



T.C.

ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KALICI YÜZEY DEFORMASYONLARINA MARUZ KALAN GÖMÜLÜ
SÜREKLİ BORU HATLARININ DEPREM PERFORMANSLARI**

Yüksek Lisans Tezi

Elif Seray SAYGIN

**Danışman
Prof. Dr. Muhittin Eren Uçkan**

**ALANYA
2026**

T.C.
ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KALICI YÜZEY DEFORMASYONLARINA MARUZ KALAN GÖMÜLÜ
SÜREKLİ BORU HATLARININ DEPREM PERFORMANSLARI**

Yüksek Lisans Tezi

Elif Seray Saygın

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Program Adı: İnşaat Mühendisliği

Danışman

Prof. Dr. Muhittin Eren Uçkan

ALANYA

(2026)

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmamın Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Elif Seray Saygın

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında, ders dönemimden tez sürecime kadar; ayrıca 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremini bizzat yaşadığım zorlu dönemde dahi desteğini, ilgisini ve yol gösterici bilgi birikimini benden esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Muhittin Eren UÇKAN'a en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Akademik rehberliği, sabrı ve motivasyonu, bu çalışmanın ortaya çıkmasında belirleyici olmuştur.

Çalışma sürecim boyunca bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, her aşamada yönlendirmeleriyle katkı sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Ercan Şerif Kaya'ya değerli destekleri için teşekkür ederim. Ayrıca dâhil olduğum TÜBİTAK projesi kapsamında yollarımızın kesiştiği, yönlendirmeleri ve akademik katkılarıyla çalışmama önemli katkılar sunan İstanbul Teknik Üniversitesi Afet Yönetimi Enstitüsünden Doç. Dr. Abdullah Can ZÜLFİKAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Akademik gelişimime katkı sağlayan değerli görüşleri ve paylaşımları için Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden Doç. Dr. Mehmet Tolga GÖĞÜŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu sürece gelmemde önemli bir yere sahip olan lisans öğrenimim boyunca, mesleki altyapımın oluşmasında emeği geçen ve yüksek lisans eğitimine başlamam konusunda beni teşvik eden Kilis 7 Aralık Üniversitesinden Dr. Öğr. Görevlisi Ömer YEŞİLTEPE ve Doç. Dr. Eyyüb KARAKAN'a teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Son olarak, eğitim hayatım boyunca her koşulda yanımda olan, sevgisi, sabrı ve desteğiyle bana güç veren başta sevgili annem Sema SAYGIN olmak üzere, kıymetli dayım Ümran ERMAŞA'ya ve tüm aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

KALICI YÜZEY DEFORMASYONLARINA MARUZ KALAN GÖMÜLÜ SÜREKLİ BORU HATLARININ DEPREM PERFORMANSLARI

Elif Seray SAYGIN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü,

Ocak, 2026 (72 Sayfa)

Gömülü boru hatları hem çevresel hem de sosyo-ekonomik açıdan kritik öneme sahiptir, çünkü yaşamı sürdüren su, doğalgaz ve petrol gibi temel maddeleri taşırlar. Bu hatlar, ekonomik, estetik ve güvenlik gerekçeleriyle yer altına gömülür dolayısıyla deprem gibi doğal afetler sırasında ciddi hasarlara karşı korunmaları önemli ve gereklidir. Depremler, gömülü boru hatlarına çeşitli nedenlerle zarar verebilir. Geçici sismik dalga yayılımı ve kalıcı zemin hareketleri bu nedenlerin başında gelmektedir. Zeminde gerçekleşen hareketler, sıvılaşmadan kaynaklanan yanal yayılma, farklı fay çeşitlerinden kaynaklı hareketlerin zemindeki etkisi ve heyelan yani zemin kayması gibi çeşitli etmenler nedeniyle ortaya çıkar. Bu tür hareketler, boru hattının belirli bir bölümünde büyük deformasyonlara yol açabilir ve ciddi hasar potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, bu hatların davranışları ve dayanıklılığı doğru incelenmelidir. Gömülü boru hatlarının sismik dayanıklılığı üzerine yapılan çalışmalar, doğal afetlerin yıkıcı etkilerini en aza indirmek ve kritik yaşam hatlarının kesintisiz çalışmasını sağlamak için büyük bir önem taşır. Zemin deformasyonları altında gömülü boru hatlarının davranışını doğru bir şekilde simüle edebilecek gelişmiş sayısal modellerin geliştirilmesi hem mühendislik hem de toplumsal açıdan kritik bir hedeftir.

Bu gerekliliklere dayanarak bu tez kapsamında, SAP2000 ortamında lineer ve nonlineer olmak üzere gömülü sürekli borular tasarlanarak yanal atımlı fay kırılmalarının ve yüklemelerin neden olduğu kalıcı zemin deformasyonları karşısında bu boruların deformasyonları incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Deprem, Gömülü boru hatları, Sürekli boru hatları, Boru hasarı, Toprak-boru etkileşimleri.

ABSTRACT

SEISMIC PERFORMANCE OF BURIED CONTINUOUS PIPELINES SUBJECTED TO PERMANENT SURFACE DEFORMATIONS

Elif Seray SAYGIN

Department of Civil Engineering

Graduate School of Alanya Alaaddin Keykubat University,

January, 2026

Buried pipelines are of critical importance both environmentally and socio-economically, as they transport essential resources such as water, natural gas, and oil that sustain daily life. These pipelines are installed underground for economic, aesthetic, and safety reasons; therefore, ensuring their protection against severe damage during natural hazards such as earthquakes is both important and necessary. Earthquakes can cause damage to buried pipelines through various mechanisms, primarily transient seismic wave propagation and permanent ground movements. Ground movements may arise from several factors, including lateral spreading induced by soil liquefaction, ground displacements associated with different types of faulting, and landslides resulting from slope instability. Such movements can induce large deformations in localized sections of the pipeline and pose a significant damage potential. For this reason, the behavior and resilience of buried pipelines must be accurately investigated.

Studies focusing on the seismic resilience of buried pipelines play a vital role in minimizing the destructive effects of natural disasters and ensuring the uninterrupted operation of critical lifeline systems. The development of advanced numerical models capable of accurately simulating the behavior of buried pipelines under ground deformations is therefore a crucial objective from both engineering and societal perspectives.

Based on these requirements, within the scope of this thesis, buried continuous pipelines were modeled in the SAP2000 environment using both linear and nonlinear analysis approaches. The deformations of these pipelines subjected to permanent ground deformations induced by strike-slip fault ruptures and associated loading conditions were systematically investigated.

Keywords: Earthquake, Buried pipelines, Continuous pipelines, Pipeline damage, Soil–pipeline interaction

İÇİNDEKİLER SAYFASI

İÇ KAPAK SAYFASI

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....**Error! Bookmark not defined.**

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ..... i

TEŞEKKÜR SAYFASI ii

ÖZET iii

ABSTRACT iv

İÇİNDEKİLER SAYFASI v

ŞEKİLLER LİSTESİ vii

TABLolar LİSTESİ..... x

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ xi

1. GİRİŞ 1

1.1.Amaç ve Kapsam 1

1.2.Problemin Önemi 2

1.3.Problemin Sonuçları..... 3

2. LİTERATÜR 4

2.1.Boru Çeşitleri 4

2.2.Fay Oluşumu 6

2.2.1.Fay çeşitleri..... 6

2.2.2.Türkiye’de bulunan aktif fay hatları 8

2.3.Deprem Oluşumu 9

2.3.1.Dalga türleri 10

2.4.Burkulma Çeşitleri 10

2.5.Deformasyona Uğrayan Gömülü Sürekli Boruların Analiz Yöntemleri 11

2.5.1.Analitik yöntemler 11

2.5.2.Nümerik yöntemler 15

2.5.3.Deneysel yöntemler..... 20

3. YÖNTEM 26

3.1.Faylanma Sırasında Gömülü Sürekli Borularda Meydana Gelen Kuvvetler 26

3.2.Tasarım Felsefesi 26

3.3.Zemin-Boru Etkileşimleri..... 28

3.3.1.Eksenel toprak yayı..... 29

3.3.2.Yanal toprak yayı 30

3.3.3.Düşey toprak yayı.....	31
4. MODELLER.....	32
4.1.Lineer (Doğrusal) Modelin Tanımlanması	32
4.2.Nonlinear (Doğrusal Olmayan) Modelin Tanımlanması	37
5. ANALİZ SONUÇLARI	40
5.1.Lineer (Doğrusal) Model Analizinin Yapılması	40
5.1.1.Borunun orta noktasından sağ uç noktasına kadarki bölgenin baz alınması ..	40
5.1.2.Borunun tam orta bölgesinin baz alınması	47
5.1.3.Borunun sağ uç bölgesindeki noktaların baz alınması.....	49
5.1.4.Borunun sol uç bölgesindeki noktaların baz alınması	52
5.2.Nonlinear (Doğrusal Olmayan) Model Analizinin Yapılması	55
5.2.1.Borunun orta noktasından sağ uç noktasına kadarki bölgenin baz alınması ..	56
5.2.2.Borunun tam orta bölgesinin baz alınması	62
5.2.3.Borunun sağ uç bölgesindeki noktaların baz alınması.....	63
5.2.4.Borunun sol uç bölgesindeki noktaların baz alınması	66
5.3.Sonuçların Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi	68
6. KAYNAKÇA	71
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Fay çeşitleri	7
Şekil 2.2 Dalga türleri (LGA Türkiye, 2014).....	10
Şekil 2.3 Newmark ve Hall tarafından önerilen modelin plan görünümü (B. Madjdabadi, 2016)	12
Şekil 2.4 Kennedy ve diğerleri tarafından önerilen modelin plan görünümü	13
Şekil 2.5 Wang ve Yeh tarafından önerilen model (Dimitrios K. Karamitros, 2007)....	14
Şekil 2.6 Karamitros ve diğerleri tarafından önerilen boru hattı bölümlleme modeli (Dimitrios K. Karamitros, 2007).....	15
Şekil 2.7 Karamitros ve diğerleri tarafından önerilen 3 boyutlu sayısal model (Dimitrios K. Karamitros, 2007)	16
Şekil 2.8 Odina ve Tan tarafından önerilen model	18
Şekil 2.9 Hasan Emre Demirci ve diğerleri tarafından önerilen sayısal model (Hasan Emre Demirci, 2018).....	20
Şekil 2.10 Yoshizaki ve diğerlerinin deneysel modelinin üstten görünümü (Koji Yoshizaki, 2001)	23
Şekil 2.11 Cornell Üniversitesi NEES Ekipman Sahasındaki büyük ölçekli bölünmüş kutu test havuzu (T.D. O'Rourke, 2009)	24
Şekil 2.12 Hasan Emre Demirci ve diğerleri tarafından önerilen deney (Hasan Emre Demirci, 2018).....	25
Şekil 3.1 Deformasyon formları.....	27
Şekil 3.2 Toprak yayları	28
Şekil 3.3 Eksenel toprak yayları grafiği	30
Şekil 3.4 Yanal toprak yayları grafiği.....	31
Şekil 3.5 Düşey toprak yayları grafiği	31
Şekil 4.1 SAP2000'de lineer model için seçilen şablon	32
Şekil 4.2 SAP2000'de lineer model için girilen boru özellikleri	33
Şekil 4.3 SAP2000'de lineer modelin için atanan link elemanları ve mesnetleri	33
Şekil 4.4 SAP2000'de lineer modelin için atanan link elemanların değeri.....	34
Şekil 4.5 SAP2000'de lineer modelin için X60 çeliğine ait girilen parametreler.....	35
Şekil 4.6 Fay hareketi altında boru davranışını temsil eden basit modelin bir plan görünümü (E. Uckan, 2015).....	35
Şekil 4.7 SAP2000'de lineer modelin için girilen yer değiştirme değeri	36

Şekil 4.8 SAP2000’de lineer modelin için girilen yer değiştirme değerinin görünümü	36
Şekil 4.9 SAP2000’de nonlinear model yayları için kuvvet-deformasyon eğrilerinin tanımlanması.....	38
Şekil 4.10 SAP2000’de nonlinear model için X60 çeliğine ait girilen gerilme-gerinim değerleri	39
Şekil 5.1 SAP2000’de lineer gömülü boru modelinin analiz sonucu deformasyon olmuş hali.....	40
Şekil 5.2 SAP2000’de lineer gömülü boru modelinin analiz sonuçlarında baz alınan bölgesi	40
Şekil 5.3 Deformasyon görülen bölgedeki link elemanların deformasyon değerleri çizgi grafiği.....	42
Şekil 5.4 Deformasyon görülen bölgedeki link elemanların kuvvet değerleri grafiği ...	44
Şekil 5.5 Deformasyon görülen bölgedeki noktaların yer değiştirme değerleri grafiği .	46
Şekil 5.6 SAP2000’de lineer gömülü boru modelinin analiz sonuçlarında baz alınan orta bölgesi	47
Şekil 5.7 Deformasyon görülen orta bölgedeki noktaların yer değiştirme değerleri grafiği.....	47
Şekil 5.8 SAP2000’de lineer gömülü boru modelinin analiz sonuçlarında baz alınan sağ uç bölgesi	49
Şekil 5.9 Gömülü borunun sağ uç bölgesindeki noktaların yer değiştirme değerleri grafiği.....	50
Şekil 5.10 SAP2000’de lineer gömülü boru modelinin analiz sonuçlarında baz alınan sol uç bölgesi	52
Şekil 5.11 Gömülü borunun sol uç bölgesindeki noktaların yer değiştirme değerleri grafiği.....	53
Şekil 5.12 SAP2000’de nonlinear gömülü boru modelinin 3 adımda deformasyon olmuş hali.....	55
Şekil 5.13 SAP2000’de nonlinear gömülü boru modelinin analiz sonuçlarında baz alınan bölgesi.....	56
Şekil 5.14 Gömülü borunun belirli metrelerdeki gerinim değerleri grafiği	56
Şekil 5.15 Deformasyon görülen bölgedeki link elemanların deformasyon maksimum değerleri grafiği	59
Şekil 5.16 Deformasyon görülen bölgedeki noktaların yer değiştirme değerleri grafiği	61

Şekil 5.17 SAP2000’de nonlinear gömülü boru modelinin analiz sonuçlarında baz alınan orta bölgesi	62
Şekil 5.18 Deformasyon görülen orta bölgedeki noktaların yer değiştirme değerleri grafiği	62
Şekil 5.19 SAP2000’de nonlinear gömülü boru modelinin analiz sonuçlarında baz alınan sağ uç bölgesi	64
Şekil 5.20 Gömülü borunun sağ uç bölgesindeki noktaların yer değiştirme değerleri grafiği	64
Şekil 5.21 SAP2000’de nonlinear gömülü boru modelinin analiz sonuçlarında baz alınan sol uç bölgesi	66
Şekil 5.22 Gömülü borunun sol uç bölgesindeki noktaların yer değiştirme değerleri grafiği	66

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1 Çeşitli dış kaplamalar için sürtünme faktörü	29
Tablo 3.2 Faktörlerin denklem içerik değerleri	30
Tablo 4.1 Lineer model için zemin parametreleri	34
Tablo 4.2 Yanal yaylar için hesaplanan özellikler	37
Tablo 4.3 Eksenel yaylar için hesaplanan özellikler	37
Tablo 4.4 API sınıfı X60 çeliğinin malzeme özellikleri	39
Tablo 5.1 Deformasyon görülen bölgedeki link elemanların deformasyon değerleri....	41
Tablo 5.2 Deformasyon görülen bölgedeki link elemanların kuvvet değerleri	43
Tablo 5.3 Deformasyon görülen bölgedeki noktaların yer değiştirme değerleri.....	45
Tablo 5.4 Deformasyon görülen orta bölgedeki noktaların yer değiştirme değerleri	47
Tablo 5.5 Gömülü borunun sağ uç bölgesindeki noktaların yer değiştirme değerleri ...	49
Tablo 5.6 Gömülü borunun sol uç bölgesindeki noktaların yer değiştirme değerleri	52
Tablo 5.7 Gömülü borunun belirli metrelerdeki gerinim değerleri.....	56
Tablo 5.8 Deformasyon görülen bölgedeki link elemanların deformasyon değerleri....	58
Tablo 5.9 Deformasyon görülen bölgedeki noktaların yer değiştirme değerleri.....	60
Tablo 5.10 Deformasyon görülen orta bölgedeki noktaların yer değiştirme değerleri ..	62
Tablo 5.11 Gömülü borunun sağ uç bölgesindeki noktaların yer değiştirme değerleri .	64
Tablo 5.12 Gömülü borunun sol uç bölgesindeki noktaların yer değiştirme değerleri..	66

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

α	Yapışma faktörü
c	Kohezyon
D	Boru dış çapı
f	Kaplamaya bağlı faktör
H	Borunun merkezine kadar olan derinlik
K_0	Basınç Katsayısı
Nch	Kil için yatay taşıma kapasitesi faktörü
Nqh	Kum için yatay taşıma kapasitesi faktörü
Ncv	Kil için düşey yükselme faktörü
Nqv	Kum için düşey yükselme faktörü
γ	Toprağın etkin birim ağırlığı
δ	Sürtünme açısı
ϕ	İç sürtünme açısı

1. GİRİŞ

1.1. Amaç ve Kapsam

Gömülü borular, günümüzde altyapı anlamında hayati bir rol oynayan ve endüstriyel açıdan da büyük öneme sahip elemanlardır. Bu boru hatları doğal gaz, petrol, su, atık su ya da buna benzer sıvı malzemeler taşımakta ve toplumun hayatında, dünya hayatında tıpkı insan vücudundaki atardamarlar, toplardamarlar ve kılcal damarlar gibi önemli olduğundan bu hatlara Yaşam Hattı da denilmektedir. Bu borular geniş alanları kaplamak üzere yüzeyin altına yerleştirilirler ancak bu stratejik konumları, aynı zamanda çeşitli doğal ve yapay risklere karşı hassasiyetlerini artırır. Özellikle sürekli boru hatları, uzun mesafeler boyunca sürekli çekme, basınç altında eğilme ve yer değiştirme gibi yüksek mukavemetli mekanik etkilere maruz kalır. Bununla birlikte, büyük çaplı segmentli boru hatları genellikle ek bölgelerinde sismik hasar gösterirken, daha küçük çaplı segmentli boru hatlarında sismik etkiler daha çok yerel çevresel deformasyonlar olarak kendini gösterebilmektedir. Jeolojik tehlikeler, kalıcı zemin deformasyonları veya güçlü depremler sırasında yeryüzü kabuğundaki sismik dalgalar nedeniyle gömülü çelik boruların dayanıklılığını zorlar. Özellikle depremler gibi doğal afetler sırasında, gömülü boru hatlarının zarar görmesi ekonomik kayıplara ve çevresel felaketlere yol açabilmektedir. Bunun yanında bu tür olaylar insan hayatını da doğrudan tehdit etmekte ve fay hareketleri, gömülü boru hatlarının hasar görmesine veya çalışamaz hale gelmesine neden olabilmektedir. Depremlerle ilişkili fay yırtılmaları, heyelanlar ve sıvılaşma gibi doğal süreçler, gömülü borulardaki hasarın ana nedenlerini oluşturur. Bu tür etkiler altında, borular genellikle plastik deformasyonlara uğrayarak elastik sınırlarını aşabilir ve kritik noktalarda kırılmalar meydana gelebilir. Bu durum, boru hatlarının bakım ve onarım gereksinimlerini artırabilir ve çevresel riskleri önemli ölçüde artırabilir. Bu nedenle, boru hatlarının mekanik davranışlarının ve sismik olaylara karşı direncinin detaylı bir şekilde anlaşılması son derece önemlidir.

Bu tez, oluşabilecek riskleri azaltmak için önlemler alınmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır, çünkü aktif fay hatlarının dinamik davranışını ve hareketlerini anlamak, afet yönetimi ve planlaması açısından önemlidir. Fayların nasıl çalıştığını ve bunun boru hatlarına olan etkilerini incelemeyi ve değerlendirmeyi hedefleyen bu tezin, doğal afetlerle karşı karşıya kalındığı durumda başa çıkmak için daha iyi stratejilerin geliştirilmesine katkıda bulunması beklenmektedir.

Bu sayede, fay hattı geçişlerindeki boruların davranışını tahmin etmek için daha kesin ve güvenilir bilgilere sahip olunabilir. Ayrıca bu davranışlarının incelenmesi, mühendislik ve jeoloji alanlarında yeni bilgilerin keşfedilmesine katkıda bulunabilir ve ilgili alandaki araştırmalara bir temel oluşturabilir böylece gelecekteki çalışmalar içinde ilham kaynağı olabilir.

Bu bağlamda, gömülü çelik boruların doğru bir şekilde tasarlanması ve yapısal bütünlüklerinin korunması, altyapı sistemlerinin güvenliğinin ve sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Bu konuda yapılan araştırmalar ve geliştirilen analitik yöntemler, boru hatlarının sismik performansının iyileştirilmesine yönelik stratejilerin belirlenmesine önemli katkı sağlamıştır. Ayrıca, zemin-boru etkileşimi üzerine yapılan çalışmalar, boru hatlarının performans kriterlerinin belirlenmesine ve değerlendirilmesine de yardımcı olmuştur. Bu problemin doğrusal olmayan doğası ve karmaşık zemin-boru etkileşimi, ileri düzeyde simülasyon ve modelleme yaklaşımlarının kullanılmasını gerektirir.

Sonuç olarak Kalıcı Yüzey Deformasyonlarına Maruz Kalan Gömülü Sürekli Boru Hatlarının Deprem Performansları adlı tez kapsamında, SAP2000 programı üzerinden belirli ölçülerde tasarlanan sürekli çelik gömülü borunun yine belli zemin, malzeme ve yük koşullarında nasıl davrandığının detaylı bir şekilde incelenmesi ve değerlendirilmesi sağlanmıştır. Bu çalışma, gömülü boruların sismik performansını doğru incelemek için potansiyel risk azaltma stratejilerini belirlemek ve önermek için bir temel oluşturmaktadır.

1.2. Problemin Önemi

Boru hatları özellikle doğalgaz boru hatları geniş coğrafyalara yayılmaktadır. Farklı kıtalardan, farklı alanlardan, farklı tipte birçok zemin profilinden ve deprem nedeniyle oluşabilecek afet bölgelerinden geçtikleri için aslında deprem dolayısıyla oluşacak kalıcı deformasyonlara çok hassas ve duyarlı yapılardır.

Faylanma, toprak kayması, sıvılaşmaya bağlı yanıl yayılma ve yukarı doğru hareketten dolayı boru hatlarında hareketlenmeler deformasyonlar oluşabilir ve bu deformasyonlar boruda hasarlar meydana getirebilir bu hasarlar neticesinde hem topluma hem insanlara hem ekonomiye büyük zararlar verdiği tarihteki depremlerden sonra da görülmüştür. Biz mühendisler olarak temel amacımız boru hatlarının geçeceği zemin profilleri ve potansiyel deprem risklerini dikkate alarak bu önemli yaşam hatlarının

deprem sırasında ve sonrasında işlevselliğini ve performansını koruyabilmesini sağlayacak ve olası risklere karşı önlem alacak şekilde tasarımını yapmaktır.

1.3. Problemin Sonuçları

Gömülü boru hatları deprem etkisine karşı oldukça savunmasızdır. Geçmişteki depremler de bunu kanıtlamaktadır. 1999 Kocaeli depreminde, boru hatlarında yerel ve global burkulmalar meydana gelmiştir. 1964 Niigata depreminde ise yerel bir burkulmadan ziyade global bir burkulma meydana gelmiştir. 1906 San Francisco depreminde ise bu depremin ardından büyük bir yangın meydana gelmiştir. Bu yıllarda şehirde bulunan binaların çoğu ahşap ve birbirine çok yakın inşa edilmiştir. Bu yangın sonucunda 490 binanın tamamı yandığı 32 binada da ciddi bir şekilde hasarlar meydana geldiği bilinmektedir. Burada sivilaşmaya bağlı toprak hareketlerinden dolayı ana boru hattının hasar görmesi sonucu şehir merkezinde su sıkıntısı yaşanmaktadır bunun sonucunda itfaiye departmanının elinde yangınla mücadele için kullanılacak sınırlı miktarda su kaynağı olduğu için müdahale etmekte çok geç kalındığı ve can kayıplarına sebep verdiği bilinmektedir. Bu durum da gömülü boru hatlarının büyük önem arz ettiğini bir kez daha göstermektedir.

2. LİTERATÜR

2.1. Boru Çeşitleri

Gömülü borular, sürekli ve segmentli (bölmeli) olmak üzere iki farklı montaj çeşidi olarak ele alınmaktadır. Gömülü sürekli borular, eklem yerlerindeki malzemenin ya da kaynağın dayanımının borunun kendi dayanımı ile aynı veya daha fazla dayanama sahip olması yani süreklilik bakımından zayıf bir nokta göstermediği borulardır. Gömülü sürekli borular, altyapı inşaatlarında genellikle büyük çaplı su, kanalizasyon, gaz veya diğer akışkanları taşımak için kullanılan boru döşeme yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, boru hattı genellikle bir bütün olarak, tek parça halinde döşenir. Döşeme süreci genellikle kazılan kanallar veya tüneller içine yerleştirilir. Bu yöntem, özellikle uzun mesafeler boyunca tek parça halinde döşenmesi gereken büyük çaplı boru hatları için tercih edilir.

Gömülü sürekli boru hatlarının avantajlarının başında daha az birleşim noktasına sahip olmaları gelmektedir. Bu durum, boru hattının bütünlüğünü artırarak sızıntı riskini azaltır ve sistem performansını iyileştirir, böylece kesintisiz bir hat oluşturarak su, gaz veya kanalizasyon gibi temel altyapı sistemlerinin etkin ve sürekli bir şekilde işler halde tutulması sağlanabilir. Bu hatlar, genellikle esnek plastiklerden yapıldığı için zemin hareketlerine karşı direnç gösterebilirler. Döşeme sürecinde çevresel etkiler minimum düzeyde olabilir ve boru hattının bakımı kolaylıkla yapılabilir. Modern teknolojilerle desteklenen bu sistemlerde, deprem sensörleri ve izleme sistemleri kullanılarak olası hasarlar önceden tespit edilebilir, böylece erken müdahale imkânı sağlanabilir. Ancak, gömülü sürekli boru hatlarının dezavantajları da vardır. Özellikle büyük çaplı depremlerde, boru hatlarının esnekliği sınırlı olabilir ve zemin hareketleri sonucunda hasar görebilirler. Ayrıca, uzun süreli kullanımda malzeme yorgunluğu ve kimyasal etkiler gibi faktörler boru hatlarının ömrünü kısaltabilir. Bu boruların döşenmesi için de geniş ve uygun bir çalışma alanı gereklidir. Bunun yanı sıra büyük çaplı boruların nakliyesi ve montajı, lojistik açıdan zorluklar doğurabilir ve projenin maliyetini etkileyebilir. Boru hattının tamamının birleştirilmiş halde taşınması ve yerleştirilmesi de titiz planlama ve koordinasyon gerektirir.

Gömülü segmentli, ekli ya da bölünmüş borularda ise en zayıf yerleri eklem yerleri olduğundan buralardan eksenel yükler altında ayrılabilen veya dönme yükleri altında dönmeler meydana gelmesi sebebiyle eklem yerlerinde hasar alan borulardır.

Bu tip borular belirli bir uzunlukta (genellikle 2 ila 3 metre) fabrikalarda üretilmektedirler. Daha sonrasında inşaat sahasında birleştirilerek döşemeleri yapılmaktadır.

Bu yöntem, özellikle şehir içi altyapı projelerinde ve dar çalışma alanlarında tercih edilir. Segmentli borular genellikle daha küçük çaplı boru hatları için kullanılır, ancak büyük çaplı projelerde de uygulanabilir.

