



Buried Pipe Behavior subjected to Seismic Effects: Christchurch Earthquake Case Study

Muhammet Ceylan ^{1,3}, Berk Yagcioglu ², Engin Nacaroglu ² and Selcuk Toprak ³

¹ Istanbul Gelisim University, Gelisim Vocational School, Department of Construction, 34315 Istanbul, Turkiye

² Pamukkale University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 20160 Denizli, Turkiye

³ Gebze Technical University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 41400 Kocaeli, Turkiye
ORCID: 0000-0001-6258-9314, 0000-0003-3156-2287, 0000-0002-0693-6534, 0000-0002-6704-9752

Keywords

Earthquake, Infrastructure systems, Numerical modeling, Christchurch

Highlights

- * Seismic behavior of cemented pipes were investigated
- * The effects of transient ground deformations on pipelines were evaluated
- * Case study for AC pipeline caused by Christchurch earthquake was performed

Aim

It is aimed to address the behavior of infrastructure systems under seismic effects in detail

Location

Christchurch, New Zealand

Methods

To address the behavior of the pipelines, a dynamic case analysis was performed using the finite element method

Results

The effect of transient ground deformations on asbestos cement pipes was demonstrated

Supporting Institutions

TUBITAK and NZGD (New Zealand Geotechnical Database)

Financial Disclosure:

Supported by Pamukkale University Scientific Research Coordination Office with project number 2019FEBE013

Peer-review

Externally peer-reviewed

Conflict of Interest:

The authors have no conflicts of interest to declare

Manuscript

Research Article

Received: 22.05.2024

Revised: 17.10.2024

Accepted: 23.10.2024

Printed: 30.12.2024

DOI

10.46464/tdad.1486701



Content of this journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International Non-Commercial License

Corresponding Author

Muhammet Ceylan

Email: muceylan@gelisim.edu.tr

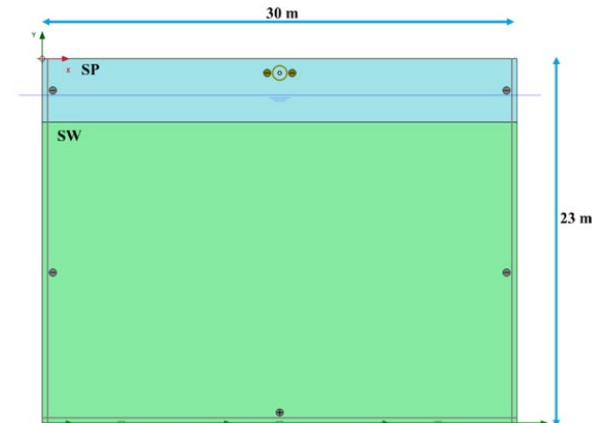


Figure
The numerical model for dynamic pipeline analysis

How to cite:

Ceylan M., Yagcioglu B., Nacaroglu E., Toprak S., 2024. Buried Pipe Behavior subjected to Seismic Effects: Christchurch Earthquake Case Study, Turk Deprem Arastirma Dergisi 6(2), 471-487, <https://doi.org/10.46464/tdad.1486701>.



TÜRK DEPREM ARAŞTIRMA DERGİSİ

TURKISH
JOURNAL OF
EARTHQUAKE
RESEARCH



Sismik Etkiler Altında Gömülü Boru Davranışı: Christchurch Depremi Vaka Analizi

Muhammet Ceylan ^{1,3}, Berk Yağcıoğlu ², Engin Nacaroglu ² ve Selçuk Toprak ³

¹ *Istanbul Gelişim Üniversitesi, Gelişim Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 34315 İstanbul, Türkiye*
² *Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 20160 Denizli, Türkiye*
³ *Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 41400 Kocaeli, Türkiye*
ORCID: 0000-0001-6258-9314, 0000-0003-3156-2287, 0000-0002-0693-6534, 0000-0002-6704-9752

ÖZET

Gömülü boru hatlarının sismik performansı, afetler sonrasında boruların servisini sürdürmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Şubat 2011'deki 6.2 M_w büyüklüğündeki Christchurch depremi içme suyu dağıtım şebekesinde büyük hasarlar oluşmasına sebep olmuştur. Bu çalışmada asbestli çimento boru (AC) hattı üzerinde gerçekleştirilen nümerik vaka analizi ile yüzey dalgalarının boru hattı üzerinde oluşturduğu etkiler incelenmiştir. Gömülü boru hatları, yüzey dalgası yayılma etkileri altında hem görece rijit hem de esnek davranışlar sergileyebilirken, bu çalışma rijit özellik gösteren asbestli çimento boruların davranışlarına odaklanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemine dayanan Plaxis 2D ile 2011 Christchurch depreminde hasar meydana gelen AC tipi boru üzerinde dinamik vaka analizi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar, Ghirmay (2016) tarafından AC boru hatları üzerinde uygulanan yükleme deneyi sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler

Deprem, Altyapı sistemleri, Nümerik modelleme, Christchurch

Öne Çıkanlar

- * Çimentolu boruların sismik davranışı araştırılmıştır
- * Geçici yer deformasyonlarının boru hatları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir
- * Christchurch depreminin neden olduğu AC boru hattı için vaka analizi uygulanmıştır

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 22.05.2024
Düzeltilme: 17.10.2024
Kabul: 23.10.2024
Basım: 30.12.2024

DOI

10.46464/tdad.1486701

Sorumlu yazar

Muhammet Ceylan
Eposta:
muceylan@gelisim.edu.tr

Buried Pipe Behavior subjected to Seismic Effects: Christchurch Earthquake Case Study

Muhammet Ceylan ^{1,3}, Berk Yagcioglu ², Engin Nacaroglu ² and Selcuk Toprak ³

¹ *Istanbul Gelisim University, Gelisim Vocational School, Department of Construction, 34315 Istanbul, Turkiye*
² *Pamukkale University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 20160 Denizli, Turkiye*
³ *Gebze Technical University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 41400 Kocaeli, Turkiye*
ORCID: 0000-0001-6258-9314, 0000-0003-3156-2287, 0000-0002-0693-6534, 0000-0002-6704-9752

ABSTRACT

The seismic performance of buried pipelines is critical to their continued service after disasters. The 6.2 M_w Christchurch earthquake in February 2011 caused extensive damage to the drinking water distribution network. In this study, the effects of surface waves on the pipeline were investigated through a numerical case study on an asbestos cement (AC) pipeline. While buried pipelines can exhibit both relatively rigid and flexible behavior under surface wave propagation effects, this study focuses on the behavior of asbestos cement pipes, which exhibit rigid characteristics. Using Plaxis 2D based on the finite element method, a dynamic case analysis was performed on the AC type pipe damaged in the 2011 Christchurch earthquake and the results were compared with the results of the axial loading test conducted by Ghirmay (2016) on AC pipelines.

Keywords

Earthquake, Infrastructure systems, Numerical modeling, Christchurch

Highlights

- * Seismic behavior of cemented pipes were investigated
- * The effects of transient ground deformations on pipelines were evaluated
- * Case study for AC pipeline caused by Christchurch earthquake was performed

Manuscript

Research Article

Received: 22.05.2024
Revised: 17.10.2024
Accepted: 23.10.2024
Printed: 30.12.2024

DOI

10.46464/tdad.1486701

Corresponding Author

Muhammet Ceylan
Email:
muceylan@gelisim.edu.tr

1. GİRİŞ

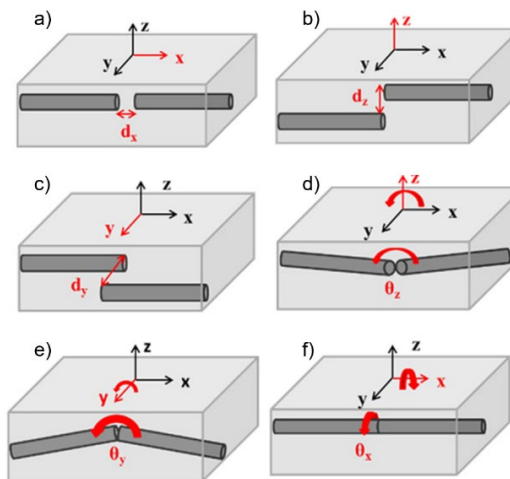
Altyapı sistemlerinde büyük depremler sebebiyle meydana gelen hasarlar toplum hayatına doğrudan etki etmektedir. Şehirleşmenin arttığı 20. Yüzyılda büyük depremlere maruz kalan kentlerde oluşan altyapı hasarları deprem sonrasında hayatın normal akışına dönmelerini geciktirmektedir. 1971 San Fernando Depremi, 1999 Kocaeli Depremi, 1999 Chi-Chi depremi, 2023 Kahramanmaraş depremleri ve benzeri depremlerde alt yapı sistemleri büyük hasarlar almışlardır (Isenberg 1978, Ansal ve diğ. 2008, EERI 1999, EERI 2023, GTU 2023, Toprak ve diğ. 2024). Bu hasarlar depremlerin farklı etkileri sebebiyle oluşmaktadır ve boruların performans değerlendirmelerinde hasar sebepleri ile yapılan analizler uyumlu olmalıdır. Örnek olarak 1999 Chi-Chi depreminde su borusu hasarlarının %48'inin yer sarsıntısı, %16'sının yanal yer hareketi, %9'unun düşey yer hareketi, %11'inin zemin yenilmesi, %10'unun yüzey çatlak ve yarıkları kaynaklı olduğu raporlanmıştır (Wang 2000, Chen ve diğ. 2002, Shih ve diğ. 2006, Nair ve diğ. 2018).

