Sand için düşey yer değiştirme.                                                                                                                                                                                                                                            | 45           |
| <b>Şekil 3.9:</b> a) P-1, b) P-2, c) P-3, d) P-4, e) P-5 f) P-6 noktaları için boşluk suyu basıncının değişimi.                                                                                                                                                                                 | 46           |
| <b>Şekil 3.10:</b> UBC3D ve PM4Sand modeli için sıvılaşma kaynaklı oturmaların a) dinamik zaman ve b) derinlikle değişimleri.                                                                                                                                                                   | 47           |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.11:</b> a) Sıvılaşma kaynaklı deformasyon katsayıları a) Ishihara ve Yosmine [1992] ve b) Zhang vd., [2002].                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 47 |
| <b>Şekil 3.12:</b> Hatay bölgesi için USGS sıvılaşma olasılığı haritası [Toprak vd., 2024b].                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 49 |
| <b>Şekil 3.13:</b> İskenderun'da sıvılaşma etkileri: (a) Atatürk Caddesi boyunca kanalizasyon rögarı ve (b) yer altındaki karayoluna su sızması (Koordinatlar: 36.582612, 36.167639) [Toprak vd., 2024b].                                                                                                                                                                                                                                                                | 51 |
| <b>Şekil 3.14:</b> İskenderun yağmur suyu ve atıksu pompa istasyonunda sıvılaşma nedeniyle oluşan hasar: (a) sahanın konumu (daire) ve denize uzanan boru (ok), (b) hasarlı pompalar ve tesis içindeki farklı oturma ve yükselme, (c) binanın güney tarafındaki yükselme, (d) tesis dışındaki kum kaynaması belirtileri, (e) boru desteklerinin kayması ve (f) yapının kuzey tarafındaki boruda hasar (yaklaşık $PGA = 0.26$ g, $PGV = 45.69$ cm/s) [Toprak vd., 2024b]. | 51 |
| <b>Şekil 3.15:</b> Pazarcık depremi için 3116 istasyonundan elde edilen ivme kaydı.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 52 |
| <b>Şekil 3.16:</b> İskenderun 1 nolu yağmur suyu yükseltme istasyonu.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 53 |
| <b>Şekil 3.17:</b> İskenderun Atatürk bulvarında yapılan sondaj verileri [Özener vd., 2024].                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 53 |
| <b>Şekil 3.18:</b> Kum kaynamasından alınan numune üzerinde yapılan elek analizi sonuçları.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 54 |
| <b>Şekil 3.19:</b> Yağmur suyu yükseltme istasyonu için nümerik model geometrisi.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 55 |
| <b>Şekil 3.20:</b> Deprem sonrası oluşan toplam deformasyon (x5 kat).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 56 |
| <b>Şekil 3.21:</b> Aşırı boşluk suyu basıncı oranı ( $R_u$ ).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 56 |
| <b>Şekil 3.22:</b> Depo elemanı üzerinde seçilen düşey deformasyonların değişimi.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 56 |
| <b>Şekil 4.1:</b> Yüzeyde seçilen analiz noktaları ve davranış modeli atamaları.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 60 |
| <b>Şekil 4.2:</b> a) Model geometrisi ve b) shell eleman ile oluşturulan PVC boru elemanı.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 62 |
| <b>Şekil 4.3:</b> Shell elemanın normal kuvvet (N), kesme kuvveti (Q) moment (M) ve gerilme tepkileri [Itasca, 2024].                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 62 |
| <b>Şekil 4.4:</b> İvme ve boşluk suyu basıncı için seçilen analiz noktaları.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 64 |
| <b>Şekil 4.5:</b> İvme kayıtlarının karşılaştırılması.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 65 |
| <b>Şekil 4.6:</b> a) Boşluk suyu basıncı değişimi ( $t=95$ s) ve b) yüzey oturmaları.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 66 |
| <b>Şekil 4.7:</b> Boşluk suyu basıncının değişimi ( $t=195$ s).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 66 |
| <b>Şekil 4.8:</b> Sismik sarsıntı nedeniyle meydana gelen toplam deplasman.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 66 |
| <b>Şekil 4.9:</b> Boru hattı deplasmanının dağılımı.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 68 |
| <b>Şekil 4.10:</b> Farklı noktalarda oluşan boru hattı deplasmanları.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 68 |
| <b>Şekil 5.1:</b> a) Tipik EBBA 1900 ve b) Lokx tipi bağlantı elemanı [Berty vd., 2022].                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 70 |
| <b>Şekil 5.2:</b> a) Northern ve b) VinylTech için tipik bir muflu bağlantılar.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 71 |
| <b>Şekil 5.3:</b> Yükleme çerçevesi 1'deki eksenel test düzeneği.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 72 |
| <b>Şekil 5.4:</b> Yükleme çerçevesi 2'deki eksenel test düzeneği.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 73 |
| <b>Şekil 5.5:</b> Çerçeve 1 için eksenel test düzeneğinin boyutlandırılmış çizimi.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 73 |
| <b>Şekil 5.6:</b> Çerçeve 2 için eksenel test düzeneğinin boyutlandırılmış çizimi.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 73 |
| <b>Şekil 5.7:</b> a) Borunun düz ucu üzerinde işaretlemeler b) RieberLok contanın montajı c) birleşimden önceki görünüş.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 74 |
| <b>Şekil 5.8:</b> Çekme ve tekrarlı testler için doğu (a ve c) ve batı (b ve d) uçlarında yükleme çerçevesine boru bağlantıları.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 75 |
| <b>Şekil 5.9:</b> Zamana karşı iç basınç, aktüatör yer değiştirmesi ve eksenel kuvvet için PT44 sonuçları.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 80 |
| <b>Şekil 5.10:</b> PT44 için kuvvet ve a) aktüatör b) birleşim deplasmanı.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 80 |
| <b>Şekil 5.11:</b> PT44 için a) eksenel b) çevresel şekil değiştirme.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 81 |

|                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 5.12:</b> PT44 a) test öncesi b) test sonrası.                                                            | 81  |
| <b>Şekil 5.13:</b> PT45 numunesi basınç, eksenel kuvvet ve aktüatörün zamana karşı yer değiştirmesi için sonuçlar. | 82  |
| <b>Şekil 5.14:</b> PT45 için kuvvet ve a) aktüatör b) birleşim deplasmanı.                                         | 83  |
| <b>Şekil 5.15:</b> PT45 a) bağlantı bölgesi b) contadaki arıza ve c) testten sonra bağlantı.                       | 83  |
| <b>Şekil 5.16:</b> PT44 için a) eksenel b) çevresel şekil değiştirme.                                              | 84  |
| <b>Şekil 5.17:</b> PT46 numunesi basınç, eksenel kuvvet ve aktüatörün zamana karşı yer değiştirmesi için sonuçlar. | 85  |
| <b>Şekil 5.18:</b> PT46 için kuvvet ve a) aktüatör b) birleşim deplasmanı.                                         | 85  |
| <b>Şekil 5.19:</b> PT46 için a) bağlantıdaki kırılma anı ve b) hasar mekanizması.                                  | 85  |
| <b>Şekil 5.20:</b> PT46 için a) eksenel b) çevresel şekil değiştirme.                                              | 86  |
| <b>Şekil 5.21:</b> PT50 numunesi basınç, eksenel kuvvet ve aktüatörün zamana karşı yer değiştirmesi.               | 87  |
| <b>Şekil 5.22:</b> PT50 için kuvvet ve a) aktüatör b) birleşim deplasmanı.                                         | 87  |
| <b>Şekil 5.23:</b> PT50 için bağlantının a) doğu ve batı tarafı ve b) bağlantının düz ucunda kırılma.              | 87  |
| <b>Şekil 5.24:</b> PT50 için a) eksenel b) çevresel şekil değiştirme.                                              | 88  |
| <b>Şekil 5.25:</b> PT51 numunesi basınç, eksenel kuvvet ve aktüatörün zamana karşı yer değiştirmesi.               | 89  |
| <b>Şekil 5.26:</b> PT51 için kuvvet ve a) aktüatör b) birleşim deplasmanı.                                         | 89  |
| <b>Şekil 5.27:</b> PT51 için a) birleşimde kırılma anı ve b) bağlantının düz ucu tarafında kırılma.                | 89  |
| <b>Şekil 5.28:</b> PT51 için a) eksenel b) çevresel şekil değiştirme.                                              | 90  |
| <b>Şekil 5.29:</b> PT52 numunesi basınç, eksenel kuvvet ve aktüatörün zamana karşı yer değiştirmesi.               | 91  |
| <b>Şekil 5.30:</b> PT52 için kuvvet ve a) aktüatör b) birleşim deplasmanı.                                         | 91  |
| <b>Şekil 5.31:</b> PT52 için a) doğu ve batı tarafı b) hasar c) conta hasarı.                                      | 91  |
| <b>Şekil 5.32:</b> PT52 için a) eksenel b) çevresel şekil değiştirme.                                              | 92  |
| <b>Şekil 5.33:</b> Çekme testleri için eksenel kuvvete karşı a) aktüatör ve b) ortalama birleşim deplasmanları.    | 93  |
| <b>Şekil 5.34:</b> Çekme testleri için eksenel kuvvete karşı a) eksenel ve b) çevresel şekil değiştirme.           | 94  |
| <b>Şekil 5.35:</b> İç basınç, aktüatör yer değiştirmesi ve zamana karşı eksenel kuvvet için PS47 sonuçları.        | 95  |
| <b>Şekil 5.36:</b> PS47 kuvvet ve a) aktüatör b) birleşim deplasmanı.                                              | 96  |
| <b>Şekil 5.37:</b> PS47 için a) eksenel b) çevresel şekil değiştirme.                                              | 96  |
| <b>Şekil 5.38:</b> a) Testten önce PS47 birleşimi ve b) birleşim hasarı.                                           | 97  |
| <b>Şekil 5.39:</b> İç basınç, aktüatör yer değiştirmesi ve zamana karşı eksenel kuvvet için PS48 sonuçları.        | 98  |
| <b>Şekil 5.40:</b> PS48 kuvvet ve a) aktüatör b) birleşim deplasmanı.                                              | 98  |
| <b>Şekil 5.41:</b> PS48 için a) eksenel b) çevresel şekil değiştirme.                                              | 99  |
| <b>Şekil 5.42:</b> a) Testten önce PS48 birleşimi ve b) borunun düz ucu tarafında kırılma.                         | 99  |
| <b>Şekil 5.43:</b> İç basınç, aktüatör yer değiştirmesi ve zamana karşı eksenel kuvvet için PS49 test sonuçları.   | 100 |
| <b>Şekil 5.44:</b> PS49 kuvvet ve a) aktüatör b) birleşim deplasmanı.                                              | 100 |
| <b>Şekil 5.45:</b> PS48 için a) eksenel b) çevresel şekil değiştirme.                                              | 101 |
| <b>Şekil 5.46:</b> a) Testten önce PS49 birleşimi ve b) birleşim bölgesi hasarı.                                   | 101 |

|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 5.47:</b> İç basınç, aktüatör deplasmanı ve zamana karşı eksenel kuvvet için PS53 sonuçları.       | 102 |
| <b>Şekil 5.48:</b> PS53 kuvvet ve a) aktüatör b) birleşim deplasmanı.                                       | 103 |
| <b>Şekil 5.49:</b> PS53 için a) eksenel b) çevresel şekil değiştirme.                                       | 103 |
| <b>Şekil 5.50:</b> a) PS53 hasar anı ve b) birleşiminin geniş ucunda kırılma.                               | 104 |
| <b>Şekil 5.51:</b> PS54 için tekrarlı yükleme protokolü.                                                    | 105 |
| <b>Şekil 5.52:</b> İç basınç, aktüatör yer değiştirmesi ve zamana karşı eksenel kuvvet için PS54 sonuçları. | 105 |
| <b>Şekil 5.53:</b> PS54 kuvveti ve a) aktüatör ve b) birleşim deplasmanı.                                   | 106 |
| <b>Şekil 5.54:</b> PS54 için a) eksenel b) çevresel şekil değiştirme.                                       | 106 |
| <b>Şekil 5.55:</b> a) Testten önce PS54 birleşimi ve b) birleşim hasarı.                                    | 107 |
| <b>Şekil 5.56:</b> PS55 için tekrarlı yükleme protokolü.                                                    | 108 |
| <b>Şekil 5.57:</b> İç basınç, aktüatör yer değiştirmesi ve zamana karşı eksenel kuvvet için PS55 sonuçları. | 108 |
| <b>Şekil 5.58:</b> PS55 kuvveti ve a) aktüatör ve b) birleşim deplasmanı.                                   | 109 |
| <b>Şekil 5.59:</b> PS55 için a) eksenel ve b) çevresel şekil değiştirme.                                    | 109 |
| <b>Şekil 5.60:</b> a) Testten önce PS55 birleşimi ve b) bağlantı hasarı.                                    | 110 |
| <b>Şekil 5.61:</b> Tekrarlı yükleme testleri için kuvvet ve aktüatör yer değiştirme karşılaştırması.        | 111 |
| <b>Şekil 5.62:</b> PS47, PS48 ve PS49 tekrarlı yükleme testleri için kuvvet ve birleşim deplasmanı.         | 112 |
| <b>Şekil 5.63:</b> PS53, PS54 ve PS55 tekrarlı yükleme testleri için kuvvet ve birleşim deplasmanı.         | 112 |

## TABLÖLAR DİZİNİ

|                                                                                           | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| <b>Tablo 3.1:</b> Başlangıç gerilme koşulları için HS ve HSSS bünye modeli parametreleri. | 38                  |
| <b>Tablo 3.2:</b> Kumlu tabakalar için UBC3D-PLM model parametreleri.                     | 40                  |
| <b>Tablo 3.3:</b> PM4Sand bünye modeli parametreleri.                                     | 44                  |
| <b>Tablo 3.4:</b> UBC3D-PLM model parametreleri.                                          | 54                  |
| <b>Tablo 3.5:</b> Depo yapısını oluşturan yapısal elemanın özellikleri.                   | 55                  |
| <b>Tablo 4.1:</b> Mohr Coulomb davranış modeli parametreleri.                             | 58                  |
| <b>Tablo 4.2:</b> Başlangıç koşulu için FISH fonksiyonu.                                  | 59                  |
| <b>Tablo 4.3:</b> P2PSand model parametreleri.                                            | 60                  |
| <b>Tablo 4.4:</b> PVC boru eleman parametreleri.                                          | 61                  |
| <b>Tablo 4.5:</b> PVC boru hattı üzerinde meydana gelen gerilmeler.                       | 67                  |
| <b>Tablo 5.1:</b> Uygulanan testler ve özellikleri.                                       | 71                  |
| <b>Tablo 5.2:</b> a) Yükleme protokolü 1(LP-1) ve b) yükleme protokolü 2 (LP-2).          | 78                  |
| <b>Tablo 5.3:</b> PVC boru üzerinde yapılan çekme testlerinin karşılaştırılması.          | 93                  |
| <b>Tablo 5.4:</b> Tekrarlı yükleme testlerinin karşılaştırılması.                         | 111                 |

# 1. GİRİŞ

Altyapı sistemlerinin tasarımı, depremler gibi doğal afetler karşısında hizmetini devam ettirmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu yüzden altyapı sistemlerinin deprem gibi dinamik etkiler altında gösterdikleri davranışları kavrayabilmek sistem sürekliliğini sağlayabilmek açısından gereklidir. Geçmişte meydana gelen birçok depremden elde edilen bilgi ve kazanımlar ile yapılacak olan tasarımlar, doğal afetlere karşı güvenli sistemler oluşturmamıza olanak sağlarlar. Özellikle gelişmiş ülkelerde şehirleşmenin yaygınlaşmasıyla gelişen altyapı sistemlerinin güvenliği insan hayatı ve maddi açıdan önem taşımaktadır. Northridge (1994), Kobe (1995), Christchurch (2011) ve Kahramanmaraş (2023) depremleri gibi önemli depremler, altyapı sistemlerinin sıvılaşma, faylanma ve heyelanlar da dahil olmak üzere zemin deformasyonuna karşı hassasiyetini ortaya çıkarmıştır. Özellikle 2023 Kahramanmaraş depremleri nedeniyle 50000'nin üzerinde can kaybı meydana gelmiş ve depremden sonra toplumun ihtiyaçlarını karşılayabilmek için altyapı sistemleri üzerinde yoğun şekilde çalışmalar yürütülmüştür [Toprak vd., 2024c; Toprak vd., 2024d].

İçme suyu dağıtım sistemlerindeki gömülü boru hatları kaynaklı ve çeşitli bağlantı tiplerine sahip parçalı boru yapılarından oluşmaktadır. Bu parçalı boru hatları sıvılaşmaya bağlı kalıcı yer deformasyonuna (KYD) maruz kaldıklarında karmaşık davranışlar sergilerler. KYD tipik olarak zemin bozulmasının neden olduğu zemindeki kalıcı deformasyonlarla, aynı zamanda zemin içindeki kayma ve hacimsel şekil değiştirmeler ile karakterize edilir. Deformasyon hem eksenel hem de farklı düzlemlerde açısal bozulmalara yol açarak boru hattı hasarına ve temel hizmetlerin aksamasına neden olmaktadır.

Bu çalışmada 22 Şubat 2011 tarihinde Yeni Zelanda Christchurch eyaletinde 6.2 Mw büyüklüğünde meydana gelen Christchurch depremi ile 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen 7.7 M<sub>w</sub> ve 7.6 M<sub>w</sub> büyüklüklerindeki Kahramanmaraş depremlerinden dolayı hasar gören içme suyu sistemleri ile alakalı sayısal davranış analizleri uygulanmıştır. Her iki depremde de sıvılaşma nedeniyle önemli miktarda altyapı sistemi hasarı meydana gelmiştir [Toprak vd., 2024a]. Christchurch depreminden

dolayı asbestli çimento (AC), dökme demir (CI) ve polivinil klorür (PVC) tipi borularda meydana gelen hasarlar ve Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinden dolayı meydana gelen altyapı sistemleri için detaylı davranış analizleri sunulmuştur.

Christchurch'te sivilaşma nedeniyle meydana gelen 150 mm çapındaki PVC boru hasarı ve Şubat 2023 Kahramanmaraş depremi nedeniyle yağmur suyu yükseltme istasyonunda meydana gelen hasarlar için nümerik vaka analizleri uygulanmıştır. Nümerik modeller sonlu elemanlar yöntemine dayanan Plaxis 2D ve sonlu farklar yöntemine dayanan FLAC3D ile gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca TÜBİTAK 2214-A doktora sırası araştırma projesinden alınan destek ile Colorado Boulder Üniversitesi İnşaat, Mimarlık ve Çevre Mühendisliği Departmanı'na bağlı Altyapı, Enerji ve Uzay Testleri Merkezi'nde (CIEST) PVC boru hatları üzerinde deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

## 1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Deprem etkisi altında bulunan farklı tiplerdeki boru hatları için coğrafi bilgi sistemleri (CBS), nümerik yöntemler ve deneysel çalışmalar kullanılarak detaylı davranış ve hassasiyet analizleri uygulanmıştır. CBS kullanılarak Christchurch şehrine ait boru hasarları ile hasar ilişkileri geliştirilmiştir. Boru hatları için hasar ilişkileri tipik olarak boru hattı onarım oranlarını (RR) (hasar/km) en yüksek yer ivmesi veya hızı (PGA veya PGV) gibi deprem parametreleriyle, maksimum asal şekil değiştirme ( $\epsilon_{HP}$ ), eksenel mutlak şekil değiştirme ( $\epsilon_x$ ) ve açısal bozulma ( $\beta$ ) gibi yer hareketi parametreleriyle, sivilaşma potansiyeli indeksi (LPI) ve sivilaşma şiddeti sayısı (LSN) gibi sivilaşma parametreleriyle ilişkilendirmektedir [Toprak vd., 2014; Bouizou, 2015; Nacaroglu, 2017; Ceylan, 2020]. Onarım oranı (RR) boru hasar sayısının boru uzunluğuna bölünmesi ile elde edilen bir parametredir. Bu çalışma, onarım oranı (RR) ile sivilaşmadan etkilenen çeşitli boru hattı türleri (asbestli çimento (AC), dökme demir (CI) ve polivinil klorür (PVC)) arasında yeni ve daha iyi ilişkiler ortaya koymayı amaçlamaktadır. İlk kez tek bir parametre aracılığıyla yatay açısal bozulma ( $\gamma_{xy}$ ) ve düşey açısal bozulma ( $\beta_{vd}$ ) birleştirilmiş ve birleşik açısal bozulma ( $\beta_{com}$ ) parametresi geliştirilmiştir.

Veri seti 22 Şubat 2011 Christchurch depremine (6.2M<sub>w</sub>) ait boru hasar kayıtlarını içermektedir [Bouziou, 2015]. Birleşik açısal bozulma değerleri, yatay ve düşey

deformasyon değerlerinin vektörel olarak toplanmasıyla hesaplanmıştır. Hasar ilişkileri, RR ile yatay eksenel şekil değiştirme ( $\epsilon_x$ ) ve birleşik açısal bozulma ( $\beta_{com}$ ) arasında sahadaki gerçekliği temsil edecek şekilde korelasyon kurularak geliştirilmiştir. Eksenel şekil değiştirmelerin etkileri çekme ve basınç şekil değiştirmeleri için ayrı ayrı incelenmiştir. AC ve CI boruların mutlak, çekme ve basınç eksenel şekil değiştirmeleri altındaki davranışları, anlamlı ilişkiler kurmak için  $\beta_{com}$  ile analiz edilmiştir. Bu çalışma, farklı tipteki boru hatlarının sismik etkiler altında yatay, düşey ve eksenel şekil değiştirmelere (çekme ve basınç) karşı performansının ayrıntılı bir incelemesini sunmaktadır.

Sıvılaşma, depremin neden olduğu tekrarlı (çevrimli) yüklemenin boşluk suyu basıncını artırarak efektif gerilmeye bir azalmaya neden olması ve zemin mukavemetinde bir kayıpla sonuçlanmasıyla meydana gelir. Sarsıntıdan sonra gözenek basınçları dağıldıkça, zemin daneleri yeniden düzenlenir ve hacimsel sıkışma ve yüzey oturmalarına yol açar. Aynı zamanda zeminde boşluk suyu basıncının oluşumu ile bazı durumlarda zemin yüzeyinde yükselmeler de meydana gelebilmektedir.

Sıvılaşma sonrası zemin davranışını anlamak ve tahmin etmek, sismik olarak aktif bölgelerde riskleri azaltmak açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu kapsamda, sıvılaşmanın altyapı sistemlerine etkilerini analiz etmek amacıyla hem sonlu elemanlar hem de sonlu farklar yöntemleri kullanılarak iki ve üç boyutlu vaka analizleri gerçekleştirilmiştir. Sıvılaşma analizlerinde UBC3D-PLM, PM4Sand ve P2PSand gibi son yıllarda kullanımı artan gelişmiş davranış modelleri uygulanmış ve karşılaştırmalı sonuçlar sunulmuştur. Nümerik modellerin oluşturulmasında Christchurch depremi sonrası derlenen kapsamlı geoteknik veri setleri (NZGD) ve LiDAR ölçümleri kullanılmıştır. Bu veri setleri, sıvılaşma etkisi altındaki altyapı sistemlerinin gerçek saha koşullarında nasıl davrandığını anlamaya yönelik modelleme sürecine rehberlik etmiştir. Bu doğrultuda, altyapı sistemleri üzerinde sıvılaşmanın neden olduğu oturma ve deformasyonların etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Çalışma, gelişmiş davranış modellerini nümerik modelleme yöntemleriyle birleştirerek, sıvılaşmaya maruz kalan altyapı sistemlerinin tasarımında dayanıklılığı artırmanın gerekliliğini ve önemini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, gelecekteki depremlere karşı altyapı sistemlerinin daha güvenli ve dayanıklı bir şekilde tasarlanmasına yönelik değerli bir kaynak sunmaktadır.

Ayrıca tez kapsamında boru hatlarının eksenel yük altında davranışlarını ortaya koyabilmek için nominal 150 mm (6 inç) çaplı polivinil klorür (PVC) boru ve güçlendirilmiş contalı muflu bağlantıların eksenel performansını araştıran bir çalışma ile bir dizi test uygulanmıştır. Tüm testlerde RieberLok isimli contalar ile conta yerleşimine sahip (borunun genişletilmiş ucu) VinylTech ve Northern şirketlerinin üretiminde olan PVC borular kullanılmıştır. Bu çalışma iki farklı fabrikadan üretilen ve RieberLok contalarla eşleştirilen PVC borular için eksenel test sonuçlarını içermektedir. Ek olarak eksenel çekme ve tekrarlı yükleme testlerin sonuçları, deprem kaynaklı zemin kayması, fay kırılması ve sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma sırasında meydana gelebilecek önemli zemin deformasyonları sırasında bir boru hattı sisteminin karşılaşılabileceği dış ve iç yükleme koşullarının anlaşılmasına yardımcı olur ve böylece boru hattı sistemi kapasitesini karakterize edebilmektedir. Tüm testler **Wham vd., [2018, 2019]** tarafından sağlanan prosedürler ve tavsiyelerin yanı sıra şu anda geliştirilmekte olan ASCE Boru Hattı Sistemlerinin Sismik Test ve Değerlendirme Standardına (STEPS) uygun olarak tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel ve nümerik bulgular karşılaştırmalı olarak sunulurken boru hatlarının servis kabiliyetinin değerlendirilmesi yapılmıştır.

## 1.2. Literatür

Bu çalışmada deprem etkisi altında meydana gelen deformasyonların boru hatları üzerindeki etkileri coğrafi bilgi sistemleri, nümerik yöntemler ve deneysel analizler ile ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Burada sunulan literatür içeriği bu sıra ile verilerek bu çalışmanın farklılıkları ortaya koyulmuştur.

CBS depremlerden dolayı meydana gelen boru hasarları ile çeşitli deprem ya da şekil değiştirme parametrelerini kullanarak hasar ilişkileri geliştirmemize olanak sağlamaktadır. Önceki çalışmalar zemin şekil değiştirmelerini boru hattı onarım oranı (hasar/km) ile ilişkilendirmeye odaklanmıştır [**O'Rourke ve Deyoe, 2004**]. Açısız bozulmalar, genellikle hem boru hattı hasar konumlarının hem de zemin yer değiştirme bilgilerinin sınırlı olması nedeniyle başlangıçta bu hasar korelasyonlarına dahil edilememiştir. **O'Rourke vd., [2014]** tarafından yapılanlar gibi daha yeni gelişmeler, bu korelasyonları açısız bozulmaları içerecek şekilde genişletmiştir. Bu genişletme, depremden önce ve sonra sabit kanatlı uçaklardan Lazer Görüntüleme Algılama ve

Sınırlama (LiDAR) sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu teknolojinin kullanımı, veri toplamadaki ilerlemelere katkıda bulunarak daha kapsamlı boru hattı ve zemin yer değiştirme bilgileri sağlamıştır. Çeşitli araştırmacılar yıllar içinde boru hattının temel özelliklerini ve hasar korelasyonlarını yayınlarak bu alana katkıda bulunmuşlardır. **O'Rourke ve Toprak [1997]**, **ALA [2001]**, **Toprak ve Taşkın [2007]**, **Ballantyne [2010]**, **O'Rourke vd., [2014]**, **Toprak vd., [2022]** ve **Bellagamba vd., [2019]** tarafından yapılan çalışmalar bunlara örnek olarak verilebilir. **Toprak vd., [2019]**, tek boyutlu hacimsel deformasyon parametresi ( $S_{VID}$ ), sıvılaşma potansiyel indeksi (LPI) ve sıvılaşma şiddet sayısı (LSN) gibi sıvılaşma parametrelerini içeren korelasyonlar sunmuştur. **Bellagamba vd., [2019]** PGV ile boru özellikleri ve sıvılaşmaya karşı zemin duyarlılığı gibi parametreleri dikkate almıştır. 2011 Christchurch depreminin ardından, **O'Rourke vd., [2014]** ve **Bouziou ve O'Rourke [2017]** tarafından yapılan çalışmalar, yatay şekil değiştirme ve açısız bozulmanın onarım oranı (RR) üzerindeki birleşik etkilerini araştırmıştır. **Bouziou ve O'Rourke [2017]** boru ekseninde meydana gelen yatay şekil değiştirmeleri olasılıksal yöntemler ile hesaplayarak farklarını ortaya koymuşlardır. **Toprak vd., [2022]**, RR ile eksenel şekil değiştirme arasındaki korelasyonlar için boru hattı doğrultusu dikkate alarak yatay şekil değiştirmeye bağlı korelasyonlar geliştirmişlerdir.

Bu çalışma ise boru hattı doğrultusunu hesaba katarak RR ile eksenel şekil değiştirme ve hem yatay hem de düşey düzlemlerde açısız bozulma arasında korelasyonlar geliştirmektedir. İlk kez üç boyutlu zemin deformasyonunun tüm bileşenlerinin kapsamlı bir değerlendirmesi ile RR regresyonlarını araştırmaktadır. Bu araştırmalarda Christchurch depreminde meydana gelen sıvılaşmalar nedeniyle oluşan boru hasarları dikkate alınmıştır. **Şekil 1.1** Christchurch depremi nedeniyle meydana gelen AC ve CI boru hasarlarını göstermektedir.

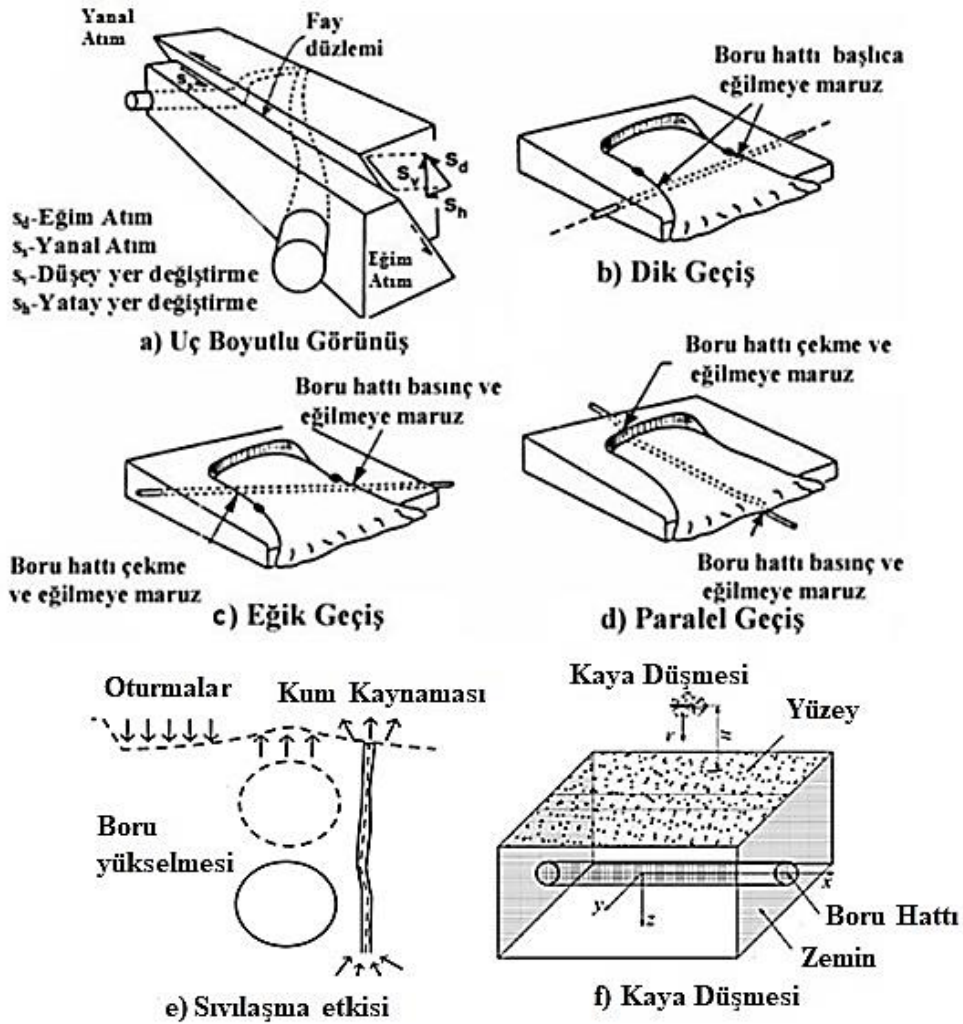


**Şekil 1.1:** Christchurch depreminin neden olduğu a) AC tipi boruda çevresel hasar ve b) Kırık CI tipi boru [Cubrinovski vd., 2014].

Deprem kaynaklı boru hasarları genellikle literatürde iki ana başlık altında incelenmektedir: kalıcı yer deformasyonları (KYD) ve geçici yer deformasyonları (GYD). GYD deprem sırasında oluşan ve deprem sonrasında etkisi sona eren deformasyonları ifade ederken, KYD, fay atımı, oturmalar, sıvılaşma deformasyonları (yanal yayılma, oturma) ve şev yenilmeleri gibi kalıcı etkileri içermektedir. GYD etkileriyle boru hasarlarının ilişkilendirilmesinde genellikle deprem şiddet parametreleri (PGA, PGV vb.) ile boru hasarları arasında geliştirilen ilişkiler kullanılmaktadır [Toprak vd., 2008]. Bu ilişkiler, vaka verilerine dayanılarak geliştirilen tasarım deprem parametreleriyle birleştirilerek bölgesel altyapı tasarımı ve deprem senaryolarına bağlı hasar tahmini yapılabilmektedir [Toprak ve Taşkın, 2007]. Örneğin sıvılaşma şiddeti katsayısı (LSN) kullanılarak sıvılaşma kaynaklı oturmaları değerlendiren hasar ilişkileri geliştirilmiştir [Toprak vd., 2019].

Boru hatları deprem gibi doğal afetler nedeniyle çeşitli yüklemelere maruz kalır ve boru tipine bağlı olarak bu etkilere karşı farklı tepkiler gösterirler. Şekil 1.2’de boru hatlarının maruz kaldığı çeşitli yükleme tipleri yer almaktadır. Bunlardan kaynaklanan gömülü boru hattı hasarını etkileyen faktörler birçok araştırmacı tarafından ortaya konmuştur [Newmark ve Hall, 1975; Kennedy vd., 1977; Takada vd., 1998; Vazouras vd., 2010; Vazouras vd., 2015]. Vazouras vd., [2010] fay kayma bölgesinin genişliğinin borunun mekanik davranışı üzerinde önemli bir etkisi olmadığını, boru hattı duvarındaki aşırı basınç gerilmelerine bağlı yerel burkulmanın ise hasar mekanizmasının yönetim modu olduğunu belirtmektedir. Vazouras vd., [2015], boru hattı eksenine ile fay hattı düzlemi (çarpma-kayma fayı) arasındaki çeşitli (0-25-45) açılara karşılık gelen sonsuz ve sonlu boru hattı (çelik boru) uzunluklarını

dikkate alarak, boru hattındaki çekme gerilmelerinin kesişme açısı arttıkça arttığını göstermiştir. **Kaya vd., [2017]**, fay hattını 55°'lik bir açıyla kesen 2200 mm çapındaki kaynaklı çelik boru üzerinde bir vaka analizi gerçekleştirmiştir. Boru hattı 1999 Kocaeli depreminin neden olduğu 3 m'lik sağ yanal hareket nedeniyle hasar görmüştür. Çalışmaları, büyük plastik gerilmelere sahip basınç yükleri altındaki boruların davranışının oldukça karmaşık olduğunu ve boru ucu koşullarına, iç basınca ve toprak dolgu malzemesinin özelliklerine çok duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Literatürde fay geçişlerindeki boru hasarları ile ilgili sınırlı sayıda vaka çalışması bulunmaktadır ve Kahramanmaraş depremleri bu az sayıdaki vakalara yeni örnekler eklemiştir.



**Şekil 1.2:** Gömülü boru hatlarını etkileyen başlıca jeolojik tehlikelerin şematik gösterimi: a) fay hareketi; b-d) sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmalar dahil heyelanlar; e) sıvılaşma etkileri; f) kaya düşmeleri [O'Rourke, 1998; Castiglia vd., 2020; Rao vd., 2022; Toprak vd., 2024].

Sıvılaşma kaynaklı yer deformasyonları, deprem riskli bölgelerde, özellikle de gevşek, doymuş kumlu zeminlerin bulunduğu alanlarda yapılar için önemli riskler taşımaktadır. Northridge (1994), Kocaeli (1999), Christchurch (2011) ve Kahramanmaraş (2023) depremleri gibi büyük sismik olaylar, boru hatları, tüneller ve temeller gibi yapıların, sıvılaşmanın neden olduğu zemin deformasyonlarına karşı savunmasızlığını bir kez daha ortaya çıkarmıştır. Bu deformasyonlar genellikle yüzey oturmaları, yanal yayılma ve yükselme olarak ortaya çıkmaktadır ve geoteknik deprem mühendisliğinde önemli bir odak noktası olmuştur.

Sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma deformasyonları genellikle ampirik yöntemlerle hesaplanmakta ve bu deformasyonlar boru-zemin etkileşim yaylarıyla modele entegre edilmektedir [El Hmadi ve O'Rourke, 1988; Vasseghi vd., 2021]. Fay atımlarında ise fayın sınırlarını belirlediği blok sabit bir yer değiştirme etkisi altındadır; bu nedenle, fay atımı kaynaklı deplasmanların model çıktısı olarak hesaplanmasına gerek duyulmamaktadır. Bunun yerine, fay atımı kaynaklı blok yer değiştirmeleri doğrudan modele girdi olarak tanımlanabilir [Vazouras vd., 2010; Kaya vd., 2017; Uçkan vd., 2024]. Sonuç olarak, GYD etkilerinin daha geniş bir alana yayıldığı, KYD etkilerinin ise daha lokal kaldığı ancak etkilerinin yüksek olduğu gözlemlenmektedir.

**Saeedzadeh ve Hataf [2011]**, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak sismik yükler altında dilatansi açısı, rölatif sıkılık ( $D_r$ ), boru çapı, gömme derinliği, yer altı su seviyesi ve doymuş zemin tabakası kalınlığının boru hattındaki yüzdürme etkisine olan etkilerini incelemiştir. Araştırma, doymuş zemin tabakasının kalınlığındaki artışın, deprem kaynağı ile borunun tabanı arasındaki mesafeyi artırarak deprem etkisini zayıflattığını ve bunun sonucunda yüzdürme etkisinin azaldığını göstermiştir. **Ceylan vd., [2024]** Christchurch depremi nedeniyle meydana gelen AC boru hattı için nümerik vaka analizleri uygulamış deney sonuçları ile karşılaştırarak sismik talepleri değerlendirmiştir.

**Tatsuoka vd., [1984]**, **Tokimatsu ve Seed [1987]**, ve **Ishihara ve Yoshimine [1992]**, serbest saha koşullarında özellikle temiz kumlar için sıvılaşma sonrası oturmaları tahmin etmek için bazı ampirik yöntemler sağlamıştır. Deneysel verilere ve saha gözlemlerine dayanan bu yöntemler, hacimsel deformasyonların tahmin edilmesini sağlamıştır. **Zhang vd., [2002]** ve **Maurer vd., [2015]**, yerinde CPT verilerini entegre ederek bu yaklaşımları genişletmiş ve oturmaları daha yüksek doğrulukla tahmin etme yeteneğini geliştirmiştir.

**Juang vd., [2013]** tarafından geliştirilen olasılıksal modeller ve **Chiaradonna vd., [2019]** tarafından geliştirilen basitleştirilmiş prosedür gibi son gelişmeler, aşırı boşluk suyu basıncı ve zemin özelliklerindeki değişkenliği ele alarak sahaya özgü koşullara uyarlanabilecek çerçeveler sunmaktadır. Bu gelişmeler, yalnızca aşırı boşluk suyu basınçlarından değil, aynı zamanda zemin bileşimi ve sismik özellikler gibi faktörlerden de etkilenen sıvılaşma kaynaklı oturmaların karmaşıklığını vurgulamaktadır.

**Çetin vd., [2009]**, sıvılaşma sonrası yeniden konsolidasyon oturmasındaki değişkenliği yakalamak için hem temiz hem de siltli kumları ele alan döngüsel basit kesme testi verilerini içeren olasılıksal bir yaklaşım önererek önceki yöntemleri genişletmiştir. Çerçeveleri, tahminleri saha vaka geçmişleriyle kalibre etmek için maksimum olabilirlik tahminini kullanmış ve sismik tasarım için olasılıksal risk değerlendirmesini entegre eden önemli bir metodolojik ilerlemeye işaret etmiştir. **Juang vd., [2013]**'de olasılıksal CPT tabanlı bir modele katkıda bulunmuş, önceki tahminleri ele alarak ve modellerini sıvılaşma sahalarından elde edilen kapsamlı saha verilerine dayandırarak sıvılaşmış zeminler için oturma tahminlerini iyileştirmiştir.

**Shamoto vd., [1996]** daha ileri bir metodolojik iyileştirmede, serbest alan koşullarını simüle etmek için laboratuvar testlerine odaklanarak oturmaları tahmin etmek için basitleştirilmiş bir prosedür sunmuştur. Bu yaklaşım, özellikle değişen ince kum içeriğine sahip kumlar için farklı kayma gerilme koşulları altında sıvılaşma oturmalarına ilişkin bilgiler sağlamıştır. Benzer şekilde, **Chiaradonna vd., [2019]** güvenlik faktörünü aşırı boşluk suyu basıncı profilleri ile ilişkilendirerek oturmaları tahmin etmek için basitleştirilmiş bir boyutlu analiz önermiş, ancak boşluk suyu basıncını yalnızca hacimsel şekil değiştirme tahmini için kullanırken doğruluktaki sınırlamaları kabul etmiştir. **Tsukamoto vd., [2004, 2010]** tarafından yapılanlar da dahil olmak üzere güncel çalışmalar, siltli kumlar üzerindeki döngüsel üç eksenli deneylerden elde edilen bulguları entegre ederek ampirik oturma modellerini daha da genişletmiş ve yalnızca temiz kumların ötesinde zemin türleri genelinde oturma tahminlerini geliştirmiştir. Bu katkılar, çevrimsel gerilme oranı ve rölatif sıkılıktan boşluk suyu basıncı dağılım dinamiklerine kadar değişen bir dizi faktörden etkilenen sıvılaşma kaynaklı oturmanın karmaşık mekaniğinin altını toplu olarak çizmektedir.

Sunulan bu çalışmada, **Zhang vd., [2002]** ve **Ishihara ve Yoshimine [1992]** tarafından geliştirilen iki önemli ampirik yöntem, serbest alan koşullarında sıvılaşma

kaynaklı oturmaları tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu yöntemler, zemin özellikleri ile sismik kaynaklı hacimsel şekil değiştirme arasındaki ilişkilere dayanan değerli bilgiler sağlayarak mühendislerin sıvılaşma sonrası yüzey deformasyonlarını tahmin etmelerine olanak tanımaktadır. Ampirik yaklaşımlara ek olarak, sıvılaşma sırasında ve sonrasında zeminlerin karmaşık, doğrusal olmayan davranışını yakalamak için sonlu elemanlar yöntemi ile UBC3D-PLM ve PM4Sand gibi davranış modelleri kullanılarak gelişmiş nümerik simülasyonlar uygulanmıştır.

Nümerik yaklaşımlar, gelişmiş davranış modelleri sayesinde karmaşık zemin profilleri, drenaj koşulları ve yük etkilerini içeren durumlarda sıvılaşma kaynaklı oturmaların tahmini için önemli bir araç haline gelmiştir. Literatürde, yapı altındaki sıvılaşma kaynaklı oturmaların değerlendirilmesine yönelik birçok çalışma bulunmasına rağmen, serbest alan koşullarında bu konuyu ele alan çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır [Popescu ve Prevost, 1993; Dashti vd., 2010; Bray ve Dashti, 2014; Mehrzad vd., 2016; Tokimatsu vd., 2019; Subaşı ve İyisan 2022]. Bu çalışmalar, yapı altındaki oturmaların tahmini için yarı-ampirik yöntemlerin kullanımı durumunda, çoğunlukla zemin ve temel etkileşiminden kaynaklanan kayma şekil değiştirmelerini dikkate almamaları nedeniyle güvensiz sonuçlar elde edilebileceğini göstermektedir.

Sıvılaşma davranışına yönelik son yıllarda yapılan deneysel ve nümerik çalışmalar, bu konudaki bilgi birikimine önemli katkılar sağlamıştır. Şili, Doğu Japonya ve Christchurch depremlerinin ardından Cubrinovski vd., [2011], Yasuda vd., [2012], Van Ballegooy vd., [2014], Ishihara vd., [2013], Verdugo ve Gonzales [2015] ile gibi araştırmacılar, sıvılaşma sonuçlarını gözlemlemek için kapsamlı saha çalışmaları gerçekleştirmiştir.

Sıvılaşma nedeniyle meydana gelen boru hasarlarında ise literatürde kısıtlı çalışma bulunmaktadır. Shabani ve Jeng [2007] ile Sumer vd., [2006] su dalgalarının etkisi altındaki sıvılaşmış zeminlerde boruların davranışlarını analiz etmişlerdir. Valletti vd., [2018], Bento ve Silva [2004], Xia ve Zhang [2018], Takada vd., [2001] ise sıvılaşma durumunda boruların farklı yönlerini incelemiş, ancak bu çalışmalarda kapsamlı ve entegre bir yaklaşım sunulamamıştır. Sonlu farklar yöntemine dayanan analizler ve özellikle FLAC3D programı kullanılarak yapılan boru hattı sistem analizleri oldukça sınırlıdır. Hassani ve Basirat [2019], FLAC3D'yi kullanarak yalnızca fay hattını kesen polietilen boruların analizini gerçekleştirmiş ve bu sonuçları

deneysel verilerle karşılaştırmıştır. Diğer araştırmacılar ise FLAC3D'yi borular yerine farklı yapı elemanlarının incelenmesinde kullanmıştır. **Esfeh ve Kaynia [2019]**, doğrusal olmayan dinamik analizler ile sıvılaşma modellemeleri uygulamış, FLAC3D sonuçlarının deney verileriyle uyumlu olduğunu göstermiş, ancak bu çalışmada kazıkların davranışına odaklanmıştır.

Günümüzde sıvılaşma davranışını ortaya koyabilmek için birçok davranış modeli geliştirilmiş olsa da bunlardan birçoğu sıvılaşmanın karmaşık yapısını oluşturamamaktadır. P2PSand, Finn, UBCSand, UBC3D-PLM, PM4Sand ve DM04 davranış modelleri sıvılaşma analizi modellerine örnek olarak sıralanabilir. Sıvılaşma sürecinin doğrusal olmayan lineer bir davranış göstermesinden dolayı deprem süresi boyunca zeminin kayma modülü değişimi, sönüm oranı değişimi gibi birçok tahmin edilmesi güç davranış meydana gelmektedir. Sismik dalgaların yayılımı ve sönümlenmesi gibi doğal zemin davranışının doğru şekilde modellenenebilmesi analizlerin gerçekliği için önemli faktörler arasındadır. Mevcut literatürde tekrarlı yükleme altında sıvılaşma analizi için P2PSand modeli kullanılarak boru hattı analizi araştırması bulunmamaktadır. Öte yandan çeşitli araştırmacılar dikdörtgen şekilli gömülü yapılar için FLAC3D ile analizler uygulanmıştır. Ayrıca heyelan altında boru hattının maruz kaldığı olası hasar mekanizmaları P2PSand kullanılarak ele alınmıştır.

Tez çalışması kapsamında yapılan iki boyutlu sıvılaşma analizleri Plaxis 2D programı ile UBC3D ve PM4Sand modelleri kullanılarak uygulanmıştır. Üç boyutlu analizlerde birçok deneysel sonuç ile doğruluğu gösterilmiş P2PSand davranış modeli kullanılmıştır. **Cheng [2018]** tarafından sunulan P2PSand model şu anda piyasada bulunan geoteknik kod yazılımı FLAC3D V9.0 içerisinde bulunmaktadır **[Itasca, 2024]**. P2PSand modeli temel dinamik zemin özelliklerini kapsamayı amaçlayan genel 3D geoteknik deprem mühendisliği uygulaması için pratik iki yüzeyli plastik kum (Practical TWO-surface Plastic SAND) davranış modelini ifade etmektedir. Bu model, **Dafalias ve Manzari [2004]** tarafından geliştirilen DM04 modelinde yapılan değişiklikler ile oluşturulmuştur. DM04 modelinin genel çok eksenli formülasyonunu uygulamakta ve bu nedenle genel 3D sınır değer problemleri için kullanılabilir **[Cheng, 2018]**.

Ayrıca Christchurch'ten alınan LiDAR ölçümleri, yüzey deformasyon tahminlerinin doğruluğunu karşılaştırmak için kullanılmıştır. LiDAR, yüksek çözünürlüklü topografik veriler sağlayarak geniş alanlardaki zemin deformasyonlarının hassas bir

şekilde haritalanmasına olanak tanır. Çalışma, bu LiDAR ölçümlerini ampirik ve nümerik yöntemlerle birleştirerek, sivilaşma nedeniyle oturma tahminlerini iyileştirmeyi ve özellikle geçmiş depremlerden etkilenen kentsel ortamlarda sivilaşma kaynaklı deformasyonların anlaşılmasını geliştirmeyi amaçlamaktadır. Ampirik yöntemler, LiDAR verileri ve nümerik simülasyonlardan elde edilen sonuçları karşılaştıran bu çalışma, sivilaşma kaynaklı oturmaların kapsamlı bir değerlendirmesini sunarak gelecekteki deprem olayları için daha güvenilir tahmin modellerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Geçmiş depremlerden sonra meydana gelen boru hattı hasarları, Kahramanmaraş depremlerinde olduğu gibi, toplumsal yaşamın sürdürülmesi için kritik öneme sahiptir. Bu olaylardan bu yana, boru üreticileri tarafından boru hattı sistemlerinin sismik yüklemeye maruz kaldığında performanslarını iyileştirmek için önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bununla birlikte, boru hattı sistemlerinin sismik tasarımına yönelik mevcut endüstri standartları yetersiz kalmaktadır. ‘ASTM D 1599’ hidrostatik patlama testi ve ‘ASTM D 638’ çekme mukavemeti testi gibi iç basınç ve malzeme testleri ile üretilen hidrostatik yüklemeye ilişkin çoğu endüstriyel kabul standardı mevcuttur [AWWA, 2007]. Deneysel testler, deprem kaynaklı zemin deformasyonlarını temsil eden harici yüklemeye maruz kalan boru hattı sistemlerinin, hidrostatik patlama testi sırasında gelişenlerden çok daha az eksenel gerilmelerde hasar alabileceğini göstermiştir [Ihnotic, 2019]. Eskiyen kamu hizmeti sistemlerini yenilemeye çalışırken, tasarımcıların yeni ve gelişmekte olan sistemlerin sismik olayların getirdiği yer hareketlerini karşılama kabiliyetini anlamaları çok önemlidir [Berty vd., 2022]. Gömülü boru hattı sistemlerinin sismik tasarımına ilişkin mevcut endüstri tasarım standardı ISO16134: Sünek demir boru hatlarının depreme ve çökmeye dayanıklı tasarımıdır [ISO, 2020]. ISO16134 kayma direnci için performans sınıfları sağlamaktadır.

Sismik yükleme altında boru hattının davranışını ve servis kabiliyetini sürdürmesini etkileyen birçok faktör mevcuttur. Boru hattı sistemlerini sismik olarak sınıflandırmaya yönelik bir başka çaba da Davis vd., [2019] tarafından önerilmiştir. Davis vd., [2019] geçici yer deformasyonu altında boru hatlarının karşılması gereken sismik talepleri eksenel şekil değiştirmeler ve açısal bozulmalar açısından belirlemiştir.

## 2. BORU HATTI HASARI ÜZERİNDEKİ DEPREM ETKİLERİ VE HASAR İLİŞKİLERİ

Christchurch depremiyle elde edilen hasar veri tabanı boru hasarlarının çeşitli yükler altında hasara uğradığını göstermiştir. Depremler nedeniyle oluşan çekme ve basınç şekil değiştirmeleri boru hattı davranışını farklı şekilde etkilemektedir. Örneğin, segmentli boru hatları eksenel şekil değiştirmeye maruz kaldığında birleşim yerlerinden ayrılarak işlevini yitirebilmektedir. Ayrıca farklı malzemelerden (dökme demir (CI), asbestli çimento (AC) veya polivinil klorür (PVC)) yapılmış boru hatlarının eksenel basınç ve çekme gerilmelerine tepkisi önemli ölçüde değişebilir. Açısal bozulmalar yatay, dikey veya birleşik yatay ve dikey düzlemlerde meydana gelebilmektedir. Tanımlanan etkiler zemin koşullarından ve depremin büyüklüğünden etkilenir. Hem yatay hem de dikey deformasyonlar aynı anda mevcut olabilir ve boru bağlantılarında ve boru hattı boyunca, özellikle korozyondan etkilenenler gibi hassas noktalarda hasarlara neden olabilmektedir. Tez kapsamında 2011 Christchurch depreminin Christchurch su dağıtım sistemi boru hatları üzerindeki eksenel şekil değiştirme ve açısal bozulma etkileri araştırılmıştır. Christchurch'ün zemin koşulları ve yüksek yeraltı suyu dalgalanmaları nedeniyle sıvılaşmaya karşı yüksek hassasiyeti nedeniyle boru hattı dağıtım sistemi sıvılaşmadan olumsuz etkilenmiştir.

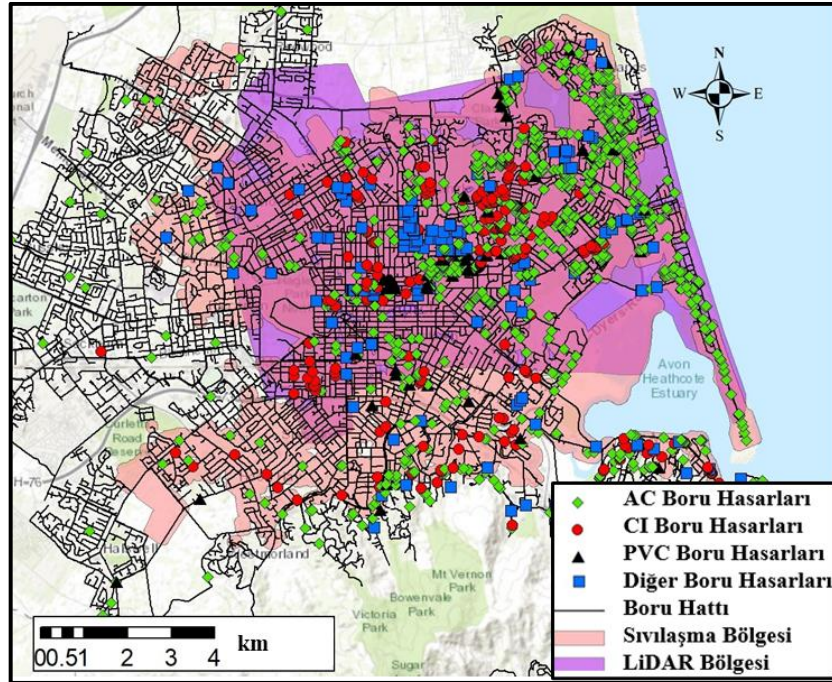
### 2.1. Çalışma Alanı ve CBS Veri Tabanı

Veri derleme, analiz ve sonuç sunumu için Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılmıştır. Araştırma boyunca hem ARCGIS hem de QGIS yazılımları kullanılmıştır. ARCGIS, **ESRI [2011]** aracılığıyla kullanılabilen ticari bir program QGIS ise açık kaynaklı bir yazılımdır. Veriler CBS'de hem raster hem de vektör bileşenleri olarak elde edilmiştir.