Gömülü segmentli boru hatlarının avantajları arasında, fabrikasyon sürecinin kalite kontrolü ve saha montajının hızı yer alır. Her bir segment fabrikada üretildiği için, malzeme kalitesi ve borunun teknik özellikleri daha iyi kontrol edilebilir. Montaj süreci sahada daha hızlı gerçekleştirilebilir ve işçilik maliyetleri azaltılabilir. Ayrıca, dar alanlarda çalışma imkânı sunması ve proje süresini kısaltması da avantaj olarak öne çıkar. Bunun yanında her bir segmentin ayrı ayrı tasarlanarak deprem etkilerine karşı dirençli olmasıdır. Betonarme segmentler genellikle güçlendirilmiş takviyelerle desteklenir ve segmentler arası bağlantılar deprem sırasında esneklik sağlar, böylece boru hattının bütünlüğü korunur. Segmentli yapının modüler yapısı, bakım ve onarım işlemlerinin belirli bölgelerde sınırlı kalmasını sağlar, bu da işletme sürekliliğini artırır. Dezavantajları ise, segmentli boruların birleştirme noktaları denilebilir, boru hattının bütünlüğünü etkileyebilir ve sızıntı riskini artırabilir. Bu nedenle, montaj sürecinde dikkatli bir şekilde planlama ve kalite kontrol gereklidir. Her bir segmentin birleştirme noktalarının dayanıklılığı ve uzun vadeli performansı, boru hattının genel sağlamlığı için önemli bir faktördür. Döşeme işlemleri sırasında segmentler arasındaki bağlantıların sağlam ve güvenilir olması gerekliliği, inşaat maliyetlerini artırabilir. Ayrıca, segmentli yapıların uzun vadeli performansı zemin koşulları ve temel tasarımı ile doğrudan ilişkilidir, bu da planlama ve mühendislik gereksinimlerini karmaşık hale getirebilir.

Bu iki boru çeşidi karşılaştırılacak olduğunda, gömülü sürekli ve gömülü segmentli boruların seçimi, projenin özelliklerine, yerel koşullara ve maliyet faktörlerine bağlı olarak yapılır. Gömülü sürekli borular genellikle büyük ölçekli ve uzun mesafeli projeler için tercih edilirken, gömülü segmentli borular daha çok şehir içi altyapı projelerinde ve dar alanlarda kullanılır. Her iki yöntemin de avantajları ve dezavantajları göz önünde bulundurularak, mühendislik hesaplamaları ve proje yönetimi süreci kapsamlı bir şekilde değerlendirilmelidir. Bu, projenin başarılı bir şekilde tamamlanması ve uzun vadede güvenilir bir altyapının sağlanması için hayati önem taşır. Bu tez kapsamında gömülü sürekli borular baz alınmıştır.

Sonuç olarak boru çeşitleri, spesifik uygulama ve çevresel koşullara bağlı olarak seçilmektedir. Her bir boru türü, belirli avantajlar ve dezavantajlar sunar, bu nedenle doğru boru tipini seçmek, sistemin verimliliği ve uzun ömürlülüğü açısından kritiktir.

2.2. Fay Oluşumu

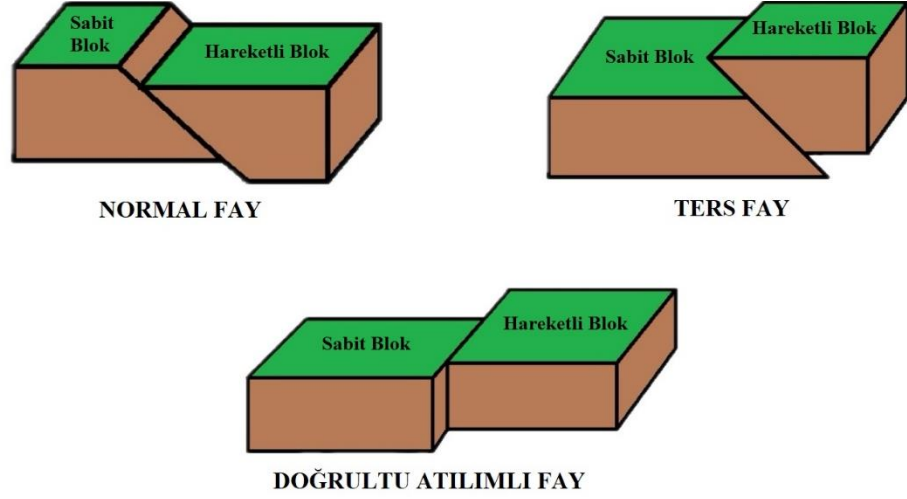
Faylar, yer kabuğunun dinamik bir şekilde hareket ettiği jeolojik yapılanmalardır ve genellikle büyük plakaların sınırlarında veya iç bölgelerinde meydana gelirler. Bu plakalar, mantonun altındaki daha sıcak ve plastik özellikteki astenosfer üzerinde sürekli olarak kayarlar ve etkileşim halindedirler. Fayların oluşumu, levha tektoniği süreçlerinin doğrudan bir sonucudur. Levha sınırlarında, plakalar birbirine göre hareket ederken veya birbirine sürtünürken, enerji birikmesi ve serbest bırakılması sonucunda faylar meydana gelir. Faylar, çoğunlukla uzun ve ince yapılar olup, iki kaya bloğu arasındaki kırılma hatlarında belirgin hale gelirler. Bu kırılmalar, yer kabuğunun içinde biriken gerilim enerjisinin aniden serbest bırakılmasıyla ortaya çıkar ve bu da depremlere neden olabilir. Fayların hareketi çeşitli şekillerde olabilir: yatay kayma, düşey itme veya çekiş gibi. Bu hareket tipleri, fay tipine ve oluşum mekanizmasına bağlı olarak değişir. Jeolojik araştırmalar ve deprem bilimciler, fay hatlarının belirlenmesi ve karakterizasyonu için çeşitli teknikler kullanırlar. Bu teknikler arasında jeomorfolojik çalışmalar, jeofizik ölçümler yer ivmesi ölçümleri gibi ve jeolojik kesitlerin analizi bulunur. Fay hatlarının tanımlanması, bölgesel deprem hasar olasılıklarının tahmin edilmesi ve yapısal mühendislik projelerinde risklerin değerlendirilmesi açısından büyük önem taşır.

Sonuç olarak, faylar ve bu faylarla ilişkili depremler, yer kabuğunun dinamiğini anlamak ve doğal afet risklerini yönetmek için sürekli olarak izlenir ve araştırılır. Bu çalışmalar, toplumların deprem risklerine karşı hazırlıklı olmasını sağlamak ve yapısal güvenliği artırmak için kritik öneme sahiptir.

2.2.1. Fay çeşitleri

Faylar, tektonik levhaların hareketleri sonucunda yer kabuğunda oluşan kırılma bölgeleridir ve bu kırılmalar genellikle depremlere neden olur. Faylar geniş bir çeşitlilik gösterir ancak Şekil 2.1’de gösterildiği üzere temel olarak üç ana kategoriye ayrılırlar: normal faylar, ters faylar ve yanal (yatay) faylar.

Bu ana çeşitlerin kombinasyonundan da faylar meydana gelmektedir. Bu fayda yatayda ve düşeyde hareket söz konusudur, yani yanal atılımlı fay ile ters fay ya da yanal atılımlı fay ile normal fayın birlikte görülmesidir.



Şekil 2.1 Fay çeşitleri

Normal faylarda taban yani hareketli blok aşağıya doğru hareket eder. Bu faylar genellikle iki tektonik levhanın uzaklaşması veya ayrılması sonucu oluşur. Bu tür faylarda kırılma, yer kabuğunun altında düşey yönde gerçekleşir bu durumda bir levha diğerine göre yükselir veya alçalır. Ayrıca normal faylar, çoğunlukla kıtasal kabuğun genişlemesi veya çekilmesi sırasında oluşan gerilimlerin serbest bırakılmasıyla ortaya çıkmaktadır. Bu tür faylar genellikle grabenler yani çöken bloklar arasında oluşan çukurlar ve rift bölgelerinde bulunur. Örneğin, Büyük Kanyon'un oluşumu sırasında Colorado Nehri boyunca uzanan normal faylar tipik bir örnektir.

Ters faylarda ise taban blok yukarı doğru hareket etmektedir. Ters faylar levhalar arasındaki sıkışma veya bir levhanın diğerinin üzerine doğru itilmesi sonucu oluşan faylardır. Bu tür faylarda kırılma, genellikle yer kabuğunun altında düşey yönde gerçekleşir ve bir levha diğerinin üzerine yükselir. Ters faylar, levhaların çarpıştığı veya sıkıştığı bölgelerde ortaya çıkar. Bu faylar genellikle büyük dağ oluşumları, dağ kemerleri ve depremle karakterize edilen aktif sismik bölgelerle ilişkilidir. Örneğin, Himalaya Dağları'nın oluşumu sırasında Hindistan Levhasının Asya Levhası üzerine itilmesiyle oluşan ters faylar belirgin bir örnektir.

Yanal faylar, doğrultu atımlı faylar olarak da bilinir ve genellikle iki tektonik levhanın yan yana hareket ettiği bölgelerde oluşan faylardır. Bu tür faylarda kırılma, yer kabuğunun altında yatay yönde gerçekleşir ve bir levha diğerine göre sağa veya sola doğru kayar. Yanal faylar genellikle levhalar arasındaki yatay hareketlerle karakterizedir. Sağ yanal atımlı faylar ve sol yanal atımlı faylar olmak üzere de iki ana kategoride incelenir.

Sağ yanal atılımlı faylar, gözlemci sabit blokta konumlandığı durumda diğer taraftaki bloğun sağa doğru hareket ettiği faylardır. Bu tür faylar, fay boyunca sağa doğru bir hareket gösterir ve genellikle büyük depremler üretme potansiyeline sahiptir. Türkiye'deki Kuzey Anadolu Fay Hattı, sağ yanal atılımlı faylara klasik bir örnektir. Bu fay hattı, Anadolu Levhası ile Avrasya Levhası arasındaki sınırı oluşturur ve batıya doğru hareket eden Anadolu Levhasının Avrasya Levhasına göre sağa doğru kaymasıyla karakterizedir.

Sol yanal atılımlı faylar ise gözlemci sabit blokta konumlandığı durumda diğer taraftaki bloğun sola doğru hareket ettiği faylardır. Bu tür faylar, fay boyunca sola doğru bir hareket gösterir. Sol yanal atılımlı faylar da büyük depremler üretme potansiyeline sahiptir, ancak Türkiye'de bu tür faylar daha az yaygındır.

Bu fay türlerinin anlaşılması, yer kabuğunun dinamik yapısının ve tektonik süreçlerin anlaşılmasında önemli bir rol oynar. Faylar üzerinde gerçekleşen hareketler, depremler gibi doğal afetlerin nedenlerinden biridir ve bu nedenle jeolojik, jeofizik ve sismolojik araştırmaların odak noktasını oluşturur.

2.2.2. Türkiye’de bulunan aktif fay hatları

Türkiye, jeolojik ve tektonik açıdan yoğun bir bölgedir ve coğrafi konumu itibarıyla çeşitli tektonik levhaların etkileşim ve kesişiminde yer almaktadır. Bu durum, ülkenin geniş bir yüzölçümü boyunca farklı tektonik yapıların gelişimine ve aktif fay hatlarının oluşumuna zemin hazırlamıştır. Türkiye'nin fay hatları, genellikle levhalar arasındaki hareketlerin sonucunda kırılma bölgeleri olarak ortaya çıkar ve bu kırılmalar, yer kabuğunun içinde biriken gerilim enerjisinin serbest bırakılmasıyla depremlere yol açabilmektedir. Bu fay hatları hem yerleşim ve kentsel planlama hem de doğal afet yönetimi açısından dikkate alınmalıdır.

Türkiye'nin önemli ve aktif fay hatlarından başta Kuzey Anadolu Fay Hattı gelmektedir. Bu fay hattı, Batı Karadeniz'den başlayarak Marmara Denizi'ni geçip Ege Denizi'ne kadar uzanır ve genellikle sağ yönlü hareketler gösterir. Anadolu Levhası ile Avrasya Levhasının sınırlarında yer alan bu fay hattı, özellikle İstanbul gibi büyük metropollerin de içinde bulunduğu önemli yerleşim alanlarına yakınlığıyla dikkat çeker.

Bir diğer fay zonu olan Batı Anadolu Fay Zonu ise Ege Bölgesi'nden başlayarak Akdeniz'e kadar uzanan bir diğer kritik fay zonudur. Bu bölgedeki faylar, genellikle sağ yönlü hareketler gösterir ve orta büyüklükte depremlere neden olabilir. Sahip olduğu

jeolojik özellikler ve yerleşim yerleriyle birlikte, Batı Anadolu Fay Zonu da deprem riski yüksek bölgeler arasında yer alır.

Doğu Anadolu Fay Zonu ise Türkiye'nin doğusunda geniş bir alana yayılan bir diğer önemli fay kuşağıdır. Bu bölgedeki faylar, genellikle derin odaklı ve büyük enerjili depremlere yol açabilir. Fay zonu üzerinde yer alan Van, Erzurum gibi şehirler, bu fayların etkisi altındadır ve bölgede deprem riski yüksektir. 2023 yılı 6 Şubat 7.8 Mw büyüklüğündeki Kahramanmaraş depremi de bu fay zonu üzerinde gerçekleşmiştir. Bu depremde yaklaşık 50.000 üzerinde can kaybına, 100.000 üzerinde yaralıya ve 20.000 üzerinde yapı hasarına sebep olmuştur. Bu fay zonu, genellikle kıtasal çarpışmaların etkisiyle oluşmuş ve zaman içinde önemli tektonik aktivitelerin merkezi haline gelmiştir.

Türkiye'nin diğer bölgelerinde de çeşitli fay hatları bulunmaktadır ve bu fay hatları ülkenin genel deprem risk profilini şekillendirir. Jeolojik ve jeofizik araştırmalar, bu fay hatlarının hareket paternlerini anlamak ve deprem potansiyellerini değerlendirmek için sürekli olarak yürütülmektedir.

2.3. Deprem Oluşumu

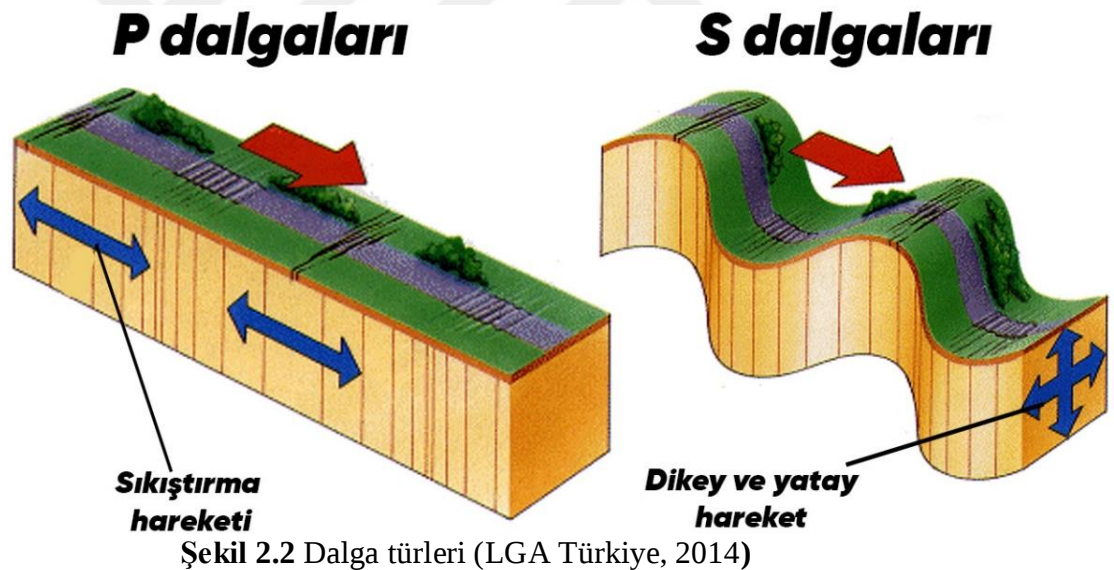
Dünyanın merkezinden yer yüzeyine kadar çeşitli katmanlar bulunmaktadır. Bunlar merkezden dışa doğru sırayla çekirdek, manto, astenosfer ve litosferdir. Litosfer, kalınlığı yaklaşık 70-80 km olmakla birlikte üzerinde yaşamımızı sürdürdüğümüz katmandır. Litosfer, altındaki 2000C civarında yarı katı yarı sıvı kıvamda olan Astenosferin üzerinde hareket halindedir. Bu hareket sırasında meydana gelen tektonik kuvvetler, fay adı verilen kırıklar boyunca belirli aralıklarla ani hareketlere neden olur. Bu ani hareketler, Litosfer boyunca yayılan titreşimlerle yıkıcı depremler oluşturur. Günümüz şartlarında depremin önceden tahmin edilmesi mümkün değildir. Yer yüzeyinden merkeze doğru sıcaklıkların arttığı bilinmektedir. Astenosfer de var olan kuvvetler sebebiyle taş katman parçalanmakta ve levhalara bölünmektedir. Günümüzde hala büyük levhalar ve çok sayıda küçük levha bulunmaktadır. Bu levhalar, kıtalarla birlikte Astenosfer üzerinde yüzer ve insanlar tarafından hissedilemeyecek kadar yavaş bir hızla hareket ederler. Bu hareket sırasında levhalar birbirlerine sürtünür, sıkıştırır, üst üste çıkar ya da altlarına girerler. Bu hareketlerin olduğu sınır bölgelerinde depremler meydana gelir. Depremlerde genellikle bu levhaların bulunduğu bölgelerde gerçekleşir. Bu hareket anidir ve şok etkisi yaratır. Bunun sonucunda, çok uzak mesafelere kadar yayılabilen deprem dalgaları oluşur. Bu oluşumda, uzunluğu kilometrelere varan kırıklar oluşur. Bu kırıklara fay adı verilir. Belirli bir noktada zamanla biriken enerji, kritik bir

seviyeye ulaştığında, fay düzlemi boyunca var olan sürtünme kuvvetini aşarak fay hattının her iki tarafındaki kaya bloklarının hareket etmesine neden olur.

2.3.1. Dalga türleri

P dalgası, deprem dalgaları arasında kayıt cihazlarına ilk ulaşan dalga türüdür. Boyuna dalgalar, sıkışma dalgaları ve birincil dalgalar olarak da adlandırılırlar. P dalgaları, taneciklerin hareketinin yayılma doğrultusunda olduğu boyuna dalgalardır. Yıkıcı etkileri düşüktür.

S dalgası ise sismik dalgalar arasında cihazlara ikinci olarak ulaşan dalga türüdür. Enine dalgalar yüzey dalgaları ve ikincil dalgalar olarak da adlandırılırlar. Dalga hareketi, yayılma yönüne dik veya çapraz şekilde gerçekleşir. Bu dalgalar oldukça yıkıcıdır. Bu dalgaların genlikleri, P dalgalarına kıyasla çok daha büyüktür. Yüzey dalgaları, büyük genlikli, daha yavaş ve uzun süreli yıkıcı dalgalardır. Bununla birlikte yalnızca katı maddelerde yayılır.



Şekil 2.2 Dalga türleri (LGA Türkiye, 2014)

2.4. Burkulma Çeşitleri

Borunun gömülü derinliği yani borunun merkezinden zeminin yüzeyine uzaklığının boru çapına oranı yüksek bir değer alıyorsa boru o kadar derine gömülmüştür ve boru ne kadar derine gömülürse faylanma altında o kadar yüksek toprak yüklerine maruz kalmaktadır. Buna ek olarak boru bir de narinse bu durumlarda yerel burkulma gözlemlenmektedir.

Global kiriş burkulmaları ise boru çapının boru duvar kalınlığına oranı küçük olan başka bir deyiş ile kalın borular da ve yeryüzüne yakın derinliklerdeki borularda gözlemlenmektedir. Genelde yerel burkulma dansa kiriş burkulmaları tercih edilmektedir.

2.5. Deformasyona Uğrayan Gömülü Sürekli Boruların Analiz Yöntemleri

Bu bölümde, aktif fay hatlarının neden olduğu deformasyonlardan etkilenen gömülü sürekli çelik boruların tepkisi ve mekanik davranışı üzerine yapılan mevcut literatür ve araştırmalar incelenmiştir.

2.5.1. Analitik yöntemler

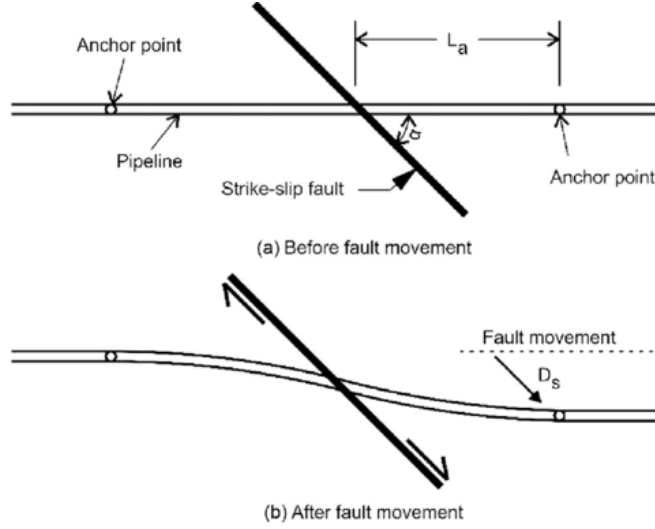
Fay hareketlerinden etkilenen gömülü sürekli çelik borular, çeliğin elastik davranışının dışına çıkmasından ve boruyu çevreleyen dolgu malzemesi ile doğrusal olmayan etkileşimde bulunmasından ötürü karmaşık bir davranış sergiler. Bu karmaşık davranışın doğru bir şekilde simüle edilebilmesi için sorunun doğru ve ayrıntılı sayısal modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Geçmişte yeterli bilgisayar araçları ve yazılımlarının eksikliği nedeniyle, bu tür boruların tepkilerini değerlendirme yöntemleri bulmaya yönelik ilk çabalar, yalnızca analitik ve teorik modellere dayanmak zorunda kalmıştır. Bu bölümde, aktif fay hatları ile kesişen gömülü borular için geliştirilen analitik modellerin tarihsel gelişimi kısaca özetlenmekte ve bu modellerin evrimi ayrıntılı bir şekilde incelenmektedir.

2.5.1.1. Newmark ve Hall modeli

Newmark ve Hall'ün 1975 yılında yaptığı çalışma Şekil 2.3'te görüldüğü gibi, gömülü bir boru hattının mekanik davranışını anlamak için geliştirilen basitleştirilmiş bir analitik modelleme yaklaşımlarının başlangıcı kabul edilmektedir. Bu modelde düşük yer değiştirme yüklerine maruz kalan borunun uzun bir kablo gibi davrandığı varsayılmıştır. Model, borunun eksenel ve yanal deformasyonunu toprak deformasyonu olarak ele alırken, etkileşen parçalar arasındaki görelî yer değişimini dikkate almamaktadır. Dolgu üzerine etki eden yer çekimi basıncının, borunun dolgu malzemesi ile sürtünme sebebiyle kaymasına sebep olduğu kabul edilmiştir. Bununla birlikte model boruların faylanmaya karşı direncinin, kesiştiği fayın özellikleri ile dolgu malzemesinin özellikleri ve borunun yapısına bağlı olduğu öne çıkarmaktadır.

Model eğilme rijitliğini dikkate almadığı için, boru hatları gibi yapıların fay hareketleri nedeniyle oluşabilecek sıkışma durumlarında denge koşullarını sağlamakta

sınırlılıklar yaşayabilir. Bu tür durumlar için metodoloji uygun olmayabilir. Ancak bu yöntem, yapıların sismik etkiler altında nasıl davranacağını anlamak için önemli bir analitik çerçeve sunar ve bu alanda güçlü ve güvenilir bir yaklaşım olarak kabul edilir.



Şekil 2.3 Newmark ve Hall tarafından önerilen modelin plan görünümü (B. Madjdabadi, 2016)

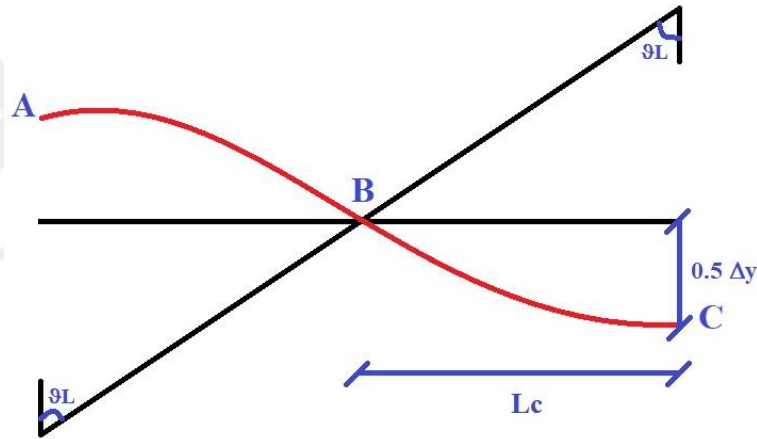
2.5.1.2. Kennedy ve diğerleri metodolojisi

Geliştirilen ve kabul görülen bir diğer analitik öneri ise Şekil 2.4'te görüldüğü gibi Kennedy ve diğerleri tarafından 1977-1983 yıllarında ortaya konmuştur. Bu modelde Newmark ve Hall'ün temel modeli üzerine çalışılarak daha ilerletilmiş versiyonu oluşturmak amaçlanmıştır. Modelin kabulüne göre bu yöntem gömülü boruların hesap ve incelenmesini kolaylaştırmak için boru yine kısmen uzun bir kablo olarak görmüş ve borunun eğilme direnciyle bükülme direncini göz ardı etmiştir. Bu kısıtlama sebebiyle, bu yöntem yalnızca boruda net gerilim oluşturan fay kesişim açıları için uygundur.

Metodun çözüm içeriğinde ilk aşamada boru ve fay kesişiminde eksenel kuvvet (F_{max}) ve maksimum boru eksenel gerilimi (σ_{max}) hesaplanmıştır. İkinci aşamada eğrilik yarı çapı, yatay ve dikey eksenler için tahmin edilmiştir. Üçüncü aşamada ise yer değiştirmenin oluşturduğu dikey ve yatay yöndeki uzunluklar belirlenmiştir. Son aşamada borunun önemli ve diğer bölgelerdeki uzamalar toplanmış genel boru uzaması hesaplanmıştır. Gerekli ve mevcut uzama dengeli olmadığı durumda tüm aşamalar tekrar gözden geçirilip, eksenel kuvvet ve maksimum boru eksenel gerilimi değerleri güncellenmiştir. Dengeli durum sağlanana kadar bu aşamalar devamlılık göstermiştir.

Bu çözüme göre metodun sonucunda, boru üzerindeki aksel çekme kuvveti, borunun eğriliğinden bağımsız olarak ortaya çıktığı; bu durumun bükülmeye sebep olan gerilmelerin aksel yönde meydana gelen gerilmelerin %80'inden fazlasına neden olmaması şartıyla gerçekleştiği ve eğer net gerilimin boruya etki ettiği varsayılırsa, gömülü borunun kablo benzeri davranış göstermesi için bükülme etkileri göz ardı edilebileceği yönünde ortaya çıkmıştır.

Bu yöntemin dezavantajları başta kısıtlayıcı kabullerinden ötürü ortaya çıkmaktadır. Bu kısıtlama sebebiyle pratikte sadece, borunun büyük oranda faylanmayla karşı karşıya kalıp kırılmadan uzama yaptığı nadir durumlarda uygulanabilmektedir. Bu durumlar gerçekleşip şartlar sağlansa dahi inşaat alanında özel önlemlerin alınmasını gerektirir. Sonuç olarak bu metodolojinin öne sürdüğü gerinim değerleri genelde boruda oluşabilecek gerçek deformasyonlardan daha büyük değerler alabilir.