Deprem kaynaklı boru hasarları genellikle literatürde davranışsal olarak 2 şekilde ele alınmaktadır. Bu hasarlara sebep olan deprem etkileri kalıcı yer deformasyonları (KYD) veya yer sarsıntısına bağlı geçici yer deformasyonları (GYD) olarak incelenebilir. Geçici yer deformasyonları depremler sırasında oluşan deprem sonrası etkisi geçen zemin deformasyonlarıdır. Kalıcı yer deformasyonları ise fay atımı, oturmalar, sıvılaşma deformasyonları (yanal yayılma, oturma) veya şev yenilmeleri gibi deprem sonrası da etkisini koruyan yer deformasyonlarıdır. Genel olarak GYD ile boru hasarlarının ilişkilendirilmesinde deprem şiddet parametreleri (PGA, PGV vb.) ve boru hasarları arasındaki geliştirilen ilişkiler kullanılır (Barenberg 1988, Toprak ve diğ. 2008). Vaka verileri ile geliştirilen ilişkiler, sismik tehlike analizleri ile elde edilmiş tasarım deprem parametreleri ile kullanılarak bölgesel altyapı tasarımı ve deprem senaryosu hasar tahmini yapılabilir (Toprak ve Taşkın 2007). Sıvılaşma şiddeti katsayısı (LSN) için geliştirilmiş hasar ilişkileri LSN parametresinin özelliklerinden dolayı sıvılaşma kaynaklı oturmaları göz önüne alabilmektedir (Toprak ve diğ. 2019). Şev yenilmelerinde ise sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan bünye modelleri şev deplasmanı hesabı yapabilecek yeterliliktedir. Sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma nedeniyle oluşacak kalıcı yer deformasyonlarında ise yanal yayılma genellikle ampirik yaklaşımlarla hesaplanır ve deplasman olarak modelde borulara doğrudan boru-zemin etkileşim yayları ile tanımlanır (El Hmadi ve O'Rourke 1988, Vasseghi ve diğ. 2021). Fay atımlarında fayın sınırlarını belirlediği atımın gerçekleştiği blok sabit bir yer değiştirme etkisi altındadır bu nedenle 3 boyutlu modeldeki fay atımı kaynaklı deplasmanların model çıktısı olarak belirlenmesi gerekmemektedir. 3 boyutlu model uygulamalarında fayın ayırdığı bloğa doğrudan girdi verisi olarak blok deplasmanı (fay atımı) etki ettirilebilir. Özet olarak fay atımlarında zemin deplasmanlarının model içinde belirlenmesinin gerekmemesi ve model dışında tespit edilen bu yer değiştirmelerin modele doğrudan girdi olarak tanımlanması nedeniyle fay atımlarında oluşacak hasarların tespit edilmesinde doğrudan zeminin 3 boyutlu olarak modellendiği sonlu elemanlar analizleri kullanılabilir (Vazouras ve diğ. 2010, Kaya ve diğ. 2017, Uçkan ve diğ. 2024).

Tüm çalışmalar bir arada değerlendirildiğinde GYD etkilerinin bölgeden elde edilen verilere bağlı olarak daha geniş çaplı olduğu ve sadece KYD etkilerinin daha lokal olarak değerlendirildiği görülmektedir (fay üzerindeki borular veya şev bölgesindeki borular vb.). Bu çalışmada ise sismik etkiler (GYD) altında hasar gördüğü düşünülen bir borunun pekleşebilir modeller ile bölgesel sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Analizlerde daha yaygın kullanılan konum PGA veya PGV'sine bağlı hasar ilişkilerinin kullanılması yerine, doğrudan ivme kaydına bağlı analizler gerçekleştirilmiştir. Çok sayıda zemin ve boru hasarı verisine bağlı olarak geliştirilen hasar ilişkisine bağlı hasar tespiti yerine lokal analizlerin avantajı ise özellikle sağlıklı veri toplanamayan geniş bölgelerdeki stratejik ve şebeke için önemli boru hasarlarının tasarım depremlerine göre belirlenebilmesidir. GYD kaynaklı hasarların tespit edilmesinde zaman tanım alanındaki bölgesel analizlerin uygulanabilirliği ve yöntemin hasar tespit yeterliliği değerlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında GYD etkisi altında olan AC boru hattı için sonlu elemanlar yöntemi ile vaka analizi uygulanmıştır. Çalışma alanı olarak Yeni Zelanda'da bulunan Christchurch şehri seçilmiştir. Christchurch 22 Şubat 2011 tarihinde 6.2 M_w büyüklüğünde Canterbury deprem dizisinin en büyük depremlerinden olan Christchurch depremine maruz kalmıştır. Deprem sebebi ile bölgede bulunan içme suyu boru hatlarında büyük çaplı hasarlar oluşmuş ve sistem su servisini 15 gün boyunca sağlayamamıştır. Bölgede meydana gelen sıvılaşma nedeni ile kum kaynamaları, geniş çaplı yanıl yayılmalar ve oturmalar meydana gelmiştir. Depremden önce ve sonra Christchurch Şehir Komisyonu (CCC) ve Daha Güçlü Christchurch Altyapı İnşa Takımı (SCIRT) tarafından yapılan saha çalışmaları hem geoteknik açıdan hem de boru hasar altyapısı açısından zengin bir veri tabanı oluşmasını sağlamıştır. Christchurch dağıtım şebekesinde (1730 km) bulunan farklı tip ve çaplardaki borularda 1502 adet hasar meydana gelmiştir (Nacaroğlu 2017, Toprak ve diğ. 2019). Depremden sonra saha çalışmaları ile sıvılaşan bölgeler belirlenmiş olup Canterbury Geoteknik veri tabanında coğrafi bilgi sistemleri dosyası olarak bulunmaktadır. Coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak meydana gelen boru hasarları ile sıvılaşma bölgesi çakıştırılmıştır. Böylelikle boru hasarlarının hangi etkilerden dolayı meydana geldiğinin tahmin edilmesi mümkün olmuştur (O'Rourke ve diğ. 2014). Bölgede meydana gelen boru hasarlarının büyük bir çoğunluğu KYD sebeplerinden olan sıvılaşma nedeniyle meydana gelmiştir.

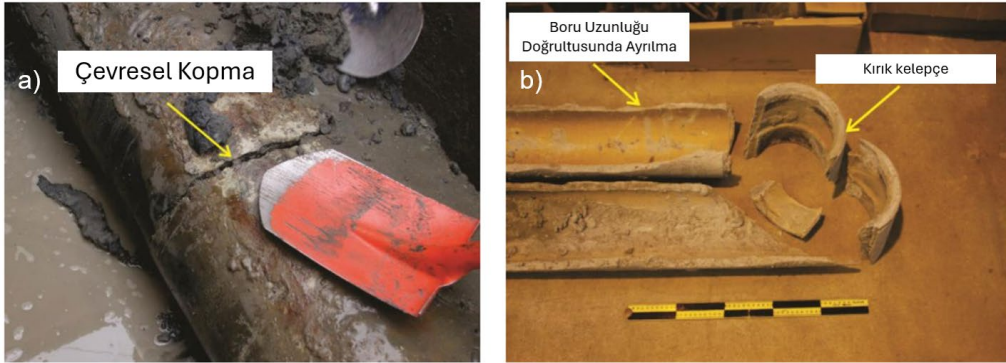
Christchurch dağıtım şebekesi genellikle asbestli çimento (AC), dökme demir (CI) ve polivinil klorür (PVC) tipi borulardan meydana gelmektedir. Bu çalışma kapsamında dağıtım şebekesi içerisinde en fazla uzunluğa sahip olan Asbestli borular (AC) için detaylı nümerik analizler yapılmıştır. Ayala ve O'Rourke (1989) çalışmasında 1985 Michoacan depreminden sonra AC borularda önemli onarımlar yapıldığını bildirmiştir. Beton iletim hatlarının birleşim noktalarında yoğunlaşan 60 hasar onarımı yapılmıştır. Ayala ve O'Rourke (1989) bu depremde su sistemi hasarlarının çoğunun sismik dalga yayılma etkilerinden kaynaklandığını belirtmiştir. Christchurch depreminde ise boru hasarlarının %69'u AC borularda meydana gelmiştir. AC boru hasarlarının %15'i ise sıvılaşma gerçekleşmeyen bölgelerde oluşmuştur (O'Rourke ve diğ. 2012). Segmentli borularda bağlantı tipi ve geometrisi, aksel ve/veya enine yer hareketlerine maruz kalan boru sisteminin performansını önemli ölçüde etkilemektedir (Wham ve diğ. 2019). GYD etkisi yerel olarak zayıf bir bağlantıda veya çevresel çatlakta odaklandığı zaman, Şekil 1'de gösterildiği gibi altı olası deformasyon modu meydana gelebilir: aksel, enine dikey ve yatay yer değiştirme, dikey ve yatay dönme ve burulma (Argyrou ve diğ. 2018).