Christchurch'te 22 Şubat 2011 tarihinde meydana gelen deprem, şehir su sisteminde ciddi hasara yol açmış ve deprem sonrası benzeri görülmemiş veriler ortaya çıkmıştır. Christchurch veri seti, yer hareketinin yüksek çözünürlüklü LiDAR ölçümlerini ve binlerce kilometrelik yeraltı boru hattı için hasar kayıtlarını içermektedir. Christchurch'te bulunan 75 ila 600 mm çapındaki şebekeler akiferlerden ve rezervuarlardan su taşımaktadır. Bunlar tipik ABD ve Avrupa su dağıtım sistemlerinde

kullanılan su şebekelerine eşdeğerdir. Tali borular, sınırlı sayıda müşteriye su sağlamak için şebekeden ayrılan, genellikle 75 mm'den daha küçük çaplı boru hatlarıdır. Bunlar ABD'deki ve dünyanın başka yerlerindeki su kaynaklarının tipik bir örneği değildir. Bu çalışma ise diğer su dağıtım sistemlerinin çoğuyla ilgili olması için yalnızca su ana hattı hasarları üzerine odaklanmaktadır. Veri seti, Daha Güçlü Christchurch Altyapı Yeniden İnşa Ekibinden (Stronger Christchurch Infrastructure Rebuild Team, SCIRT) alınan ve **Bouziou [2015]** tarafından güncellenen en son boru hasar kayıtlarını içermektedir.

**Şekil 2.1** Christchurch şehrinin su dağıtım sistemini, 2011 depreminin ardından oluşan hasarları ve LiDAR araştırmalarıyla haritalanan sıvılaşma ve kalıcı yer deformasyonu (KYD) bölgelerini göstermektedir. **Şekil 2.1**'de gösterilen sıvılaşma alanları, Canterbury Geoteknik Veri tabanı **[CGD, 2013]** aracılığıyla ulaşılabilen, hava fotoğrafları ve saha araştırmalarıyla kaydedilen sıvılaşma etkilerini ortaya koyan haritalardan oluşturulmuştur. Sıvılaşma etkileri kum kaynaması, yanıl yayılma ve farklı yüzey oturmalarıdır. Buna ek olarak, sıvılaşma bölgeleri bir tampon bölge veya standart bir konut caddesinin kabaca yarısı uzunluğunda 125 m genişletilmiş çevre içerir. Bu uzunluk ise boru hattı çekilmesinin uzunlamasına iletilebileceği mesafedir **[O'Rourke ve Liu, 1999]**.



**Şekil 2.1:** Christchurch su dağıtım boru hatları ve 22 Şubat 2011 depremi için boru hasarları **[Toprak vd., 2021]**.

Havadan LiDAR, lazer tarama teknolojisini kullanan bir hava araştırması yöntemidir. İncelenen bir alan boyunca milyonlarca veri noktası toplama kapasitesine sahiptir. Bu çalışmada kullanılan LiDAR verileri, Canterbury Deprem Dizisi'nin (CES) büyük depremlerinden önce ve sonra Avustralya Hava Haritacılığı (AAM) ve Yeni Zelanda Hava Haritacılığı (NZAM) tarafından elde edilen verilerdir. Veriler GNS Science tarafından Tonkin ve Taylor Ltd. (T&T) adına değerlendirilmiştir. Yatay yer hareketleri 4 m ve 56 m aralıklarla, düşey yer hareketleri ise 5 m aralıklarla ölçülmüş ve hepsi raster formatında elde edilmiştir. Sırasıyla 4 m ve 5 m'lik yatay ve düşey hareket aralığı, tipik olarak 6 m'ye eşit veya daha az olan su boru hattı bağlantıları arasındaki mesafe ile tutarlıdır.

Analizi kolaylaştırmak için, yanal kuzey-güney (KG) ve doğu-batı (DB) yer hareketlerinin raster verileri CBS'de ayrı ayrı nokta verilerine dönüştürülmüştür. Yatay ve dikey yer hareketleri için sırasıyla 4 m ve 5 m aralıklı kafes verileri, CBS'de birleştirme ve ağ işlemleri yoluyla elde edilmiştir. Elde edilen kafes noktaları ve poligonlar Christchurch şehir alanının yaklaşık 74 km<sup>2</sup>'sini kapsamaktadır ve LiDAR 12 x 9 km'lik bir alanı 4.270.841 veri noktası ile kapsamaktadır. Göller, nehirler vb. su kütleleri için veri noktası bulunmamaktadır. İki veri tabanı oluşturulmuştur: biri yatay yer hareketleri için, her veri noktasının doğu-batı ve kuzey-güney yönlerinde koordinatları ve yatay yer değiştirmeleri içeren, diğeri ise düşey yer hareketleri için her veri noktasının koordinatları ve dikey yer değiştirmeleri içeren dosyadır.

Yatay şekil değiştirmeler ve açısal bozulmaları hesaplamak için LiDAR yer değiştirme verileri kullanılmıştır. Boru hatlarının ve hasarların CBS değerlendirmeleri daha sonra çeşitli şekil değiştirme seviyelerine ve açısal bozulmalara karşılık gelen RR'yi hesaplamak için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, CBS ve elektronik tablolar kullanılarak entegrasyon yoluyla zemin şekil değiştirmelerinin sayısal olarak belirlenmesini içeren sonlu elemanlar tekniği uygulanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi (SE), bir sürekliliği sonlu elemanlara ayıran yaygın olarak kullanılan sayısal bir tekniktir. Sonlu eleman düğümlerindeki enterpolasyon fonksiyonları aracılığıyla şekil değiştirmeleri ve açısal bozulmaları çözer. 4x4 m kare elemanlarla LiDAR veri noktalarından oluşan bir kare desen kullanılmıştır. Köşelerde doğu-batı ( $u_i$ ) ve kuzey-güney ( $v_i$ ) yer değiştirmelerini içeren genişletilmiş bir kare elemandan oluşmaktadır. göstermektedir. LiDAR veri noktaları esasen zemin elemanı için düğüm noktaları olarak işlev görmektedir.

**Şekil 2.2b** x eksenine göre boru doğrultusunun yanı sıra asal şekil değiştirme, eksenel şekil değiştirme ve boru doğrultusuna dik şekil değiştirme tanımlarını da göstermektedir. Elemanların köşelerindeki eşit olmayan yer değiştirmeler nedeniyle, her bir eleman deformasyona uğrar. Bu deformasyonlara karşılık gelen eleman merkezlerindeki şekil değiştirmeler **Cook [1995]** tarafından sunulan ve literatürde yaygın olarak bulunan sonlu eleman formülü denklem (2.1) ile elde edilmiştir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{(2a)^2} \begin{bmatrix} -(a-y) & 0 & (a-y) & 0 & \dots \\ 0 & -(a-x) & 0 & -(a+x) & \dots \\ -(a-x) & -(a-y) & -(a+x) & (a-y) & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_4 \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

Köşe yer değiştirmeleri  $u_1, v_1, u_2, v_2, \dots, v_4$  olarak gösterilir, burada x ve y koordinatları iki boyutlu uzayı, “a” ise kare elemanın kenar uzunluğunu temsil eder. Denklem 2.1 ile yapılan analizler sonucunda her bir eleman için doğu-batı ( $\varepsilon_x$ ) ve kuzey-güney ( $\varepsilon_y$ ) yönlerindeki şekil değiştirmeler ile xy düzlemindeki kayma şekil değiştirmeleri ( $\gamma_{xy}$ ) hesaplanabilmektedir. Buna ek olarak, elemandaki asal şekil değiştirmeler denklem (2.2) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Bir borunun doğu-batı yönlerindeki yönelimi **Şekil 2.2b**’de gösterilmektedir. Boru doğrultusunda gerçekleşen zemin şekil değiştirmesi denklem (2.3) ile hesaplanmıştır.

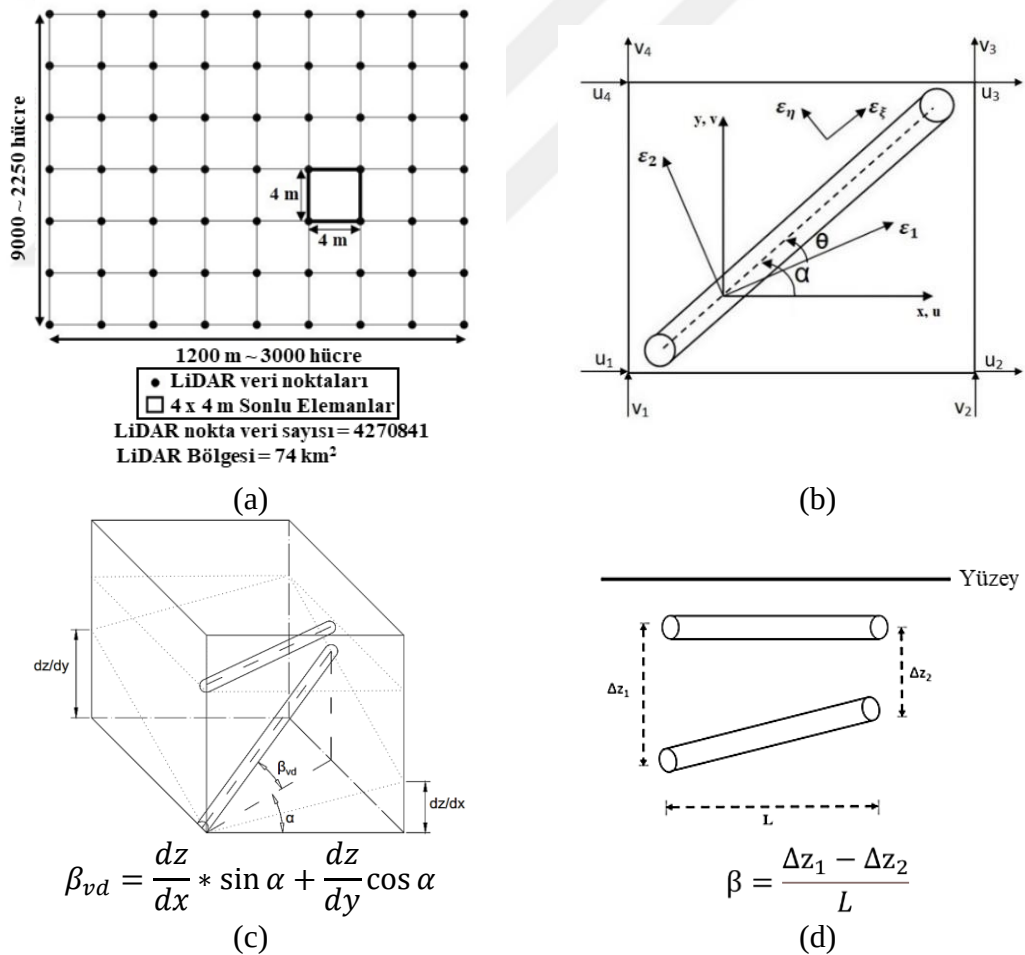
$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_\xi = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\alpha + \frac{1}{2} \gamma_{xy} \sin 2\alpha \quad (2.3)$$

Düşey düzlemdeki açısal bozulma ve yatay düzlemdeki açısal bozulmalar olmak üzere boru hatlarını iki açısal bozulmadan etkilenmektedir.  $\beta$  olarak gösterilen düşey açısal bozulma LiDAR noktaları arasındaki göreceli dikey hareketlerden elde edilen boyutsuz bir parametredir. **Şekil 2.2c** boru hattı boyunca farklı oturmalar ( $\Delta z_1 > \Delta z_2$ ) nedeniyle meydana gelen düşey açısal bozulmayı göstermektedir.

Bu çalışmada  $\beta$ , üçüncü dereceden bir sonlu fark yaklaşımı kullanılarak 5 m’lik bir ızgara sistem üzerinde hesaplanmıştır. Hesaplamalar CBS platformlarında gerçekleştirilmiştir. Hasar ilişkilerini hesaplarken boru hattı etrafındaki maksimum

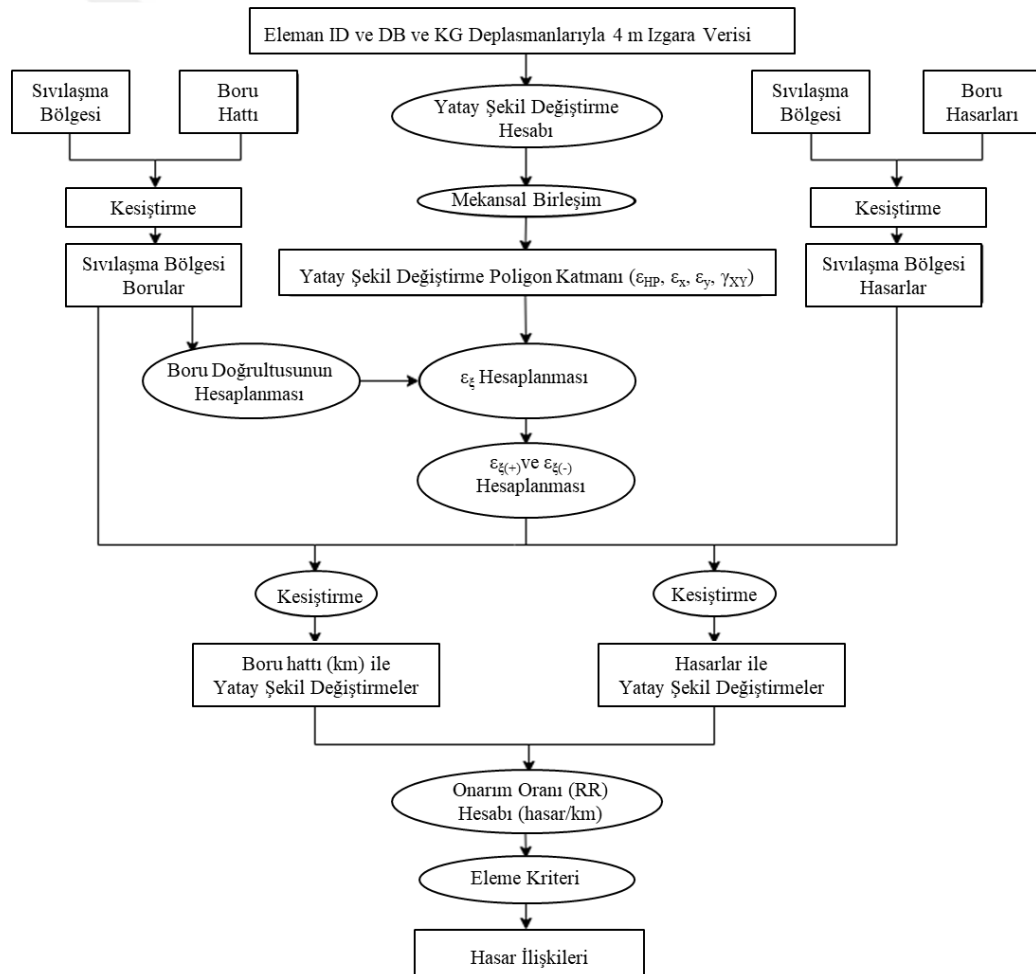
açısal bozulmayı dikkate alan önceki çalışmaların aksine [Bouziou ve O'Rourke, 2017], bu çalışma Şekil 2.2c'de gösterildiği gibi boru hattı yönü boyunca düşey açısal bozulmayı ( $\beta_{vd}$ ) hesaplamaya odaklanmıştır. Verileri doğrulamak için maksimum açısal bozulma ( $\beta$ ) regresyonları karşılaştırıldığında, sonuçlar Bouziou ve O'Rourke [2017] ile uyumludur. Daha sonra boru hattı doğrultusu dikkate alınarak düşey açısal bozulma ( $\beta_{vd}$ ) değerleri hesaplanmıştır.  $\beta_{vd}$  hesaplaması düşey yer hareketleri kullanılarak boru hattı etrafındaki  $d_z/d_y$  ve  $d_z/d_x$  değerlerinin belirlenmesini ve ardından bir dönüştürme işlemi aracılığıyla düşey açısal bozulmanın türetilmesini gerektirir. Şekil 2.2c  $d_z/d_y$  ve  $d_z/d_x$  değerlerinin tanımlanmasıyla birlikte boru hattının konumunu göstermektedir. Düşey açısal bozulmalar 5x5m'lik hücreler kullanılarak elde edilmiştir. Birleşik açısal bozulma ( $\beta_{com}$ ), yatay ( $\gamma_{xy}$ ) ve düşey açısal ( $\beta_{vd}$ ) bozulmaların vektörel olarak toplanmasıyla hesaplanmıştır.



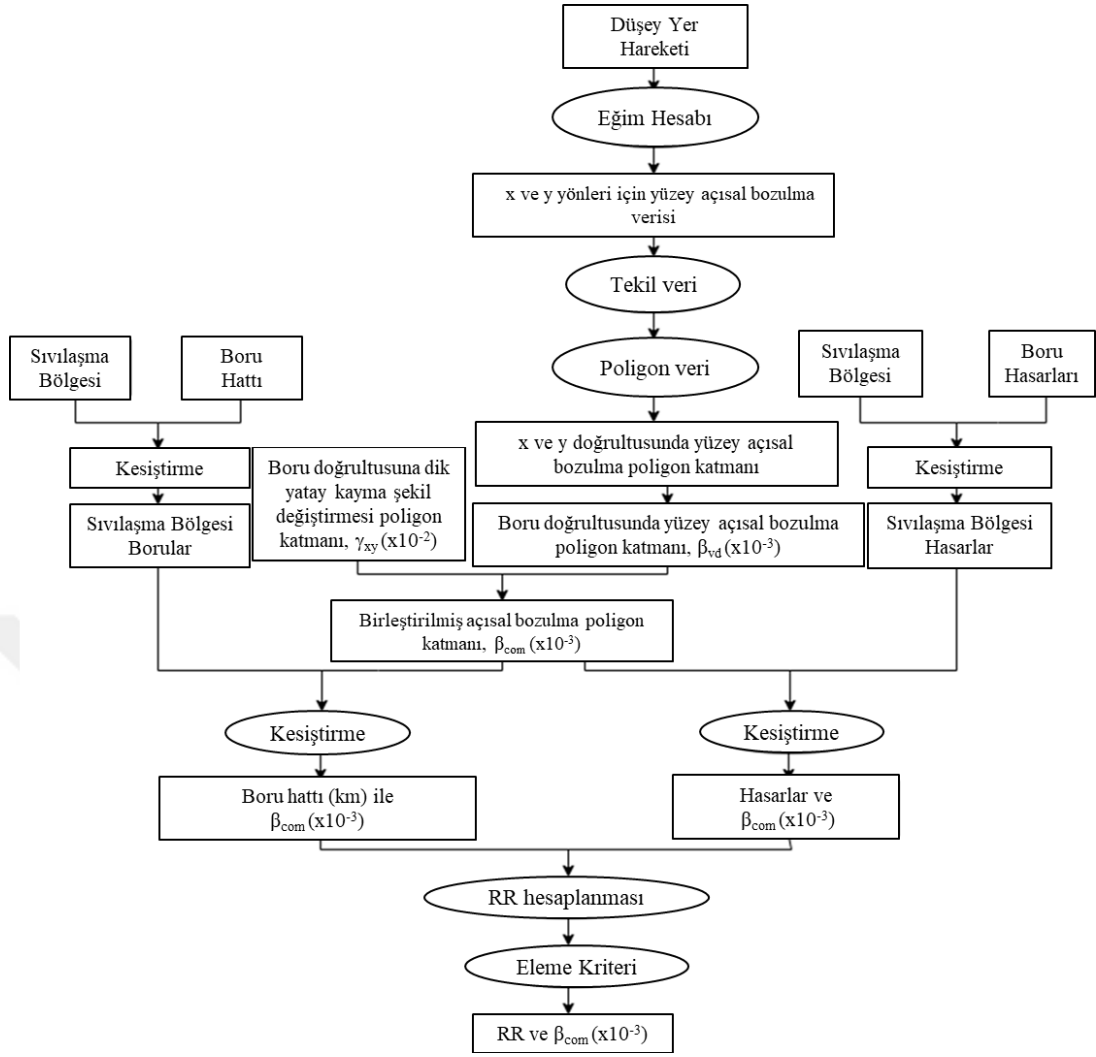
**Şekil 2.2:** Boru hattı doğrultusuna göre farklı yönlerdeki şekil değiştirmelerin hesaplanması (a ve b), boru yönü boyunca düşey açısal bozulmanın (c) ve LiDAR verileri kullanılarak düşey açısal bozulmaların (d) hesaplanması.

Şekil 2.3 ve Şekil 2.4 boru hattı hasarının yatay ve düşey kalıcı yer deformasyonlarıyla (KYD) ilişkilendirilmesine yönelik süreçlerin akış şemalarını sunmaktadır. Bu süreç, hasar korelasyonlarında boru hattı doğrultusunu dikkate alan önceki çalışmalarda açıklanan prosedürlerin değiştirilmiş bir versiyonudur [O'Rourke vd., 2012; Bouziou, 2015; Nacaroğlu, 2017]. Aşağıdaki yaklaşımda üç farklı veri türü kullanılmaktadır: zemin yer değiştirmesi, boru hattı bilgileri ve boru hattı hasar kayıtları. 4 m'lik hücreler kullanılarak, Şekil 2.3'de gösterilen akış şemasına göre sırasıyla mutlak ( $\epsilon_x$ ), çekme ( $\epsilon_{x(+)}$ ) ve basınç ( $\epsilon_{x(-)}$ ) eksenel şekil değiştirmeler hesaplanmıştır.

Birleşik açısal bozulmayı ( $\beta_{com}$ ) hesaplamak için 4-m hücrelerden elde edilen yatay açısal bozulma ( $\gamma_{xy}$ ) ve 5-m hücrelerden elde edilen düşey açısal bozulmalar ( $\beta_{vd}$ ) kullanılmıştır.

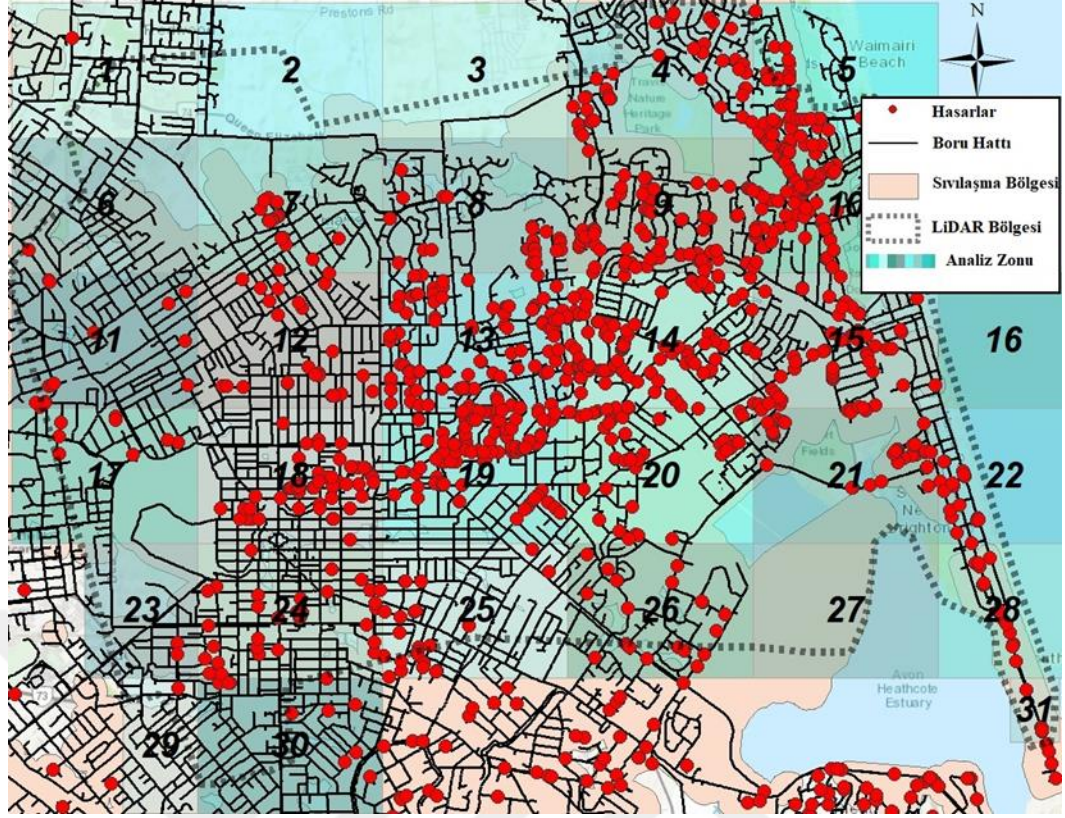


Şekil 2.3: Yatay şekil değiştirmeler için akış diyagramı.



**Şekil 2.4:** Düşey şekil değiştirmeler için akış diyagramı.

CBS yazılımının kısıtlamalarının üstesinden gelmek ve tüm alan için şekil değiştirme hesaplamalarını mümkün kılmak için sıvılaşma bölgesinin LiDAR kapsama alanı (3.492.048 m<sup>2</sup>) 31 küçük alt bölgelere bölünmüştür. Bu alt bölgeler **Şekil 2.5**'te boru hatları ve boru hattı hasarlarının üzerine yerleştirilmiştir. Bu alt bölgeler, her bir bölge için ayrı zemin şekil değiştirme analizleri yapılmasını kolaylaştırmıştır. Bu bölgeler ve ilgili analizler daha sonra birleştirilmiştir. Mümkün olduğunca eşit büyüklükte (2188 m x 1596 m) alanlar oluşturmak için çaba gösterilmiş ve 31 bölgenin 26'sı aynı arazi alanına sahip olmuştur. Beş bölgenin daha küçük olması, analiz bölgelerinin sınırında yer almalarından kaynaklanmaktadır. Toplam 31 bölgede 218.253 adet 4x4 m kare eleman bulunmaktadır. Düşey açılmal bozulmalar ise alt bölümlere ayırmaya gerek kalmadan CBS kapasitelerinden yararlanarak tüm alan için işlenebilmiştir.

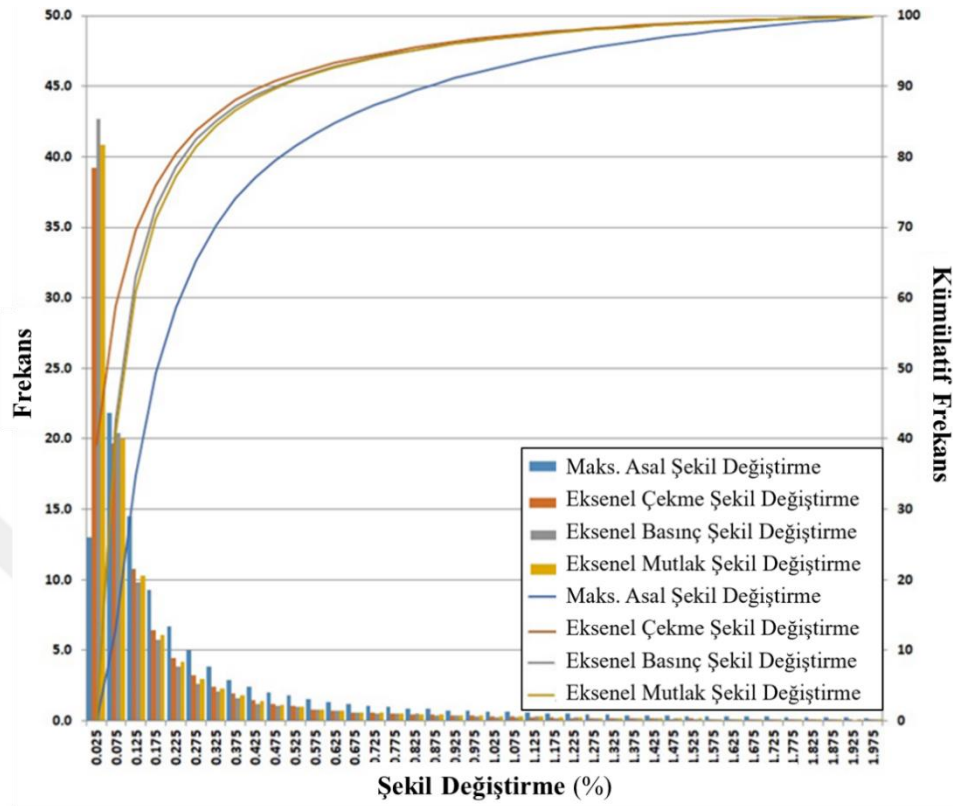


Şekil 2.5: Boru hattı, hasarlar, sıvılaşma bölgesi, LiDAR bölgesi ve analiz zonu.

## 2.2. Boru Hattı Üzerinde Yatay Şekil Değiştirme Etkileri

Boru hatları, depremler nedeniyle boyuna, enine ve maksimum asal şekil değiştirmeler gibi çeşitli yatay şekil değiştirmelere maruz kalmaktadır. Boru doğrultusunda yatay şekil değiştirme (mutlak aksenal şekil değiştirme) çekme ve basınç şekil değiştirmeleri olarak da ele alınmaktadır. İlk adımda CBS kullanarak sıvılaşma bölgesindeki her boru hattının doğrultu açılarının hesaplanmasını içermiştir çünkü denklem (2.3) boru hattının yatay eksene göre eğimini gerektirmektedir. Bu işlem boru hatlarındaki aksenal şekil değiştirmelerin belirlenmesini sağlamıştır. **Şekil 2.6** şekil değiştirme seviyelerine ilişkin farklı değerlerin histogramını ve kümülatif dağılımını göstermektedir. Yatay asal şekil değiştirme olan  $\epsilon_{HP}$ 'nin kümülatif dağılımı diğerlerinden daha düşüktür, çünkü sahada aynı konumdaki  $\epsilon_{HP}$  değerleri doğal olarak diğer şekil değiştirmelerden çok daha yüksektir. Basınç ve çekme aksenal şekil değiştirmeleri ile ilgili olarak, şekiller Christchurch sıvılaşma alanında aksenal basınç şekil değiştirme değerlerinin aksenal çekme şekil değiştirmelerinden biraz daha

yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, bu fark çok düşük şekil değiştirme değerleri dışında önemli değildir.



**Şekil 2.6:** Christchurch boru hatları için şekil değiştirme histogramı ve kümülatif dağılımı.

Boru hattı hasarı ve şekil değiştirme değerleri arasında korelasyon kurmak için, şekil değiştirme haritası ilk olarak boru hattı ve hasar verileriyle kesiştirilmiştir. Bu kesişme, boru hattı uzunluğunun ve belirli şekil değiştirme değerleriyle ilişkili hasar sayısının belirlenmesini sağlamıştır. Boru hattı uzunluğu ve hasar verileri kullanılarak, şekil değiştirme değerlerine göre onarım oranı (RR) değerleri hesaplanmıştır. Bu işlem sırasında, sağlam korelasyonlar oluşturmak için yeterli boru uzunluğunu içeren uygun şekil değiştirme aralıklarını seçmek için eleme kriterleri uygulanmıştır. Eleme kriterleri, boru hattı uzunluğu ve hasar sayısı dikkate alınarak anlamlı korelasyonlar elde etmek için **O'Rourke vd., [2014]** tarafından geliştirilmiştir. Boru hattı hasarı için regresyon modelleri, eleme kriterlerini karşılayan veriler kullanılarak türetilmiştir. Maksimum eksenel mutlak şekil değiştirmeler ile korelasyonlar için kullanılan yaklaşıma benzer şekilde, boru hattı hasarı ve eksenel şekil değiştirmeler arasındaki korelasyonları belirlemek için de benzer eleme kriterleri ve yöntemleri kullanılmıştır.

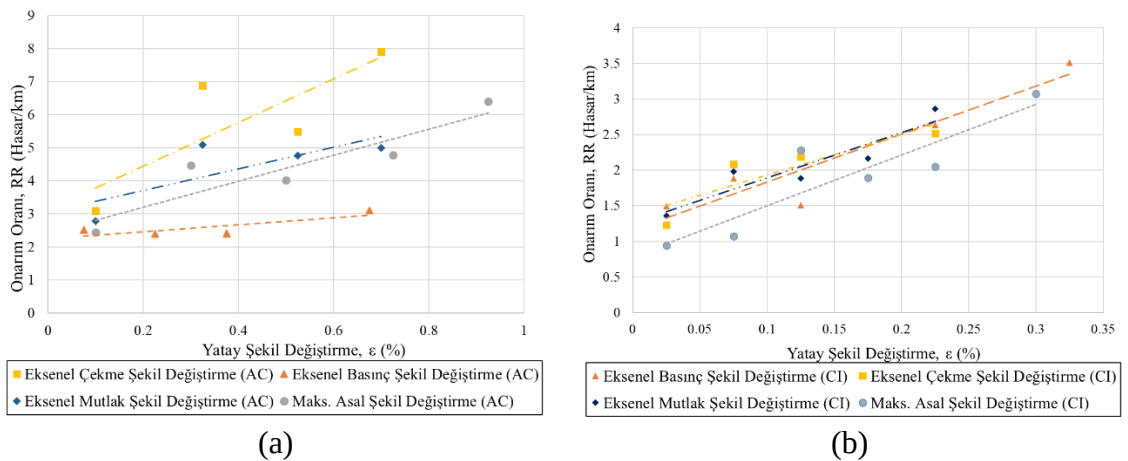
Eleme kriterleri Poisson dağılımını takip eder ve yeterli boru hattı uzunluklarını belirlemek için güven aralığına, gerçek değerin yüzdesine ( $\alpha$ ) ve RR'ye bağlıdır. Güven aralığı değerleri, AC ve CI eksenel şekil değiştirme regresyonları için güven aralığı %70-%90 arasında seçilmiştir. Önceki araştırmalar boru malzemesinin su dağıtım sistemlerinin depreme dayanıklılığındaki önemli rolünü vurgulamıştır. Bu nedenle bu çalışma kapsamında boru hattı hasarı ve boru malzemesi arasında korelasyonlar geliştirmek için ayrı ayrı yürütülmüştür.

**Şekil 2.7a, b ve c**'de sırasıyla AC, CI ve PVC boru hatları için şekil değiştirmelere göre hasar korelasyonları gösterilmektedir. Ayrıca **Şekil 2.9**'de AC, CI ve PVC boru hatları için boru hattı hasar korelasyonları aynı grafik üzerinde karşılaştırılmaktadır. Korelasyonlarda kullanılan dört farklı şekil değiştirme türü maksimum asal şekil değiştirme, basınç, çekme ve mutlak eksenel şekil değiştirmeleridir. Her bir şekil değiştirme türü için şekil değiştirme aralığı, eleme kriterlerine ve bu alanlardaki veri kullanılabilirliğine bağlı olarak değişmiştir. Tanım gereği daha yüksek olan mutlak maksimum asal şekil değiştirme genellikle daha büyük şekil değiştirme seviyelerine uzanmaktadır. Ayrıca aynı malzemedan yapılmış boru hatları için bile eksenel çekme ve basınç şekil değiştirmeleri için şekil değiştirme aralığı farklılık gösterebilir. Gelecekteki depremlerde veya mevcut boru hatlarının sismik değerlendirmelerinde hasar tahminleri için korelasyonlar kullanılırken bu sınırlamalar göz önünde bulundurulmalıdır.

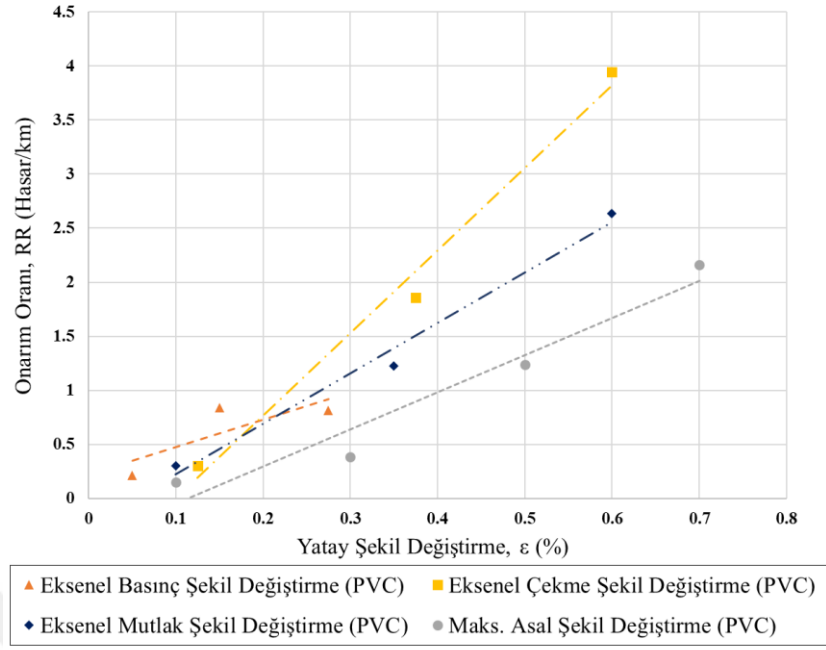
**Şekil 2.7**'deki sonuçlar, boru hattı onarım oranlarının, aynı boru malzemesi için bile, bu farklı şekil değiştirmeler için aynı şekil değiştirme seviyelerinde karşılaştırıldığında değişebileceğini göstermektedir. **Şekil 2.7a** AC boru hatlarının eksenel çekme şekil değiştirmelere maruz kaldıklarında eksenel basınç şekil değiştirmelerden daha yüksek onarım oranlarına sahiptir. AC boru hatlarının, özellikle de çekme şekil değiştirmelerinin etkisi altında ayrılmaya karşı basınca kıyasla daha düşük direnç gösterdikleri bağlantılardaki kırılma eğiliminden kaynaklanmaktadır. Mutlak eksenel şekil değiştirmeler ve maksimum asal şekil değiştirmeler açısından boru hattı hasar ilişkileri nispeten birbirine benzemektedir. CI boru hatları için durum AC boru hatlarının davranışından tamamen farklıdır. **Şekil 2.7b**'ye göre, CI boruların çekme ve basınç eksenel şekil değiştirmelerine tepkisi oldukça benzerdir. **Şekil 2.8**'e göre PVC boru hatlarının kalıcı zemin deformasyonuna tepkisi hem AC hem de CI boru hatlarından farklı görünmektedir. %0.2-%0.3 şekil değiştirme seviyelerinde, eksenel

çekme ve basınç şekil değiştirmelerine göre hasar seviyeleri oldukça benzerdir. Şekil değiştirme seviyeleri yükseldiğinde, PVC boru hatları çekme eksenel şekil değiştirmelerinden basınç eksenel şekil değiştirmelerine kıyasla daha fazla etkilenmektedir.

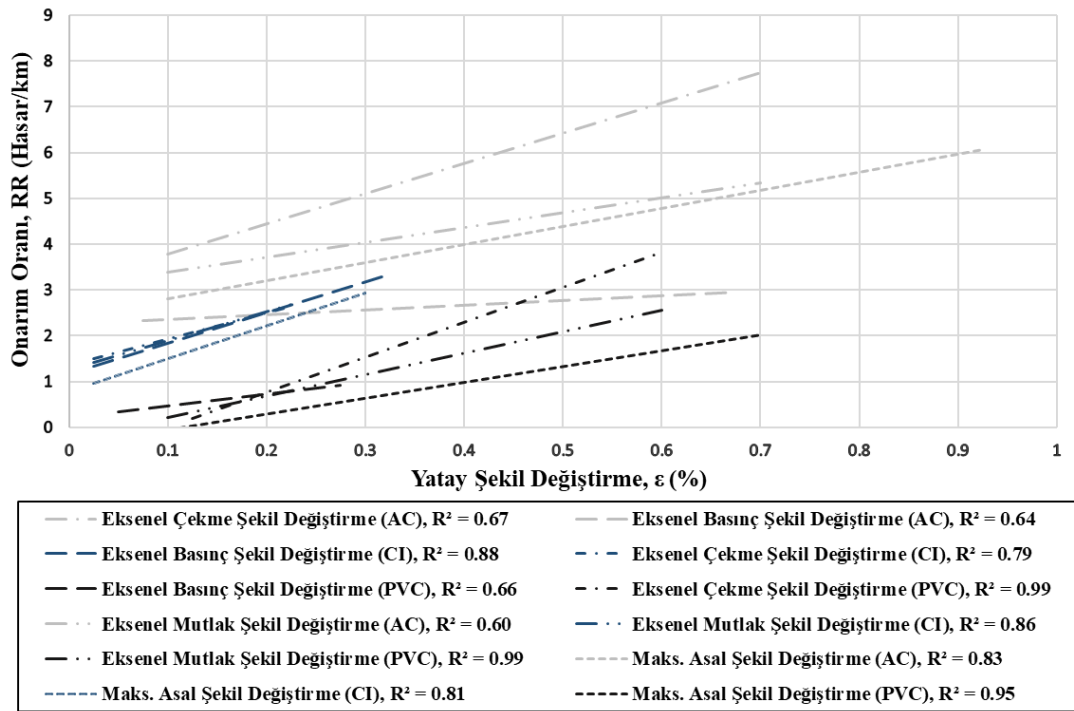
**Şekil 2.9** farklı malzemelerden yapılmış boru hatlarının sismik davranışlarının bir karşılaştırmasını sunmaktadır. Sonuçlar burada ele alınan parçalı boru hattı malzemeleri arasında en iyi performansın PVC boru hatları için gözlemlendiğini göstermektedir. PVC borunun AC ve CI gibi kırılğan malzemelere kıyasla daha sünek olması bu tepkiyi açıklamaktadır. PVC bağlantıların nispeten uzun ekleme uzunlukları da bir faktördür. 75 mm ve 200 mm standart çaplı borular için, PVC bağlantılardaki normal ekleme uzunluğu, daha yüksek çaplı borular için yaklaşık olarak 250 mm'ye eşit veya daha az olmalıdır. Kalıcı zemin deformasyonu altında çekme ile ilgili performans, nispeten uzun ekleme uzunlukları ile iyileştirilebilir. Burada incelenen parçalı boru hattı türleri arasında en kötü performans AC boru hatlarında gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, eksenel basınç şekil değiştirmelerine maruz kalan AC boru hatları, CI boru hatlarına kıyasla bir miktar karşılaştırılabilir performans göstermektedir. Genel olarak, CI boru hatları, sıvılaşma kaynaklı kalıcı zemin deformasyonları sırasındaki performans açısından AC ve PVC boru hatları arasında orta seviyede kabul edilebilir. CI boru hatlarının belirgin özelliği, basınç ve çekme eksenel şekil değiştirmeleri altındaki davranışlarının oldukça benzer olmasıdır.



**Şekil 2.7:** a) AC ve b) CI boru hatları için onarım oranları.



Şekil 2.8: PVC boru hatları için onarım oranları.

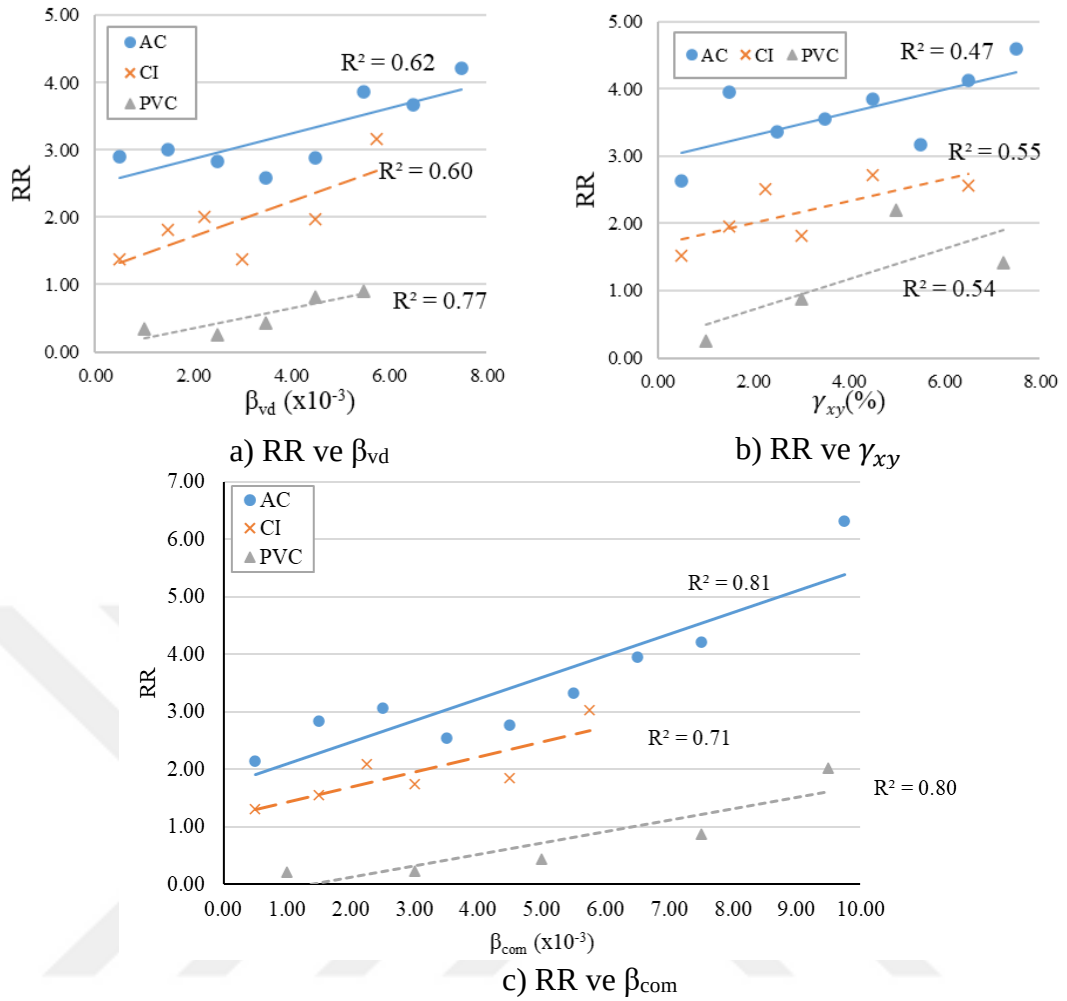


Şekil 2.9: AC, CI ve PVC boru hatları için RR regresyon ilişkilerinin karşılaştırılması.

### 2.3. Düşey, Yatay ve Birleştirilmiş Açısal Bozulmaların Boru Hattı Üzerindeki Etkileri

Deprem sırasında boru hatları üzerindeki yatay ve düşey kalıcı zemin deformasyonlarının birleşik etkisini tek bir parametre ile yakalamak ve boru yönünün etkisini hesaba katmak için, yatay ve düşey deformasyonlar, birleştirilmiş açısal bozulma değerlerini elde etmek için vektörel olarak birleştirilmiştir. Bu birleşik açısal bozulma değerleri, LiDAR 4m verilerinden elde edilen yatay deformasyon değerleri ile LiDAR 5m verilerinden elde edilen düşey deformasyon değerlerinin boru yönünde vektörel olarak toplanmasıyla hesaplanmıştır.

**Şekil 2.10** AC, CI ve PVC boru hatları için çeşitli açısal bozulmalara göre onarım oranlarını ve hasar korelasyonlarını göstermektedir. **Şekil 2.10a, b ve c**'de sırasıyla düşey açısal bozulma ( $\beta_{vd}$ ), yatay açısal bozulma ( $\gamma_{xy}$ ) ve birleşik açısal bozulma ( $\beta_{com}$ ) ilişkileri yer almaktadır. Yatay, düşey ve birleşik açısal bozulmaların regresyonları için güven aralıkları AC, CI ve PVC boru hatları için sırasıyla %90, %85 ve %65 olarak belirlenmiştir. **Şekil 2.10a ve b**, AC ve CI tipi boruların hem yatay hem de düşey bozulma altında benzer RR değerleri sergilediğini göstermektedir. PVC tipi borular yatay bozulmaya karşı daha hassastır ve düşey bozulmalar altında daha iyi performans göstermektedir. **Şekil 2.10c** AC, CI ve PVC boruların hepsinin hem yatay hem de düşey bozulmalar altında daha yüksek RR değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. AC tipi borular CI ve PVC'den daha yüksek RR değerlerine sahipken, PVC borular en iyi performansı göstermiştir. Regresyon analizlerinden elde edilen  $R^2$  değerleri, boru hattı ekseninden birleşik açısal bozulmanın tüm boru tipleri için en iyi korelasyonları sağladığını göstermektedir. Birleşik bozulma parametresinin ( $\beta_{com}$ ) uygulanması, AC, CI ve PVC borular için  $\beta_{vd}$  ve  $\gamma_{xy}$  parametrelerinin ayrı ayrı kullanılmasına kıyasla performansta önemli bir artış göstermiştir.  $\beta_{com}$ , AC, CI ve PVC boru hatlarının RR regresyonları için dikkate değer ölçüde daha iyi bir tek parametredir.



**Şekil 2.10:** Boru hattı yönleri dikkate alınarak AC, CI ve PVC boru hatları için RR'ye karşı a) dikey, b) yatay ve c) birleşik açısal bozulmalar.

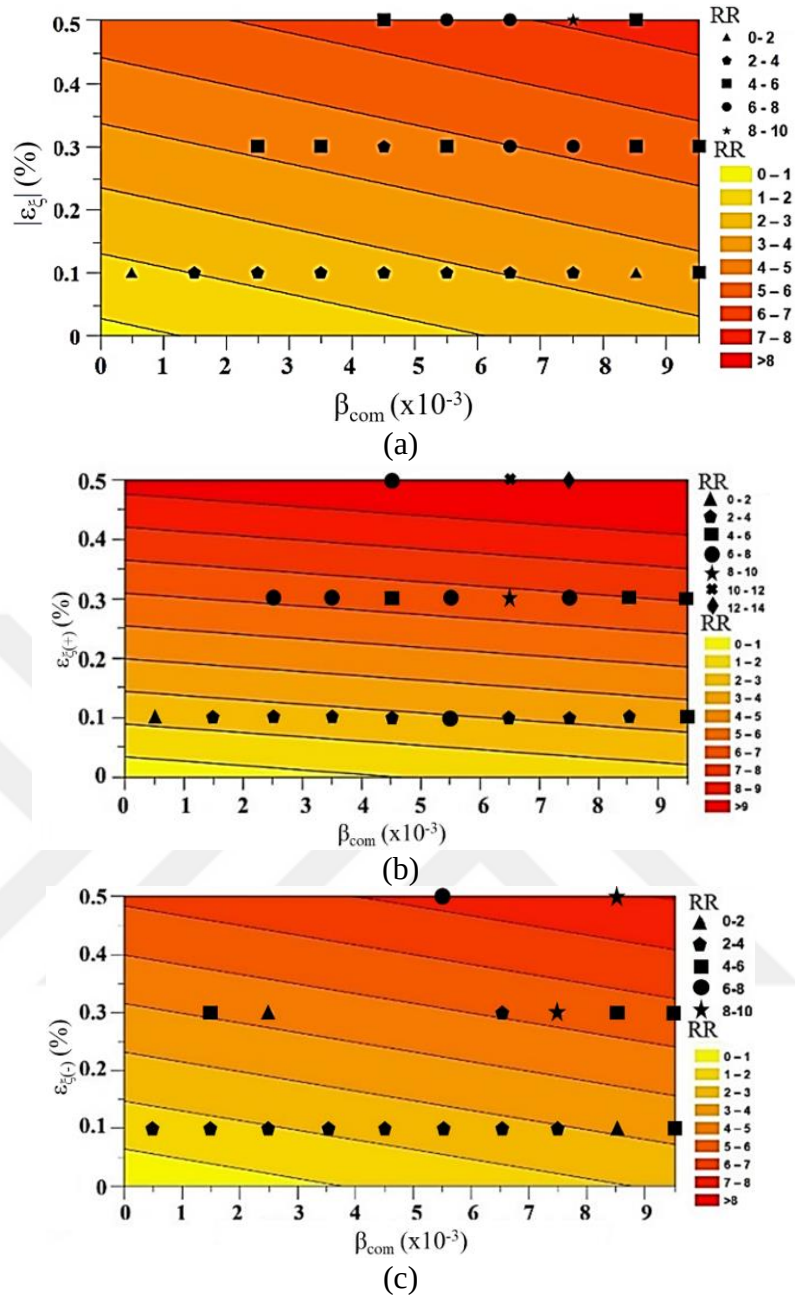
## 2.4. Düşey Açısal Bozulma ve Yatay Şekil Değiştirmelerin Birleştirilmiş Etkileri

Deprem sırasında boru hatları farklı yönlerde yüklemeye maruz kalmaktadır. **Bouziuo [2015]** AC ve CI boru hattı hasarları üzerinde açısal bozulmanın (boru hattı yönünü dikkate almadan) ve maksimum asal şekil değiştirmelerin etkisini belirlemek için global polinom interpolasyon yöntemini kullanmıştır. **O'Rourke vd., [2014]** düşey yer hareketinin ve yatay şekil değiştirmelerin birleşik etkilerini ortaya çıkarmak için benzer bir analiz sunmuşlardır. Boru hatlarının yer hareketlerine karşı davranışını değerlendirmek için önemli bir parametre birleşik açısal bozulma ( $\beta_{com}$ ) parametresidir.  $\beta_{com}$  yatay ve düşey yer hareketinin etkisini birlikte ortaya koymaktadır. Buna ek olarak, geçici zemin deformasyonları ve kalıcı zemin

deformasyonları boru hatlarında eksenel yüklemeye (boru hattına paralel) neden olur. **Argyrou vd., [2018]** tarafından boru hattına paralel geçici yer değiştirmeden kaynaklanan zeminin şekil değiştirmesini belirlemek için bir eşitlik önerilmiştir. Bu çalışmada, zemin elemanında bir borunun paralel yönündeki (eksenel yön) şekil değiştirmeyi hesaplamak için denklem (2.3) kullanılmıştır. 22 Şubat 2011 depremi için, onarım oranı (RR) ile yanal eksenel zemin şekil değiştirmesi ( $\epsilon_x$ ) ve birleşik açısız bozulma ( $\beta_{com}$ ) ilişkilendirilerek su şebekeleri için bir hasar değerlendirme yaklaşımı geliştirilmiştir. Korelasyon,  $1 \times 10^{-3}$ 'lük  $\epsilon_x$  ve  $\beta_{com}$  aralıklarıyla ilişkili AC ve CI boru hatlarının hasarlarını ve uzunluklarının tespiti ile gerçekleştirilmiştir.

Güçlü enterpolasyon için yeterli sayıda veri noktası sağlamak amacıyla, eleme kriterleri daha düşük güven seviyelerini yansıtacak şekilde, özellikle AC ve CI boru hatları için %50 ile %60 arasında ayarlanmıştır. Bu ayarlama anlamlı regresyonlar geliştirmek için uygulanmıştır. Eleme kriterlerine ilişkin prosedürü göstermek ve örnek uzunluklarına genel bir bakış sağlamak için aşağıdaki örneklerde mutlak eksenel şekil değiştirme korelasyon süreci uygulanmıştır. Benzer bir prosedür çekme ve basınç şekil değiştirmeleri için de kullanılmıştır.

