



## Behavior of buried pipes exposed to longitudinal permanent ground deformations in earthquakes

Selçuk Toprak<sup>1,\*</sup>, Engin Nacaroglu<sup>2</sup>, Berk Yağcıoğlu<sup>2</sup>, Orhan Alp Çetin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Gebze Technical University, 41400, Kocaeli, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Pamukkale University, 20070, Denizli, Türkiye

<sup>3</sup>General Directorate of State Hydraulic Works, 18th Regional Directorate, 20070, Isparta, Türkiye

### Highlights:

- Layout of the pipelines have influence on their response to longitudinal ground displacements
- Interdependent effects of soil and pipe variables
- The length of moving ground block and the amount of ground displacement have significant effects on pipeline behavior

### Keywords:

- Buried pipelines
- Finite Element Analyses
- Permanent ground deformations
- Soil-pipe interaction

### Article Info:

Research Article

Received: 05.05.2023

Accepted: 16.08.2024

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1292744

### Acknowledgement:

This study was supported by TUBITAK with project number 114M258 and PAUBAP with project number 2022FEBE016.

### Correspondence:

Author: Selçuk Toprak  
e-mail: stoprak@gtu.edu.tr  
phone: +90 535 660 6689

### Graphical/Tabular Abstract

Observations from past earthquakes have shown that buried pipelines are more adversely affected and damaged by ground movements in the direction of their long axis. In this study, buried continuous pipelines exposed to longitudinal ground movements due to earthquakes were evaluated by using finite element analyses. The layout of the pipelines along with soil, pipe and ground motion properties were considered in the analyses. In general, the layout of the pipelines are determined according to the needs in the residential areas, the conditions of the streets and the hydraulic models. Existing pipeline maps were examined and 8 different pipe models were determined corresponding to the most common pipeline layouts as shown in Figure A.

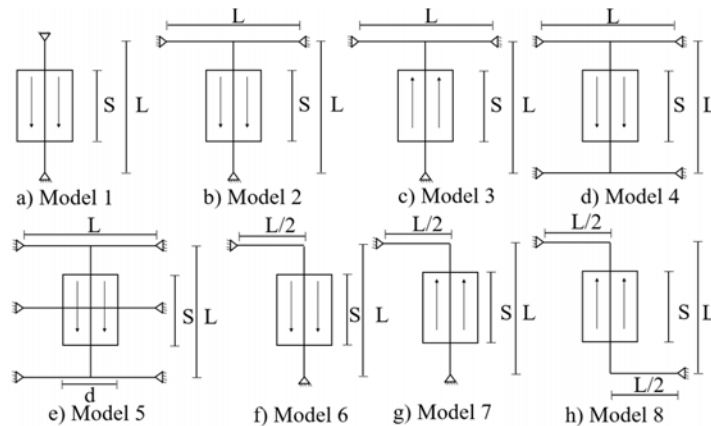


Figure A. Pipeline layout models used in the finite element analyses

**Purpose:** The study aims to investigate the behavior of buried steel pipelines in different layouts under the influence of various permanent ground movements that may occur as a result of earthquakes. In addition, different factors such as pipe diameter, pipe material properties, burial depth, and lateral earth pressure were varied to form 8 different analysis groups to determine their effects on the performance of pipelines. The results will contribute to the practical design and preliminary evaluation of the pipelines by the operating institutions.

**Theory and Methods:** The effects of 10 different axial ground motion lengths, 9 different ground displacements, 8 different pipe layout models and 16 different variables (e.g. burial depth) were evaluated by finite element analyses. In order to observe the interdependent effects of the changes, analyzes were carried out by considering over ten thousand combinations.

**Results:** The effects of the length of the PGD zone and the amount of displacement on pipeline behavior are assessed relative to boundaries (Fig. A) for different pipeline layouts. Moreover, the effects of the investigated variables on pipe stress and strain are explained one by one in the study.

**Conclusion:** The effect of variables such as burial depth and pipe material properties on the analysis results varies depending on pipeline layouts and other parameters such as displaced ground block length and displacement amounts. Contributions of all these factors on pipeline performance are explained in detail to provide guidelines for the design and preliminary evaluation of the pipelines by institutions which operates the systems.



## Depremlerde uzun eksenleri doğrultusunda kalıcı yer hareketlerine maruz kalan gömülü boruların davranışı

Selçuk Toprak<sup>1,\*</sup>, Engin Nacaroglu<sup>2</sup>, Berk Yağcıoğlu<sup>2</sup>, Orhan Alp Çetin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 41400, Kocaeli, Türkiye

<sup>2</sup>Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 20070, Denizli, Türkiye

<sup>3</sup>Devlet Su İşleri, 18. Bölge Müdürlüğü, 20070, Isparta, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Boru hatlarının yerleşimleri, uzunluğu doğrultusunda zemin deplasmanlarına verdikleri tepkide etkilidir
- Zemin ve boru değişkenlerinin birbirine etkileri mevcuttur
- Hareketli zemin bloğunun uzunluğu ve bloğun yer değiştirme miktarı boru hattı davranışı üzerinde önemli etkilere sahiptir

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 05.05.2023

Kabul: 16.08.2024

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1292744

### Anahtar Kelimeler:

Gömülü boru hatları,  
sonlu elemanlar analizleri,  
kalıcı zemin  
deformasyonları,  
zemin-boru etkileşimi

### ÖZ

Geçmiş depremlerden gözlemler, boruların özellikle kendi uzun eksenleri doğrultusunda yer hareketlerinden daha olumsuz olarak etkilendikleri ve hasar görebildiklerini göstermiştir. Bu gözleme bağlı olarak mevcut çalışmada deprem etkisiyle boru doğrultusunda zemin hareketine maruz gömülü sürekli boru hatları değerlendirilmiştir. Sayısal analizlerde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Analizlerde doğalgaz hatlarında yaygın olarak kullanılan çelik boru cinsi tercih edilmiş, değişken olabilecek parametreler olarak boru çapı, borunun mekanik özellikleri, gömme derinliği, zemin-boru sürtünmesi ve yer hareketinin değerleri alınmıştır. İlave olarak, yolların ve mevcut yapıların durumuna bağlı olarak boruların 8 farklı geometrik yerleşime sahip olmaları da değerlendirilmiştir. Böylece farklı boru yerleşim durumları için düşük seviyeden yüksek seviyeye kadar kalıcı yer hareketleri (0,01-4 m) etkisi altında davranışları belirlenmiştir. Analizler sonucunda, boru hattında meydana gelen yer değiştirmeler, çekme ve basınç şekil değiştirmeleri ile çekme ve basınç gerilmeleri elde edilerek kullanılan parametrelerin boru üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, gömülü çelik boruların deprem sonucu oluşabilecek farklı kalıcı yer hareketleri etkisi altında davranışını göstererek uygulamada boru hatlarını işleten kurumlara tasarım ve ön değerlendirmelerinde katkı sağlayacaktır.

## Behavior of buried pipes exposed to longitudinal permanent ground deformations in earthquakes

### H I G H L I G H T S

- Layout of the pipelines have influence on their response to longitudinal ground displacements
- Interdependent effects of soil and pipe variables
- The length of moving ground block and the amount of ground displacement have significant effects on pipeline behavior

### Article Info

Research Article

Received: 05.05.2023

Accepted: 16.08.2024

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1292744

### Keywords:

Buried pipelines,  
finite element analyses,  
permanent ground  
deformations,  
soil-pipe interaction

### ABSTRACT

Observations from past earthquakes have shown that pipes are more adversely affected and damaged by ground movements, particularly in the direction of their long axis. Based on this observation, the present study evaluates buried continuous pipelines exposed to ground movement in the direction of the pipe due to earthquakes. Numerical analysis was conducted using the finite element method. Commonly used types of steel pipes in natural gas lines were selected for the analysis, with pipe diameter, mechanical properties of the pipe, burial depth, soil-pipe friction, and ground movement values considered as variable parameters. Additionally, eight different geometrical layouts of the pipes, depending on the condition of the roads and existing structures, were evaluated. The behavior of these pipelines under the influence of permanent ground movements (ranging from 0.01 to 4 meters) was determined for different pipe placement situations. The analysis yielded results for displacements, tensile and compressive deformations, and tensile and compressive stresses in the pipeline. The effects of the varying parameters on the pipe were also determined. The study's results illustrate the behavior of buried steel pipes under different permanent ground movements caused by earthquakes and contribute to the design and preliminary evaluations of buried pipelines by the operating institutions.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*stoprak@gtu.edu.tr, enacaroglu@pau.edu.tr, byagcioglu13@posta.pau.edu.tr, oacetin@dsi.gov.tr / Tel: +90 535 660 6689

## 1. Giriş (Introduction)

Geçmiş depremlerden gözlemler gömülü boru hatlarının deprem yükleri altında farklı şekillerde hasar gördüğünü göstermiştir. Hasar sonucunda boru hattının taşıdığı malzemeye göre farklı riskler oluşur. İçme suyu hatlarında yerleşim veya sanayi bölgesinin uzun süreli susuz kalma problemi ortaya çıkarken özellikle petrol ve doğal gaz boru hatlarında, hasarın neden olduğu yangın, patlama, çevre kirliliği ve can kayıpları gibi kritik sonuçlar ortaya çıkar. En genel manada depremin gömülü boru hatları üzerine olan zararı, geçici yer deformasyonlarıyla (GYD) ya da kalıcı yer deformasyonlarıyla (KYD) olmaktadır. GYD deprem dalgalarının geçişi esnasında oluşan, zeminin dinamik tepkisi iken KYD deprem sonrasında zeminde oluşan ve geri dönmeyen son yer değiştirmelerdir. GYD bazen küçük miktarda kalıcı deformasyonlar oluşturabilir fakat bunlar genelde yüzeysel etkilerdir. KYD genellikle büyük olmakta, örneğin fay hatlarının hareketlerini, şev kaymalarını, zemin sıvılaşması sonucu oluşan yer değiştirmeleri ve kohezyonsuz topraklarda oluşan farklı oturumları içine almaktadır. KYD'nin borular üzerine hasarlarının büyüklüğü ve ciddiyeti konusunda literatürde pek çok örnek mevcuttur [1-3]. Örnek olarak 1999 Kocaeli (İzmit) depreminde fay hattını 55 derecelik açı ile kesen 2200 mm çap ve 18 mm et kalınlığına sahip Thames su çelik borusunda oluşan hasarlar farklı araştırmacılar tarafından incelenmiştir [4-8]. Çelik boru, fay hareketi sonucu basınç etkisi altında 3 noktada hasar görmüş, iki noktada boru çapını 1400 mm'ye indiren buruşmalar ve parmak genişliğinde çatlaklar oluşmuştur. GYD etkilerinin değerlendirilmesinde genellikle pik yer hızları veya benzeri deprem parametreleri, boru hasarları ile ilişkilendirilmektedir ve GYD nedeniyle gerçekleşecek boru hasarı tahmini ile ilgili olarak Toprak ve Taşkın'da [9] Denizli şehri için örnek bir uygulama yapılmıştır. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinde faylar, heyelanlar ve yanal yayılmalar kaynaklı KYD ve zemin sarsıntısı kaynaklı GYD nedeniyle depremden etkilenen bölgede su ve doğalgaz iletim hatlarında çok sayıda boru hasarı oluşmuştur [10, 11].