Şekil 2.4 Kennedy ve diğerleri tarafından önerilen modelin plan görünümü

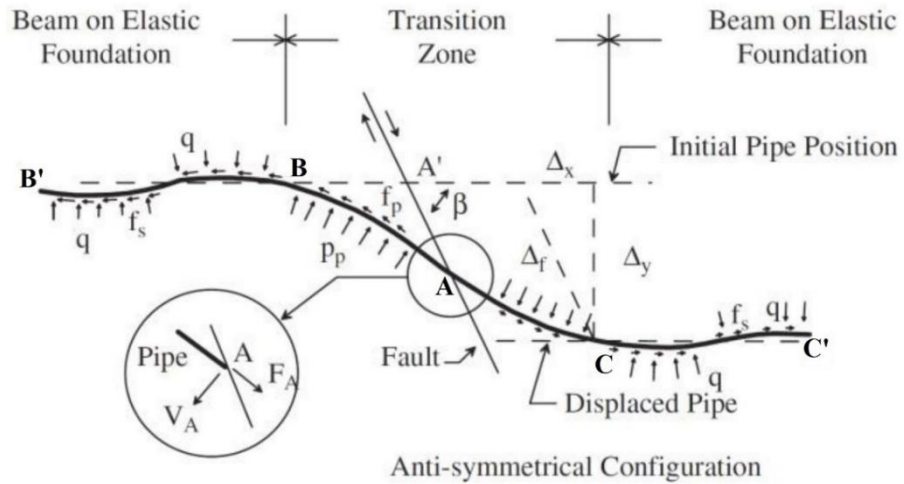
2.5.1.3. Wang ve Yeh metodolojisi

Wang ve Yeh 1985 yılında Şekil 2.5'te görüldüğü gibi, çalıştıkları yaklaşım ile önceki metotlardan daha kapsamlı bir çalışma ortaya koymuşlardır. Önceki metotları daha nitelikli hale getirmekle birlikte sağa kayma ve ters kayma fay koşullarının olduğu senaryo ile yeni bir bakış açısı dahi kazandırdılar. Bu sebeple Wang ve Yeh'in yaklaşımı öncü metotların temellerini ve kabullerini kökünden değiştirmiştir. Bu yöntemi diğer mevcut yöntemlerden ayıran ve ana yenilik olarak kabul edilen özelliği, borunun dört kısma ayrılarak incelenmiş olması vardır.

Metodun başlıca kabul ve çözüm adımları şekil 2.5'te gösterildiği gibi aşağıdaki şekildedir;

- Fay hattının gömülü boruyu A noktasında kestiği
- B-A ve A-C bölgelerinin fay hareketi sırasında, geçiş zonu ya da yüksek deformasyonların görüldüğü zon olduğu
- C-C' ve B-B' bölgelerini de elastik temel oturan kiriş olduğu
- Yüksek eğilme deformasyonlarının görüldüğü AB ve AC segmentlerin, dairesel kemerler şeklinde deforme olduğunu kabul eden fonksiyonlar varsayılarak çözüm yapılmıştır.

Bu metodoloji, öncü metotlar ile kıyaslandığında yenilik ve iyileştirmeler sunmuş olsa da diğer yaklaşımlarda olduğu gibi bu yaklaşımın da eksikleri ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu eksikliklerden ilki, borunun eğilme direnci sonucunda borunun sertliğini olumsuz etkileyeceği gerçeği yok sayılmıştır. Bununla birlikte borunun güvenliği sadece eğilme momentlerine bağlı olarak ele alındığı için, gerilme yerine deformasyona bağlı yer değiştirme durumlarında doğru olmayan sonuçlar söz konusu olabilmektedir. Son olarak en kötü deformasyon birikimi her zaman yüksek eğriliğin bulunduğu alanların sınırlarında olmayıp faya yakın olarak da bulunabilmektedir.



Şekil 2.5 Wang ve Yeh tarafından önerilen model (Dimitrios K. Karamitros, 2007)

2.5.1.4. Karamitros ve diğerleri metodoloji

Karamitros ve arkadaşlarının 2007 yılında öne sürdüğü daha güncel metodoloji, önceki metotları geliştirerek ve onlara entegre ederek ortaya konmuştur. Bu metot, Kennedy ve diğerlerinin boru üzerindeki eksenel gerilmeleri ve etkilerini belirlemek için geliştirdiği formül ile Wang ve Yeh'in boruyu deforme olmasına bağlı olarak dört farklı bölgeye ayırma yöntemini birleştirmiştir.

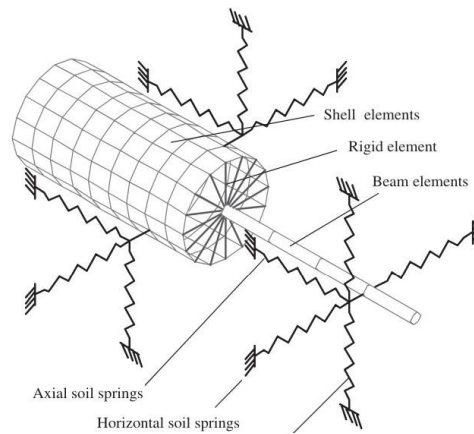
Modelde, boru ile fayın kalınlığı sıfır olan bir noktada kesiştiği varsayılmıştır. gerilme ve deformasyon değerleri arasında uyum sağlamak için çelik malzemenin modülünün değeri her seferinde güncellenmiştir.

etkileşimin doğru bir şekilde tanımlanması önemlidir. Bununla birlikte fayın kırılma hareketinden kaynaklanan yüklemeye maruz kalan boruların analizi oldukça karmaşık ve tepkileri de doğrusal olmadığı olduğu için uygun malzemeler ile modelleme gerekmektedir.

2.5.2.1. Karamitros, Bouckovalas ve Kouretzis Modeli

Karamitros, Bouckovalas ve Kouretzis tarafından 2007 yılında geliştirilmiş olan model hem analitik hem de sayısal yöntemleri kullanarak boruların maruz kaldığı mekanik gerilmeleri ve deformasyonları tahmin etmeye çalışmıştır.

İlk aşamada boruların yer değiştiren zemin üzerinde maruz kaldıkları mekanik gerilmeleri hesaplamak için zemin özelliklerini, borunun malzeme özelliklerini, yer değiştirme miktarını ve daha birçok parametreyi içeren analitik formüller kullanılmıştır. İkinci aşamada geliştirilen analitik yöntemin doğruluğunu incelemek ve daha karmaşık senaryoları analiz edebilmek için Şekil 2.7’de 3 boyutlu sonlu elemanlar sayısal modelleri de kullanılmıştır. Bu sayısal model, uzunluğu 1000 metre olan bir boru modeli içerir. Borunun 900 metresi kiriş elemanları kullanılarak, kalan kısmı ise kabuk elemanları kullanılarak modellenmiştir. Modellenen borunun çapı 914,4 mm, duvar kalınlığı ise 12 mm kabul edilmiştir. Borunun etrafındaki toprak ve boru-toprak etkileşimleri ise doğrusal olmayan yaylarla temsil edilmiştir. Bununla birlikte model, farklı fay açısı değerleri (30°, 45°, ve 60°) ve farklı yer değiştirme miktarları gibi çeşitli senaryolar için analiz yapılmasına olanak tanımıştır. Son aşamada ise analizler sırasında borunun maksimum aksenal, eğilme ve boyuna gerilmeleri hesaplanmış ve bu değerler analitik yöntemlerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında analitik ve sayısal yöntemlerle elde edilen sonuçlar arasında genel olarak iyi bir uyum gözlemlenmiştir.



Şekil 2.7 Karamitros ve diğerleri tarafından önerilen 3 boyutlu sayısal model (Dimitrios K. Karamitros, 2007)

2.5.2.2. Liu, Wang ve Yu modeli

Liu ve diğerlerinin 2008 yılında geliştirdiği sayısal model, Karamitros ve diğerlerinin 2007 yılında oluşturduğu sayısal modelle benzer yaklaşımlar göstermektedir. Modelde kabuk eleman olarak 4100 metre uzunluğu olan boru ile sonlu eleman oluşturulmuş ve borunun iç basıncının, borunun akmaya başladığı noktaların değişiminin ve fay açısı gibi özelliklerinin ne şekilde değişiklik gösterdiği incelenmek istenmiştir. 4100 metre kabul edilen boru uzunluğunun sebebi ise boru ve zemin arasındaki hareket farklılıklarını en aza indirmek içindir.

Bu modelde, fay kesişim açısının artmasıyla gömülü borunun çekme yerine bükülmeye maruz kaldığı vurgulanırken fay kesişim açısının küçülmesiyle ise borunun eksenel doğrultuda çekme kuvvetinin arttı ve bunun da çekme kopmasına neden olduğu vurgulamaktadır.

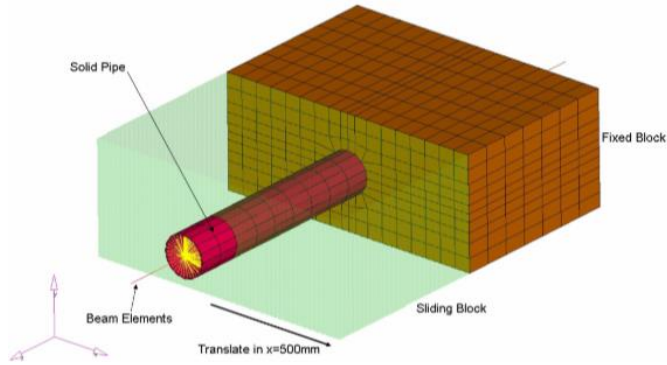
2.5.2.3. Odina ve diğerleri modeli

Odina ve Tan tarafından 2009 yılında yapılan çalışmada, gömülü boru hatlarının fay hareketleri etkisi altındaki performansını değerlendirmek için kiriş şeklindeki elemanlardan oluşan gömülü boruların sonlu elemanlar modeli önerilmiştir.

Şekil 2.8’de gösterildiği üzere modellemedeki kabuller aşağıdaki gibidir;

- Borunun uzunluğu 1400 m
- Borunun et kalınlığı 17,1 mm
- Çeliğin kalitesi API X65
- Fay kesişim açısı 22 derece
- Dolgu malzemesi, yanal ve düşey eksenel yönlerde eşdeğer zemin yayları olarak
- Dairesel kesitte yer alan düğüm noktalarının tamamına 6 serbestlik dereceli ve çift düğümlü elastik-plastik kiriş eleman olarak kabul edilmiştir.

Çalışmanın sonucuna göre, eksenel gerilmelerin büyüklüğünü, malzeme özelliği ve modellemesinin önemli ölçüde etkilediği görülmüştür.



Şekil 2.8 Odina ve Tan tarafından önerilen model

2.5.2.4. Shitamoto ve diğerleri modeli

Shitamoto ve diğerleri tarafından 2010 yılında yapılan çalışma, API X80 sınıfındaki bir çelik boru hattı için basınca bağlı gerilme sınırı belirlemek üzerine yapılmıştır. Buna amaç doğrultusunda borunun nümerik bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan modelde borunun maksimum gerilmeleri, 3 metrelik bir fay yer değiştirme değerine karşın hesaplanmış bununla birlikte borunun yarısını ve onu temsil etmek için sekiz düğümlü üç boyutlu katı elemanlar kullanılmıştır. Boru ile dolu malzemesi arasındaki etkileşim ise yine kabuk eleman olarak modellenen borunun alt ve üst yüzeylerine yerleştirilen doğrusal olmayan yaylar ile hesaplanmıştır. Model sonucunda maksimum eğilme deformasyonları hesaplanıp çelik borunun kapasitesi ile kıyaslanmıştır.

2.5.2.5. Gantes ve Boukovalas modeli

Gantes ve Boukovalas tarafından yapılan 2013 yılında bir başka çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada Yunanistan’da bulunan faylanma etkisine maruz kalan doğal gaz borularının performansı incelenmiştir. Model NASTRAN adlı yazılım kullanılarak yapılmıştır. Bu modeldeki tasarım kabulleri aşağıdaki gibidir;

- Borunun uzunluğu 1700 m
- Çeliğin kalitesi API X65
- Borunun iç basıncı 7,5 MPa
- Borunun et kalınlığı 12 ila 17,5mm
- Borunun dış çapı 0,9144 m
- Boru giriş ve kabuk eleman olarak
- Dolgu malzemesi olan toprak yay elemen olarak modellenmiştir.

Çalışmanın sonucuna göre, borunun çekme gerilmesi sınır şartlarına uygun olsa da sismik etkilere karşı güçlendirme gerektiği sonucuna varılmıştır.

2.5.2.6. Liu ve diğerleri modeli

Liu ve arkadaşları, gömülü boru hatlarının güvenliği ve performansını etkileyen faktörleri incelemek amacıyla 2016 yılında bu modeli geliştirmiştir. Özellikle modelde gömülü boruların ters faylanma etkileri karşısındaki durumu ayrıca farklı çelik sınıfı kullanılarak deformasyon sonucu sertleşme ve akma dayanımı gibi çelik malzeme özelliklerinin meydana getirdiği etkiler incelenmiştir. Modelin tasarımında boru kabuk elemanlarla, boru ile zemin arasındaki etkileşim ise yay elemanlarla tasarlanmıştır.

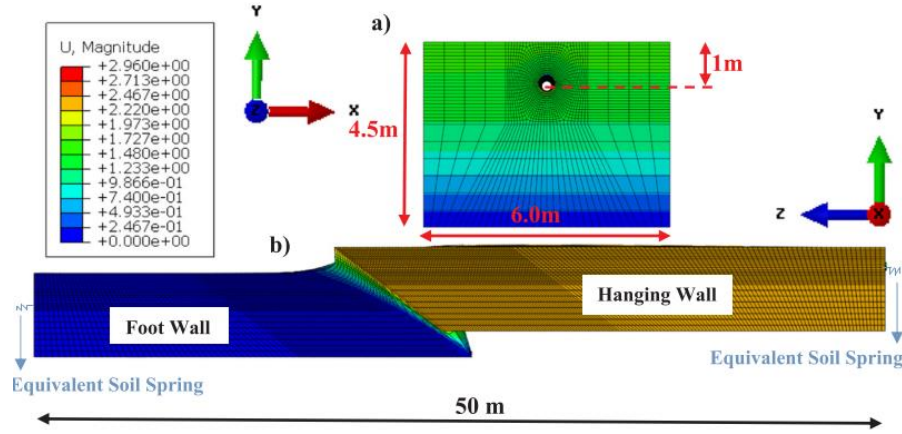
Modellemenin sonuçlarına göre ters faylanma durumunda boru üzerinde oluşan gerilmelerin, çelik malzemenin mukavemetinin yaklaşık 1,1 katı olduğu, çelik malzemenin akma dayanım değeri artırıldığında, eksenel gerilme değerlerinin ve kritik fay yer değiştirme değerinin arttığı, deformasyonun sertleşme değerleri artırıldığında ise eksenel gerilme değerlerinin ve kritik fay yer değiştirme değerinin azaldığı ortaya çıkmıştır.

2.5.2.7. Hasan Emre Demirci ve diğerleri sayısal modeli

Hasan Emre Demirci, Subhamoy Bhattacharya, Dimitrios Karamitros ve Nicholas Alexander 2018 yılında bir başka sayısal model ortaya koymuşlardır. Bu modelin amacı deneyi gerçekleştirilecek olan ters faylar ile karşılaşan gömülü boruların üç boyutlu sayısal modelini de oluşturarak analiz sonuçlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırmak, 1971 yılında meydana gelen San Fernando depreminde, San Fernando alanındaki gömülü çelik boru hattının ters fay hattından geçişine dair bir örnek olay incelemesi yapmak, ters fayın etkisi altındaki saha boru hattının tepkisini araştırmak, toprak-boru sertliği kavramını açıklamak ve bu kavramın laboratuvar ve saha boru hatlarının tepkilerini nasıl etkilediğini değerlendirmek. Sayısal model Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Bu modeldeki tasarım kabulleri aşağıdaki gibidir;

- ABAQUS yazılımı kullanılmış
- Üç boyutlu sonlu elemanlar analizi yapılmış
- Boru hattının ters fay hareketine tepkisi incelenmiş
- Borunun uzunluğu 1250 mm
- Borunun kalitesi API X65
- Borunun iç basıncı 0,414 MPa

- Borunun kalınlığı 0,008m



Şekil 2.9 Hasan Emre Demirci ve diğerleri tarafından önerilen sayısal model (Hasan Emre Demirci, 2018)

2.5.3. Deneysel yöntemler

Gömülü boru hatlarının fay hareketlerinin oluşturduğu sismik taleplere nasıl tepki verdiği, analitik ve sayısal yöntemlerin yanı sıra deneysel araştırmalarla da incelenmektedir.

Gömülü boru hatlarının incelenmesi ve değerlendirilmesi için kullanılan deneysel yöntemler, teknolojinin ilerlemesiyle birlikte büyük değişim ve gelişim göstermiştir. Geçmişten günümüze kadar uzanan bu süreç, boru hatlarının güvenliği ve performansının nasıl sağlandığını anlamak açısından önem arz etmektedir. Boru hatlarının ilk inşa edildiği dönemlerde en temel yöntem görsel incelemelerdi, boru hatlarının yüzeyi, özellikle de ulaşılabilir olan kısımlar, insan gözüyle incelenmekteydi. Bu yöntem sadece dış yüzeydeki belirgin hasarları tespit edebilirdi. Aynı dönemde basınç testleri de kullanılmaktaydı. Boru hatlarının dayanıklılığı ve sızdırmazlığı test edilebilmek amacıyla boru hattı belirli bir basınç altında tutulup ve sızıntılar ile zayıf noktalar tespit edilmeye çalışılmıştır.

Spesifik çalışmalar 20. Yüzyılın başında geliştirilmeye başlanmıştır.

- Bunların başında radyografik testler (RT) gelmektedir. Bu testler, X-ışınları veya gama ışınları kullanarak boru hattının iç yapısını inceleyen bir yöntem olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntem boru hattının içindeki çatlakları ve kusurları tespit edebilse de uygulanması ve sonuçlarının yorumlanması uzmanlık gerektirmektedir.

- Ultrasonik testler (UT) ise boru hattı duvar kalınlığını ve içindeki çatlakları tespit etmek için ultrasonik dalgalar kullanılmaya başlanmıştır, bu yöntem boru hattının iç yüzeyindeki küçük çatlakları ve korozyonu tespit etmek için oldukça etkili olmuştur.

20. yüzyılın sonları ve 21. yüzyılın başlarında ise manyetik akı sızıntısı (MFL), yeraltı radar (GPR), akustik emisyon (AE), termografi, fiber optik sensörler ve iç taban robotları gibi daha modern yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler ile ilgili özet bilgiler aşağıda yer alan maddelerde açıklanmıştır.

- Manyetik akı sızıntısı, boru hattındaki metalik hasarları tespit etmek için manyetik alan kullanarak boru hattı duvarlarındaki korozyon ve çatlakların tespitinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Manyetik sensörler, boru hattındaki manyetik akı sızıntısını ölçerek hasarlı bölgeleri belirlemektedir.
- Yeraltı radar (GPR), elektromanyetik dalgalar kullanarak yer altındaki boru hatlarının yerini ve derinliğini belirlemek için kullanılmaktadır, bu teknoloji metalik ve metalik olmayan boru hatlarını tespit etmek için uygundur.
- Akustik emisyon (AE) ise boru hattı içerisindeki akışkanların akışından kaynaklanan akustik dalgaları kullanarak boru hattındaki çatlakları, korozyonu ve diğer hasarları tespit etmektedir. Bu teknoloji, boru hattının iç yüzeyindeki küçük çatlakların bile tespit edilmesini sağlamaktadır.
- Termografi, boru hattındaki sıcaklık değişikliklerini tespit etmek için kullanılan bir yöntem olarak geliştirilmiştir. Bu teknoloji boru hattındaki izolasyon hatalarını, sızıntıları ve diğer termal anomalileri tespit etmek için kullanılmaktadır.
- Fiber optik sensörler, modern izleme teknolojilerinin bir parçası olarak boru hatlarının izlenmesi ve hasar tespiti için kullanılmaya başlanmıştır.
- İç taban robotları ise boru hatlarının iç kısmını incelemek için kullanılan robotlar olarak geliştirilmiş, kameralar ve sensörlerle donatılmıştır; bu robotlar boru hattının iç yüzeyini görsel olarak inceleyerek çatlakları, korozyonu ve diğer hasarları tespit etmektedir.

Modern dönemde çeşitli yöntemlerin entegrasyonu ile daha kapsamlı izleme sistemleri geliştirilmiştir.

- GPR, AE ve termografinin bir arada kullanıldığı sistemler boru hatlarının durumu hakkında daha detaylı bilgi sağlamaktadır.
- Yapay zeka ve makine öğrenimi teknikleri, büyük veri setlerini analiz ederek boru hatlarındaki anormallikleri tespit etmede kullanılmaya başlanmıştır. Bu teknolojiler önceden tespit edilemeyen sorunları daha hızlı ve doğru bir şekilde tespit edebilmektedir.
- Gelişmiş sensör teknolojileri, özellikle fiber optik sensörler ve kablosuz sensör ağları boru hatlarının sürekli izlenmesini ve anlık veri toplanmasını mümkün kılmaktadır.

Bu yöntemlerin her biri, boru hatlarının durumunu değerlendirmek ve olası sorunları önceden tespit etmek için farklı avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır.

Aynı zamanda bu deneysel yöntemler gerçeğe yakın olmasa dahi ölçekli şekilde maket formunda oluşturularak laboratuvar ya da benzeri ortamlarda yük simülasyonları gerçekleştirilmiş ve meydana gelen deformasyonlar incelenmiştir.

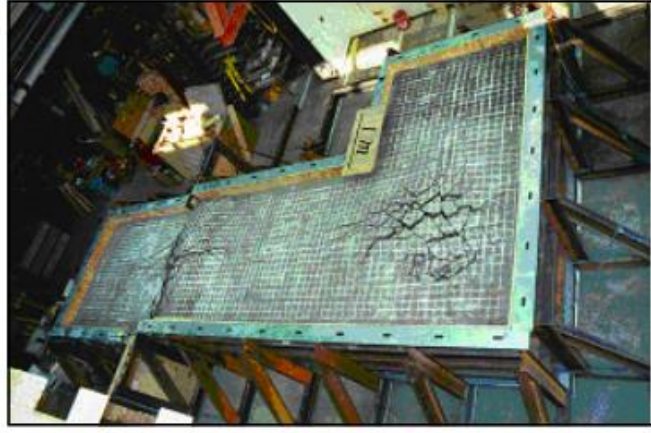
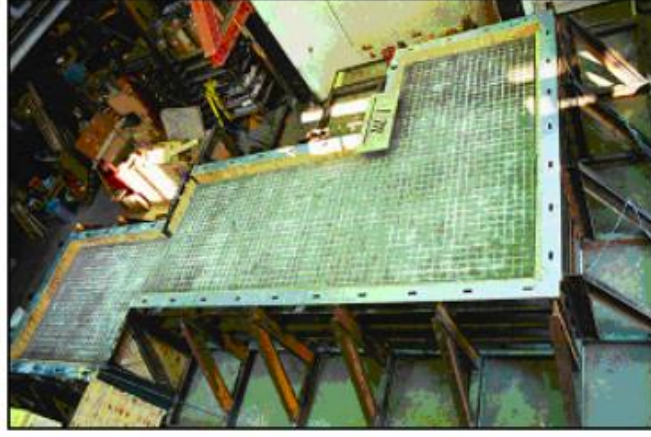
2.5.3.1. Yoshizaki ve diğerleri modeli

Bu deney Yoshizaki ve diğerleri tarafından 2001 yılında yapılmıştır. Bu deneyin elementleri aşağıdaki şekildedir.

- Boru, dirsek tipi boru seçilmiştir.
- Borunun et kalınlığı 4,1 mm
- Borunun Dış çapı 100 mm
- Gömme derinliği 0,9 m olacak şekilde tasarlanmıştır.
- Bu veriler dört adet birbirinden bağımsız toprak tipi ve su içeriği koşullarında test edilmiştir.

Ayrıca önerilen model sayısal olarak, kiriş ve kabuk elemanlar kullanılarak ve yine toprak boru etkileşimi deneysel verilerden elde edilen kuvvet deformasyon eğrileri yardımıyla yay elemanlar kullanılarak modellenmiştir.

Deney sonucu ile sayısal modelin sonuçları yakın olarak elde edilmiş ve dolgu toprakta bulunan su varlığının gömülü çelik boruların performansına oldukça fazla etki ettiği görülmüştür. Deneye ait görüntü Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



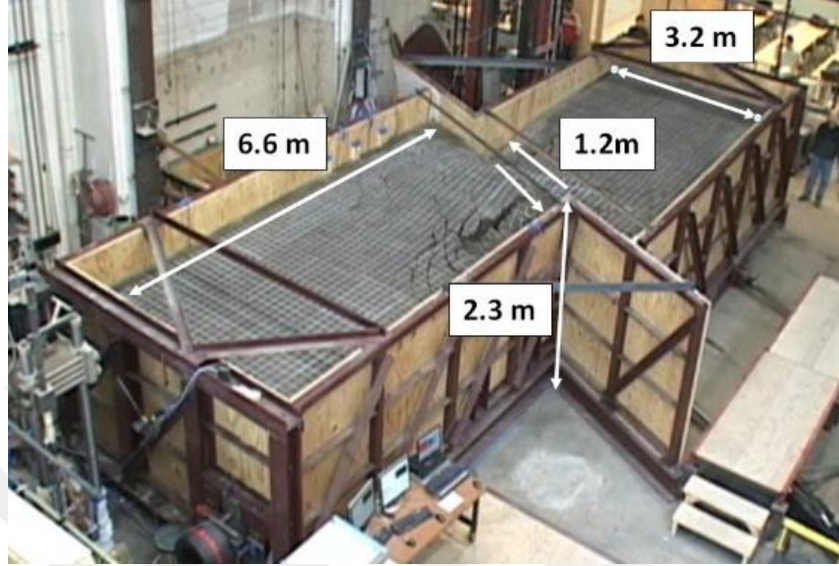
Şekil 2.10 Yoshizaki ve diğerlerinin deneysel modelinin üstten görünümü (Koji Yoshizaki, 2001)

2.5.3.2. O'Rourke ve diğerleri modeli

O'Rourke ve diğerleri 2008 yılında Cornell Üniversitesi'nde bir başka deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu deneyin elementleri aşağıdaki şekildedir.

- Boru malzemesi polietilen malzemeden üretilen termoplastik
- Boru çapları 250 ve 400 mm
- Borunun çapı 150 mm
- Borunun et kalınlığı 24 mm
- Borunun duvar kalınlığı 3 mm
- Fay kesişim açısı 65 derece olacak şekilde tasarlanmıştır.
- Boru 10,7 m uzunlukta ve 3,3 m olacak şekilde bölümlere ayrılmıştır.
- Bloklara kademe kademe 1,2 m'ye kadar faylanmadan kaynaklanan yer değiştirme yükü etkiltilmiştir. Bu yük sebebiyle boru gerilmeler meydana gelmiştir.

Deney sonucunda elde edilen veriler, santrifüj testleriyle karşılaştırılmış ve bunlar arasında tutarlı bir uyum bulunduğu gözlemlenmiştir. Deneye ait görüntü Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 Cornell Üniversitesi NEES Ekipman Sahasındaki büyük ölçekli bölünmüş kutu test havuzu (T.D. O’Rourke, 2009)

2.5.3.3. Ha ve diğerleri modeli

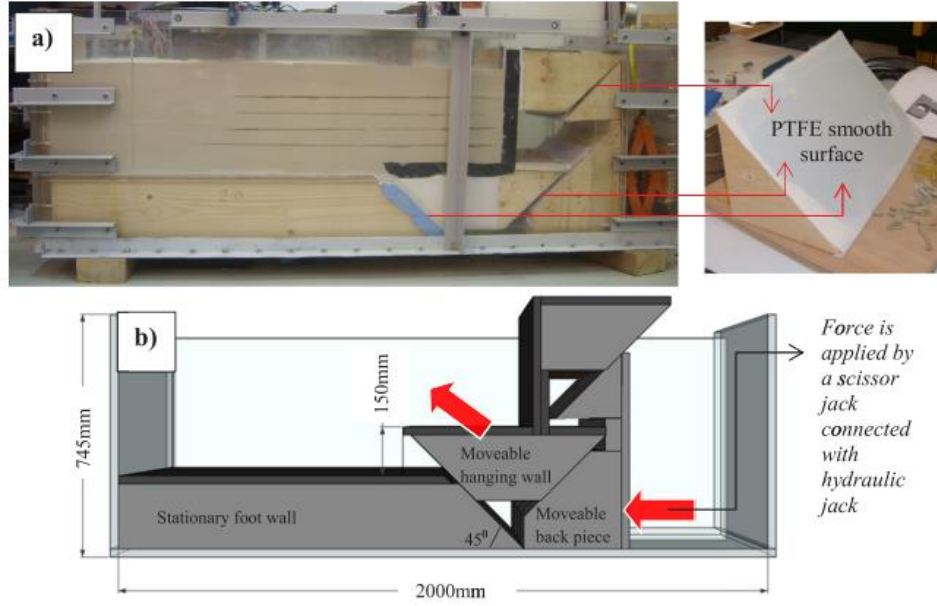
Ha ve diğerleri 2008 yılında birçok deney ortaya konmuştur. Bu deneyin içeriğinde iki farklı düzenek kurulmuştur. Bu deneyde yüksek yoğunluklu polietilen borular tercih edilip bu borunun normal ve yanal atımlı faylanmalar altındaki etkilerini incelemek amaçlanmıştır.