AC boru hatlarında  $\epsilon_x$ - $\beta_{com}$  regresyonu için %60 güven aralığı kullanılmıştır. Analiz, toplam 193.89 km uzunluğu kapsayan 587 boru hasarı içermektedir. RR değerleri 1.79 ile 4.55 arasında değişmekte olup,  $\epsilon_x$ - $\beta_{com}$  regresyonu için gerekli boru uzunluğunun 0.58 km ile 1.48 km arasında olduğunu göstermiştir. Bu durum eleme kriterlerinin en düşük şekil değiştirme seviyesi olan %0.1'de 4.16 km ile 31.16 km arasında değişen mevcut boru uzunlukları ile karşılanmasını sağlamıştır. Sonuç olarak, **Şekil 2.11**'de sunulan korelasyonlara toplam 23 veri noktası dahil edilmiştir. Bununla birlikte, %70 güven aralığı uygulanmış olsaydı, daha yüksek şekil değiştirme seviyeleri için yeterli veri noktası üretilmeyeceği bilinmelidir. **Şekil 2.11**'de AC boru hatları için geliştirilen eksenel mutlak, çekme ve basınç şekil değiştirmelerine bağlı ilişkiler yer almaktadır. CI boru hatları incelendiğinde, analiz toplam uzunluğu 73.23 km olan 128 boru hasarı içermektedir. Yine 1.79 ila 4.55 arasında değişen RR değerleri, %60 güven aralığı kullanıldığında,  $\epsilon_x$ - $\beta_{com}$  regresyonu için gerekli boru uzunluğunun 1.19 km ila 2.65 km arasında olduğunu göstermiştir. Eleme kriterleri, en düşük şekil değiştirme seviyesi olan %0.1'de 3.98 km ile 11.38 km arasında değişen mevcut boru uzunlukları ile karşılanmıştır.

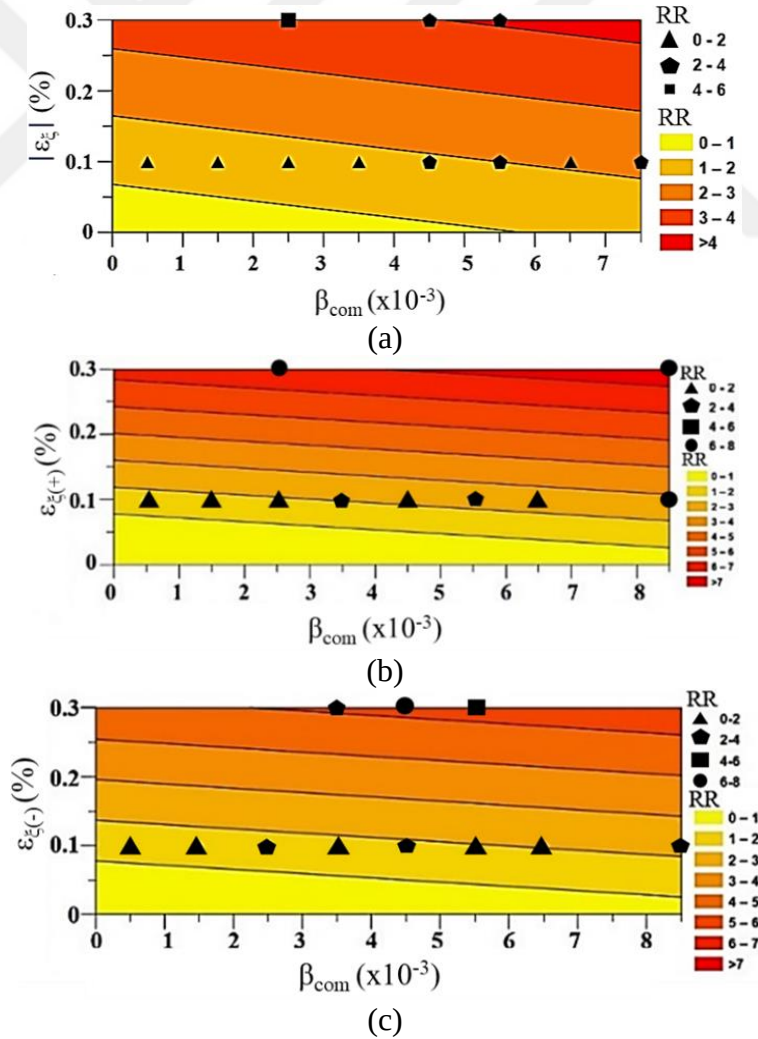


**Şekil 2.11:** AC boru hatları için eksenel a) mutlak b) çekme ve c) basınç şekil değiştirmelerine karşı onarım oranı ve açısız bozulma.

Şekil 2.12a'da gösterilen korelasyonlarda toplam 11 veri noktası kullanılmıştır. AC boru hatlarına benzer şekilde, %70 güven aralığı kullanılmış olsaydı, daha yüksek şekil değiştirme seviyeleri için yeterli veri noktası elde edilemeyecektir.

Eleme kriterlerinin gevşetilmesi PVC boru hatları için mümkün olmamıştır. PVC boru hatlarına ilişkin veriler incelendiğinde, toplam 66.72 km uzunluğunda 25 hasar tespit edilmiştir. Farklı şekil değiştirme seviyeleri için RR değerleri 0 ile 1.55 arasında değişmektedir ve  $\epsilon_{\xi}$ - $\beta_{com}$  regresyonu için gerekli boru uzunluğunun en düşük şekil

değiştirme seviyeleri için 1.17 km ile 20.76 km arasında olduğu tespit edilmiştir. Ancak, mevcut PVC boru uzunlukları 1.29 km ile 11.41 km arasında değişmektedir, bu da eleme kriterlerinin yalnızca dört regresyon noktası için doğrulanabileceği anlamına gelmektedir. %50 gibi daha düşük bir güven aralığı seviyesi seçildiğinde bile, PVC boru hatları için anlamlı regresyonlar elde etmek için gerekli boru uzunluğu elde edilememiştir. Şekil değiştirmelere karşılık gelen RR değerleri  $\varepsilon_{\xi}-\beta_{com}$  için çizilmiş ve Şekil 2.11 ve Şekil 2.12'de gösterildiği gibi RR konturlarının pürüzsüz bir yüzeyini üretmek için ArcGIS yazılımındaki global polinom enterpolasyon yöntemi kullanılmıştır. İlişkilerde mutlak ( $\varepsilon_{\xi}$ ), çekme ( $\varepsilon_{\xi(+)}$ ) ve basınç ( $\varepsilon_{\xi(-)}$ ) eksenel şekil değiştirmeleri gibi çeşitli eksenel şekil değiştirmeler kullanılmıştır. Verilere birinci dereceden bir polinom modeli uygulanmıştır. Elde edilen kontur yüzeyleri sırasıyla AC boru hatları için Şekil 2.11 ve CI boru hatları için Şekil 2.12'de sunulmuştur.



Şekil 2.12: CI boru hatları için eksenel a) mutlak b) çekme ve c) basınç şekil değiştirmelerine karşı onarım oranı ve açısal bozulma.

$\varepsilon_{\xi}-\beta_{com}$  ile kurulan ilişkiler incelendiğinde, AC boruların CI borulara kıyasla  $\beta_{com}$ 'a karşı daha fazla hassasiyet gösterdiği ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, AC boruların yapısal bütünlüğü hem  $\varepsilon_{\xi}$  hem de  $\beta_{com}$ 'dan önemli ölçüde etkilenmektedir. Buna karşılık, CI borular çekme ve basınç eksenel şekil değiştirmelerine karşı benzer tepkiler göstermektedir. Özellikle AC boruları eksenel basınç koşulları altında açısız bozulmaya daha fazla duyarlılık göstermektedir. Ek olarak, çekme eksenel koşulu AC boru hatları için daha yüksek RR değerleri vermektedir.

Zaman içinde, AC borular hem iç hem de dış duvarlarında bozulmaya uğrarlar. Bu bozulmanın boyutu boru çapı, et kalınlığı, zemin koşulları, boru basıncı, kurulum yılı ve kullanım amacı (atık su, içme suyu) gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Christchurch'teki boru hattı sistemi göz önüne alındığında, AC boruları kullanımdaki en eski boru türlerinden birini temsil etmektedir (1930'lardan beri). Rijit yapıları ve yaşlanma süreci nedeniyle AC tipi borular yüksek RR değerlerine sahip olma eğilimindedir.

**Şekil 2.11** ve **Şekil 2.12**'de sunulan grafiksel ilişkilere ek olarak, RR ile ölçeklendirilmiş eksenel şekil değiştirme ve birleşik açısız bozulma parametreleri arasındaki korelasyonları belirlemek için çoklu doğrusal regresyon analizleri yapılmıştır. Bu parametreler mutlak ( $\varepsilon_{\xi}$ ), çekme ( $\varepsilon_{\xi(+)}$ ) ve basınç ( $\varepsilon_{\xi(-)}$ ) eksenel şekil değiştirmeleriyle ayrı ayrı birleştirilmiş açısız bozulmayı içermektedir. Çoklu doğrusal regresyon analizlerinde aşağıdaki denklem (2.4) kullanılmıştır.

$$\log RR = \log K + a \log LS + b \log AD \quad (2.4)$$

Burada K, a ve b sabitler, LS çeşitli eksenel şekil değiştirmelerden biri (mutlak ( $\varepsilon_{\xi}$ ), çekme ( $\varepsilon_{\xi(+)}$ ) ve basınç ( $\varepsilon_{\xi(-)}$ ) eksenel şekil değiştirmeler), AD ise birleşik açısız bozulmadır. Bu eşitlik yeniden düzenlenirse denklem (2.5) biçimindeki gibi ifade edilebilir.

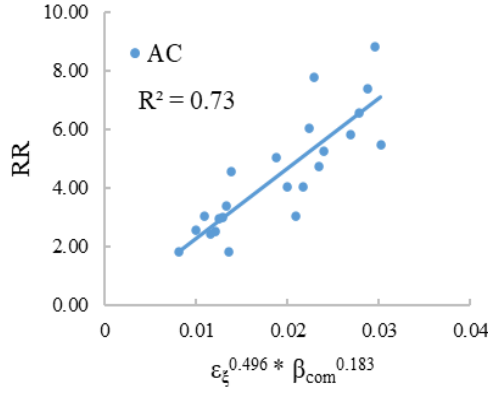
$$RR = K (LS^a AD^b) \quad (2.5)$$

Burada ( $LS^a AD^b$ ) ölçeklendirilmiş eksenel şekil değiştirme ve birleşik açısız bozulma parametresidir.

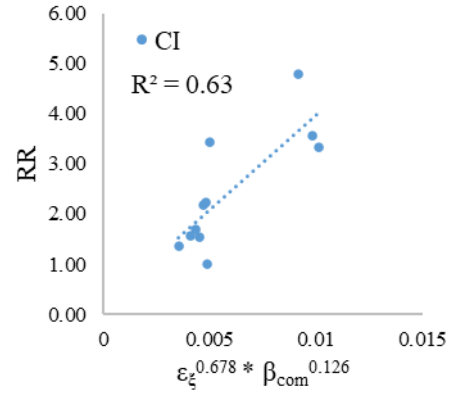
**Şekil 2.13'**de AC ve CI boru hatları için regresyon ilişkileri gösterilmekte ve ilgili regresyon denklemleri verilmektedir. Korelasyonların yüksek anlamlılık seviyeleri, yatay ve düşey bozulmalar kullanıldığında ilişkilerin değerlendirilmesi için istatistiksel bir temel sağlamaktadır. Geliştirilen korelasyonlar yatay ve düşey bozulmaları tek bir parametre ile ifade etmektedir. Ölçeklendirilmiş eksenel şekil değiştirme ve açısal bozulma parametreleri ile RR arasında tek bir doğrusal regresyon grafiği olarak elde edilmiştir. Yüksek  $R^2$  değerlerinden de anlaşılacağı üzere, bu korelasyonlar istatistiksel olarak anlamlıdır.

**Şekil 2.13** AC ve CI borular için bağımlı değişken (RR) ile bağımsız değişkenler (mutlak, çekme ve basınç eksenel şekil değiştirmeler) arasındaki regresyon denklemlerini göstermektedir. Bu denklemler **Şekil 2.13'**de verilen ilişkileri temsil etmektedir. Bu çalışmada, kalıcı zemin şekil değiştirmesinin boru hatları üzerindeki etkisini ortaya koymak için eksenel yer şekil değiştirmesi parametreleri ile  $\beta_{com}$  kullanılmıştır.  $\beta_{com}$  kullanılarak yatay ve düşey hareketin etkisi detaylı olarak incelenmiştir.

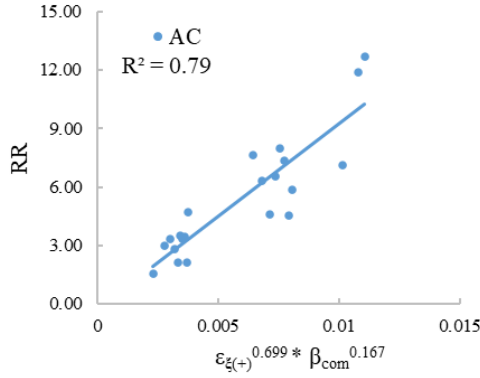
Eksenel şekil değiştirmenin birleşik açısal bozulma regresyon modellerine dahil edilmesi, AC borular için tüm eksenel şekil değiştirmeler (mutlak, çekme ve basınç) için regresyonların iyileştirilmesine yol açmıştır. Buna karşılık, çoklu doğrusal regresyon modelleri, CI borulardaki tüm eksenel şekil değiştirmeler için regresyonlarda bir düşüş olduğunu göstermiştir.



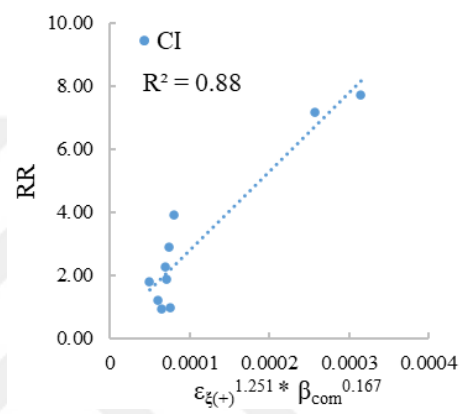
a) AC boru hatları için mutlak eksenel şekil değiştirme ( $\epsilon_{\xi}$ ) ve  $\beta_{com}$



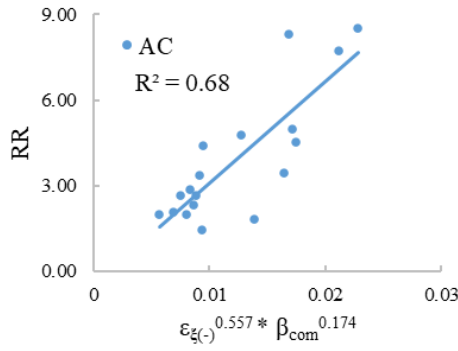
b) CI boru hatları için mutlak eksenel şekil değiştirme ( $\epsilon_{\xi}$ ) ve  $\beta_{com}$



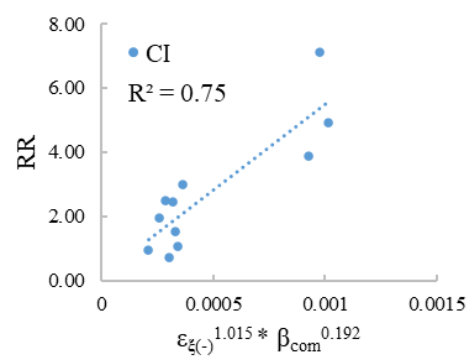
c) AC boru hatları için çekme eksenel şekil değiştirme ( $\epsilon_{\xi(+)}$ ) ve  $\beta_{com}$



d) CI boru hattı için çekme eksenel şekil değiştirme ( $\epsilon_{\xi(+)}$ ) ve  $\beta_{com}$



e) AC boru hatları için basınç eksenel şekil değiştirme ( $\epsilon_{\xi(-)}$ ) ve  $\beta_{com}$



f) CI boru hatları için basınçlı eksenel şekil değiştirme ( $\epsilon_{\xi(-)}$ ) ve  $\beta_{com}$

| Regresyon Denklemleri                                                              |                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| AC                                                                                 | CI                                                                                 |
| $\log RR = \log 229,61 + 0,496 \log \epsilon_{\xi} + 0,183 * \log \beta_{com}$     | $\log RR = \log 396,28 + 0,678 \log \epsilon_{\xi} + 0,126 * \log \beta_{com}$     |
| $\log RR = \log 901,571 + 0,699 \log \epsilon_{\xi(+)} + 0,167 * \log \beta_{com}$ | $\log RR = \log 26121,6 + 1,251 \log \epsilon_{\xi(+)} + 0,167 * \log \beta_{com}$ |
| $\log RR = \log 299,23 + 0,557 \log \epsilon_{\xi(-)} + 0,174 * \log \beta_{com}$  | $\log RR = \log 5284,45 + 1,015 \log \epsilon_{\xi(-)} + 0,192 * \log \beta_{com}$ |

**Şekil 2.13:** Boru hattı doğrultuları ve regresyon denklemleri dikkate alınarak AC (a, c, e) ve CI (b, d, f) boru hatları için ölçeklendirilmiş eksenel şekil değiştirme ve birleştirilmiş açısıl bozulma için onarım oranı regresyonları.

### **3. SIVILAŞMA NEDENİYLE MEYDANA GELEN ALTYAPI HASARLARI İÇİN NÜMERİK ANALİZLER**

Sıvılaşma nedeniyle altyapı hasarları ciddi ölçüde hasar görmektedir. Sıvılaşma, depremin neden olduğu tekrarlı yüklemenin boşluk suyu basıncını artırarak efektif gerilmede bir azalmaya neden olması ve zemin mukavemetinde bir kayıpla sonuçlanmasıyla meydana gelir. Sarsıntıdan sonra boşluk suyu basıncı dağıldıkça, zemin daneleri yeniden düzenlenir, bu da hacimsel sıkışmaya ve yüzey oturmalarına yol açar. Bazı durumlarda ise gömülü yapılarda yükselmeler meydana gelmektedir. Sıvılaşma sonrası davranışı anlamak ve tahmin etmek, sismik olarak aktif bölgelerdeki riskleri azaltmak için kritik öneme sahiptir.

2011 yılında 6.2  $M_w$  büyüklüğünde Christchurch'te ve 2023 yılında 7.7  $M_w$  ve 7.6  $M_w$  büyüklüğünde Kahramanmaraş'ta gerçekleşen depremler altyapı sistemlerinde ciddi hasarlara yol açmıştır. Bu bölümde sıvılaşma nedeniyle altyapı hasarı görülen yerler için nümerik vaka analizleri uygulanmıştır. Birinci vaka çalışması Christchurch depremiyle 150 mm çapında PVC boru hasarı olan bölge için serbest yüzey analizleri uygulanmıştır. Burada elde edilen sonuçlar sonraki bölümde sonlu farklar modelini doğrulamak içinde kullanılmıştır.

Ayrıca Kahramanmaraş depremleri nedeniyle Adıyaman ve Hatay gibi bölgelerde önemli düzeyde sıvılaşma etkileri gözlenmiştir. Deprem sonrası bölgede gerçekleştirilen gözlem çalışmalarından elde edilen bulgular ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Ayrıca İskenderun'da özellikle Atatürk Bulvarı boyunca yanal yayılmalar, oturmalar ve kum kaynamaları nedeniyle üstyapı ve altyapı hasarları meydana gelmiştir. Atatürk bulvarında yer alan 1 nolu atık su yükseltme pompa istasyonu ve yağmur suyu pompa istasyonu sıvılaşma nedeniyle hizmet sürdürmez hale gelmiştir. Bu çalışmada ise yağmur suyu pompa istasyonunun bulunduğu bölge için Plaxis 2D programı ile sıvılaşma analizleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar sahada elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır.

### 3.1. Vaka çalışması I: Christchurch PVC Boru Hasarı

Christchurch depremi nedeniyle PVC boru hatlarında önemli düzeyde hasarlar oluşmuş ve hizmetini sürdürmez duruma gelmiştir. Tez kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi ile **Zhang vd., [2002]** ve **Ishihara ve Yoshimine [1992]** tarafından geliştirilen iki önemli ampirik yöntem, serbest alan koşullarında sıvılaşma kaynaklı oturmaları tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu yöntemler, zemin özellikleri ile sismik kaynaklı hacimsel deformasyon arasındaki ilişkilere dayanan değerli bilgiler sağlayarak mühendislerin sıvılaşma sonrası yüzey deformasyonlarını tahmin etmelerine olanak tanımaktadır. Ampirik yaklaşımlara ek olarak, sıvılaşma sırasında ve sonrasında zeminlerin karmaşık, doğrusal olmayan davranışını yakalamak için UBC3D-PLM ve PM4Sand davranış modelleri kullanılarak gelişmiş nümerik simülasyonlar uygulanmıştır.

Christchurch'ten alınan LiDAR ölçümleri, yüzey deformasyon tahminlerinin doğruluğunu karşılaştırmak için kullanılmıştır. LiDAR, yüksek çözünürlüklü topografik veriler sağlayarak geniş alanlardaki zemin deformasyonlarının hassas bir şekilde haritalanmasına olanak tanır. Çalışma, bu LiDAR ölçümlerini ampirik ve sayısal yöntemlerle ele alarak, oturma tahminlerini iyileştirmeyi ve özellikle geçmiş depremlerden etkilenen kentsel ortamlarda sıvılaşma kaynaklı deformasyonların anlaşılmasını geliştirmeyi amaçlamaktadır.

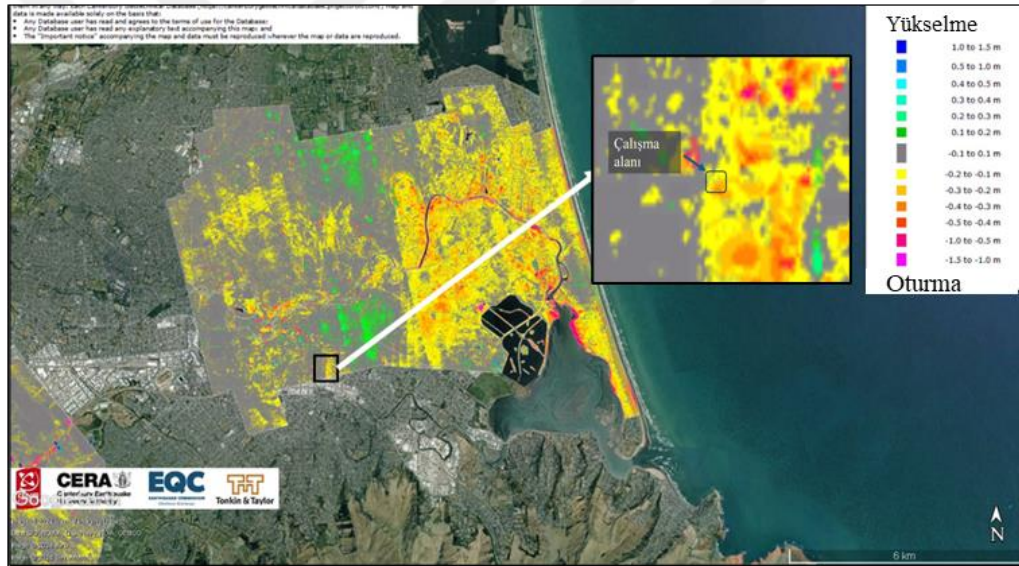
Ampirik yöntemler, LiDAR verileri ve nümerik analizlerden elde edilen sonuçları karşılaştırarak, sıvılaşma kaynaklı oturmaların kapsamlı bir değerlendirmesini sunarak gelecekteki deprem olayları için daha güvenilir tahmin modellerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

#### 3.1.1. LiDAR Ölçümleri

Christchurch depremi sonrası LiDAR araştırmaları Sivil Savunma ve Acil Durum Yönetimi Bakanlığı ve Christchurch Şehir Konseyi gibi kurumların görevlendirmesiyle AAM (Avustralya Hava Haritacılığı) ve NZAM (Yeni Zelanda Hava Haritacılığı) tarafından yürütülmüştür. Bu araştırmalar, her önemli depremden kısa bir süre sonra gerçekleştirilmiş ve sıvılaşmadan etkilenen alanlarda ayrıntılı zemin yüzeyi değişiklikleri tespit edilmiştir. LiDAR verileri, yalnızca zemin yüzeyini doğru

bir şekilde temsil etmek için binaları, bitki örtüsünü ve enkazı hariç tutan ‘dijital yükseklik modelleri’ (DEM) oluşturmak üzere işlenmiştir. Yapılan bu ölçümlerin dikey doğruluğu  $\pm 0.07$  m içinde olması zemin deformasyonunu izlemek için güvenilir bir temel sağlamıştır [NZGD, 2024].

Bu ölçümlere NZGD aracılığıyla erişilerek, PM4Sand ve UBC3D davranış modellerinden elde edilen oturma tahminleri ile ampirik oturma tahminlerinin karşılaştırılmasında ölçüt olarak kullanılmıştır. Bu karşılaştırma yaklaşımı, sıvılaşabilir zeminlerde sıvılaşma kaynaklı oturmaların değerlendirilmesinde sayısal modellerin tahmin doğruluğunu artırmaktadır. **Şekil 3.1**, Christchurch depreminin neden olduğu dikey yüzey oturmalarını göstermektedir. LiDAR verilerine göre, çalışma alanındaki oturma **Şekil 3.1**’de gösterildiği gibi 10 cm ile 20 cm arasındadır.



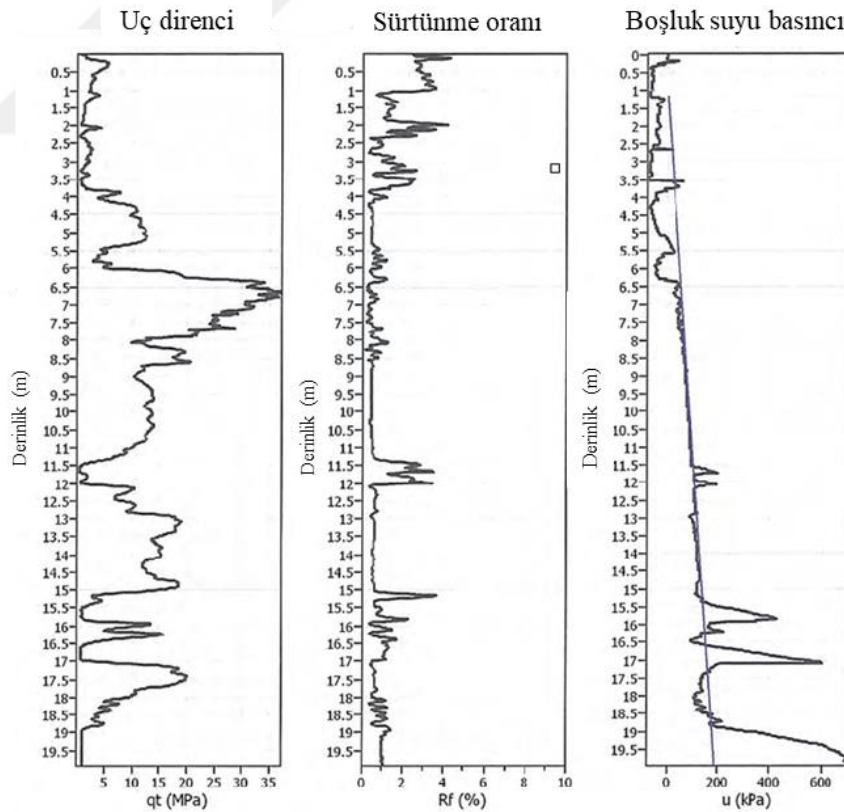
**Şekil 3.1:** Christchurch depremi sonrası meydana düşey deplasmanlar.

### 3.1.2. Nümerik Modeller

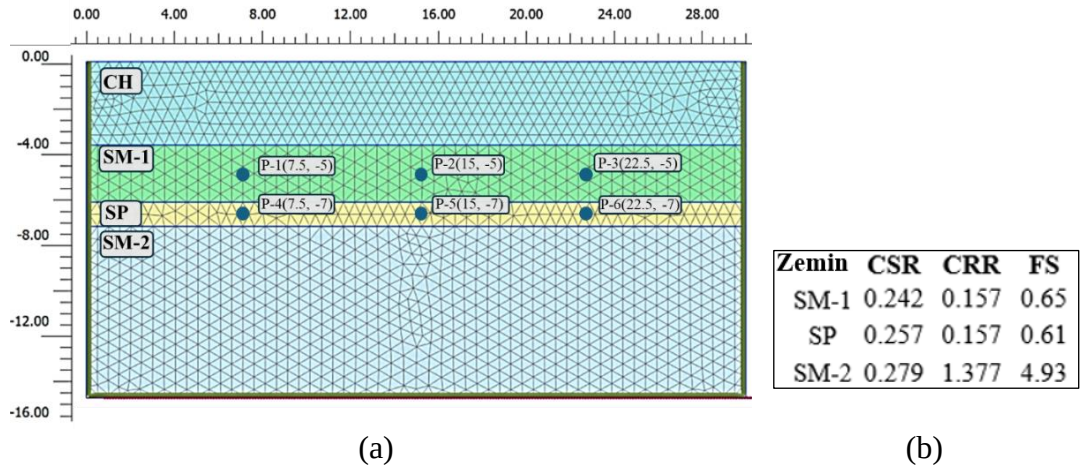
Genel olarak, dinamik yükleme altındaki zeminlerin doğrusal olmayan davranışını nümerik olarak belirlemek için saha deneyleri ve laboratuvar deneylerinin sonuçlarını karşılaştırmak gerekir. Christchurch depreminden sonra, Christchurch depreminin etkilerini ortaya çıkarmak için çeşitli kuruluşlar tarafından birçok saha araştırması yapılmıştır. Bu araştırmalar ile Christchurch depreminin zemin davranışı üzerindeki etkilerini incelemek için benzeri görülmemiş bir fırsat sağlanmıştır. Yeni Zelanda

Geoteknik Veri tabanı (NZGD) çok sayıda zemin inceleme verisine (CPT, SPT, vb.) sahiptir ve çevrimiçi platform üzerinden erişilebilir durumdadır.

Christchurch depremi nedeniyle geniş bir alanda sıvılaşmalar meydana gelmiştir. Çalışma alanı sıvılaşma bölgesinde yer almaktadır. Vaka çalışması için seçilen alan, deprem kayıt istasyonuna olan mesafe ve zemin parametrelerinin belirlenmesi için uygun verilerin mevcudiyeti göz önünde bulundurularak seçilmiştir. UBC3D ve PM4Sand bünye modellerinin parametrelerini belirlemek için NZGD tarafından sağlanan araştırma sondajı verileri (CPT, SPT) kullanılmıştır. **Şekil 3.2** çalışma alanı için CPT sondaj sonuçlarından elde edilen uç direncini, sürtünme oranını ve boşluk suyu basıncı suyu basıncını göstermektedir. Ayrıca, sıvılaşabilir zemin katmanlarını değerlendirmek ve nümerik modelleri kalibre etmek için basitleştirilmiş sıvılaşma analizi uygulanmıştır. **Şekil 3.3a** nümerik model geometrisini ve sıvılaşabilir katmanlardaki atanmış analiz noktalarını göstermektedir. **Şekil 3.3b** basitleştirilmiş sıvılaşma analizi ile elde edilen güvenlik faktörü sonuçlarını göstermektedir.



**Şekil 3.2:** Analiz sahası için CPT verisi [NZGD, 2024].



Şekil 3.3: (a) Model geometrisi ve (b) basitleştirilmiş prosedür sonuçları.

### 3.1.2.1 Başlangıç Koşulları

UBC3D ve PM4Sand modelleri zeminlerin başlangıç koşullarını oluşturma kapasitesine sahip olmadığı için, başlangıç koşulları sırasıyla killi ve kumlu zeminler için pekleşen zemin (Hardening Soil, HS) ve pekleşen zemin küçük şekil değiştirme (Hardening Soil Small Strain, HSSS) davranış modelleri kullanılarak oluşturulmuştur. Dinamik analiz başlamadan önce, model K0 prosedürü aracılığıyla başlangıç gerilme koşullarına ulaşmıştır. **Tablo 3.1** başlangıç gerilme koşulları için HS ve HSSS bünye modeli parametrelerini göstermektedir. Bu parametreler **Brinkgreve [2010]** tarafından kumlu zeminler için sağlanan rölatif sıkılığa dayalı denklemler kullanılarak elde edilmiştir. Yerçekimi yüklemesinden sonra, sadece dinamik yüklemenin sayısal model üzerindeki etkilerini gözlemlemek için modeldeki tüm yer değiştirmeler sıfıra ayarlanmıştır.

**Tablo 3.1:** Başlangıç gerilme koşulları için HS ve HSSS bünye modeli parametreleri.

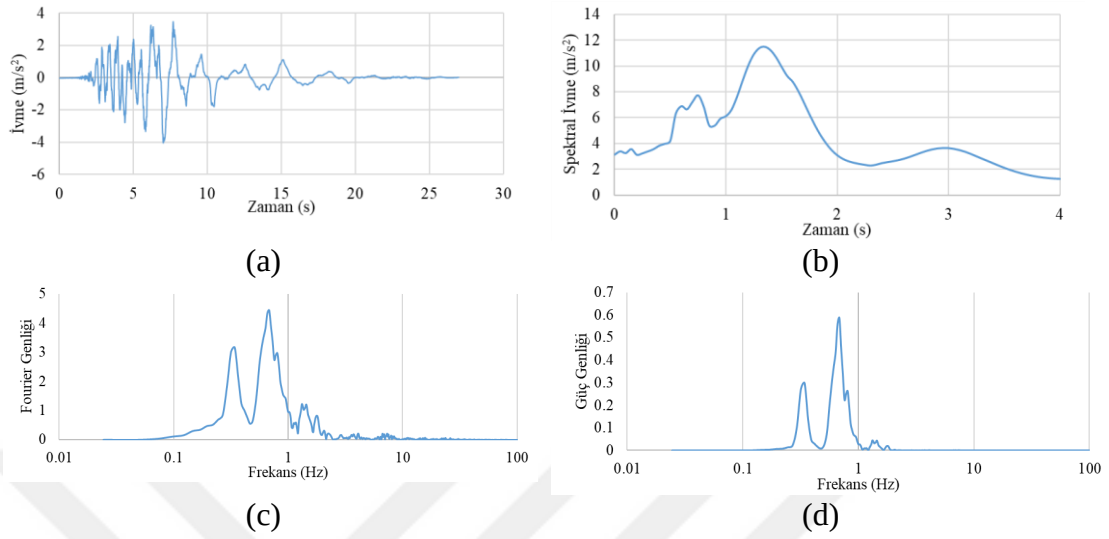
|                                      | Zemin katmanları |        |         |        |
|--------------------------------------|------------------|--------|---------|--------|
|                                      | CH               | SM-1   | SP      | SM-2   |
| Davranış Modeli                      | HS               | HSSS   | HSSS    | HSSS   |
| Parametreler                         |                  |        |         |        |
| $\gamma_{unsat}$ , kN/m <sup>3</sup> | 17               | 15     | 15      | 16.1   |
| $\gamma_{sat}$ , kN/m <sup>3</sup>   | 21.04            | 18     | 18      | 19     |
| $(E_{50}^{ref}$ , MPa)               | 5.3              | 12     | 27      | 30     |
| $(E_{oed}^{ref}$ , MPa)              | 5.3              | 12     | 27      | 30     |
| $(E_{ur}^{ref}$ , MPa)               | 15.9             | 36     | 81      | 90     |
| $(G_0^{ref}$ , MPa)                  | -                | 73.6   | 90.6    | 94     |
| $G_s = 0.722G_0 (\gamma_{0.7})$      | -                | 1.8E-4 | 1.55E-4 | 1.5E-4 |
| $(c'_{ref})$ , kPa)                  | 10               | 1      | 1       | 1      |
| $(\phi')$                            | 1                | 35     | 41      | 42     |
| $(\psi)$                             | -                | 5      | 11      | 12     |
| $(v_{ur})$                           | 0.2              | 0.2    | 0.2     | 0.2    |

Deprem verisi Christchurch Cathedral College (CCCC) istasyonunda kaydedilen Christchurch depreminin yüzey kaydıdır. Plaxis 2D’de dinamik analiz için gerekli giriş hareketi model tabanında tanımlanmalıdır. Bu nedenle yüzey kaydı Deepsoil V7.0 programı ile ters evrişim işlemi uygulanarak model derinliğinde elde edilmiştir. **Şekil 3.4** giriş hareketini, tepki spektrumunu, fourier genliğini ve güç genliğini göstermektedir. Zemin katmanları boyunca dalga yayılımını gerçekçi bir şekilde modellemek için Rayleigh sönümlleme prosedürü kullanılmıştır. Rayleigh sönümlleme matrisi (C), kütle matrisinin (M) ve rijitlik matrisinin (K) bir fonksiyonu olarak denklem (3.1) ile ifade edilmektedir.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (3.1)$$

Rayleigh sönümlleme parametreleri  $\alpha$  ve  $\beta$ , zemin ve giriş hareketinin sönümlleme oranı ve frekansı ile ilgilidir. Rayleigh sönüm oranı %2 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, oluşturulan modellerde sınır koşullarının seçimi, model içinde üretilen sismik dalgaların sınırlardan yansımaları önlemek için dikkate alınması gereken bir

faktördür. Düşey sınır koşulları serbest alan (Free-Field) olarak atanmış, modelin alt kısmında ise uyumlu taban (Compliant base) sınır koşulu kullanılmıştır.



**Şekil 3.4:** Christchurch depremi için a) giriş hareketi, b) tepki spektrumu, c) Fourier spektrumu ve d) güç genliği.

### 3.1.2.2 UBC3D-PLM

UBC3D-PLM modeli, UBCSand modelini temel alan ve efektif gerilme prensibini kullanan elastoplastik bir modeldir. İki davranış modeli (UBC3D ve UBCSand) arasındaki temel fark, UBC3D modelinin 3D çözüm için uygulanabilmesidir. İlk yükleme durumu için 3D asal gerilme düzleminde Mohr-Coulomb akma koşulunu kullanır ve akma yüzeyi ikincil yükleme için kinematik sertleşme kuralını içerir. UBC3D-PLM modeli, konsolide zeminlerde iki akma yüzeyi aracılığıyla boşluk suyu basıncının oluşumunu kontrol eder. Model hem monotonik hem de tekrarlı yükleme koşulları altında boşluk suyu basıncını simüle edebilir. Ek olarak, boşluk suyu basıncını daha gerçekçi bir şekilde tahmin etmek için hacimsel deformasyonda artışa izin veren bir sertleşme kuralı dahil edilmiştir [Plaxis 2D, 2018].

Genel olarak sıvılaşma davranış modeli parametreleri laboratuvar testleri, özellikle tekrarlı drenajsız doğrudan basit kesme testleri ve yerinde testler (SPT ve CPT vb.) yoluyla tanımlanır. Bu çalışmada ilgili analiz sahası için laboratuvar test sonuçları olmaması nedeniyle model parametrelerini belirlemek için NZGD aracılığıyla mevcut olan SPT ve CPT sondajları kullanılmıştır. UBC3D modeli üç grupta toplam 13 model parametresi içermektedir: rijitlik, mukavemet ve ileri parametreler. Rijitlik modülü

faktörleri **Beaty ve Byrne [2011]** tarafından önerilen normalize SPT değerlerine dayalı denklem (3.2), denklem (3.3) ve denklem (3.4) ile elde edilmiştir. İndeks parametreleri (ne, me, np) için varsayılan değerler kullanılmıştır. **Tablo 3.2** kumlu tabakalar için UBC3D-PLM model parametrelerini göstermektedir.

$$k_G^e = 21.7 \times 20 \times (N_1)_{60}^{0.3333} \quad (3.2)$$

$$k_B^e = 0.7 \times k_G^e \quad (3.3)$$

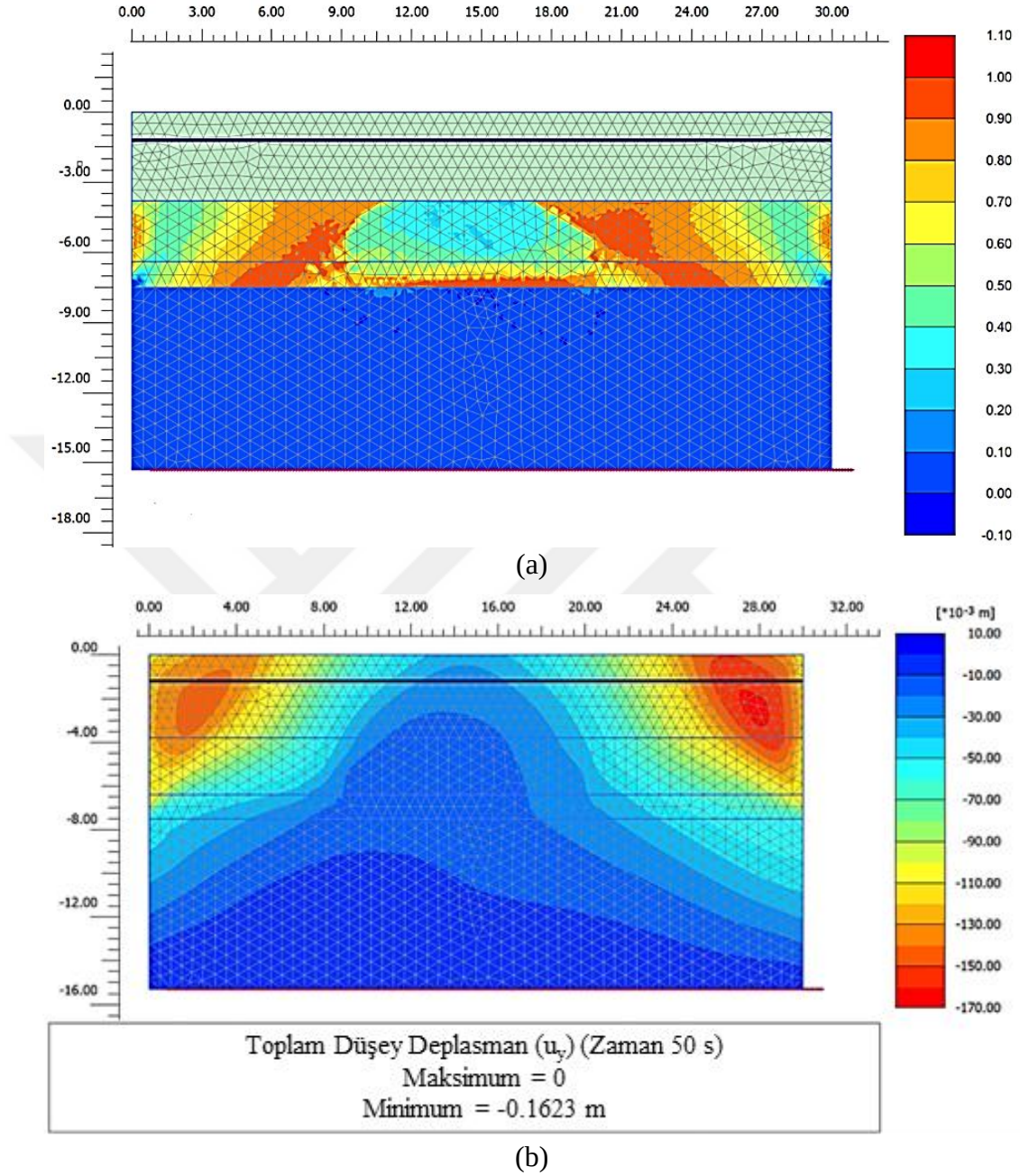
$$k_G^p = k_G^e \times (N_1)_{60}^2 \times 0.003 + 100 \quad (3.4)$$

**Tablo 3.2:** Kumlu tabakalar için UBC3D-PLM model parametreleri.

| <b>Rijitlik parametreleri</b>                     | <b>Sembol</b> | <b>SM-1</b> | <b>SP</b> | <b>SM-2</b> |
|---------------------------------------------------|---------------|-------------|-----------|-------------|
| Elastik kayma modülü faktörü                      | $k_G^e$       | 1070.2      | 1070.2    | 1432.8      |
| Elastik bulk modülü faktörü                       | $k_B^e$       | 749.1       | 749.1     | 1003.0      |
| Plastik kayma modülü faktörü                      | $k_G^p$       | 822.4       | 822.4     | 5670.9      |
| Elastik kayma modülünün gerilime bağımlılık oranı | ne            | 0.5         | 0.5       | 0.5         |
| Elastik bulk modülünün gerilime bağımlılık oranı  | me            | 0.5         | 0.5       | 0.5         |
| Plastik kayma modülünün gerilime bağımlılık oranı | np            | 0.4         | 0.4       | 0.4         |
| <b>Mukavemet parametreleri</b>                    |               |             |           |             |
| Sabit hacim sürtünme açısı                        | $\phi_{cv}$   | 35          | 35        | 42          |
| Tepe sürtünme açısı                               | $\phi_p$      | 36.5        | 36.5      | 49.8        |
| Kohezyon                                          | c (kPa)       | 1           | 1         | 1           |
| <b>Gelişmiş Parametreler</b>                      |               |             |           |             |
| Düzeltilmiş SPT(N)                                | $N_{1.60}$    | 15          | 15        | 36          |
| Yoğunlaştırma faktörü                             | $f_{dens}$    | 1           | 1         | 1           |
| Sıvılaşma sonrası faktör                          | $f_{Epost}$   | 1           | 1         | 1           |
| Göçme oranı                                       | $R_f$         | 0.9         | 0.9       | 0.9         |

Sıvılaşmanın gelişimi, aşırı boşluk suyu basıncı oranı parametresi ( $R_u$ ) ile ele alınmıştır. Belirli derinlikteki boşluk suyu basıncı değişiminin efektif gerilme cinsinden değişim oranını temsil eden aşırı boşluk suyu basıncı oranı  $R_u$  ile ifade edilmektedir. Burada  $R_u$ 'nın 0.7'den büyük olduğu yerler için sıvılaşma potansiyeli olduğu ön görülmektedir. Aşırı boşluk suyu basıncı oranına göre, **Şekil 3.5a**'da gösterildiği gibi, sismik sarsıntı sırasında SM-1 ve SP zemin katmanlarında kısmi

sıvılaşıma potansiyeli meydana gelmiştir. **Şekil 3.5b** dinamik sarsıntının sonundaki düşey yer değiştirmeleri göstermektedir.



**Şekil 3.5:** a) Aşırı boşluk suyu basıncı oranı ( $R_u$ ) ve b) Düşey deplasman.

### 3.1.2.3 PM4Sand

Sıvılaşıma sonrası etkileri araştırmak için ikinci davranış modeli olarak PM4Sand bünye modeli (versiyon 3.1) kullanılmıştır. Model, **Dafalias ve Manzari [2004]** tarafından geliştirilen kum için gerilme oranı kontrollü, kritik durum uyumlu,

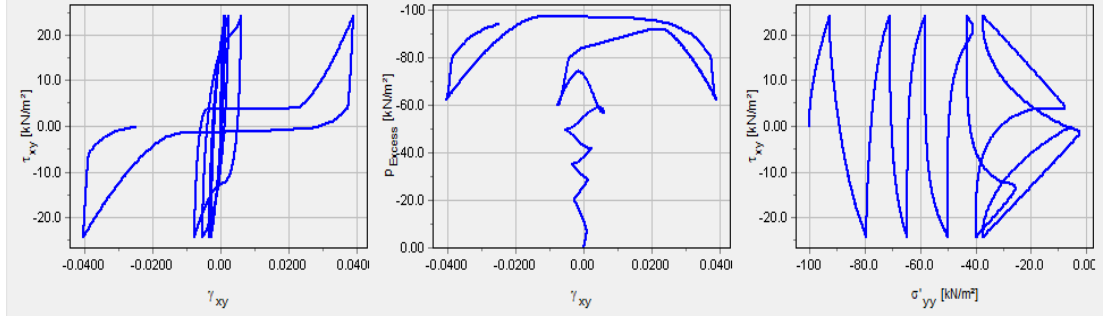
sınırlayıcı yüzey plastisite modeline (DM04) dayanmaktadır. **Boulanger ve Ziotopoulou [2017]** tarafından geliştirilen PM4Sand sıvılaşma modeli, kumlu zeminlerin sismik davranışını modellemek için geliştirilen bünye denklemlerinden oluşmaktadır. Bu denklemler gerilme oranı ile kontrol edilmektedir. Ayrıca kritik durum teorisi ile uyumlu olmakla birlikte iki boyutlu plastisite teorisine dayanmaktadır. PM4Sand aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunu, sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası olaylar da dahil olmak üzere dinamik yükleme altında kumların davranışını simüle edebilmektedir. En önemli avantajlarından biri, kalibrasyon gerektiren parametre sayısının az olmasıdır; bunların çoğu rölatif sıkılık ( $D_r$ ), SPT, CPT ve kayma dalgası hızı ( $V_s$ ) değerleri gibi yaygın olarak bulunan verilerle ilgilidir **[Plaxis, 2018]**.

PM4Sand model kodu Plaxis dinamik bağlantı kütüphanesinde (DLL) kullanıcı tanımlı bir materyal olarak mevcuttur. PM4Sand modeli 11 adet kullanıcı tanımlı model parametresi içerir. Rölatif sıkılık ve kayma modülü katsayısı değerleri, düzeltilmiş normalize SPT değerine dayalı olarak aşağıdaki denklem (3.5) ve denklem (3.6) kullanılarak hesaplanabilir **[Idriss ve Boulanger, 2008; Boulanger ve Ziotopoulou, 2017]**.

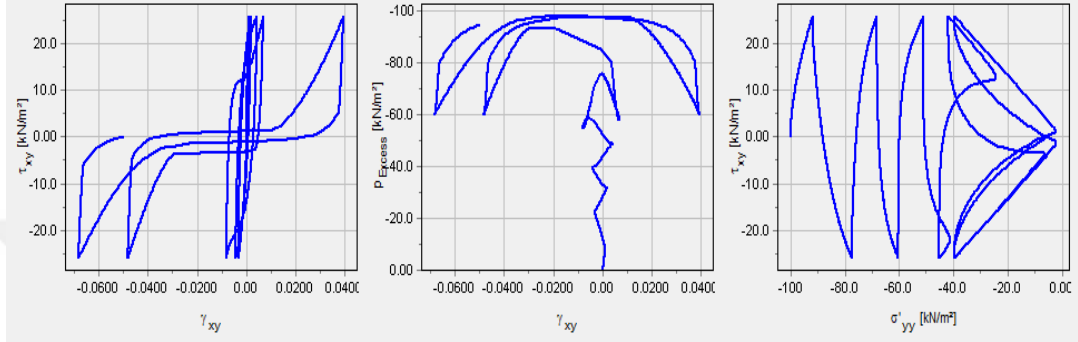
$$D_r = \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{46}} \quad (3.5)$$

$$G_0 = 167\sqrt{(N_1)_{60} + 2.5} \quad (3.6)$$

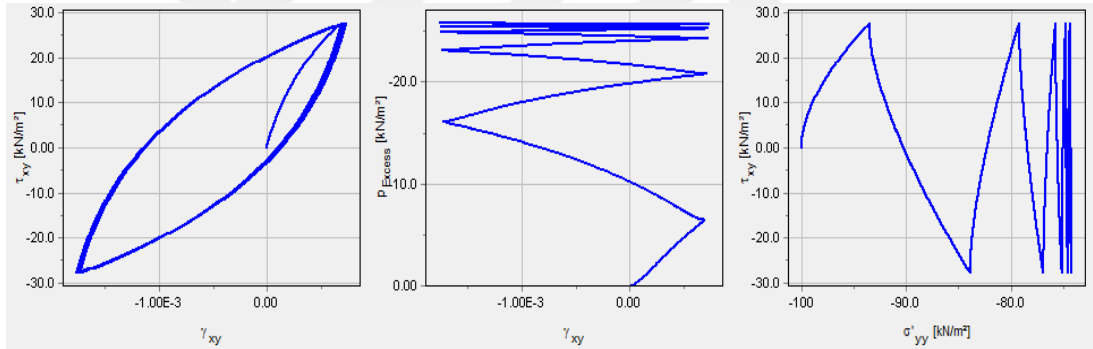
Tüm parametreler kalibre edildikten sonra, sıkışma parametresi  $h_{p0}$ , çevrimsel kayma mukavemeti oranı (CRR) ve döngü sayısı (N) kullanılarak kalibre edilmiştir. Plaxis zemin testleri özelliği,  $h_{p0}$ 'ı ayarlamak için çevrimli basit kesme (CDSS) testini simüle etmek için kullanılmıştır. **Şekil 3.6** SM-1, SP ve SM-2 katmanları için Christchurch deprem kaydı kullanılarak simüle edilen CDSS test sonuçlarını göstermektedir.



a) SM-1 için CDSS sonuçları ( $h_{p0}:0.80$ ,  $N:5$ ).



b) SP için CDSS sonuçları ( $h_{p0}:0.85$ ,  $N:5$ ).



c) SM-2 için CDSS sonuçları ( $h_{p0}:0.5$ ,  $N:5$ ).

**Şekil 3.6:** a) SM-1, b) SP ve c) SM-2 için drenajsız tekrarlı basit kayma gerilmesi testi simülasyon sonuçları.

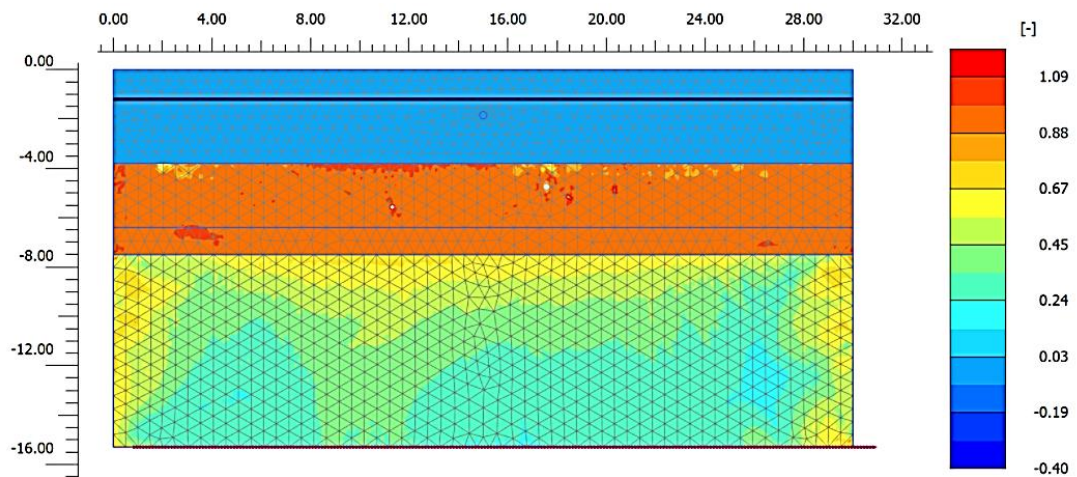
PM4Sand davranış modeli için boşluk suyu basıncının dağılmasını simüle etmek amacıyla Christchurch deprem kaydı iki aşamalı olarak ele alınmıştır. İlk aşama, boşluk suyu basıncının gelişeceği sarsıntının güçlü kısmı (ilk 20 saniye) ve ikinci aşama, boşluk suyu basıncının dağılacığı deprem kaydının zayıf kısmıdır (son 6.99 saniye). PM4Sand modelindeki sarsıntı sonrası parametresi ilk dinamik yükleme (Faz 1) için 0 olarak tanımlanmış ve daha sonra ikinci dinamik yükleme (Faz 2) için sarsıntı sonrası parametresi 1 olarak değiştirilmiştir. Aşama 2'de, sıvılaşmanın neden olduğu oturmayı elde etmek için Biot Teorisine **[Biot, 1956]** dayalı olarak konsolidasyon ile

dinamik analiz seçeneği seçilmiştir. **Tablo 3.3** PM4Sand bünye modeli zemin parametrelerini göstermektedir.