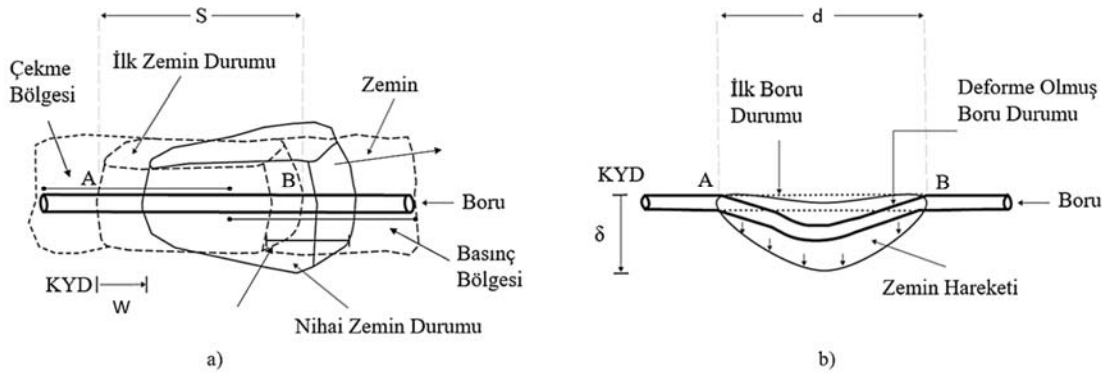
Bilinen fay hatlarını kesen boru hatları hariç genelde mevcut boru hatlarının önemli bir kısmı KYD'ler göz önüne alınmadan tasarlanmaktadır. Bunun temel nedenlerinden biri boru hatlarının uzun kilometrelere uzanması ve bu hat boyunca yapılacak KYD hesaplarının genelde ilave geoteknik incelemeler gerektirmesi ve sonrasında da ayrı bir uzmanlık kapsamında detaylı analizler yapılması ihtiyacıdır. Wham vd. [12] çalışmasında, boruların uzun eksenleri doğrultusundaki KYD nedeniyle oluşan boru hareketleri ve şekil değiştirmelerin belirlenmesi için çözüm yöntemleri oluşturmuş ve O'Rourke ve Nordburg [13] tarafından önerilen çözüm yöntemiyle karşılaştırmıştır. Boru hasar ilişkileri kullanılarak belirli bir bölge için

olası boru hasarının belirlenmesi ile ilgili farklı yaklaşımlar Toprak vd. [14] tarafından karşılaştırılmıştır. Literatürde ayrıca büyük ölçekli boru deneylerinde farklı fay yapıları için boruların KYD altındaki davranışı laboratuvar ortamında değerlendirilmiş ve nümerik yöntemlerle uyumları ortaya konulmuştur [15-17]. Sonlu elemanlar yöntemi ile boru davranışlarının belirlenmesi literatürde sıklıkla kullanılan bir yöntem olmak ile beraber, zemin yer değiştirmelerinin boru birleşim noktaları modellere dahil edilmemektedir [18-20]. Bu açıdan şehir şebekelerine uyumlu olarak modellenmiş analizler, gömülü boru hatları tasarımında ön değerlendirme sağlayarak detaylı analizlere gerek olup olmadığının kararını almayı sağlayacak değerlendirmeler ayrı bir önem taşımaktadır. Bu çalışmada çok sayıda sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilerek gömülü boru hattı tasarımında önemli olan zemin, boru ve yer hareketi özelliklerinin etkileri gösterilmiş ve sonuçlar ön değerlendirmede kullanılabilen referans durumlar abaklar halinde sunulmuştur. Bunun yanı sıra referans değerlere etki eden parametre değişimleri ve bu değişimlerin nedenleri saha koşulları doğrultusunda açıklanmıştır.

Geçmiş depremlerden gözlemler boruların özellikle kendi uzun eksenleri doğrultusunda yer hareketlerinden (Şekil 1a) kendi eksenlerine dik ya da eğik olanlara göre (Şekil 1b) daha olumsuz olarak etkilendikleri yönündedir [21, 22]. Bu gözleme bağlı olarak mevcut çalışmada eksenel yönde harekete maruz gömülü boru hatları sonlu eleman analizleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Boru cinsi olarak doğalgaz hatlarında sıklıkla karşılaşılan çelik borular seçilmiştir. Farklı boru çapı, boru mekanik özellikleri, gömme derinliği, zemin boru sürtünmesi ve yer hareketi durumları için analizler gerçekleştirilmiştir. İlave olarak, yolların ve mevcut yapıların durumuna bağlı olarak boruların farklı geometrik yerleşimlere sahip olmaları da göz önüne alınmıştır. Böylece farklı boru yerleşim durumları için düşük seviyede yüksek seviyeye kadar KYD etkileri göz önüne alınmıştır. Parametrelerin ve yerleşim modellerinin çokluğundan dolayı on binlerce analiz gerçekleştirilerek bu çalışmanın sonuçları elde edilmiştir. Analizler sonucunda boru hattında meydana gelen yer değiştirmeler, çekme ve basınç şekil değiştirmeleri ile çekme ve basınç gerilmeleri elde edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarının gömülü çelik boruların çok farklı KYD boyutları etkisi altında davranışını ortaya çıkarması ve benzer boru hatlarını işleten kurumlara rehberlik ile bu sistemlerinin deprem sonucu oluşabilecek KYD etkisi altında değerlendirilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

## 2. Metot (Method)

Boru hatlarının güzergahları yerleşim alanlarındaki ihtiyaca, cadde ve sokakların durumlarına ve hidrolik modellemelere göre



Şekil 1. Eksenine paralel ya da dik yönde KYD etkisinde kalan gömülü boru [23]  
(Buried pipeline under the influence of axial or perpendicular PGD)

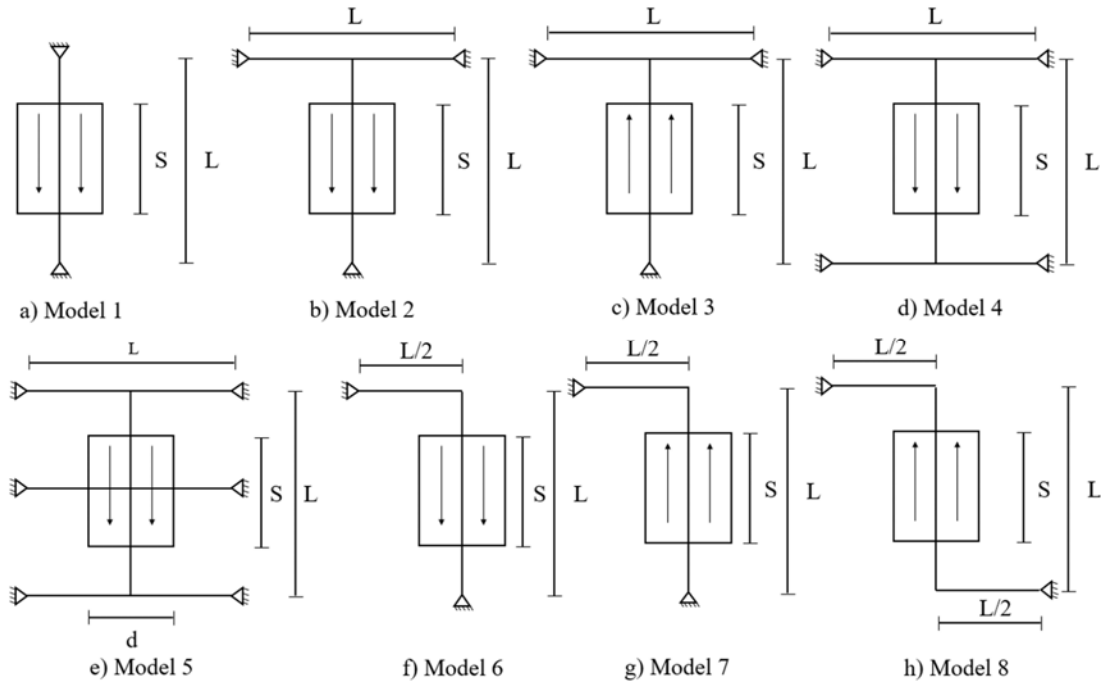
belirlenmektedir. Bu çalışma kapsamında, mevcut boru hatları haritaları incelenerek yerleşim bölgeleri ve civarında en yaygın karşılaşılan boru hattı güzergahlarına göre 8 farklı boru modeli belirlenmiştir. Bu boru modelleri, numerik analizler kullanılarak boruların en ciddi şekilde etkileyen KYD'lerden olan boru eksenine paralel yer hareketine maruz bırakılmışlardır. Şekil 2 analizlerde kullanılan modelleri göstermektedir. Analizlerde L uzunluğundaki boru, eksenini doğrultusunda farklı uzunluklarda (S) zemin kütlelerinin (yer hareketi bloğu) hareket etkisine maruz bırakılmıştır. Yer hareketinin hangi yönde olduğu da şekilde gösterilmiştir. Boru uzunluğu, L, göreceli olarak uzun belirlenerek 600 m olarak alınmış ve boruya uygulanacak yer hareketi bloğunun uzunluğu, S, ise boru uzunluğunun bir oranı olarak L/20, L/18, L/16, L/12, L/8, L/6, L/4, L/2, 3L/4 ve 9L/10 olarak seçilmiştir. Bu oranların karşılık geldiği uzunluklar sırasıyla şöyledir: 30, 34, 38, 50, 75, 100, 150, 300, 450 ve 540 m. Uygulamada, boru boyu, L borunun yerleştirildiği güzergah ve hareketi beklenen zemin bloğunun uzunluğuna (S) göre belirlenebilir. Borunun bir yol hattını takip ederek dönüş yaptığı noktalar ya da borunun hareketini sınırlayan konumlar L uzunluğunun bir ucunu oluşturacaktır. Borunun düz devam ettiği noktalarda ise L uzunluğu  $0,1 \leq (S/L) \leq 0,9$  aralığında değişebilir. Yer hareketi bloğunun uzunluğunun yanında boruya etki eden yer hareketinin önemli özelliklerinden birisi de yer hareketi miktarıdır. Bu çalışmada boruya etki ettirilecek yer hareketi değerleri 10, 30, 50, 100, 250, 500, 1000, 2000, 4000 mm olarak belirlenmiştir ve grafiklerde W10, W30, W50, W100, W250, W500, W1000, W2000 ve W4000 olarak gösterilmiştir. Bir örnek olması açısından, 1994 Northridge depreminde Balboa Bulvarında borulara hasar veren KYD özellikleri 275 m uzunluğunda bir yer hareketi bloğu ve 50 cm yer hareketidir [24]. Özellikle boru hatlarının KYD etkisi altında davranışının değerlendirildiği durumda farklı özellikleri göz önüne almak gerekmektedir. Boru hatlarında boru ve zeminle ilgili pek çok değer değişkenlikler içermektedir. Bunlar en genel manasıyla boru boyutları, malzeme özellikleri ve zemin-boru etkileşim faktörleridir. Boru ve zemin özellikleri sabit olarak kabul edilse bile 10 farklı eksenel yer hareketi boyutu, 9 farklı yer hareketi büyüklüğü ile 8 farklı boru yerleşim modeli ile oluşturulan kombinasyonlar 720 analiz gerektirmektedir. Bu çalışma kapsamında boru ve zemin