Her iki deney için de boruyu çevreleyen dolgu toprak bölme çizgisi yardımıyla iki blok olacak şekilde ayrılmış ve bloklardan biri sabit tutulup diğer bloğun hareket ettirilmesiyle simüle gerçekleştirilmiştir. Ayrıca stres ve deformasyon değişikliklerini ölçmek için duyarlı basınç algılayıcıları ve gerilme ölçerler kullanılmıştır.

Deneylerden ilkinde hem normal faylanma hem de 5 derecelik kesişme açısıyla yanal atımlı bir faylanma altında borunun performansı incelenmiştir. İkincisinde ise bu kez sadece doğrultu atımlı faylanma altında farklı kesişme açıları denemeleri yapılarak incelenmiştir. Deneylerin sonunda elde edilen bulgular, enine basınçlar ve bükülme gerilmeleri açısından değerlendirilmiştir. Zemin boru etkileşimlerini ifade eden grafikler hazırlanmıştır. Hazırlanan grafikler, 1984 ASCE boru hattı yönergeleriyle karşılaştırılmıştır.

2.5.3.4. Hasan Emre Demirci ve diğerkleri deneysel modeli

Bölüm 2.5.2.7’de detaylandırılan Hasan Emre Demirci ve diğerkleri tarafından oluşturulan sayısal modelin, boru hatlarının ters fay hareketi durumunda davranışını inceleyen deneysel versiyonu da gerçekleştirilmiştir. Deneysel modelde ek olarak ters faylanmada gömülü çelik boruların üzerinde gömme derinliğinin etkilerini incelemektir. Deneye ait görseller şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Hasan Emre Demirci ve diğerkleri tarafından önerilen deney (Hasan Emre Demirci, 2018)

3. YÖNTEM

3.1. Faylanma Sırasında Gömülü Sürekli Borularda Meydana Gelen Kuvvetler

Boru hatlarının faylanma sırasında maruz kaldığı kuvvetler, boru hatlarının güvenliği ve dayanıklılığı açısından büyük önem taşımaktadır. Faylanma sırasında boru sağdan soldan çekilmekte ve toprak hareketlerine maruz kalarak eğilmektedir. Eğildikten sonra borunun etrafında zemin ve boru arasında eksenel sürtünme kuvvetleri oluşmakta ve eksenel sürtünme kuvvetleri burada eksenel yüklerini meydana getirmektedir. Bu esnada boru hattı 2 kısımda incelenmektedir.

Bölgelerden birisi yüksek eğilme deformasyonlarının olduğu hem eksenel hem de eğilme kuvvetlerinin baskın olduğu bölgedir. Bölgelerden diğeri ise eğilme deformasyonlarının olmadığı sadece eksenel kuvvetlerin baskın olduğu yani borunun zeminden zemin hareketine bağlı olarak ayrılması kayması ya da sıkıştırılması durumlarının söz konusu olduğu bölgedir.

Bu bilgilerden hareketle yanal atımlı fayların ele alındığı durumda, yanal yönde toprak etkileri olmaktadır bu toprak etkilerinden dolayı boru eğilecek ve boru eğilirken uzama kısılma meydana geleceği için boru zeminden ayrılıyormuş, sayılıyormuş ya da zemini sıkıştırıyormuş gibi bir hareket yapacağından dolayı eksenel yönde de bir etkileşim olacaktır. Normal fayların ele alındığı durumda ise düşey yöne bir hareket meydana geleceği için eğilmenin yönü düşeyde bir eğilme profili gösterecektir. Yine aynı şekilde sıyrılmadan dolayı ya da zeminin ters hareketinden dolayı boru hatlarında eksenel yönde basınç ya da çekme kuvvetleri oluşacaktır.

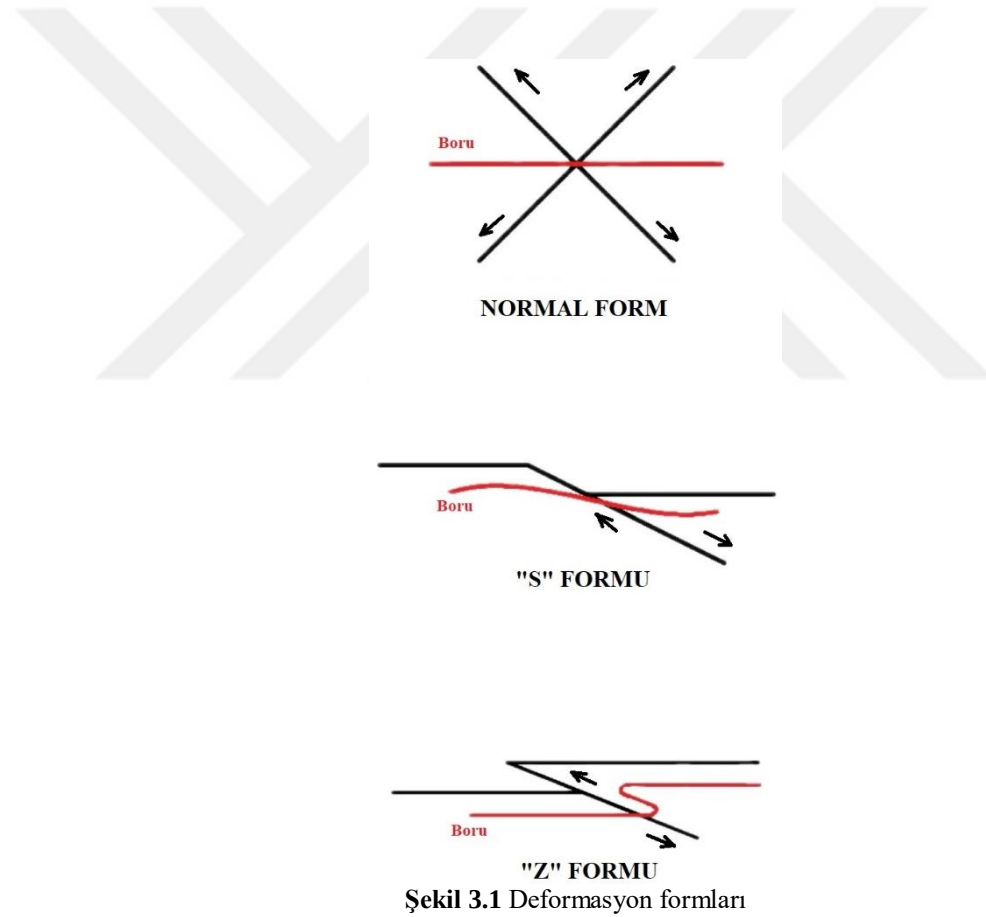
Sonuç olarak faylanma sırasında boru hatları, yanal ve düşey yönlerde hareketlere maruz kalarak eğilir ve deformasyona uğrar. Bu hareketler, borunun zeminle olan etkileşimini değiştirir ve eksenel sürtünme kuvvetlerinin oluşmasına neden olur. Bu durum boru hatlarının güvenliği açısından kritik bir rol oynar. Bu nedenle, boru hatlarının tasarımında ve inşasında bu tür etkiler dikkate alınmalı ve gerekli önlemler alınmalıdır.

3.2. Tasarım Felsefesi

Tasarım felsefesi başlıklar altında tanımlanmaktadır. Bunlar; kayma yönü, keşişim açısı, gömme derinliği, dolgu malzemesi, çelik kalitesi, çap/kalınlık oranı, kaplama (sürtünme), iç basınç başlıklarıdır.

Bu bölümde bahsedilen başlıklardan beklenen sınır koşulları ve doğru performans değerleri açıklanmıştır.

Kesişim açısı, boru ile fay arasında kalan açıdır. Sağa ve sola yanal atılımlı olmak üzere mevcut olan 2 çeşit atılım faydan, sola yanal atılımlı fayda basınç kuvveti meydana gelmekte ve boru boyunda kısılma beklenmektedir, sağa yanal atılımlı fayda ise çekme kuvveti meydana gelmekte ve boru boyunda uzama beklenmektedir. Borular faylanmaya maruz kaldığında basınç durumunda Z, çekme durumunda S formuna benzemektedir. Bu formlardan çekme durumu gözlemlenmesi tercih edilirken basınç durumu gözlemlenmesi genelde tercih edilmemektedir. Borunun basılarak kopmasındansa uzayarak kopması tercih edilmektedir. Sağ yanal atılımlı fayda kesişim açısı sıfır ile 90 arasında iken sol yanal atılımlı fayda 90-180 arasındadır. Hem kesişim açısı hem de atılım yönüne dikkat ederek deformasyon sonrası borunun S ya da Z yönlü olup olmadığının kontrolü yapılmaktadır. Kesişim açısına göre deformasyon formları şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Borunun gömülme derinliği arttığında yay sabiti değeri artmaktadır. Çünkü borunun üzerindeki zeminden dolayı boruya uygulanan basınç artış gösterir. Bu değerler arttığında boru içerisinde daha fazla gerilmeler meydana gelmektedir.

Dolgu malzemesi için kriter zeminin yumuşak, yoğunluğu düşük bir zemin olmasıdır fakat yoğunluğu yüksek bir zemin ise zemin gerilmeleri arttırdığından tercih edilmemektedir.

Çelik kalitesi için yüksek kalite olması gerekmektedir.

Çap kalınlık oranında kriter bu oranın küçük tutulmasıdır. Bu oran ne kadar büyük olursa boru narin ve burkulmaya açık hale gelmektedir.

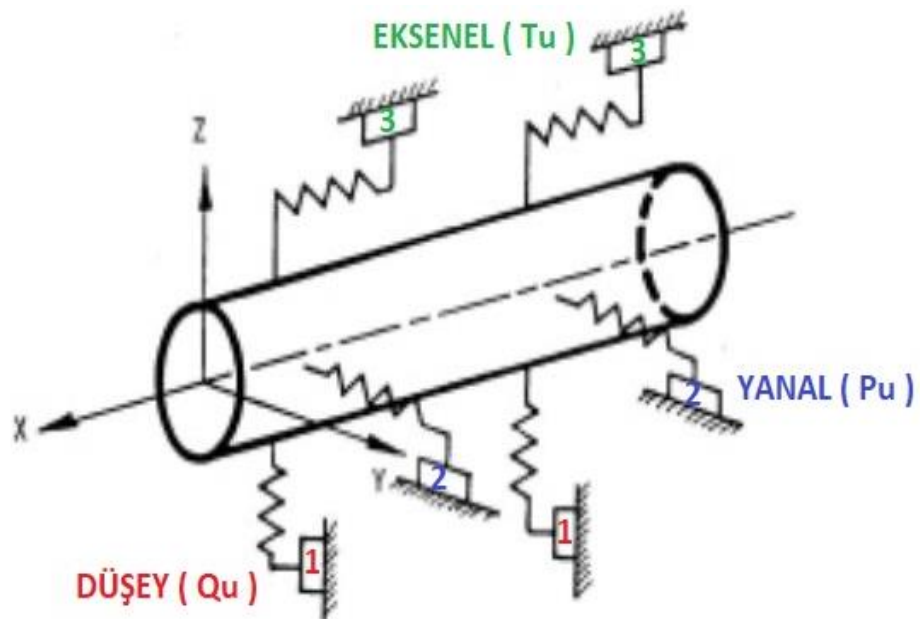
Kaplama, borunun etrafındaki koruma kalkanıdır. Kaplama için kriter sürtünmenin düşük tutulmasıdır. Bu kaplama çok kaba olduğunda boru üzerindeki sürtünmeyi arttırmaktadır. Sürtünme değeri arttığında yay sabiti değeri artmaktadır. Yay sabiti değeri arttığında ise gerilme değerleri de artmaktadır.

İç basınç olduğunda boru daha rijit gibi davranmaktadır. İç basıncın olması olumlu bir etkidir.

Sonuç olarak gömülme derinliğinin düşük olması, dolgu malzemesinin gevşek, çelik kalitesinin yüksek, çap kalınlık oranının küçük, sürtünmenin az ve iç basıncın yüksek olması genelde faydalıdır.

3.3. Zemin-Boru Etkileşimleri

Boru hattının üzerinde bulunan dolgu toprak (zemin), boruya yük uygulamakta ve bu yük yaylar ile temsil edilmektedir. Genel anlamda yay kuvvetlerinin hesaplamaları için dolgu toprağın zemin özellikleri kullanılmaktadır. Bu bölümde, bahsedilen zemin boru etkileşimleri yay kuvvetlerinin denklemleri (ALA Guideline, 2001) gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Toprak yayları

3.3.1. Eksenel toprak yayı

Birim uzunlukta boruya iletilebilecek maksimum eksenel toprak kuvvetidir. Denklemi aşağıda gösterildiği şekildedir.

$$Tu = \pi D \alpha c + \pi D H \gamma \left(\frac{-1 + K_0}{2} \right) \tan \delta \quad (3.1)$$

- D = Boru dış çapı
- α = Yapışma faktörü

$$\alpha = 0,608 - 0,123c - \frac{0,274}{c^2 + 1} + \frac{0,695}{c^3 + 1} \quad (3.2)$$

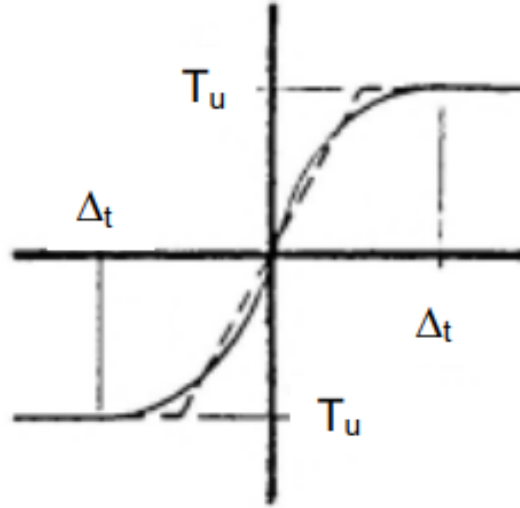
- c = Kohezyon
- H = Borunun merkezine kadar olan derinlik
- γ = Toprağın etkin birim ağırlığı
- K_0 = Basınç katsayısı
- δ = Sürtünme açısı

$$\delta = f \phi \quad (3.3)$$

- ϕ = İç sürtünme açısı
- f = Kaplamaya bağlı faktör

Tablo 3.1 Çeşitli dış kaplamalar için sürtünme faktörü

Boru Kaplaması	f
Beton	1.0
Kömür Katranı	0.9
Kaba Çelik	0.8
Pürüzsüz Çelik	0.7
Füzyona Bağlı Epoksi	0.6
Polietilen	0.6



Şekil 3.3 Eksenel toprak yayları grafiği

3.3.2. Yanal toprak yayı

Birim uzunlukta boruya iletebilecek maksimum yanal toprak kuvvetidir. Denklemi aşağıda gösterildiği şekildedir.

$$Pu = N_{ch}cD + N_{qh}\gamma HD \quad (3.4)$$

- N_{ch} = Kil için yatay taşıma kapasitesi faktörü ($c = 0$)

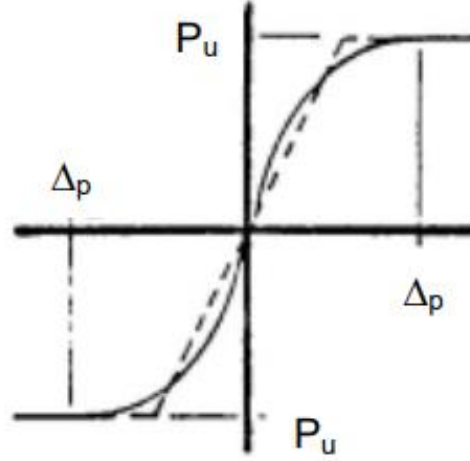
$$N_{ch} = a + bx + \frac{c}{(x+1)^2} + \frac{d}{(x+1)^3} \quad (3.5)$$

- N_{qh} = Kum için yatay taşıma kapasitesi faktörü ($\phi=0$)

$$N_{qh} = a + b(x) + c(x^2) + d(x^3) + e(x^4) \quad (3.6)$$

Tablo 3.2 Faktörlerin denklem içerik değerleri

Faktör	ϕ	x	a	b	c	d	e
N_{ch}	0°	H/D	6,752	0,065	-11,063	7,119	
N_{qh}	20°	H/D	2,399	0,439	-0,03	0,001059	-0,00001754
N_{qh}	25°	H/D	3,332	0,839	-0,09	0,005606	-0,0001319
N_{qh}	30°	H/D	4,565	1,234	-0,089	0,004275	-0,00009159
N_{qh}	35°	H/D	6,816	2,019	-0,146	0,007651	-0,0001683
N_{qh}	40°	H/D	10,959	1,783	0,045	-0,005425	-0,0001153
N_{qh}	45°	H/D	17,658	3,309	0,048	-0,006443	-0,0001299



Şekil 3.4 Yanal toprak yayları grafiği

3.3.3. Düşey toprak yayı

Birim uzunlukta boruya iletilebilecek maksimum yanal toprak kuvvetidir. Denklemi aşağıda gösterildiği şekildedir.

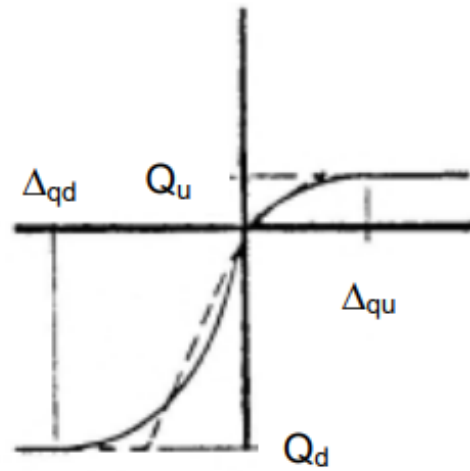
$$Q_u = N_{cv}cD + N_{qv}\gamma HD \quad (3.7)$$

- N_{cv} = Kil için düşey yükselme faktörü ($c = 0$)

$$N_{cv} = 2 \left(\frac{H}{D} \right) \quad (3.8)$$

- N_{qv} = Kum için düşey yükselme faktörü ($\phi=0$)

$$N_{qv} = \left(\frac{\phi H}{44D} \right) \quad (3.9)$$



Şekil 3.5 Düşey toprak yayları grafiği

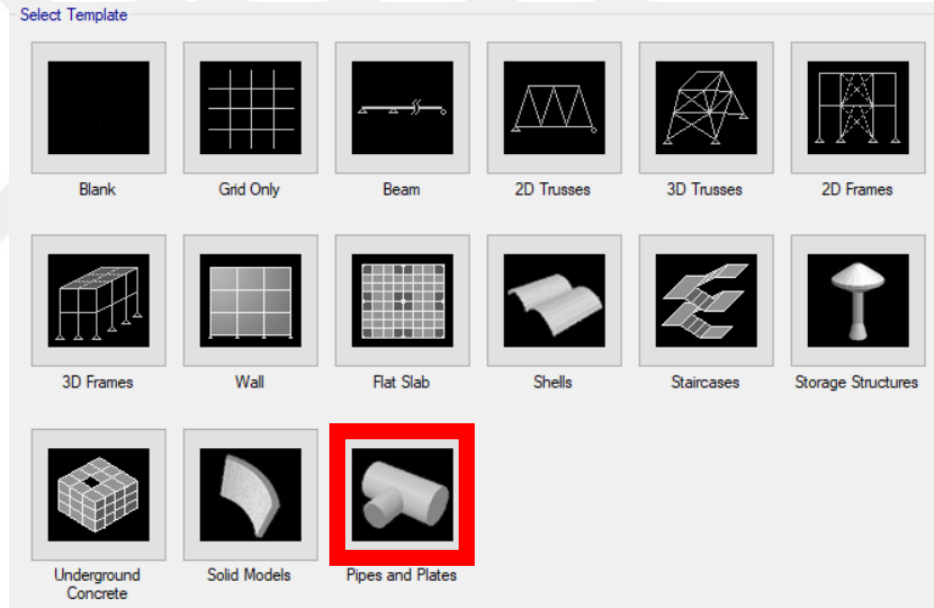
4. MODELLER

Bu bölümde linear ve nonlinear olmak üzere SAP2000 programında tasarlanan iki modelin tanımlanması ve analizi hakkında bilgi verilmiş ve bulguları paylaşılmıştır.

4.1. Linear (Doğrusal) Modelin Tanımlanması

SAP2000 programında gömülü sürekli boru hattı modellenerek belli yükler altında linear olarak çözümlenmiş ve borunun deformasyonu incelenmiştir. Bu bölümde SAP2000 programında modellenen gömülü sürekli boruya ait genel bilgiler, mesnet özellikleri, malzeme özellikleri, zemin-toprak etkileşimindeki yay değerleri, yer değiştirme yükleri ve analiz sonuçlarına ait bilgiler verilmiştir.

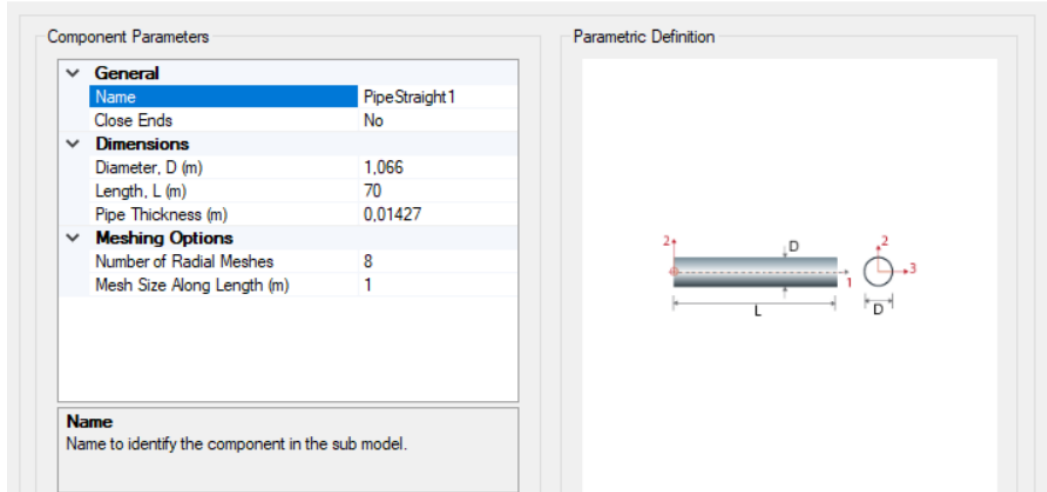
Modele ait genel özelliklerden ilki programda şablonlardan Pipes and Plates seçimi yapılarak genel bilgiler girilmiştir.



Şekil 4.1 SAP2000’de linear model için seçilen şablon

Seçimden sonra aşağıdaki maddelerde sıralanan boru özellikleri gerekli yerlere girilmiştir.

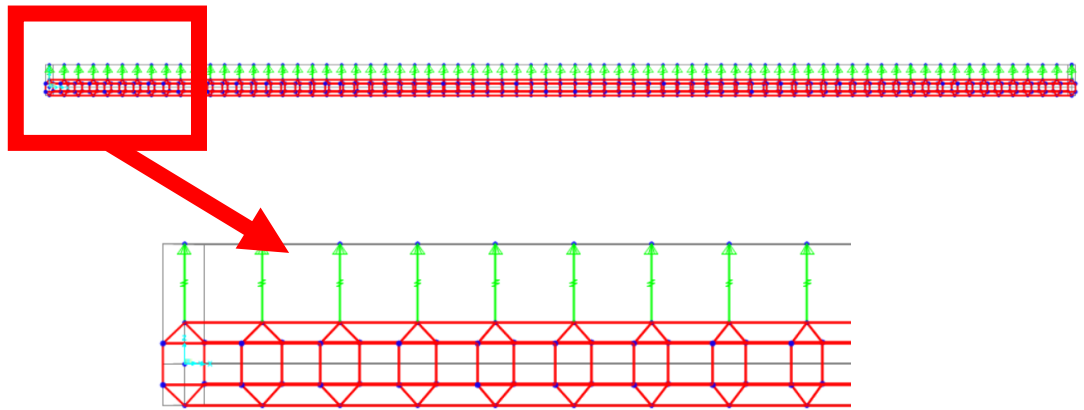
- Borunun toplam uzunluğu 70 m
- Borunun çapı 1066 mm
- Borunun kalınlığı 14,27 mm
- Boruda uzunluk boyunca mesh boyları 1 m olarak kabul edilerek programa girilmiştir. Yapılan girdilere ait görüntü Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 SAP2000’de lineer model için girilen boru özellikleri

Genel özellikleri girilen modelin bir sonraki aşamada zemin-boru etkileşimini temsil etmek adına borunun xz global eksenindeki görünüşü üzerinde, her 1 metrede konumlandırılan mesh noktalarından z ekseninde (düşey olarak) birer metre link elemanlar atanmıştır.

Atanan link elemanların, boruyla temas etmeyen yani dolgu malzemesi olan toprağı temsil ettiği üst noktalarına sabit mesnetler atanmıştır.



Şekil 4.3 SAP2000’de lineer modelin için atanan link elemanları ve mesnetleri

Zemin-boru etkileşimi için atanan yayları temsil eden link elemanların değerleri programda gerekli sekmeye aşağıda yer alan Şekil 4.4’te gösterildiği gibi girilerek tanımlamaları yapılmıştır. Bu değerler, zemine ait parametreler kullanılarak 3. Yöntem başlığında yer alan 3.1, 3.4 ve 3.7 formülleri yardımıyla bulunmuştur. Yine zemine ait parametreler aşağıdaki Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Lineer model için zemin parametreleri

Parametre	Değer
Dolgu tipi	Yoğun kum
Zemin sürtünmesinin iç açısı (ϕ)	34°
Toprak basıncı katsayısı (K_0)	0,5
Kohezyon (c)	0 kN/m ²
Toprağın aktif birim ağırlığı (γ)	17,6 kN/m ³

Şekil 4.4 SAP2000’de lineer modelin için atanan link elemanların değeri

Tablo 4.1’deki zemin parametreleri gerekli formüllerde yerlerine yerleştirilip değerler elde edildiğinde Şekil 4.4’te gösterilen U1 bölümüne, (P_u) yanal toprak yayı değeri girilirken U2 bölümüne, (T_u) eksenel toprak yayı değeri girilmiştir.

Devamında boru X60 çeliği seçildiği için uygun menüye bu çeliğe ait parametreler girilerek çelik sınıfı tanımlanmıştır. Programa tanımlanan X60 çeliğine ait parametreler Şekil 4.5’te gösterilmiştir.