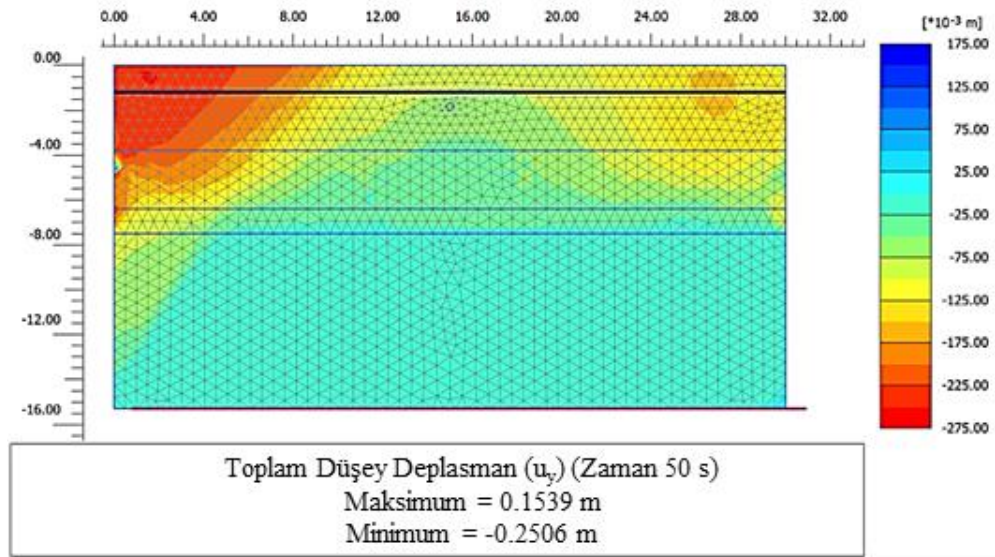
**Tablo 3.3:** PM4Sand bünye modeli parametreleri.

|                                   | Sembol         | SM-1    | SP      | SM-2    |
|-----------------------------------|----------------|---------|---------|---------|
| Rölatif Sıklık                    | $D_{R0}$       | 0.57    | 0.57    | 0.88    |
| Kayma modülü katsayısı            | $G_0$          | 698     | 698     | 1036.2  |
| Sıkışma oranı parametresi         | $h_{p0}$       | 0.8     | 0.85    | 0.5     |
| Atmosferik basınç                 | $p_A$ (kPa)    | 101.3   | 101.3   | 101.3   |
| Maksimum boşluk oranı             | $e_{max}$      | 0.8     | 0.8     | 0.8     |
| Minimum boşluk oranı              | $e_{min}$      | 0.5     | 0.5     | 0.5     |
| Sınırlayıcı yüzey parametresi     | $n^b$          | 0.5     | 0.5     | 0.5     |
| Dilatansi yüzey parametresi       | $n^d$          | 0.1     | 0.1     | 0.1     |
| Kritik durum içsel sürtünme açısı | $\varphi_{cv}$ | 33      | 33      | 33      |
| Poisson oranı                     | $\nu$          | 0.3     | 0.3     | 0.3     |
| Kritik durum parametreleri        | $Q, R$         | 10, 1.5 | 10, 1.5 | 10, 1.5 |

**Şekil 3.7** PM4Sand modeli için aşırı boşluk suyu basıncı oranının dağılımını göstermektedir. Aşırı boşluk basıncı oranına göre, sismik sarsıntı nedeniyle SM-1 ve SP zemin katmanlarında yüksek oranda sıvılaşma potansiyeli gözlenmiştir. **Şekil 3.8** sismik sarsıntının sonundaki düşey yer değiştirmeleri göstermektedir. Maksimum düşey yer değiştirme 25 cm'ye ulaşmıştır.



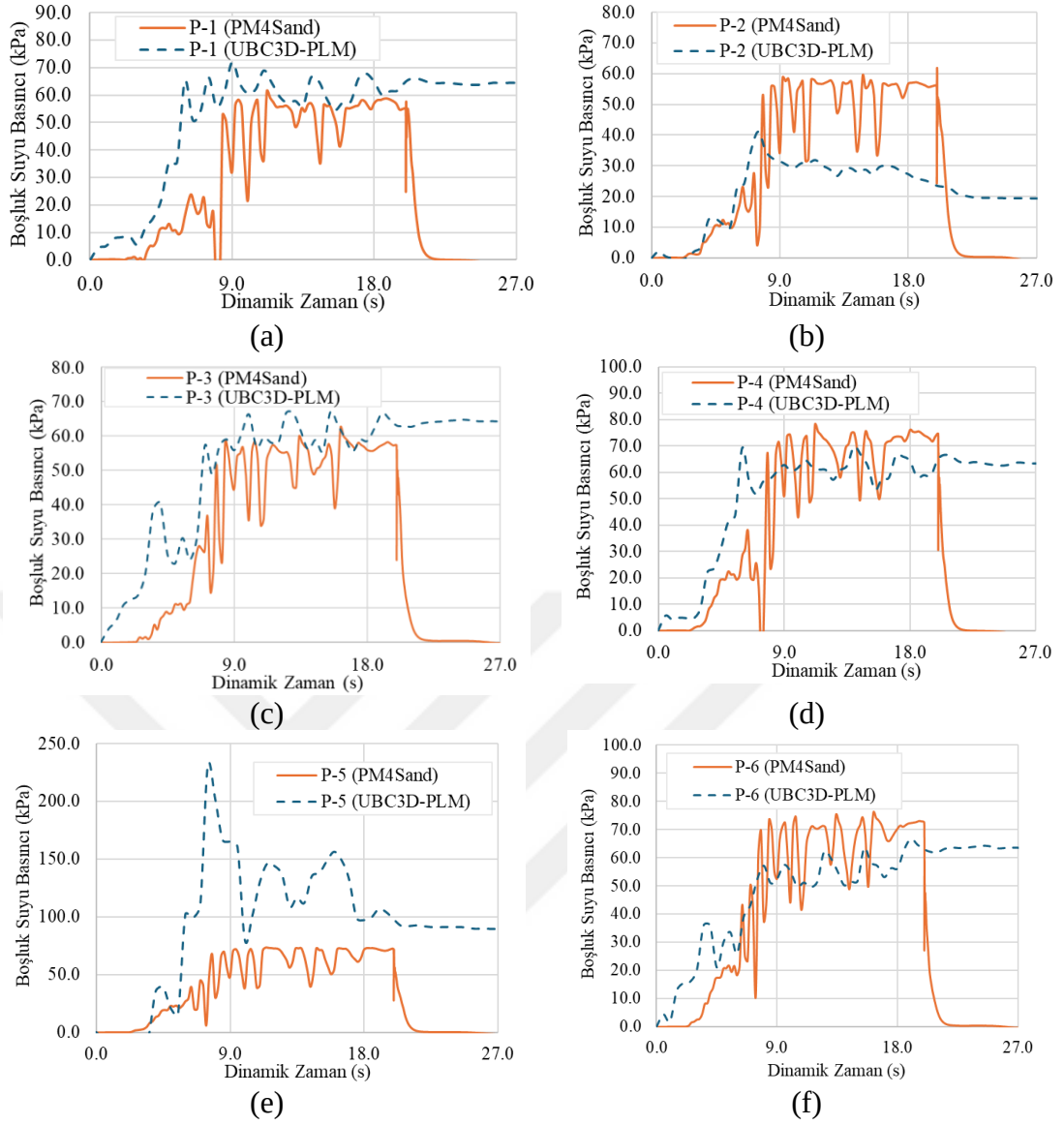
**Şekil 3.7:** PM4Sand için aşırı boşluk suyu basıncı oranı ( $R_u$ ).



**Şekil 3.8:** PM4Sand için düşey yer değiştirme.

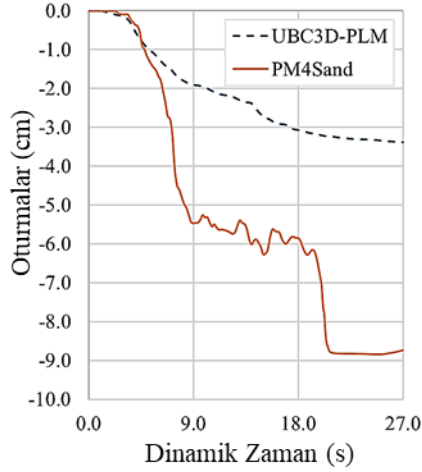
#### 3.1.2.4 Nümerik Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Sonlu elemanlar yöntemine (SE) dayalı Plaxis 2D kullanılarak, Christchurch depremi için kumlu zeminlerin sıvılaşma sonrası oturmalarını tahmin etmek için saha tepki analizleri yapılmıştır. Nümerik ve basitleştirilmiş çözümlerle aynı zemin katmanlarında (SM-1 ve SP) sıvılaşma potansiyeli gözlemlenmiştir. Öte yandan, dinamik yükleme sırasında sıvılaşabilir kum tabakalarındaki boşluk basıncı değişimi karşılaştırılmıştır. **Şekil 3.9** UBC3D-PLM ve PM4sand modelleri için seçilen analiz noktalarında sismik sarsıntı ile değişen boşluk suyu basıncının karşılaştırmasını göstermektedir. PM4Sand modeli ile yapılan analizde boşluk suyu basıncının olduğu ve dağıldığı gözlenirken UBC3D modelinde boşluk suyu basıncını dağılımı tamamlanamamıştır. Bu nedenle sıvılaşma kaynaklı oturmalar için UBC3D-PLM ve PM4Sand modeli arasında önemli bir fark oluşmuştur. Düşey oturmalar sınır etkilerinden kaçınmak için modelin ortasında hesaplanmıştır. Sıvılaşma kaynaklı oturmalar UBC3D-PLM ve PM4Sand modelleri için sırasıyla toplam 3.5 cm ve 8.8 cm olarak gözlemlenmiştir.

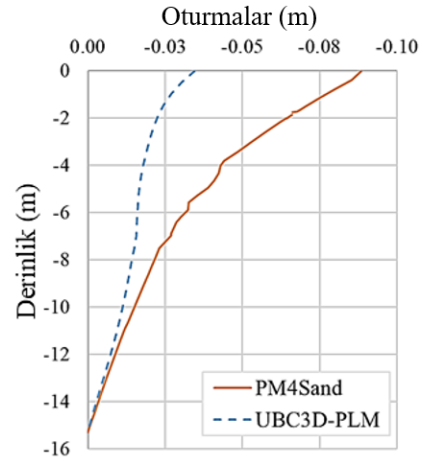


**Şekil 3.9:** a) P-1, b) P-2, c) P-3, d) P-4, e) P-5 f) P-6 noktaları için boşluk suyu basıncının değişimi.

**Şekil 3.10a** PM4Sand ve UBC3D davranış modellerinde dinamik yükleme sırasında yüzeyde modelin orta noktasında (15,0) zaman bağlı olarak gerçekleşen sıvılaşma kaynaklı oturmaları göstermektedir. Ayrıca **Şekil 3.10b**'de aynı nokta için oturmaların derinlik boyunca değişimleri gösterilmektedir.



(a)

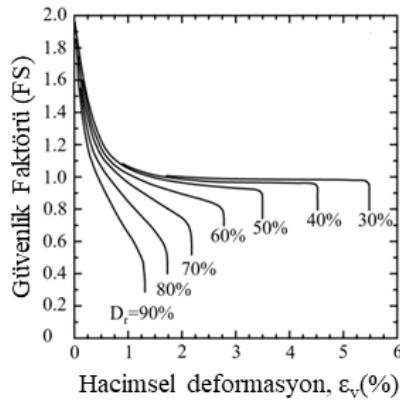


(b)

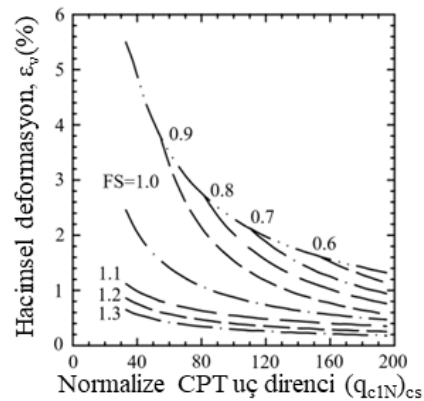
**Şekil 3.10:** UBC3D ve PM4Sand modeli için sıvılaşma kaynaklı oturmaların a) dinamik zaman ve b) derinlikle değişimleri.

### 3.1.3. Ampirik Yaklaşımlar

SPT ve CPT verilerine dayanarak sıvılaşma kaynaklı oturmaları değerlendirmek için yarı ampirik yaklaşımlar kullanan yöntemler de kullanılmaktadır. Bu teknikler genellikle katmanın sıvılaşma güvenlik faktörünü ve belirlenen zemin parametresini kullanarak hacimsel deformasyonu tahmin etmeyi amaçlamaktadır. **Ishihara ve Yasmine [1992]** rölatif sıkılık ve güvenlik faktörüne dayalı bir ilişki (**Şekil 3.11a**) kullanırken, **Zhang vd., [2002]** düzeltilmiş CPT uç direnci ve güvenlik faktörüne dayalı bir çizelge (**Şekil 3.11b**) kullanmaktadır. İki yöntemde de oturma tahminleri hacimsel deformasyonun tabaka kalınlığıyla çarpılmasıyla elde edilir (Denklem (3.7)).



(a)



(b)

**Şekil 3.11:** a) Sıvılaşma kaynaklı deformasyon katsayıları a) **Ishihara ve Yasmine [1992]** ve b) **Zhang vd., [2002]**.

$$S = \sum_{i=1}^j \varepsilon_{vi} \Delta_{zi} \quad (3.7)$$

**Zhang vd., [2002]** ve **Ishihara ve Yosmine [1992]** tarafından önerilenler gibi çeşitli tahmin yöntemlerine ek olarak, sıvılaşma kaynaklı oturmaları belirlemek için farklı yaklaşımlar kullanılabilir. Bunlar arasında **Çetin vd., [2009]** tarafından önerilen olasılıksal tahmin modelleri, **Bray ve Macedo [2017]** tarafından önerilen basitleştirilmiş sıvılaşma kaynaklı yapısal oturma modelleri ve **Kayen vd., [2013]** tarafından önerilen kayma dalgası hızına bağlı modeller yer almaktadır.

CRR için **Robertson ve Wride [1998]** ve CSR için **Seed ve Idriss [1971]** bu amaçla yaygın olarak kullanılmaktadır. Güvenlik faktöründe CRR için **Idriss ve Boulanger [2008]** ve **Çetin vd., [2004]** tarafından sunulanlar gibi başka yöntemlerin de mevcut olduğunu belirtmek gerekir. Ancak, bu çalışmada **Robertson ve Wride [1998]** tarafından ortaya konan yaklaşıma dayanan **Zhang vd., [2002]** tarafından kullanılan yöntem kullanılarak hesaplamaların yapılması tercih edilmiştir. CSR için denklem ise denklem (3.8)'de verilmiştir.

$$CSR_{M,\sigma'_v} = 0.65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \frac{\sigma_{max}}{g} r_d g_v \quad (3.8)$$

Sonuç olarak, güvenlik faktörünün belirlenmesi için seçilen yöntemlere uygun olarak, düşey oturma değeri **Ishihara ve Yoshimine [1992]** için 11.1 cm ve **Zhang vd., [2002]** için 11.3 cm olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar nümerik analiz sonuçları ve LiDAR ölçümleri ile uyum içerisindedir.

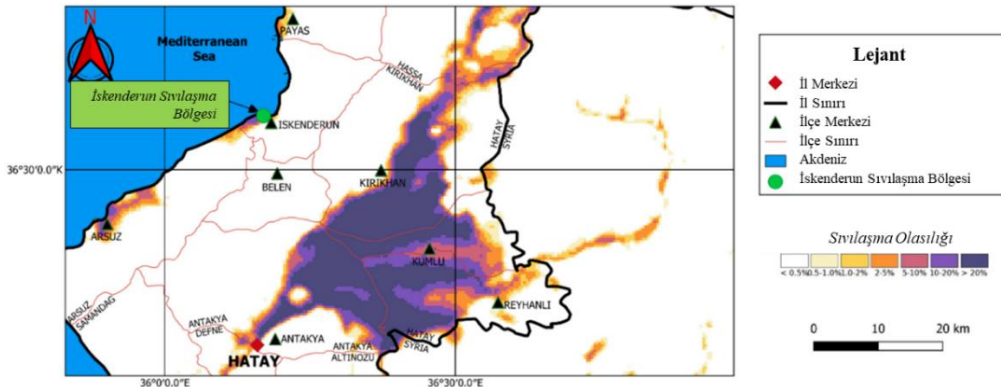
### 3.2. Vaka çalışması II: Kahramanmaraş Depremi

6 Şubat 2023'te meydana gelen 7.7  $M_w$  ve 7.6  $M_w$  büyüklüğündeki Kahramanmaraş depremleri ve ardından meydana gelen artçı depremler Türkiye'de 13 ilde altyapı sistemlerinde ciddi hasara yol açmıştır. İçme suyu ve atık su altyapısı üzerindeki etkiler önemli boyutlara ulaşmış ve etkilenen yaklaşık 14 milyon insana yaşamlarını sürdürebilecekleri hizmeti sağlamak için bölge ve dünya genelinde desteğin seferber edilmesini gerektirmiştir.

Kahramanmaraş'ta 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen depremler iki ana şoktan oluşmuştur. İlk olarak Pazarcık depremi yerel saatle 04:17'de 7.7  $M_w$  büyüklüğünde,

merkez üssü Kahramanmaraş'ın Pazarcık ilçesinde yaklaşık 8.6 km derinlikte gerçekleşmiştir. 7.6  $M_w$  büyüklüğündeki ikinci ana şok depremi ise yerel saatle 13:24'te yaklaşık 170 km uzunluğundaki bir fay üzerinde meydana gelmiştir [AFAD, 2023; Garini ve Gazetas, 2023]. Depremin merkez üssü Pazarcık merkez üssünün yaklaşık 100 km kuzeyindeki Kahramanmaraş ili Ekinözü ilçesi olup, derinliği yaklaşık 7 km'dir [AFAD, 2023]. Bu sismik olaylar, Türkiye'deki en aktif fay zonlarından biri olarak kabul edilen Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) boyunca meydana gelmiş, Türkiye'de en az 13 ili ve Kuzey Suriye'nin bazı bölgelerini etkilemiş, 14 milyondan fazla nüfusu etkileyerek 50.000'den fazla can kaybına ve önemli maddi hasara yol açmıştır. Bu tehlikelerin kümülatif etkisi geniş bir coğrafi alanı etkileyecek kadar büyük olmuştur. Fay kırılmaları, heyelanlar, sıvılaşma ve geçici zemin deformasyonlarının karşılıklı etkileşimi yalnızca temel altyapının işlevselliğini bozmakla kalmamış, aynı zamanda Kahramanmaraş depremlerinin ardından toplumun dayanıklılığı ve toparlanması açısından da büyük zorluklar yaratmıştır.

Etkilenen bölge boyunca birçok yerde sıvılaşmalar meydana gelmiştir [Çetin vd., 2023; Çakır ve Çetin, 2024; Taftoglou vd., 2023]. Şekil 3.12 Hatay bölgesinde USGS tarafından oluşturulan olasılıksal sıvılaşma dağılımını göstermekte olup daha koyu renkler etkilenen alanın tahmin edilen daha büyük oranını göstermektedir. Hatay'ın kuzeydoğusunda beklenen geniş sıvılaşma bölgesi, Doğu Anadolu ve Ölü Deniz Fay Zonlarının kesişiminde oluşan Holosen tortullarından oluşan bir havza olan Amik Vadisi'ne karşılık gelmektedir ve bu bölgede ölçülen yüksek PGA seviyeleri ile tutarlıdır.



Şekil 3.12: Hatay bölgesi için USGS sıvılaşma olasılığı haritası [Toprak vd., 2024b].

### 3.2.1. İskenderun Yağmur Suyu Pompa İstasyonu Vaka Çalışması

Yoğun şekilde sıvılaşmadan etkilenen bölgelerden biri Akdeniz kıyısındaki liman kenti İskenderun olmuştur (**Şekil 3.12**). Yer sarsıntısı nedeniyle yanal yayılma, çökme ve çeşitli seviyelerde oturma ve yükselme dahil olmak üzere binalarda yaygın şekilde hasarlar meydana gelmiştir [**Toprak vd., 2024**]. Hatay Su ve Kanalizasyon İşleri (HATSU) yaklaşık 300 km uzunluğundaki gömülü su boru hatlarında önemli hasarlar meydana geldiğini bildirmiştir; bu hatların birçoğuna çöken binalardan kaynaklanan yüzey kalıntıları nedeniyle erişilememiştir.

**Şekil 3.13a** yer altı altyapısında sıvılaşmanın neden olduğu kaldırma kuvveti etkilerinin bir sonucu olarak bir kanalizasyon menholünün birkaç metre yukarıya doğru yer değiştirdiği bir örneği göstermektedir. **Kang vd., [2013]** gibi çalışmalarda görüleceği üzere, kanalizasyon sistemlerinde benzer hasar gözlemleri önceki depremlerde de belgelenmiştir. **Şekil 3.13b**, kurak bir günde yer altındaki bir otoyolun istinat duvarından sızan suyu göstermektedir ve muhtemelen sızan içme suyu boru hatlarından beslenen sürekli yüksek bir su tablasına işaret etmektedir. Önemli hasar noktalarından biri İskenderun Atatürk Bulvarında bulunan 1 nolu barınak yağmur suyu ve atık su terfi istasyonunda meydana gelmiştir. Tesisin içinde (**Şekil 3.14b**) ve dışında (**Şekil 3.14c**) sıvılaşma kaynaklı önemli yükselmeler ile oturmalar ve bina çevresinde kum kaynaması belirtileri gözlenmiştir (**Şekil 3.14d**). Yaklaşık 400 mm çapındaki yer üstü çelik boru hattında da hasarlar görülmüş olup, bu hasarlara yer üstü uzunluğu boyunca destek noktalarında yaklaşık 200 mm eksenel kayma (**Şekil 3.14e**) ve bina ile boru hattı arasındaki farklı oturmalar ve geçici hareketler nedeniyle boru burkulması ve beton duvar hasarı da dahildir (**Şekil 3.14f**). Gözlemlenen hasarların geçici yer sarsıntısı ve kalıcı yer hareketinin bir araya gelmesiyle meydana geldiği düşünülmektedir.



(a)

(b)

**Şekil 3.13:** İskenderun'da sıvılaşma etkileri: (a) Atatürk Caddesi boyunca kanalizasyon rögarı ve (b) yer altındaki karayoluna su sızması (Koordinatlar: 36.582612, 36.167639) [Toprak vd., 2024b].



(a)

(b)

(c)

(d)

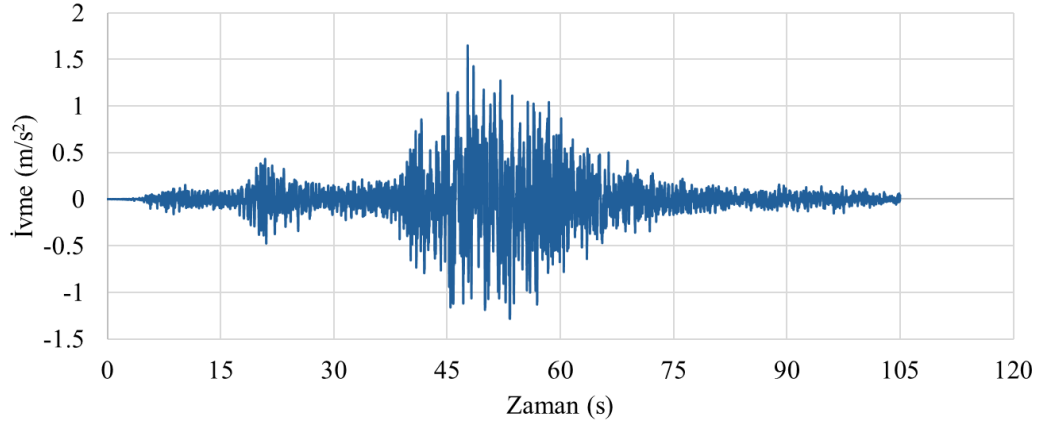
(e)

(f)

**Şekil 3.14:** İskenderun yağmur suyu ve atıksu pompa istasyonunda sıvılaşma nedeniyle oluşan hasar: (a) sahanın konumu (daire) ve denize uzanan boru (ok), (b) hasarlı pompalar ve tesis içindeki farklı oturma ve yükselme, (c) binanın güney tarafındaki yükselme, (d) tesis dışındaki kum kaynaması belirtileri, (e) boru desteklerinin kayması ve (f) yapının kuzey tarafındaki boruda hasar (yaklaşık  $PGA = 0.26$  g,  $PGV = 45.69$  cm/s) [Toprak vd., 2024b].

### 3.2.1.1 Nümerik Model

Plaxis 2D sonlu elemanlar programı ile **Şekil 3.14c**'de yer alan yer altı yağmur suyu deposunun nümerik analizleri uygulanmıştır. Deprem kaydı AFAD tarafından sunulan veri merkezinden elde edilmiştir. Mühendislik kayası üzerinde bulunan 3116 nolu deprem kayıt istasyonundan alınan 7.7Mw büyüklüğündeki Pazarcık depremi ivme kaydıdır. Mühendislik kayası üzerinden alınan ivme kaydı olması nedeniyle ters evrişim işlemi uygulanmamıştır. Bir önceki bölümde olduğu gibi Rayleigh parametreleri kullanılmıştır. **Şekil 3.15**'de analizlerde kullanılan deprem kaydı yer almaktadır.

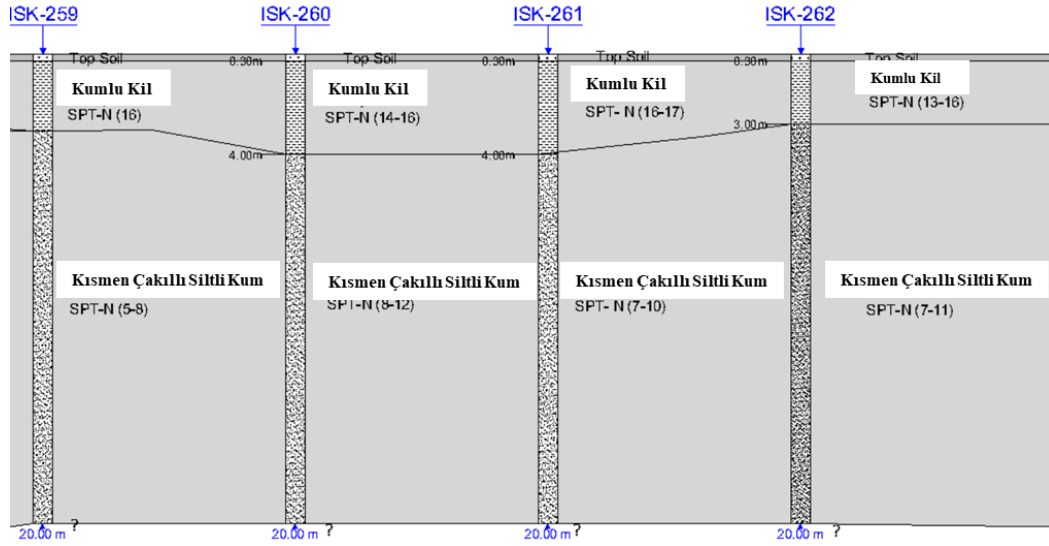


**Şekil 3.15:** Pazarcık depremi için 3116 istasyonundan elde edilen ivme kaydı.

Zemin sondaj verisi ise **Özener vd., [2024]** ve **Dülger ve Kılıç [2024]** tarafından sunulan sondaj verisine dayanmaktadır. **Şekil 3.16** İskenderun 1 nolu yağmur suyu istasyonunda meydana gelen yer hareketleri yer almaktadır. **Şekil 3.17** Atatürk bulvarında sahil hattında uygulanan sondaj verilerini göstermektedir. Bu aşamada bir önceki bölümde izlenen adımlar takip edilerek nümerik model oluşturulmuştur.

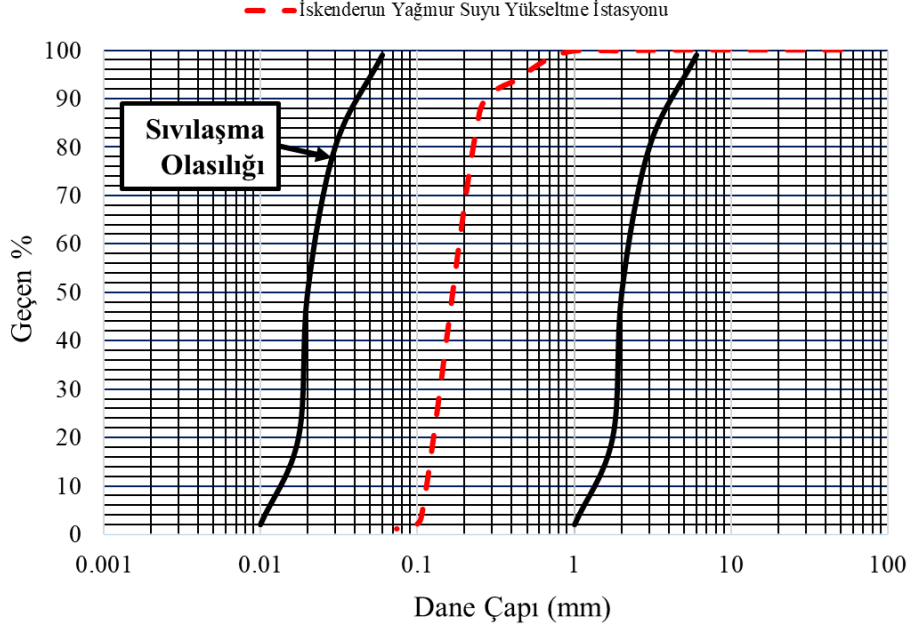


**Şekil 3.16:** İskenderun 1 nolu yağmur suyu yükseltme istasyonu.



**Şekil 3.17:** İskenderun Atatürk bulvarında yapılan sondaj verileri [Özener vd., 2024].

Kahramanmaraş depremleri sonrasında deprem bölgesinde Gebze Teknik Üniversitesi'nden araştırmacılar ile yürütülen saha araştırma çalışmalarında Yükseltme İstasyonu yakınında meydana gelen kum kaynamasından zemin numunesi alınarak elek analizi uygulanmıştır. **Şekil 3.18'**de elek analizi sonuçları yer almaktadır. Burada dane dağılımının sıvılaşma potansiyeli içerisinde kaldığı görülmektedir. Nümerik analizde sıvılaşma davranış modeli olarak UBC3D-PLM kullanılmıştır. **Tablo 3.4'**de ise UBC3D-PLM davranış modeli parametreleri yer almaktadır.



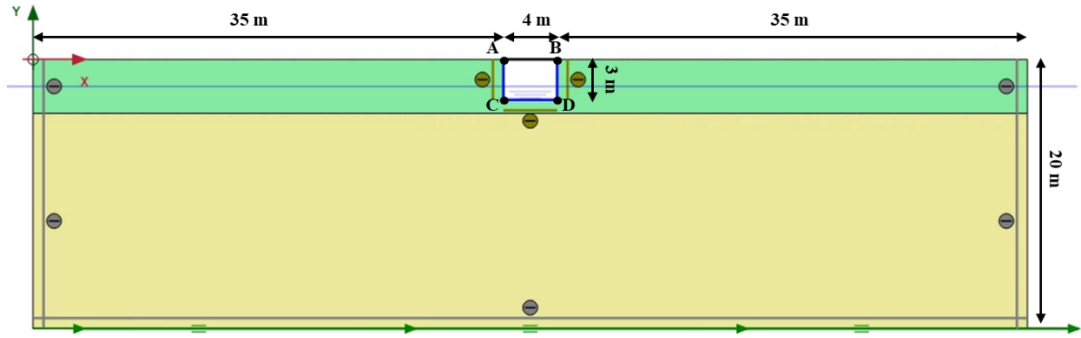
**Şekil 3.18:** Kum kaynamasından alınan numune üzerinde yapılan elek analizi sonuçları.

**Tablo 3.4:** UBC3D-PLM model parametreleri.

| <b>Rijitlik parametreleri</b>                     | <b>Sembol</b> | <b>Kum</b> |
|---------------------------------------------------|---------------|------------|
| Elastik kayma modülü faktörü                      | $k_G^e$       | 1045       |
| Elastik bulk modülü faktörü                       | $k_B^e$       | 731.5      |
| Plastik kayma modülü faktörü                      | $k_G^p$       | 714.46     |
| Elastik kayma modülünün gerilime bağımlılık oranı | ne            | 0.5        |
| Elastik bulk modülünün gerilime bağımlılık oranı  | me            | 0.5        |
| Plastik kayma modülünün gerilime bağımlılık oranı | np            | 0.4        |
| Sabit hacim sürtünme açısı                        | $\phi_{cv}$   | 33         |
| Tepe sürtünme açısı                               | $\phi_p$      | 31.6       |
| Kohezyon (kPa)                                    | c             | 1          |
| Düzeltilmiş SPT(N)                                | $N_{1,60}$    | 14         |
| Yoğunlaştırma faktörü                             | $f_{dens}$    | 1          |
| Sıvılaşma sonrası faktör                          | $f_{Epost}$   | 1          |
| Göçme oranı                                       | $R_f$         | 0.9        |

74 m genişliğinde, 20 m derinlikte oluşturulan nümerik modelin yüzeyinde 4 m genişliğinde 3 m derinliğinde su alma yapısı bulunmaktadır. Yer altı su seviyesi yüzeyden 2 m aşağıda yer almaktadır. Yapısal elemanlar ‘plate’ eleman özelliği kullanılarak oluşturulmuştur. **Şekil 3.19**’da model geometrisi yer almaktadır. **Tablo**

3.5’de ise yapısal elemanın malzeme özellikleri yer almaktadır. **Şekil 3.19**, model geometrisini ve atanmış analiz noktalarını göstermektedir.



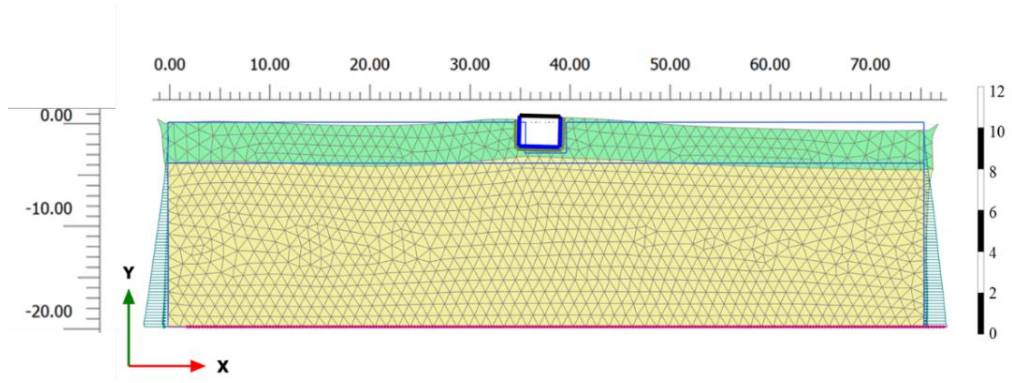
**Şekil 3.19:** Yağmur suyu yükseltme istasyonu için nümerik model geometrisi.

**Tablo 3.5:** Depo yapısını oluşturan yapısal elemanın özellikleri.

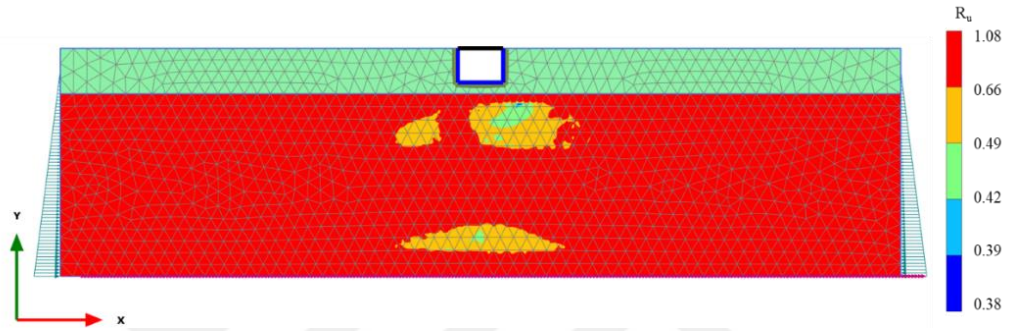
| <i>Parametre</i> | <i>Sembol</i> | <i>Değer</i>      | <i>Birim</i>        |
|------------------|---------------|-------------------|---------------------|
| Normal Rijitlik  | EA            | $1.2 \times 10^7$ | kN/m                |
| Eğilme Rijitliği | EI            | $1.6 \times 10^5$ | kNm <sup>2</sup> /m |
| Ağırlık          | w             | 10                | kN/m                |
| Poisson Oranı    | v             | 0.15              | -                   |

### 3.2.1.2 Nümerik Model Sonuçları

Bu bölümde elde edilen nümerik sonuçlar deprem sonrasında saha tarama çalışmalarında elde edilen bulgular ve bölgede yapılan diğer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Sıvılaşma potansiyeli bir önceki bölümde olduğu gibi boşluk suyu basıncı oranı parametresi ( $R_u$ ) ile ele alınmıştır. Analizlerin uygulandığı bölge olan İskenderun Atatürk bulvarı boyunca benzer bir zemin profili mevcut olup sıvılaşma potansiyeli bölgede yürütölen çalışmalar ile de ortaya çıkarılmıştır [Çetin vd., 2024; Özener vd., 2024; Dölger ve Kılıç 2024]. Yüzeyden itibaren 4 m aşağıdan başlayarak 20 m’ye kadar devam eden siltli çakıllı kum tabakasında yoğun bir biçimde sıvılaşma potansiyeli gözlenmiştir. **Şekil 3.20** sismik yükleme sonrası modelde oluşan toplam deforme sonlu elemanlar ağını göstermektedir. **Şekil 3.21** nümerik modelde Pazarcık depremi nedeniyle oluşan sıvılaşma potansiyelini boşluk suyu basıncı oranı parametresi ile göstermektedir. Kumlu tabakada yüksek bir oranda sıvılaşma potansiyeli olduğu görölmektedir.

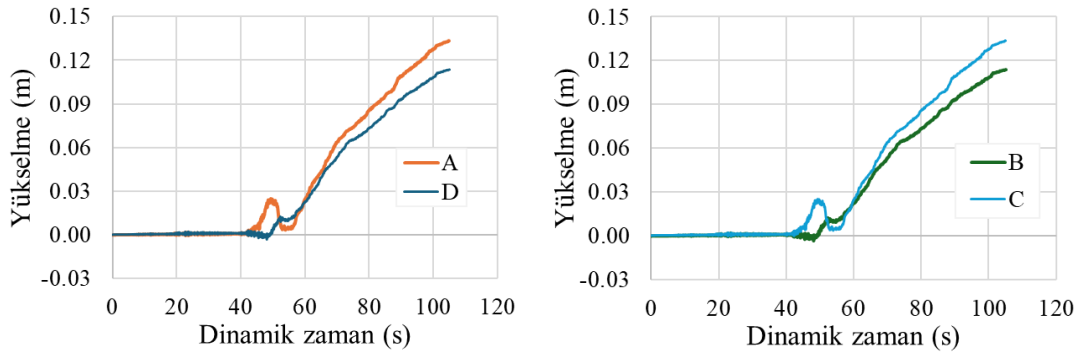


Şekil 3.20: Deprem sonrası oluşan toplam deformasyon (x5 kat).



Şekil 3.21: Aşırı boşluk suyu basıncı oranı ( $R_u$ ).

Analiz öncesinde depo yapısının dört köşe noktasında analiz noktaları seçilerek sismik yükleme boyunca gerçekleşen düşey deplasmanların değişimi ele alınmıştır. Şekil 3.22'de analiz noktalarında meydana gelen deplasmanlar yer almaktadır.



Şekil 3.22: Depo elemanı üzerinde seçilen düşey deformasyonların değişimi.

Rijit şekilde yukarı yönlü bir hareket meydana gelmiş olup yükselme miktarı depremin sonunda yaklaşık 13 cm'ye yaklaşmıştır. Yerinde yapılan ölçümlerde ise yaklaşık 30 cm'lik bir yükselme belirlenmiştir. Ancak bu bölgede meydana gelen yoğun şekilde gözlemlenen kum kaynaması gibi sıvılaşma etkileri zemindeki deformasyonun hem oturma hem de yükselme şeklinde gerçekleştiğini göstermektedir.

## 4. SONLU FARKLAR YÖNTEMİYLE SIVILAŞAN ZEMİNLERDE PVC BORU HATTI DAVRANIŞI

Çalışma kapsamında sonlu farklar yöntemine dayanan FLAC3D (V9.0) ile Christchurch depreminde sıvılaşma nedeniyle hasar meydana gelen PVC boru hattı için dinamik vaka analizi uygulanmıştır. 2011 yılında 6.2 Mw büyüklüğünde meydana gelen Christchurch depremi kullanılarak üç boyutlu olarak PVC boruların davranışı ortaya koyulmuştur. Analiz sahasında sıvılaşan katmanlar bir önceki bölümde (Bölüm 3.1) belirlenmiştir. Bu katmanlar için FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3D) içerisinde bulunan P2PSand davranış modeli kullanılmıştır.

### 4.1. P2PSand Model Özellikleri ve Parametreleri

Sıvılaşan katmanları modelleyebilmek için **Cheng [2018]** tarafından sunulan P2PSand bünye modeli kumlu zeminler için atanmıştır. P2PSand modeli, temel zemin dinamik özelliklerini kapsamayı amaçlayan genel 3D geoteknik deprem mühendisliği uygulaması için pratik iki yüzeyli plastik kum (Practical TWO-surface Plastic SAND) davranış modelini ifade eder. Bu model ise **Dafalias ve Manzari [2004]** tarafından geliştirilen kum plastisitesi ile ilişkili DM04 modelinin modifiye edilmiş bir uzantısıdır. Bazı formüllere çok fazla karmaşıklık eklemekten yenileyerek, çeşitli başlangıç ve yükleme koşulları altında simüle edilen sonuçlar ile çeşitli laboratuvar, saha gözlemleri ve ampirik ilişkiler arasındaki uyum ile iyileştirilmiş performanslara ulaşmıştır [**Cheng, 2018**]. Bu modifiye model boşluk oranı ile ilgili tüm yapısal bileşenleri rölatif sıkılık ile ilgili olacak şekilde değiştirmiş ve laboratuvardaki deneysel veriler yerine SPT(N) gibi yerinde veriler açısından daha kolay bir kalibrasyon prosedürünü içermektedir.

P2PSand modeli, elastik modüllerini mevcut ortalama basınç ( $p$ ) ve mevcut rölatif sıkılığın ( $D_r$ ) bir fonksiyonu olarak kabul eder. Modelde rölatif sıkılığın saha verilerinden kalibre edilmesinin daha uygun olduğuna dair aynı düşünce ile bu modelde kritik durum için benzer bir güç yasası boşluk oranı ( $e$ ) yerine denklem (4.1)'de rölatif sıkılık cinsinden tanımlanmıştır.

$$D_{rc} = D_{rc0} + \lambda_c \left( \frac{p_c}{p_{atm}} \right)^\xi \quad (4.1)$$

Burada  $D_{rc0}$ ,  $\lambda_c$ , ve  $\xi$  malzeme parametreleri olup  $\xi = 0.7$  çoğu zemin için kullanılabilir. Akma Fonksiyonu Gerilme uzayındaki elastik bölge küçük bir koni olarak tanımlanmaktadır ve akma yüzeyi denklem (4.2)'de bulunan fonksiyonla tanımlanmaktadır.

$$f = [(s - p\alpha) : (s - p\alpha)]^{\frac{1}{2}} - \sqrt{\frac{2}{3}} pm = 0 \quad (4.2)$$

Burada  $r=s/p$  deviatorik gerilme oranı tensörüdür,  $\alpha$  deviatorik gerilme oranıdır. Bu modelde,  $m$ 'yi malzemeye bağımlı bir sabit olarak değil, sabit  $m = 0.01Mc$  değeri alınmaktadır.

Bu modelde, elastik modül azalma faktörü ( $F_d$ ) (Denklem (4.3)) ile çarpılarak tekrarlı yükleme sırasında azalır.

$$F_d = 1 - k_d \ln(N_z) \geq 0.1; \quad N_z = \frac{\int_0^z \|dz\|}{\max\|z\|} \quad (4.3)$$

Burada  $k_d$  malzeme parametresi,  $\max\|z\|$  genişleme yapısının tensörünün maksimum büyüklüğü ve  $\int_0^z \|dz\|$  genişleme yapısının tensörünün toplam büyüklüğüdür.

Tez çalışması kapsamında üç boyutlu analizler için Bölüm 3'te sonlu elemanlar, ampirik ve uzaktan algıla yöntemleriyle serbest yüzey oturmaları incelenen çalışma sahasında yer alan 150 mm çapındaki PVC boru kullanılmıştır. PM4Sand ve UBC3D-PLM davranış modellerinde olduğu gibi P2PSand davranış modeli de başlangıç gerilme koşullarını oluşturamamaktadır. Dolayısıyla başlangıç koşulları için Mohr-Coulomb davranış modeli kullanılmıştır. FLAC3D içerisinde bulunan Mohr Coulomb davranış modeli parametreleri **Tablo 4.1**'de yer almaktadır.

**Tablo 4.1:** Mohr Coulomb davranış modeli parametreleri.

| Parametreler         | Sembol | MH    | SM    | SP    | SM2    | Birim             |
|----------------------|--------|-------|-------|-------|--------|-------------------|
| Yoğunluk             | $\rho$ | 1.73  | 1.52  | 1.52  | 1.64   | Mg/m <sup>3</sup> |
| Bulk Modülü          | K      | 14128 | 23973 | 53300 | 103400 | kPa               |
| Kayma Modülü         | G      | 12900 | 16506 | 36700 | 71270  | kPa               |
| Kohezyon             | c      | 10    | 0     | 0     | 0      | kPa               |
| İçsel Sürtünme Açısı | $\phi$ | 0     | 33    | 33    | 33     | °                 |

P2PSand model parametreleri iki kategoride, başlangıç durumu parametreleri ve malzeme özelliği parametreleri olarak ele alınabilirler. Başlangıç durumu parametreleri başlangıç rölatif sıklık ve efektif gerilmelerini içerir. Bu başlangıç parametreleri diğer parametreleri başlatmak için kullanılır. P2PSand davranış modeli atandıktan sonra FISH fonksiyonu ile P2PSand atanan katmanlar için başlangıç koşulları oluşturulmuştur. Modelde kullanılan FISH fonksiyonu **Tablo 4.2** verilmiştir.

**Tablo 4.2:** Başlangıç koşulu için FISH fonksiyonu.

```
fish operator ini_stress(z, modelname)
  if zone.model(z) == modelname then
    local pp = zone.pp(z)
    zone.prop(z,'stress-xx-initial') = zone.stress.xx(z) + pp
    zone.prop(z,'stress-yy-initial') = zone.stress.yy(z) + pp
    zone.prop(z,'stress-zz-initial') = zone.stress.zz(z) + pp
    zone.prop(z,'stress-xy-initial') = zone.stress.xy(z)
    zone.prop(z,'stress-yz-initial') = zone.stress.yz(z)
    zone.prop(z,'stress-xz-initial') = zone.stress.xz(z)
  endif
end
[ini_stress(::zone.list, 'p2psand')]
```

P2PSand parametreleri rölatif sıklık değerleri ile kalibre edilmiştir. Başlangıç rölatif sıklık düzeltilmiş SPT vuruş sayısına (Denklem (4.4)) ya da Idriss and Boulanger, (2008) tarafından sunulan CPT saha testinden elde edilecek normalize uç direnci ile elde edilebilir (Denklem (4.5)).

$$D_r = \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{46}} \quad (4.4)$$

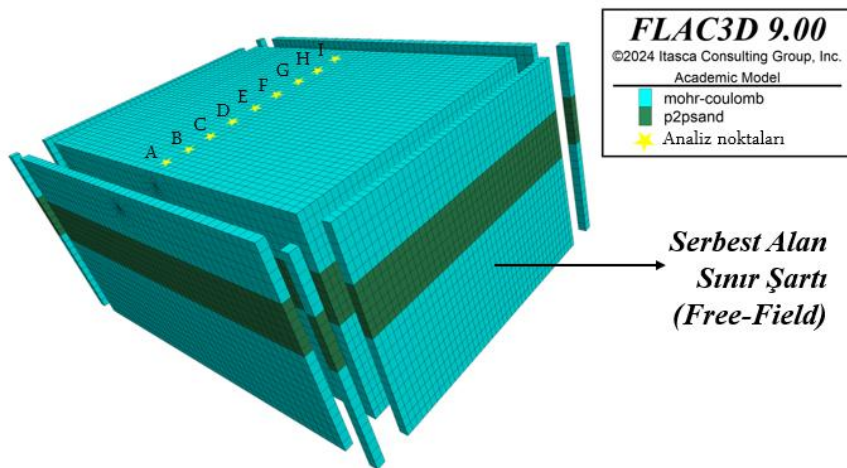
$$D_r = 0.478(q_{c1N})^{0.264} - 1.063 \quad (4.5)$$

Malzeme özelliği parametreleri ayrıca üç alt kategoride gruplandırılabilir: birincil, yardımcı ve sabit parametreler. Birincil parametreler model tarafından simüle edilen yanıt üzerinde biraz daha büyük etkiye sahiptir. Yardımcı parametreler model sonuçları üzerinde daha az etkiye sahiptir ve genellikle daha fazla iyileştirme gerektirmez. Bununla birlikte, bu parametreler için uygun değerlerin seçimini desteklemek için güvenilir deneysel verilere ihtiyaç vardır. **Tablo 4.3**'de P2PSand model parametreleri yer almaktadır.

**Tablo 4.3:** P2PSand model parametreleri.

| <i>Sembol</i>      | <i>Açıklama</i>                           | <i>SM</i><br><i>(N<sub>1</sub>)<sub>60</sub>=15</i> | <i>SP</i><br><i>(N<sub>1</sub>)<sub>60</sub>=15</i> |
|--------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| $D_r$              | Rölatif sıkılık                           | %57                                                 | %57                                                 |
| $K_c$              | Çevrim faktörü                            | 0.6707                                              | 0.6707                                              |
| $P_{atm}$          | Standart atmosfer basıncı                 | 100 kPa                                             | 100 kPa                                             |
| $n^b$              | Sınır yüzey katsayısı                     | 0.0775                                              | 0.0775                                              |
| $n^d$              | Sınır dilatansi katsayısı                 | 0.465                                               | 0.465                                               |
| $Q, R$             | Kritik durum parametreleri                | 10, 1                                               | 10, 1                                               |
| $K_{LB}^d$         | Düşük basınçlarda minimum dilatansi oranı | 0,7                                                 | 0,7                                                 |
| $n$                | Elastisiteyi tanımlama parametresidir.    | 0.5                                                 | 0.5                                                 |
| $z_{max}$          | Bünye magnitudü                           | 15                                                  | 15                                                  |
| $f_{cut}$          | Kesme faktörü                             | 0.05                                                | 0.05                                                |
| $\varphi_{cs}$     | İçsel sürtünme açısı                      | 33                                                  | 33                                                  |
| $k_d$              | Elastisite degradasyonu                   | 0.2605                                              | 0.2605                                              |
| $\nu$              | Poisson oranı                             | 0.22                                                | 0.22                                                |
| $h_0$              | Plastik kayma oranı                       | 1.7                                                 | 1.7                                                 |
| $e_{max}, e_{min}$ | Maks. ve min. boşluk oranı                | 1.0, 0.6                                            | 1.0, 0.6                                            |

Model yüzeyinde boru hattı boyunca 9 adet analiz noktası 2’şer m aralıklarla seçilmiştir. Bu noktalarda meydana gelen hareketler ve ivme okumaları yapılmıştır. Ayrıca boru üzerinde de benzer şekilde analiz noktaları atanmıştır. **Şekil 4.1’**de seçilen analiz noktaları ile davranış modeli atamaları yer almaktadır. Ayrıca düşey sınır şartları serbest alan özelliği ile oluşturulmuştur. Bir sonraki bölümde sonuçlar ayrıntılı olarak sunulmuştur.

**Şekil 4.1:** Yüzeyde seçilen analiz noktaları ve davranış modeli atamaları.

## 4.2. Boru Elemanı

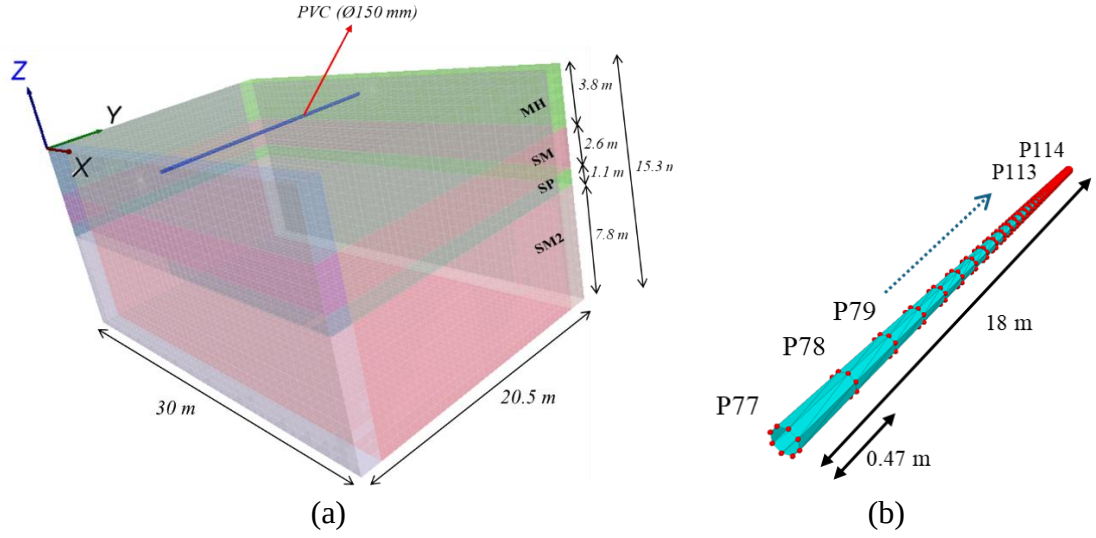
FLAC3D içerisinde bulunan yapısal elemanlar sonlu elemanlar tabanlı olup (elemanlar ve düğümler) ağ (bölgeler ve ağ noktaları) ve diğer yapısal elemanlarla etkileşime girebilmektedirler. Yapısal elemanlar 7 farklı yol ile FLAC3D içerisinde temsil edilebilirler. Yapısal elemanlar şunları içerir: kablolar (cable) ve hibrit civatalar (hybrid bolts), kirişler (beams), kazıklar (piles), kabuklar (shells), geogridler ve kaplamalar (liner). Ayrıca ağlar (zone) ile de yapısal elemanlar oluşturulabilir fakat özellikle eğilme davranışını temsil etmekte doğru sonuçlar vermemektedir. Ayrıca küçük ağ boyutlarının tanımlanması zaman adımını düşürerek analiz sürelerinin artmasına sebep olur.