özelliklerinde de değişiklikler göz önüne alındığından on binlerce analiz gerçekleştirilmiştir.

### 2.1. Boru ve Malzeme Özellikleri (Pipe and Materials Properties)

Analizlerde doğal gaz hatlarında yaygın olarak kullanılan anma çapı 400 ve 200 mm olan çelik boru hatları incelenmiştir. Anma çapı 400 mm olan borunun dış ve iç çapları sırasıyla 406 ve 387 mm, et kalınlığı 9,5 mm'dir. Anma çapı 200 mm olan borunun dış ve iç çapları sırasıyla 219,1 ve 202,7 mm, et kalınlığı 8,18 mm'dir. Yeraltı gaz boru tesisatında kullanılacak çelik borular TS EN ISO 3183'e [25] uygun olmalıdır. Bu tür borular standartlara uygun kaynaklandığında ek noktalarında bir zayıflama olmadığından analizlerde sürekli borular olarak değerlendirilir. Malzeme özellikleri açısından doğal gaz ve petrol hatlarında çelik boru seçiminde farklı standartlar uygulanabilmektedir. Genelde API Spec 5L [26] kullanılmaktadır ve boruların dış kaplaması polietilen (PE)'dir. API Spec 5L, petrol ve doğal gaz endüstrilerinde boru hattı gaz, su ve petrol taşıma sistemlerinde kullanım için dikişsiz ve kaynaklı çelik boruların iki ürün spesifikasyon seviyesinin (PSL 1 ve PSL 2) üretimi için gereksinimleri belirten uluslararası bir standarttır. PSL 1, hat borusu için standart kaliteyi, PSL 2 ise ek kimyasal, mekanik özellikler ve test gereksinimlerini içerir. Bu spesifikasyonun kapsadığı kaliteler A25, A, B ve "X" Sınıfları X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70 ve X80'dir. "X" i takip eden iki haneli sayı, bu kalitede üretilen borunun ksi biriminden minimum akma dayanımını gösterir. Boru hatlarını işleten firmalar ihtiyaçlarına göre farklı spesifikasyonlarda borular kullanabilirler. Örneğin, İGDAŞ çelik boru hatlarında genellikle API SPEC 5L Grade B kullanılmaktadır [27]. Bu çalışmada analizlerde Grade B cinsi boruya ilaveten akma dayanımı daha yüksek olan X52 boru cinsi de analiz edilmiştir.

Şekil 3, analizlerde kullanılan Grade B ve X52 çelik boruların gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini göstermektedir. Grade B borular için gerilme şekil değiştirme grafiği İGDAŞ tarafından yapılmış deney sonuçlarından elde edilmiştir. Literatürde Grade B için farklı gerilme şekil değiştirme grafikleri de mevcuttur. Bu açıdan, analizlerde gerçeğe en yakın sonuçları elde etmek için alınan



Şekil 2. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan modeller (Models used in the finite element analysis)

numuneler üzerinde deney yapılarak boru malzeme özelliklerini belirleme yolu tercih edilmektedir. X52 için ise gerilme şekil değiştirme grafiği O'Rourke ve Liu'dan [28] alınmıştır. Bu ilişkilere uygun olarak analizlerde malzemenin doğrusal olmayan davranışı göz önüne alınmıştır. Boru malzemesinin akma ve minimum çekme dayanımları Grade B ve X52 borular için sırasıyla 316 ve 358 MPa'dır.

## 2.2. Gömme Derinliği (Embedment Depth)

Boru-zemin etkileşimini etkileyen önemli parametrelerden biri boruların gömü derinliğidir. Toprak altına dönecek doğal gaz hattı için gerekli olan minimum tranşe (toprak altı boru döşeme kanalı) derinlikleri Şekil 4'te verilmiştir [29]. Bu çalışmada çelik boru üst seviyesinden yüzeye olan en az mesafe 60 cm olarak alınmıştır. Farklı nedenlerden dolayı boru hattı daha derinlere gömülebilmektedir. Çelik borunun aşırı yüke maruz kalabileceği (yol geçişi, araç geçişi vb.) durumlarda tranşe derinliği arttırılmakta ve boru üst seviyesinin tranşe üst seviyesine olan mesafesi en az 80 cm olmaktadır. Bu şekilde olabilecek en büyük derinlik de bu çalışma kapsamında boru üst seviyesinden tranşe üst seviyesine 160 cm olarak seçilmiştir.

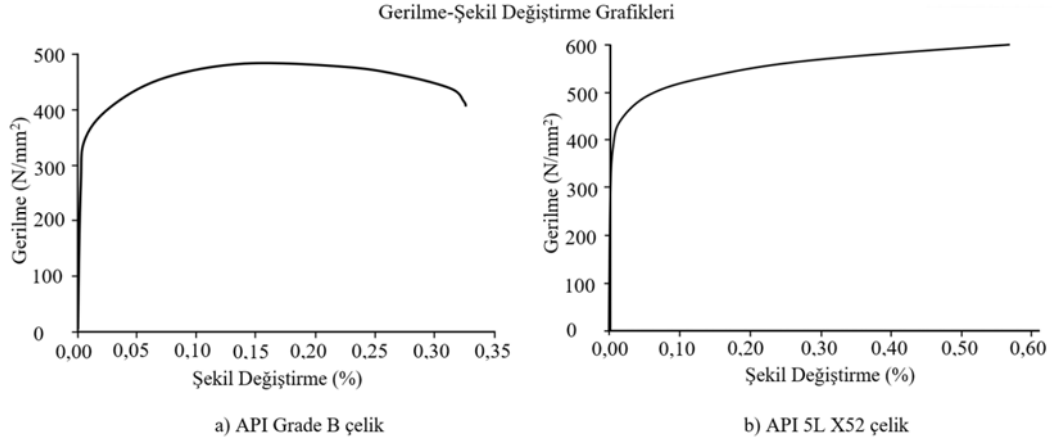
## 2.3. Zemin Özellikleri (Soil Properties)

Deprem etkisiyle zeminde meydana gelen hareketler boruya borunun etrafını çevreleyen zemin tarafından aktarıldığı için zemin özellikleri

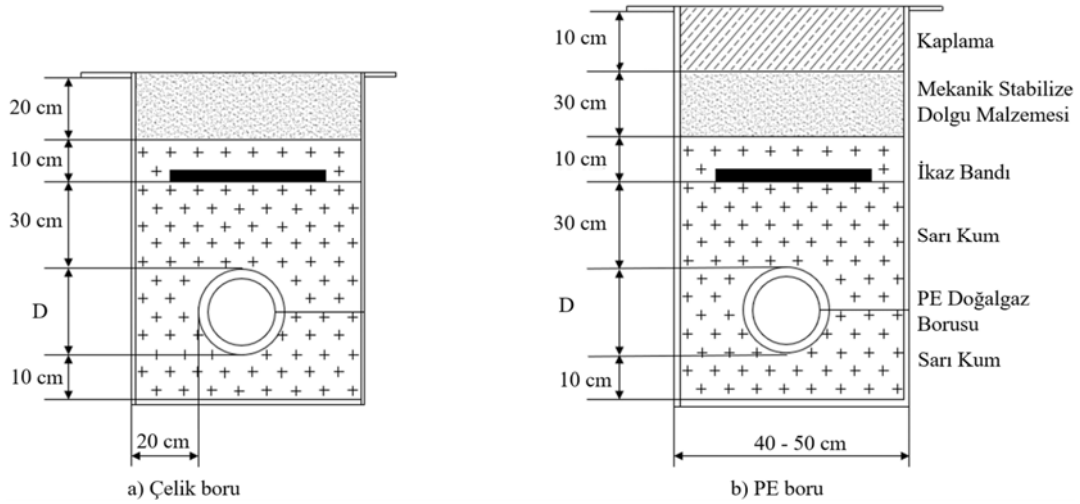
ayrı bir önem taşımaktadır. Şekil 4'te gösterildiği gibi uygulamada doğalgaz borularının etrafında sarı kum diye tarif edilen zemin kullanılmaktadır. Piyasadan elde edilen bu tür zemin üzerinde gerçekleştirilen elek ve hidrometre deneylerine bağlı olarak çizilen granülometri eğrisi Şekil 5 üzerinde gösterilmiştir. TS 1900-1'de [30] belirtilen deneylere göre belirlenen zeminin indeks özellikleri de Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca bu zemin üzerinde farklı rölatif sıklıklar için gerçekleştirilen TS 1900-2'ye [31] göre gerçekleştirilen deneylerden elde edilen içsel sürtünme açıları Tablo 2'de sunulmuştur.