Şekil 1: Sismik dalga etkileşimi nedeniyle zayıf bir eklemden veya çevresel çatlakta meydana gelen deformasyonlar a) Aksel deplasman, b) Dikey deplasman, c) Yatay deplasman, d) Yatay dönme, e) Dikey dönme, f) Burulma (Argyrou ve diğ. 2018)

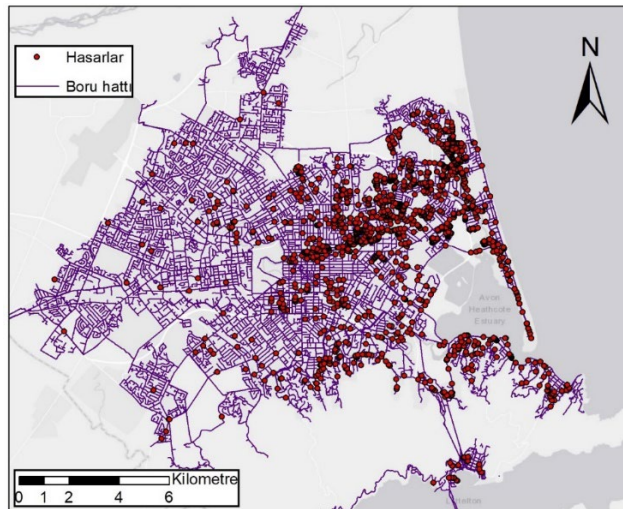
Figure 1: Deformations in a weak joint or circumferential crack due to seismic wave interaction a) Axial displacement, b) Vertical displacement, c) Horizontal displacement, d) Horizontal rotation, e) Vertical rotation, f) Torsion (Argyrou et al. 2018)

Şekil 2'de Christchurch depremi sonucu oluşmuş hasarlar ile ilgili boru uzunluk eksenini doğrultusunda ve boru kesiti doğrultusunda hasar örnekleri verilmiştir (Cubrinovski ve diğ. 2014).



Şekil 2: AC boru hasarları a) Çevresel hasar, b) Boru uzunluğunda hasar (Cubrinovski ve diğ. 2014)
Figure 2: AC pipe damages a) Circumferential split, b) Broken collar and longitudinal split (Cubrinovski et al. 2014)

Analizlerin 2 boyutlu olarak gerçekleştirilebilmesi için ön koşul doğrulamaları yapılması gerekmektedir. Bu nedenle yanal yayılma ve sıvılaşma kaynaklı oturmaların sınırlı olduğu bir boru nümerik analizler için seçilmiştir. Boru uzunluğu boyunca oluşan deplasmanlar LiDAR (Beavan ve diğ. 2012) görüntüleri ile deprem öncesi ve sonrası için değerlendirilmiştir (Toprak ve diğ. 2018) ve boruda oluşan hasarın boru uzunluğu boyunca oluşan yer deformasyonlarına bağlı eğilme, çekme ve basınç kaynaklı olmadığı ön koşulu doğrulanmıştır. Doğrulamaların amacı analizlerin istenen davranışı sağlaması için borunun eksenini boyunca göreceli olarak farklı deformasyonlar etkisinde değil incelenen kesit üzerinde hasar görmesi gerekliliğidir. Diğer bir koşul ise incelenen boruda oluşan hasarın boru gövdesinde gerçekleşmiş olmasıdır ve belirtilen tüm koşulları sağlayacak bir AC boru analizler için seçilmiştir. Şekil 3'te Christchurch dağıtım şebekesi ve deprem nedeniyle farklı tipteki ve çaptaki borularda meydana gelen hasarları göstermektedir (Ceylan 2020).



Şekil 3: Christchurch dağıtım şebekesi boru hatları ve hasarları (Ceylan 2020)
Figure 3: Christchurch distribution network pipelines and damages (Ceylan 2020)

Nümerik analizlerde kullanılacak olan geoteknik veriler Yeni Zelanda Geoteknik Veri tabanından (NZGD) çevrimiçi olarak elde edilmiştir. Geniş çaplı çalışma verisinin olması bölge için detaylı çalışmalar yapılması için büyük fırsat oluşturmaktadır.

2. YÖNTEM VE VERİ

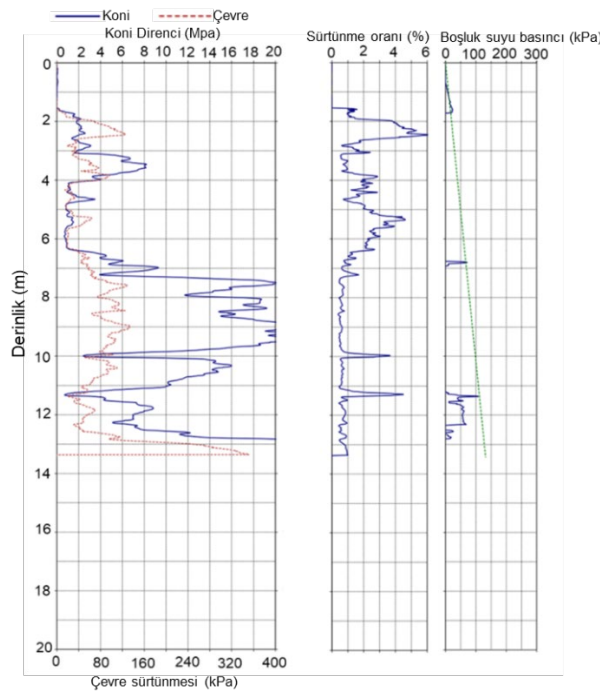
Geoteknik problemlerde nümerik modellerin kullanımı yaygın bir hal almıştır. Analizin yükleme koşulları ve zemin tipi davranış modellerinin seçiminde önemli bir rol oynamaktadır. Davranış modelleri yükleme ile zeminlerde meydana gelen şekil değiştirmelerdeki değişimleri plastik veya elastik şekilde tanımlamamıza olanak sağlar. Bir zemin tabakasının dinamik davranış analizini yapabilmek için genellikle uygulanması gereken adımlar;

- I. Statik ve tekrarlı yüklemeler altındaki davranışı tanımlamak için zemin katmanının dağılımı, yer altı su seviyesi ve zeminin mekanik özellikleri açısından tanımlanması,
- II. Mevcut yönetmeliklere uygun şekilde belirli bir sahaya göre sismik giriş hareketinin belirlenmesi,
- III. Uygun dinamik sınır şartları içeren nümerik modelin tanımlanmasıdır.

Çalışma kapsamında Plaxis 2D programı ile Christchurch depreminde hasar gören AC tipi boru için dinamik analizler uygulanmıştır. Boru hasarının seçiminde nümerik modeli oluşturmak için gerekli sondaj verisinin varlığına ve hasar konumunun deprem kayıt istasyonuna yakın olmasına dikkat edilmiştir. Bölge için oluşturulan veri tabanında AC FID433 kodu ile oluşturulan hasar, analizler için seçilmiştir.

2.1) Zemin ve Boru Özellikleri

Nümerik modellerin en önemli aşamalarından biri zemin modelinin vaka analizine uygun olarak seçilip model kalibrasyonlarının yapılmasıdır. Plaxis bünyesinde Mohr-Coulomb, Soft Soil, Hardening Soil, Hardening Soil Small Strain ve UBC3D-PLM gibi birçok davranış modeli bulunmaktadır. Bazı modellere de kullanıcı tanımlı olarak erişim sağlanabilmektedir. Sismik dalgaların zemin modeli içerisinde ilerleyişini gerçekçi olarak temsil edebilmek ve yüklem-boşaltma durumunda zeminin doğrusal olmayan davranışını ortaya koyabilmek için Pekleşen zemin modeli (Hardening Soil Small Strain) seçilmiştir. HS-small model, 13 kurucu parametre ile karakterize edilmektedir. NZGD (2024) veri tabanından elde edilen CPT_439, BHCBD-19 ve Borehole_76451 sondaj verileri kullanılarak zemin özellikleri belirlenmiştir. Şekil 4 CPT_439 verilerini göstermektedir.