Bu çalışmada 150 mm çapındaki PVC boru kabuk (shell) eleman kullanılarak modellenmiştir. Her bir kabuk yapı elemanının mekanik davranışı, kabuk malzemesinin kendisinin yapısal tepkisi ve kabuk elemanının ağ ile etkileşim şekli olarak ikiye ayrılabilir. Kabuk elemanları, ağ deforme oldukça kabuk içinde gerilmeler oluşacak şekilde zemine rijit olarak bağlanabilir. Kabuk eleman isteğe bağlı olarak yuvarlak ve yapısal ince kabuk olarak kullanılabilir. Malzeme davranışı elastik (izotropik) veya elastoplastiktir. Kabuk eleman elastik malzeme olarak tanımlanması için 3 parametrenin tanımlanması gerekmektedir. **Tablo 4.4'**de PVC boru eleman parametreleri yer almaktadır.

**Tablo 4.4:** PVC boru eleman parametreleri.

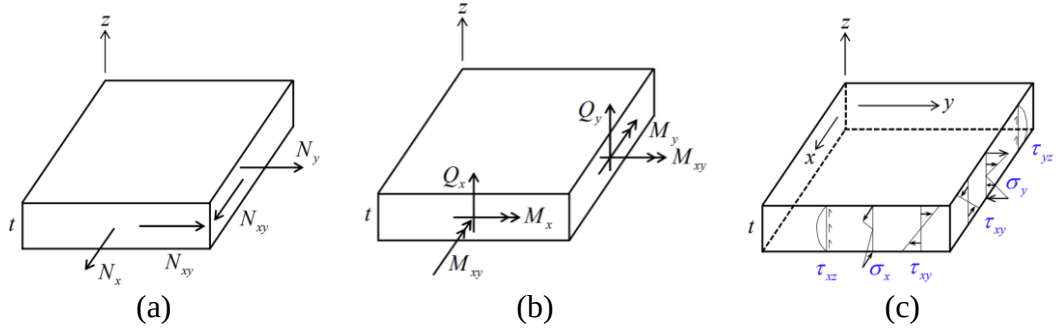
| Boru tipi | Yoğunluk                  | Young Modülü | Et kalınlığı | Çap    |
|-----------|---------------------------|--------------|--------------|--------|
| PVC       | 1.45 (Mg/m <sup>3</sup> ) | 2.7 GPa      | 9.8 mm       | 150 mm |

Christchurch su dağıtım hatlarında PVC borular genellikle 6 m'lik parçalardan oluşan segmentli borulardır. Bu yüzden bu çalışmada 18 m (3x6) uzunluğunda 150 mm çapında, yüzeyden 1.1 m aşağıda y eksenini boyunca uzanmaktadır. Christchurch Cathedral Collage deprem kayıt istasyonundan alınan ivme kaydı boruya dik olacak şekilde x eksenini boyunca etkilmiştir. Deprem kaydı model tabanında kayma gerilmesine çevrilerek yükleme sağlanmıştır. **Şekil 4.2'**de model geometrisi ile PVC boru ve tepe kısımlarındaki analiz noktaları yer almaktadır. Analiz noktaları arası 0,47 m olarak atanmıştır.



**Şekil 4.2:** a) Model geometrisi ve b) shell eleman ile oluşturulan PVC boru elemanı.

Ayrıca boru elemanı üzerinde gerekli olacak verileri alabilmek için model geometrisi ile aynı olacak şekilde yüzey koordinat sistemi oluşturulmuştur. Shell elemanın en alt tabakası ortası ve yüzeyinde gerilme sonuçları alınabilmektedir. Bu analizlerde boru yüzeyinde meydana gelen gerilmeler dikkate alınmıştır. **Şekil 4.3**'de PVC shell üzerinde oluşan normal kuvvet, kesme kuvveti ve momentin yön dağılımları görülmektedir.



**Şekil 4.3:** Shell elemanın normal kuvvet (N), kesme kuvveti (Q) moment (M) ve gerilme tepkileri [Itasca, 2024].

Analiz boyunca meydana gelen gerilmeler FLAC3D tarafından otomatik olarak hesaplanmamaktadır. Dinamik yükleme sonrası gerekli komutlar verilerek öncesinde belirlenen shell yüzey koordinat sistemi için kuvvetler elde edilebilir. Burada yer alan kuvvetler kullanarak boru üzerinde meydana gelen gerilmeler ( $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\tau_{xy}$ ) FLAC3D tarafından üretilmektedir.

### 4.3. Nümerik Model

Önceki bölümde bahsedildiği gibi FLAC3D ile de benzer nümerik modelleme adımları uygulanmıştır. Temel olarak bu adımlar; Probleme uygun bünye modeli Seçimi (Mohr Coulomb, Hardening Soil, P2PSand vb.), yapısal malzemelerin tanımı (Pipe, Beam, Tunnel, Shell, Plate), parametre seçimi, yükleme koşulu, sınır şartları, ağ büyüklüklerin tanımlanması, model kalibrasyonu olarak sıralanabilir.

Özellikle sıvılaşabilir katmanlar içeren dinamik analizlerde oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Doğrusal olmayan bir efektif gerilme tabanlı malzeme modeli kullanarak sismik analiz gerçekleştirmek için aşağıdaki adımların uygulanmıştır.

- i. Statik ve dinamik malzeme özelliklerini belirlenmesi,
- ii. Sismik kayıt özelliklerini değerlendirilmesi,
- iii. Elastik olmayan çevrimsel davranışı temsil etmek için malzeme sönümleme parametrelerinin belirlenmesi,
- iv. Doğru dalga yayılımı için uygun model elemanlarının (Gridler) oluşturulması,
- v. Statik denge durumunu hesaplanması,
- vi. Dinamik yükleme ve sınır koşullarını uygulaması,
- vii. Sönümsüz, elastik malzeme simülasyonu gerçekleştirilmesi,
- viii. Sönümleme ve gerçek mukavemet özelliklerine sahip simülasyonlar gerçekleştirilmesi.

Christchurch depreminde sıvılaşma bölgesinde hasar aldığı tespit edilen 150 mm çapındaki PVC tipi boru için vaka analizi yapılmıştır. Bu çalışmanın sıvılaşma analizlerinde, FLAC3D V9.0 kodu kullanılarak sonlu farklar yöntemine dayalı tamamen doğrusal olmayan analizler uygulanmıştır. Bu seçimin ana nedeni, temel zemin dinamiği özelliklerini yakalamayı amaçlayan genel 3D geoteknik deprem mühendisliği uygulaması için ileri düzey yapısal modelleri kullanmaktır. Bu tür ileri düzey sıvılaşma yöntemlerinin kullanılması, kullanıcının tecrübesini gerektirmektedir.

Model yaklaşımı geometri oluşturulduktan sonra yer çekimi tanımlamasıyla başlangıç koşullarının oluşturulması ve dinamik yüklemenin yapılması olmuştur. Deprem kaydı bir önceki bölümde sıvılaşma analizlerinde kullanılan CCCC istasyonun alınan N64E kodlu ivme kayıdır. İvme kaydına 0.1-25 Hz. aralığı için filtreleme uygulanmıştır. P2PSand model kendi içerisinde sönümleme bulundurduğu için ilave sönümleme

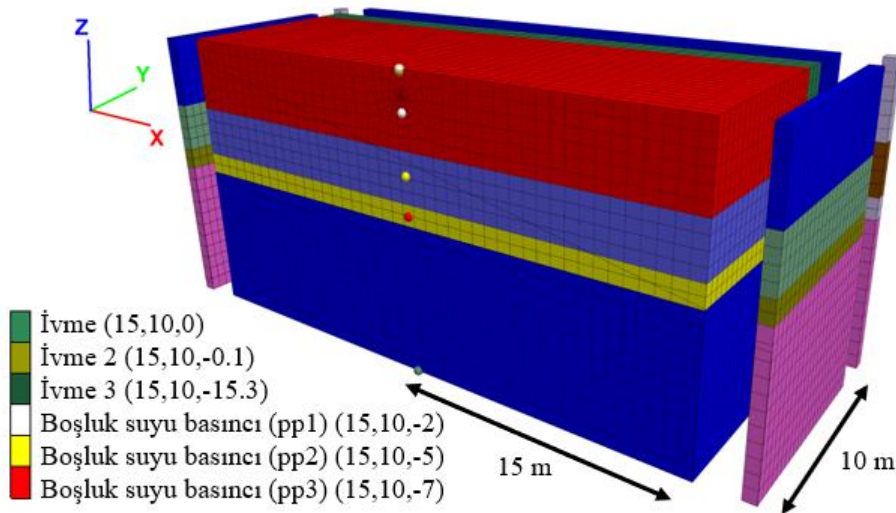
gerektirmemektedir. Yalnızca modelde kullanılan Mohr-Coulomb katmanları için histerik sönümleme ve modelde gözlemlenen yüksek frekans bozulması nedeniyle küçük miktarda Rayleigh sönümlemesi eklenmiştir. Bu sorun bu tür modellerde sıklıkla karşılaşıldığı için Rayleigh sönümlemesi kullanmak yaygın bir yöntemdir [Itasca, 2024]. Denklem (4.6) Hardin/Drnevich histerik sönümleme parametresini göstermektedir.

$$D = \frac{4}{\pi} \frac{1}{1 - M_s} \left[ 1 + \frac{M_s}{1 - M_s} \ln M_s \right] - \frac{2}{\pi} \quad (4.6)$$

$M_s$  normalleştirilmiş sekant modülüdür ve genellikle 0.2-0.35 aralığında değerler alınabilir. Model içerisinde zemin elemanı boyutları literatürde sıklıkla kullanılan denklem (4.7) ile hesaplanmıştır.

$$\Delta l = \frac{\lambda}{10} \quad (4.7)$$

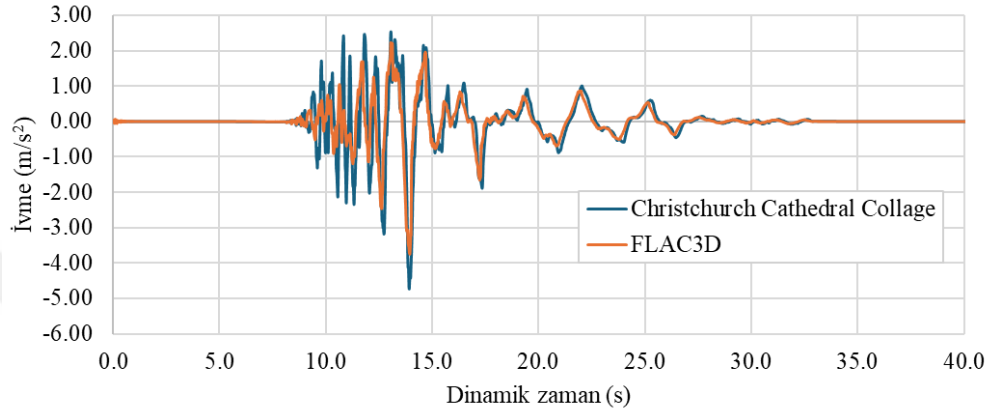
Burada  $l$  eleman boyutu  $\lambda$  ise dalga boyudur. Bir eleman boyutu 1.25 m olarak analizler uygulanmıştır. Model doğrulaması yüzeyde elde edilen ivme kaydının CCCC istasyonundan alınan Christchurch ivme kaydı ile karşılaştırılması ve yüzeyde meydana gelen oturmalarla yapılmıştır. Ayrıca dinamik yükleme sırasında değişen boşluk suyu basıncını takip edebilmek için sıvılaştıran katmanlar içerisinde analiz noktaları seçilmiştir. **Şekil 4.4**'de ivme ve boşluk suyu basıncının değişimini takip etmek için seçilen analiz noktaları yer almaktadır.



**Şekil 4.4:** İvme ve boşluk suyu basıncı için seçilen analiz noktaları.

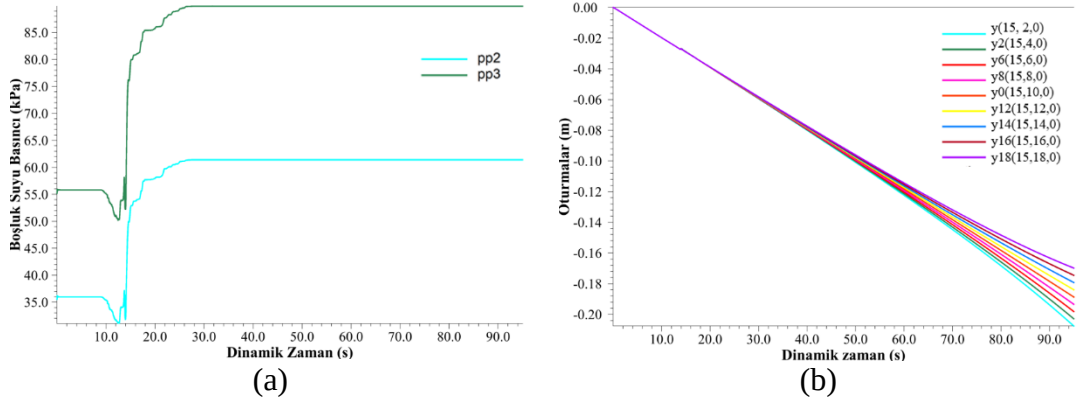
#### 4.4. Nümerik Analiz Sonuçları

Öncelikle model doğrulaması için model yüzeyinde elde edilen ivme kaydı CCCC istasyonundan alınan yüzey kaydı ile karşılaştırılmıştır. **Şekil 4.5'**de FLAC3D ile elde edilen yüzey ivme değerlerinin karşılaştırması yer almaktadır. Modelden elde edilen ivme değerleri ile gerçekte oluşan ivmeler büyük bir uyum içerisindedir.

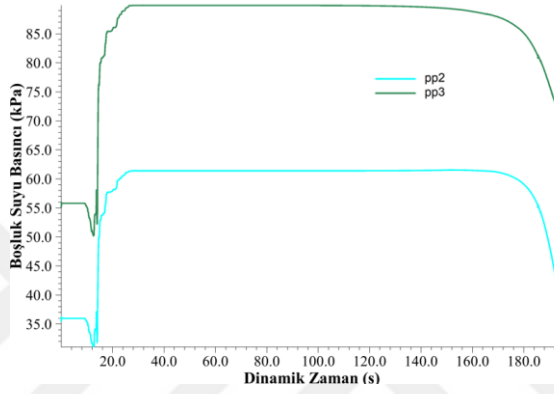


**Şekil 4.5:** İvme kayıtlarının karşılaştırılması.

Boşluk suyu basıncı değişimleri seçilen noktalar için dinamik yükleme boyunca takip edilmiştir. Dinamik yükleme bittikten sonra analiz süresi ivme değerleri sıfır olacak şekilde 95 saniyeye uzatılarak hedeflenen yüzey oturma değerlerine ulaşılmıştır. Ancak bu süre boşluk suyu basıncının dağılması için yeterli olmamıştır. Yapılan analizlerde boşluk suyu basıncının dağılması için analiz süresinin 195 saniyeye uzatılması gerekmektedir. Fakat bu durumda meydana gelen oturmalar hedeflenen oturmaların üstünde gerçekleşmiş ve modelde büyük yanılmalara neden olmuştur. O yüzden Bölüm 3'te nümerik, ampirik ve LiDAR ölçümleri ile belirlenen hedef oturma miktarı (10-20 cm) dikkate alınarak deprem kaydı 95 saniye olarak belirlenmiştir. **Şekil 4.6a'**da SM (pp2) ve SP (pp3) katmanlarında elde edilen boşluk suyu basıncı değişimi yer almaktadır. Model yüzeyinde seçilen noktalar üzerinde farklı miktarlarda oturmalar gözlemlenmiştir. **Şekil 4.6b'**de ise model yüzeyinde meydana gelen oturma miktarları yer almaktadır. Ayrıca **Şekil 4.7'**de ise yükleme süresi artırıldığında oluşan boşluk suyu basıncının değişimi yer almaktadır.

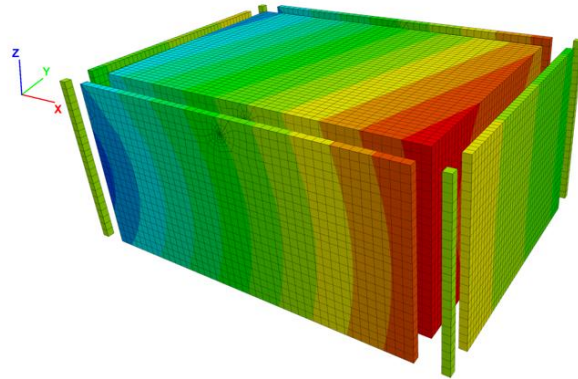
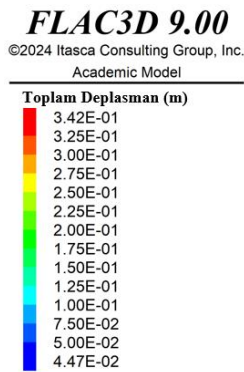


Şekil 4.6: a) Boşluk suyu basıncı değişimi (t=95 s) ve b) yüzey oturmaları.



Şekil 4.7: Boşluk suyu basıncının değişimi (t=195 s).

Dinamik sarsıntı nedeniyle meydana gelen farklı oturmalar boru hattı boyunca farklı mertebelerde oturmalar meydana gelmesine neden olmuştur. Şekil 4.8’de sismik yükleme nedeniyle meydana gelen toplam deplasmanlar yer almaktadır. PVC boru hattının tepe noktalarında yükleme nedeniyle meydana gelen normal, kesme ve kayma gerilmeleri elde edilmiştir. Tablo 4.5’te elde edilen gerilmeler yer almaktadır.



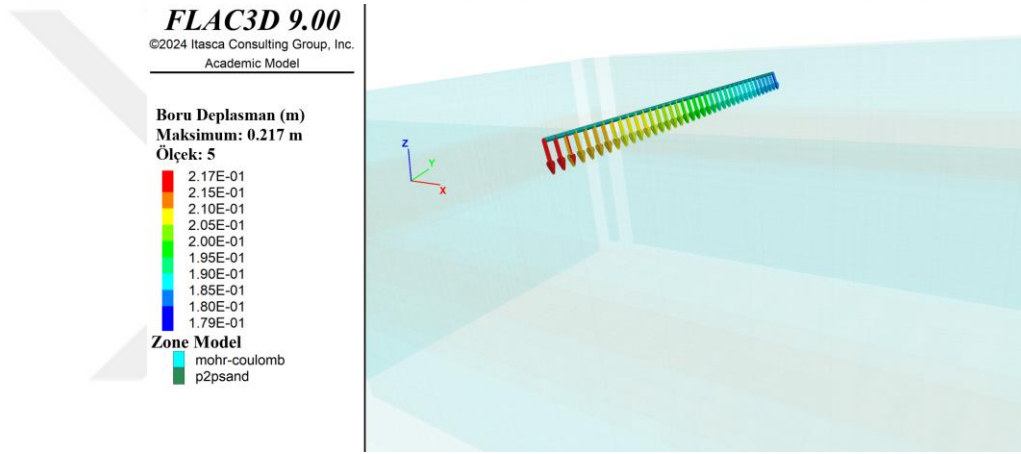
Şekil 4.8: Sismik sarsıntı nedeniyle meydana gelen toplam deplasman.

**Tablo 4.5:** PVC boru hattı üzerinde meydana gelen gerilmeler.

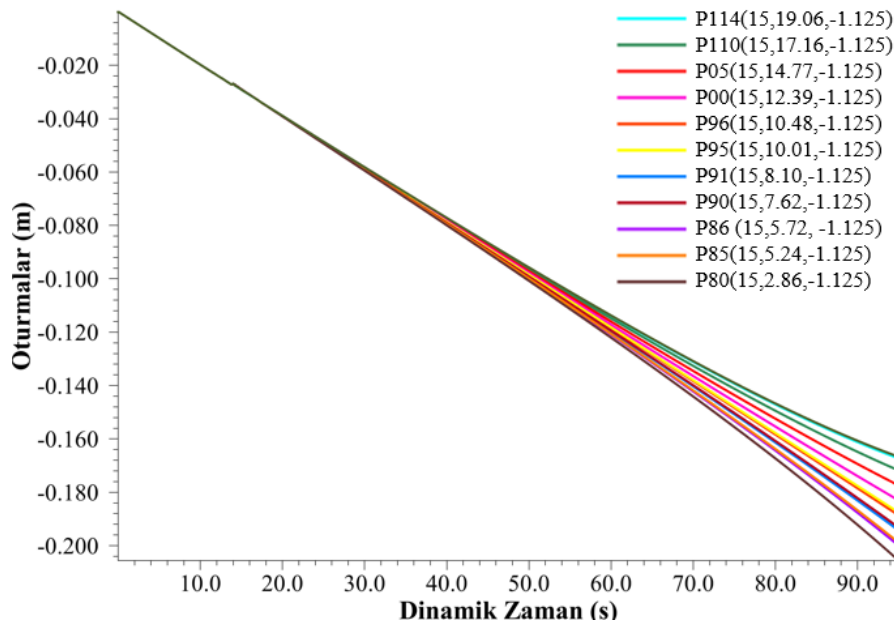
| ID   | $\sigma_{xx}$ (kPa) | $\sigma_{yy}$ (kPa) | $\sigma_{zz}$ (kPa) | $\tau_{xy}$ (kPa) | $\tau_{xz}$ (kPa) | $\tau_{yz}$ (kPa) |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| P77  | -9.69E+02           | -5.01E+02           | -1.59E+02           | -1.59E+01         | -3.93E+02         | -7.49E+00         |
| P78  | -1.04E+03           | -5.37E+02           | -1.72E+02           | -1.29E+01         | -4.23E+02         | -6.37E+00         |
| P79  | -9.83E+02           | -5.04E+02           | -1.62E+02           | -1.16E+01         | -3.99E+02         | -5.79E+00         |
| P80  | -1.03E+03           | -5.32E+02           | -1.69E+02           | -9.63E+00         | -4.18E+02         | -5.04E+00         |
| P81  | -9.53E+02           | -4.93E+02           | -1.57E+02           | -9.48E+00         | -3.86E+02         | -4.90E+00         |
| P82  | -1.00E+03           | -5.20E+02           | -1.64E+02           | -9.37E+00         | -4.05E+02         | -4.91E+00         |
| P83  | -9.37E+02           | -4.91E+02           | -1.54E+02           | -9.31E+00         | -3.80E+02         | -4.83E+00         |
| P84  | -9.98E+02           | -5.27E+02           | -1.64E+02           | -1.10E+01         | -4.05E+02         | -5.59E+00         |
| P85  | -9.53E+02           | -5.09E+02           | -1.57E+02           | -1.20E+01         | -3.86E+02         | -5.95E+00         |
| P86  | -1.01E+03           | -5.43E+02           | -1.66E+02           | -1.54E+01         | -4.10E+02         | -7.41E+00         |
| P87  | -9.60E+02           | -5.17E+02           | -1.58E+02           | -1.28E+01         | -3.89E+02         | -6.31E+00         |
| P88  | -9.99E+02           | -5.37E+02           | -1.64E+02           | -1.35E+01         | -4.05E+02         | -6.64E+00         |
| P89  | -9.37E+02           | -4.99E+02           | -1.54E+02           | -6.38E+00         | -3.80E+02         | -3.67E+00         |
| P90  | -9.69E+02           | -5.11E+02           | -1.59E+02           | -6.84E+00         | -3.93E+02         | -3.88E+00         |
| P91  | -9.21E+02           | -4.77E+02           | -1.51E+02           | -2.05E+00         | -3.73E+02         | -1.87E+00         |
| P92  | -9.71E+02           | -5.02E+02           | -1.59E+02           | -6.14E+00         | -3.93E+02         | -3.57E+00         |
| P93  | -9.45E+02           | -4.85E+02           | -1.55E+02           | -7.27E+00         | -3.83E+02         | -3.99E+00         |
| P94  | -1.01E+03           | -5.20E+02           | -1.65E+02           | -1.23E+01         | -4.08E+02         | -6.11E+00         |
| P95  | -9.62E+02           | -4.96E+02           | -1.58E+02           | -1.30E+01         | -3.89E+02         | -6.32E+00         |
| P96  | -9.95E+02           | -5.16E+02           | -1.63E+02           | -1.50E+01         | -4.03E+02         | -7.18E+00         |
| P97  | -9.29E+02           | -4.85E+02           | -1.52E+02           | -1.31E+01         | -3.76E+02         | -6.35E+00         |
| P98  | -9.61E+02           | -5.07E+02           | -1.58E+02           | -1.58E+01         | -3.89E+02         | -7.48E+00         |
| P99  | -9.27E+02           | -4.90E+02           | -1.52E+02           | -1.59E+01         | -3.76E+02         | -7.51E+00         |
| P100 | -9.76E+02           | -5.14E+02           | -1.60E+02           | -2.31E+01         | -3.95E+02         | -1.05E+01         |
| P101 | -9.59E+02           | -4.97E+02           | -1.57E+02           | -2.41E+01         | -3.88E+02         | -1.08E+01         |
| P102 | -1.00E+03           | -5.15E+02           | -1.65E+02           | -2.97E+01         | -4.06E+02         | -1.32E+01         |
| P103 | -9.72E+02           | -4.93E+02           | -1.60E+02           | -2.49E+01         | -3.94E+02         | -1.12E+01         |
| P104 | -1.01E+03           | -5.15E+02           | -1.67E+02           | -2.42E+01         | -4.11E+02         | -1.09E+01         |
| P105 | -9.77E+02           | -4.96E+02           | -1.60E+02           | -1.61E+01         | -3.96E+02         | -7.59E+00         |
| P106 | -1.02E+03           | -5.20E+02           | -1.67E+02           | -1.69E+01         | -4.13E+02         | -7.97E+00         |
| P107 | -9.63E+02           | -4.90E+02           | -1.58E+02           | -1.49E+01         | -3.90E+02         | -7.09E+00         |
| P108 | -9.85E+02           | -5.00E+02           | -1.62E+02           | -2.07E+01         | -3.99E+02         | -9.48E+00         |
| P109 | -9.17E+02           | -4.60E+02           | -1.51E+02           | -1.99E+01         | -3.72E+02         | -9.06E+00         |
| P110 | -9.37E+02           | -4.72E+02           | -1.54E+02           | -2.30E+01         | -3.80E+02         | -1.03E+01         |
| P111 | -8.93E+02           | -4.51E+02           | -1.47E+02           | -1.77E+01         | -3.62E+02         | -8.16E+00         |
| P112 | -9.37E+02           | -4.77E+02           | -1.54E+02           | -1.83E+01         | -3.80E+02         | -8.44E+00         |
| P113 | -9.12E+02           | -4.65E+02           | -1.50E+02           | -1.32E+01         | -3.70E+02         | -6.35E+00         |
| P114 | -9.60E+02           | -4.91E+02           | -1.58E+02           | -1.56E+01         | -3.89E+02         | -7.37E+00         |

Boşluk suyu basıncının değişimi takip edilerek hesaplanan  $R_u$  parametresi kullanılarak sıvılaştan katmanlar tespit edilmiştir. Bölüm 3'te UBC3D ve PM4Sand davranış

modelleriyle sıvılaştığı tespit edilen SM-1 ve SP katmanlarının FLAC3D ile yapılan sismik yükleme ile de sıvılaştığı gözlenmiştir. Fakat sismik yükleme devam ettirilip katmanın tamamen sıvılaşma davranışı göstermesi büyük oranlarda gerçekçi olmayan yanal yayılmalar göstermesinde neden olmaktadır. Bu yüzden model kalibrasyonu için kullanılan ivme ve oturma değerleri sağlandığında analiz durdurulmuştur (t=95 s). Burada yer alan sonuçlar model doğrulması yapıp elde edilen deformasyon ve hasar bilgileridir. **Şekil 4.9** boru hattında meydana gelen toplam deplasmanları göstermektedir. Maksimum deplasman 21.7 cm gerçekleşirken minimum 17.9 cm hareket belirlenmiştir. Bu iki değer boruların uç noktalarında gerçekleşmiştir. **Şekil 4.10** boru üzerinde oluşan düşey deplasmanları göstermektedir.



**Şekil 4.9:** Boru hattı deplasmanının dağılımı.



**Şekil 4.10:** Farklı noktalarda oluşan boru hattı deplasmanları.

PVC borunun üzerinde bulunan analiz noktaları ile meydana gelen hareketler belirlenerek şekil değiştirme miktarları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar hasar ilişkilerinden elde edilen eksenel şekil değiştirmeler ile Bölüm 5'te deneysel yollarla elde edilen şekil değiştirmeler ile karşılaştırmada kullanılmıştır. Boru doğrultusunda gerçekleşen eksenel şekil değiştirme denklem (4.8) ile hesaplanabilir. Ayrıca boru doğrultusundaki açısal bozulma ( $\beta_{vd}$ , **Şekil 2.2d**) değerleri düşey deplasmanlar ile elde edilmiştir.

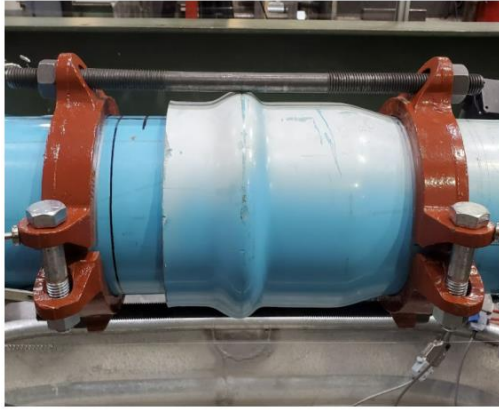
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.8)$$

Burada  $L_0$  başlangıç uzunluğu,  $\Delta L$  boydaki değişimi göstermektedir. Boru üzerinde bulunan analiz noktaları kullanılarak eksenel şekil değiştirmeler hesaplanmıştır. Düşey açısal bozulma değerini 18 m'lik boru uzunluğu dikkate alınarak hesaplandığında  $2.7 (x10^{-3})$  olarak bulunmaktadır. Boru hattının 0,47 m'lik bir kısmı için iki analiz noktasının y yönü (boru doğrultusu) deplasmanları dikkate alındığında 1.91 cm eksenel yönde deplasmana maruz kaldığı görülmektedir. Ancak boru hattının model içerisinde rijit bir bağlantısı olmadığı için eksenel şekil değiştirme miktarı %0.0027 olarak hesaplanmıştır. Bu analizde deprem yönünün boru doğrultusuna dik olduğu unutulmamalıdır. Sismik etkiler altında boru hattı farklı yönlerden aynı anda sismik yüklere maruz kalmaktadır. Burada elde edilen bulgular Sonuçlar bölümünde karşılaştırmalı olarak ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.

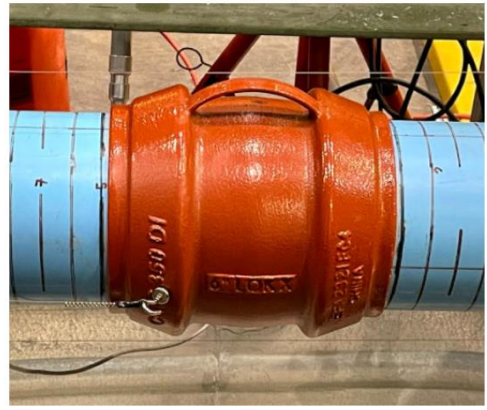
## 5. YENİ NESİL PVC BORU BİRLEŞİMİ İÇİN EKSENEL YÜKLEME DENEYLERİ

Sıvılaşma gibi şekil değiştirmelerin olduğu durumlarda boru birleşim/bağlantı bölgeleri borunun servisini sürdürebilmesi açısından önem kazanmaktadır. Bu nedenle boru bağlantıları için birçok bağlantı elemanı kullanılmaktadır. **Şekil 5.1**'de boru bağlantı elemanı olarak kullanılan tipik sistemler yer almaktadır.

Tez kapsamında PVC boruların eksenel davranışını incelemek için bir dizi çekme ve tekrarlı yükleme deneyi uygulanmıştır. Boru numuneleri Amerika Birleşik Devletleri merkezli Northern ve VinylTech şirketleri tarafından üretilen C900 polivinil klorür (PVC) borulardan oluşmaktadır. İncelenen boru bağlantıları tüm PVC borular için RieberLok marka contalı muflu bağlantıya sahip birleşimlerdir. Northern ve VinylTech tarafından üretilen PVC borular aynı nominal çapa (150 mm) ve et kalınlığına (9.80 mm) sahiptirler. **Şekil 5.2** Northern ve VinylTech borular için bağlantı bölgelerini göstermektedir. RieberLok conta beş grup şeklinde toplam on beş dişe sahiptir.

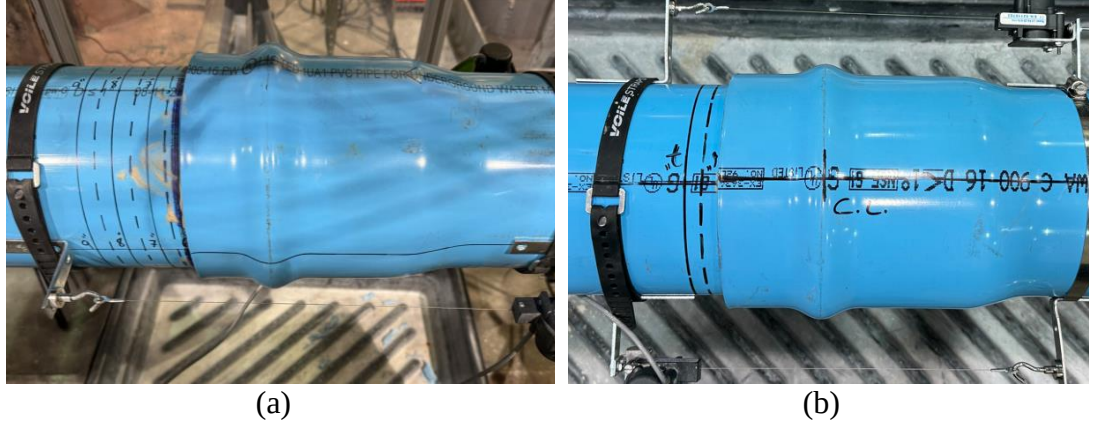


(a)



(b)

**Şekil 5.1:** a) Tipik EBBA 1900 ve b) Lokx tipi bağlantı elemanı [Berty vd., 2022].



**Şekil 5.2:** a) Northern ve b) VinylTech için tipik bir muflu bağlantılar.

Burada test edilen tüm numuneler 150 mm (6 inç) çapında, 235 basınç sınıfında (DR18), piyasada bulunabilen C900 (PVC) standartlarına uygun borulardır. **Tablo 5.1**, eksenel test (Çekme ve tekrarlı yükleme testleri) numunelerine ve gerçekleştirilen deneylere genel bir bakış sunmaktadır. Test numarası, test türüne ve laboratuvarında gerçekleştirilen tüm testlerin sırasına bağlı olarak sayısal bir değer ile temsil edilmektedir. Kullanılan çerçeve sistemi, testlerde kullanılan test çerçevesini, hedef iç basınç, her bir testin gerçekleştirildiği yaklaşık iç su basıncını göstermektedir.

**Tablo 5.1:** Uygulanan testler ve özellikleri.

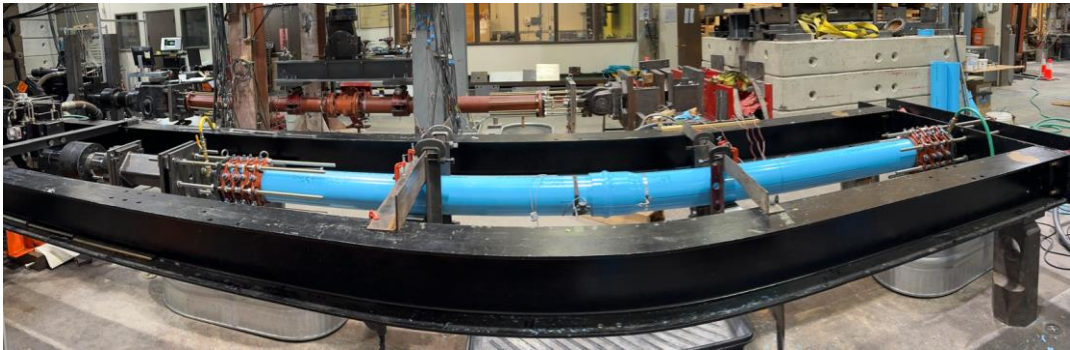
| Test No | Test Tipi        | Üretici     | Hedef iç basınç (psi) [kPa] | Kullanılan Çerçeve Sistem |
|---------|------------------|-------------|-----------------------------|---------------------------|
| PT44    | Eksenel Çekme    | (VinylTech) | 65 [448]                    | 1                         |
| PT45    | Eksenel Çekme    | (VinylTech) | 65 [448]                    | 1                         |
| PT46    | Eksenel Çekme    | (VinylTech) | 65 [448]                    | 1                         |
| PS47    | Tekrarlı Yükleme | (VinylTech) | 65 [448]                    | 1                         |
| PS48    | Tekrarlı Yükleme | (VinylTech) | 65 [448]                    | 1                         |
| PS49    | Tekrarlı Yükleme | (VinylTech) | 65 [448]                    | 1                         |
| PT50    | Eksenel Çekme    | (Northern)  | 65 [448]                    | 2                         |
| PT51    | Eksenel Çekme    | (Northern)  | 65 [448]                    | 2                         |
| PT52    | Eksenel Çekme    | (Northern)  | 65 [448]                    | 2                         |
| PS53    | Tekrarlı Yükleme | (Northern)  | 65 [448]                    | 2                         |
| PS54    | Tekrarlı Yükleme | (Northern)  | 65 [448]                    | 2                         |
| PS55    | Tekrarlı Yükleme | (Northern)  | 65 [448]                    | 2                         |

## 5.1. Eksenel Testler

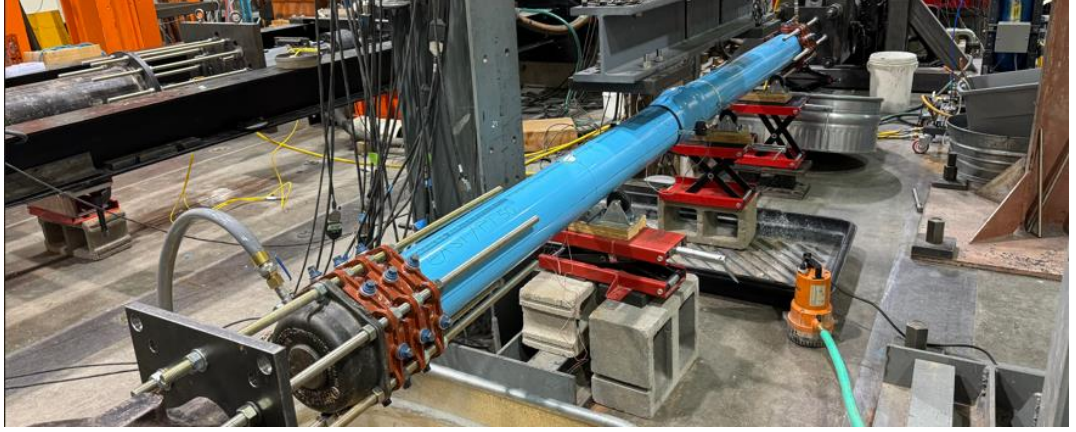
Bu bölümde, su dağıtım boru hatlarına eksenel yük uygulanmasıyla ilgili test kurulum prosedürüne ve temel deneysel kısıtlamalara ayrıntılı bir genel bakış sunulmaktadır. Burada testlerin amacı boru hattı sistemi kapasitesini karakterize etmek için sistemi deprem kaynaklı yer hareketleri sırasında oluşabilecek önemli deformasyonları temsil eden harici yükleme koşullarına maruz bırakmaktır. Tüm testler **Wham vd., [2018, 2019]** tarafından sağlanan prosedür ve tavsiyelere uygun olarak tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir ve kurulumla ilgili ek ayrıntılar **Ihnotic [2019]** tarafından sağlanmıştır.

### 5.1.1. Eksenel Testlerin Kurulumu

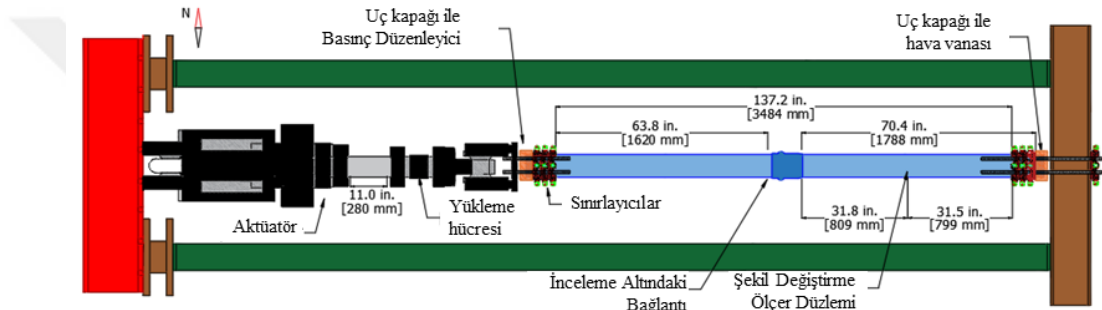
Bu bölümde belirli bir boru numunesinin eksenel yüklenmesi için test kurulum prosedürü özetlenmektedir. **Şekil 5.3** ve **Şekil 5.4**, iki farklı test çerçevesi (çerçeve 1 ve çerçeve 2) için eksenel test kurulumunun ve ekipmanının görüntülerini göstermektedir. Çerçeve 1, 490 kN (110 kips) yük hücreğine ve 245 mm (10 inç) yer değiştirme kapasitesine sahip 244.41 MTS aktüatör ile donatılmıştır. Çerçeve 2, 980 kN (220 kips) yük hücreğine ve 260 mm (12 inç) yer değiştirme kapasitesine sahip 244.51 MTS aktüatör ile donatılmıştır. **Şekil 5.5** ve **Şekil 5.6** sırasıyla çerçeve 1 ve çerçeve 2'nin boyutlandırılmış çizimlerini göstermektedir.



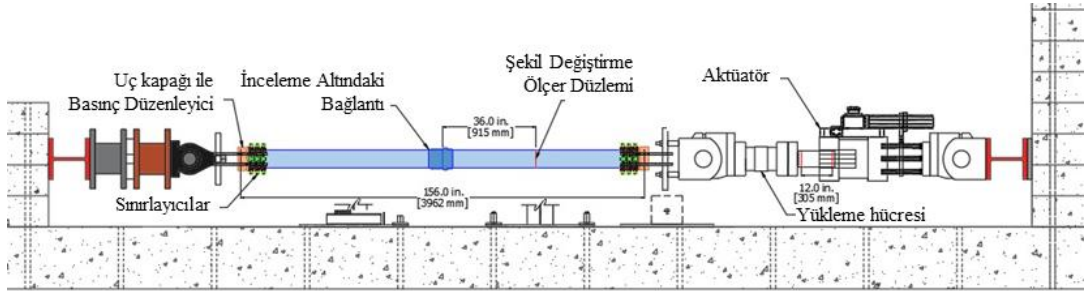
**Şekil 5.3:** Yükleme çerçevesi 1'deki eksenel test düzeneği.



Şekil 5.4: Yükleme çerçevesi 2'deki eksenel test düzeneği.



Şekil 5.5: Çerçeve 1 için eksenel test düzeneğinin boyutlandırılmış çizimi.

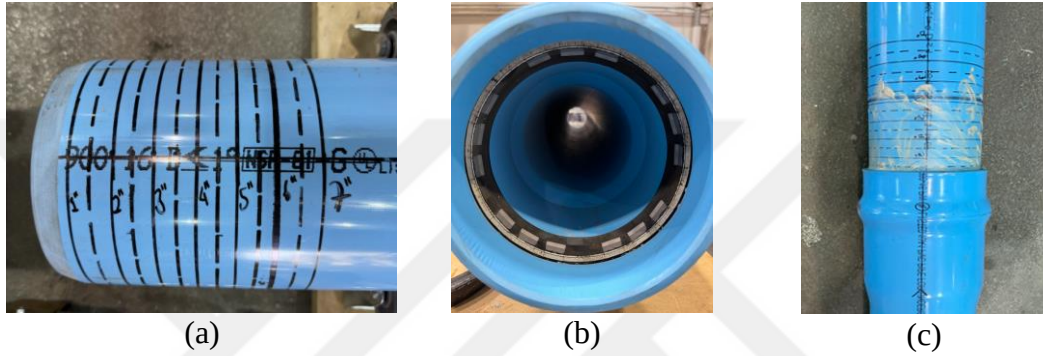


Şekil 5.6: Çerçeve 2 için eksenel test düzeneğinin boyutlandırılmış çizimi.

### 5.1.2. Boru Numunesi Kurulum Prosedürü

Boru numuneleri, sırasıyla iki adet 1980 mm'lik (78 inç) uzunlukta parçadan oluşan çekme testi ve iki adet 2130 mm (84 inç) parçadan oluşan tekrarlı test için yaklaşık 3.96 m (13 ft) ve 4.26 m (14 ft) uzunlukta hazırlanır. Boru uzunlukları yükleme yönüne (çekme veya tekrarlı) ve incelenen bağlantıya bağlı olarak değişmektedir. Boru

standart saha montaj uygulamaları kullanılarak kesilir. Boru üzerindeki hareketleri tespit etmek için oluşturulan işaretlemeler, **Şekil 5.7a**'da gösterildiği gibi boru bağlantılarında (bağlantı düz ucu boyunca) 13 mm (0.5 inç) artışlarla sağlanmıştır. Borunun tepe, alt ve yay çizgilerini (yanlar) belirlemek için gerekli ölçüm aletleri kullanılır. Şekil değiştirme ölçer düzlemi, numune merkez hattının doğu tarafından (bağlantının genişletilmiş tarafı) 910 mm (36 inç) uzaklıkta işaretlenmiştir. RieberLok conta **Şekil 5.7b**'de gösterildiği gibi monte edilmiştir. **Şekil 5.7c**'de bağlantı sağlanmadan önceki durumu gösterilmektedir.



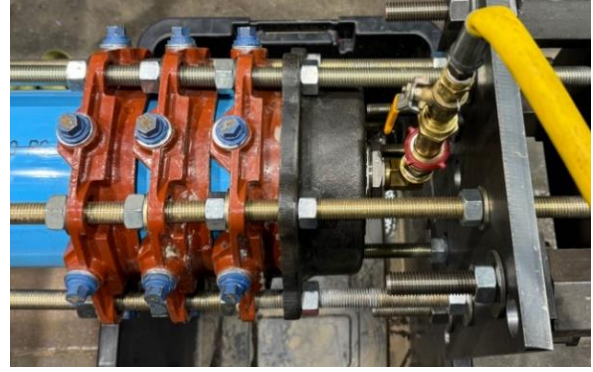
**Şekil 5.7:** a) Borunun düz ucu üzerinde işaretlemeler b) RieberLok contanın montajı c) birleşimden önceki görünüş.

Çekme ve tekrarlı testler için harici olarak uygulanan eksenel yükü aktarmak üzere numunenin her iki ucunda sırasıyla üç ve dört adet 2006PV Megalug marka dış sınırlayıcı kullanılmıştır. **Şekil 5.8** numunelerin yükleme ucuna (batı) ve sabit ucuna (doğu) yerleştirilen sınırlayıcıları göstermektedir. Yük çerçevesine sabitlenen doğu tarafı, numunenin tepesinde bulunan dişli bir çubukla konumlandırılır ve batı tarafı (aktüatör veya yükleme tarafı) tepede bulunan kısıtlama somunları ile hizalanır. İki kısa dişli çubuk, kalan iki tutucuyu ilkiyle temas edecek şekilde çekmek için kullanılır.

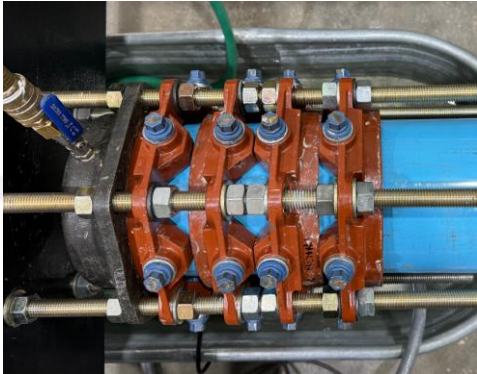
Her bir sınırlayıcıdaki somunlar 27.11 Nm'ye ayarlanmış bir tork anahtarı kullanılarak sıkılır. Somunlar yıldız şeklinde 27.11 Nm adımlarla 81.3 Nm'ye sıkılır. İşlem tüm sınırlayıcılar boruya sabitlenene kadar tekrarlanır. Megalug marka sınırlayıcı, tipik saha kurulumu için kendinden torklu, döndürülerek kapatılan sıkıştırma somunları ile donatılmış olsa da önceki deneyimler, kademeli olarak artan tork anahtarı yükünün eşit çevresel temas sağlayan ve numunenin uçlarında hasarı önleyen eşit dağılımlı bir sıkıştırma kuvveti sağladığını göstermektedir.



a) Çekme testi için sabit uç (doğu)



b) Çekme testi için yükleme ucu (batı)



c) Tekrarlı test için sabit uç (doğu)



d) Tekrarlı test için yükleme ucu (batı)

**Şekil 5.8:** Çekme ve tekrarlı testler için doğu (a ve c) ve batı (b ve d) uçlarında yükleme çerçevesine boru bağlantıları.

Şekil değiştirme ölçerler, şekil değiştirme ölçer uygulama prosedürleri izlenerek belirlenen yerlere monte edilmiştir. Ek ayrıntılar aşağıdaki bölümde yer almaktadır. Numune test çerçevesine yerleştirilir, doğu ve batı bağlantıları, aktüatör tam uzatılmış konumdayken (çekme testi) veya ortalanmış konumdayken (tekrarlı test) uygun şekilde hizalanır.

Uç kapak contalarına ve uç kapakların iç çapına yağlama (conta için gerekli) uygulanır, conta en dıştaki uç tutucuya yerleştirilir ve uç kapaklar dişli çubuklarla yerine sıkılır (**Şekil 5.8**). Batı uç kapağında basınçlandırma ekipmanı ve su girişi bulunurken, doğu uç kapağında borunun doldurulması sırasında havayı tahliye etmek için tepede bir tahliye vanası bulunmaktadır. Batı uç kapağındaki su girişi hortumu ve doğu uç kapağındaki hava tahliye vanası dikey olarak konumlandırılmıştır. Doğru ucunda, boruyu çerçeveye sabitlemek için altı adet 900 mm (36 inç) uzunluğunda, 19 mm (0.75 inç) çapında yüksek mukavemetli (827 MPa) dişli çubuk monte edilir. Daha sonra boruyu test çerçevesine sabitlemek için her iki uca somunlar ve pullar uygulanır. Batı ucunda da benzer bir prosedür izlenir.

### 5.1.3. Test Aparatları

Boru bağlantısı eksenel yer değiştirmelerini ölçmek için boru bağlantısında numuneye iki adet potansiyometre (String Pot) takılmıştır. Test sırasında iç su basıncını ölçmek için batı ucuna bir elektronik basınç transdüseri (PPT) takılmıştır. İki adet x-y çiftli şekil değiştirme ölçer, şekil değiştirme ölçer düzleminde numunenin dış tarafına sabitlenmiştir. Düzlem konumu yaklaşık olarak boru bağlantısının merkezi ile uç sınırlayıcılar arasında orta noktada konumlandırılmıştır. Şekil değiştirme ölçerler genişletilmiş uca sahip tarafta boru hattının tepe ve alt noktasına yerleştirilmiştir. SG+36 şekil değiştirme ölçüm düzlemi, numune merkez hattının 915 mm (36 inç) doğusunda konumlandırılmış olup eksenel ve çevresel yönde yönlendirilmiş iki x-y ölçüm cihazı içermektedir.

## 5.2. Eksenel Test Prosedürleri

### 5.2.1. Test Öncesi

Numune yükleme çerçevesine sabitlendikten ve kalibre edilmiş enstrümantasyon kurulduktan sonra, ölçüm sistemleri doğrulaması yapılır. Boru hava tahliyesi açık konumdayken su ile doldurulur. Hava tahliye vanası, yalnızca su geldikten sonra kapatılır ve sızıntı olup olmadığını kontrol etmek için sistem yaklaşık 448 kPa (65 psi) laboratuvar basıncına kadar basınçlandırılır. Ortamdaki laboratuvar koşullarına termal alışmayı sağlamak için numuneye testten beş saatten daha uzun bir süre önce su verilir. Contaları oturtmak, şekil değiştirme ölçerlerin okumalarını doğrulamak ve yük hücresi tarafından ölçülen eksenel kuvveti kontrol etmek için en az üç kez basınçlandırma dizisi uygulanır. Her bir döngüde biriken havayı tahliye etmek için hava tahliye vanası açılır. Basınçlandırma sekansından önce, yükleme çerçevesi ile uç kapaklar arasındaki somunlar sıkılır, böylece boru basınçlandırıldığında eksenel basınçlandırma kuvveti yük hücresi tarafından ölçülebilir. Basınçlandırma dizileri sırasında boru yaklaşık 448 kPa'a kadar basınçlandırılır ve birkaç kez 0'a geri indirilir. Her diziden sonra, tüm ölçüm sistemlerinin düzgün çalıştığından emin olmak için her testten önce veriler toplanmış, depolanmış ve analiz edilmiştir. Test çerçevesini çevreleyen alan tüm aletlerden ve diğer nesnelerden temizlenmiştir. Test için hazır olduğunda, kurulum koşullarını gözden geçirmek, enstrümantasyon konumlarını ve beklentileri gözden

geçirmek ve güvenlik ekipmanlarını ve endişelerini tartışmak için bir ön test toplantısı yapılır.

### 5.2.2. Çekme Testi

Ön test toplantısı yapıldıktan ve görevlendirmeler atandıktan sonra, veri toplama sistemi ve laboratuvar hidrolik sistemleri çalıştırılarak test dizisi başlatılır. Rapor edilen tüm testler için 4 Hz'lik bir veri örnekleme hızı kullanılmıştır. Numunenin her iki ucundaki yükleme somunları, basınçlandırma nedeniyle herhangi bir uç hareketini önlemek için kontrol edilir. Teste bağlı olarak uygun su basıncı uygulanır. Çekme testleri dakikada 25.4 mm'lik bir hızda aktüatör deplasman kontrolü altında gerçekleştirilmiştir. Yükleme numune artık dahili su basıncını tutamayacak hale gelene kadar veya aktüatörün maksimum kapasitesine ulaşana kadar uygulanmıştır. Test tamamlandıktan sonra veri toplama sistemi kapatılır, laboratuvar hidrolik sistemleri düşük basınca ayarlanır ve veriler yedeklenir.

### 5.2.3. Tekrarlı Yükleme Testi

Her bir tekrarlı test için, boru numunesine artan miktarlarda yer değiştirme ile bir dizi çekme ve basınç yükü uygulanmıştır. Tekrarlı yükleme, yapısal ve yapısal olmayan bina bileşenleri için sismik yükleme protokollerini içeren FEMA461 yönergelerine göre uygulanmıştır [Applied Technology Council (ATC), 2007]. Tüm eksenel tekrarlı testler için iki farklı yükleme protokolü uygulanmıştır. **Tablo 5.2a** PS47'de kullanılan ilk tekrarlı yükleme protokolünü göstermektedir. **Tablo 5.2b** diğer beş tekrarlı testte kullanılan ikinci tekrarlı yükleme protokolünü göstermektedir. Her döngü çekme yönünde bir yükleme ile başlamıştır. Gösterilen deplasmanlar, testin başında belirlenen sıfır noktasından ölçülmüştür. Tekrarlı yüklemeden sonra, numune hasar alana kadar çekme ile yüklenmiştir. PS54 hariç tüm yüklemeler dakikada 25.4 mm (1 inç) yer değiştirme hızında uygulanmıştır. PS54 için yükler dakikada 228 mm (9 inç) yer değiştirme hızında uygulanmıştır.