S Material Property Data

Material Name: X60

Material Type: Steel

Symmetry Type: Isotropic

Modulus of Elasticity: E = 2,100E+08

Poisson: U = 0,3

Coeff of Thermal Expansion: A = 1,170E-05

Shear Modulus: G = 80769231,

Weight and Mass: Weight per Unit Volume = 76,9729, Mass per Unit Volume = 7,849

Units: KN, m, C

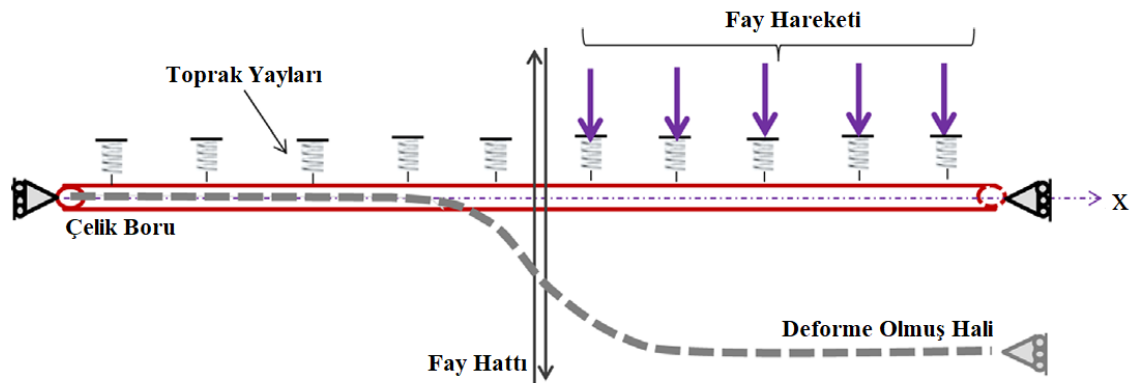
Other Properties For Steel Materials: Minimum Yield Stress, Fy = 415000, Minimum Tensile Stress, Fu = 520000, Expected Yield Stress, Fye = 415000, Expected Tensile Stress, Fue = 520000

Advanced Material Property Data: Nonlinear Material Data..., Material Damping Properties..., Time Dependent Properties...

OK Cancel

Şekil 4.5 SAP2000’de lineer modelin için X60 çeliğine ait girilen parametreler

Son aşamada tüm tanımlamaları yapılan modelin gerekli sekmede borunun sağ tarafından itibaren Şekil 4.6’da gösterildiği şekilde deforme olması beklendiği için bu sağ tarafta yer alan noktalara global eksen z yönünde -3m yönünde yer değiştirme değeri girilmiştir. Girilen değere ait görüntü Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Fay hareketi altında boru davranışını temsil eden basit modelin bir plan görünümü (E. Uckan, 2015)

S Assign Joint Ground Displacements ×

General

Load Pattern: Yük1

Coordinate System: GLOBAL

Ground Displacements

Translation Global X: 0 m

Translation Global Y: 0 m

Translation Global Z: -3 m

Rotation about Global X: 0 rad

Rotation about Global Y: 0 rad

Rotation about Global Z: 0 rad

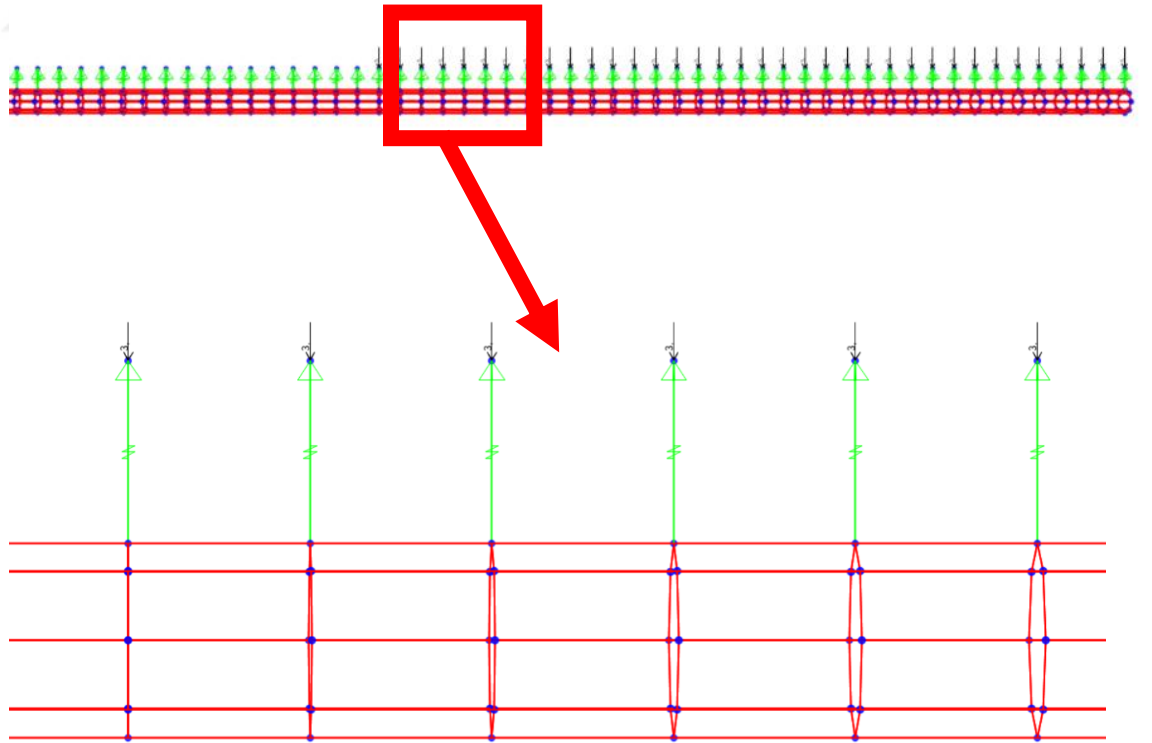
Options

☒ Add to Existing Loads

☐ Replace Existing Loads

☐ Delete Existing Loads

Şekil 4.7 SAP2000’de lineer modelin için girilen yer değiştirme değeri



Şekil 4.8 SAP2000’de lineer modelin için girilen yer değiştirme değerinin görünümü

4.2. Nonlinear (Doğrusal Olmayan) Modelin Tanımlanması

Bu kez SAP2000 programında gömülü sürekli boru hattı modellenerek belli yükler altında nonlinear olarak çözümlenmiş ve borunun deformasyonu incelenmiştir.

Tanımlama kısmında 4.1’de tanımlanan adımların belli bir kısma kadar benzeri gerçekleştirilmiştir. Yine; modele ait genel özelliklerden ilki programda şablonlardan Pipes and Plates seçimi yapılarak genel bilgiler girilmiş, seçimden sonra aynı yapıdaki boru özellikleri gerekli yerlere girilmiş, genel özellikleri girilen modelin bir sonraki aşamada zemin-boru etkileşimini temsil etmek adına borunun xz global eksenindeki görünüşü üzerinde, her 1 metrede konumlandırılan mesh noktalarından z ekseninde (düşey olarak) birer metre link elemanlar atanmış, atanan link elemanların, boruyla temas etmeyen yani dolgu malzemesi olan toprağı temsil ettiği üst noktalarına sabit mesnetler atanmıştır.

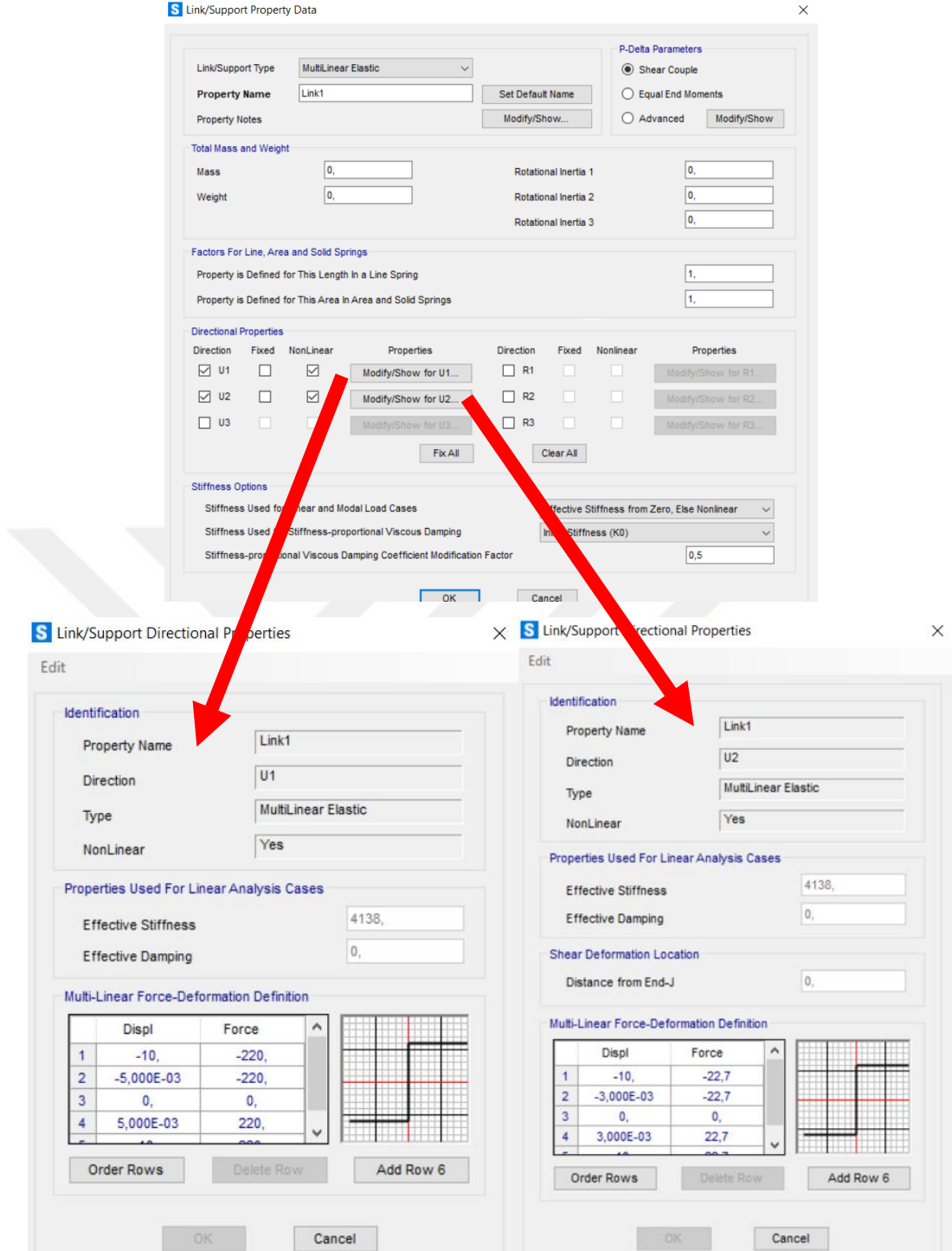
Zemin-boru etkileşimi için atanan yayları temsil eden link elemanların değerleri bu kez nonlinear forma göre yanal ve eksenel toprak yay değerleri ile kuvvet-deformasyon eğrileri oluşturularak Şekil 4.9’da gösterildiği gibi tanımlama yapılmıştır. Tanımlamada kullanılan yay özellikleri Tablo 4.2 ve 4.3’te gösterilmiştir.

Tablo 4.2 Yanal yaylar için hesaplanan özellikler

Özellik	Değer
Nch	0
c	0 kN/m ²
D	1066 mm
ϕ	34°
Nqh	8,642
γ'	17,6 kN/m ³
H	0,9 m
Pu	220 kNm
Pu için deplasman	0,003 mm

Tablo 4.3 Eksenel yaylar için hesaplanan özellikler

Özellik	Değer
D	1066 mm
α	1,029 kN/m ²
c	0 kN/m ²
H	0,9 m
γ'	17,6 kN/m ³
K_0	0,5
f	Pürüzsüz Çelik
ϕ	34°
δ	23,8°
Zemin Tipi	Yoğun Kum
Tu	22,7 kNm

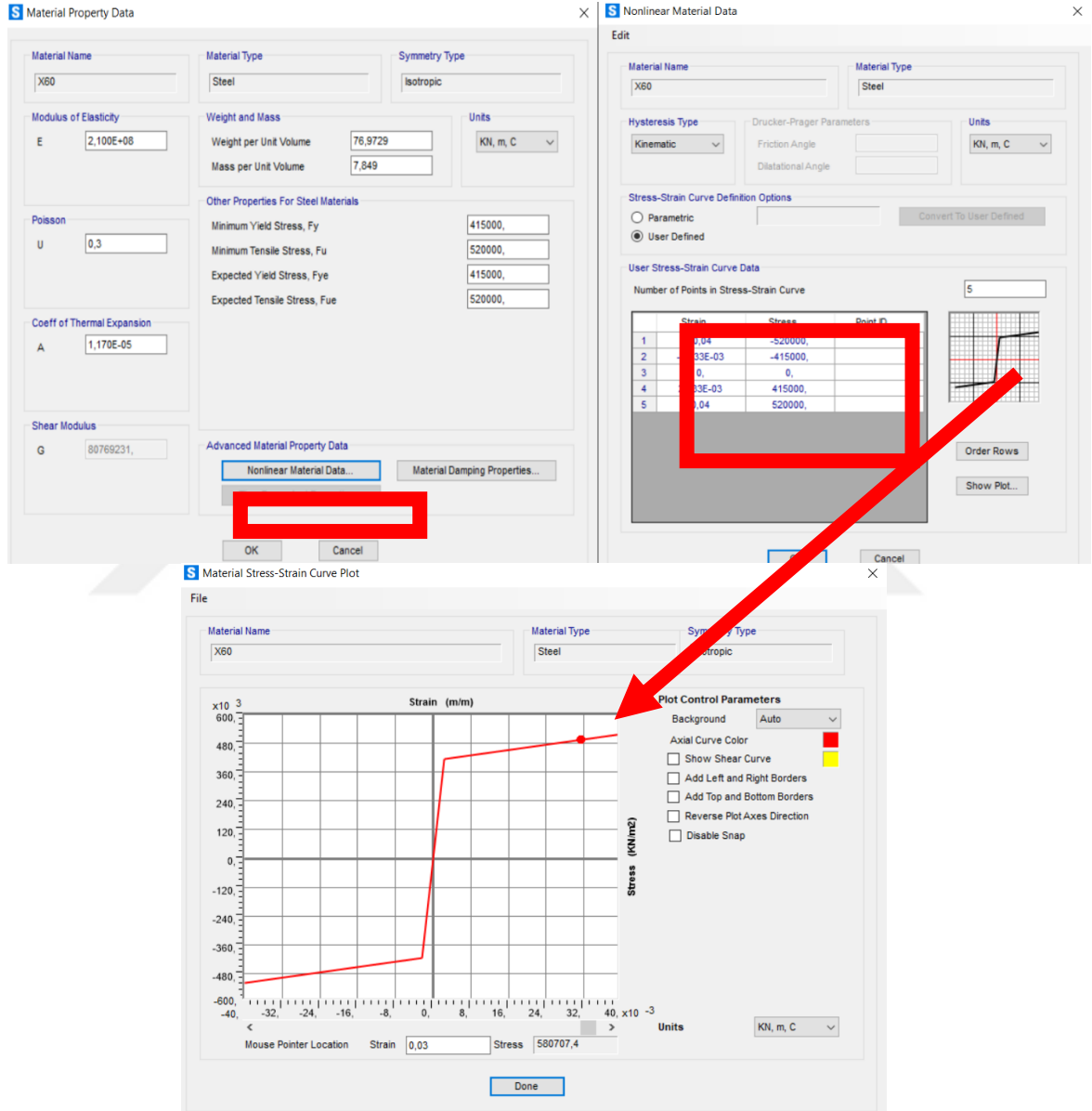


Şekil 4.9 SAP2000’de nonlinear model yayları için kuvvet-deformasyon eğrilerinin tanımlanması

Sonraki adımda, yine boru X60 çeliği seçildiği için uygun menüye bu çeliğe ait parametreler nonlinear form seçilip girilerek çelik sınıfı tanımlanmıştır. Bu nonlinear tanımlama yapılırken Tablo 4.4’te verilen API sınıfı X60 çeliğinin malzeme özellikleri yardımıyla gerilme-gerinim eğrileri oluşturularak Şekil 4.10’da gösterildiği gibi girilmiştir.

Tablo 4.4 API sınıfı X60 çeliğinin malzeme özellikleri

Malzeme Özelliği	Değer
Yield Stress (Akma Gerilmesi)	415 MPa
Failure Stress (Kopma Gerilmesi)	520 MPa
Yield Strain (Akma Gerinimi)	0,233 %
Failure Strain (Kopma Gerinimi)	4 %
Elastic Young's Modulus (Elastisite Modülü)	210 GPa
Plastic Young's Modulus (Plastisite Modülü)	1,088 GPa



Şekil 4.10 SAP2000’de nonlineer model için X60 çeliğine ait girilen gerilme-gerinim değerleri

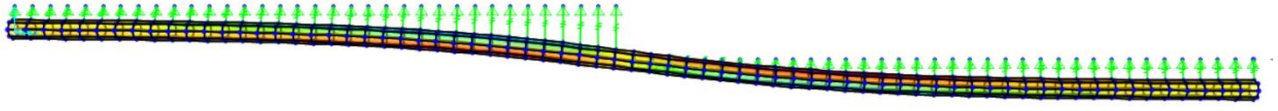
Son adımda yine tüm tanımlamaları yapılan modelin gerekli sekmede borunun sağ tarafından itibaren sağ tarafta yer alan noktalara global ekseninde z yönünde -3m yönünde yer değiştirme değeri girilmiştir.

5. ANALİZ SONUÇLARI

Bu bölümde analize sokulan lineer (doğrusal) ve nonlinear (doğrusal olmayan) modellerin analiz sonuçları gösterilmiş ve yorumlanmıştır.

5.1. Lineer (Doğrusal) Model Analizinin Yapılması

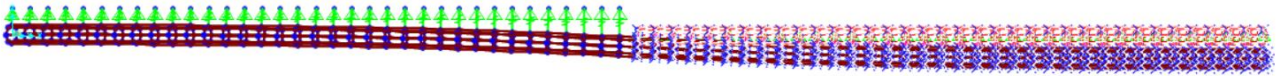
Analiz sonucunda gömülü sürekli çelik borunun analiz sonrası deformasyon görünümü Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 SAP2000’de lineer gömülü boru modelinin analiz sonucu deformasyon olmuş hali

5.1.1. Borunun orta noktasından sağ uç noktasına kadarki bölgenin baz alınması

Bu alt başlıkta analiz sonuçları, tablolar ve grafikler oluşturulup yorumlanırken tasarlanan gömülü sürekli borunun deforme olan bölgesi Şekil 5.2’de gösterildiği gibi tam ortadan en sağdaki ucuna kadar olan bölge baz alınmıştır.

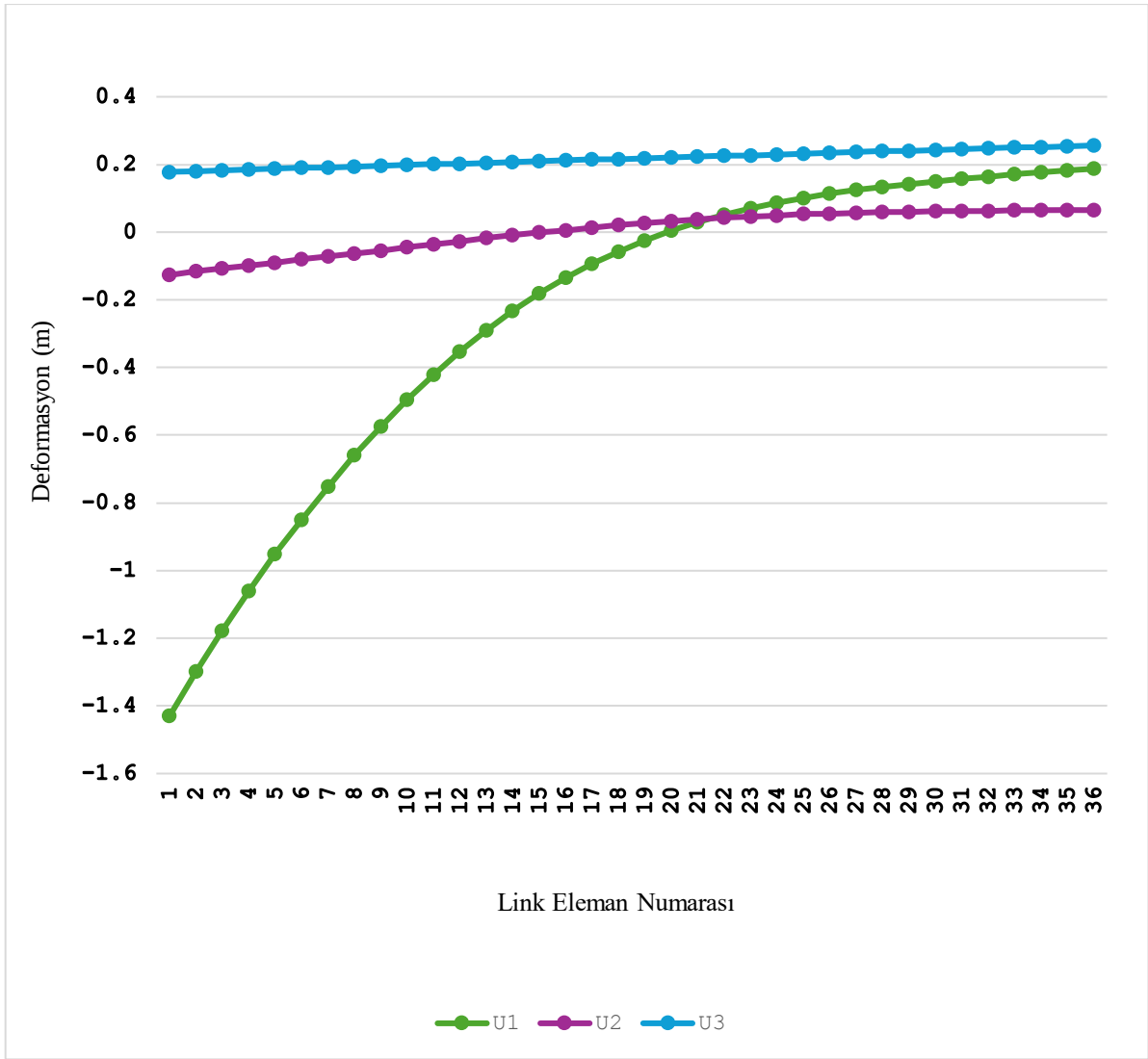


Şekil 5.2 SAP2000’de lineer gömülü boru modelinin analiz sonuçlarında baz alınan bölgesi

Deformasyonun görüldüğü bölgedeki yani borunun ortasından en sağdaki ucuna kadar olan bölgede bulunan yay görevi görmesi için tanımlanan link elemanların deformasyonları Tablo 5.1’de ve deformasyon görülen bölgedeki link elemanların deformasyon değerlerinin çizgi grafiği Şekil 5.3’te verilmiştir.

Tablo 5.1 Deformasyon görülen bölgedeki link elemanların deformasyon değerleri

Link Eleman No	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)
1	-1,429898	-0,12698	0,17834
2	-1,299269	-0,116204	0,180567
3	-1,177066	-0,106479	0,182794
4	-1,061702	-0,098143	0,185021
5	-0,952427	-0,089458	0,187247
6	-0,849096	-0,080884	0,189474
7	-0,751625	-0,072042	0,191701
8	-0,65996	-0,063253	0,193928
9	-0,574107	-0,054234	0,196154
10	-0,494108	-0,045214	0,198381
11	-0,419998	-0,036104	0,200608
12	-0,351762	-0,027128	0,202835
13	-0,289321	-0,018293	0,205061
14	-0,23253	-0,009775	0,207288
15	-0,18118	-0,00159	0,209515
16	-0,135015	0,006142	0,211742
17	-0,09374	0,013422	0,213969
18	-0,057032	0,020174	0,216195
19	-0,024554	0,02642	0,218422
20	0,004043	0,032104	0,220649
21	0,029113	0,037276	0,222876
22	0,051005	0,04188	0,225102
23	0,070066	0,046001	0,227329
24	0,086632	0,049563	0,229556
25	0,101028	0,052703	0,231783
26	0,113564	0,055295	0,234009
27	0,124534	0,057565	0,236236
28	0,134208	0,059287	0,238463
29	0,142834	0,060842	0,24069
30	0,150632	0,061827	0,242916
31	0,157788	0,062877	0,245143
32	0,164457	0,063264	0,24737
33	0,170762	0,064062	0,249597
34	0,176745	0,064071	0,251823
35	0,182309	0,065269	0,25405
36	0,187389	0,064854	0,256277



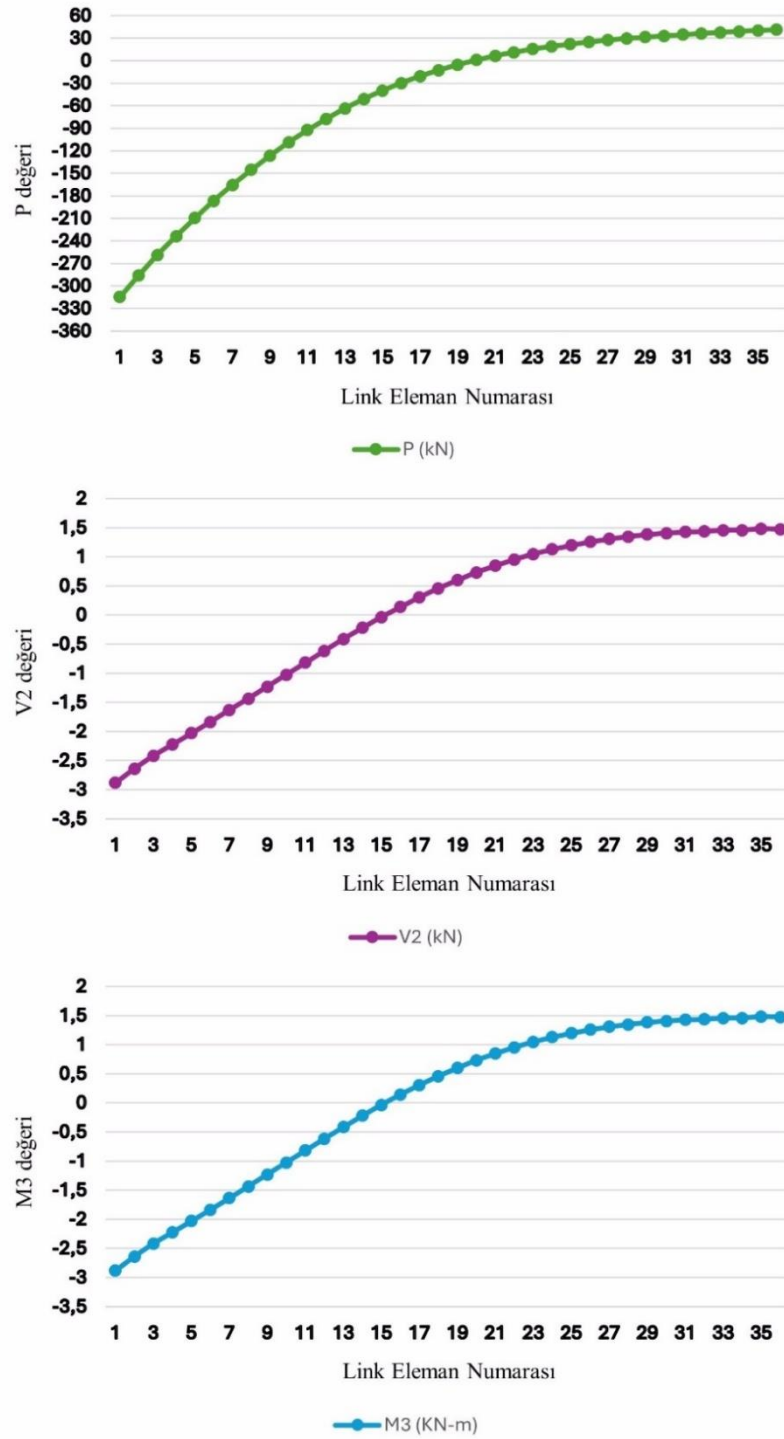
Şekil 5.3 Deformasyon görülen bölgedeki link elemanların deformasyon değerleri çizgi grafiği

Bu değerler incelendiğinde tüm link elemanların deformasyon değerlerinin giderek artış gösterdiği bununla birlikte U1 yani yanal toprak yayını temsil eden link elemanın diğer link elemanlara göre negatif olarak daha büyük değerler aldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte U1 ve U2 link elemanların gösterdiği maksimum deformasyon değerleri kısmen yakın olarak gözlemlenmiştir.