Şekil 4: CPT deneyi verisi (NZGD 2024)
Figure 4: CPT test data (NZGD 2024)

Pekleşen zemin modeli (Hardening Soil Small Strain) parametrelerini elde etmek için kumlu zeminlerde Brinkgreve ve diğ. (2010) tarafından önerilen eşitlikler kullanılmıştır. Ayrıca kayma dalgası hızı (V_s) McGann ve diğ. (2015) tarafından Christchurch zemininde 30 m'den daha sığ zeminler için oluşturulmuş Denklem 1'de yer alan CPT- V_s arasındaki korelasyon kullanılmıştır.

$$V_s = 18.4q_c^{0.144} f_s^{0.0832} z^{0.278} \quad (1)$$

Burada q_c (kPa) konik uç direnci, f_s (kPa) sürtünme direnci ve z (m) ise tabaka kalınlığıdır. Brinkgreve ve diğ. (2010) tarafından önerilen ilişkiler Denklem 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ve 9'da verilmiştir.

$$\gamma_k = 15 + 4.0D_r/100 \text{ [kN/m}^3\text{]} \quad (2)$$

$$\gamma_d = 19 + 1.6D_r/100 \text{ [kN/m}^3\text{]} \quad (3)$$

$$E_{50}^{ref} = 60000D_r/100 \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (4)$$

$$E_{oed}^{ref} = 60000D_r/100 \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (5)$$

$$E_{ur}^{ref} = 180000D_r/100 \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (6)$$

$$\varphi = 28 + 12.5 D_r/100 \quad [^\circ] \quad (7)$$

$$G_0 = 60000 + 68000D_r/100 \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (8)$$

$$\gamma_{0.7} = (2 - D_r/100) \times 10^{-4} \quad (9)$$

Denklemlerde verilen γ_k (kN/m³) kuru birim hacim ağırlık, γ_d (kN/m³) doymun birim hacim ağırlık, E_{50}^{ref} (kN/m²) sekant rijitliği, E_{oed}^{ref} (kN/m²) tanjant rijitliği, E_{ur}^{ref} (kN/m²) yükleme-boşaltma rijitliği, φ (°) içsel sürtünme açısı, G_0 (kN/m²) kayma modülü, $\gamma_{0.7}$ (birimsiz) kayma deformasyon seviyesi, D_r (birimsiz) rölatif sıklıktır.

SP ve SW katmanından oluşan zemin modeli sırasıyla 4 m ve 19 m tabaka kalınlığında olmak üzere 23 m derinliğinde 30 m genişliğinde oluşturulmuştur. Tablo 1 Pekleşen zemin modeli (Hardening Soil Small Strain) parametrelerini göstermektedir.

Tablo 1: Brinkgreve ve diğ. (2010) tarafından kumlu zeminler için önerilen eşitlikler
Table 1: Equations proposed by Brinkgreve et al. (2010) for sandy soils

| Zemin türü | SP (Dr: %25) | SW (Dr: %75) |
|---|--------------|--------------|
| Malzeme modeli | HS SS | HS SS |
| Model davranış tipi | Drenajlı | Drenajlı |
| Kuru birim hacim ağırlık (γ_k , kN/m ³) | 16 | 18 |
| Doymun birim hacim ağırlık (γ_d , kN/m ³) | 19.4 | 20.2 |
| İleri düzey parametreleri | | |
| | SP (Dr: %25) | SW (Dr: %75) |
| Sekant rijitliği (E_{50}^{ref} , Mpa) | 15 | 45 |
| Tanjant rijitliği (E_{oed}^{ref} , Mpa) | 15 | 45 |
| Yükleme-boşaltma rijitliği (E_{ur}^{ref} , Mpa) | 45 | 135 |
| Kayma modülü (G_0^{ref} , MPa) | 77 | 111 |
| Kayma deformasyon seviyesi ($\gamma_{0.7}$) | 1.75E-4 | 1.25E-4 |
| Kohezyon (c_{ref} , kPa) | 1 | 1 |
| İçsel sürtünme açısı (ϕ') | 31 | 37 |
| Dilatansi açısı (ψ) | 1 | 7 |
| Poisson oranı (ν_{ur}) | 0.2 | 0.2 |

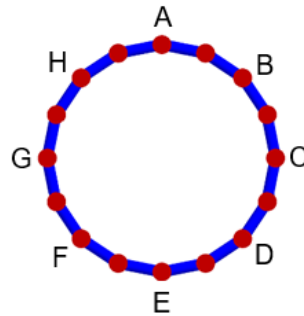
Model içerisinde AC boru hattı yüzeyden itibaren 1 m derinlikte SP katmanı içerisinde bulunmaktadır. Sismik sarsıntı sırasında boru ile zemin arasında sürtünmeden dolayı gerçekleşecek etkileşimi gerçekçi şekilde ortaya koyabilmek için arayüzey (Interface) tanımlanması yapılmıştır.

20'nci Yüzyılın başlarından itibaren Christchurch eyaletinde içme suyu boru hattı olarak asbestli borular (AC) kullanılmıştır. 1950-1960'lardan itibaren dökme demir borular, 1980-1990'lı yıllardan itibaren yaygın olarak PVC tipi borular döşenmeye başlamıştır. 2011 Christchurch depreminde içme suyu şebekesinin büyük bir bölümünü oluşturan AC tipi borularda büyük hasarlar oluşmuştur. Çalışma kapsamında vaka analizi yapılan 200 mm çapındaki AC boru için malzeme özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: Boru parametreleri
Table 2: Pipe parameters

| | Değer | Birim | Boru çapı | İnşa yılı |
|-----------------------|-------|---------------------|-----------|-----------|
| Normal rijitlik (EA) | 92644 | kN/m | 200 mm | 1976 |
| Eğilme rijitliği (EI) | 843.2 | kNm ² /m | | |
| Birim ağırlık (w) | 0.172 | kN/m | | |
| Poisson oranı(v) | 0.15 | - | | |

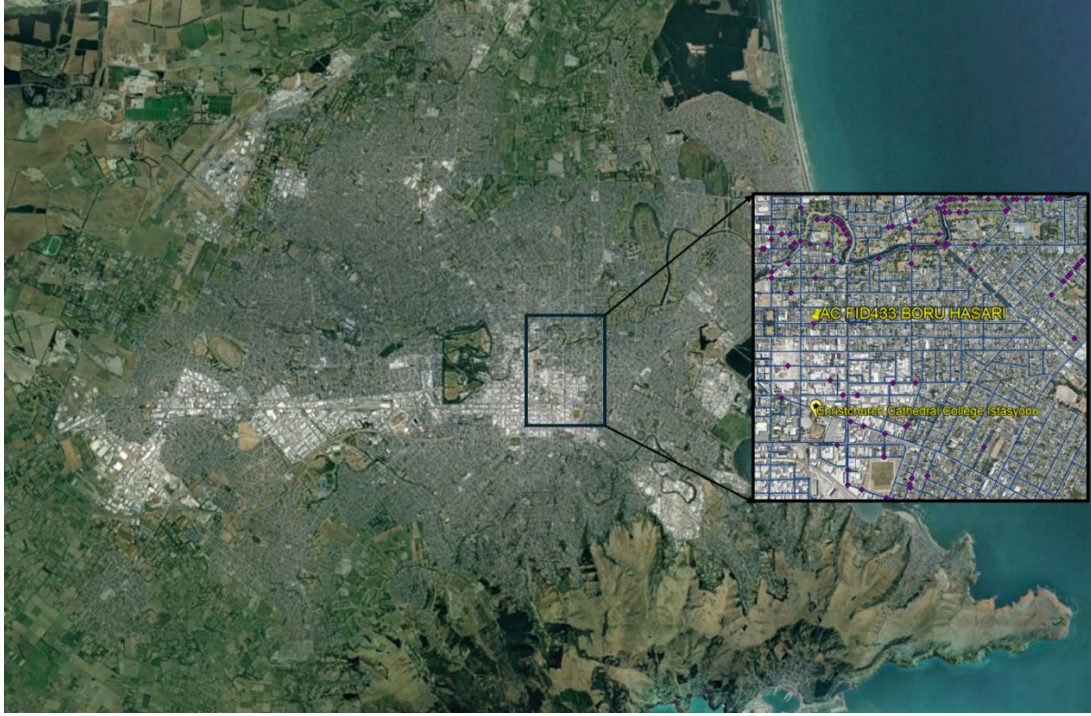
Plaxis 2D ile yapısal elemanları oluşturmanın farklı yolları mevcuttur. AC boru elemanı et kalınlığı düşünülerek kompozit solid eleman olarak tanımlanmıştır. Genel olarak, boru et kalınlıkları gibi sınırlı boyutlara sahip eleman geometrilerinde ağ (mesh) oluşturma aşamasında sorunlar gözlenebilmektedir. Bu nedenle boru elemanı üzerinde ekstra ağ tanımlaması yapılarak zemin ile boru bağlantısı sağlanmıştır. Malzeme özellikleri atanarak analiz öncesinde veri okuma noktaları işaretlenmiştir. Boru hattı üzerinde meydana gelen gerilme ve şekil değiştirmeleri elde edebilmek için analiz öncesinde Şekil 5'te görülen noktalar seçilmiştir. Boru üzerinde yaklaşık olarak 22.5 açılarla nokta (node) olarak yerleştirilmiştir.