**Tablo 5.2:** a) Yükleme protokolü 1(LP-1) ve b) yükleme protokolü 2 (LP-2).

(a)

| Adım | İnç                | mm        | Tekrarlar |
|------|--------------------|-----------|-----------|
| 1    | 0.0192             | 0.48768   | 2 Tekrar  |
| 2    | -0.0192            | -0.48768  |           |
| 3    | 0.0269             | 0.68326   | 2 Tekrar  |
| 4    | -0.0269            | -0.68326  |           |
| 5    | 0.0376             | 0.95504   | 2 Tekrar  |
| 6    | -0.0376            | -0.95504  |           |
| 7    | 0.0527             | 1.33858   | 2 Tekrar  |
| 8    | -0.0527            | -1.33858  |           |
| 9    | 0.0738             | 1.87452   | 2 Tekrar  |
| 10   | -0.0738            | -1.87452  |           |
| 11   | 0.1033             | 2.62382   | 2 Tekrar  |
| 12   | -0.1033            | -2.62382  |           |
| 13   | 0.1446             | 3.67284   | 2 Tekrar  |
| 14   | -0.1446            | -3.67284  |           |
| 15   | 0.2024             | 5.14096   | 2 Tekrar  |
| 16   | -0.2024            | -5.14096  |           |
| 17   | 0.2834             | 7.19836   | 2 Tekrar  |
| 18   | -0.2834            | -7.19836  |           |
| 19   | 0.3967             | 10.07618  | 2 Tekrar  |
| 20   | -0.3967            | -10.07618 |           |
| 21   | Hasara Kadar Çekme |           |           |

(b)

| Adım | İnç                | mm        | Tekrarlar |
|------|--------------------|-----------|-----------|
| 1    | 0.0403             | 1.02362   | 2 Tekrar  |
| 2    | -0.0403            | -1.02362  |           |
| 3    | 0.0564             | 1.43256   | 2 Tekrar  |
| 4    | -0.0564            | -1.43256  |           |
| 5    | 0.079              | 2.0066    | 2 Tekrar  |
| 6    | -0.079             | -2.0066   |           |
| 7    | 0.1106             | 2.80924   | 2 Tekrar  |
| 8    | -0.1106            | -2.80924  |           |
| 9    | 0.1549             | 3.93446   | 2 Tekrar  |
| 10   | -0.1549            | -3.93446  |           |
| 11   | 0.2169             | 5.50926   | 2 Tekrar  |
| 12   | -0.2169            | -5.50926  |           |
| 13   | 0.3036             | 7.71144   | 2 Tekrar  |
| 14   | -0.3036            | -7.71144  |           |
| 15   | 0.425              | 10.795    | 2 Tekrar  |
| 16   | -0.425             | -10.795   |           |
| 17   | 0.595              | 15.113    | 2 Tekrar  |
| 18   | -0.595             | -15.113   |           |
| 19   | 0.8331             | 21.16074  | 2 Tekrar  |
| 20   | -0.8331            | -21.16074 |           |
| 21   | Hasara Kadar Çekme |           |           |

Testten önce test esnasında önceden belirlenmiş birkaç kesinti durumu tanımlanmıştır. Test sırasında numune su basıncını kaybederse test durdurulur. Uç kapaklarda istenmeyen sızıntı meydana gelirse, bunlar sıkılır ve teste devam edilir. Numunenin merkezinde herhangi bir sızıntı gözlenirse (servis edilebilirlik sınır durumuna göre), test kısa bir süre duraklatılır, sızıntı oranı değerlendirilir ve test nihai hasara kadar devam ettirilir. Test sırasında herhangi bir temel cihaz hasar alırsa veya test laboratuvarının herhangi bir yerinde güç kesilirse test durdurulur. Test numune iç su basıncını tutamadığında sonlandırılır. Bu durum tipik olarak boru hattının veya bağlantısının yapısal hasarının bir sonucu olarak ortaya çıkar.

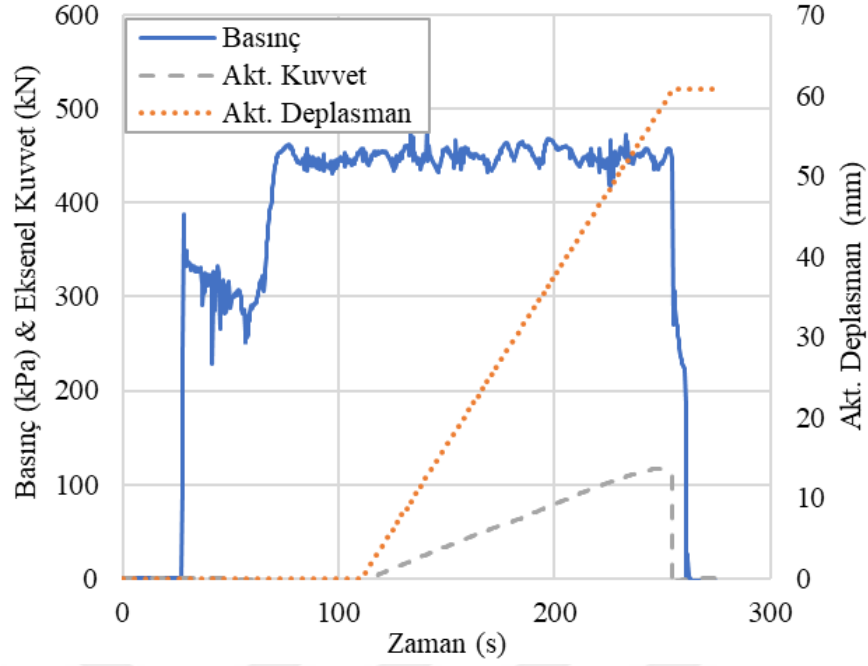
### 5.3. Eksenel Çekme Testleri

Bu bölümde borunun genişletilmiş ucunda RieberLok conta ile Northern ve VinylTech tarafından üretilen PVC borular üzerinde gerçekleştirilen eksenel çekme testlerinden elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Aşağıdaki bölümlerde toplam altı eksenel çekme testi sunulmuştur. Tüm testler için aktüatör deplasmanı dakikada 25.4 mm hızında uygulanmıştır. Tüm eksenel çekme testleri için ortak prosedür ve aynı conta kullanılmıştır.

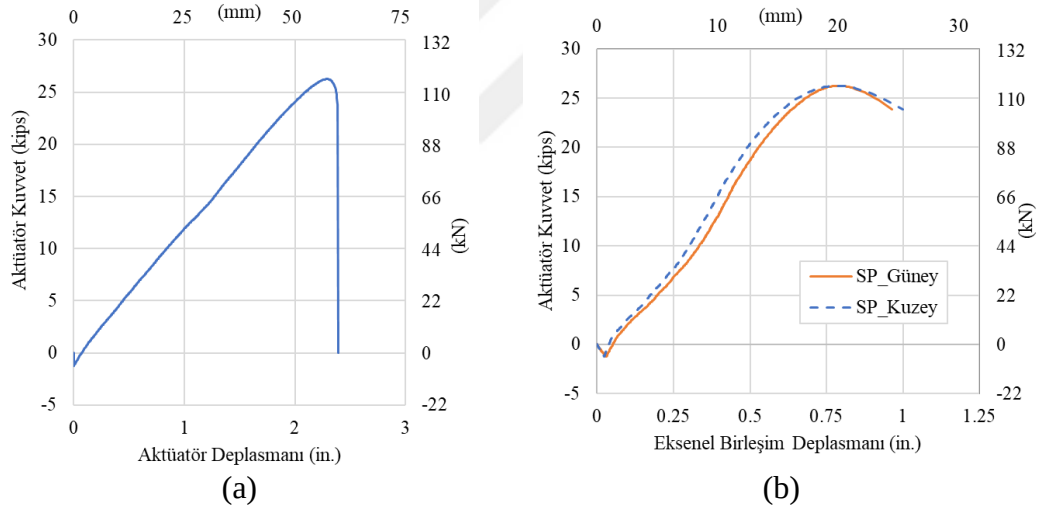
### 5.3.1. Çekme Testi (PT44)

VinylTech tarafından üretilen PVC boru üzerinde ilk çekme testi PT44 olmuştur. **Şekil 5.9** PT44 testi sırasında zamana bağlı olarak aktüatör kuvvetini, uygulanan yer değiştirmeyi ve iç basıncı göstermektedir. **Şekil 5.9**'deki düz (mavi) çizgi ile gösterildiği gibi, su basıncı yükleme süresince 448 kPa (68 psi) değerinde nispeten sabit tutulmuştur. Basıncıdaki hafif dalgalanmalar, uygulanan çekme yüklemesi sırasında artan iç hacmin bir fonksiyonudur. **Şekil 5.10a** aktüatör kuvveti ile aktüatör yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Aktüatör kuvvetleri ve yer değiştirmeleri sırasıyla hidrolik yük hücresi ve pistonun doğrudan ölçümleridir. Aktüatörün yük hücresinde kaydedilen maksimum kuvvet 116.8 kN (26.3 kips) ve uygulanan maksimum yer değiştirme 60.70 mm (2.39 inç) olmuştur. **Şekil 5.10b** aktüatör kuvveti ile boru bağlantısı eksenel deplasmanını göstermektedir. Maksimum uygulanan kuvvette, boru bağlantısı ortalama 20.06 mm (0.79 inç) yer değiştirmeye ulaşırken, hasardan önceki maksimum boru bağlantısı deplasmanı yaklaşık 25.4 mm (1 inç) olmuştur.

Boru bağlantısı yer değiştirmesi birleşimin her iki ucundaki boru bağlantısından 75 mm (3 inç) uzakta bulunan iki deplasman ölçüm potansiyometresi (SP\_Kuzey ve SP\_Güney) kullanılarak ölçülmüştür. Sunulan boru bağlantısı yer değiştirmesi, boru bağlantısının her iki tarafında boru bağlantısının uzamasını da içermektedir. Bu testlerde birleşimdeki yer değiştirmeye kıyasla bu uzama pratikte ihmal edilebilir düzeydedir.



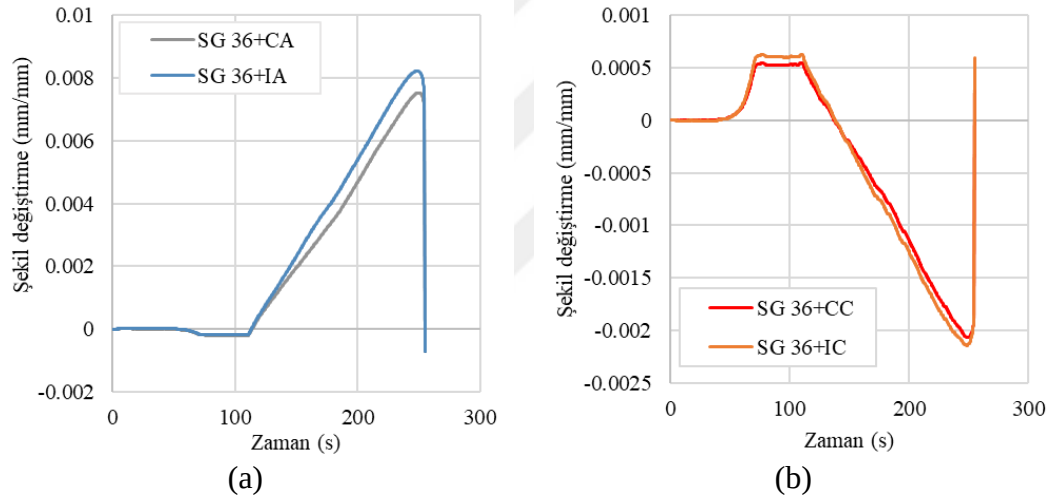
**Şekil 5.9:** Zamana karşı iç basınç, aktüatör yer değiştirmesi ve eksenel kuvvet için PT44 sonuçları.



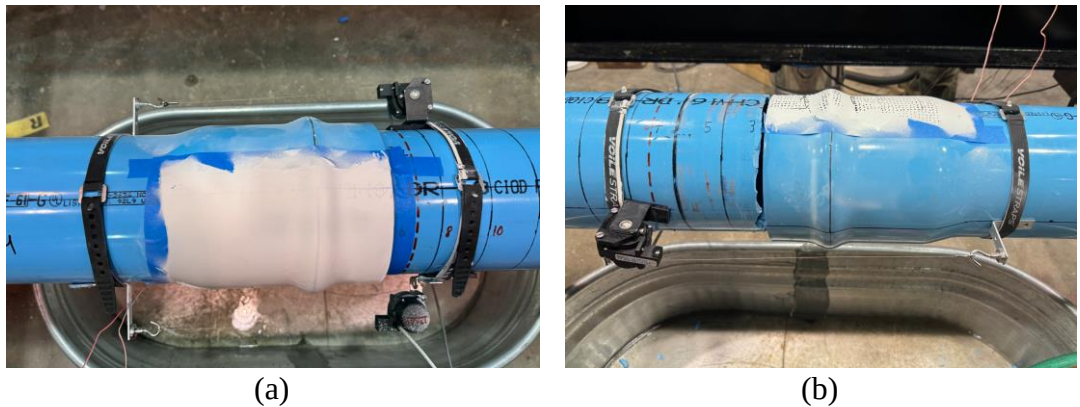
**Şekil 5.10:** PT44 için kuvvet ve a) aktüatör b) birleşim deplasmanı.

**Şekil 5.11a** ve **Şekil 5.11b** sırasıyla test süresince merkez hattından (boru bağlantısının ortası) 915 mm (36 inç) uzaklıktaki bir düzlemde ölçülen eksenel ve çevresel şekil değiştirmeleri göstermektedir. Şekil değiştirme ölçerler borunun tepe ve alt pozisyonlarına yerleştirilmiştir (CA: Boru tepe noktası eksenel, IA: Boru alt noktası eksenel, CC: Boru tepe noktası çevresel, IC: Boru alt noktası çevresel şekil değiştirme). Yaklaşık 75 saniyede sistem su ile basınçlandırılmış ve çevresel şekil değiştirmede bir artış ve eksenel şekil değiştirmede hafif bir azalma gözlenmiştir.

Yükleme başladığında ( $t=115$  sn), çevresel şekil değiştirmeler azalmaya başlarken eksenel şekil değiştirmeler artmıştır. Aktüatör sisteme çekme yükü uyguladıkça boru uzamaya başlamış ve eksenel şekil değiştirmelerde artışa neden olmuştur. Poisson etkisi nedeniyle, çekme yükü uygulandıkça çevresel şekil değiştirmeler azalmıştır. Maksimum eksenel şekil değiştirme ve çevresel şekil değiştirme, hasardan önce sırasıyla yaklaşık %0.82 ve -%0.21 olarak ölçülmüştür. Hasar boru bağlantısının düz ucu (batı) tarafında (spigot) meydana gelmiştir. Kırılma conta dişlerinin boru iç yüzeyine kitlendiği yerde borunun düz ucu bölümünde meydana gelmiştir. Testten önce ve sonra boru bağlantısının görüntüleri Şekil 5.12a ve Şekil 5.12b'de gösterilmektedir. Nokta işaretleri beyaz yüzeydeki dijital görüntü korelasyonu (DIC) ölçümü içindir. DIC ölçümleri bu tez kapsamı dışındadır.



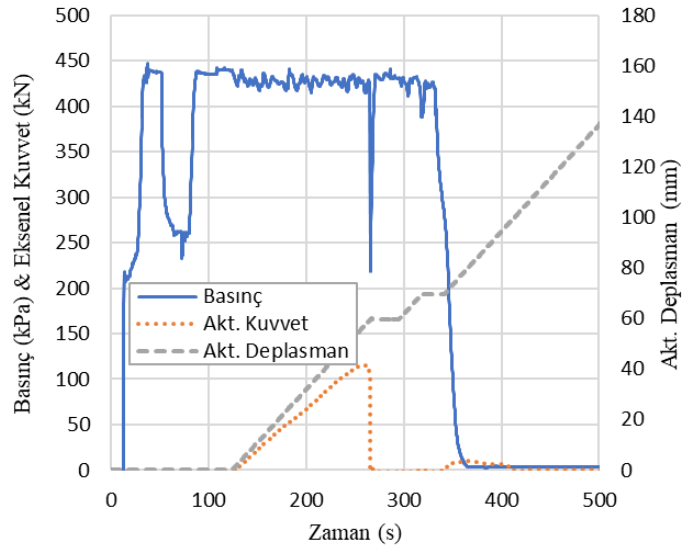
Şekil 5.11: PT44 için a) eksenel b) çevresel şekil değiştirme.



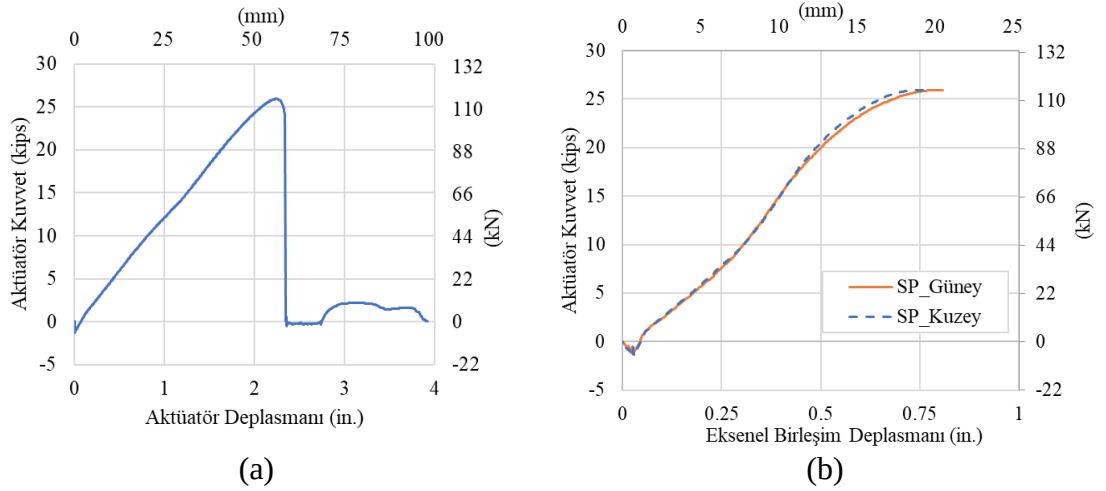
Şekil 5.12: PT44 a) test öncesi b) test sonrası.

### 5.3.2. Çekme Testi (PT45)

Bu test içinde kullanılan malzeme ve test yöntemi bir önceki testle (PT44) benzerdir. **Şekil 5.13** aktüatör kuvveti, iç su basıncı ve zamana bağlı aktüatör yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Test sırasında  $434 \pm 13$  kPa ( $63 \pm 2$  psi) sabit bir iç su basıncı sağlanmıştır.  $t=120$  saniyeden yükleme başlayarak çekme yüklemesi 25.4 mm/dakika hızında uygulanmıştır. Numune kuvvet kapasitesini kaybettiğinde ( $t=260$  sn), basınç yaklaşık 206 kPa'a düştü ve ardından tekrar 448 kPa'a yükselmiştir. Numunenin hedef iç basıncı sürdürme kapasitesini doğrulamak için test durakladıktan sonra, eksenel çekme uygulamasına devam edilmiştir. Uygulanan eksenel yer değiştirmede, birleşimin yerinden dışarı çekilmesi ve numunenin basınç bütünlüğünü kaybetmesi nedeniyle önemli bir sızıntı meydana gelmiştir. **Şekil 5.14a** yük hücresinde kaydedilen maksimum kuvvetin 115.3 kN (25.9 kips), aktüatör yer değiştirmesinde 57.2 mm (2.25 inç) olduğunu göstermektedir. **Şekil 5.14b** boru bağlantısı yer değiştirmesine göre aktüatör kuvvetini göstermektedir. Boru bağlantısı deplasmanı numunenin kuzey ve güney yan hatlarında bulunan iki potansiyometre kullanılarak ölçülmüştür. Boru bağlantısı yer değiştirmesi maksimum kuvvette ortalama yaklaşık 20.3 mm (0.8 inç) değerine ulaşmış ve kırılmadan hemen önce toplamda yaklaşık 25.1 mm (0.99 inç) değerine ulaşmıştır.

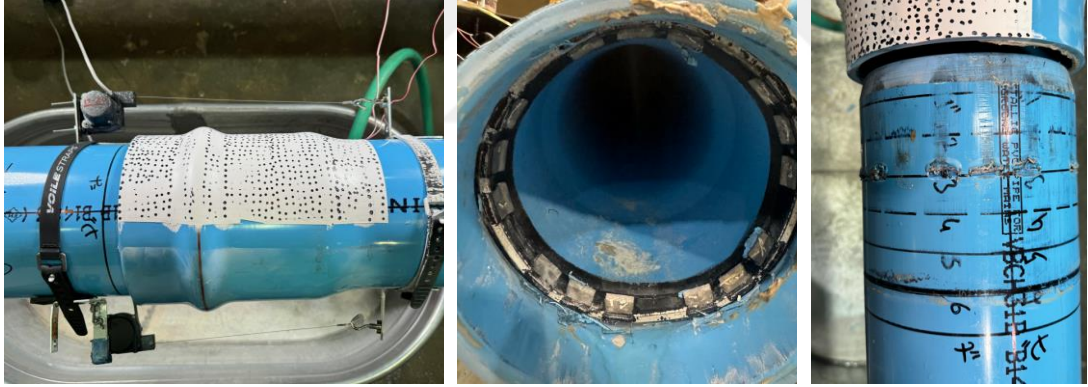


**Şekil 5.13:** PT45 numunesi basınç, eksenel kuvvet ve aktüatörün zamana karşı yer değiştirmesi için sonuçlar.



**Şekil 5.14:** PT45 için kuvvet ve a) aktüatör ve b) birleşim deplasmanı.

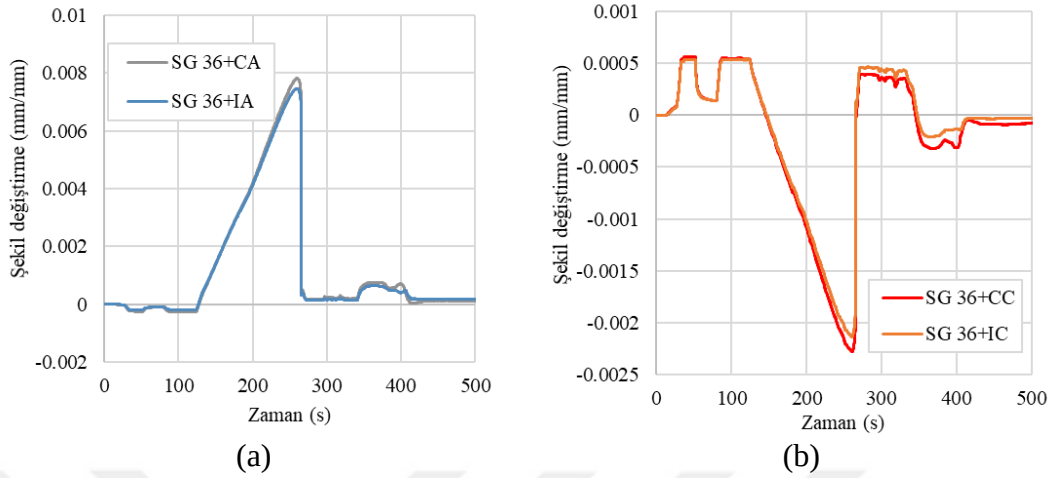
**Şekil 5.15b** test sonrasında contada meydana gelen hasarı göstermektedir. Metal dişlerin birçoğu deforme olmuştur. Bu durum da boru bağlantısının kuvvet kapasitesini azaltmış, ancak kuvvet düştükten sonra contanın muhafaza sağlamaya devam etmesine izin vermiştir. **Şekil 5.15c** testten sonra metal dişlerin düz boru ucu üzerindeki izlerini göstermektedir.



**Şekil 5.15:** PT45 a) bağlantı bölgesi b) contadaki arıza ve c) testten sonra bağlantı.

**Şekil 5.16a** ve **Şekil 5.16b** test süresince bağlantının merkez hattından 915 mm (36 inç) uzaklıktaki bir düzlemde ölçülen sırasıyla eksenel ve çevresel şekil değiştirmeleri göstermektedir. Sistem tamamen su ile basınçlandırılmış ve testin başlangıcında yine çevresel şekil değiştirmede bir artış gözlenmiştir. Yükleme başlangıcından sonra çevresel şekil değiştirmeler azalırken eksenel şekil değiştirmeler artmıştır. Sistem üzerindeki aktüatör çekme yüklemesinin etkisi altında boru uzamaya başlamış ve bu da eksenel şekil değiştirmelerde artışa neden olmuştur. Eş zamanlı olarak Poisson etkisi, çekme yükü uygulandıkça çevresel şekil değiştirmede bir azalmaya neden

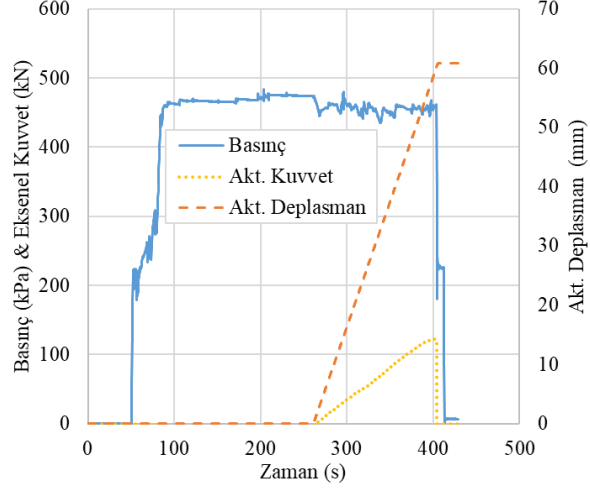
olmuştur. Maksimum eksenel şekil değiştirme ve çevresel şekil değiştirme, hasardan önce sırasıyla yaklaşık %0.78 ve %-0.22 olarak ölçülmüştür.



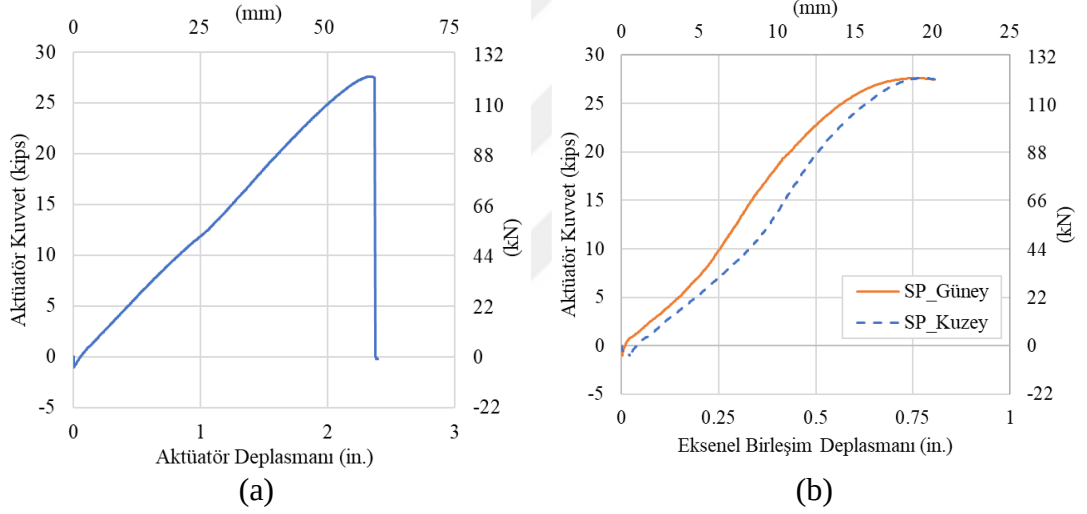
**Şekil 5.16:** PT44 için a) eksenel b) çevresel şekil değiştirme.

### 5.3.3. Çekme Testi (PT46)

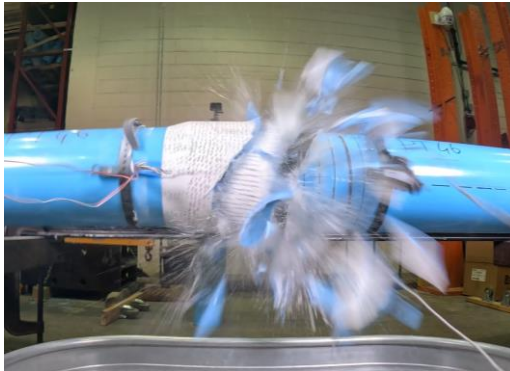
VinylTech tarafından üretilen PVC boru üzerinde gerçekleştirilen üçüncü çekme testi PT46 olmuştur. **Şekil 5.17** aktüatör kuvveti, iç su basıncı ve zamana bağlı aktüatör yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Yer değiştirme 25 mm/dk hızında uygulanmıştır. **Şekil 5.18a** yük hücresinde kaydedilen maksimum kuvvetin 122.7 kN (27.6 kips) aktüatör yer değiştirmesinin 59.9 mm (2.36 inç) olduğunu göstermektedir. Sabit bir iç su basıncı  $448 \pm 13$  kPa ( $65 \pm 2$  psi) uygulanmıştır. **Şekil 5.18b** aktüatör kuvveti ile boru bağlantısı yer değiştirmesini göstermektedir. Birleşim yer değiştirmesi hasardan hemen önce ortalama 20.32 mm (0.8 inç) değerine ulaşmıştır. **Şekil 5.19a** birleşimdeki kırılma anını göstermektedir. Maksimum kuvvette (122.7 kN) birleşimin doğu ve batı taraflarında kırılma meydana gelmiştir. Çevresel kırılma contanın dışlarının borunun düz ucuna kitlendiği yerde meydana gelmiştir. Borunun genişletilmiş ucu tarafında, **Şekil 5.19b**'de gösterildiği gibi tepeden başlayıp borunun alt tarafına ulaşan yaklaşık 45 derecelik bir açıda bir kırılma meydana gelmiştir.



**Şekil 5.17:** PT46 numunesi basınç, eksenel kuvvet ve aktüatörün zamana karşı yer değiştirmesi için sonuçlar.



**Şekil 5.18:** PT46 için kuvvet ve a) aktüatör b) birleşim deplasmanı.



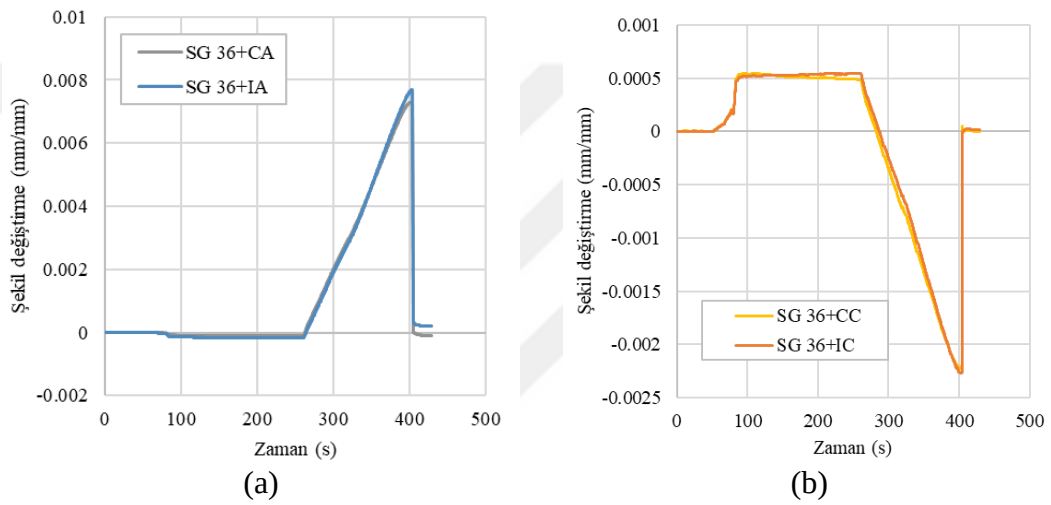
(a)



(b)

**Şekil 5.19:** PT46 için a) bağlantıdaki kırılma anı ve b) hasar mekanizması

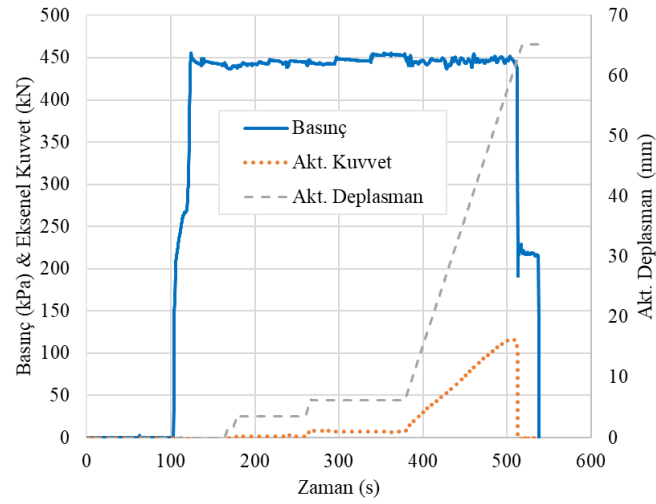
**Şekil 5.20a** ve **Şekil 5.20b** test süresince ortalama eksenel ve çevresel şekil değiştirmeleri göstermektedir. Testin başlangıcında sistem tamamen basınçlandırılmış ve çevresel şekil değiştirmelerde bir artış gözlenmiştir. Yükleme başladığında, eksenel şekil değiştirmeler artarken çevresel şekil değiştirmeler azalmaya başlamıştır. Aktüatör sisteme çekme yükü uyguladıkça boru uzamaya başlamış ve eksenel şekil değiştirmelerde artışa neden olmuştur. Poisson etkisi nedeniyle, çekme yükü uygulandıkça çevresel şekil değiştirmeler azalmıştır. Maksimum eksenel şekil değiştirme ve çevresel şekil değiştirme, hasardan önce sırasıyla yaklaşık %0.81 ve -%0.22 olarak ölçülmüştür.



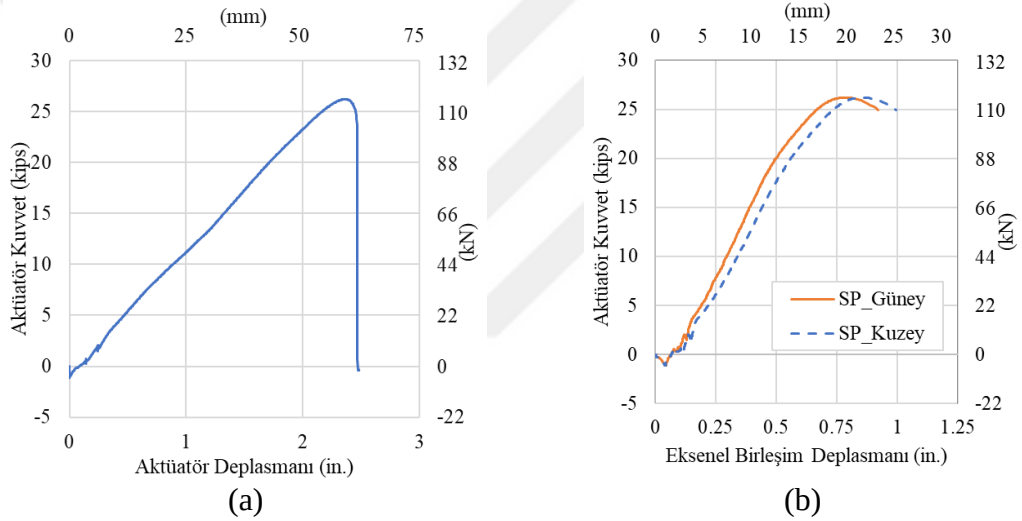
**Şekil 5.20:** PT46 için a) eksenel ve b) çevresel şekil değiştirme.

#### 5.3.4. Çekme Testi (PT50)

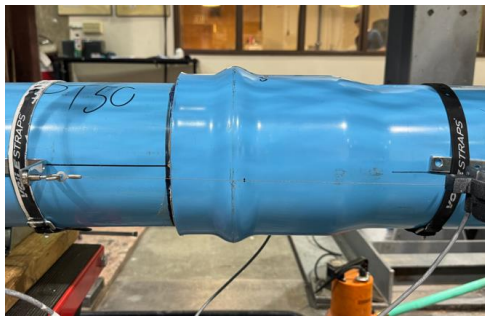
Northern tarafından üretilen, ilk PVC boru çekme testi PT50 olmuştur. **Şekil 5.21** aktüatör kuvveti, iç basınç ve zamana bağlı aktüatör yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Yer değiştirme 25 mm/dk hızında uygulanmış ve yük hücresinin kuvvet geri tepmesi kaydedilmiştir. **Şekil 5.22a** yük hücresinde kaydedilen maksimum kuvvetin 116.6 kN (26.2 kips) aktüatör deplasmanında 62.5 mm (2.46 inç) olduğunu göstermektedir. Yükleme sırasında  $448 \pm 13$  kPa ( $65 \pm 2$  psi) sabit bir dahili su basıncı uygulanmıştır. **Şekil 5.22b** aktüatör kuvveti ile boru bağlantısı yer değiştirmesini göstermektedir. Birleşim yer değiştirmesi hasardan hemen önce yaklaşık 25.9 mm (1.02 inç) değerine ulaşmıştır. **Şekil 5.23a** testten önce boru bağlantısını göstermektedir. **Şekil 5.23b**'de gösterildiği gibi conta dişlerinin bağlantının düz ucunda tarafına girdiği yerde çevresel bir kırılma meydana gelmiştir.



**Şekil 5.21:** PT50 numunesi basınç, eksenel kuvvet ve aktüatörün zamana karşı yer değiştirmesi.



**Şekil 5.22:** PT50 için kuvvet ve a) aktüatör b) birleşim deplasmanı.



(a)

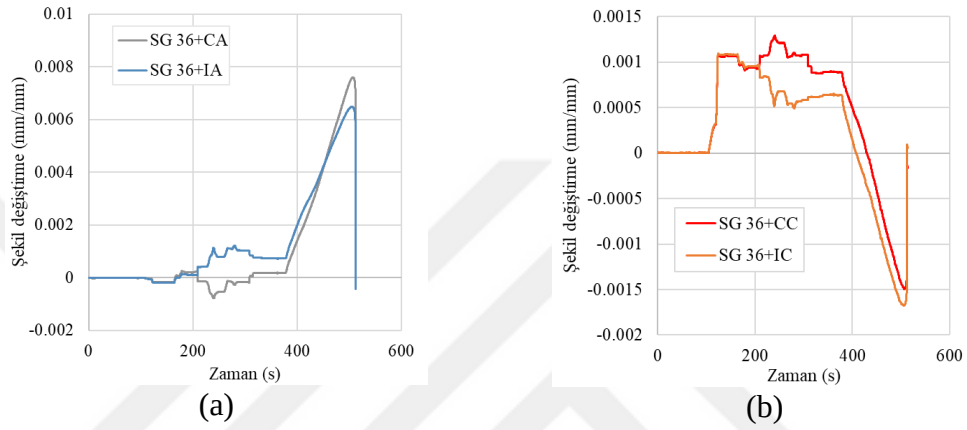


(b)

**Şekil 5.23:** PT50 için bağlantının a) birleşimi ve b) bağlantının düz ucunda kırılma.

**Şekil 5.24a** ve **Şekil 5.24b** test süresince ortalama eksenel ve çevresel şekil değiştirmeleri göstermektedir. Testin başlangıcında sistem tamamen basınçlandırılmış

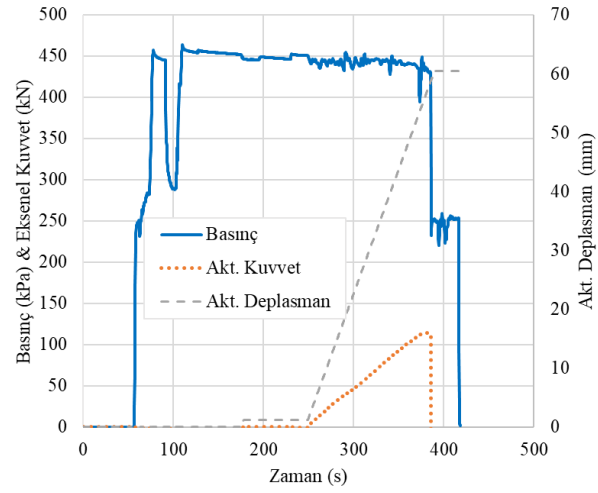
ve çevresel şekil değiştirmede bir artış gözlenmiştir. Yükleme başladığında, eksenel şekil değiştirmeler artarken çevresel şekil değiştirmeler azalmaya başlamıştır. Aktüatör sisteme çekme yükü uyguladıkça boru uzamaya başlamış ve eksenel şekil değiştirmede artışa neden olmuştur. Poisson etkisi nedeniyle, çekme yükü uygulandıkça çevresel şekil değiştirmeler azalmıştır. Maksimum eksenel şekil değiştirme ve çevresel şekil değiştirme, hasardan önce sırasıyla yaklaşık %0.76 ve -%0.16 olarak ölçülmüştür.



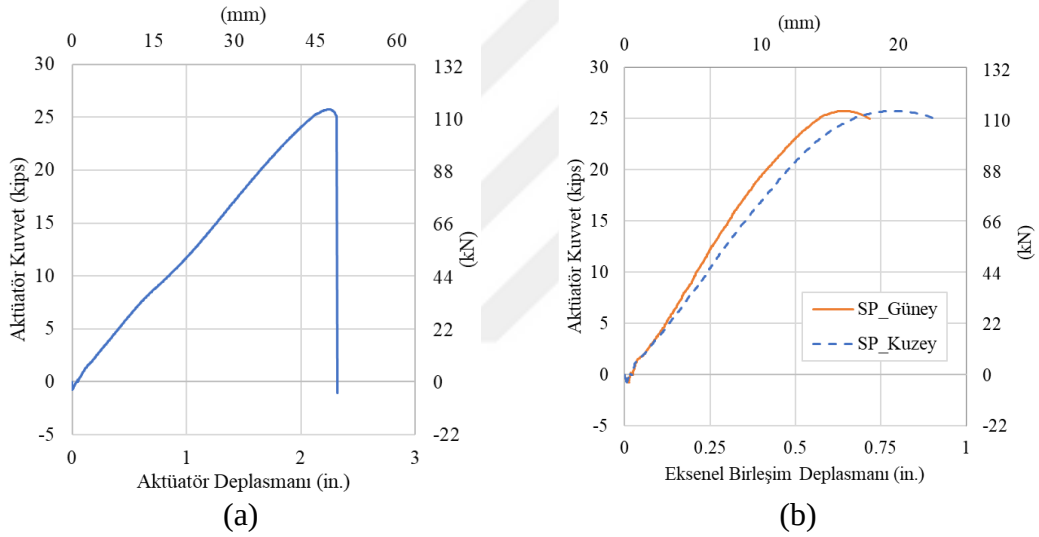
**Şekil 5.24:** PT50 için a) eksenel b) çevresel şekil değiştirme.

### 5.3.5. Çekme Testi (PT51)

PT51, Northern PVC boruları için ikinci çekme testidir. **Şekil 5.25** zamana bağlı olarak aktüatör kuvveti, iç basınç ve aktüatör yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Yer değiştirme 25 mm/dk hızında uygulanmıştır. Sabit bir iç su basıncı  $448 \pm 13$  kPa ( $65 \pm 2$  psi) uygulanmıştır. Numune kuvvet kapasitesini kaybettiğinde ( $t=390$  sn), basınç yaklaşık 241 kPa'a düşmüş ve ardından kuvvetin 0'a düşmesinden sonra yaklaşık 20 saniye boyunca su basıncını korumuştur ( $t=410$  sn). **Şekil 5.26a** yük hücresinde kaydedilen maksimum kuvvetin 114.4 kN (25.7 kips) aktüatör deplasmanının 58.7 mm (2.31 inç) olduğunu göstermektedir. **Şekil 5.26b** aktüatör kuvveti ile boru bağlantısı deplasmanını göstermektedir. Boru bağlantısı deplasmanı hasardan hemen önce ortalama 20.6 mm (0.81 inç) değerine ulaşmıştır. **Şekil 5.27a** boru bağlantısındaki kırılma anını göstermektedir. Hasar boru bağlantısının düz ucu (Spigot) tarafında meydana gelmiştir. **Şekil 5.27b**'de gösterildiği gibi kırılma meydana gelmiştir.



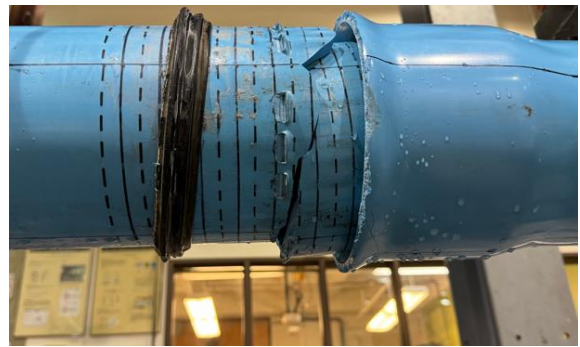
**Şekil 5.25:** PT51 numunesi basınç, eksenel kuvvet ve aktüatörün zamana karşı yer değiştirmesi.



**Şekil 5.26:** PT51 için kuvvet ve a) aktüatör b) birleşim deplasmanı.



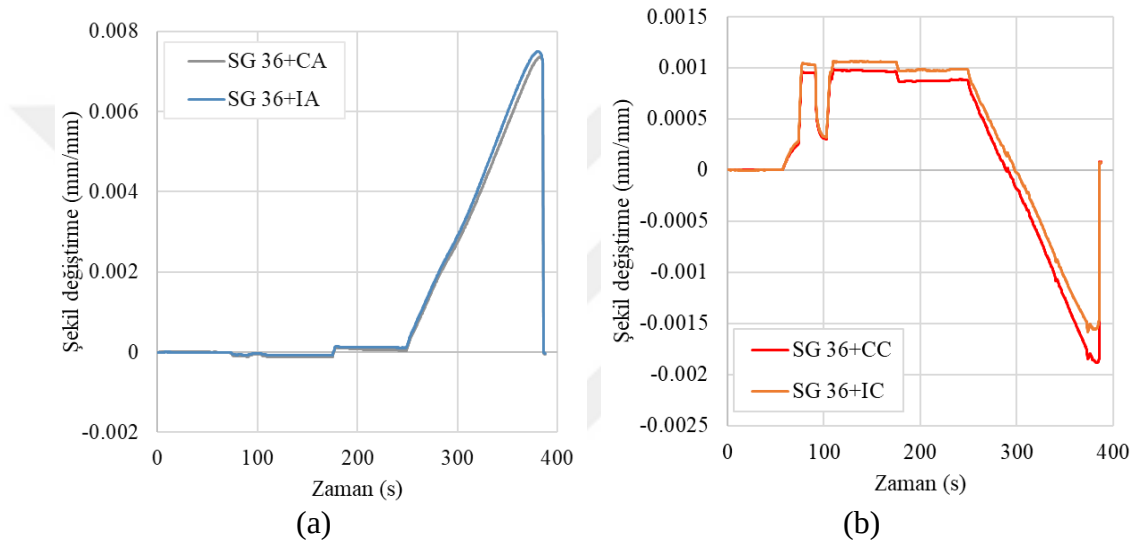
(a)



(b)

**Şekil 5.27:** PT51 için a) birleşimde kırılma anı ve b) bağlantının düz ucu tarafında kırılma.

**Şekil 5.28** test süresince meydana gelen eksenel ve çevresel şekil değiştirmeleri göstermektedir. Testin başlangıcında sistem tamamen basınçlandırılmış ve çevresel şekil değiştirmede bir artış gözlenmiştir. Yükleme başladığında, eksenel şekil değiştirmeler artarken çevresel şekil değiştirmeler azalmaya başlamıştır. Aktüatör sisteme çekme yükü uyguladıkça boru uzamaya başlamış ve şekil değiştirmelerde artışa neden olmuştur. Poisson etkisi nedeniyle, çekme yükü uygulandıkça çevresel şekil değiştirmeler azalmıştır. Maksimum eksenel şekil değiştirme ve çevresel şekil değiştirme, hasardan önce sırasıyla yaklaşık %0.75 ve -%0.18 olarak ölçülmüştür.

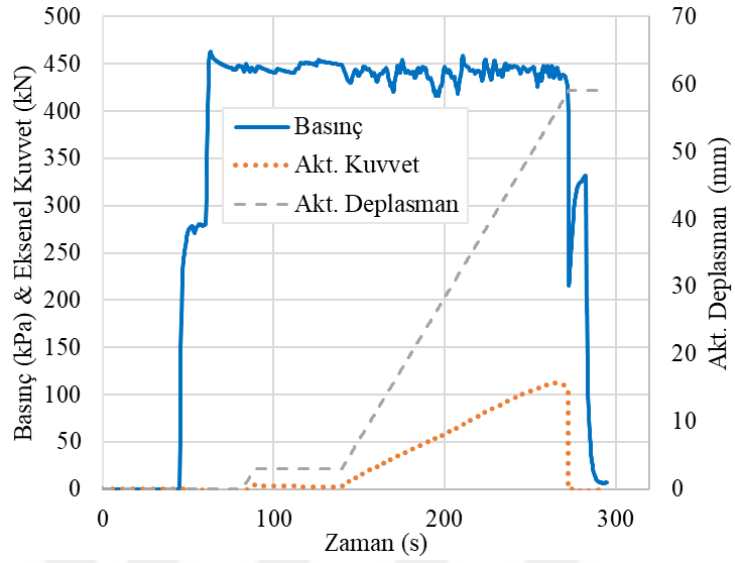


**Şekil 5.28:** PT51 için a) eksenel b) çevresel şekil değiştirme.

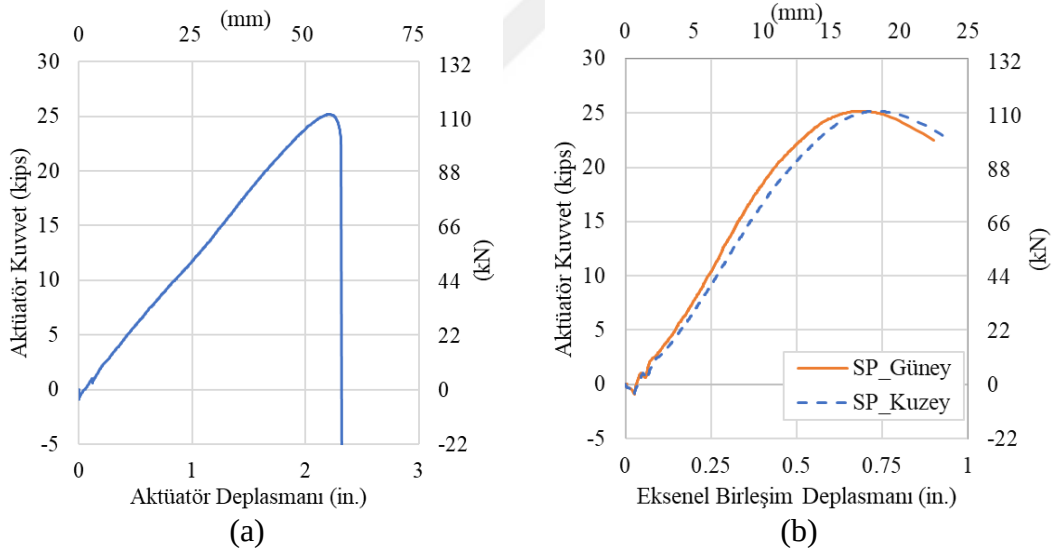
### 5.3.6. Çekme Testi (PT52)

Northern tarafından üretilen PVC boru üzerinde gerçekleştirilen son çekme testi PT52 olmuştur. **Şekil 5.29** aktüatör kuvveti, iç basınç ve zamana bağlı aktüatör yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Test sırasında  $448 \pm 13$  kPa ( $65 \pm 2$  psi) sabit dahili su basıncı uygulanmıştır. **Şekil 5.30a** ayrıca yük hücresinde kaydedilen maksimum kuvvetin 111.9 kN (25.2 kips) aktüatör deplasmanının 55.9 mm (2.20 inç) olduğunu göstermektedir. **Şekil 5.30b** aktüatör kuvveti ile boru bağlantısı yer değiştirmesini göstermektedir. Boru bağlantısı yer değiştirmesi maksimum kuvvette ortalama yaklaşık 17.8 mm (0.7 inç) değerine ulaşmış ve hasardan hemen önce toplamda yaklaşık 23.4 mm (0.92 inç) değerine ulaşmıştır. **Şekil 5.31** PT52 için testten önce boru bağlantısını göstermektedir. Contada hasar meydana gelmiş ve **Şekil**

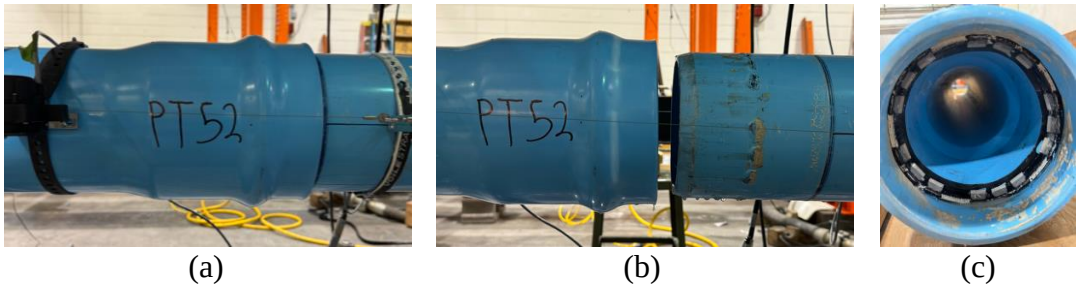
5.31'de gösterildiği gibi conta dişleri kaymıştır. **Şekil 5.31c** testten sonra RieberLok conta dişlerindeki hasarı göstermektedir.