Deformasyonun görüldüğü bölgedeki yani borunun ortasından en sağdaki ucuna kadar olan bölgede bulunan yay görevi görmesi için tanımlanan link elemanların kuvvetleri Tablo 5.2’de ve deformasyon görülen bölgedeki link elemanların kuvvet değerleri çizgi grafiği Şekil 5.4’te verilmiştir.

Tablo 5.2 Deformasyon görülen bölgedeki link elemanların kuvvet değerleri

Link Eleman No	P (kN)	V2 (kN)	M3 (kNm)
1	-314,578	-2,882	-2,8824
2	-285,839	-2,638	-2,6378
3	-258,955	-2,417	-2,4171
4	-233,575	-2,228	-2,2278
5	-209,534	-2,031	-2,0307
6	-186,801	-1,836	-1,8361
7	-165,358	-1,635	-1,6353
8	-145,191	-1,436	-1,4358
9	-126,304	-1,231	-1,2311
10	-108,704	-1,026	-1,0263
11	-92,4	-0,82	-0,8196
12	-77,388	-0,616	-0,6158
13	-63,651	-0,415	-0,4153
14	-51,157	-0,222	-0,2219
15	-39,86	-0,036	-0,0361
16	-29,703	0,139	0,1394
17	-20,623	0,305	0,3047
18	-12,547	0,458	0,458
19	-5,402	0,6	0,5997
20	0,89	0,729	0,7288
21	6,405	0,846	0,8462
22	11,221	0,951	0,9507
23	15,415	1,044	1,0442
24	19,059	1,125	1,1251
25	22,226	1,196	1,1964
26	24,984	1,255	1,2552
27	27,397	1,307	1,3067
28	29,526	1,346	1,3458
29	31,424	1,381	1,3811
30	33,139	1,403	1,4035
31	34,713	1,427	1,4273
32	36,181	1,436	1,4361
33	37,568	1,454	1,4542
34	38,884	1,454	1,4544
35	40,108	1,482	1,4816
36	41,226	1,472	1,4722



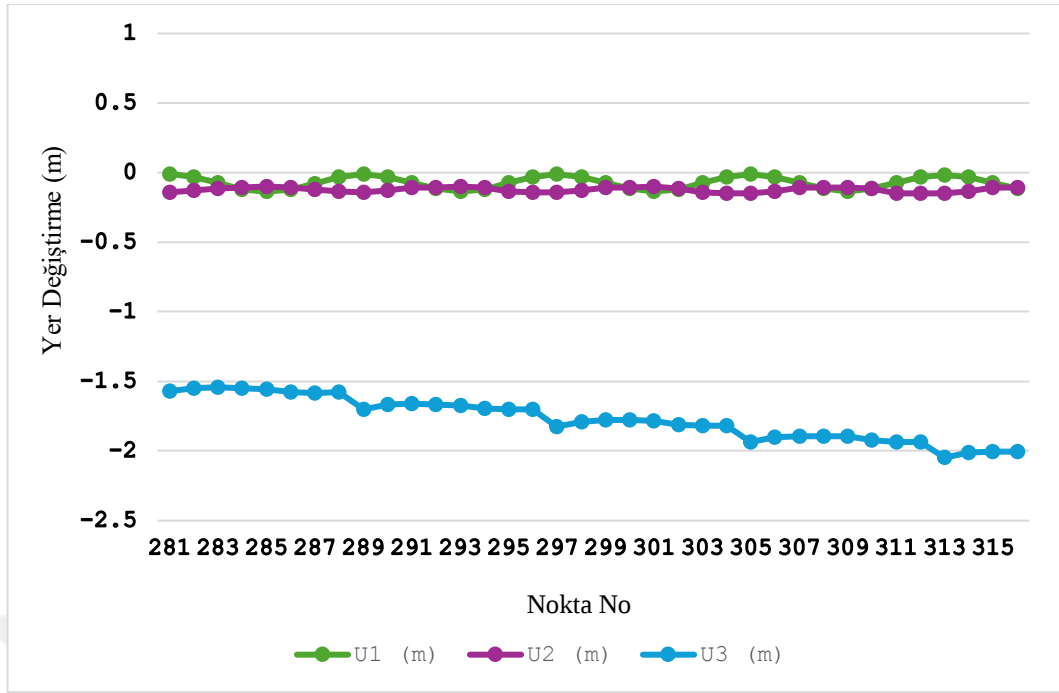
Şekil 5.4 Deformasyon görülen bölgedeki link elemanların kuvvet değerleri grafiği

Bu değerler incelendiğinde P kuvveti değerinin negatif değerden pozitif bir artış göstererek 27. link ve sonrasındaki linklerde sabite yakın değerler aldığı, $V2$ ve $M3$ yani kesme ve moment değerlerinin yine negatif değerlerden pozitif bir artış ile neredeyse tüm linklerden yakın değerler alıp 27. link ve sonrasındaki linklerde sabite yakın değerler aldığı gözlemlenmiştir.

Deformasyonun görüldüğü bölgedeki yani borunun orta noktasından en sağdaki ucuna kadar bulunan tüm noktadaki U1, U2 ve U3 yönlerine göre yer değiştirme değerleri Tablo 5.3'te ve deformasyon görülen bölgedeki noktaların yer değiştirme değerleri çizgi grafiği Şekil 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5.3 Deformasyon görülen bölgedeki noktaların yer değiştirme değerleri

Nokta No	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)
281	-0,007917	-0,139963	-1,570102
282	-0,028053	-0,130727	-1,547848
283	-0,073867	-0,115248	-1,541421
284	-0,117821	-0,104289	-1,545935
285	-0,136248	-0,099053	-1,558501
286	-0,119499	-0,105799	-1,574863
287	-0,07624	-0,123768	-1,582331
288	-0,029732	-0,137217	-1,576775
289	-0,009524	-0,14219	-1,700731
290	-0,02826	-0,128857	-1,668914
291	-0,073534	-0,109721	-1,66098
292	-0,117364	-0,105007	-1,662857
293	-0,135752	-0,101279	-1,671632
294	-0,119042	-0,109535	-1,691785
295	-0,075908	-0,133748	-1,70189
296	-0,029938	-0,143541	-1,697842
297	-0,011574	-0,144416	-1,822934
298	-0,029162	-0,129854	-1,788279
299	-0,073011	-0,106752	-1,778743
300	-0,116438	-0,105924	-1,778973
301	-0,134756	-0,103506	-1,784435
302	-0,118117	-0,113071	-1,807901
303	-0,075385	-0,141171	-1,819653
304	-0,030841	-0,146996	-1,817207
305	-0,013909	-0,146643	-1,938298
306	-0,030542	-0,132026	-1,903626
307	-0,07257	-0,106974	-1,893316
308	-0,115075	-0,107389	-1,893015
309	-0,133229	-0,105733	-1,89649
310	-0,116754	-0,116059	-1,921943
311	-0,074944	-0,145402	-1,934226
312	-0,032221	-0,149279	-1,932554
313	-0,016512	-0,14887	-2,047573
314	-0,032224	-0,134687	-2,014032
315	-0,072291	-0,109519	-2,003702
316	-0,113389	-0,109533	-2,00356



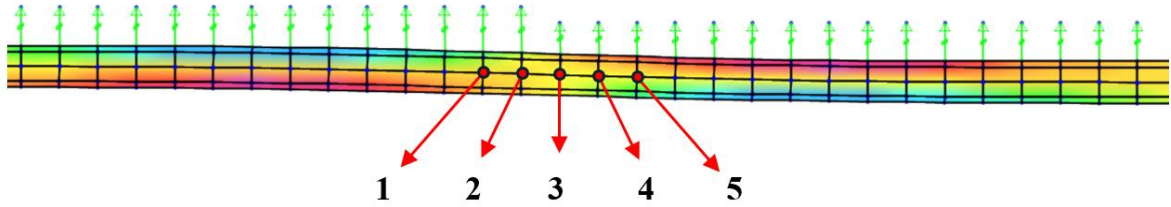
Şekil 5.5 Deformasyon görülen bölgedeki noktaların yer değiştirme değerleri grafiği

Tablo 5.3 ve Şekil 5.5 incelendiğinde, U1 yayının yer değiştirme değerleri genel olarak 0 m civarında sabitlenmiştir. Küçük yer değiştirme değerleri mevcut, ancak bu dalgalanmalar ± 0.1 m aralığında kalmaktadır. U1 yayı, grafik boyunca nötr bir yer değiştirme sergilemektedir, yani herhangi belirgin bir hareket veya kayma göstermemektedir. U2 yayının yer değiştirme değerleri de 0 m civarında sabitlenmiştir. U1'de olduğu gibi, U2'de de küçük yer değiştirme değerleri vardır, ancak bu dalgalanmalar da ± 0.1 m aralığındadır. U2 yayı, U1'e benzer şekilde, nötr bir yer değiştirme sergilemektedir ve belirgin bir hareket veya kayma göstermemektedir. U3 yayının yer değiştirme değerleri yaklaşık -1.5 m civarından başlayıp, bazı noktalarda -2 m'ye kadar düşmektedir. U3 yayı, diğer iki yaya göre daha büyük yer değiştirme değerleri göstermektedir. U3 yayı, genel olarak negatif bir eğilim sergilemekte olup, grafiğin başından sonuna kadar belirgin bir yer değiştirme göstermektedir.

Nokta 281-295 aralığında, U1 ve U2 yaylarının yer değiştirmeleri oldukça sabit kalırken, U3 yayı yaklaşık -1,5m civarında yer değiştirme göstermektedir. Nokta 296-305 aralığında, U3 yayı, hafif bir düşüşle -1.5 m'den -1.75 m'ye doğru bir yer değiştirme göstermektedir. Sonuç olarak U1 ve U2 yine sabit kalmaktadır. U1 ve U2 yayları, genel olarak sabit kalırken, U3 yayı belirgin bir negatif yer değiştirme göstermektedir. U3 yayının daha fazla kayma göstermesinin nedeni toprağın bu bölgesinde daha fazla hareket veya kayma olduğunu işaret etmektedir.

5.1.2. Borunun tam orta bölgesinin baz alınması

Bu alt başlıkta analiz sonuçları yine tablolar ve grafikler oluşturulup yorumlanırken tasarlanan gömülü sürekli borunun en çok deformasyon beklenen bölgesindeki Şekil 5.6’da gösterildiği gibi 5 nokta baz alınmıştır.

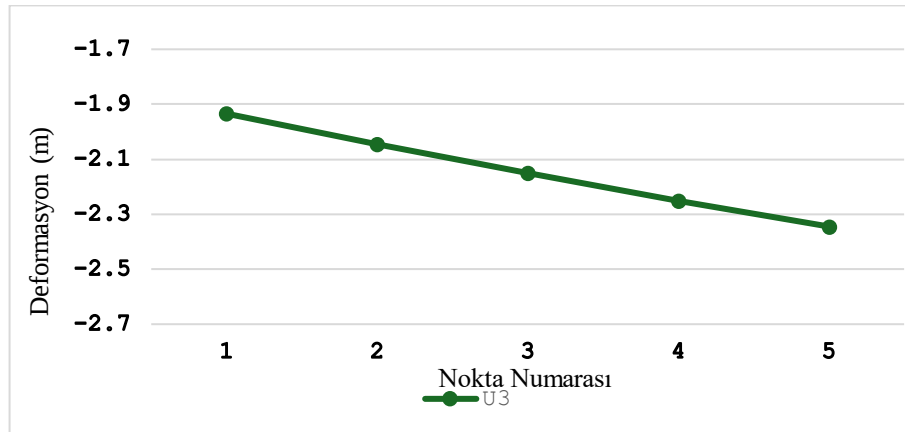


Şekil 5.6 SAP2000’de lineer gömülü boru modelinin analiz sonuçlarında baz alınan orta bölgesi

Borunun en çok deformasyon beklenen orta bölgesinde bulunan 5 noktanın deformasyonları Tablo 5.4’te ve deformasyon görülen bölgedeki noktaların deformasyon değerlerinin çizgi grafiği Şekil 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.4 Deformasyon görülen orta bölgedeki noktaların yer değiştirme değerleri

Nokta No	U3 (m)
1	-1,934226
2	-2,044613
3	-2,150121
4	-2,250242
5	-2,344605
6	-1,934226



Şekil 5.7 Deformasyon görülen orta bölgedeki noktaların yer değiştirme değerleri grafiği

Grafikte görüldüğü üzere, yer değiştirme (deformasyon) değeri, incelenen noktalar boyunca kademeli olarak artan bir negatif değer gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu, borunun bu beş noktada sabit bir dış kuvvete maruz kaldığını ve bu kuvvetin etkisiyle borunun belirli bir yönde yer değiştirdiğini kanıtlamaktadır. Yer değiştirme değerlerinin, özellikle borunun tam ortasında daha yüksek deformasyon oranlarına sahip olduğu görülmüştür.

Grafikteki noktalar arasındaki farkların düzenli bir artış gösterdiği gözlemlenmiş ve 1. noktadan 5. noktaya doğru, deformasyon değeri -1.9 m'den -2.3 m'ye doğru azaldığı sonucuna varılmıştır. Bu, uygulanan kuvvetin boru boyunca birikmiş enerjiyi arttırarak daha büyük deformasyonlara sebep olduğunu göstermektedir.

Deformasyon değerleri arasında lineer bir ilişki gözlemlenmiştir. Bu durum, borunun belirli bir elastik bölgedeki deformasyon tepkisinin doğrusallığını yansıttığını kanıtlamaktadır. Borunun malzeme özelliklerine ve uygulanan kuvvetin doğrusal dağılımına bağlı olarak, bu eğilim elastik deformasyonun göstergesidir. Buradan hareketle eğer boru elastik bölgedeyse, bu deformasyon geri döndürülebilir, ancak belirli bir sınırın ötesinde bu doğrusal eğri saparak plastik deformasyona dönüşebilir yorumu yapılmıştır.

Deformasyonun mutlak değerlerinin yüksek olması (-1,9 m ile -2,3 m arasında), borunun yer değiştirme kuvvetine karşı verdiği tepkide ciddi bir değişim olduğunu göstermektedir. Bu, borunun gömülü olduğu zeminin türüne, çevresel koşullara (örneğin sıcaklık değişimleri) veya borunun malzeme dayanımına bağlı olduğu yorumunun yapılmasını sağlamaktadır. Bu büyüklük, borunun kritik bir sınırdan olup olmadığını veya daha fazla deformasyona maruz kalabileceğini göstermektedir.

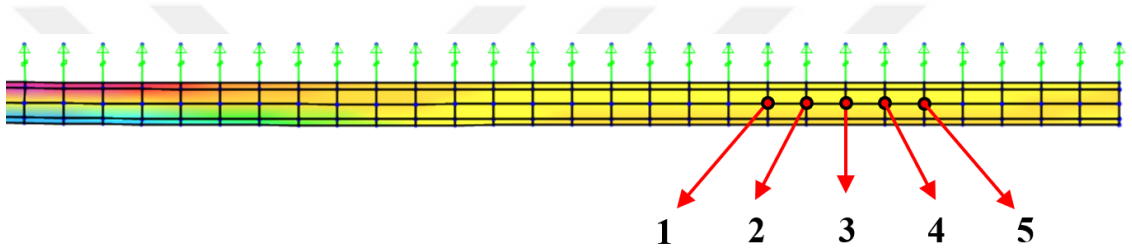
Borunun deformasyon eğrisi, malzeme dayanımını ve boru içinde gerilme yoğunlaşmalarını yansıtabilmektedir. Özellikle borunun ortasındaki noktaların daha fazla deformasyon göstermesi, borunun bu bölgesinde yüksek bir gerilme yoğunlaşmasına maruz kaldığını göstermiştir. Bu durum, boru tasarımında dikkate alınması gereken kritik bir zayıflık bölgesine işaret etmektedir.

Gömülü borularda, boru ile zemin arasındaki etkileşim de deformasyon üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu burada da görülmektedir. Yer değiştirme verileri, zeminin boruyu yeterince destekleyemediği veya borunun maruz kaldığı kuvvetin zemin tarafından yeterince absorbe edilmediği durumları göstermektedir. Ayrıca borunun elastik sınırı aşıldığında, plastik deformasyon gerçekleşir ve bu da borunun kalıcı olarak şekil değiştirmesine neden olur.

Sonuç olarak bu grafikte görülen deformasyon eğrisi, yer değiştirme kuvvetine maruz kalan gömülü bir borunun karakteristik deformasyon davranışını net bir şekilde göstermektedir. Noktalar arasındaki düzenli artış, elastik bir deformasyon sürecine işaret edebilirken, borunun ortasında gözlemlenen yüksek deformasyon, gerilme yoğunlaşması ve malzeme dayanımının kritik olduğunu göstermektedir.

5.1.3. Borunun sağ uç bölgesindeki noktaların baz alınması

Bu alt başlıkta analiz sonuçları yine tablolar ve grafikler oluşturulup yorumlanırken tasarlanan gömülü sürekli borunun elastik temele oturan kiriş varsayımı ile orta bölgeye göre daha az deformasyon beklenen sağ uç bölgesindeki Şekil 5.8’de gösterildiği gibi 5 nokta baz alınmıştır.

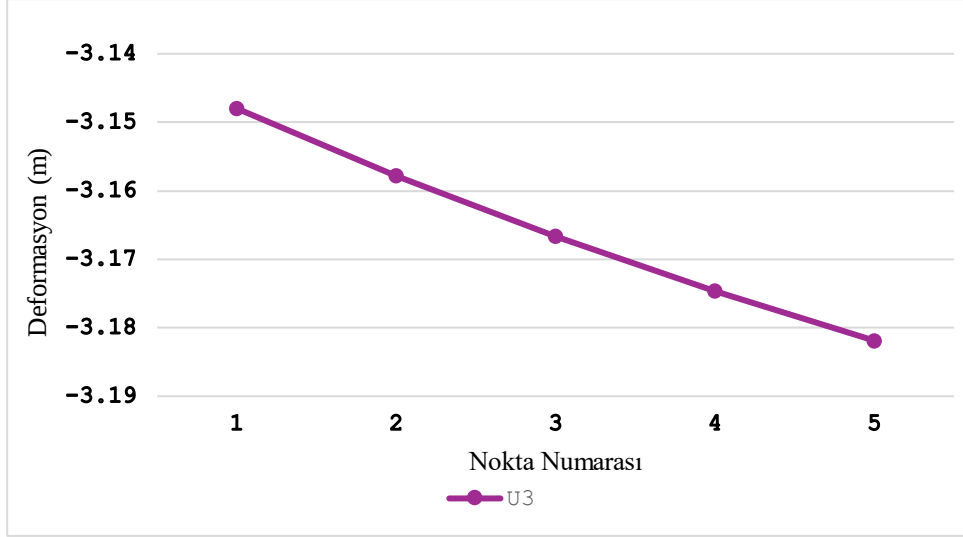


Şekil 5.8 SAP2000’de lineer gömülü boru modelinin analiz sonuçlarında baz alınan sağ uç bölgesi

Borunun elastik temele oturan kiriş kabulü ile tanımlanan sağ bölgesinde bulunan 5 noktanın deformasyonları Tablo 5.5’de ve deformasyon görülen bölgedeki noktaların deformasyon değerlerinin çizgi grafiği Şekil 5.9’te verilmiştir.

Tablo 5.5 Gömülü borunun sağ uç bölgesindeki noktaların yer değiştirme değerleri

Nokta No	U3 (m)
1	-3,147996
2	-3,157852
3	-3,166634
4	-3,174575
5	-3,18188
6	-3,147996



Şekil 5.9 Gömülü borunun sağ uç bölgesindeki noktaların yer değiştirme değerleri grafiği

Grafikte gözlemlenen deformasyon değerleri, -3.14 m ile -3.19 m arasında değişmektedir. Bu eğilim, borunun uç bölgesinde deformasyonun nispeten daha yüksek olduğunu ve her bir noktanın deformasyonunun bir önceki noktaya göre kademeli olarak arttığını göstermektedir. Sağ uca doğru deformasyon daha fazla olabilir, çünkü borunun uç bölgesi, sistemdeki sınır koşullarına bağlı olarak daha fazla yer değiştirme gösterebileceği yorumu yapılmıştır.

Noktalar arasındaki fark, grafikteki yer değiştirme eğrisinde dikkat çekici bir şekilde düzenli ve lineer bir azalma göstermektedir. Deformasyonun bu bölgede giderek artması, uç bölgelerde genellikle daha zayıf yapıların bulunduğunu ve gerilme yoğunlaşmasının uçlara doğru arttığını göstermektedir.

Yine bu grafikte de deformasyon değerlerinin birbirine paralel ve doğrusal bir ilişki gösterdiği açıkça görülmektedir. Bu durum, borunun sağ uç kısmında da elastik bir deformasyon bölgesinde olduğunu veya kuvvetin eşit şekilde dağıldığını göstermektedir. Ancak deformasyonun mutlak değerinin diğer bölgelere göre daha büyük olması, bu bölgenin daha yüksek kuvvetlere maruz kaldığına ya da zeminle daha zayıf bir etkileşimde olduğunu da gösterebilmektedir.

Deformasyon değerlerinin mutlak büyüklüğü, -3.14 m ile -3.19 m arasında değişmektedir. Bu, uç bölgelerde borunun önemli ölçüde yer değiştirdiğini ve bu bölgenin daha fazla deformasyona açık olduğunu göstermektedir. Uç noktalar genellikle sınır koşullarından dolayı daha az desteklenir, bu nedenle borunun bu bölgesinde gerilme ve deformasyon daha yoğun olur.

Borunun uç bölgesinde görülen bu yüksek deformasyon, gerilme yoğunlaşmasının en fazla olduğu noktaları işaret ediyor yorumunun yapılmasına neden olmuştur. Boru sistemlerinde uç noktalar genellikle gerilme birikimine daha fazla maruz kalır, bu da yer değiştirme değerlerinin artmasına neden olur. Bu, borunun uç bölgesinde daha fazla dikkat edilmesi gereken bir tasarım zayıflığı olduğunu gösterebilmektedir.

Sağ uç bölgesi, borunun serbest ucu veya sabit bir sınır koşulu bulunan bölge olması durumlarına karşın iki şekilde ele alındığında; eğer bu bölge serbest bir uça olarak tasarlanırsa, kuvvetler bu noktada daha fazla deformasyon yaratacaktır. Ancak uç sabitlenirse, bu deformasyon, borunun sınır koşullarına olan tepkisi olarak değerlendirmek mümkündür. Her iki durumda da sınır koşullarının borunun genel deformasyon profiline önemli bir katkısı vardır.

Grafikten hareketle gömülü borularda genel anlamda uç bölgedeki deformasyonun elastik sınırlar içinde olup olmadığını anlamak önemlidir. Eğer bu deformasyon elastik bölgedeyse, boru üzerindeki yük kaldırıldığında boru eski şekline dönebilmektedir. Ancak deformasyon plastik bölgedeyse, boru kalıcı bir şekil değiştirme yaşaması beklenmektedir. Burada gözlemlenen lineer eğilim elastik bir davranışı kanıtlamaktadır, ancak deformasyonun büyüklüğü borunun plastik bölgeye yakın olduğuna da işaret edebileceğini göstermiştir.

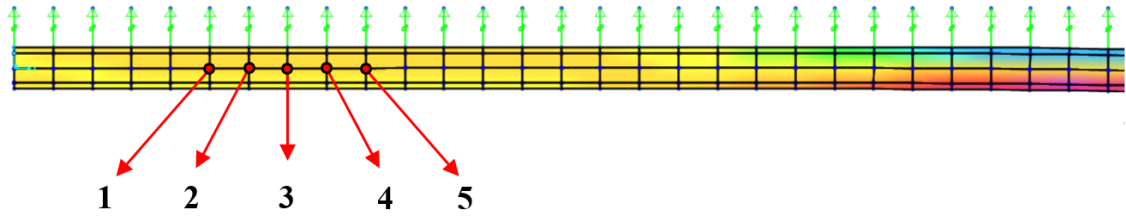
Gömülü borularda, borunun zeminle etkileşimi uç bölgelerde farklı olabilmektedir. Zemin sertliği veya dayanımı bu uç bölgedeki yer değiştirme üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Eğer zemin daha zayıfsa, bu durum borunun uç bölgesinde daha fazla deformasyona yol açacaktır. Ayrıca, boru ve zemin arasındaki sürtünme ve bağlanma kuvvetleri de deformasyonun dağılımını etkilemektedir.

Borunun sağ uç bölgesinde elde edilen bu yer değiştirme grafiği, uç bölgedeki deformasyonun, diğer bölgelere kıyasla daha büyük olduğunu ve sınır koşullarına bağlı olarak gerilme yoğunlaşmasının arttığını göstermektedir. Bu tür deformasyon verileri, borunun tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli noktalar sunar, özellikle uç bölgelerdeki zayıflıkların giderilmesi için tasarımda revizyonlar gerektirebilmektedir.

Elastik ve plastik deformasyon arasındaki sınırın belirlenmesi ve zemin-boru etkileşiminin detaylı incelenmesi, borunun uzun vadeli stabilitesi için hayati önem taşımaktadır.

5.1.4. Borunun sol uç bölgesindeki noktaların baz alınması

Bu alt başlıkta analiz sonuçları yine tablolar ve grafikler oluşturulup yorumlanırken tasarlanan gömülü sürekli borunun elastik temele oturan kiriş varsayımı ile orta bölgeye göre daha az deformasyon beklenen sol uç bölgesindeki Şekil 5.10'da gösterildiği gibi 5 nokta baz alınmıştır.

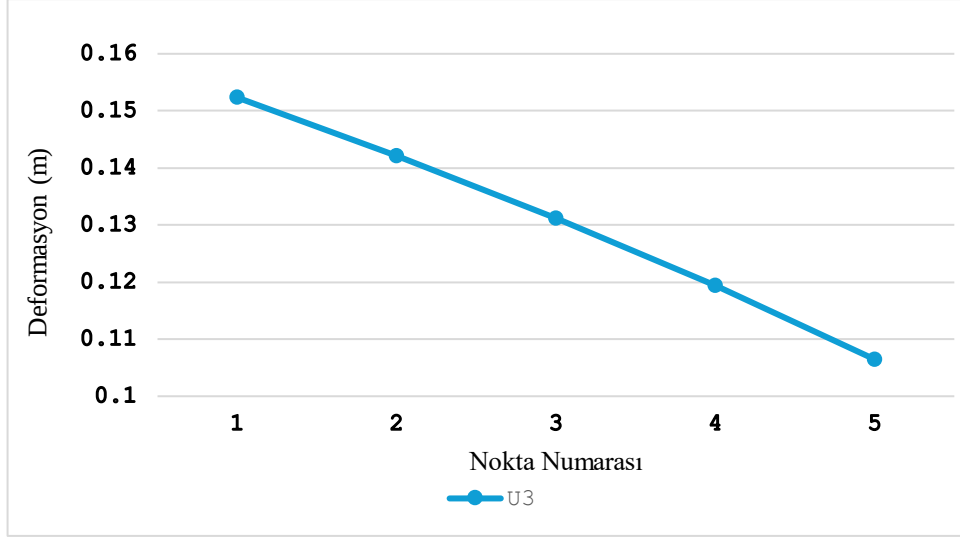


Şekil 5.10 SAP2000'de lineer gömülü boru modelinin analiz sonuçlarında baz alınan sol uç bölgesi

Borunun elastik temele oturan kiriş kabulü ile tanımlanan sol bölgesinde bulunan 5 noktanın deformasyonları Tablo 5.6'da ve deformasyon görülen bölgedeki noktaların deformasyon değerlerinin çizgi grafiği Şekil 5.11'de verilmiştir.

Tablo 5.6 Gömülü borunun sol uç bölgesindeki noktaların yer değiştirme değerleri

Nokta No	U3 (m)
1	0,152335
2	0,142163
3	0,131283
4	0,119467
5	0,106461
6	0,152335



Şekil 5.11 Gömülü borunun sol uç bölgesindeki noktaların yer değiştirme değerleri grafiği

Grafik, yer değiştirme değerlerinin 0,16 m ile 0,1 m arasında değiştiğini göstermektedir. Bu, diğer uç bölgelerle kıyaslandığında deformasyonun daha düşük seviyelerde olduğunu ortaya koymaktadır. Sol uç bölgesi, sistemdeki deformasyon dağılımında daha az yer değiştirme gösteren bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır.