Şekil 5: AC boru üzerinde seçilen analiz noktaları
Figure 5: Analysis points selected on the AC pipe

2.2) Deprem Özellikleri

Dinamik analizlerde deprem verisi olarak 2011 yılında Yeni Zelanda'da meydana gelen Canterbury deprem dizisinin büyük depremlerinden biri olan 6.2 M_w büyüklüğündeki Christchurch depremi kullanılmıştır. Depremin odak noktasının şehir merkezine yakın olması sebebiyle deprem bölgede yıkıcı bir etki göstermiştir. Deprem nedeniyle AC boru hattı hasarı Christchurch şehrinin Worcester caddesinde meydana gelmiştir (Şekil 6). Tablo 3'te Christchurch depreminin bazı kayıt istasyonlarından alınan PGA değerleri ve odak derinlikleri görülmektedir.

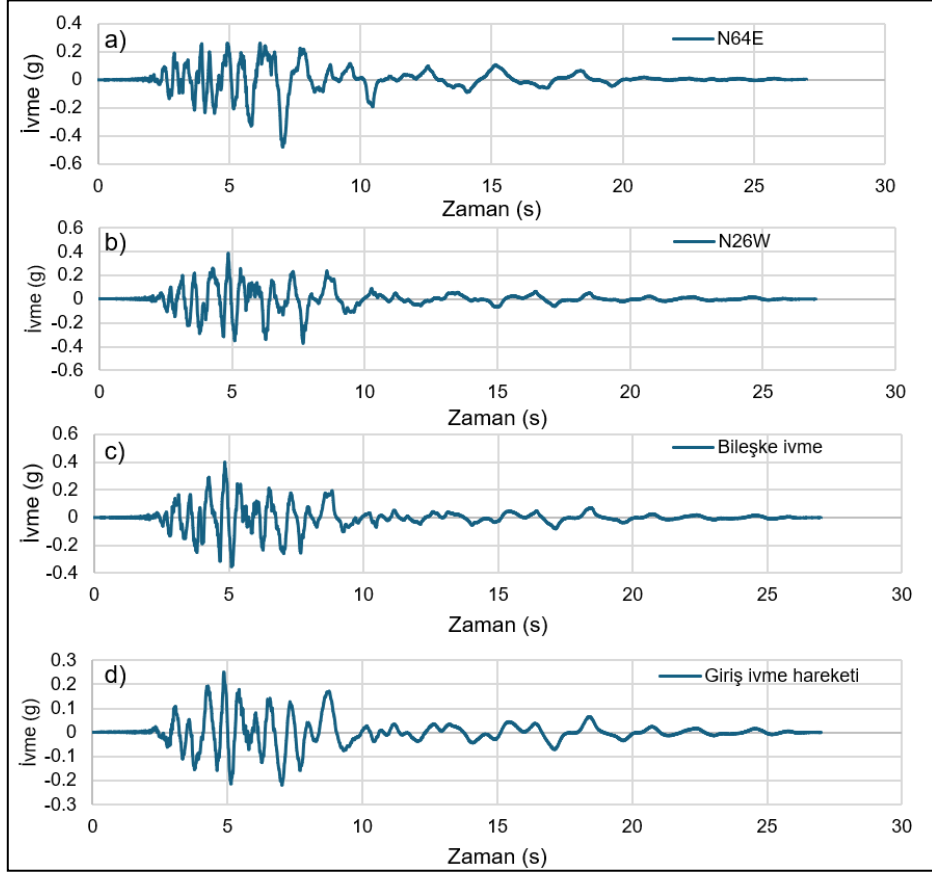


Şekil 6: AC boru hattı hasarı ve CCCC yer hareketi istasyonu konumu
Figure 6: The location of AC pipe damage and CCCC ground motion station

Tablo 3: Christchurch depremi için istasyon bilgileri
Table 3: Station information for Christchurch earthquake

| İstasyon kodu | İstasyon | Bileşenleri | Odak derinliği [km] | PGA [g] |
|---------------|-----------------------------------|--------------|---------------------|--------------|
| CMHS | Christchurch Cashmere High School | N10E S80E | 6.0 6.0 | 0.40 0.34 |
| CHHC | Christchurch Hospital | N01W S89W | 8.0 8.0 | 0.34 0.36 |
| CBGS | Christchurch Botanic Gardens | N89W S01W | 9.0 9.0 | 0.55 0.45 |
| CCCC | Christchurch Cathedral College | N64E N26W | 6.0 6.0 | 0.47 0.38 |
| SHLC | Shirley Library | S40W S50E | 9.0 9.0 | 0.31 0.34 |

Sismik analizlerde AC hasar noktasına 1 km mesafede yer alan Christchurch Cathedral College (CCCC) kayıt istasyonundan alınan ivme kayıtları kullanılmıştır (PEER 2013). İki boyutlu analizlerde deprem verisi boru doğrultusuna dik olarak etki etmektedir. Dolayısıyla Christchurch Cathedral College (CCCC) istasyonundan alınan N64E ve N26W ivme-zaman verileri kullanılarak boru doğrultusuna dik bileşke ivme elde edilmiştir ve ilgili ivme-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 7a, b ve c'de gösterilmiştir. Elde edilen, bu ivme takımının yüzey kayıdır. Model derinliğinde tanımlanacak olan sismik girdi kaydını elde etmek için ters evrişim (deconvolution) işlemi uygulanmıştır. Tek boyutlu zemin tepki analizleri programı olan Deepsoil V7.0 ile ters evrişim analizi yapılmıştır (Şekil 7d). Deepsoil V7.0 doğrusal, eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemlerine olanak sağlamaktadır. Ters evrişim işleminin yalnızca doğrusal ve eşdeğer doğrusal analiz yöntemleri ile yapılması uygundur. Ayrıca gerilme miktarının artmasıyla birlikte modelde kayma modülü oranının azalması (G- γ) ve sönümlenme miktarının artması (ξ - γ) ilişkisi Darendeli (2001) tarafından kumlu zeminler için önerilen G- γ ve ξ - γ ilişkisi kullanılmıştır.



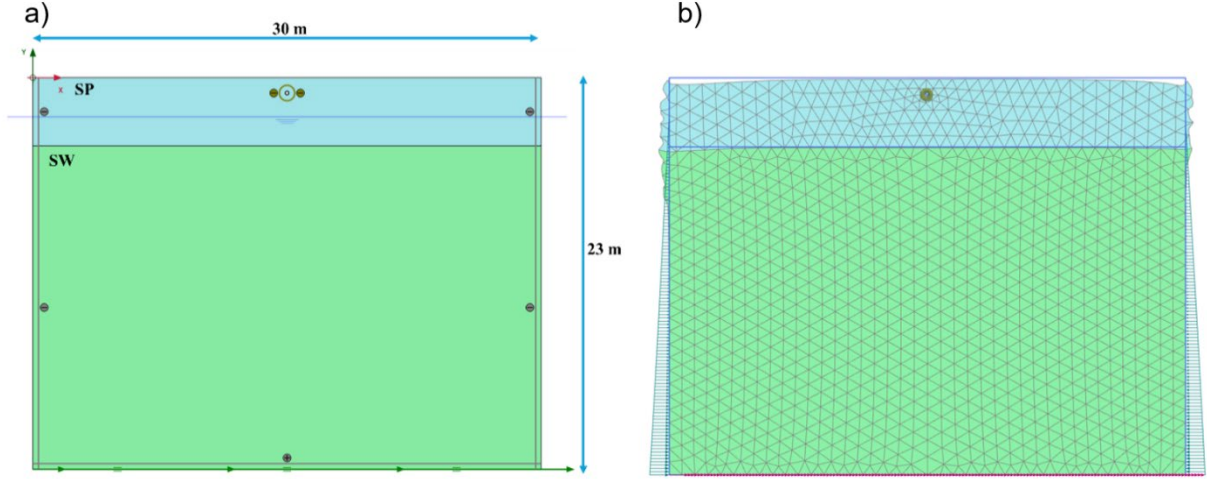
Şekil 7: İvme Kayıtları a) N64E yönlü ivme, b) N26W yönlü ivme, c) bileşke ivme, d) giriş ivme kaydı
Figure 7: Acceleration records a) N64E direction acceleration, b) N26W direction acceleration, c) combined acceleration, d) input acceleration record

2.3) Nümerik Model ve Kalibrasyonu

Plaxis 2D V22 paket programı aşamalı olarak analiz yapılmasına olanak sağlamaktadır. Analiz 3 aşamada gerçekleştirilmiştir;

- I. Başlangıç şartları K_0 prosedürü ile oluşturulmuş,
- II. AC tipi boru yerleştirilmiş ve statik gerilmeler sağlanmış,
- III. Dinamik yükleme gerçekleştirilmiştir.