**Tablo 1.** Zemine ait indeks özellikleri (Soil index properties)

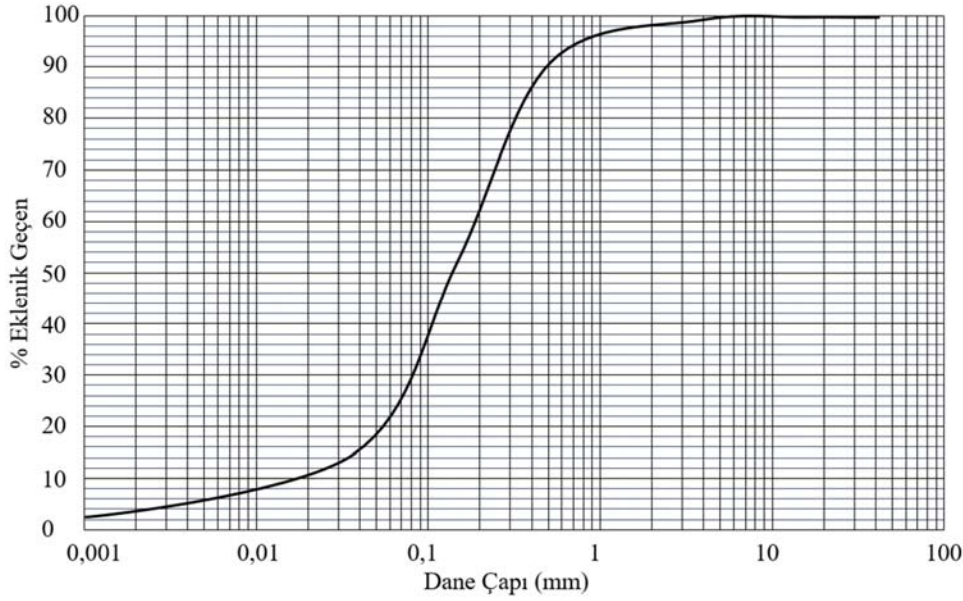
Zemin İndeks Özellikleri	Değerler
Özgül Ağırlık ( $G_s$ )	2,65
Maksimum Boşluk Oranı ( $e_{max}$ )	1,14
Minimum Boşluk Oranı ( $e_{min}$ )	0,47
$D_{10}$ (mm)	0,022
$D_{30}$ (mm)	0,082
$D_{60}$ (mm)	0,230
Üniformluk katsayısı ( $C_u$ )	10,36
Eğrilik katsayısı ( $C_c$ )	1,36



**Şekil 3.** Çelik borular için gerilme şekil değiştirme diyagramı (Stress strain diagram for steel pipes)



**Şekil 4.** Toprak altı hat detayı [27] (Underground pipeline detail)



Şekil 5. Zemin granülometri eğrisi (Particle-size distribution curve)

**Tablo 2.** Zemin için farklı rölatif sıklıklara karşılık gelen içsel sürtünme açıları (Friction angles at different relative densities for soils)

Rölatif Sıklık ( $D_r$ )	Boşluk Oranı ( $e$ )	İçsel Sürtünme Açısı ( $\phi$ )
60	0,72	36°
70	0,66	38°
80	0,55	39°

#### 2.4. Sayısal Analizler (Numerical Analysis)

Sayısal analizlerde DIANA [32] sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizleri içerisinde boru hatları kiriş elemanları olarak, zemin ise elastik-mükemmel plastik yaylar kullanılarak modellenmiştir. Yer hareketinin olduğu bölgedeki yaylarda yay mesnetlerine yer hareketi kadar deplasman tanımlanmıştır, yer hareketi oluşmayan bölgedeki yaylarda ise yay mesnetleri hareket ekseninde tutulmuştur. Yayların aynı ekseninde çift yönlü çalışmaları sebebiyle, boru boyunca tanımlanan yaylar boruyu bölgesel olarak harekete geçirme ve boru hareketini engelleme özelliğine sahiptir. Zemini tanımlarken kullanılan yay elemanlar hem boru yönünde hem boruya dik yönde tanımlanmıştır. Bu sayede zemin-boru etkileşiminin gerçeğe en yakın şekilde modellenmesi amaçlanmıştır (Şekil 6a). Borunun malzeme özellikleri doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme grafikleri ile tanımlanırken hem boru yönündeki hem boru yönüne dik yöndeki boru zemin etkileşiminin de doğrusal olmayan özelliklerinin sonlu elemanlarla tanımlanması sağlanmıştır. Boru-zemin eksenel ilişkisinin modellenmesinde kullanılan elastik-mükemmel plastik yay özellikleri Eş. 1 ve Eş. 2'de [21] verilmiştir. Burada,  $t_u$  = boru eksenel doğrultusundaki birim boru uzunluğuna karşılık gelen birim zemin dayanımı kuvveti,  $x_u$  = maksimum zemin dayanımına karşılık gelen eksenel yer değiştirme,  $D$  = boru dış çapı,  $\alpha$  = adezyon faktörü,  $S_u$  = drenajsız kayma mukavemeti,  $\gamma$  = efektif zemin birim hacim ağırlığı,  $H$  = boru orta noktasının derinliği,  $K_0$  = sükünat durumundaki yanıl toprak basıncı,  $\phi$  = içsel sürtünme açısı,  $k$  = boru dış yüzeyi ve çevreleyen zemin arasındaki sürtünme katsayısını ifade etmektedir. Yayların çalışma doğrultularına göre kuvvet ( $p_u$ ,  $t_u$ ) ve yer değiştirme ( $x_u$ ,  $y_u$ ) değerleri ile oluşturulan elastik-mükemmel plastik yayların kuvvet-yer değiştirme ilişkisi Şekil 6b'da verilmiştir.

$$t_u = \begin{cases} \pi D \alpha S_u & \text{Kil için} \\ \frac{\pi D}{2} \bar{\gamma} H (1 + K_0) \tan \phi & \text{Kum için} \end{cases} \quad (1)$$

$$x_u = \begin{cases} 2,54 \text{ mm ile } 5,08 \text{ mm Sıkı ila gevşek kum} \\ 5,08 \text{ mm ile } 10,16 \text{ mm Sert ila yumuşak kil} \end{cases} \quad (2)$$

Boru-zemin yatay ilişkisini modellemede kullanılan elastik-mükemmel plastik yay özellikleri Eş. 3 ve Eş. 4'te [21] verilmiştir. Burada  $p_u$  = boru eni doğrultusundaki birim boru uzunluğuna karşılık gelen birim zemin dayanım kuvveti,  $y_u$  = maksimum zemin dayanımının elde edildiği boru eni doğrultusundaki deplasman,  $N_{qh}$  ve  $N_{ch}$  taşıma faktörü katsayılarıdır [21, 33].

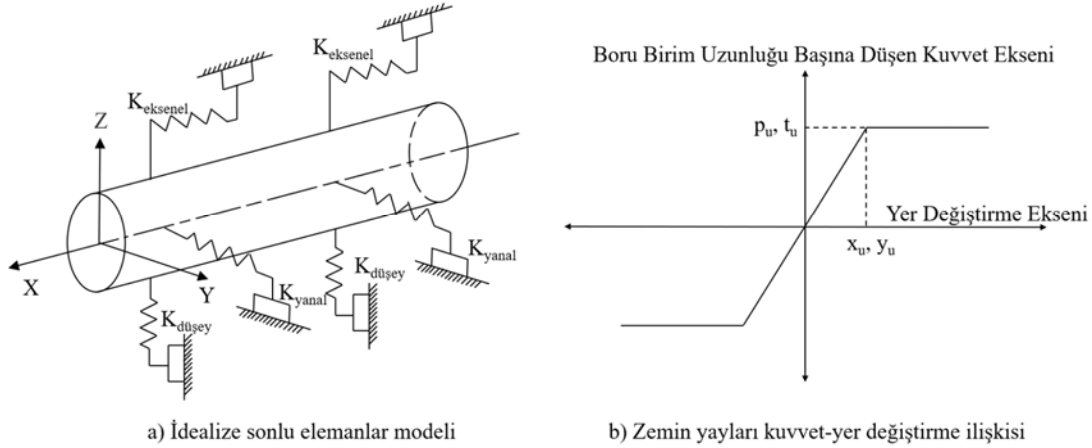
$$p_u = \begin{cases} S_u N_{ch} D & \text{Kil için} \\ \bar{\gamma} H N_{qh} D & \text{Kum için} \end{cases} \quad (3)$$

$$y_u = \begin{cases} 0,07 \text{ ila } 0,10 (H + D/2) \text{ Gevşek kum için} \\ 0,03 \text{ ila } 0,05 (H + D/2) \text{ Orta sıkı kum için} \\ 0,02 \text{ ila } 0,03 (H + D/2) \text{ Sıkı kum için} \\ 0,03 \text{ ila } 0,05 (H + D/2) \text{ Sert ila yumuşak kil} \end{cases} \quad (4)$$

Yukarıda açıklanan tüm değişkenler göz önüne alınarak 8 farklı analiz grubu oluşturulmuştur. Tablo 3 analiz gruplarında kullanılan boru, malzeme, gömme derinliği ve yanıl itki katsayısı değerlerini vermektedir. Şekil 2'de verilen her bir model için Tablo 3'te verilen 8 analiz grubu çalıştırılarak elde edilen sonuçlar bir sonraki bölümde sunulmuştur. Analiz modellerinde kullanılan yay parametreleri Tablo 4'te verilmiştir.

### 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Boru tasarımlarında ve performans değerlendirmelerinde ağırlıklı olarak şekil değiştirmeler göz önüne alınmaktadır. Örneğin, Eurocode 8 Bölüm 4 [34] çekme şekil değiştirme sınırını 3% ve basınç şekil değiştirme oranı sınırını ise 1% ya da 20 t/r (%) değerlerinden küçük olanı olarak tanımlamaktadır. Burada,  $t$  ve  $r$  sırasıyla borunun kalınlığı ve yarıçapını ifade etmektedir. Mevcut çalışmada kullanılan 200 ve 400 mm çaplı çelik borular için basınç şekil değiştirme oranı sınırı Eurocode açısından sırasıyla 0,75% ve 0,47% olarak



Şekil 6. Sonlu elemanlar zemin yayları (Soil springs force-displacement relationship)

hesaplanmaktadır. Bu yaklaşıma paralel olarak mevcut çalışmadaki çelik boru modellerinin numerik analiz sonuçları, boruda meydana gelen maksimum çekme birim şekil değiştirme ve boru yer değiştirme grafikleri ile sunulmuştur.