Grafikte deformasyon değerlerinin doğrusal bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu doğrusal eğilim, borunun sol ucunda da elastik bir deformasyon bölgesinde olduğunu göstergesidir. Uç noktalarda genellikle sınır koşulları ve yük dağılımı doğrusal bir değişim yaratabilir, bu da doğrusal bir yer değiştirme profiline yol açabilmektedir.

Her bir nokta arasındaki deformasyon farkı düzenli bir şekilde azalmaktadır. Bu durum, yer değiştirme kuvvetlerinin düzgün bir şekilde borunun sol uç bölgesine dağıldığını veya borunun bu bölgesinin daha stabil olduğunu göstermektedir.

Grafikte gözlemlenen yer değiştirme değerlerinin küçük olması (0,16 m ile 0,1 m arasında) borunun sol ucunun daha az kuvvete maruz kaldığını ya da bu bölgedeki sınır koşullarının daha sağlam olduğunu göstermektedir. Borunun uç bölgelerindeki gerilme yoğunlaşmasının sağ uca göre daha düşük olduğu yorumu yapılmıştır.

Bu düşük deformasyon değerleri, borunun sol uç bölgesinde maruz kaldığı kuvvetlerin sınırlı olduğunu veya bu bölgenin daha dayanıklı sınır koşullarına sahip olduğunu göstermektedir. Gerilme dağılımı açısından ele alındığında, sol uç bölgesinde borunun daha az zorlandığı ve deformasyonun daha kontrol edilebilir bir seviyede olduğu yorumu yapılmıştır.

Diğer iki uç bölge ile kıyaslandığında, sol uç bölgesindeki deformasyonun oldukça düşük seviyelerde kaldığı açıkça görülmektedir. Bu tür düşük deformasyon değerleri, borunun elastik sınırlar içinde çalıştığını göstermektedir. Yani, boru üzerindeki yük kaldırıldığında boru eski haline dönebilir. Bu durum, özellikle sistemin güvenli çalışma koşullarını sağlamak açısından olumlu bir göstergedir.

Borunun sol uç bölgesindeki sınır koşulları, sağ uç ve orta bölgeden farklı olabilmektedir. Daha sağlam bir sınır koşulu, borunun bu bölgesindeki deformasyonun sınırlı kalmasına neden olabilir. Eğer sol uç, borunun sabitlendiği ya da güçlü bir destek aldığı bir bölgeyse, buradaki deformasyonun daha az olması beklenmektedir. Sınır koşullarının farklı uçlarda nasıl düzenlendiği, deformasyon dağılımını etkileyen kritik bir faktör olduğu gözlemlenmiştir.

Gömülü borularda zemin ile boru arasındaki etkileşim büyük önem taşıdığı daha önceki analizde de olduğu gibi bu analizde de gözlemlenmiştir. Sol uç bölgesindeki zemin özellikleri, bu bölgede daha az deformasyon göstermesine katkıda bulunmaktadır.

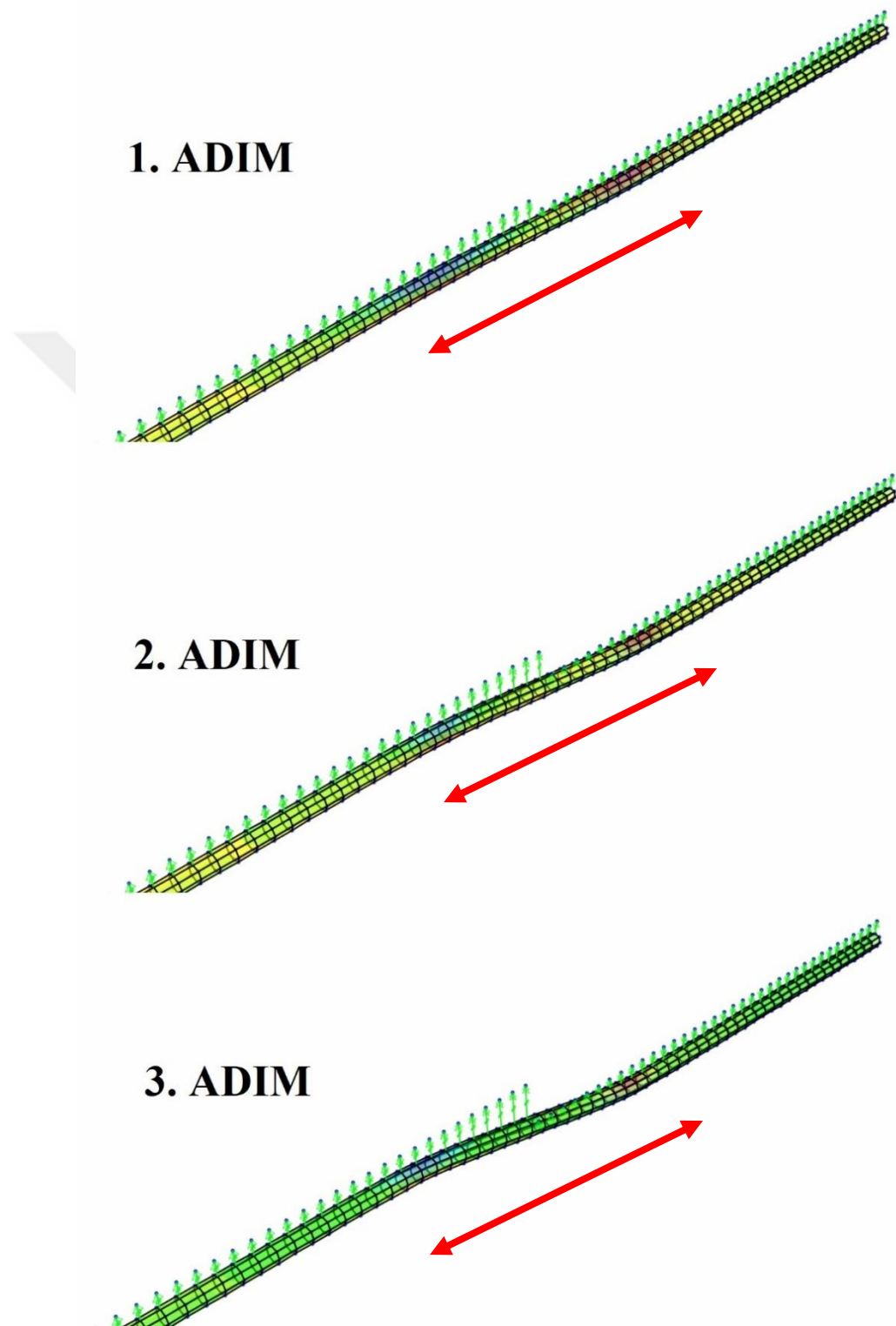
Zemin sertliği, borunun zeminle olan sürtünmesi ve borunun gömülü olduğu derinlik gibi faktörler deformasyon üzerinde etkili olmuştur. Zeminle olan bu etkileşimler göz önünde bulundurulduğunda, sol uç bölgesindeki düşük deformasyon değerleri, zeminin bu bölgede boruyu daha iyi desteklediğini göstermektedir.

Sol uç bölgesinde görülen bu düşük deformasyon değerleri, borunun genel performansını olumlu etkileyen bir faktör olabileceği yorumu yapılmıştır. Düşük deformasyon, borunun uzun vadede yapısal bütünlüğünü koruyabileceği anlamına gelir. Ancak, bu bölgedeki düşük deformasyon değerleri borunun sadece bu kısımda elastik davranış gösterdiği ve başka bölgelerde plastik deformasyonların meydana gelebileceği anlamına da gelebileceği yorumu da yapılmıştır.

Sol uç bölgesindeki deformasyon grafiği, borunun bu bölümünde düşük yer değiştirme değerleri ile karakterize edilmektedir. Bu durum, borunun bu bölgesindeki sınır koşullarının daha sağlam olduğunu veya maruz kaldığı kuvvetlerin daha düşük olduğunu göstermektedir. Diğer uç bölgelerle karşılaştırıldığında, sol uçta daha az yer değiştirme olduğu için, bu bölge elastik deformasyon sınırları içinde kalmaktadır. Bu da borunun bu kısmında daha az gerilme birikimi olduğunu ve sistemin güvenli sınırlar içinde çalıştığını düşündürmektedir.

5.2. Nonlinear (Doğrusal Olmayan) Model Analizinin Yapılması

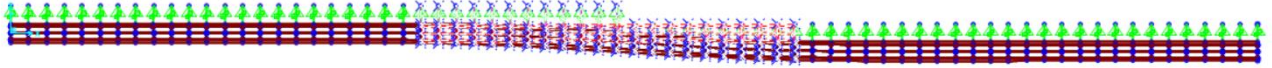
Analiz sonucunda gömülü sürekli çelik borunun analiz sonrası deformasyon görünümü Şekil 5.12’de gösterilmiştir.



Şekil 5.12 SAP2000’de nonlinear gömülü boru modelinin 3 adımda deformasyon olmuş hali

5.2.1. Borunun orta noktasından sağ uç noktasına kadarki bölgenin baz alınması

Bu alt başlıkta analiz sonuçları yine tablolar ve grafikler oluşturulup yorumlanırken tasarlanan gömülü sürekli borunun deforme olan bölgesi Şekil 5.13'te gösterildiği gibi tam orta bölgesi baz alınmıştır.

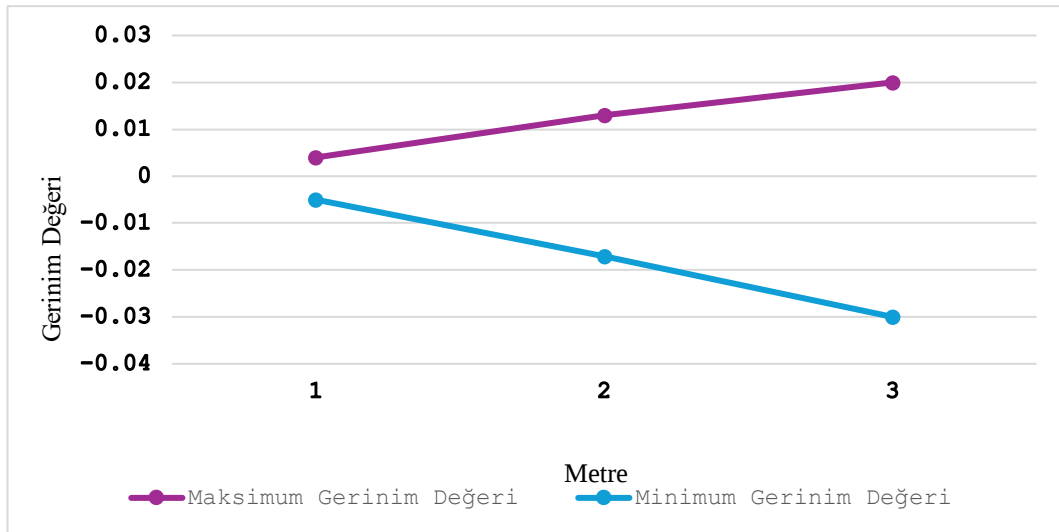


Şekil 5.13 SAP2000'de nonlinear gömülü boru modelinin analiz sonuçlarında baz alınan bölgesi

Tasarlanan ve analizi yapılan nonlinear gömülü sürekli çelik borunun belirli metrelerdeki gerinim değerleri Tablo 5.7'de ve gerinim değerleri çizgi grafiği Şekil 5.14'te gösterilmiştir.

Tablo 5.7 Gömülü borunun belirli metrelerdeki gerinim değerleri

Metre (m)	Maksimum Gerinim Değeri	Minimum Gerinim Değeri
1	0,004	-0,005
2	0,013	-0,017
3	0,02	-0,03



Şekil 5.14 Gömülü borunun belirli metrelerdeki gerinim değerleri grafiği

Tablo 5.7 ve Şekil 5.14 incelendiğinde maksimum gerinim değeri, metre arttıkça lineer bir şekilde pozitif yönde artış, minimum gerinim değeri ise metre arttıkça lineer bir şekilde negatif yönde artış göstermektedir.

1. metrede, maksimum gerinim değeri yaklaşık 0.01 seviyesindedir. Bu, borunun bu noktada maruz kaldığı çekme kuvvetlerinin olduğunu gösterir. Minimum gerinim değeri ise yaklaşık -0.01 seviyesindedir. Bu durum da borunun bu noktada maruz kaldığı basınç kuvvetlerini göstermektedir.

2. metrede, maksimum gerinim değeri 0.02 seviyesine çıkmıştır. Bu, borunun bu noktada daha fazla çekme kuvvetine maruz kaldığını göstermektedir. Minimum gerinim değeri ise -0.02 seviyesine düşmüştür. Bu durum, borunun bu noktada daha fazla basınç kuvvetine maruz kaldığını işaret etmektedir.

3. metrede maksimum gerinim değeri 0.03 seviyesine ulaşmıştır. Bu, borunun bu noktada en yüksek çekme kuvvetine maruz kaldığını göstermektedir. Minimum gerinim değeri ise -0.03 seviyesine kadar inmiştir. Bu, borunun bu noktada en yüksek basınç kuvvetine maruz kaldığını işaret etmektedir.

Sonuç olarak, gömülü borunun metre arttıkça hem maksimum hem de minimum gerinim değerleri düzenli bir şekilde artış göstermektedir. Hem maksimum hem de minimum gerinim değerlerinin metre başına lineer bir artış göstermesi, borunun her metre artışında benzer bir gerinim artışı yaşadığını işaret eder. Bu, borunun yapısal analizinde dikkate alınması gereken önemli bir veridir. Ayrıca bu artış, borunun yapısal bütünlüğü üzerinde önemli etkiler yaratabilmektedir.

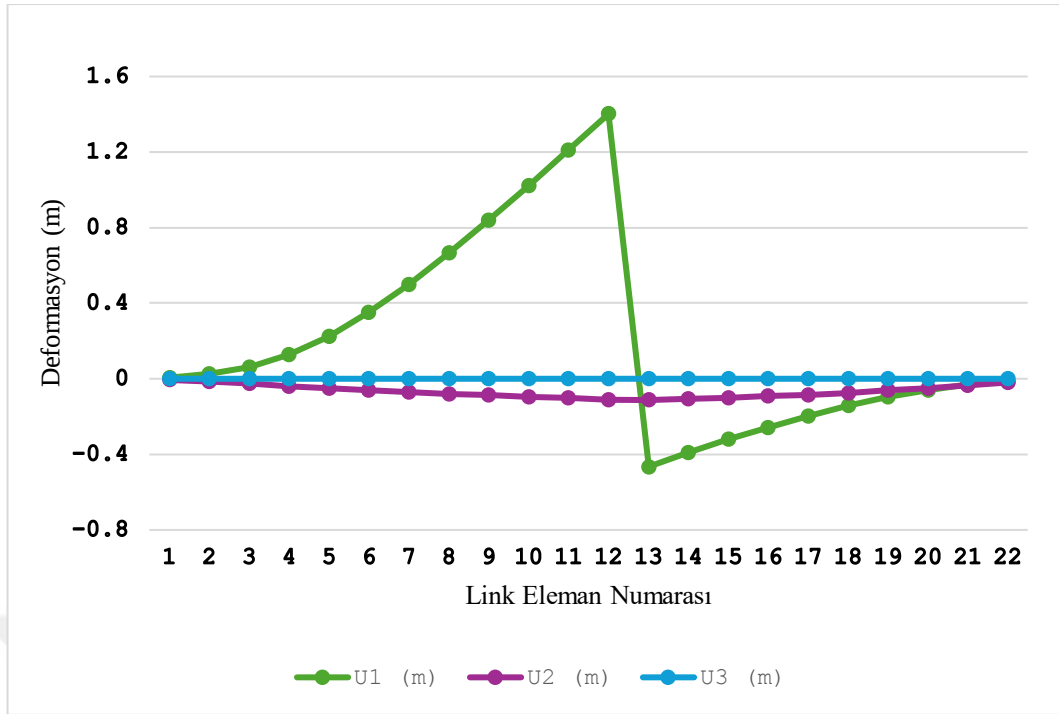
Maksimum gerinim değerleri (pozitif), borunun metre arttıkça artan çekme kuvvetlerine maruz kaldığını göstermektedir. Çekme kuvvetlerinin, borunun malzeme dayanımı açısından kritik olduğu, çünkü yüksek çekme gerinimleri malzemenin kopma veya çatlama riskini artırabildiği gözlemlenmiştir. Minimum gerinim değerleri (negatif), borunun metre arttıkça artan basınç kuvvetlerine maruz kaldığını göstermektedir. Basınç kuvvetlerinin, borunun deformasyon veya bükülme riskini arttırabildiği gözlemlenmiştir.

Bu bilgilerin borunun tasarımı, yerleştirilmesi ve bakımında önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Örneğin, borunun çekme ve basınç kuvvetlerine karşı dayanıklılığını artırmak için malzeme seçimi veya destek yapıları üzerinde değişiklikler yapılabilir. Ayrıca, bu tür gerinim analizleri, borunun uzun vadeli performansını ve güvenliğini sağlamak için periyodik kontrollerin yapılması gerektiğini de göstermektedir.

Deformasyonun görüldüğü bölgedeki yani tam orta bölgede bulunan link elemanların deformasyonları Tablo 5.8’de ve deformasyon görülen bölgedeki link elemanların deformasyon değerlerinin çizgi grafiği Şekil 5.15’te verilmiştir.

Tablo 5.8 Deformasyon görülen bölgedeki link elemanların deformasyon değerleri

Link Eleman No	Adım Tipi	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)
24	Maksimum	0,007578	-0,006332	2,621E-16
	Minimum	0,001251	-0,013909	-4,723E-16
25	Maksimum	0,024774	-0,013759	-1,725E-16
	Minimum	0,007292	-0,037527	-1,028E-15
26	Maksimum	0,063114	-0,024891	7,122E-17
	Minimum	0,01989	-0,07353	-1,124E-15
27	Maksimum	0,129402	-0,03805	4,617E-16
	Minimum	0,04104	-0,121541	-6,062E-16
28	Maksimum	0,22544	-0,050386	4,756E-16
	Minimum	0,070905	-0,167611	-6,083E-16
29	Maksimum	0,349718	-0,060821	9,288E-16
	Minimum	0,108195	-0,211339	-1,715E-16
30	Maksimum	0,498554	-0,071626	1,722E-16
	Minimum	0,152407	-0,242154	-7,054E-16
31	Maksimum	0,664734	-0,080932	4,211E-16
	Minimum	0,203355	-0,261332	-7,344E-16
32	Maksimum	0,840184	-0,088086	3,557E-17
	Minimum	0,259819	-0,268372	-1,087E-15
33	Maksimum	1,021448	-0,096895	7,332E-16
	Minimum	0,321872	-0,278157	-1,03E-15
34	Maksimum	1,208545	-0,103513	5,096E-16
	Minimum	0,389589	-0,284367	-1,24E-15
35	Maksimum	1,401462	-0,111607	8,713E-16
	Minimum	0,463034	-0,293238	-9,347E-16
36	Maksimum	-0,465043	-0,112673	5,441E-16
	Minimum	-1,401666	-0,293937	-1,411E-15
37	Maksimum	-0,390448	-0,105369	7,717E-16
	Minimum	-1,207227	-0,287728	-1,29E-15
38	Maksimum	-0,320823	-0,099933	2,029E-15
	Minimum	-1,017533	-0,281809	-1,158E-15
39	Maksimum	-0,256416	-0,091116	1,317E-15
	Minimum	-0,832877	-0,27393	-1,896E-15
40	Maksimum	-0,197423	-0,084458	1,058E-15
	Minimum	-0,652828	-0,268109	-1,85E-15
41	Maksimum	-0,143763	-0,075089	-1,064E-15
	Minimum	-0,477031	-0,260212	-2,274E-15
42	Maksimum	-0,097455	-0,06277	6,758E-16
	Minimum	-0,307634	-0,246057	-1,344E-15
43	Maksimum	-0,059823	-0,049299	1,532E-16
	Minimum	-0,158724	-0,195377	-2,831E-15
44	Maksimum	-0,031509	-0,035022	2,412E-16
	Minimum	-0,061488	-0,095939	-2,344E-15
45	Maksimum	-0,013658	-0,019434	1,116E-15
	Minimum	-0,021902	-0,029689	-2,148E-15



Şekil 5.15 Deformasyon görülen bölgedeki link elemanların deformasyon maksimum değerleri grafiği

U1 için, link eleman 1-11’de deformasyon değeri yavaşça artarak yaklaşık 1.6 metreye kadar çıkmıştır. Link eleman 12’de aniden -0,8 metreye düşmüş, bu noktada büyük bir negatif deformasyon gözlemlenmiştir. Link eleman 13-22’de deformasyon değeri hızla toparlanarak tekrar 0 civarına çıkmış ve ardından yavaşça pozitif değerlere dönmüştür.

U2 için, deformasyon değeri, link elemanları boyunca yaklaşık -0,1 ile 0,1 metre arasında çok küçük değişimler göstermiştir. Neredeyse sabit bir eğilimle devam etmiş, belirgin bir ani değişim gözlemlenmemiştir.

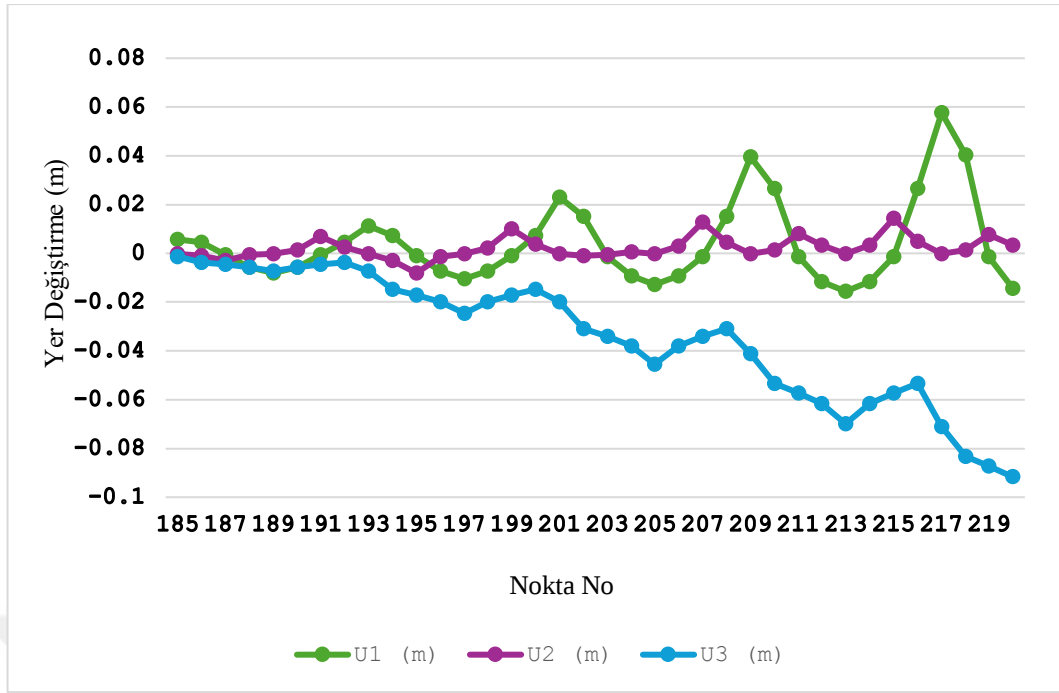
U3 için, deformasyon değeri, link elemanları boyunca yaklaşık -0,1 ile 0,1 metre arasında küçük değişimler göstermiştir. U2’ye benzer şekilde neredeyse sabit bir eğilimle devam etmiş, belirgin bir ani değişim gözlemlenmemiştir.

Grafikte görüldüğü üzere, gömülü borunun U1 toprak yayı büyük deformasyon değişikliklerine maruz kalırken, U2 ve U3 toprak yayları daha stabil deformasyon değerlerine sahiptir. U2 ve U3 yaylarının daha stabil olması, bu yayların borunun yapısal bütünlüğünü korumada daha etkili olduğunu gösterebilir. Özellikle U1 yayında link eleman 12’de gözlenen ani büyük negatif deformasyon, borunun bu noktada özel bir duruma (örneğin, büyük bir dış kuvvet, yapısal zayıflık veya zemin kayması) maruz kaldığını işaret etmektedir.

Deformasyonun görüldüğü bölgedeki yani tam orta bölgede bulunan tüm noktalardaki U1, U2 ve U3 yönlerine göre yer değiştirme değerleri Tablo 5.9'da ve deformasyon görülen bölgedeki noktaların yer değiştirme değerleri çizgi grafiği Şekil 5.16'da verilmiştir.

Tablo 5.9 Deformasyon görülen bölgedeki noktaların yer değiştirme değerleri

Nokta No	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)
185	0,005697	1,35E-15	-0,001251
186	0,004439	-0,001055	-0,003807
187	-0,000663	-0,003108	-0,00466
188	-0,005753	-0,000765	-0,00563
189	-0,008123	2,299E-15	-0,00747
190	-0,005753	0,00147	-0,00563
191	-0,000663	0,00705	-0,00466
192	0,004439	0,002665	-0,003807
193	0,011414	1,384E-15	-0,007292
194	0,00728	-0,00306	-0,014727
195	-0,000971	-0,008103	-0,01701
196	-0,007392	-0,001509	-0,019746
197	-0,0104	2,337E-15	-0,024441
198	-0,007392	0,00212	-0,019746
199	-0,000971	0,010151	-0,01701
200	0,00728	0,003832	-0,014727
201	0,023043	1,429E-15	-0,01989
202	0,015181	-0,00113	-0,030735
203	-0,001267	-0,000785	-0,034146
204	-0,009287	0,000667	-0,038176
205	-0,012847	2,328E-15	-0,045313
206	-0,009287	0,002962	-0,038176
207	-0,001267	0,012691	-0,034146
208	0,015181	0,004478	-0,030735
209	0,039517	1,48E-15	-0,04104
210	0,026672	0,001421	-0,053275
211	-0,001547	0,008173	-0,057121
212	-0,011526	0,003357	-0,06167
213	-0,015582	2,39E-15	-0,069696
214	-0,011526	0,003331	-0,06167
215	-0,001547	0,014314	-0,057121
216	0,026672	0,005058	-0,053275
217	0,057637	1,547E-15	-0,070905
218	0,040507	0,001279	-0,083295
219	-0,001488	0,007731	-0,087138
220	-0,014363	0,003245	-0,09172



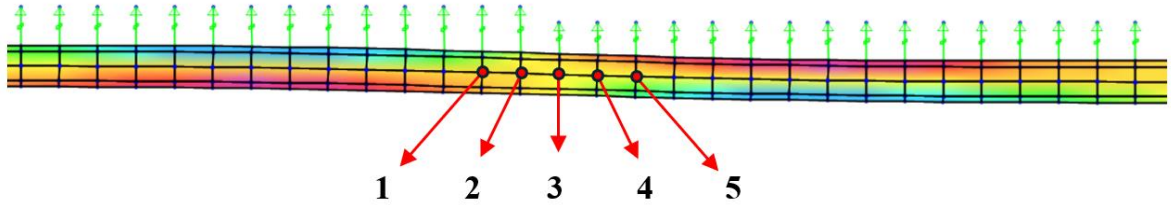
Şekil 5.16 Deformasyon görülen bölgedeki noktaların yer değiştirme değerleri grafiği

Tablo 5.9 ve Şekil 5.16 incelendiğinde U1 yayının yer değiştirmesi çoğunlukla pozitif yönde ve genel olarak 0 ila 0,04 m arasında seyretmektedir. Özellikle noktalar arasında belirgin dalgalanmalar bulunmaktadır. 199-211 numaralı noktalar arasında yer değiştirmeler daha belirgin ve keskin zirveler gözlenmektedir. En yüksek deformasyonlar nokta 205 ve 215 civarında (yaklaşık 0,04 m) görülmektedir. U2 yayının yer değiştirme eğrisi oldukça sabit ve küçük dalgalanmalar göstermektedir. Genellikle 0 ila 0,02 m arasında yer değiştirmeler görülmektedir. Noktalar arasında küçük dalgalanmalar gözlemlenmekte, ancak genel eğilim sabit kalmaktadır. U1'e kıyasla daha az belirgin deformasyonlar bulunmaktadır. U3 yayının yer değiştirmesi negatif bir eğilim göstermektedir. 185 numaralı noktadan başlayarak sürekli bir azalma ile yaklaşık -0.1 m'ye kadar düşmektedir. 95'ten itibaren belirgin bir azalma eğilimi başlamaktadır ve bu eğilim 219 numaralı noktaya kadar devam etmektedir. Bu noktalar arasında hafif dalgalanmalar olsa da genel azalma eğilimi belirgindir. 215 ve 219 numaralı noktalarda belirgin bir düşüş gözlenmektedir.