Şekil 8'de model geometrisi ve deforme sonlu elemanlar ağı görülmektedir. Bu sonuçlar depremin son anında elde edilen değerler olup deprem süresi boyunca elastik olarak daha büyük şekil değiştirmeler meydana gelebilmektedir. Bu yüzden yapısal değerlendirmelerde bulunmak için deprem süresi boyunca meydana gelen en büyük kuvvetler ve şekil değiştirmeler incelenmelidir. Analiz öncesinde seçilen noktalar üçgen mesh eleman içerisinde bulunan gerilme noktası ya da elemanın sınırlarında bulunan noktalardan (node) seçilebilmektedir.



Şekil 8: Sonlu eleman modelleri a) Geometrik model, b) Deforme sonlu elemanlar ağı
Figure 8: Finite element models a) Geometric model, b) Deformed finite element mesh

Nümerik modellerde, deprem dalgalarının malzeme modeli içinde gerçekçi bir şekilde ilerlemesi ve dalgaların model sınırlarına çarpıp geri yansımaması sağlanmalıdır. Model sınırlarında oluşabilecek yansımaları önlemek ve deprem girdisini doğru şekilde tanımlayabilmek için Plaxis içerisinde yan yüzeylerde serbest alan (Free Field) tabanda ise “compliant base” sınır şartı seçilmiştir.

Deprem dalgalarının zemin modeli içerisinde genliklerinin (ivme, deplasman vb.) değişiminin gerçekçi şekilde modelleyebilmek için Rayleigh sönümlenme parametreleri kullanılmıştır. Rayleigh sönümlenme matrisi (C), rijitlik matrisi (K) ve kütle Matrisinden (M) oluşmaktadır.

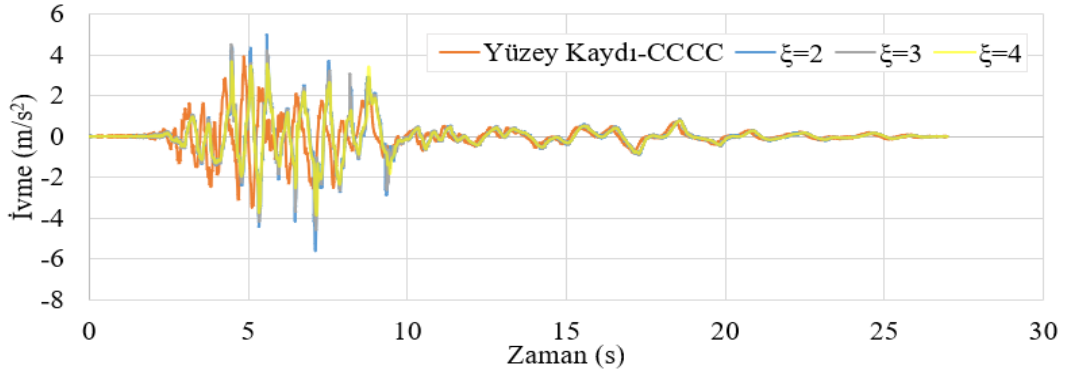
$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (10)$$

Rayleigh sönümlenme parametreleri α ve β , hedef frekans değerleri (f_1 ve f_2) ve hedef sönüm oranları (ξ) ile otomatik olarak belirlenmektedir. Hudson ve diğ. (1994) çalışmalarında f_1 , zeminin tabakasının hâkim frekansı, f_2 ise f_{eq}/f_1 oranından büyük tek tam sayı olarak tanımlanmaktadır. f_{eq} ise giriş sinyalinin baskın frekans değeridir. Bu değer Fourier spektrumu kullanılarak elde edilebilir (PLAXIS 2018).

Nümerik analizlerde analizlerin hassaslığı sonlu elemanlar ağı (mesh) büyüklüğüne ve seçilen düğüm sayısına bağlıdır. Plaxis 2D 6 düğümlü ve 15 düğümlü üçgen eleman seçeneği sunmaktadır. Sonlu eleman ağındaki bulunan elemanların boyutu, analizlerin doğruluğu açısından önemlidir. Küçük boyutlarda oluşturulan sonlu elemanlar ağı hassas sonuçlar elde edilmesini sağlarken fazla analiz süreleri gerektirmektedir. Büyük boyutlarda uygulanması halinde ise modelin doğru sonuç veremeyeceği unutulmamalıdır. Bu yüzden eleman boyutlarının (EB) belirlenmesinde, literatürde sıklıkla ortalama eleman boyutunu bulmak için kullanılan eşitlik 11 kullanılmıştır.

$$EB = \frac{V_{s,min}}{8f_{max}} \quad (11)$$

Burada $V_{s,min}$ zemin tabakasındaki minimum kayma dalgası hızı, f_{max} ise ivme kaydının en büyük frekans içeriğidir. Yapılan karşılaştırmalar ile orta derecede (medium) seçeneği ile oluşturulan sonlu elemanlar ağı kullanılmıştır.

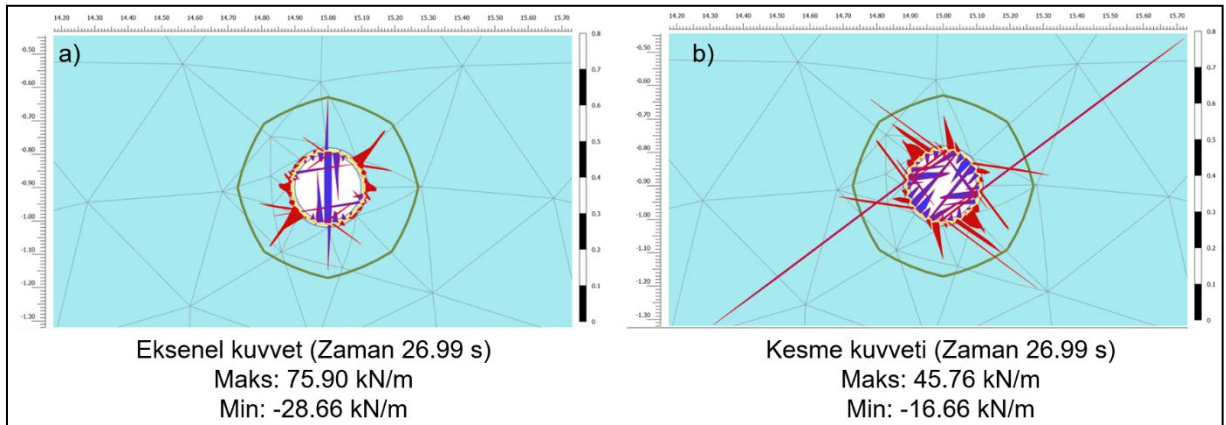


Şekil 9: Farklı sönüm oranları ile elde edilen yüzey kayıtları
Figure 9: Surface recordings obtained with different damping ratios

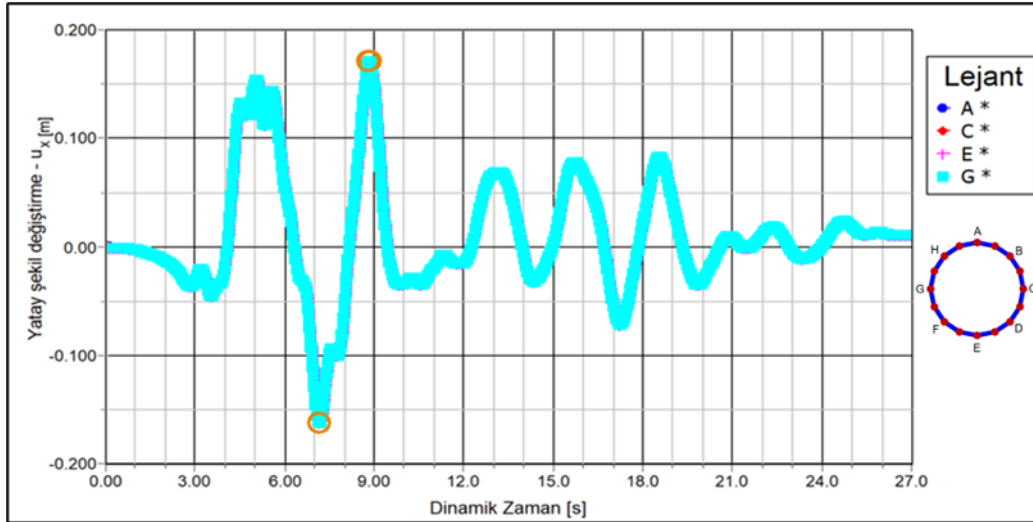
Kurulan nümerik modeli doğrulamak için borusuz dinamik analizler uygulanarak model yüzeyinde ivme değerleri elde edilmiş ve CCCC istasyonundan alınan ivme takımlarıyla oluşturulan bileşke ivme ile karşılaştırılmıştır. Hedef 1 ve hedef 2 sönüm (ξ) değerlerinin etkisini gözlemlemek için $\xi=2$, $\xi=3$ ve $\xi=4$ değerleri ile analizler yapılarak karşılaştırılmıştır. Şekil 9'da farklı sönüm değerleri ile elde edilen sonuçlar görülmektedir. Bu sonuçlara göre yüzey kaydı ile en uyumlu ivme-zaman takımı $\xi=4$ değeri ile sağlanmıştır. Bu sebeple analizlerde sönüm oranı hedef 1 ve hedef 2 için $\xi=4$ olarak alınmıştır.