**Tablo 3.** Analizlerde kullanılan boru, malzeme, gömme derinliği ve yanal itki katsayısı kombinasyonları  
(Pipe, material, embedment depth and lateral soil pressure coefficient combinations used in the analysis)

Grup Adı	Boru Malzemesi	Çap (mm)	Derinlik (m)	$K_0$
P1	API 5L X52	200-400	1,7	1,0
P2	API 5L Grade B	200-400	1,7	1,0
P3	API 5L X52	200-400	1,7	0,4
P4	API 5L Grade B	200-400	1,7	0,4
P5	API 5L X52	200-400	0,7	1,0
P6	API 5L Grade B	200-400	0,7	1,0
P7	API 5L X52	200-400	0,7	0,4
P8	API 5L Grade B	200-400	0,7	0,4

**Tablo 4.** Zemin-Boru etkileşim yaylarına ait kuvvet-yer değiştirme parametreleri  
(Force-displacement parameters of soil-pipe interaction springs)

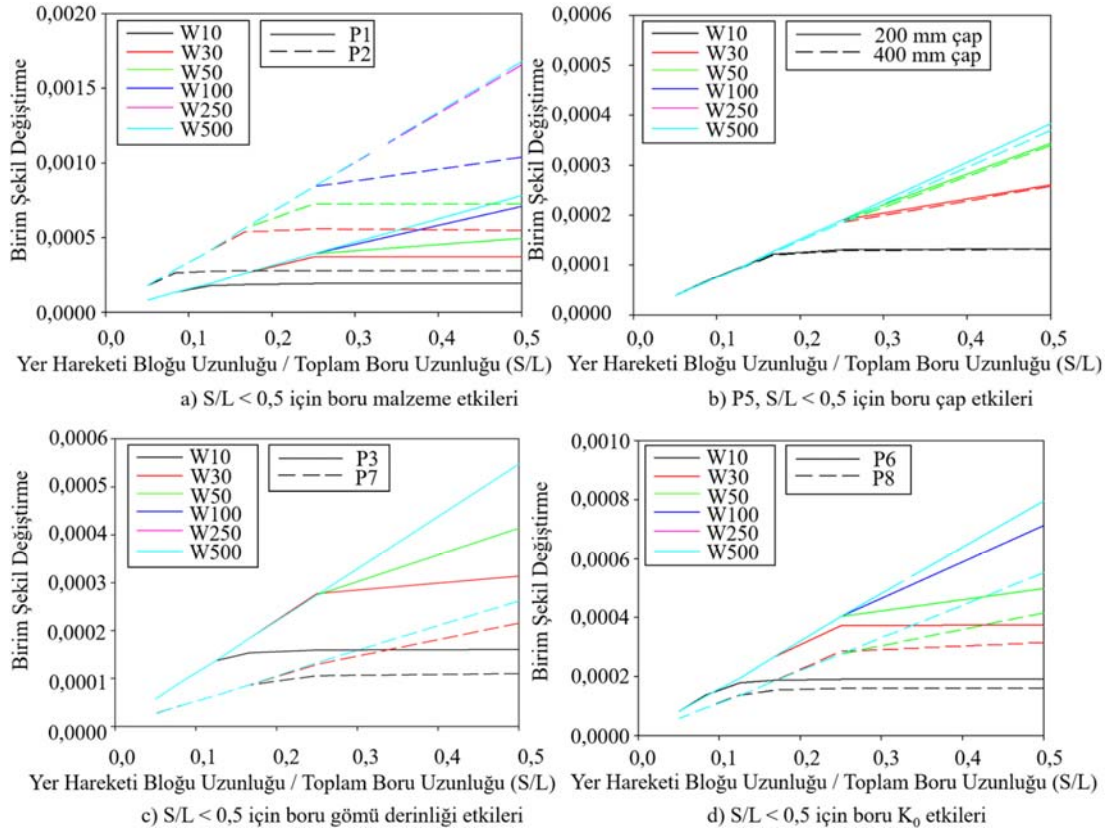
Grup Adı	Çap	$t_u$ (N)	$x_u$ (mm)	$p_u$ (N)	$y_u$ (mm)
P1-P2	200	6564	3	51742	51
P3-P4	200	4589	3	51742	51
P5-P6	200	2871	3	16349	24
P7-P8	200	2008	3	16349	24
P1-P2	400	13247	3	92783	57
P3-P4	400	9261	3	92783	57
P5-P6	400	6234	3	31655	30
P7-P8	400	4358	3	31655	30

Model 5 dışındaki boru yerleşim modelleri için yer hareketi bloğu uzunluğunun (S), toplam boru uzunluğunun (L) yarısına eşit veya daha küçük olması durumunda yerleşim modelinin farklılığı sonuçlar üzerinde belirgin bir değişiklik oluşturmamaktadır. Bunun nedeni modellerde uçlara eşit mesafede olan yer hareketinin boru üzerinde oluşturduğu etkinin, aksenal etki altındaki borunun uçlarına ulaşmadan yer hareketi bölgesi dışında kalan zemin tarafından sönmülmesidir. Buna bağlı olarak Şekil 7'de Model 5 dışındaki tüm boru geometrileri için  $S/L < 0,5$  davranışına ait şekil değiştirmeler parametre değerlerine bağlı olarak sunulmuştur.

Boru malzeme özellikleri kalıcı yer deformasyonları altında boru hattında meydana gelen şekil değiştirme seviyelerinde etkili

olmaktadır. Aynı zemin ve boru geometrisi koşulları altında boru malzeme özellikleri değiştiğinde, boru gerilmelerinin gerilme-şekil değiştirme grafiğindeki (Şekil 3) elastik bölgede kalması durumunda şekil değiştirmeler elastisite modüllerinin oranına bağlı olarak değişmektedir (Şekil 7a). Pekleşmenin gerçekleşeceği gerilme durumlarında ise pekleşme kaynaklı davranış nedeniyle boru geometrisinde gerilme-şekil değiştirmelere bağlı plastik şekil değiştirmeler oluşacaktır ve boru geometrisi buna bağlı olarak değişecektir. Plastik şekil değiştirmeler borunun model geometrisini elastik duruma göre daha yüksek düzeyde değiştireceği için doğrudan gerilme-şekil değiştirme grafiklerinden bir çıkarımda bulunulamaz. Bu nedenle pekleşmenin gerçekleştiği durumlarda sonlu elemanlar veya sonlu farklar gibi yöntemlerle ayrıca nümerik çözümleme yapılması gereklidir. Bu çalışmada ele alınan iki farklı boru malzemesi (Grade B ve X52) için gerilmelerin elastik bölgede kaldığı durumlarda X-52 malzemeli boru şekil değiştirmelerinin, Grade B malzemeli boru şekil değiştirmelerine oranı %47-60 seviyesindedir. Bu da elastisite modülünün ters oranlarına karşılık gelmektedir (Grade B için 97880 MPa, X52 için 210000 MPa). Borudaki maksimum gerilmenin, boru malzemesi akma dayanımını sadece bir boruda geçmesi durumunda borudaki şekil değiştirmeler ise akma dayanımlarına göre değişmektedir. Çalışmada kullanılan 200 ve 400 mm borularda çapa bağlı olarak tepki değerleri maksimum %10 seviyesinde değişmektedir. Artan boru çapıyla birlikte boru ile zemin arasında sürtünme artarken kesit alanındaki artışla şekil değiştirmeler azalmakta ve toplam değişim düşük olmaktadır (Şekil 7b). Gömü derinliği 0,7 metreden 1,7 metreye çıkarıldığında, şekil değiştirmeler ve gerilmeler incelenen tüm durumlarda %32 ile %115 arasında artış göstermiştir. Yüksek artışlar boru-zemin etkileşimini temsil eden yayların aktığı deplasmanlar seviyesinde gerçekleşmektedir (Şekil 7c).  $K_0$ , 0,4'ten 1'e çıkarıldığında, farklı geometriler için maksimum şekil değiştirmeler %20-%45 arasında artmıştır. Kazı derinliği etkisine benzer şekilde zemin-boru etkileşim yaylarının akması durumunda gerilme ve şekil değiştirmelerdeki değişim  $K_0$ 'la orantılı olarak %40-45, yayların akmadığı durumlarda ise %10-%45 arasında değişmektedir (Şekil 7d).

Yer hareketi zemin bloğu ve gömülü boru hattı sınırı arasında, hareketli zemin bloğu uzunluğuna eşit veya daha büyük uzunlukta mesafe bulunmaması durumunda, borunun sınır şartları etkili olmaktadır ( $S/L > 0,5$ ). Bu mesafe hareketli zemin bloğu uzunluğundan küçük olduğunda borunun ucuna başka bir borunun bağlı olması ya da hareketi engelleyen bir mesnetin varlığı, tepkilerin büyüklüğünü etkilemektedir. Bu durum için farklı yayın kullanılan 8 farklı model geometrisi için üç farklı davranış gözlemlenmektedir. Bu üç farklı davranış arasından ilk durum, iki boru ucunun da hareketinin



**Şekil 7.**  $S/L < 0,5$  blok aksenal yer hareketi etkisi altındaki borulara ait şekil değiştirmeler (Strains of pipes under the influence of axial ground movement for  $S/L < 0,5$  block length condition)

engellenmesidir (Model 1). İkinci durum, borunun iki ucunun da başka boru sistemlerine bağlanmasıdır (Model 4, Model 5 ve Model 8). Üçüncü durum, bir boru ucunun hareketinin engellenmesi ve diğer ucunun başka bir boru sistemine bağlanmasıdır (Model 2, Model 3, Model 6 ve Model 7).

Durum 1’de, boru sınırı ve hareketli yer bloğu arasında daha büyük şekil değiştirmeler gözlenir ve bunlar KYD miktarına ve KYD bloğunun uzunluğuna göre değişiklik gösterir. İki ucunun hareketi engellenmiş borularda yer hareketi etkisiyle boru ucu ile yer hareketinin bittiği nokta arasında yer hareketi yönüne bağlı çekme veya basınç, gerilme ve şekil değiştirmeleri oluşur. KYD değerleri ve KYD bloğu uzunlukları birbirine iliştirilmiştir. Zeminde gözlenen KYD değerinin sabit olduğu durumda, KYD bloğu uzunluğunun artırılması, boruda gözlenen gerilme şekil değiştirmeleri belirli bir KYD bloğu sınırına kadar arttırmaktadır ve o sınıra gelindiğinde KYD bloğu uzunluğunu borulara etkisi kalmamaktadır. Boru gerilmelerine etki eden KYD bloğu sınırı ise KYD’ye bağlı olarak artmaktadır.