**Şekil 5.29:** PT52 numunesi basınç, eksenel kuvvet ve aktüatörün zamana karşı yer değiştirmesi.

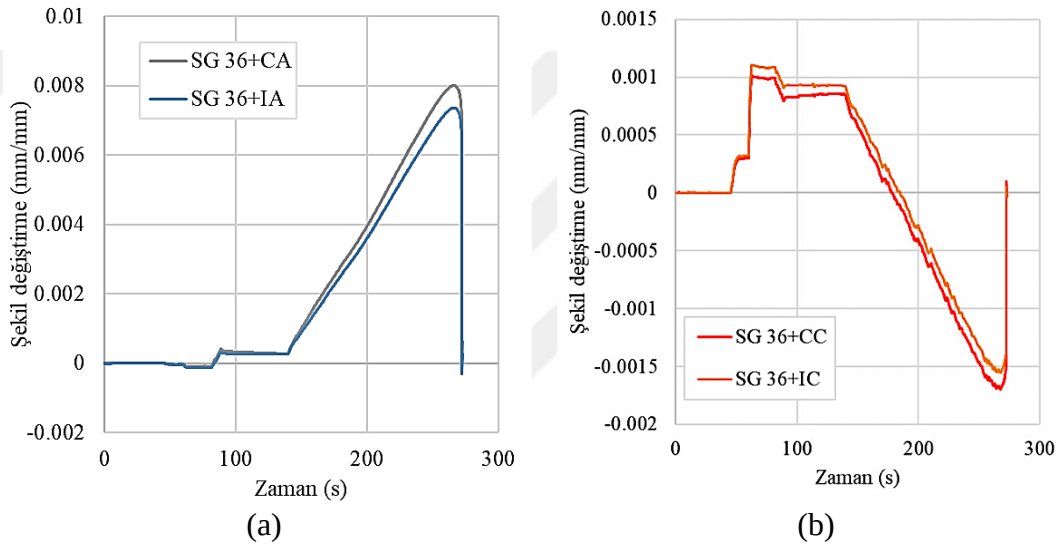


**Şekil 5.30:** PT52 için kuvvet ve a) aktüatör b) birleşim deplasmanı.



**Şekil 5.31:** PT52 için a) birleşim b) hasar c) conta hasarı.

**Şekil 5.32** test süresince meydana gelen eksenel ve çevresel şekil değiştirmeleri göstermektedir. Testin başlangıcında sistem tamamen basınçlandırılmış ve çevresel şekil değiştirmede bir artış gözlenmiştir. Yükleme başladığında, eksenel şekil değiştirmeler artarken çevresel şekil değiştirmeler azalmaya başlamıştır. Aktüatör sisteme çekme yükü uyguladıkça boru uzamaya başlamış ve eksenel şekil değiştirmelerde artışa neden olmuştur. Poisson etkisi nedeniyle, çekme yükü uygulandıkça çevresel şekil değiştirmeler azalmıştır. Maksimum eksenel şekil değiştirme ve çevresel şekil değiştirme, hasardan önce sırasıyla yaklaşık %0.80 ve -%0.16 olarak ölçülmüştür.



**Şekil 5.32:** PT52 için a) eksenel b) çevresel şekil değiştirme.

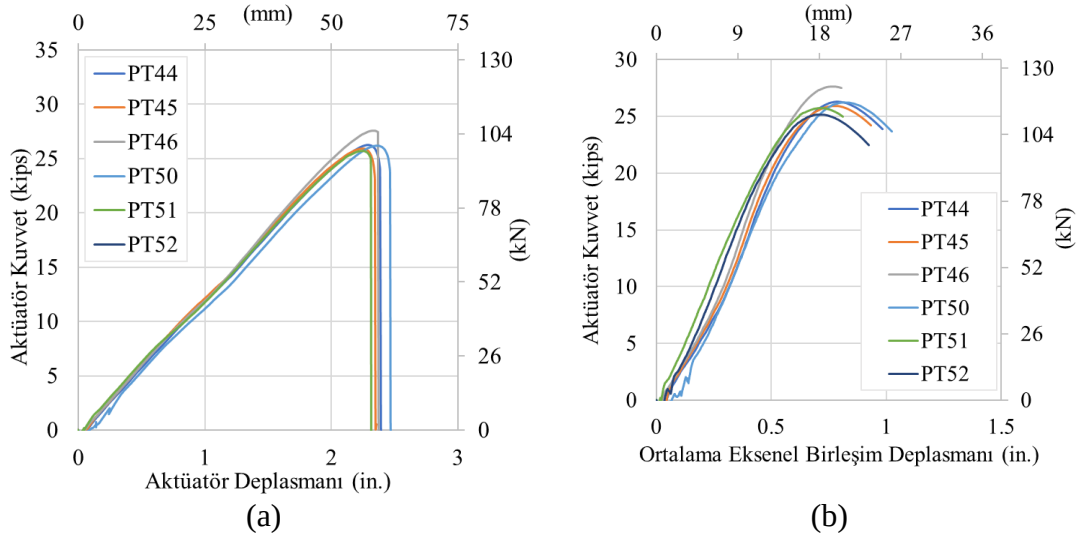
### 5.3.7. Çekme Testlerinin Değerlendirilmesi

Bu bölüm eksenel çekme test sonuçlarının bir özeti olan **Tablo 5.3** ile başlayarak gerçekleştirilen çekme testlerinin bir karşılaştırmasını sunmaktadır. **Şekil 5.33a** her bir çekme testi için aktüatör yer değiştirmesine göre aktüatör kuvvetini göstermektedir. Çekme testi altındaki maksimum eksenel kuvvetler VinylTech ve Northern PVC boruları için sırasıyla ortalama 118.3 kN (26.6 kips) ve 114.3 kN (25.7 kips) olmuştur. Kuvvetler ve aktüatör yer değiştirmeleri tüm çekme testleri için oldukça tutarlıdır. **Şekil 5.33b**'de her bir test için boru bağlantısı yer değiştirmeleri ve eksenel kuvvetler gösterilmektedir ve maksimum boru bağlantısı yer değiştirmeleri 20.32 ile 25.9 mm arasında değişmektedir. **Şekil 5.34** eksenel ve çevresel şekil değiştirmeler için

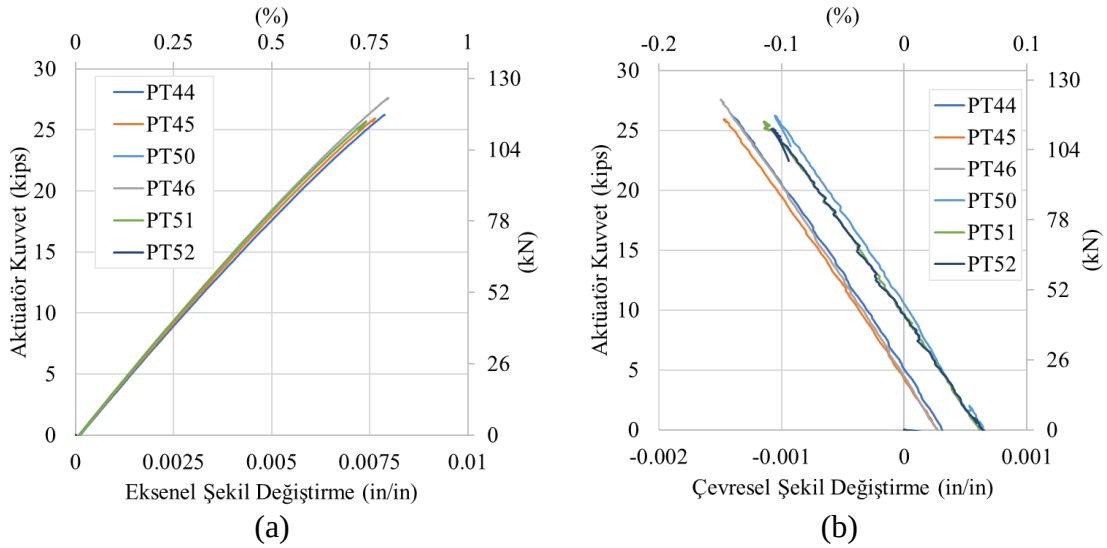
karşılaştırmayı göstermektedir. Tüm çekme testleri %0.75 ile %0.82 arasında maksimum aksenal şekil değiştirme değerlerine sahiptir. RieberLok marka conta bağlantısının performansını değerlendirdiğimizde, Northern ve VinylTech ürünleri aksenal çekme testleri altında oldukça benzer kuvvet ve bağlantı deplasman kapasitesi göstermiştir, ancak her iki ürün türü için de farkı göçme mekanizmaları gözlemlenmiştir. Çekme testleri için üç farklı hasar mekanizması gözlemlenmiştir: bağlantının düz ucunda çevresel kırılma (PT44, PT50, PT51), conta hasarı (PT45, PT52) ve bağlantının her iki tarafında kırılma (PT46).

**Tablo 5.3:** PVC boru üzerinde yapılan çekme testlerinin karşılaştırılması.

| Test NO  | Boru Üreticisi | Maksimum Aksenal Kuvvet |       | Maksimum Aktüatör Deplasmanı |         | Maksimum Aksenal Şekil Değiştirme |      | Birleşim/bağlantı Deplasmanı |       |
|----------|----------------|-------------------------|-------|------------------------------|---------|-----------------------------------|------|------------------------------|-------|
|          |                | kips                    | (kN)  | in                           | (mm)    | in/in                             | %    | in                           | (mm)  |
| PT44     | VinylTech      | 26.3                    | (117) | 2.39                         | (60.7)  | 0.0082                            | 0.82 | 0.98                         | 24.9  |
| PT45     | VinylTech      | 25.9                    | (115) | 2.25                         | (57.2)  | 0.0078                            | 0.78 | 0.99                         | 25.1  |
| PT46     | VinylTech      | 27.6                    | (122) | 2.36                         | (59.9)  | 0.0081                            | 0.81 | 0.8                          | 20.3  |
| PT50     | Northern       | 26.2                    | (116) | 2.46                         | (62.5)  | 0.0076                            | 0.76 | 1.02                         | 25.9  |
| PT51     | Northern       | 25.7                    | (114) | 2.31                         | (58.7)  | 0.0075                            | 0.75 | 0.81                         | 20.6  |
| PT52     | Northern       | 25.2                    | (111) | 2.20                         | (55.9)  | 0.0080                            | 0.80 | 0.92                         | 23.4  |
| Ortalama |                | 26.15                   | (115) | 2.32                         | (59.15) | 0.0078                            | 0.78 | 0.92                         | 23.36 |



**Şekil 5.33:** Çekme testleri için aksenal kuvvete karşı a) aktüatör ve b) ortalama birleşim deplasmanları.



**Şekil 5.34:** Çekme testleri için eksenel kuvvete karşı a) eksenel ve b) çevresel şekil değiştirme.

## 5.4. Eksenel Tekrarlı Yükleme Testleri

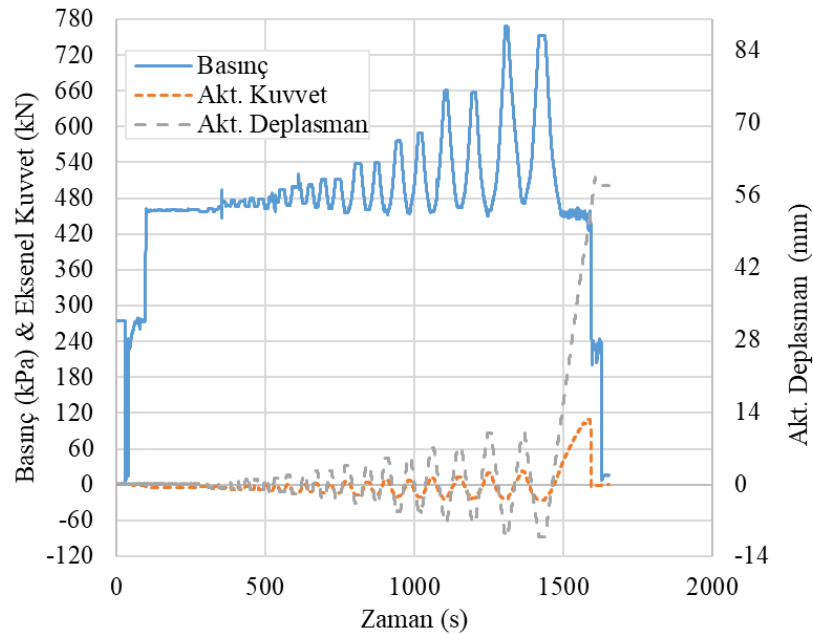
Bu bölümde farklı yük protokolleri altında gerçekleştirilen eksenel tekrarlı testlerin sonuçları sunulmaktadır. Tüm yükleme protokolleri FEMA 464 tarafından sağlanan tekrarlı yükleme testi kılavuzuna dayanmaktadır. Tekrarlı ve kırılmaya kadar çekme yüklemeleri yer değiştirme kontrolü altında gerçekleştirilmiştir. Her tekrarlı yükleme protokolü ilgili tekrarlı test altında açıklanmıştır. Tekrarlı yükleme dizisinden sonra, numunede hasar meydana gelene kadar çekme yüklemesi yapılmıştır.

### 5.4.1. Tekrarlı Yükleme Testi (PS47)

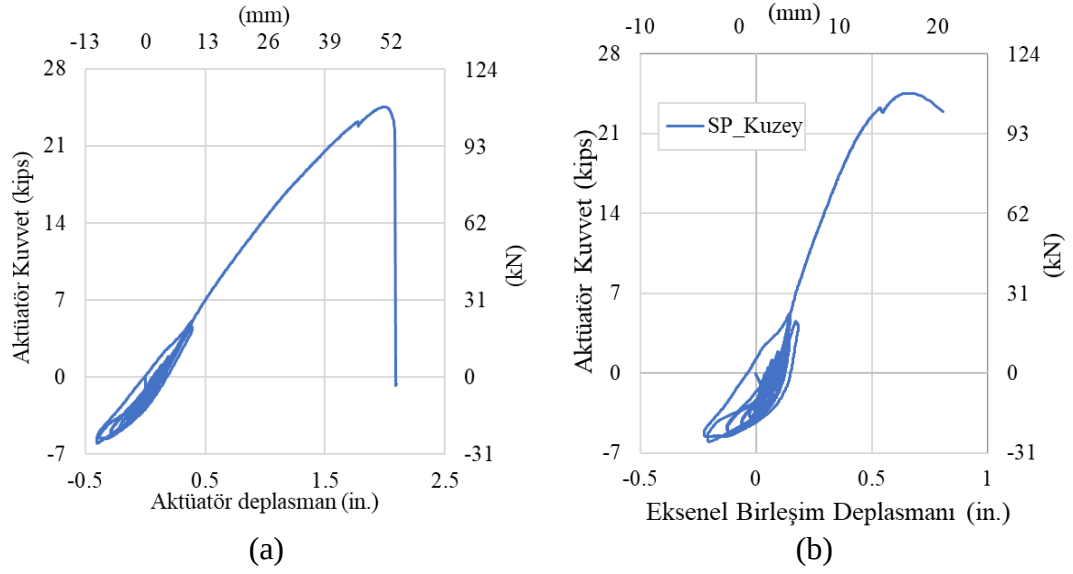
VinylTech tarafından üretilen PVC boru üzerinde gerçekleştirilen ilk tekrarlı test PS47 olmuştur. Bu testte (**Tablo 5.2a**) belirtilen yükleme protokolü 1 (LP-1) tekrarlı yüklemesi ve çekme yüklemesi 25.4 mm/dk hızında yer değiştirme kontrolü altında gerçekleştirilmiştir. Tekrarlı yükleme sırasında, çekme ve basınç döngülerinde gerçekleştirilen maksimum eksenel yer değiştirme 10.1 mm'dir (0.40 inç). **Şekil 5.35**'de test sırasında zamana bağlı olarak su basıncı, aktüatör kuvveti ve aktüatör yer değiştirmesi gösterilmektedir. Test sırasında ortalama su basıncı yaklaşık 503 kPa (73 psi) olmuştur, ancak tekrarlı yükleme ile iç hacmin değişmesi basıncın yaklaşık 448 - 758 kPa (65-110 psi) aralığında dalgalanmasına neden olmuştur. Genel olarak, basınçlı boruyu test ederken, yer değiştirme uygulandıkça borunun hacmindeki dalgalanma

sırasında basıncı sabit tutmak için bir basınç regülatörü kullanılır. Ancak PS47'nin kurulumu sırasında regülatör yanlışlıkla açılmamıştır. **Şekil 5.35**'da görüldüğü gibi, bu durum basıncın boru hacmiyle birlikte dalgalanmasına neden olmuştur. **Şekil 5.36a** aktüatör kuvveti ve aktüatör yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Maksimum kuvvet 109.1 kN (24.5 kips) ve maksimum aktüatör yer değiştirmesi 57.8 mm (2.27 inç) olmuştur.

**Şekil 5.36b** aktüatör kuvveti ile boru bağlantısı yer değiştirmesini göstermektedir. Tekrarlı yükleme sırasında, maksimum eksenel kuvvet basınç yüklemesi kısmında yaklaşık -26.7 kN (-6.0 kips) ve çekme kısmında 22.9 kN (5.2 kips) değerlerine ulaşmıştır. Borunun kuzey ve güney yan hatlarına, her iki taraftaki bağlantıdan tam olarak 76.2 mm (3 inç) uzağa iki deplasman ölçen potansiyometre özel olarak yerleştirilmiştir. Ancak, güney tarafındaki telli kaplar test sırasında hasarlanmış, bu nedenle bağlantı kapasitesini değerlendirmek için yalnızca bir potansiyometre kullanılmıştır. Tekrarlı yüklemekten sonra, hasara kadar çekme yüklemesi gerçekleştirilmiştir. Yükleme dizisi sırasında PS47 için herhangi bir su sızıntısı gözlenmemiştir. Birleşim yer değiştirmesi hasardan hemen önce yaklaşık 22.1 mm (0.87 inç) olarak ölçülmüştür.

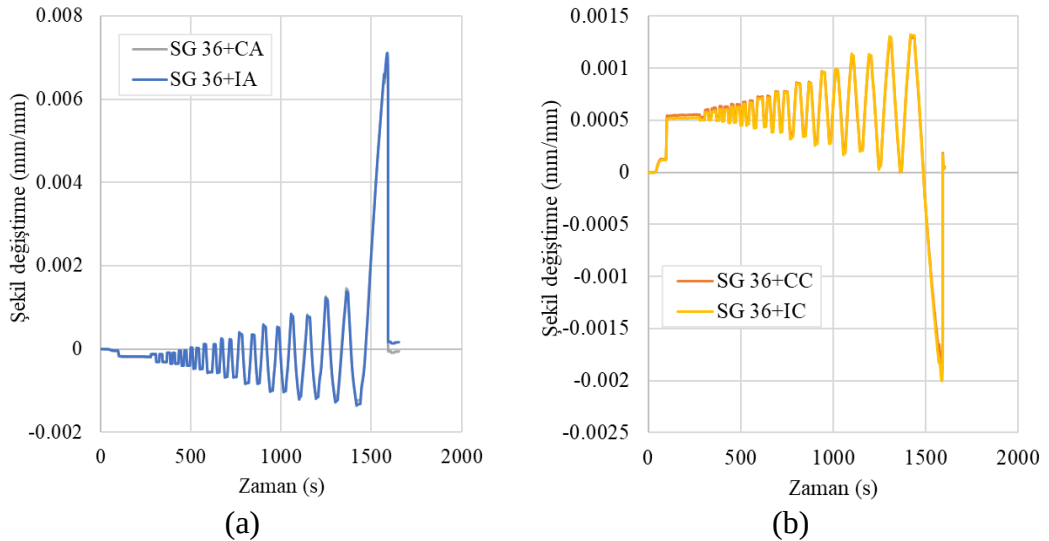


**Şekil 5.35:** İç basınç, aktüatör yer değiştirmesi ve zamana karşı eksenel kuvvet için PS47 sonuçları.



**Şekil 5.36:** PS47 kuvvet ve a) aktüatör ve b) birleşim deplasmanı.

**Şekil 5.37** test süresi boyunca eksenel ve ortalama çevresel şekil değiştirmeleri göstermektedir. Testin başlangıcında sistem tamamen basınçlandırılmış ve çevresel şekil değiştirmede bir artış gözlenmiştir. Maksimum eksenel şekil değiştirme %0.71 ve maksimum çevresel şekil değiştirme -%0.20 olmuştur. Birleşimin testten önceki ve sonraki görüntüleri **Şekil 5.38**'de gösterilmektedir. Bağlantıların hiçbirinde hasar olmamıştır, ancak tekrarlı yüklemekten sonra çekme yüklemesi sırasında conta dişleri kaymış ve bağlantının basınç kapasitesini kaybetmesine neden olmuştur.



**Şekil 5.37:** PS47 için a) eksenel ve b) çevresel şekil değiştirme.

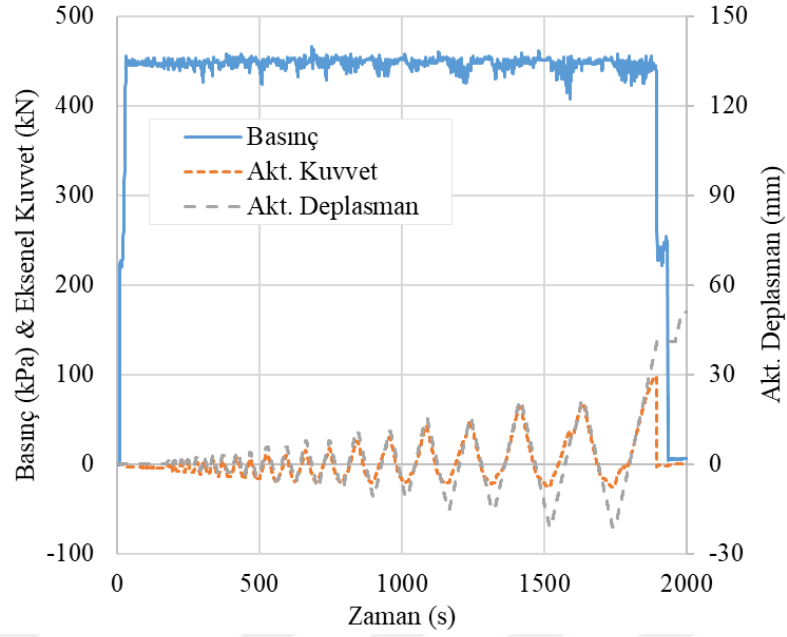


**Şekil 5.38:** a) Testten önce PS47 birleşimi ve b) birleşim hasarı.

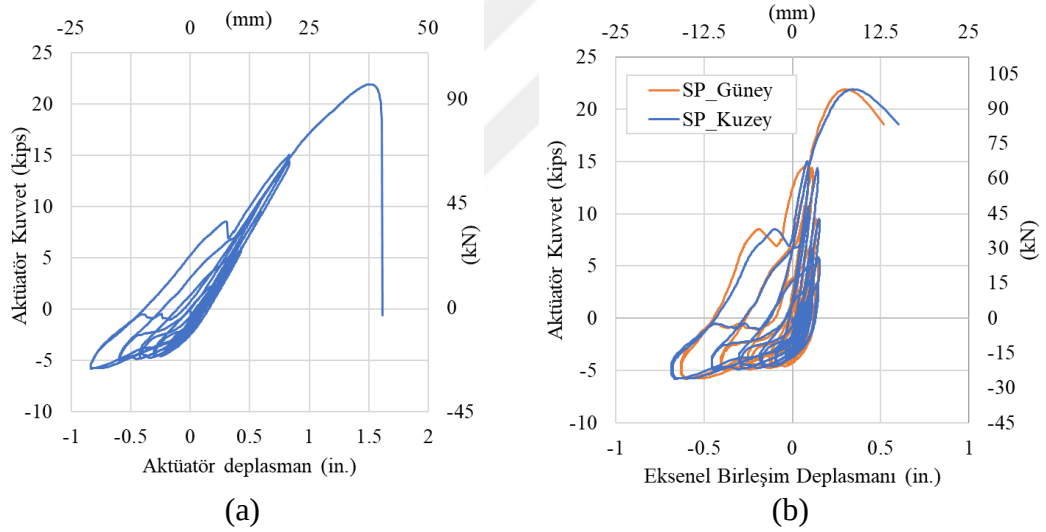
#### 5.4.2. Tekrarlı Yükleme Testi (PS48)

VinylTech tarafından üretilen PVC boru üzerinde gerçekleştirilen ikinci tekrarlı yükleme testi PS48 olmuştur. Bu testte **Tablo 5.2b**'de belirtilen yükleme protokolü 2 (LP-2) tekrarlı yüklemesi ve çekme yüklemesi, 25.4 mm/dk hızında ve yer değiştirme kontrolü altında gerçekleştirilmiştir. Tekrarlı yükleme sırasında, çekme ve basınç döngülerinde gerçekleştirilen maksimum eksenel yer değiştirme 21.2 mm'dir. **Şekil 5.39**'da test sırasında zamana bağlı olarak su basıncı, aktüatör kuvveti ve aktüatör yer değiştirmesi gösterilmektedir. Test sırasında ortalama su basıncı yaklaşık 448 kPa (65 psi) olmuştur. Basınç düzenleme sisteminde yapılan değişiklikler, döngüler sırasında önceki teste (PS47) kıyasla daha sabit bir iç basınç elde edilmesini sağlamıştır.

**Şekil 5.40a** aktüatör kuvveti ile aktüatör yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Maksimum kuvvet 97.5 kN (21.9 kips) ve maksimum aktüatör yer değiştirmesi 40.6 mm (1.6 inç) olmuştur. **Şekil 5.40b** aktüatör kuvveti ile boru bağlantısı yer değiştirmesini göstermektedir. Tekrarlı yükleme sırasında, maksimum eksenel kuvvet basınç ve çekme kısımlarında sırasıyla -25.8 kN (5.8 kips) ve 66.9 kN (15.04 kips) değerlerine ulaşmıştır. Tekrarlı yüklemeden sonra, hasara kadar çekme yüklemesi gerçekleştirilmiştir. Birleşim yer değiştirmesi hasardan hemen önce yaklaşık 13.97 mm (0.55 inç) olarak ölçülmüştür.



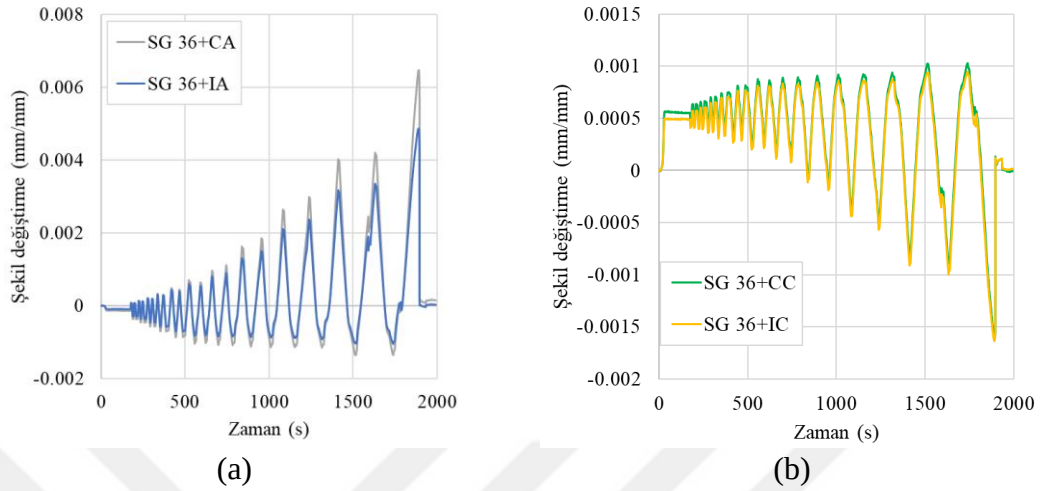
**Şekil 5.39:** İç basınç, aktüatör yer değiştirmesi ve zamana karşı eksenel kuvvet için PS48 sonuçları.



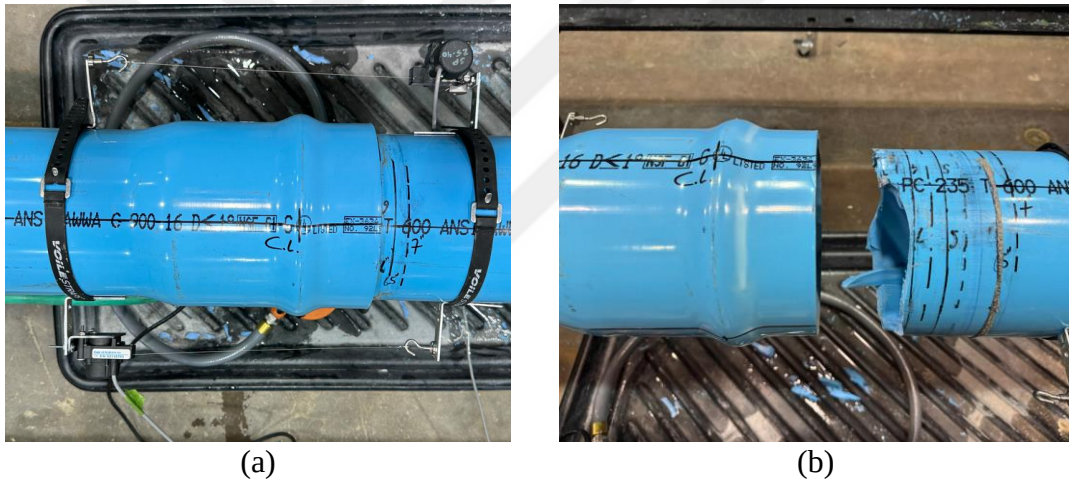
**Şekil 5.40:** PS48 kuvvet ve a) aktüatör b) birleşim deplasmanı.

**Şekil 5.41** test süresi boyunca eksenel ve ortalama çevresel şekil değiştirmeleri göstermektedir. Testin başlangıcında sistem tamamen basınçlandırılmış ve çevresel şekil değiştirmede bir artış gözlenmiştir. Hasardan önce maksimum eksenel şekil değiştirme %0.64 ve maksimum çevresel şekil değiştirme %-0.16 olmuştur. **Şekil 5.42** testten önce ve hasardan sonra birleşimi göstermektedir. Hasar, RieberLok conta dişlerinin boru ile birleştiği yerde düz boru ucunun (Spigot) çevresel kırılmasından

kaynaklanmıştır. PS48 için tekrarlı yükleme dizisi sırasında herhangi bir su sızıntısı gözlenmemiştir.



(a) (b)  
Şekil 5.41: PS48 için a) eksenel b) çevresel şekil değişime.

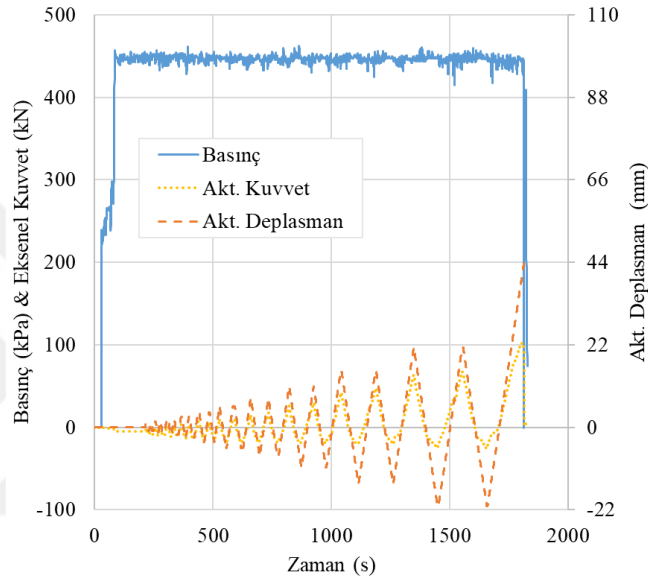


(a) (b)  
Şekil 5.42: a) Testten önce PS48 birleşimi ve b) borunun düz ucu tarafında kırılma.

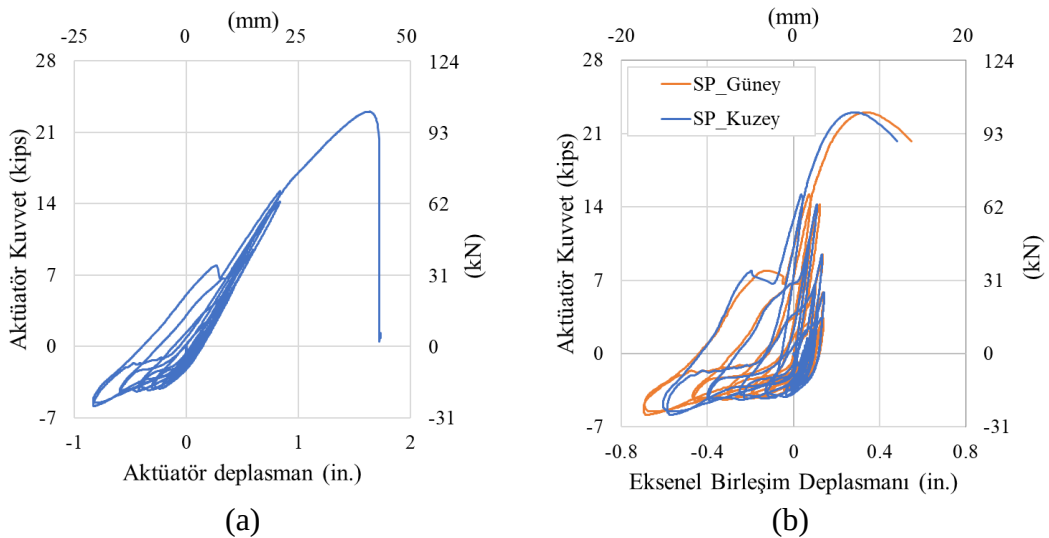
### 5.4.3. Tekrarlı Yükleme Testi (PS49)

VinylTech tarafından üretilen PVC boruların üçüncü tekrarlı yükleme testi PS49 olmuştur. Şekil 5.43'de zamana göre su basıncı, aktüatör kuvveti ve aktüatör yer değiştirmesi gösterilmektedir. Bu testte yükleme protokolü 2 (LP-2) ile tekrarlı yükleme ve çekme yüklemesi 25.4 mm/dk hızında ve yer değiştirme kontrolü altında gerçekleştirilmiştir. Yükleme sırasında ortalama su iç basıncı yaklaşık 448 kPa (65 psi) olmuştur. Şekil 5.44a aktüatör kuvveti ile aktüatör yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Maksimum kuvvet 102.4 kN (23.0 kips) ve maksimum

aktüatör yer değiştirmesi 43.43 mm (1.71 inç) olmuştur. **Şekil 5.44b** aktüatör kuvveti ile boru bağlantısı yer değiştirmesini göstermektedir. Tekrarlı yükleme sırasında, maksimum eksenel kuvvet basınç ve çekme kısımlarında sırasıyla -26.1 kN (-5.9 kips) ve 67.5 kN'a (15.2 kips) ulaşmıştır. Tekrarlı yükleme işlemi sırasında, 19. ve 20. döngülerde basınçlı yükleme aşamasının ortasında küçük su sızıntıları gözlenmiştir. Tekrarlı yükleme dizisinden sonra, hasara kadar çekme yüklemesi gerçekleştirilmiştir. Hasardan hemen önce birleşim yer değiştirmesi yaklaşık 12.95 mm (0.51 inç) olarak ölçülmüştür.

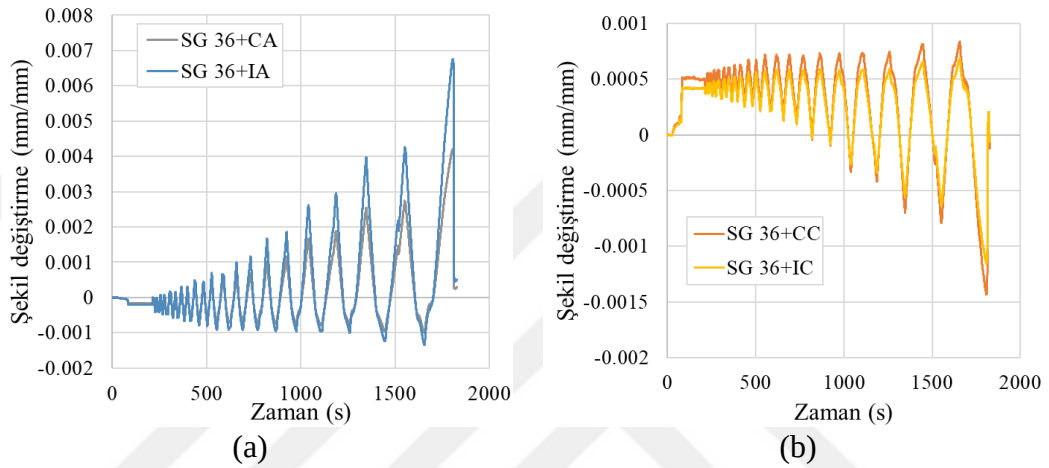


**Şekil 5.43:** İç basınç, aktüatör yer değiştirmesi ve zamana karşı eksenel kuvvet için PS49 test sonuçları.

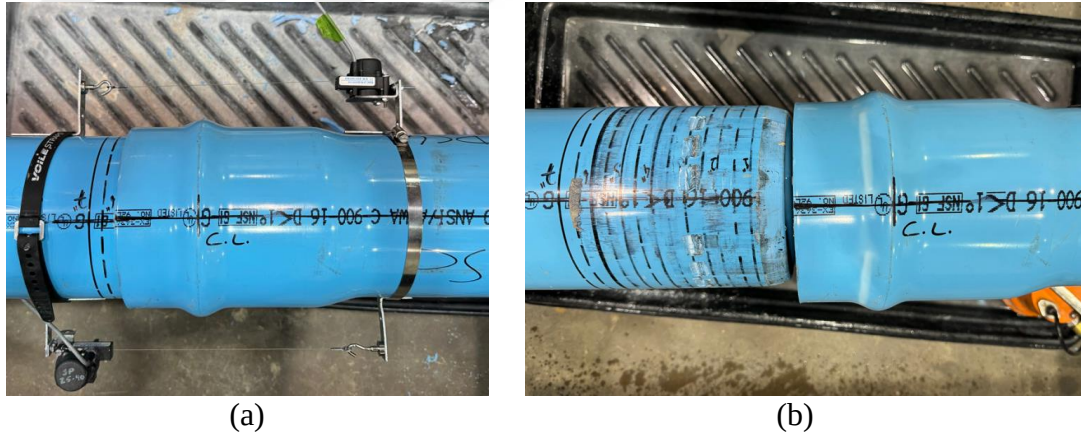


**Şekil 5.44:** PS49 kuvvet ve a) aktüatör b) birleşim deplasmanı.

**Şekil 5.45** test süresi boyunca aksel ve çevresel şekil değiştirmeleri göstermektedir. Testin başlangıcında sistem tamamen basınçlandırılmış ve çevresel şekil değiştirmede bir azalma gözlenmiştir. Maksimum aksel şekil değiştirme %0.67 ve maksimum çevresel şekil değiştirme %-0.13 olmuştur. **Şekil 5.46** test öncesi ve hasar sonrası birleşimi göstermektedir. Bağlantıların her iki tarafında da hasar meydana gelmemiştir fakat conta dişleri çekme yüklemesi sırasında kayarak bağlantının basınç kapasitesini kaybetmesine neden olmuştur.



**Şekil 5.45:** PS48 için a) aksel b) çevresel şekil değiştirme.

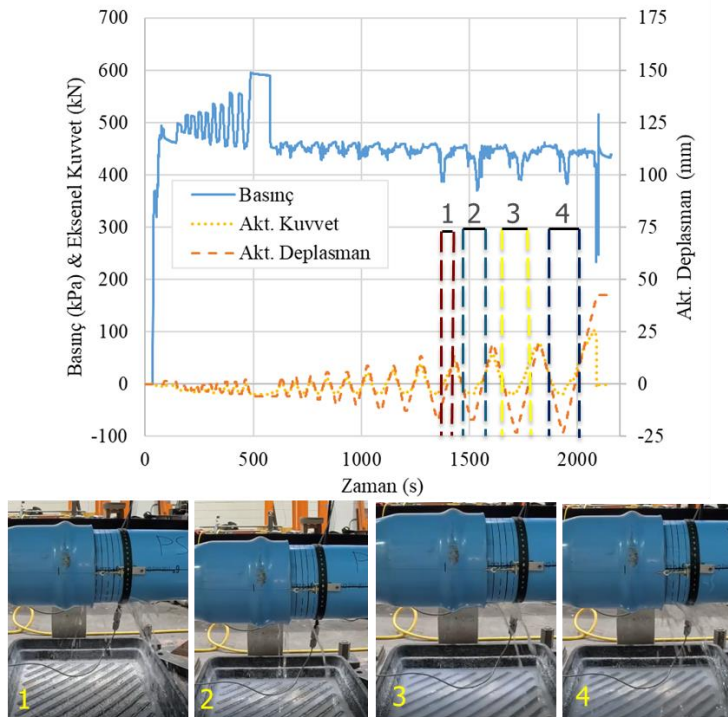


**Şekil 5.46:** a) Testten önce PS49 birleşimi ve b) birleşim bölgesi hasarı.

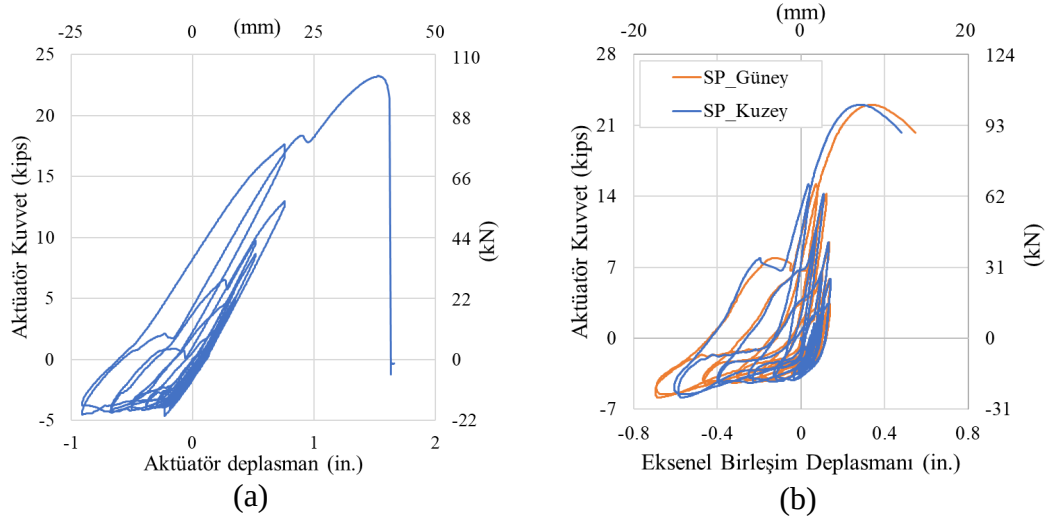
#### 5.4.4. Tekrarlı Yükleme Testi (PS53)

Northern tarafından üretilen PVC boru üzerinde gerçekleştirilen ilk tekrarlı test PS53 olmuştur. Bu testte **Tablo 5.2b**'de belirtilen yükleme protokolü 2 (LP-2) tekrarlı yüklemesi ve çekme yüklemesi 25.4 mm/dk hızında ve yer değiştirme kontrolü altında gerçekleştirilmiştir. **Şekil 5.47**'de test sırasında zamana bağlı olarak su basıncı,

aktüatör kuvveti ve aktüatör yer değiştirmesi gösterilmektedir. Testin başında, basınç regülatöründeki bir hasar  $t=500$  saniyeye kadar iç su basıncında dalgalanmalara neden olmuştur. Test sırasında ortalama su basıncı 18. döngüdeki ilk sızıntıya kadar yaklaşık 448 kPa (65 psi) olmuştur. Sızıntılar sırasında basınç yaklaşık 380 kPa'a (55 psi) düşmüştür. **Şekil 5.48a** aktüatör kuvveti ile aktüatör yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Maksimum kuvvet 103.3 kN (23.2 kips) ve maksimum aktüatör yer değiştirmesi 41.14 mm (1.62 inç) olmuştur. **Şekil 5.48b** aktüatör kuvveti ile boru bağlantısı yer değiştirmesini göstermektedir. Tekrarlı yükleme sırasında maksimum eksenel kuvvet, basınç ve çekme yüklemelerinde sırasıyla 20.1 kN (-4.5 kips) ve 78.5 kN'a (17.6 kips) ulaşmıştır. Tekrarlı yükleme işlemi sırasında, ilk olarak 18. döngüdeki çekme yükleme aşamasının başlangıcında sabit bir sızıntı gözlenmiş ve bu döngü boyunca devam etmiştir. Yükleme 19. döngüde basınç fazına geçtiğinde, sızıntı devam etmiş ve tüm basınç fazı boyunca ve aynı döngünün sonraki çekme fazına kadar uzanmıştır. Bu sabit sızıntı durumu 20. döngüde de devam etmiş ve son aşamadaki çekme yüklemesinin başlangıcına kadar uzanmıştır. Sızıntı conta dişleri boruya tekrar temas ettiğinde ( $t=2000$  sn) durmuştur. Hasara kadar çekme yüklemesi uygulanmıştır. Hasardan hemen önce ölçülen bağlantı deplasmanı ortalama 7.62 mm (0.30 inç) olmuştur.

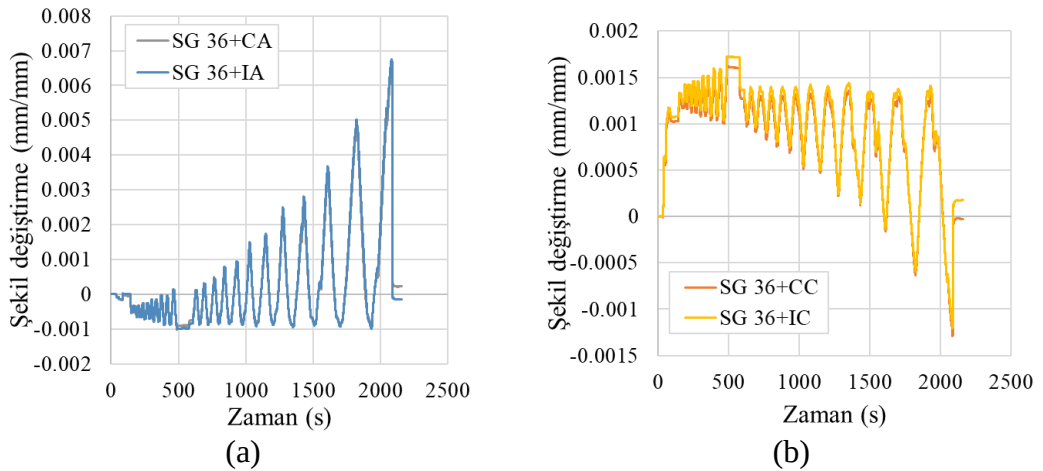


**Şekil 5.47:** İç basınç, aktüatör deplasmanı ve zamana karşı eksenel kuvvet için PS53 sonuçları.



**Şekil 5.48:** PS53 kuvvet ve a) aktüatör b) birleşim deplasmanı.

**Şekil 5.49** test süresi boyunca eksenel ve ortalama çevresel şekil değiştirmeleri göstermektedir. Testin başlangıcında sistem tamamen basınçlandırılmış ve çevresel şekil değiştirmede bir artış gözlenmiştir. Maksimum eksenel şekil değiştirme %0.67 ve maksimum çevresel şekil değiştirme %-0.12 olmuştur. **Şekil 5.50a** birleşimin genişletilmiş ucundaki kırılma anını göstermektedir. Son basınç döngüsü sırasında, boru bağlantısı yer değiştirmeleri 20.8 mm'ye (-0.82 inç) ulaşmıştır. Bu önemli yer değiştirme genişletilmiş uç tarafının kapasitesini olumsuz etkilemiştir. Sonuç olarak çekme yüklemesi sırasında **Şekil 5.50b**'de gösterildiği gibi genişletilmiş ucunda çevresel bir kırılma meydana gelmiştir. Bu gözlem, tekrarlı yüklemenin boru bağlantısının yapısal bütünlüğü ve hasar mekanizmaları üzerindeki belirgin etkisini göstermesi açısından çok önemlidir.



**Şekil 5.49:** PS53 için a) eksenel b) çevresel şekil değiştirme.



(a)



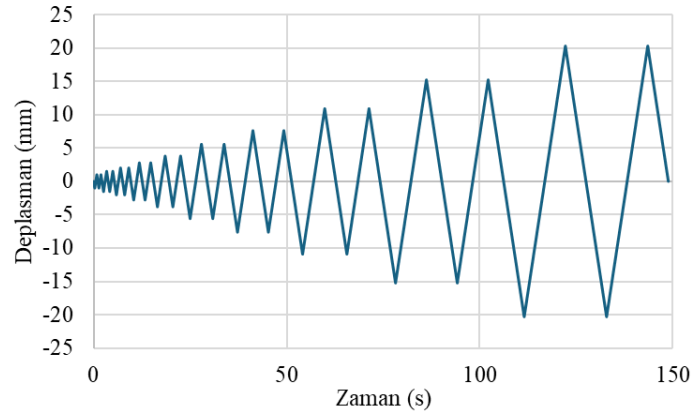
(b)

**Şekil 5.50:** a) PS53 hasar anı ve b) birleşiminin geniş ucunda kırılma.

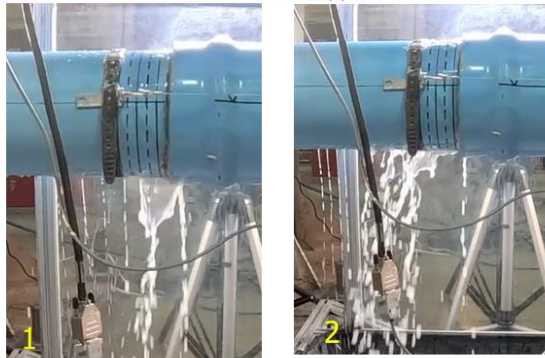
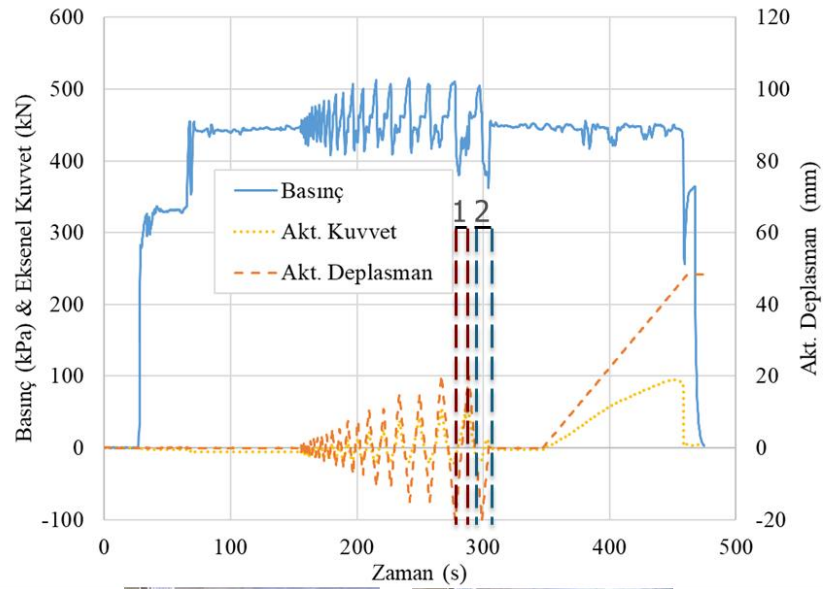
#### 5.4.5. Tekrarlı Yükleme Testi (PS54)

Northern şirketi tarafından üretilen PVC boru üzerinde gerçekleştirilen ikinci tekrarlı yükleme testi PS54 olmuştur. PS54'ün tekrarlı dizisi için dakikada 228 mm hızında olacak şekilde yükleme protokolü 2 (LP-2) kullanılmıştır. Bu testte yükleme protokolü zamana bağlı olarak kullanılmıştır. Tekrarlı yüklemeler için aynı tepe yer değiştirme değerleri kullanılarak **Şekil 5.51**'de gösterildiği gibi yaklaşık 150 saniyelik bir zaman tanımlı yükleme elde edilmiştir. Tekrarlı diziden sonra yer değiştirme kontrolü altında dakikada 25.4 mm (1 inç) hızında çekme yüklemesi gerçekleştirilmiştir. **Şekil 5.52** test sırasında zamana göre su basıncını, aktüatör kuvvetini ve aktüatör deplasmanını göstermektedir. Testin başlangıcındaki ortalama su basıncı yaklaşık 448 kPa'a (65 psi) ayarlanmıştır. Tekrarlı yükleme dizisinin başlamasıyla birlikte, 415 - 483 kPa (60-70 psi) aralığında su basıncı dalgalanmaları gözlenmiştir. Son iki döngünün başlangıcında ( $t=380$  sn), basıncın yaklaşık 380 kPa'a (55 psi) düşmesine neden olan sabit sızıntılar tespit edilmiştir. **Şekil 5.53a** aktüatör kuvveti ile aktüatör yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Maksimum kuvvet 94.6 kN (21.3 kips) ve maksimum aktüatör yer değiştirmesi 47.0 mm (1.85 inç) olarak gerçekleşmiştir. **Şekil 5.53b** aktüatör kuvveti ile boru bağlantısı yer değiştirmesini göstermektedir. Tekrarlı yükleme sırasında, maksimum eksenel kuvvet basınç ve çekme kısımlarında sırasıyla 20.5 kN (-4.6 kips) ve 55.8 kN'a (12.5 kips) ulaşmıştır. Tekrarlı yükleme işlemi sırasında, ilk olarak son döngüdeki (20. döngü) çekme yükleme aşamasının başlangıcında sabit bir sızıntı gözlenmiş ve bu çekme aşaması boyunca devam etmiştir. Basınç yükleme fazının ortasında tekrar sabit bir sızıntı meydana gelmiş ve tekrarlı yüklemenin sonuna kadar devam etmiştir. Tekrarlı yüklemeden sonra hasara kadar çekme yüklemesi

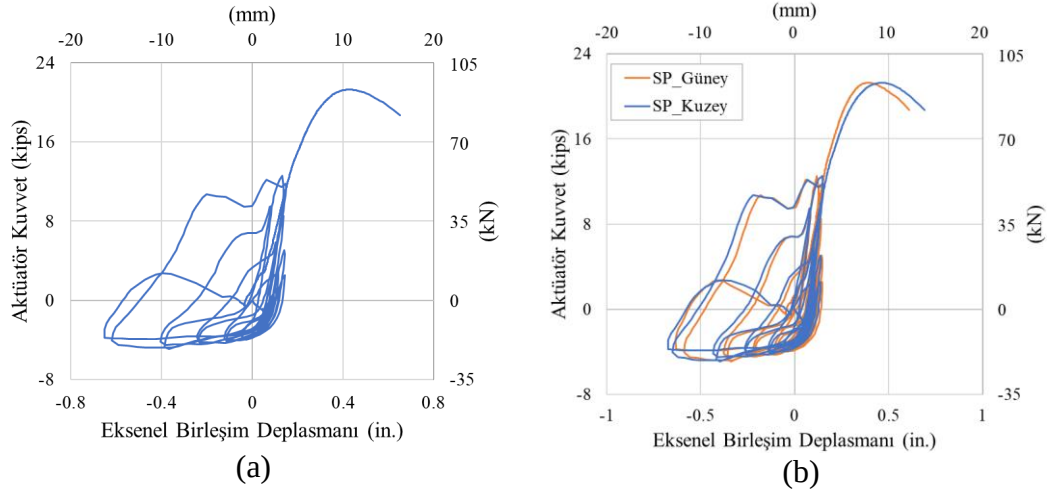
gerçekleştirilmiştir. Birleşim yer değiştirmesi hasardan hemen önce yaklaşık 16.51 mm (0.65 inç) olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.51: PS54 için tekrarlı yükleme protokolü.

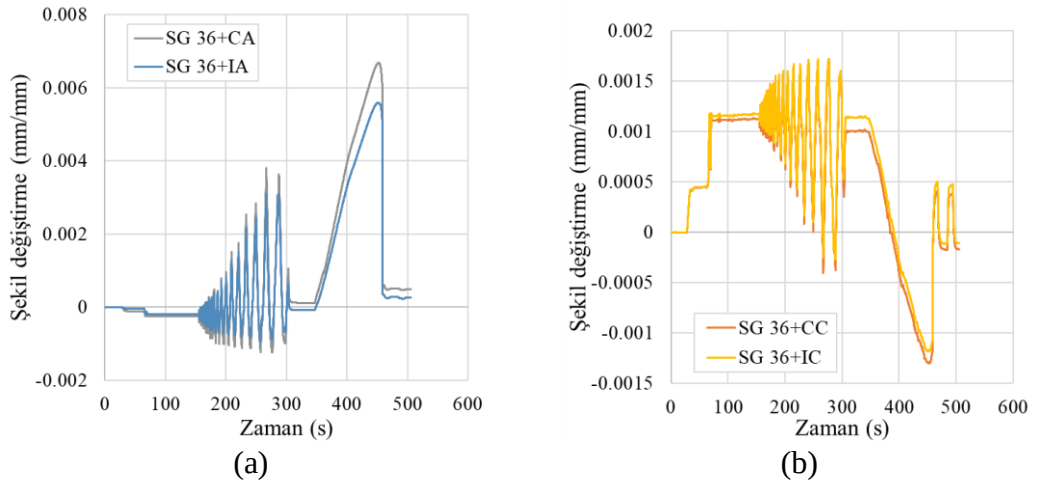


Şekil 5.52: İç basınç, aktüatör yer değiştirmesi ve zamana karşı eksenel kuvvet için PS54 sonuçları.