3. BULGULAR

2011 Christchurch depremi (6.2 M_w) nedeniyle 200 mm çapındaki AC boru üzerinde meydana gelen kuvvetler (N, Q) göz önüne alınarak değerlendirilmiştir. Hacimsel elemanda yapısal kuvvetler (Structural forces in volume plates) seçeneği ile AC boru üzerinde meydana gelen normal kuvvet ve kesme kuvveti belirlenmiştir. Deprem son anında ($t=26.99$ s) meydana gelen maksimum normal kuvvet 75.90 kN, maksimum kesme kuvveti ise 45.76 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 10). Bu değerler yalnızca depremin sonunda meydana gelen kuvvetleri göstermektedir. Plaxis 2D programı analiz öncesinde seçilen noktalar üzerinde yalnızca deplasman, hız ve gerilmeleri deprem süresi boyunca elde etmeye olanak sağlamaktadır. AC boru hattının dalga yayılımı sırasında daha büyük kuvvetlere maruz kaldığı görülmektedir. Şekil 11'de boru üzerinde seçilen A, C, E ve G noktalarında deprem sarsıntısı boyunca meydana gelen yatay şekil değiştirme miktarları yer almaktadır. Boru sarsıntısı sırasında rijit şekilde hareket ettiği için diğer noktalarda (B, D, F ve H) aynı davranışı göstermiştir. Sarsıntı esnasında 16 cm'ye ulaşan yatay deplasmanlar meydana gelmiştir.

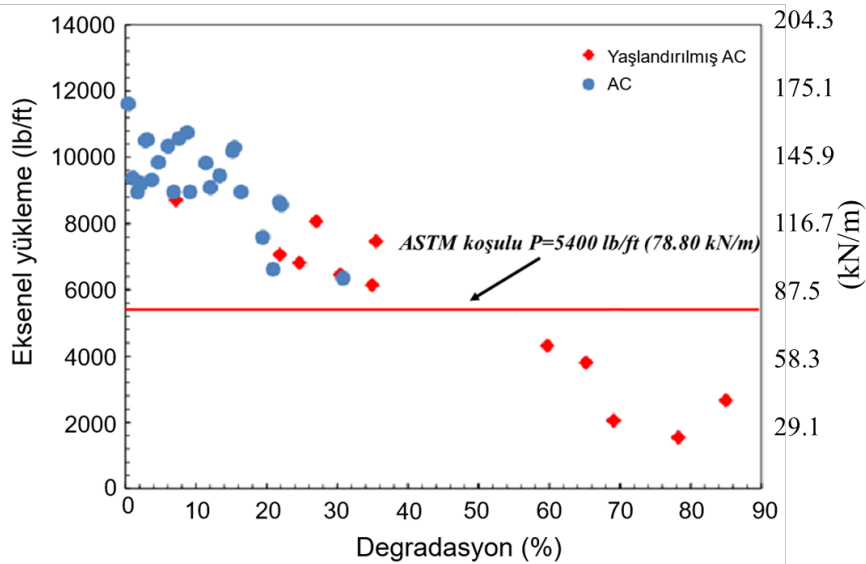


Şekil 10: Boru hattı üzerinde meydana gelen a) Normal kuvvet (N), b) Kesme kuvveti (Q)
Figure 10: Forces on the pipeline a) Normal force (N), b) Shear force (Q)



Şekil 11: Deprem boyunca boruda meydana gelen zamana bağlı yatay şekil değiştirmeler
Figure 11: Time-dependent horizontal deformations of the pipe during the earthquake

Gömülü borular malzeme hasarı, boru degradasyonu ya da basınç veya çekme gerilmelerine karşı malzeme zayıflığı yoluyla hasara maruz kalırlar (Barton ve diğ. 2019). Asbestli borularda (AC) yıllar içerisinde çeşitli sebeplerden (bulunduğu zeminin kimyasal özellikleri, topografik durumu, taşıdığı malzemenin kimyasal durumu ve işletme basıncı) dolayı iç ve dış yüzeylerinde bozulmalar meydana gelmektedir. İç ve dış etkiler nedeniyle et kalınlıkları azalmakta ve dayanım mukavemetlerinde önemli düşüşler meydana gelmektedir. Christchurch'teki boru hattı sistemi göz önüne alındığında, AC boruları kullanımdaki en eski boru türlerinden birini temsil etmektedir (1930'lardan beri). Boru hattı üzerinde deprem sarsıntısı boyunca meydana gelen normal kuvvetlerin boru hattında hasara sebep olup olmadığını tespit etmek için Ghirmay (2016) tarafından sunulan asbestli borular üzerinde yapılan yükleme deneyi sonuçları kullanılmıştır. Ghirmay (2016) 200 mm çapında degradasyon oranı %1-%31 arasında değişen 23 adet AC boru ve asidik uygulamayla degradasyon oranı artırılan borular üzerinde aksel yüklemeye deneyi sonuçlarını sunmuşlardır. Şekil 12'de Ghirmay (2016) tarafından AC tipi borular için yapılan yükleme deneyi sonuçları ve ASTM (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu) için gerekli normal yük miktarı yer almaktadır.



Şekil 12: AC tipi borular için yapılan yükleme deneyi sonuçları (Ghirmay 2016)
Figure 12: Loading test results for AC type pipes (Ghirmay 2016)

Ghirmay (2016) tarafından uygulanan deney sonuçlarına göre degradasyon oranı %50'den fazla olan AC borular ASTM koşulu altında bir aksenal dayanıma sahiptir. Nümerik analiz sonucunda elde edilen kuvvetler ile Ghirmay (2016) tarafından sunulan yükleme deneyi sonuçları karşılaştırıldığında sismik sarsıntıdan dolayı boru hattının ASTM koşulu üzerinde normal kuvvete maruz kaldığı görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Christchurch depremi altyapı sistemlerine verdiği hasar ile literatüre geçmiş ve altyapı sistemlerinin deprem güvenliğinin önemini ortaya çıkaran önemli depremlerden biri olmuştur. Bölgede geniş çaplı meydana gelen sıvılaşma olayları içme suyu boru hasarlarına önemli hasarlar vermiş ve sistemin servis kabiliyetini kaybetmesine neden olmuştur. Deprem gibi doğal afetler sonrasında içme suyu, doğalgaz, atık su sistemlerinin servisini sürdürebilmesi hayati öneme sahiptir. Son yıllarda meydana gelen teknolojik gelişmeler sonlu elemanlar yöntemi gibi nümerik analiz yöntemlerinin kullanımını tüm alanlarda olduğu gibi geoteknik deprem mühendisliğinde de artırmıştır. Nümerik modelleme yöntemi ile hem vaka hem de beklenen depremler için güvenlik analizleri uygulanabilmektedir.

Çalışma kapsamında AC tipi boru için Christchurch depremi kullanılarak uygulanan sismik vaka analizinde boru hattının maruz kaldığı kuvvetler ve şekil değiştirme miktarları tespit edilmiştir. Deprem sarsıntısı sırasında yatay yönde yaklaşık olarak 16 cm yer değiştirme meydana gelmiştir. Ayrıca depremin sonunda boru üzerinde 74.90 kN aksenal kuvvet ve 45.76 kN normal kuvvet olduğu nümerik analiz sonuçları ile gözlenmiştir. Ghirmay (2016) Nümerik analizler ile, elde edilen aksenal kuvvet miktarı Ghirmay (2016) tarafından uygulanan yükleme deneyi sonuçları ile karşılaştırıldığında kapasitesinin deprem sarsıntısı sırasında aşıldığı görülmektedir. Ayrıca AC tipi boruların rijit yapısı göze alındığında sarsıntı boyunca meydana gelen yatay şekil değiştirmelerin boru hasarının oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Hasarın yatay deplasman etkisi ile meydana geldiği anlaşılmaktadır. Deprem sarsıntısı sırasında boru hattının izin verilebilir kuvvet sınırlarından daha fazla yüke maruz kaldığı görülmektedir.