Durum 2’de,  $S/L$ ’nin  $0,5$ ’ten büyük olması koşulunda hareketsiz zemin bölgesi boru hareketini engelleyememekte ve boru hareketli zemin bölgesi ile birlikte hareket etmektedir. Buna bağlı olarak boruda yüksek deplasmanlar (neredeyse zemin deplasmanı ile eşit boru deplasmanları) gözlenmekte ve aksenal hareket altındaki boruda gözlenen şekil değiştirmeler artmazken, bağlı borularda yüksek şekil değiştirmeler gözlemlenmektedir. Ayrıca  $S/L > 0,5$  için seçilecek her  $S$  değerinde oluşacak en büyük şekil değiştirme  $S/L = 0,5$ ’te oluşan şekil değiştirme ile eşdeğerdir. Bu modelde hasarların harekete maruz kalan borudan ziyade bu borunun bağlandığı diğer borularda gerçekleşmesi beklenmektedir. Durum 3’te ise boru hattı üzerinde, belirtilen üç durum arasında en yüksek etkiler gözlenir. Bu hasarlar birinci duruma benzer şekilde KYD’ye ve KYD bloğu uzunluğuna

göre değişiklik gösterir. Bu durumda borunun basınç bölgesindeki hareketi uç mesneti ile engellenmekte, çekme bölgesindeki ucu ise başka bir boruya bağlandığı için göreceli olarak serbest hareket edebilmektedir. Bu sebeple, yer hareketinin etkisine maruz kalan borunun basınç bölgesindeki hareketi sınırlı olmakta, çekme bölgesinde ise yer değiştirmesinin bir kısmını bağlı olduğu boruya deplasman olarak aktarmaktadır. Bu davranış şeklinden dolayı borunun basınç bölgesindeki gerilmeler ilk duruma göre artmıştır.

Durum 1 ve Durum 3 arasındaki şekil değiştirme ilişkileri, Model 1 ve Model 2 üzerinden Şekil 8’de gösterilmiştir. Şekil 8a’da boru uçlarının hareketi uç mesnetler ile engellenmektedir. Yer hareketi sonucu boru, hareketli zemin bloğu ile birlikte hareket etmekte ve boru mesnet bölgesi ve hareketli zemin bloğu arasında tanımlanan hareketsiz zemin bloğunda, hareket yönüne bağlı olarak çekme ve basınç davranışları göstermektedir. 500 mm’lik ve daha üstü yer hareketi altında, zemin-boru etkileşimini temsil eden yayların tüm etki alanında akması ve borunun akma sınırından uzak olması nedeni ile 500 mm’den büyük  $W$  değerleri için şekil değiştirme- $S/L$  grafiği doğrusaldır. Durum 3’e karşılık gelen Model 2 ve Model 3 arasındaki fark yer hareketi yönüdür. Yer hareketi yönünün değişmesinin sonucu olarak basınç bölgesinin çekme, çekme bölgesinin ise basınç bölgesi olduğu gözlenmektedir, gerilme-şekil değiştirme grafiklerinde tanımlanan parametrelerin doğası nedeni ile değişen bölgedeki çekme ve basınç değerleri sayısal değerlerini koruyarak boru orta noktasına göre simetrik olarak değişmektedir. Model 6’nın davranışı incelendiğinde Model 2 ile büyük benzerlikler göstermektedir. Model 6’da davranışı incelenen borunun üst ucu L tipi birleşim kullanılarak tek taraftan mesnetli bir boru ile bağlanmaktadır. Model 2 ile farklılık gösteren bu geometri sonucunda zemin hareketine karşı Model 6’da boru birleşimi bulunan uçta göreceli olarak daha fazla serbestlik vardır. Bu durum neticesinde boru, bağlantılı olduğu uçtan mesnetli



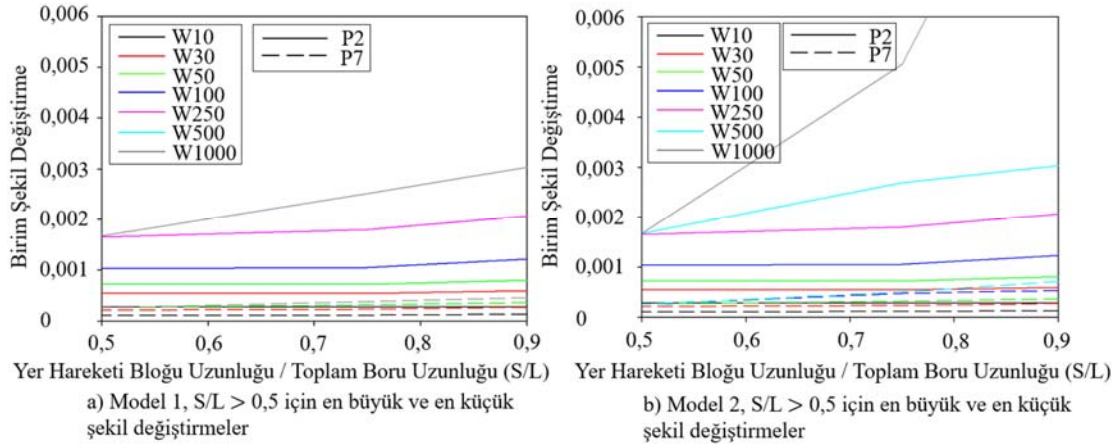
olduğu uca doğru fazla hareket etmekte ve borunun mesnetli ucunda oluşan gerilme ve şekil değiştirmeler artmaktadır. Model 2 ve Model 6 arasındaki diğer farklılık model geometrisinden ötürü Model 2’de rijitlik merkezinin davranışı incelenen borunun üzerinde olmasından dolayı boru birleşim bölgesinde burulma momentleri oluşmazken, Model 6’da rijitlik merkezi boru üzerinde olmadığından dolayı burulma momentleri oluşmasıdır. Model 6 üzerindeki bu momentler sebebiyle borulara ait birleşim bölgelerinde yüksek şekil değişimler oluşmaktadır. Bu makalenin konusu olmamakla birlikte, bu tür modellerin analizinde birleşim bölgesindeki boru tepkilerinin detaylı olarak ayrıca incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, KYD etkisindeki boru eksenine göre simetrik olmayan boru yerleşimlerinde (Model 6, Model 7 ve Model 8) KYD’nin bulunduğu ana boruda oluşan davranışa odaklanılmıştır. Sonuç olarak bir ucu serbest ve bir ucu tutulu borularda tutulu olmayan boru ucundaki serbestliğin artması, mesnetli uç bölgesinde KYD yönüne bağlı olarak basınç ve çekme gerilmelerinin artmasına sebep olmaktadır. Model 2 ve Model 3 arasındaki davranış farkı Model 6 ve Model 7 arasında da mevcuttur.

Durum 1 için daha önce bahsedilen KYD ve KYD bloğu uzunluğu ilişkisine örnek olarak; Şekil 7a ve Şekil 8a’da verilen P2 grubu parametrelere ve Model 1 boru tasarımına sahip sonuçlarda,  $W=30$  mm iken KYD bloğu uzunluğuna karşılık gelen boru şekil değiştirmelerinin  $L/6$ ’da sabitlendiği ve daha yüksek KYD bloğu uzunlukları oranlarında şekil değiştirmelerin değişmediği görülmüştür. Aynı boruya ait KYD  $W=100$  mm ile yapılan analizlerde ise bu sabitlenme  $L/4$ ’te gerçekleşmiştir.  $W=500$  mm’lik bir KYD’de

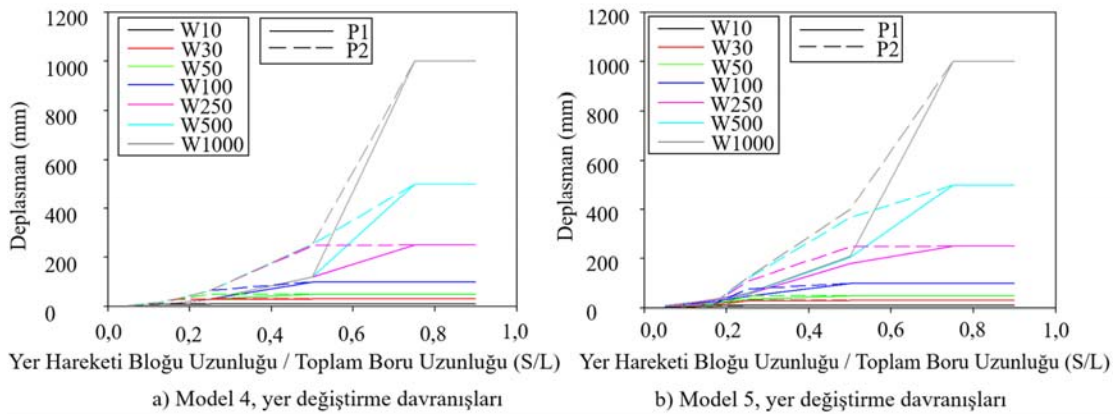
ise  $9L/10$ ’luk bir KYD bloğuna kadar gerilmeler yükselmiştir. Bu duruma bağlı olarak KYD ve KYD bloğu olarak tanımlanan iki yer hareketi parametresinin birbirinden bağımsız değerlendirilmesi mümkün değildir. Ayrıca düşük KYD’lerin mevcut olduğu borular için, tüm boru boyunca analizler yapılması yerine, KYD bloğunun mevcut olduğu bölümde daha lokal analizlerin yapılması yeterlidir. Yüksek KYD’lerin boruya etkileri ise KYD bloğuna doğrudan bağlı olduğu için daha geniş çaplı analizler yapılması gereklidir.