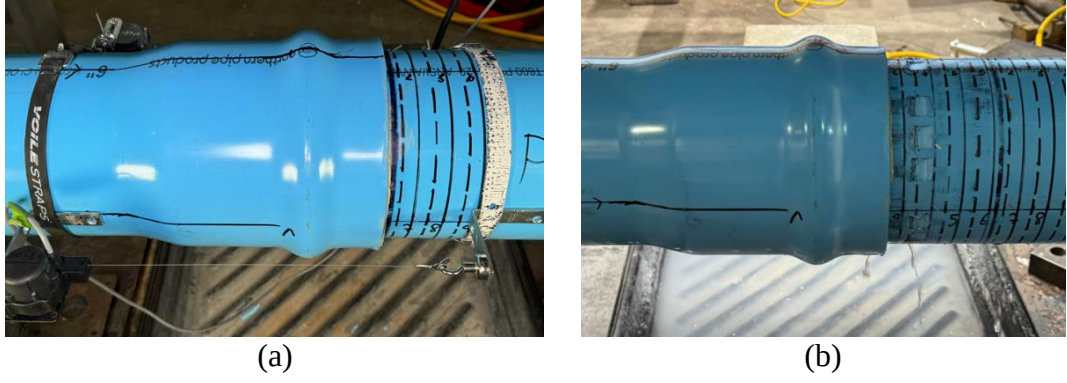


**Şekil 5.53:** PS54 kuvveti ve a) aktüatör ve b) birleşim deplasmanı.

**Şekil 5.54** test süresi boyunca eksenel ve ortalama çevresel şekil değiştirmeleri göstermektedir. Testin başlangıcında sistem tamamen basınçlandırılmış ve çevresel şekil değiştirmede bir artış gözlenmiştir. Maksimum eksenel şekil değiştirme %0.66 ve maksimum çevresel şekil değiştirme %-0.13 olmuştur. **Şekil 5.55** testten önce ve hasardan sonra boru bağlantısını göstermektedir. Bağlantıların iki ucunda da yapısal hasar meydana gelmemiş olup conta dişleri çekme yüklemesi sırasında kayarak bağlantının basınç kapasitesini kaybetmesine neden olmuştur.



**Şekil 5.54:** PS54 için a) eksenel b) çevresel şekil değiştirme.

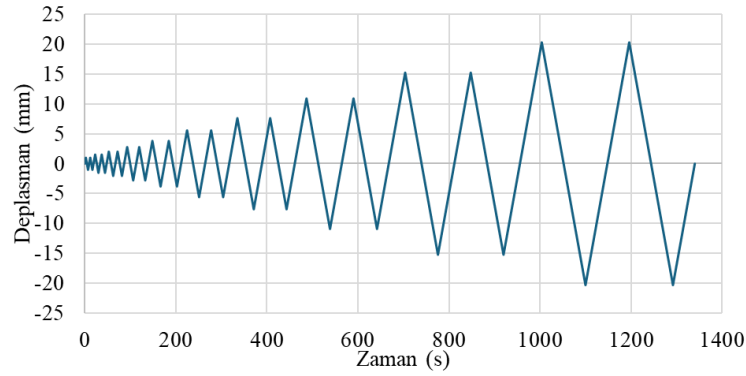


**Şekil 5.55:** a) Testten önce PS54 birleşimi ve b) birleşim hasarı.

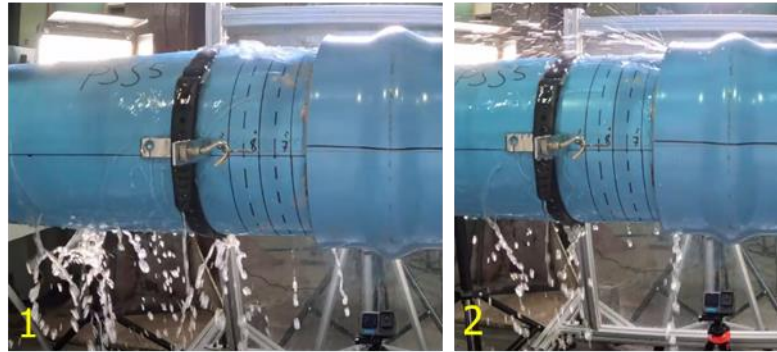
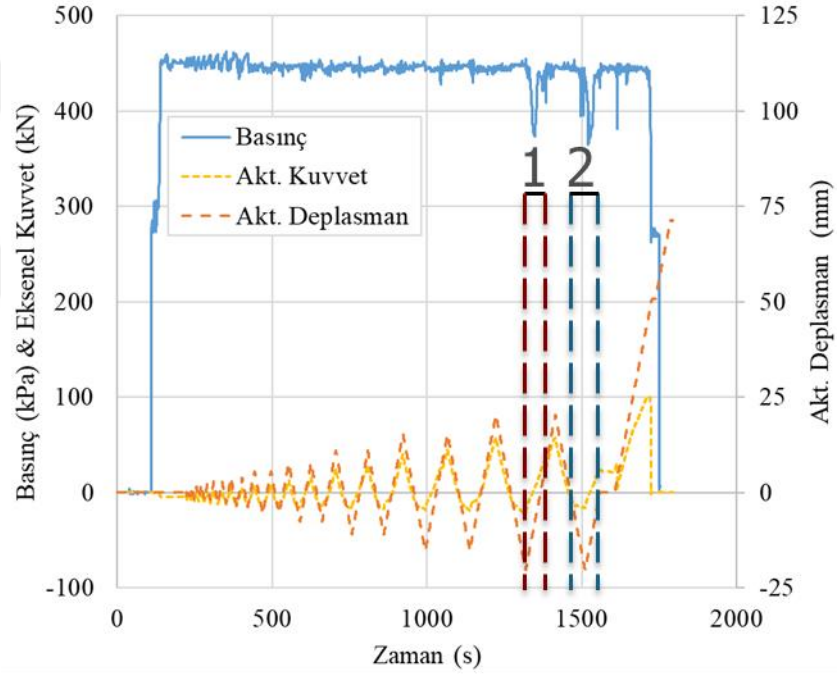
#### 5.4.6. Tekrarlı Yükleme Testi (PS55)

Northern tarafından üretilen PVC boru üzerinde gerçekleştirilen son tekrarlı yükleme testi PS55 olmuştur. PS55'in tekrarlı dizisi için dakikada 25.4 mm hızında yükleme protokolü 2 (LP-2) kullanılmıştır. LP-2, önceki tekrarlı testin yükleme protokolü ile aynı prosedürü izleyerek zaman tanımlı yükleme verilerine dönüştürülmüştür. Tekrarlı dizi için aynı tepe yer değiştirme değerleri kullanılarak, **Şekil 5.56**'de gösterildiği gibi yaklaşık 22.5 dakikalık bir zaman tanımlı yükleme verisi elde edilmiştir. Tekrarlı yüklemekten sonra yer değiştirme kontrolü altında dakikada 25.4 mm hızında çekme yüklemesi gerçekleştirilmiştir. **Şekil 5.57**'de test sırasında zamana bağlı olarak su basıncı, aktüatör kuvveti, aktüatör yer değiştirmesi ve sızıntı oluşumu gösterilmektedir. Son döngünün çekme kısmına kadar ortalama su basıncı yaklaşık 448 kPa (65 psi) olmuş ve son döngü yüklemesi sırasında su basıncı 380 kPa'a (55 psi) düşmüştür. Tekrarlı yükleme işlemi sırasında, ilk olarak son döngüdeki (20. döngü) çekme yükleme aşamasının başlangıcında sabit bir sızıntı gözlenmiş ve bu çekme aşaması boyunca devam etmiştir. Basınç fazının ortasında tekrar sabit bir sızıntı meydana gelmiş ve tekrarlı yüklemenin sonuna kadar devam etmiştir. Tekrarlı yüklemekten sonra, hasara kadar çekme yüklemesi gerçekleştirilmiştir. **Şekil 5.58a** aktüatör kuvveti ile aktüatör yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Maksimum kuvvet 100.8 kN (22.7 kips) ve maksimum aktüatör yer değiştirmesi 49.02 mm (1.93 inç) olmuştur. **Şekil 5.58b** aktüatör kuvveti ile boru bağlantısı yer değiştirmesini göstermektedir. Tekrarlı yükleme sırasında, maksimum eksenel kuvvet basınç ve çekme kısımlarında sırasıyla 16.5 kN (-3.7 kips) ve 57.5 kN'a (12.9 kips)

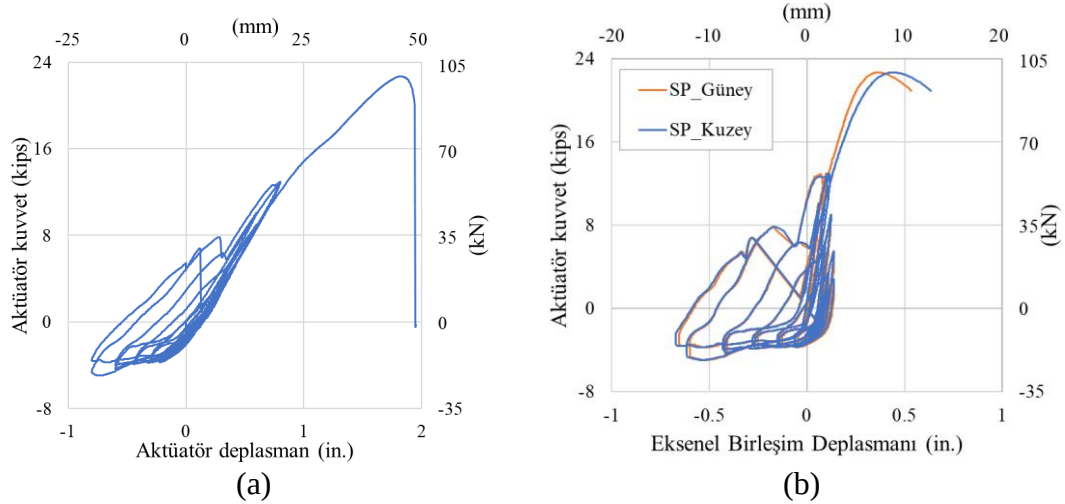
ulaşmıştır. Birleşim deplasmanı hasardan hemen önce yaklaşık 16 mm (0.63 inç) olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.56: PS55 için tekrarlı yükleme protokolü.

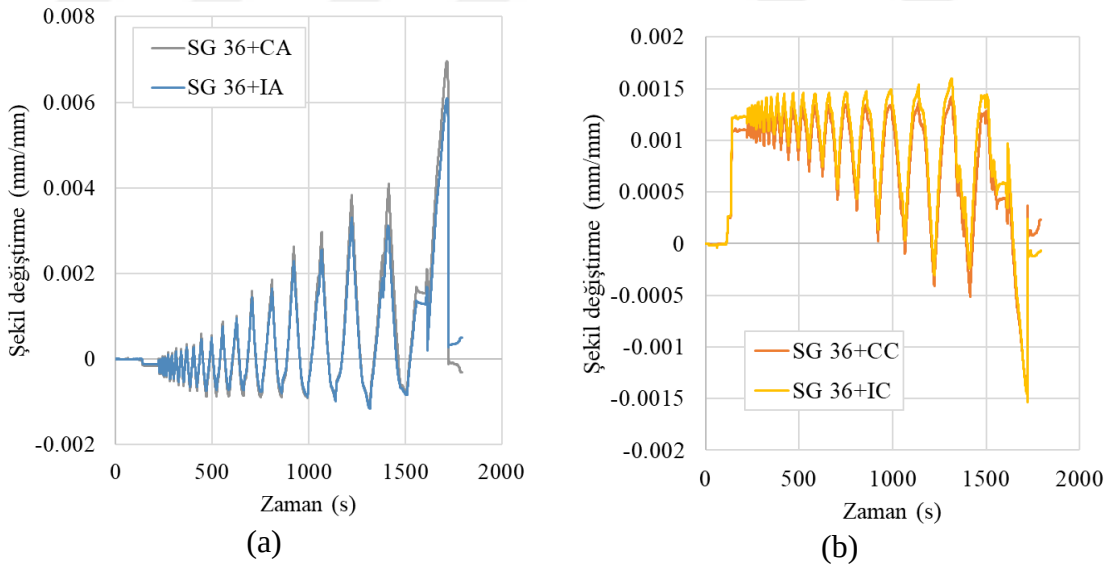


Şekil 5.57: İç basınç, aktüatör yer değiştirmesi ve zamana karşı eksenel kuvvet için PS55 sonuçları.



**Şekil 5.58:** PS55 kuvveti ve a) aktüatör ve b) birleşim deplasmanı.

**Şekil 5.59** test süresi boyunca eksenel ve ortalama çevresel şekil değiştirmeleri göstermektedir. Testin başlangıcında sistem tamamen basınçlandırılmış ve çevresel şekil değiştirmede bir artış gözlenmiştir. Maksimum eksenel şekil değiştirme %0.69 ve maksimum çevresel şekil değiştirme -%0.15 olmuştur. **Şekil 5.60** test öncesi ve hasar sonrası boru bağlantısını göstermektedir. Hasar, RieberLok conta dişlerinin boru ile birleştiği yerde borunun düz ucunda çevresel kırılmadan kaynaklanmıştır.



**Şekil 5.59:** PS55 için a) eksenel ve b) çevresel şekil değiştirme.



**Şekil 5.60:** a) Testten önce PS55 birleşimi ve b) bağlantı hasarı.

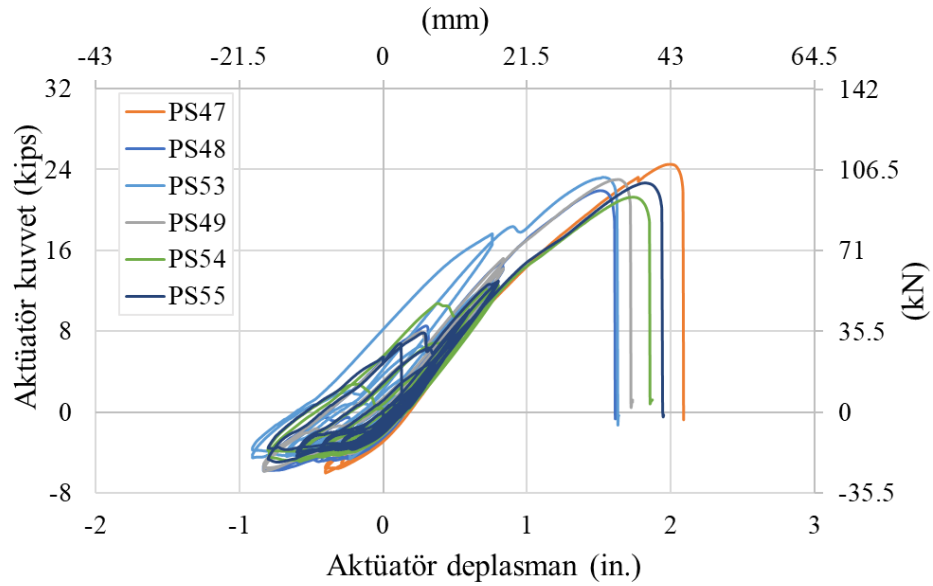
#### 5.4.7. Tekrarlı Yükleme Testlerinin Değerlendirilmesi

Bu tez kapsamında, VinylTech ve Northern şirketleri tarafından üretilen PVC borular üzerinde altı adet tekrarlı yükleme testi gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki bölüm, eksenel tekrarlı test sonuçlarının bir özeti olan **Tablo 5.4** ile başlayarak gerçekleştirilen tekrarlı testlerin bir karşılaştırmasını sunmaktadır. İki farklı yükleme protokolü (LP-1 ve LP-2) kullanılarak eksenel tekrarlı testler gerçekleştirilmiştir. Tekrarlı yüklemeler tüm tekrarlı testler için dakikada 25.4 mm bir hızda yer değiştirme kontrolü altında gerçekleştirilirken, tekrarlı yükleme yalnızca PS54 için dakikada 228.6 mm'lik bir hızda gerçekleştirilmiştir. Muflu bağlantı kapasitesinin eksenel performansı tekrarlı yükleme ve çekme yüklemesi altında farklı yükler ve yükleme hızları için incelenmiştir. **Şekil 5.61** her bir tekrarlı test için aktüatör yer değiştirmesine göre aktüatör kuvvetini göstermektedir. Tekrarlı yükleme altındaki maksimum eksenel kuvvetler VinylTech ve Northern boruları için sırasıyla ortalama 116 kN (24.5 kips) ve 103 kN (23.2 kips) olmuştur. Kuvvetler ve aktüatör yer değiştirmeleri tüm tekrarlı testler için oldukça benzer gerçekleşmiştir. **Şekil 5.62** ve **Şekil 5.63** muflu boru bağlantıları üzerinde uygulanan tekrarlı yüklemeler altında gerçekleşen yer değiştirmeleri ve eksenel kuvvetleri göstermektedir. Maksimum boru bağlantısı yer değiştirmeleri 7.6 ile 22.1 mm (0.3 inç ile 0.87 inç) arasında değişmektedir. Tüm tekrarlı testler %0.64 ile %0.71 arasında maksimum eksenel şekil değiştirme değerlerine sahiptir. RieberLok contanın performansını değerlendirdiğimizde, Northern ve VinylTech ürünleri eksenel tekrarlı testler altında oldukça benzer kuvvet ve bağlantı yer değiştirme kapasitesi göstermiştir, ancak her iki boru türü için de çeşitli hasar mekanizmaları gözlemlenmiştir. Tekrarlı testler için üç farklı hasar mekanizması gözlemlenmiştir: Genişletilmiş boru ucunda çevresel kırılma (PS48 ve PS55), conta

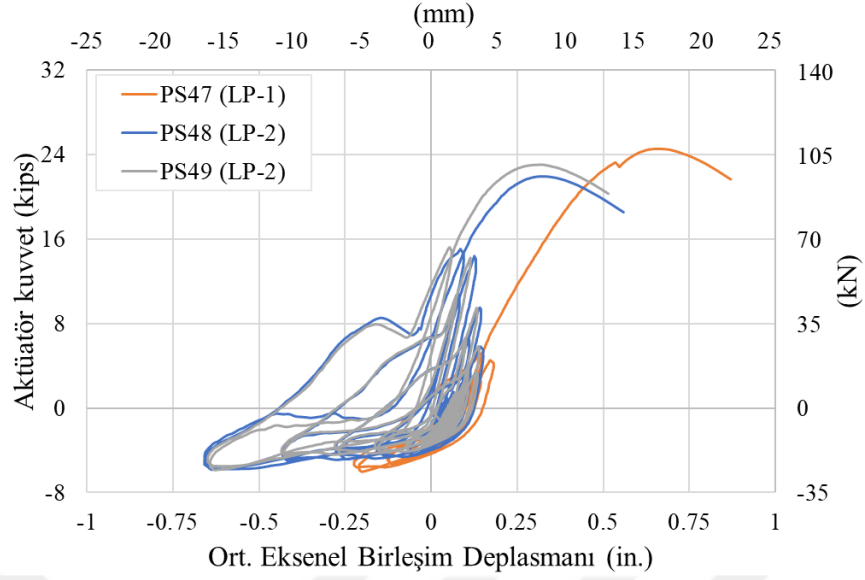
hasarı (PS47, PS49 PS54) ve bağlantının düz ucunda kırılma (PS53). Ayrıca VinylTech borularda tekrarlı yüklemeler sırasında su sızıntısı gözlenmezken Northern borularında önemli düzeylerde sızıntılar gözlemlenmiştir.

**Tablo 5.4:** Tekrarlı yükleme testlerinin karşılaştırılması.

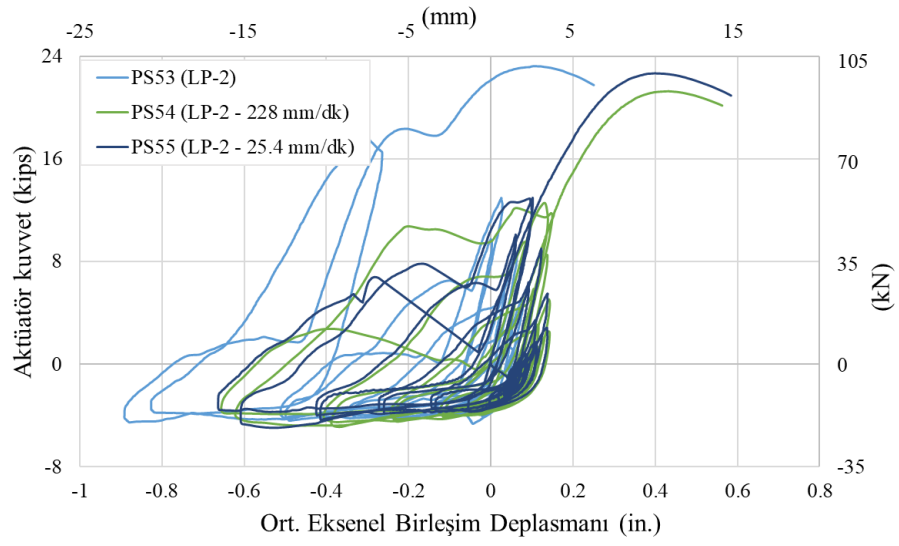
| Test No  | Boru Üreticisi | Yükleme Protok. | Maksimum Eksenel Kuvvet |       | Maksimum Aktüatör Deplasmanı |         | Maksimum Eksenel Şekil Değiştirme |      | Boru Bağlantısı Deplasmanı |         |
|----------|----------------|-----------------|-------------------------|-------|------------------------------|---------|-----------------------------------|------|----------------------------|---------|
|          |                |                 | kips                    | (kN)  | in                           | (mm)    | in/in                             | %    | in                         | (mm)    |
| PS47     | VinylTech      | LP-1            | 24.5                    | (109) | 2.08                         | (52.83) | 0.0071                            | 0.71 | 0.87                       | (22.09) |
| PS48     | VinylTech      | LP-2            | 21.9                    | (97)  | 1.6                          | (40.64) | 0.0064                            | 0.64 | 0.55                       | (13.97) |
| PS49     | VinylTech      | LP-2            | 23.0                    | (102) | 1.71                         | (43.43) | 0.0067                            | 0.67 | 0.51                       | (12.95) |
| PS53     | Northern       | LP-2            | 23.2                    | (103) | 1.62                         | (41.14) | 0.0067                            | 0.67 | 0.30                       | (7.62)  |
| PS54     | Northern       | LP-2            | 21.3                    | (94)  | 1.85                         | (46.99) | 0.0066                            | 0.66 | 0.65                       | (16.51) |
| PS55     | Northern       | LP-2            | 22.7                    | (100) | 1.93                         | (49.02) | 0.0069                            | 0.69 | 0.63                       | (16.00) |
| Ortalama |                |                 | 22.8                    | (100) | 1.79                         | (45.67) | 0.0067                            | 0.67 | 0.59                       | (14.86) |



**Şekil 5.61:** Tekrarlı yükleme testleri için kuvvet ve aktüatör yer değiştirme karşılaştırması.



**Şekil 5.62:** PS47, PS48 ve PS49 tekrarlı yükleme testleri için kuvvet ve birleşim deplasmanı.



**Şekil 5.63:** PS53, PS54 ve PS55 tekrarlı yükleme testleri için kuvvet ve birleşim deplasmanı.

## 6. SONUÇLAR

Deprem sırasında boru hatları, geçici ve kalıcı zemin deformasyonu nedeniyle çeşitli yüklere maruz kalmaktadır. Bu çalışmada özellikle sıvılaşma nedeniyle boru hatlarının maruz kaldığı etkiler ele alınmıştır. Altyapı sistemlerinin sıvılaşma gibi doğal afetlere karşı sismik performansının belirlenmesi ve sıvılaşmaya karşı direnci artıracak tasarımlar uygulanması deprem güvenliği için kritiktir. Bu nedenle farklı boru tipleri için hasar ilişkileri, sıvılaşma etkilerini incelemek için vaka analizleri ve ayrıca yeni nesil boru bağlantı elemanları ile eksenel yükleme deneyleri yapılarak kapasite ve sismik talep araştırmaları yapılmıştır.

Onarım oranı (RR), sıvılaşma şiddet sayısı (LSN) ve en yüksek yer hızı (PGV) gibi çeşitli parametreler, deprem sırasında boru hattı performansını değerlendirmek için kullanılabilir. Bu çalışma, boru doğrultularını dikkate alarak kalıcı zemin deformasyonunun boru hatları üzerindeki etkisini ortaya koymayı amaçlamıştır. Farklı boru türlerinde 1502 boru hasarını içeren 2011 Christchurch depreminin hasar veri seti, sıvılaşma bölgelerindeki asbestli çimento (AC), dökme demir (CI) ve polivinil klorür (PVC) boru hasarlarına odaklanarak analiz edilmiştir. Sıvılaşma olayının neden olduğu kalıcı zemin deformasyonları borularda önemli hasara yol açmıştır. RR ile yatay ve düşey yer değiştirme parametrelerini kullanarak AC, CI ve PVC borular için korelasyonlar oluşturulmuştur. Bu çalışma ayrıca, boru doğrultusunun boru hattı davranışı üzerindeki etkilerini, özellikle sıvılaşmanın etkisini tahmin etmede ortaya çıkarmak için yatay ve düşey açısal bozulmalar tek bir parametre ( $\beta_{com}$ ) olarak dikkate almıştır. Farklı boru tipleri için boru doğrultusunun etkisi ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Sismik şekil değiştirme talepleri genellikle eksenel şekil değiştirme için %0.01 ila %1 arasında değişmektedir [Davis vd., 2019]. Depremlerdeki geçici yer değiştirme tipik olarak %0,01 ila %0,1 aralığında eksenel şekil değiştirmeye neden olur [O'Rourke vd., 2015] ve bazı çok düşük seviyeli kalıcı eksenel ve yanal zemin şekil değiştirmelere neden olur. Boru hatlarının depreme karşı duyarlılığını değerlendirmek için büyük bir veri setinin kullanılması, RR ile anlamlı ilişkiler kurmak açısından önemlidir. AC borular için %0.5 ve CI borular için %0.3 eksenel şekil değiştirmeye kadar anlamlı ilişkiler elde edilmiştir. Açısal bozulma değerleri için, AC borular için %0.95'e ve CI borular için %0.85'e kadar anlamlı korelasyonlar elde edilmiştir.

AC borular yatay açısai bozulmaya ( $\gamma_{xy}$ ) düşey açısai bozulmadan ( $\beta_{vd}$ ) daha duyarlıdır. CI borular hem yatay hem de düşey bozulma altında benzer performans sergilerken, PVC borular düşey açısai bozulma altında daha iyi performans gösterir. Güçlü yer hareketi nedeniyle, AC, CI ve PVC boruların tümü hem yatay hem de düşey açısai bozulmalar altında daha yüksek RR değerlerine sahiptir; AC borular, yapım yılından kaynaklanan yapısal bozulma nedeniyle en yüksek RR değerlerine sahiptir ve bu da onları CI ve PVC borulara kıyasla daha kırılğan hale getirir. Yatay, düşey ve eksenel şekil değıştirmelerin (çekme ve basınç) boru hatları üzerindeki etkisini daha iyi anlamak için tek bir grafikte birinci dereceden bir polinom modeli kullanılmıştır. Yatay ve düşey açısai bozulmalar ( $\beta_{com}$ ) altında, AC boruları CI borularına göre daha yüksek kırılğanlık göstermektedir. AC boruların yapısal özellikleri, eksenel şekil değıştirme ve birleşik açısai bozulma ( $\beta_{com}$ ) altındaki performansları için kritik öneme sahiptir. AC borular yatay eksenel basınç şekil değıştirmelere daha yüksek hassasiyet sergilerken, CI borular eksenel çekme ve basınç şekil değıştirmesi etkileri altında benzer performans göstermektedir.

Geliştirilen ilişkilerin istatistiksel yönlerini ele almak üzere RR, eksenel şekil değıştirmeler ve birleşik açısai bozulma için çoklu doğrusal regresyonlar gerçekleştirilmiştir. Ölçeklendirilmiş eksenel şekil değıştirme ve birleşik açısai bozulma parametresi ( $LS^aAD^b$ ), birleşik açısai bozulmaya göre normalize edilmiş eksenel mutlak, çekme ve basınç şekil değıştirmesidir. Özellikle çekme şekil değıştirmesinde yüksek  $R^2$  değerleri, ilişkilerin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma sıvılaşma kaynaklı zemin hareketlerine maruz kalan gömülü boru hatları için tüm şekil değıştirmeleri araştıran ilk kapsamlı çalışmalardan biridir. Bu korelasyonlar, diğer hasar veri setleri için daha iyi sonuçlar sağlayabilir. Araştırma sonuçları, boru hatlarının performansının iyileştirilmesi ve gelecekteki depremlere karşı güçlendirilmesi için çok önemlidir.

Tez kapsamında sıvılaşma nedeniyle altyapı hasarı gerçekleşen bölgeler için nümerik vaka analizleri uygulanmıştır. Christchurch için uygulanan nümerik simülasyonlar, ampirik modeller ve yüksek çözünürlüklü LiDAR verilerinden yararlanarak sıvılaşma kaynaklı oturmaları değerlendirmek için çeşitli yaklaşımlar kullanmanın tutarlılığını göstermektedir. Nümerik modelleme çerçevesinde, sıvılaşabilir zeminlerin deprem etkileri altındaki davranışını yakalamak için hem PM4Sand hem de UBC3D-PLM

bünye modelleri kullanılmıştır. Christchurch depremi nedeniyle gerçekleşen 150 mm çapında PVC boru hasarının olduğu bölge için PM4Sand modeli boşluk suyu basıncı oluşumunu ve ardından dağılmayı etkili bir şekilde simüle ederek 8.8 cm'lik bir düşey oturma ile sonuçlanmıştır. Buna karşılık, boşluk suyu basıncı dağılımını simüle etmeyen UBC3D-PLM modeli, 3.5 cm'lik oldukça düşük bir oturma kaydederek, sıvılaşma sonrası oturma tahminlerinde dağılma etkilerinin önemini göstermiştir. Düşey oturmalar, sınır etkilerini en aza indirmek için yüzeyin merkezinde hesaplanmış ve beklenen saha tepkileriyle yakından uyumlu olan doğru değerlendirmeler sağlanmıştır.

Tahmin güvenilirliğini artırmak için, **Ishihara ve Yoshimine [1992]** ve **Zhang vd., [2002]** tarafından geliştirilen ampirik yaklaşımlar serbest alan koşullarındaki oturmaları tahmin etmek için uygulanmıştır. Her iki yöntem de sırasıyla 11.1 cm ve 11.3 cm'lik düşey oturmalar sağlayarak kayda değer bir tutarlılık göstermiş ve yaygın olarak kullanılan bu ampirik ilişkilerin güvenilirliğini güçlendirmiştir. Ayrıca, Christchurch deprem sonrası araştırmalarından elde edilen yüksek çözünürlüklü LiDAR ölçümleri, çalışma alanı içinde 10 cm ila 20 cm arasında değişen oturma değerleri bildirmiştir. LiDAR veri seti, nümerik ve ampirik bulgularla iyi bir uyum göstermekte ve bu çalışmada üretilen oturma tahminlerinin doğrulamaktadır.

Tez kapsamında Kahramanmaraş depremlerinden sonra bölgede arazi inceleme çalışmaları yürütülmüş ve sıvılaşma nedeniyle meydana gelen altyapı hasarları incelenmiştir. 7.7 Mw büyüklüğündeki Pazarcık nedeniyle İskenderun yağmur suyu yükseltme istasyonunda meydana gelen hasar Plaxis 2D programı ile modellenmiştir. UBC3D-PLM model ile yapılan sıvılaşma analizleri ile bölgede önemli bir sıvılaşma potansiyeli olduğu ortaya konmuştur. Nümerik model ile ele alınan su alma yapısında 14 cm'ye varan yükselmeler meydana gelmiştir. Deprem sonrasında yürütülen saha gözlem çalışmalarında yaklaşık 30 cm yükselme tespit edilmiştir. Bölgede meydana gelen büyük deformasyonlar bu hareketin yalnızca yükselmeden kaynaklandığını söylemek için yeterli değildir. Dolayısıyla UBC3D ile gözlemlenen 14 cm'lik yükselmenin meydana gelen deformasyonlarla uyumlu olduğu görülmektedir.

Vaka çalışması 1 için sonlu elemanlar yöntemiyle ve diğer yöntemlerle elde edilen sonuçlar, PVC boru hasarı için uygulanan üç boyutlu vaka analizinin doğrulamasında kullanılmıştır. PVC boru hasarının gerçekleştiği bu bölge için elde edilen sonuçlar kullanılarak FLAC3D sonlu farklar programında üç boyutlu vaka analizi

uygulanmıştır. FLAC3D içerisinde bulunan P2PSand davranış modeli ile uygulanan sıvılaşma analizlerinde deprem süresi 95 saniyeye kadar uzatılarak hedef oturma miktarlarına ulaşılmıştır. Öte yandan aynı zemin katmanlarında (SM-1 ve SP) sıvılaşmanın meydana geldiği  $R_u$  parametresi ile tespit edilmiştir. Sismik yükleme nedeniyle boru üzerinde 20 cm'ye varan farklı oturmalar meydana gelmiştir. Düşey açısız bozulma değerini 18 m'lik boru uzunluğu dikkate alınarak hesaplandığında  $2.7 (x10^{-3})$  olarak hesaplanmıştır. Christchurch dağıtım sistemi için geliştirilen hasar ilişkileri incelendiğinde PVC borular için onarım oranı (RR) değeri ortalama 0.5 olarak belirlenmiştir. Ayrıca boru ekseninde yaklaşık 1.91 cm'lik bir deplasman meydana gelmiştir. Fakat boru hattının model içerisinde rijit bir bağlantısı olmadığı için eksenel şekil değiştirme miktarı %0.0027 olarak hesaplanmıştır. Ancak boru hattını sonsuz uzunlukta kabul ederek ve meydana gelen 1.91 cm'lik eksenel deplasmanın 6 m'lik bir segmentte olduğu kabul edilirse %0.31 eksenel şekil değiştirme meydana gelmektedir. Hasar ilişkileri incelendiğinde PVC boru için 1-1.5 aralığında onarım oranı oluşmaktadır. Deneysel çalışmalarda ise PVC boru hattı ortalama %0.67 eksenel şekil değiştirme anında hasara uğramıştır. Nümerik analizde deprem yönünün boru doğrultusuna dik olduğu unutulmamalıdır. Sismik etkiler altında boru hattı farklı yönlerden aynı anda sismik yüklere maruz kalmaktadır.

Tez kapsamında Colorado Boulder Üniversitesi çatısı altında bulunan CIEST laboratuvarında yeni nesil (RieberLok) contalı PVC boru bağlantısının çekme ve tekrarlı yükleme altındaki eksenel performansının değerlendirilmesine odaklanarak toplamda 6 çekme ve 6 tekrarlı yükleme testi uygulanmıştır. Test numuneleri heyelan, faylanma ve sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma dahil olmak üzere deprem kaynaklı zemin deformasyonunun neden olduğu gibi önemli deformasyonlar altında boru bağlantılarının eksenel performansını değerlendirmek için dış ve iç yükleme koşullarına tabi tutulmuştur. Çekme testi sonuçları incelendiğinde, üç farklı hasar (göçme) mekanizmasının mevcut olduğu görülmüştür. Farklı hasar mekanizmalarına rağmen, bağlantıların kuvvet ve birleşim deplasman kapasitesi tüm çekme testlerinde önemli ölçüde tutarlıdır ve RieberLok contalı bağlantının ortalama kuvvet kapasitesi tüm çekme testleri için 116 kN (26.1 kips) olarak gözlemlenmiştir. Tekrarlı yükleme testlerinde, VinylTech ve Northern boruları için tekrarlı yükleme sırasında 10.2 mm (0.4 inç) bağlantı yer değiştirmesine kadar herhangi bir sızıntı gözlenmemiştir. Buna ek olarak, farklı yükleme protokolleri ve yükleme hızları kullanılmasına rağmen,

birleşim kapasite kuvveti ve deplasman kapasiteleri tüm tekrarlı testler için oldukça benzerdir. Eksenel kuvvet ve birleşim deplasmanı sırasıyla ortalama 101 kN (22.8 kips) ve 15 mm (0.59 inç) olmuştur. Özellikle, tekrarlı yükleme maksimum kuvvet kapasitesini sadece çekme testlerine kıyasla yaklaşık %12.5 oranında azaltmıştır. Tekrarlı testlerin birkaçında bazı sızıntılar gözlenmiş olsa da VinylTech ve Northern ürünleri için boru bağlantılarının kuvvet kapasitesi veya bağlantı deplasmanı üzerinde gözlemlenebilir bir etki olmamıştır.

Çekme ve tekrarlı yükleme sırasında PVC boru üzerinde elde edilen eksenel şekil değiştirmeler sırasıyla ortalama %0.78 ve %0.67 olarak gözlemlenmiştir. Christchurch'te bulunan PVC boru hatları için geliştirilen eksenel çekme şekil değiştirmesi hasar ilişkisi göz önüne alındığında onarım oranı (RR) (hasar/km) değerinin 4'ün üzerinde oluşacağı görülmektedir. Deneysel testlerde meydana gelen hasarların boru birleşim bölgesinden kaynaklandığı unutulmamalıdır. Dolayısıyla doğal afetler nedeniyle meydana gelen hasarların kayıtlarının tutulması bu tür araştırmalar için önem arz etmektedir.

Sonuç olarak boru doğrultusunda meydana gelebilecek sismik yüklemenin farklı boru bağlantıları için değerlendirilmesi ve sismik taleplerin belirlenmesi altyapı sistemlerinin tasarımı için kritik öneme sahiptir. Bu çalışma ile coğrafi bilgi sistemleri, çeşitli nümerik yöntemler ve deneysel çalışmalar ile boru hatlarının ve altyapı sistemlerinin sismik performansları ayrıntılı olarak sunulmuştur.

## KAYNAKLAR

- Argyrou C., Bouziou D., O'Rourke T. D., Stewart H. E., (2018). Retrofitting pipelines with cured-in-place linings for earthquake-induced ground deformations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, 156-168.
- AWWA, (2007), "AWWA C900-07 Polyvinyl Chloride (PVC) Pressure Pipe and Fabricated Fittings, 4 In. Through 12 In. (100 mm Through 300 mm), for Water Transmission and Distribution", American Water Works Association, 44. DOI: 10.12999/AWWA.C900.07.
- Ballantyne D., (2010). Seismic vulnerability assessment and design of pipelines. *Journal-American Water Works Association*, 102(5), 88-97.
- Bellagamba X., Bradley B. A., Wotherspoon L. M., Lagrava W. D., (2019). A decision-support algorithm for post-earthquake water services recovery and its application to the 22 February 2011 Mw 6.2 Christchurch earthquake. *Earthquake Spectra*, 35(3), 1397-1420.
- Bento R., Falcão-Silva M. J., (2004), "Analytical model for the seismic behavior of buried pipeline when subjected to ground liquefaction", In Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, Canada, 1-6.
- Berty N. W., Wham B. P., Ihnotic C. R., Ramos J. L., Rose H. R., (2022), "Seismic performance classification of hazard resilient iPVC pipeline systems". In *Pipelines 2022*, 232-241.
- Bouziou D., (2015), "Earthquake-induced ground deformation effects on buried pipelines", Doktora Tezi, Cornell Üniversitesi, Ithaca, New York.
- Bouziou D., O'Rourke T. D., (2017). Response of the Christchurch water distribution system to the 22 February 2011 earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 97, 14-24.
- Bray J. D., Dashti S., (2014). Liquefaction-induced building movements. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12, 1129-1156.
- Canterbury Geotechnical Database, (2012). Liquefaction interpreted from aerial photography, map layer CGD0200-11 Feb 2013; August 2012. <https://canterburygeotechnicaldatabase.projectorbit.com> Erişim Tarihi: 14.06.2022
- Castiglia M., Fierro T., Santucci de Magistris F., (2020). Pipeline performances under earthquake-induced soil liquefaction: state of the art on real observations, model tests, and numerical simulations. *Shock and Vibration*, 2020(1), 8874200.
- Cetin K. O., Bilge H. T., Wu J., Kammerer A. M., Seed R. B., (2009). Probabilistic model for the assessment of cyclically induced reconsolidation (volumetric)

settlements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(3), 387-398.

Ceylan M. (2020), “İçme suyu boru hasarlarının detaylı incelenmesi: Christchurch depremi örneği” Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ceylan M., Yağcıoğlu B., Nacaroglu E., Toprak S., (2023). Sismik etkiler altında gömülü boru davranışı: Christchurch depremi vaka analizi. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, 6(2), 471-487.

Cheng Z., (2018). A practical 3D bounding surface plastic sand model for geotechnical earthquake engineering application. In *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V*, Reston, VA, American Society of Civil Engineers, 37-47.

Chiaradonna A., d’Onofrio A., Bilotta E., (2019). Assessment of post-liquefaction consolidation settlement. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17, 5825-5848.

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

Cubrinovski M., Bray J. D., Taylor M., Giorgini S., Bradley B., Wotherspoon L., Zupan J., (2011), “Soil liquefaction effects in the central business district during the February 2011 Christchurch earthquake”, *Seismological Research Letters*, 82(6), 893-904.

Cubrinovski M., Hughes M., Bradley B., Noonan J., Hopkins R., McNeill S., English G., (2014), “Performance of horizontal infrastructure in Christchurch City through the 2010-2011 Canterbury earthquake sequence”, Report.

Dafalias Y. F., Manzari M. T., (2004). Simple plasticity sand model accounting for fabric change effects. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(6), 622-634.

Dashti S., Bray J. D., Pestana J. M., Riemer M., Wilson D., (2010). Centrifuge testing to evaluate and mitigate liquefaction-induced building settlement mechanisms. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(7), 918-929.

Davis C. A., (2019). A proposed performance-based seismic design process for lifeline systems. In *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions*, CRC Press, 1986-1993.

El Hmadi K., O'Rourke M. J., (1988). Soil springs for buried pipeline axial motion. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(11), 1335-1349.

Esfeh P. K., Kaynia A. M., (2019). Numerical modeling of liquefaction and its impact on anchor piles for floating offshore structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 127, 105839.

European Standard Eurocode 8, (2006), “Design of structures for earthquake resistance – Part 4: Silos, tanks and pipelines”. Report.

GNS Science, (2013), “The most recent aftershock map”, <http://www.gns.cri.nz/Home/Our-Science/Natural-Hazards/Recent-Events/Canterbury-quake/Recent-aftershock-map>

Hassani R., Basirat R., (2019). A 3D numerical modeling of polyethylene buried pipes affected by fault movement. *Engineering Science and Technology*, 22(2), 482-488.

Ihnotic C. R., (2019), “Seismic Evaluation of Hazard-Resistant Lifelines: Thermoplastic Pipes and Connections”, M.S. Thesis, Boulder, CO: University of Colorado Boulder.

International Organization for Standardization (ISO), (2020), “ISO 16134:2006 Earthquake- and subsidence-resistant design of ductile iron pipelines”, Switzerland: ICS: 23.040.10, TC/SC: ISO/TC 5/SC 2.

Ishihara K., Araki K., Toshiyuki K., (2013), “Liquefaction in Tokyo bay and Kanto regions in the 2011 great east Japan earthquake”, In *Earthquake Geotechnical Engineering Design* (pp. 93-140), Springer International Publishing.

Ishihara K., Yoshimine M., (1992). Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundations*, 32(1), 173-188.

ISO 16134:2006, (2006), “Earthquake- and subsidence-resistant design of ductile iron pipelines”.

Itasca, (2024), <https://docs.itascacg.com/>, (Erişim Tarihi: 01.10.2023)

Juang C. H., Ching J., Wang L., Khoshnevisan S., Ku C. S., (2013). Simplified procedure for estimation of liquefaction-induced settlement and site-specific probabilistic settlement exceedance curve using cone penetration test (CPT). *Canadian Geotechnical Journal*, 50(10), 1055-1066.

Kaya E. S., Uckan E., O'Rourke M. J., Karamanos S. A., Akbas B., Cakir F., Cheng Y., (2017). Failure analysis of a welded steel pipe at Kullar fault crossing. *Engineering Failure Analysis*, 71, 43-62.

Kennedy R. P., Chow A. M., and Williamson R. A., (1977). Fault Movement Effects on Buried Oil Pipeline. *Transportation Engineering Journal of the American Society of Civil Engineers*, 103(5), 617-633.

Maurer B. W., Green R. A., Cubrinovski M., Bradley B. A., (2015), “Assessment of CPT-based methods for liquefaction evaluation in a liquefaction potential index framework”, *Geotechnique*, 65(5), 328-336.

Mehrzhad B., Haddad A., Jafarian Y., (2016). Centrifuge and numerical models to investigate liquefaction-induced response of shallow foundations with different contact pressures. *International Journal of Civil Engineering*, 14, 117-131.

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

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

New Zealand Geotechnical Database (NZGD), "Map viewer [online]", (2020) <https://www.nzgd.org.nz/ARCGISMapViewer/mapviewer.aspx> Erişim Tarihi: 10.08.2021

O'Rourke T. D., (1998), "An overview of geotechnical and lifeline earthquake engineering", In P. Dakoulas & M. Yegian (Eds.), Geotechnical Special Publication No. 75, Proceedings of Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference (Vol. 2, pp. 1392–1426), ASCE.

O'Rourke M. J., Liu X., (1999), "Response of buried pipelines subject to earthquake effects", Monograph no. 3: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY. (<http://hdl.handle.net/10477/588>).

O'Rourke T. D., Jeon S. S., Toprak S., Cubrinovski M., Hughes M., Ballegooy S., Bouziou D., (2014). Earthquake response of underground pipeline networks in Christchurch, NZ. *Earthquake Engineering Research Institute, EERI*, Vol. 30, No. 1, pp. 183-204.

O'Rourke T. D., Jung J. K., Argyrou C., (2016). Underground pipeline response to earthquake-induced ground deformation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 91, 272-283.

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

O'Rourke T. D., Toprak S., (1997). GIS assessment of water supply damage from the Northridge earthquake. *Geotechnical Special Publication*, ASCE, Frost, J. D. (Ed.) New York, pp. 117-131.

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

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

Popescu R., Prevost J. H., (1993). Centrifuge validation of a numerical model for dynamic soil liquefaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 12(2), 73-90.

Rao P., Wu Z., Cui J., (2022). Analysis of deformation of adjacent buried pipeline under rockfall impact load. *Geotechnique and Geology Engineering*, 40(3), 1463–1474.

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

Shabani, B., Jeng, D. S., (2007), “Three-dimensional analysis of momentary liquefaction near submarine pipelines”, In 16th Australasian Fluid Mechanics Conference, Gold Coast, Australia (pp. 3-7).

Shamoto Y., Sato M., Zhang J., (1996). Simplified estimation of earthquake-induced settlements in saturated sand deposits. *Soils and Foundations*, 36(1), 39-50.

Shamoto Y., Zhang J. M., Tokimatsu K., (1998). New charts for predicting large residual post-liquefaction ground deformation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17(7-8), 427-438.

Subaşı O., İyisan, R. (2022). Sıvılaşma nedeniyle meydana gelen oturmaların PM4Sand bünye modeli ile incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(3), 378-388.

Sumer B. M., Truelsen C., Fredsøe J., (2006). Liquefaction around pipelines under waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 132(4), 266-275.

Takada S., Suzuki T., Koike T., Ueno J., Ogawa Y., Oguchi N., Matsumoto M., (2001). Seismic design of buried pipelines for liquefaction-induced large ground displacement. *WIT Transactions on The Built Environment*, 57.

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

Tatsuoka F., Kato H., Kimura M., Pradhan T. B., (1988), “Liquefaction strength of sands subjected to sustained pressure”, *Soils and Foundations*, 28(1), 119-131.

Tokimatsu K., Hino K., Suzuki H., Ohno K., Tamura S., Suzuki Y., (2019). Liquefaction-induced settlement and tilting of buildings with shallow foundations based on field and laboratory observation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 124, 268-279.

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

Toprak S., Taskin F., (2007). Estimation of earthquake damage to buried pipelines caused by ground shaking. *Natural Hazards*, 40, 1-24.

Toprak, S., Koc, A. C., Cetin, O. A., Nacaroglu, E., (2008), “Assessment of Buried Pipeline Response to Earthquake Loading by Using GIS”, In Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering.

Toprak, S., Nacaroglu, E., Ceylan, M., O’Rourke, T. D., (2022), “Effects of Ground Strain and Pipeline Orientation on Pipeline Damage During Earthquakes”, In Lifelines 2022, pp. 489-499.

Toprak S., Nacaroglu E., Koc A. C., O’Rourke T. D., Hamada M., Cubrinovski M., Van Ballegooy S., (2018). Comparison of horizontal ground displacements in Avonside area, Christchurch from air photo, LiDAR and satellite measurements

regarding pipeline damage assessment. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, 4497-4514.

Toprak S., Nacaroglu E., Van Ballegooy S., Koc A. C., Jacka M., Manav Y., Torvelainen E., O'Rourke T. D., (2019). Segmented pipeline damage predictions using liquefaction vulnerability parameters. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125 (2019): 105758.

Toprak S., Wham B. P., Nacaroglu E., Ceylan M., Dal, O., Senturk A. E., (2024a). Impact of Seismic Geohazards on Water Supply Systems and Pipeline Performance: Insights from the 2023 Kahramanmaras Earthquakes. *Engineering Geology*, 340: 107681.

Toprak, S., Wham, B. P., Nacaroglu, E., Ceylan, M., Dal, O., Senturk, A. E., (2024b), "The Effects of February 6, 2023 Kahramanmaras Earthquakes on Pipelines", In Proceedings of the 18th World Conference on Earthquake Engineering, Milan, 30 June–5 July.

Toprak, S., Wham, B. P., Nacaroglu, E., Ceylan, M., Dal, O., Senturk, A., Tunc, S. C., Ince, M. B., (2024c), "Field Observations on Water Systems After the February 2023 Kahramanmaras Earthquakes (Mw 7.7, Mw 7.6)", DesignSafe-CI.

Toprak S., Zulfikar A. C., Mutlu A., Tugsal U. M., Nacaroglu E., Karabulut S., ... Karimzadeh S. (2024). The aftermath of 2023 Kahramanmaras earthquakes: evaluation of strong motion data, geotechnical, building, and infrastructure issues. *Natural Hazards*, 1-38.

Tsukamoto Y., Ishihara K., (2010). Analysis on settlement of soil deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundations*, 50(3), 399-411.

Tsukamoto Y., Ishihara K., Sawada S. (2004). Settlement of silty sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundations*, 44(5), 135-148.

Uckan E., Aksel M., Atas O., Toprak S., Kaya E. S. (2024). The performance of transmission pipelines on February 6th, 2023 Kahramanmaras earthquake: a series of case studies. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-20.

Valleti D. P., Sathyam N., Sivaranjani S., Shahin C., Mondal S., (2018). Design of buried flexible pipelines during liquefaction. *International Journal of Engineering & Technology*, 221, 259-265.

Van Ballegooy S., Wentz F., Boulanger R. W. (2015). Evaluation of CPT-based liquefaction procedures at regional scale. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 79, 315-334.

Vasseghi A., Haghshenas E., Soroushian A., Rakhshandeh M., (2021). Failure analysis of a natural gas pipeline subjected to landslide. *Engineering Failure Analysis*, 119, 105009.

Vazouras P., Dakoulas P., Karamanos S. A., (2015). Pipe–Soil Interaction and Pipeline Performance Under Strike–Slip Fault Movements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 72, 48-65.

Vazouras P., Karamanos S. A., Dakoulas P., (2010). Finite Element Analysis of Buried Steel Pipelines Under Strike-Slip Fault Displacements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(11), 1361-1376.

Verdugo R., González J., (2015). Liquefaction-induced ground damages during the 2010 Chile earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 79, 280-295.

Water New Zealand Guide, (2017), “National Asbestos Cement Pressure Manual Volume One”, Second Edition.

Wham B. P., Davis C. A., (2018). Buried Continuous and Segmented Pipelines Subjected to Longitudinal Permanent Ground Deformation. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 10(4), 04019036.

Wham, B. P., Anderson, D. K., Ihnotic, C. R., (2020), “Experimental Assessment of Pipeline Connection Response to Transverse Loading”, Proceedings, 2020 ASCE Pipelines Conference, Reston, VA: American Society of Civil Engineers.

Xia M., Zhang H. (2018). Stress and deformation analysis of buried gas pipelines subjected to buoyancy in liquefaction zones. *Energies*, 11(9), 2334.

Yasuda S., Harada K., Ishikawa K., Kanemaru Y., (2012). Characteristics of liquefaction in Tokyo Bay area by the 2011 Great East Japan earthquake. *Soils and Foundations*, 52(5), 793-810.

Zealand, W. N., (2017), “National Asbestos Cement Pressure Pipe Manual”, Technical Supporting Data, Water New Zealand.

Zhang G., Robertson P. K., Brachman R. W. (2002). Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5), 1168-1180.

## ÖZGEÇMİŞ

Muhammet Ceylan, 2012 yılında Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitime başlamış ve 2016 yılında mezun olmuştur. 2017 yılında Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitime başlamıştır. 2020 yılının bahar döneminde buradan mezun olduktan sonra aynı tarihte güz döneminde Gebze Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Deprem ve Yapı Mühendisliği Programı'nda doktora eğitime başlamıştır.

2021 yılından itibaren İstanbul Gelişim Üniversitesi'nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. 2023-2024 yılları arasında bir yıl süre ile Colorado Boulder Üniversitesi'nde ziyaretçi araştırmacı olarak çalışmıştır.



## TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

Ceylan M., Yağcıoğlu B., Nacaroglu E., Toprak S., (2024), “Sismik Etkiler Altında Gömülü Boru Davranışı: Christchurch Depremi Vaka Analizi”, Türk Deprem Araştırma Dergisi, 6(2), 471-487.

Toprak S., Nacaroglu E., Ceylan M., O’Rourke T. D. (2022), “Effects of Ground Strain and Pipeline Orientation on Pipeline Damage during Earthquakes”, In Lifelines 2022 (pp. 489-499).

Toprak S., Wham B. P., Nacaroglu E., Ceylan M., Dal O., and Senturk A. E., (2024a), “Impact of Seismic Geohazards on Water Supply Systems and Pipeline Performance: Insights from the 2023 Kahramanmaraş Earthquakes”, Engineering Geology, 340: 107681.

Toprak S., Wham B. P., Nacaroglu E., Ceylan M., Dal O., Senturk A. E., (2024b), “The Effects of February 6, 2023 Kahramanmaraş Earthquakes on Pipelines”, In Proceedings of the 18th World Conference on Earthquake Engineering, Milan, 30 June–5 July.