Sıvılaşma bölgesi dışında yer alan AC borunun dalga yayılımı sebebiyle yatay deplasman etkisiyle hasar gördüğü nümerik model ile ortaya konulmuştur. Gelecek çalışmalarda boru hatlarının güvenilirlik analizlerinde boru doğrultusu göz önüne alınarak nümerik modellerin üç boyutlu şekilde göz önüne alınması planlanmaktadır. Böylece boruların hem geçici yer deformasyonları hem de kalıcı yer deformasyonları altındaki davranışı ortaya konulması üç boyutlu analizler ile mümkün olacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 2019FEBE013 proje nosu ile Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü ve Tübitak Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Ansal A., Kurtulus A., Tonuk G., 2008. Damage to water and sewage pipelines in Adapazari during 1999 Kocaeli, Turkey earthquake, Sixth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, 5. 11-16 August 2008, Arlington, Virginia, Erişim adresi: <https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2757&context=icchge>.

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.

Ayala A.G., O'Rourke M., 1989. Effects of the 1985 Michoacan earthquake on water systems and other buried lifelines in Mexico, Technical Report NCEER-89-0009, Erişim adresi: <https://www.buffalo.edu/mceer/catalog.host.html/content/shared/www/mceer/publications/NCEER-89-0009.detail.html>.

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

Barton N.A., Farewell T.S., Hallett S.H., Acland T.F., 2019. Improving pipe failure predictions: Factors affecting pipe failure in drinking water networks, *Water research*, 164, 114926.

Beavan J., Levick S., Lee J., Jones K., 2012. Ground displacements and dilatational strains caused by the 2010-2011 Canterbury earthquakes, GNS Science Consultancy Report 2012/67. 59 p.

Brinkgreve R.B.J., Engin E., Engin H.K., 2010. Validation of empirical formulas to derive model parameters for sands, *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, 137, 142.

Ceylan M., 2020., İme suyu boru hasarlarının detaylı incelenmesi: Christchurch depremi örneği, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 99 s.

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

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, Technical Report, Erişim Adresi: <http://hdl.handle.net/10092/9492>.

Darendeli M.B., 2001. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves, Ph.D. Dissertation, University of Texas Austin, USA.

EERI, 1999. The Chi-Chi, Taiwan Earthquake of September 21, 1999, Earthquake Engineering Research Institute, Learning From Earthquakes, Report, Erişim Adresi: https://learningfromearthquakes.org/lfe/pdf/Taiwan_ChiChi_Article_Oct99.pdf.

EERI, 2023. February 6, 2023 Türkiye Earthquakes: Report on Geoscience and Engineering Impacts, Oakland, CA: Earthquake Engineering Research Institute. <https://doi.org/doi:10.18118/G6PM34>.

El Hmadi K., O'Rourke M.J., 1988. Soil springs for buried pipeline axial motion, *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(11), 1335-1339.

Ghirmay A., 2016. Asbestos cement pipe condition assessment and remaining service life prediction, MSc Thesis, University of Arkansas, Department of Civil Engineering, Fayetteville, 109 p.

GTÜ, 2023. 6 Şubat 2023 Marař Depremleri (Pazarcık Mw7.7 ve Elbistan Mw7.6) Sonrasında Kuvvetli Yer Hareketi, Geoteknik, üst Yapı ve Altyapılara ilişkin Saha Gözlemleri Ön inceleme Raporu 7 Mart 2023 Gebze Teknik Üniversitesi/MARTEST 2023-01. Marmara Afetlerle Bař Edebilir Yapılar için Uygulama ve Araştırma Merkezi (MARTEST), Erişim Adresi: https://www.gtu.edu.tr/fileman/Files/UserFiles/insaat_muhendisligi_bolumu/GTU_Maras%20Depremleri%20Deg%CC%86erlendirme%20Raporu_Final_07.03.2023.pdf.

Hudson M., Idriss I., Beirkae M., 1994. QUAD4M User'S Manual.

Isenberg J., 1978. Seismic performance of underground water pipelines in the southeast San Fernando Valley in the 1971 San Fernando earthquake. National Science Foundation, Washington, D.C, Technical Report No: PFR 78-15049, Erişim Adresi: <https://nehrpsearch.nist.gov/article/PB-293%20562/5/XAB>.

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.

McGann C.R., Bradley B.A., Wotherspoon L.M., Cox B.R., 2015. Comparison of a Christchurch-specific CPT-Vs correlation and Vs derived from surface wave analysis for strong motion station velocity characterisation, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 48(2), 81-91.

Nacaroglu E., 2017, Sismik Etkiler Altında Gömülü Boru Hatlarında Hasar Analizleri, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstits, Denizli.

Nair G.S., Dash S.R., Mondal G., 2018. Review of pipeline performance during earthquakes since 1906, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 32(6), 04018083.

NZGD, 2024. The New Zealand Geotechnical Database, Erişim adresi: <https://www.nzgd.org.nz/Registration/Login.aspx?ReturnUrl=%2FARCGISMapViewer%2Fmapviewer.aspx>.

O'Rourke T.D., Jeon S.S., Toprak S., Cubrinovski M., Jung J.K., 2012. Underground lifeline system performance during the Canterbury earthquake sequence, In Proceedings of the 15th world conference on earthquake engineering, Lisbon, Portugal Vol. 24.

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 Spectra*, 30(1), 183–204.

PEER, 2013. PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) NGA-West2 Database, Timothy D. Ancheta, Robert B. Darragh, Jonathan P. Stewart, Emel Seyhan, Walter J. Silva, Brian S.J. Chiou, Katie E. Wooddell, Robert W. Graves, Albert R. Kottke, David M. Boore, Tadahiro Kishida, and Jennifer L. Donahue. May 2013., Erişim Adresi: <https://ngawest2.berkeley.edu/>.

PLAXIS, 2018. PLAXIS 2D Reference Manual. Bentley Systems International Limited, Dublin.

Shih B.J., Chang C.H., 2006. Damage survey of water supply systems and fragility curve of PVC water pipelines in the Chi-Chi Taiwan earthquake, *Natural Hazards*, 37, 71-85.

Toprak S., Koc A.C., Cetin O.A., Nacaroglu E., 2008. Assessment of buried pipeline response to earthquake loading by using GIS, In Proc., 14th World Conf. on Earthquake Engineering (pp. 1-8).

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, 105758.

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

Toprak S., Wham B.P., Nacaroglu E., Ceylan M., Dal O., Senturk A.E., 2024, Impact of Seismic Geohazards on water supply systems and pipeline performance: Insights from the 2023 Kahramanmaraş Earthquakes, *Engineering Geology*, 340, 107681. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107681>.

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

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., 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.

Wang B., 2000. The damage report of public water system after the Ji-Ji earthquake, [In Chinese.] *Water Supply*, 19 (1), 64–81.

Wham B.P., Davis C.A., Rajah S., 2019. Axial connection force capacity required for buried pipelines subjected to seismic permanent ground displacement, In *Pipelines 2019* (pp. 299-308), Reston, VA: American Society of Civil Engineers.

ARAŞTIRMA VERİSİ (Research Data)

Çalışmada kullanılan zemin araştırma verileri Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanından (NZGD), Christchurch depremi ivme takımları PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) web sitesinden online olarak elde edilmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ (Conflict of Interest / Relationship)

Araştırma kapsamında yer alan bilgiler; herhangi bir kişiye, kuruma, ekipmana çıkar sağlamayı veya kişisel/kurumsal menfaat kazandırmayı amaçlamamaktadır. Aynı şekilde çalışmada yer alan hususlar objektif değerlendirme sınırları dışına çıkarak herhangi bir şekilde kişi, kurum, kuruluş nezdinde zarara, kastı aşan kötü niyetli yoruma ya da itibar kaybına yol açmamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI (Author Contributions)

- Çalışmanın tasarlanması (*Designing of the study*): M.C., S.T., E.N.
- Literatür araştırması (*Literature research*): M.C., B.Y.
- Saha çalışması, veri temini/derleme (*Fieldwork, collection/compilation of data*): M.C.
- Verilerin işlenmesi/analiz edilmesi (*Processing/analysis of data*): M.C.
- Şekil/Tablo/Yazılım hazırlanması (*Preparation of figures/tables/software*): M.C., B.Y.
- Bulguların yorumlanması (*Interpretation of findings*): M.C., S.T., E.N., B.Y.
- Makale yazımı, düzenleme, kontrol (*Writing, editing and checking of manuscript*): M.C., S.T., E.N., B.Y.