Durum 2 için boru yer değiştirme davranışları, Model 4 ve Model 5 için P2, P7 parametre örnekleri üzerinden Şekil 9’da gösterilmiştir.  $S/L > 0,5$  durumunda oluşan zemin deplasmanı ile eşdeğer boru deplasmanları Şekil 9’da gözlenebilmektedir. Model 8’e ait davranış Model 4 ile benzerlikler göstermektedir. Model 8’de Model 4’e göre gözlenen farklılığın sebebi ise bu modeldeki eksenel etki altındaki borunun uçlarına bağlı boruların tek taraftan bağlanmış olması, dolayısıyla bu bölgelerin harekete karşı daha serbest olması ve bu serbestlik sonucu Model 4’e göre gerilme ve birim şekil değiştirmelerin azalmasıdır. Model 8’de de Model 6 ve Model 7’ye benzer şekilde burulma momentleri oluşmaktadır ve buna bağlı olarak birleşim bölgelerinin ayrı analizler ile incelenmesi gerekmektedir.

Model 5 kısmi olarak Durum 2 ile benzer davranışa sahiptir, fakat Model 5 ve Durum 2 boruları arasında KYD bloğu uzunluğuna ve KYD’lere bağlı belirli farklar bulunmaktadır.  $S/L < 0,5$  koşulu için KYD bloklarındaki boru hareketinin model ortasında bulunan ek boru hareketi kaynaklı olarak artmasına bağlı olarak gerilme ve şekil değiştirmeler Model 5 için artmaktadır.  $S/L > 0,5$  koşulunda ise eğer

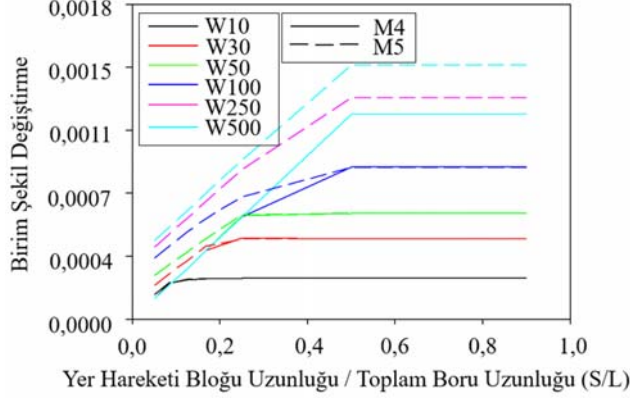


Şekil 8. Model 1 ve Model 2,  $S/L > 0.5$  borulara ait şekil değiştirmeler (Strains of pipes for Model 1 and Model 2,  $S/L > 0.5$ )



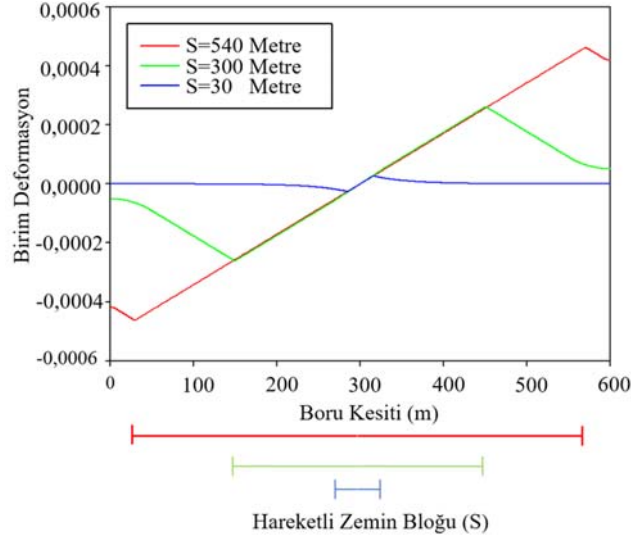
Şekil 9. Model 4 ve Model 5, yer değiştirme davranışları (Model 4 and Model 5, displacement behaviours)

KYD bloğu etkileri, düşük KYD değerleri için sabitlenmiş ise Model 4 ve Model 5'te eşdeğer şekil değiştirmeler gözlenirken, daha yüksek KYD değerlerinde Model 5'te Model 4'e göre daha yüksek şekil değiştirmeler gözlenir. Bu davranış ilişkisine örnek olarak Şekil 10'da P4 için, Model 4 ve Model 5 şekil değiştirme ilişkileri gösterilmiştir.



Şekil 10. Model 4 ve Model 5, birim şekil değiştirme davranışları (Model 4 and Model 5, strain behaviours)

Durum 1 için eksenel yer hareketinin etki ettiği borular üzerindeki birim şekil değiştirmeler ve gerilmeler incelendiğinde, tüm modellerde kritik değerlerin yer hareketi bloğunun başlangıç ve bitiş bölgelerinde olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 11, örnek olarak Model 1 ve Grup 7'ye ait 4000 mm'lik yer hareketi için oluşan birim şekil değiştirmeleri S/L değişkenliği için boru uzunluğu boyunca göstermektedir.



Şekil 11. Model 1, P7 için 4000 mm'lik yer hareketi altında farklı hareketli zemin bloğu uzunlukları (S) için boru boyunca oluşan deformasyonlar (Strains for different movable soil block lengths in Model 1, P7 under the influence of 4000 mm ground motion)

#### 4. Simgeler (Symbols)

$C_c$	: Eğrilik katsayısı
$C_u$	: Üniformluk katsayısı
$d$	: Hareketli zemin bloğu genişliği
$D$	: Boru dış çapı
$D_r$	: Rölatif sıklık

$e$	: Boşluk oranı
$e_{max}$	: En büyük boşluk oranı
$e_{min}$	: En küçük boşluk oranı
$G_s$	: Özgül ağırlık
$H$	: Boru orta noktasının yüzeye göre derinliği
$k$	: Boru dış yüzeyi ve çevreleyen zemin arasındaki sürtünme katsayısı
$K_0$	: Sükûnet durumundaki yanal toprak basıncı
$ksi$	: inç kare başına kilopound
$L$	: Boru uzunluğu
$N_{ch}$	: Taşıma gücü katsayısı
$N_{qh}$	: Taşıma gücü katsayısı
$r$	: Boru yarıçapı
$S$	: Hareketli zemin bloğu uzunluğu
$s_u$	: Drenajsız kayma mukavemeti
$t$	: Boru kalınlığı
$W$	: Hareketli zemin bloğu deplasmanı
$p_u$	: Boruya yatay dik doğrultudaki boru zemin dayanım kuvveti
$t_u$	: Boru eksenine doğrultusundaki boru zemin dayanım kuvveti
$x_u$	: Maksimum zemin dayanımına karşılık gelen eksenel yer değiştirme
$y_u$	: Maksimum zemin dayanımının elde edildiği boru eni doğrultusundaki deplasman

#### 4.1. Yunan Harfleri (Greek Letters)

$\bar{\gamma}$	: Efektif birim hacim ağırlığı
$\alpha$	: Adezyon faktörü
$\delta$	: Deplasman
$\phi$	: İçsel sürtünme katsayısı

#### 4.2. Kısaltmalar (Abbreviations)

GYD	: Geçici yer deplasmanı
KYD	: Kalıcı yer deplasmanı
PE	: Polietilen
PSL	: Ürün spesifikasyon seviyesi

#### 5. Sonuçlar (Conclusions)

Şehirlere hizmet veren gömülü boru hatları, yerleştirileceği yolların uygunluğuna göre birbirlerine bağlanmakta ve farklı yerleşim konfigürasyonlarında olabilmektedir. Diğer özellikler sabit kaldığında dahi farklı yerleşim şekilleri boruların kalıcı yer hareketlerine karşı tepkilerini etkilemektedir. Bu çalışmada bu farklı yerleşim şekillerini temsil eden 8 farklı model seçilmiştir. Kalıcı yer hareketiyle aynı doğrultuda olan borular daha kritik durumda olduğu için çalışmada özellikle bu borular irdelenmiştir. Yerleşim model farklılıkları yanında, boru davranışında önemli olması beklenen boru çapı, kazı derinliği, boru malzeme özellikleri, zemin-boru etkileşim özellikleri ve kalıcı yer hareketi bloğunun özellikleri analizler içerisinde parametresel yaklaşımla değiştirilerek etkileri gözlemlenmiştir. Gömülü boru hatlarıyla yapılan bu analizler kalıcı yer hareketlerinin boru üzerindeki etkilerinin belirlenmesi ve tasarımlarda dikkat edilecek hususların belirlenmesi açısından önemlidir.

Farklı yerleşim modellerinin boru üzerindeki etkileri incelendiğinde, kalıcı yer hareketinin gözlemlendiği bölge genişliğinin yarısı kadar uç bölgelerde hareketsiz bölge bulunması durumunda boru uçlarındaki bağlantı türü modele etki etmemektedir ( $S/L < 0,5$ ). Hareketli blok ile model sınırı arasında sönümleyici bölge bulunmaması durumunda borular 3 farklı davranış türü ile tanımlanabilir. İlk durum, iki boru ucunun da hareketinin engellenmesidir (Model 1). İkinci durum,

borunun iki ucunun da başka boru sistemlerine bağlanmasıdır (Model 4, Model 5 ve Model 8). Üçüncü durum, bir boru ucunun hareketinin engellenmesi ve diğer ucunun başka bir boru sistemine bağlanmasıdır (Model 2, Model 3, Model 6 ve Model 7).

İlk durumda, boru sınırı ve hareketli yer bloğu arasında daha büyük şekil değiştirmeler gözlenir. Durum 1 için zeminde gözlenen KYD değerleri sabit olduğunda KYD bloğu uzunluğunun artırılması, boruda gözlenen gerilme şekil değiştirmeleri belirli bir KYD bloğu sınırına kadar artırmaktadır ve o sınıra geldiğinde KYD bloğu uzunluğunun borulara etkisi kalmamaktadır. Boru gerilmelerine etki eden KYD bloğu sınırı ise KYD'ye bağlı olarak artmaktadır. Şekil 7'de görüldüğü gibi P2 için  $W=30$  mm yer hareketi altında şekil değiştirmeler  $S/L>0,15$ 'den sonra sabitlenmektedir ve buna bağlı olarak  $W$  yer değiştirmeleri,  $S/L$  etkisini ortadan kaldırmaktadır. Aynı durum benzer şekilde  $W=100$  mm yer hareketi için  $S/L>0,25$  koşulunda gerçekleşmiştir. Tersisi durum düşünüldüğünde ise örnek olarak P2 için  $S/L=0,30$  koşulunda hiçbir  $W$  değeri ( $W=250, 500$  ve  $1000$ )  $0,001$ 'lik şekil değiştirmeyi aşamamıştır.  $S/L$ ,  $W$  yer değiştirmeleri etkisini ortadan kaldırmıştır. Bu nedenle zemin hareketi nedeniyle oluşan borudaki gerilme ve şekil değiştirmeler zeminin boru ile temas eden hareketli bölgesinin uzunluğunun ve bu bölgedeki hareketin miktarının birlikte ele alınmasıyla belirlenebilir.

Durum 2'de,  $S/L$ 'nin  $0,5$ 'ten büyük olması koşulunda hareketsiz zemin bölgesi boru hareketini engelleyememekte ve boru hareketli zemin bölgesi ile birlikte hareket etmektedir. Durum 2'yi gösteren Şekil 9'da  $S/L >0,5$  koşulunda  $W$  zemin yer değiştirmelerinin boru yer değiştirmeleri ile eşitlendiği görülmektedir. Boru serbest hareketinin başladığı  $S/L >0,5$  koşulunda hareketsiz zemin bölgesinin boruya etkileyen durdurma direnci aşılmıştır ve mobilize olan borudaki şekil değiştirmeler Şekil 10'da görüldüğü üzere sabitlenmiştir. Bu nedenle KYD bloğu uzunluğunun borunun blokete geçmesi için yeterli düzeye geldiği bu durumda KYD blok uzunluğu yerine doğrudan KYD, boru hareketini belirlemektedir.

Durum 3'te ise boru hattı üzerinde, belirtilen üç durum arasında en yüksek etkiler gözlenir. Şekil 8'de (Şekil 8a Durum 1'i Şekil 8b ise Durum 3'e aittir.) görüldüğü gibi yüksek  $W$  yer hareketleri Durum 3 için Durum 1'e oranla daha yüksek boru şekil değiştirmelerine neden olmaktadır. Bu hasarlar birinci duruma benzer şekilde KYD'ye ve KYD bloğu uzunluğuna göre değişiklik gösterir.

Model geometrilerinden bağımsız olarak analizler boru ve çevre zemin özelliklerinin davranışta belirgin bir şekilde etkili olduğunu göstermektedir. Analizler kapsamında boru malzemelerinin, boru çapının, gömü derinliğinin ve yanıl toprak basıncı katsayısının etkileri oransal olarak farklı durumlar için sunulmuştur. Çalışmanın sonuçları, gömülü çelik boruların deprem sonucu oluşabilecek farklı kalıcı yer hareketleri etkisi altında davranışını göstererek uygulamada boru hatlarını işleten kurumlara tasarım ve ön değerlendirmelerinde katkı sağlaması beklenmektedir.

#### Teşekkür (Acknowledgment)

Buradaki çalışmalar 114M258 nolu TÜBİTAK ve 2022FEBE016 nolu PAÜBAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.

#### Kaynaklar (References)

- O'Rourke T.D., Jeon S.S., Toprak S., Cubrinovski M., Hughes M., Van Ballegooy S., Bouziou D., Earthquake response of underground pipeline networks in Christchurch, NZ, Earthquake Spectra (Earthq Spectra), 30 (1), 183–204, 2014.
- Toprak S., Nacaroglu E., Koc A.C., O'Rourke T.D., Hamada M., Cubrinovski M. Van Ballegooy S., Comparison of horizontal ground displacements in Avonside area, Christchurch from air photo, LiDAR and satellite measurements regarding pipeline damage assessment. Bulletin of Earthquake Engineering (Bull Earthq Eng), 16 (10), 4497-4514, 2018.
- Toprak S., Nacaroglu E., Van Ballegooy S., Koc A.C., Jacka M., Manav Y., Torvelainen E., O'Rourke T.D., Segmented pipeline damage predictions using liquefaction vulnerability parameters, Soil Dynamics and Earthquake Engineering (Soil Dyn. Earthq), 125, 105758, 2019.
- Eidinger J.M., O'Rourke M.J., Bachhuber J., Performance of a Pipeline at a Fault Crossing, Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering (7NCEE), Massachusetts-USA, July, 2002.
- Liu A., Takada S., Hu Y., A Shell Model with an Equivalent Boundary for Buried Pipelines Under the Fault Movement, 13th World Conference on Earthquake Engineering (13WCEE), Vancouver-Canada, Paper No. 613, August, 2004.
- Liu A., Takada S., He Q., The Failure Performance of Thames Water Pipeline at Fault Crossing in Kocaeli Earthquake, Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul-Turkey, August, 2014.
- Uckan E., Kaya E.S., O'Rourke M., Cakir F., Akbas B., The Performance of Thames Water Pipeline at the Kullar Fault Crossing, In International Collaboration in Lifeline Earthquake Engineering 2016, VA, American Society of Civil Engineers (ASCE), 359–365, 2017.
- Kaya, E.Ş., Determination of performance criteria of steel pipes subjected to axial compressive load and bending moment, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (4), 2107-2118, 2023.
- Toprak S., Taşkın F., Estimation of earthquake damage to buried pipelines caused by ground shaking, Natural Hazards (Nat Hazards), 40, 1-24, 2007.
- Uckan E., Aksel M., Atas O., Toprak, S., Kaya, E. S., The performance of transmission pipelines on february 6th, 2023 Kahramanmaraş earthquake: a series of case Studies, Bulletin of Earthquake Engineering (Bull. Earthq. Eng.), 1-20, 2024.
- Toprak S., Wham B., Nacaroglu E., Ceylan M., Dal O., Senturk A.E., Impact of seismic geohazards on water supply systems and pipeline performance: Insights from the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, Engineering Geology (J. Eng. Geol.), 2024.
- Wham B. P., Davis C. A., Buried continuous and segmented pipelines subjected to longitudinal permanent ground deformation, Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice (J. Pipeline Syst. Eng. Pract.), 10 (4), 04019036, 2019.
- O'Rourke M. J., Nordberg C., Longitudinal permanent ground deformation effects on buried continuous pipelines, National Center for Earthquake Engineering Research. Taipei, Taiwan: 1992.
- Toprak S., Taşkın F., Koç A.C., Prediction of earthquake damage to urban water distribution systems: a case study for Denizli, The Bulletin of Engineering Geology and the Environment (B Eng Geol Environ), 68, 499-510, 2009.
- Sarvanis G. C., Karamanos S. A., Vazouras P., Mecozzi E., Lucci, A., Dakoulas, P., Permanent earthquake-induced actions in buried pipelines: numerical modeling and experimental verification, Earthquake Engineering & Structural Dynamics (Earthq Eng Struct Dyn), 47 (4), 966-987, 2018.
- Argyrou C., O'Rourke T. D., Stewart H. E., Wham B. P., Large-scale fault rupture tests on pipelines reinforced with cured-in-place linings, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (J. Geotech. Geoenvironmental Eng.), 145 (3), 04019004, 2019.
- Ni P., Moore I. D., Take, W. A. Distributed fibre optic sensing of strains on buried full-scale PVC pipelines crossing a normal fault, Géotechnique (Geotech. Lett.), 68 (1), 1-17, 2018.
- Ni P., Moore I. D., Take W. A. Numerical modeling of normal fault-pipeline interaction and comparison with centrifuge tests, Soil Dynamics and Earthquake Engineering (Soil Dyn. Earthq. Eng.), 105, 127-138, 2018.
- Joshi S., Prashant A., Deb A., Jain S. K., Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion, Soil Dynamics and Earthquake Engineering (Soil Dyn. Earthq. Eng.), 31 (7), 930-940, 2011.
- Argyrou C., O'Rourke T. D., Pariya-Ekkasut C., Stewart H. E., Ductile iron pipeline response to earthquake-induced ground rupture, Earthquake Spectra (Earthq. Spectra), 36 (2), 832-855, 2020.
- American Lifelines Alliance (ALA), Seismic Guidelines for Water Pipelines, Guideline, March, 2005.
- O'Rourke M. J. ve Liu X., Seismic Design of Buried and Offshore Pipelines, MCEER Monograph, MCEER-12-MN04, University at Buffalo, New York, USA, 2012.

23. Toprak S., Çırmıktılı, O.Y., Reliability-Based Analyses and Design of Pipelines' Underground Movements during Earthquakes. In Reliability-Based Analysis and Design of Structures and Infrastructure, Cilt 1, Editör: Farsangi E.N., Noori M., Gardoni P., Takewaki I., Varum H., Bogdanovic A., CRC Press, BR, Florida, A.B.D, 365-380, 2021.
24. O'Rourke T.D., Toprak S., ve Sano Y. Factors affecting water supply damage caused by the Northridge earthquake, In US-Japan workshop on earthquake disaster prevention for lifeline systems, November, 57, 1998.
25. Türk Standartları Enstitüsü (TSE). Petrol ve doğalgaz sanayileri-Boru hattı ile taşıma sistemleri için çelik borular, Standard No., ISO 3183, Ankara, Türkiye, 2019.
26. American Petroleum Institute (API), API SPEC 5L, 46th Edition, Washington, USA, 2018.
27. İstanbul Gaz ve Doğalgaz Dağıtım A.Ş. (İGDAS), 2019 Faaliyet Raporu. [https://cdn.igdas.com.tr/web/Docs/igdas-faaliyet-raporu-web-versiyon\\_3586106.pdf](https://cdn.igdas.com.tr/web/Docs/igdas-faaliyet-raporu-web-versiyon_3586106.pdf). Yayın tarihi 2020. Erişim tarihi Kasım 14, 2021.
28. O'Rourke M.J., Liu X., Response of buried pipelines subject to earthquake effects, MCEER Monograph, MN03, University at Buffalo, New York, USA, 1999.
29. İstanbul Gaz ve Doğalgaz Dağıtım A.Ş. (İGDAS), Doğal Gaz İç Tesisat Teknik Esasları İGDAS Yayınları 29, İstanbul, Türkiye, 2017.
30. Türk Standartları Enstitüsü (TSE), İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri- Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, Standard No., 1900-1, Ankara, Türkiye, 2006.
31. Türk Standartları Enstitüsü (TSE), İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri- Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini, Standard No., 1900-2, Ankara, Türkiye, 2006.
32. DIANA (Displacement ANALyzer) Software: TNO Company, Delftechpark 19a 2628 XJ Delft The Netherlands, <http://dianafea.com/system/files/DIANA-Brochure-June-2016-Print-Version, 2016>.
33. American Society of Civil Engineers (ASCE), Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems, Committee on Gas and Liquid Fuel Lifeline, ASCE, Reston, 1984.
34. European Standard Eurocode 8, Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 4: Silos, Tanks and Pipelines, Brüksel, Belçika, 2006.