Sonuç olarak, U1 yayının yer değiştirmesi pozitif ve dalgalı bir seyir izlemekte, belirli noktalarda zirveler gözlemlenmektedir. U2 yayının yer değiştirmesi oldukça sabit ve küçük dalgalanmalarla sınırlıdır. U3 yayının yer değiştirmesi ise negatif yönde sürekli bir azalma göstermekte, özellikle 195 numaralı noktadan itibaren belirgin bir düşüş gözlenmektedir.

5.2.2. Borunun tam orta bölgesinin baz alınması

Bu alt başlıkta analiz sonuçları yine tablolar ve grafikler oluşturulup yorumlanırken tasarlanan gömülü sürekli borunun en çok deformasyon beklenen bölgesindeki Şekil 5.17’de gösterildiği gibi 5 nokta baz alınmıştır.

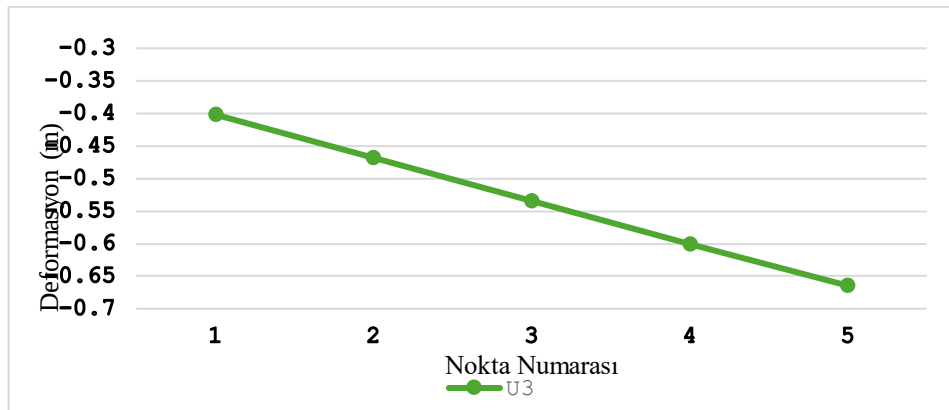


Şekil 5.17 SAP2000’de nonlinear gömülü boru modelinin analiz sonuçlarında baz alınan orta bölgesi

Borunun en çok deformasyon beklenen orta bölgesinde bulunan 5 noktanın deformasyonları Tablo 5.10’da ve deformasyon görülen bölgedeki noktaların deformasyon değerlerinin çizgi grafiği Şekil 5.18’de verilmiştir.

Tablo 5.10 Deformasyon görülen orta bölgedeki noktaların yer değiştirme değerleri

Nokta No	U3 (m)
1	-0,401775
2	-0,467569
3	-0,534136
4	-0,600217
5	-0,66443
6	-0,401775



Şekil 5.18 Deformasyon görülen orta bölgedeki noktaların yer değiştirme değerleri grafiği

Deformasyon profili incelendiğinde grafik, lineer bir eğilim göstermekte, bu da yer değiştirmelerin (deformasyonların) düzenli bir şekilde arttığını göstermektedir.

Birinci noktada deformasyon -0,4 m civarında başlarken, beşinci noktada bu değer yaklaşık -0,67 m'ye kadar ulaşmıştır. Bu, boru üzerindeki kuvvetin etkisinin sistematik ve tutarlı olduğunu göstermektedir.

Deformasyon değerlerinin neredeyse doğrusal bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Bu, borunun kuvvete karşı elastik bir deformasyon sergilediği çıkarımı yapılmıştır. Elastik deformasyon, malzemenin kuvvet kalktığında eski haline dönebileceğini göstermektedir. Ancak deformasyon değerlerinin yüksekliği, plastik bir deformasyonun başlangıç aşamalarını da işaret edebilmektedir.

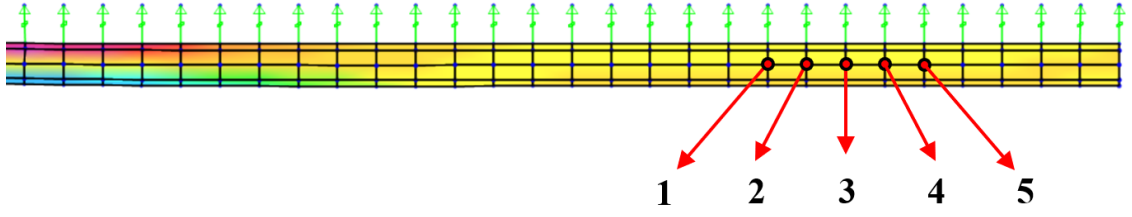
Grafikteki değerler incelendiğinde, borunun merkezine doğru deformasyonun daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır. Bu tipik olarak, gömülü boruların ortasındaki yer değiştirme kuvvetine maruz kaldıklarında en büyük deformasyonu yaşadıklarını göstermektedir. Bunun sebebi, borunun uç noktalarının daha fazla sabitlenmiş olabileceği ya da kuvvetin ortada maksimum etkiye sahip olmasıdır.

Deformasyon değerlerinin büyüklüğü göz önüne alındığında, borunun maruz kaldığı kuvvet oldukça yüksek olabileceği yorumu yapılmıştır. Bu, borunun malzeme dayanımının ve elastik limitlerinin aşılabileceğine işaret edebilir. Özellikle deformasyon -0,67 m'ye kadar ulaştığında, borunun plastik deformasyon bölgesine girmesi mümkündür. Eğer bu durumda malzemenin elastik limitini aştığını varsayarsak, kalıcı bir şekil bozukluğu meydana gelebilmektedir.

Sonuç olarak deformasyon değerlerinin düzenli bir şekilde artması, borunun homojen bir kuvvet altında kaldığını ve bu kuvvetin merkezde en büyük deformasyonu yarattığını işaret etmektedir. Eğer boru elastik limitlerin ötesinde deformasyon gösteriyorsa, bu tasarım veya malzeme seçiminde dikkate alınması gereken kritik bir faktör olabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, borunun hangi malzemeden yapıldığı ve yer değiştirme kuvvetinin hangi yönlerde etkili olduğu, bu verilerle birlikte daha kapsamlı bir değerlendirme yapılmasını sağlamaktadır.

5.2.3. Borunun sağ uç bölgesindeki noktaların baz alınması

Bu alt başlıkta analiz sonuçları yine tablolar ve grafikler oluşturulup yorumlanırken tasarlanan gömülü sürekli borunun elastik temele oturan kiriş varsayımı ile orta bölgeye göre daha az deformasyon beklenen sağ uç bölgesindeki Şekil 5.19'da gösterildiği gibi 5 nokta baz alınmıştır.

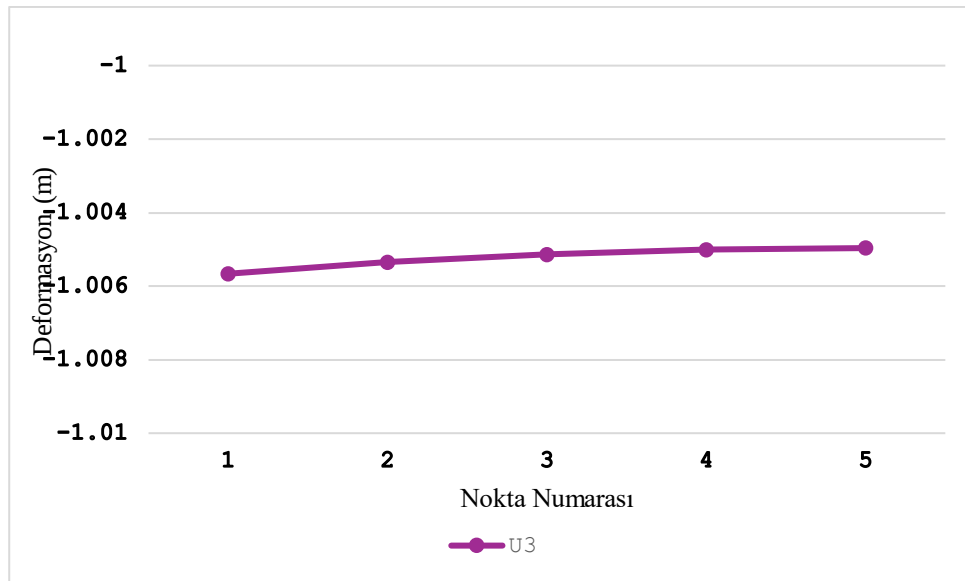


Şekil 5.19 SAP2000’de nonlinear gömülü boru modelinin analiz sonuçlarında baz alınan sağ uç bölgesi

Borunun elastik temele oturan kiriş kabulü ile tanımlanan sağ bölgesinde bulunan 5 noktanın deformasyonları Tablo 5.11’de ve deformasyon görülen bölgedeki noktaların deformasyon değerlerinin çizgi grafiği Şekil 5.20’de verilmiştir.

Tablo 5.11 Gömülü borunun sağ uç bölgesindeki noktaların yer değiştirme değerleri

Nokta No	U3 (m)
1	-0,401775
2	-0,467569
3	-0,534136
4	-0,600217
5	-0,66443
6	-0,401775



Şekil 5.20 Gömülü borunun sağ uç bölgesindeki noktaların yer değiştirme değerleri grafiği

Grafiğe göre deformasyon değerleri yaklaşık olarak -1,006 m ile -1,004 m arasında değişmektedir. Bu, sağ uç bölgesindeki deformasyonun oldukça düşük bir aralıkta ve neredeyse sabit olduğunu göstermektedir. Bu eğilim, sağ uç bölgesindeki noktalarda dış kuvvetin etkisinin homojen dağıldığını ya da bu bölgedeki yapısal sabitlemenin daha güçlü olabileceğini göstermektedir.

Deformasyon eğrisi neredeyse yatay ve sabit bir çizgi göstermektedir. Bu, borunun sağ uç bölgesindeki deformasyonların oldukça düşük olduğunu ve kuvvetin bu bölgede nispeten dengeli bir şekilde dağıldığını işaret etmektedir.

Bu bölgedeki deformasyonun sabit olması, borunun bu kısmında yer alan malzemenin elastik sınırları içinde olduğunu ve herhangi bir önemli plastik deformasyon yaşanmadığını gösterir. Deformasyonlar arasında çok az fark olması, borunun sağ uç bölgesinde kuvvetin düzenli ve istikrarlı bir şekilde aktarıldığını göstermektedir.

Borunun sağ uç bölgesinde sabitlenen noktalar, uç noktada daha az deformasyonun oluşmasına neden olabilir. Borunun uç kısımlarının sabitlenmiş olması ya da kuvvetin merkezde yoğunlaşıp uçlara doğru azalarak yayılması, bu bölgedeki deformasyonların sınırlı kalmasına yol açmış olabileceği yorumu yapılmıştır.

Grafikteki bu sabit deformasyon değerleri, borunun sağ ucunda etkili olan kuvvetlerin yer değiştirme üzerinde belirgin bir etki yaratmadığını, dolayısıyla bu bölgedeki yapısal bütünlüğün daha yüksek olduğu yorumu yapılmıştır.

Borunun sağ uç bölgesinde deformasyonlar oldukça sınırlı olduğundan, bu bölgedeki malzemenin elastik davranış gösterdiği ve kalıcı bir şekil bozukluğu yaşanmadığı söylenebilmektedir. Eğer sağ uç bölgesi iyi sabitlenmişse, bu bölgedeki deformasyonlar minimum düzeyde kalır ve yapısal dayanım yüksek olması beklenmektedir.

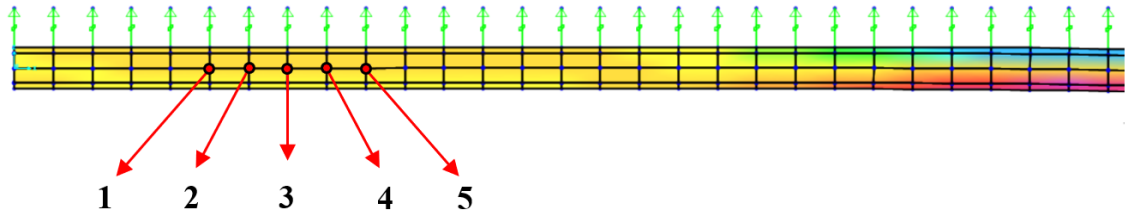
Deformasyonun -1,006 m civarında sabit kalması, yer değiştirme kuvvetinin bu bölgede elastik sınırları aşmadığını gösterir.

Sonuç olarak borunun sağ uç bölgesindeki deformasyon değerlerinin oldukça sabit ve düşük aralıkta kalması, bu bölgede yapısal bir stabilite olduğunu göstermektedir. Bu, sağ uca yakın noktaların kuvvet karşısında daha az deformasyon yaşadığını ve elastik sınırlar içinde kaldığını işaret eder. Dolayısıyla, borunun merkez bölgelerine göre sağ uç bölgesi, daha düşük deformasyona maruz kalmış ve yapısal olarak daha az etkilenmiştir.

Bu veriler, borunun uç bölgelerindeki sabitlemenin oldukça başarılı olduğunu ve kuvvetin büyük kısmının daha çok merkez bölgelere dağıldığını da kanıtlamaktadır.

5.2.4. Borunun sol uç bölgesindeki noktaların baz alınması

Bu alt başlıkta analiz sonuçları yine tablolar ve grafikler oluşturulup yorumlanırken tasarlanan gömülü sürekli borunun elastik temele oturan kiriş varsayımı ile orta bölgeye göre daha az deformasyon beklenen sol uç bölgesindeki Şekil 5.21’de gösterildiği gibi 5 nokta baz alınmıştır.

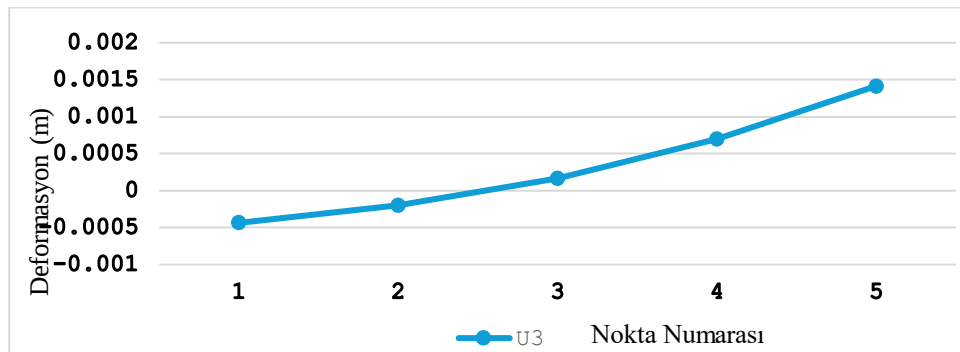


Şekil 5.21 SAP2000’de nonlinear gömülü boru modelinin analiz sonuçlarında baz alınan sol uç bölgesi

Borunun elastik temele oturan kiriş kabulü ile tanımlanan sol bölgesinde bulunan 5 noktanın deformasyonları Tablo 5.12’de ve deformasyon görülen bölgedeki noktaların deformasyon değerlerinin çizgi grafiği Şekil 5.22’de verilmiştir.

Tablo 5.12 Gömülü borunun sol uç bölgesindeki noktaların yer değiştirme değerleri

Nokta No	U3 (m)
1	-0,401775
2	-0,467569
3	-0,534136
4	-0,600217
5	-0,66443
6	-0,401775



Şekil 5.22 Gömülü borunun sol uç bölgesindeki noktaların yer değiştirme değerleri grafiği

Grafiğe göre deformasyon değerleri -0,0005 m ile 0,0015 m arasında değişmektedir. Sol uç bölgesinde gözlenen bu değişim, borunun sol uç kısmında bir deformasyon eğilimi olduğunu göstermektedir. Sol uç bölgesindeki deformasyonun pozitif yöne doğru artması, bu bölgedeki yer değiştirme kuvvetinin, borunun diğer bölümlerine kıyasla farklı bir şekilde etki ettiğini işaret etmektedir.

Grafik lineer bir artış eğilimi göstermektedir. Nokta numarası arttıkça deformasyon değerleri de sürekli artmaktadır. Bu, sol uç bölgesine uygulanan kuvvetin artarak etkisini gösterdiği anlamına gelebilmektedir.

İlk nokta civarında çok küçük bir negatif deformasyon varken, sonraki noktalarda deformasyonun pozitif bir değere geçmesi, sol uç bölgesindeki kuvvetlerin ilk noktaya yakın yerlerde borunun yüzeyinde çekme etkisi yaratmış olabileceğini göstermektedir. Bu, uç noktaya yakın bölgedeki yapının yük altında elastik bir davranış sergilediğini göstermiştir.

Deformasyonun küçük ve lineer şekilde artması, sol uç bölgesinde elastik bir davranışın hakim olduğunu göstermektedir. Bu, malzemenin yer değiştirme kuvvetine karşı dirençli olduğunu ve elastik sınırlar içinde hareket ettiğini ifade eder.

Grafik üzerinde gözlenen düzenli artış, deformasyonun daha çok elastik davranış sınırları içinde kaldığını ve malzemenin henüz plastik bir deformasyon aşamasına ulaşmadığını işaret eder. Malzeme bu koşullar altında kuvvet kaldırıldığında eski haline dönebilir.

Deformasyonun her bir noktada artması, sol uç bölgesine uygulanan kuvvetin bu bölgeye doğru yöneldiğini ya da burada odaklandığını göstermektedir. Borunun bu bölgesinde çekme veya basınç etkisi nedeniyle meydana gelen deformasyon artışı, boru boyunca kuvvetin düzenli bir şekilde yayıldığını ve uç noktaya doğru deformasyonun arttığını göstermektedir.

Sol uç bölgesinin deformasyonun en düşük seviyede olduğu bölgelerden biri olması, yapısal olarak kuvvetin büyük bir kısmının bu noktadan diğer noktalara aktarıldığı yorumunu yaptırmaktadır.

Deformasyon değerleri genel olarak oldukça küçük olduğu için bu bölgede herhangi bir büyük gerilim birikmesi veya yapısal bütünlük kaybı olduğu söylenemez. Borunun sol uç bölgesindeki malzeme, dış kuvvetlere karşı başarılı bir şekilde direnç göstermekte ve yapısal bütünlüğünü korumaktadır.

Sonuç olarak gömülü borunun sol uç bölgesinde gözlenen deformasyon, düzenli ve lineer bir artış göstermektedir. Bu durum, borunun bu bölgesinde elastik bir

deformasyon olduğunu ve kuvvetin bu bölgeye doğru odaklandığını göstermektedir. Deformasyonun düşük seviyelerde kalması, malzemenin elastik sınırlar içinde olduğunu ve herhangi bir kalıcı şekil bozukluğu yaşanmadığını işaret eder. Borunun sol uç bölgesi, yapısal olarak sağlamlığını korumakta ve uygulanan kuvvetleri etkili bir şekilde taşımaktadır.

5.3. Sonuçların Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Bu tez çalışmasında, kalıcı zemin deformasyonlarına maruz kalan gömülü çelik boru hatlarının deprem etkisi altındaki davranışı doğrusal (linear) ve doğrusal olmayan (nonlinear) analiz yöntemleri kullanılarak ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, boru hattı–zemin etkileşiminin doğrusal olmayan doğasının yapısal yanıt üzerindeki etkilerini ortaya koymak ve geleneksel doğrusal analiz yaklaşımlarının bu tür karmaşık problemlerde ne ölçüde yetersiz kaldığını değerlendirmektir. Elde edilen bulgular, doğrusal olmayan analizlerin boru hatlarının sismik performansının doğru biçimde değerlendirilmesinde kritik bir role sahip olduğunu açıkça göstermektedir.

Doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre, fay kesişim bölgesinde maksimum aksenal gerinim değeri %0,65 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, API X60 çeliği için kabul edilen akma gerinimi olan %0,2'nin yaklaşık üç katına karşılık gelmektedir. Bu durum, boru hattının elastik davranış sınırlarını aştığını ve plastik şekil değiştirmelerin başladığını açık biçimde ortaya koymaktadır. Dolayısıyla boru hattının deprem etkisi altında yalnızca elastik bir eleman olarak davranmadığı, malzemenin doğrusal olmayan davranışının sistem tepkisinde belirleyici olduğu görülmüştür.

Gerilme dağılımları ayrıntılı olarak incelendiğinde, özellikle fay düzlemi çevresinde belirgin bir asimetrik gerilme yoğunlaşması olduğu tespit edilmiştir. Borunun bir tarafında çekme etkisi baskın hale gelirken, karşı tarafında basınç etkisiyle plastikleşme meydana gelmiştir. Analizlerde elde edilen maksimum eşdeğer (Von Mises) gerilme yaklaşık 540 MPa olup, bu değer malzemenin akma dayanımının yaklaşık %30 üzerinde bir seviyeye karşılık gelmektedir. Bu sonuç, boru hattının fay kesişim bölgesinde ileri düzey plastik davranış geliştirdiğini ve bu bölgenin hasar açısından kritik bir konumda olduğunu göstermektedir.

Yer değiştirme sonuçları, boru hattı davranışının zemin özelliklerine son derece duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Borunun faydan uzak orta bölgelerinde yer değiştirmelerin 15–25 mm aralığında kaldığı, buna karşın fay zonunda yer değiştirmelerin 85 mm'ye kadar yükseldiği belirlenmiştir. Bu önemli fark, zemin rijitliği, zemin–boru

sürtünme katsayısı ve zemin yaylarının doğrusal olmayan özelliklerinin boru davranışı üzerindeki doğrudan etkisini yansıtmaktadır. Zemin rijitliğinin artması durumunda boru deformasyonlarının kısıtlandığı, buna karşılık gerilme yığılmalarının belirgin biçimde arttığı gözlenmiştir. Daha yumuşak zemin koşullarında ise boru daha büyük deformasyonlar yapabilmekte ve bu sayede deprem enerjisinin daha geniş bir alana yayılması mümkün olmaktadır.

Bu durum, mühendislik açısından önemli bir denge problemine işaret etmektedir. Zemin koşullarının aşırı sert olması, boru hattının deformasyon yapabilme kapasitesini sınırlandırarak kırılma riskini artırmakta; aşırı yumuşak zeminler ise büyük yer değiştirmelere neden olarak kullanılabilirlik, hizmet verebilirlik ve işletme güvenliği açısından olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Bu nedenle boru hatlarının tasarımında yalnızca boru malzemesi özelliklerinin değil, aynı zamanda zemin rijitliği, gömülme derinliği ve zemin sıklığı gibi parametrelerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Çalışma sonuçları, uygun zemin koşullarının boru güvenliği açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Doğrusal ve doğrusal olmayan analiz sonuçlarının karşılaştırılması, iki yaklaşım arasındaki farkın yalnızca sayısal büyüklüklerde değil, aynı zamanda tasarım anlayışı açısından da belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Doğrusal analiz modelinde maksimum eksenel gerinim %0,18 olarak hesaplanmış ve boru hattı tamamen elastik davranış sergiliyor gibi değerlendirilmiştir. Ancak aynı yükleme ve sınır koşulları doğrusal olmayan analizler altında incelendiğinde, gerinim değerinin %0,65'e yükseldiği ve yaklaşık 3,5 kat artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu sonuç, doğrusal analizlerin boru hattının gerçek davranışını önemli ölçüde hafife aldığını göstermektedir.

Benzer biçimde, toplam yer değiştirme değerleri doğrusal analizlerde yaklaşık 25 mm seviyesinde kalırken, doğrusal olmayan analizlerde bu değer 85 mm'ye kadar yükselmiştir. Yaklaşık üç katlık bu fark, zemin–boru etkileşiminin doğrusal olmayan doğasının ihmal edilmesi durumunda sistemin gerçek deformasyon kapasitesinin ciddi biçimde göz ardı edileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca doğrusal olmayan analizlerde elde edilen gerilme ve deformasyon dağılımları, boru hattının fay kesişim bölgesinde plastik mafsallaşmaya benzer davranışlar geliştirdiğini göstermiştir. Bu durum, üstyapı mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan hasar odaklı değerlendirme yaklaşımlarının altyapı sistemleri için de geçerli olduğunu ortaya koymaktadır.

Enerji birikimi ve enerji yutma kapasitesi açısından yapılan değerlendirmeler de doğrusal olmayan analizlerin önemini desteklemektedir. Doğrusal analizlerde sistemde

depolanan elastik enerjinin yaklaşık 9 kJ/m olduğu, doğrusal olmayan analizlerde ise bu değerin yaklaşık 24 kJ/m seviyesine ulaştığı belirlenmiştir. Bu sonuç, sistemin doğrusal olmayan koşullar altında daha fazla enerji sönümleyebildiğini ve kalıcı deformasyon kapasitesinin devreye girdiğini göstermektedir. Enerji temelli bu yaklaşım, boru hattı davranışının yalnızca gerinim ve yer değiştirme büyüklükleriyle değil, aynı zamanda enerji dağılımı açısından da değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, bu tez çalışması doğrusal olmayan analizlerin gömülü boru hatlarının deprem performansının değerlendirilmesinde vazgeçilmez bir araç olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Doğrusal analizler, sistemin güvenli olduğu yönünde yanıltıcı bir izlenim oluşturabilmekte; buna karşılık doğrusal olmayan analizler, boru hattının gerçek davranışını ortaya koyarak daha gerçekçi ve güvenli tasarım kararlarının alınmasına olanak sağlamaktadır. Özellikle enerji iletim hatları, doğalgaz ve petrol boru hatları gibi yüksek önem derecesine sahip altyapı sistemlerinde doğrusal olmayan analizlerin kullanılması, çağdaş mühendislik yaklaşımının temel bir gerekliliği olarak değerlendirilmektedir.

6. KAYNAKÇA

- Bao, X., & Li, S. (2023). Experimental study of deep-burial underground structures subjected to multiple 45-degree side-top far-field explosions. *Tunnelling and Underground Space Technology*.
- Demirci, H. E., & Bakir, B. S. (2018). Experimental and numerical modelling of buried pipelines crossing reverse faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 78, 202-207.
- Francisco, C.-D.-A., & Valdés-Castro, J. (2002). Finite element structural analysis of buried pipelines. *Engineering*.
- Karamitros, D. K., Bouckovalas, G. D., & Kouretzis, G. P. (2007). Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 200-211.
- LGA Türkiye. (2014). *Sismik alarm*. <https://sismikalarm.com.tr/similasyon>
- American Lifelines Alliance (2001). *Guideline for the design of buried steel pipe*.
- Liu, W., Hou, M., & Zhang, J. (2018). The stiffness of axial pipe-soil springs and axial joint springs tested by artificial earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- Madjdabadi, B., & Vaziri, B. V. (2016). Experimental evaluation of a distributed Brillouin sensing system for measuring extensional and shear deformation in rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1-10.
- Madjdabadi, B., & Vaziri, B. V. (2017). Experimental evaluation of a distributed Brillouin sensing system for detection of relative movement of rock blocks in underground mining. *Tunnelling and Underground Space Technology*.
- O'Rourke, T. D., & Jeon, S.-S. (2009). Underground lifeline system performance during earthquakes. *15th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Rahimzadeh Rofooei, F., Attari, N. K., & Jalali, H. H. (2017). New method of modeling the behavior of buried steel distribution pipes subjected to reverse faulting. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*.
- Sahoo, S., & Bandyopadhyay, M. (2014). Seismic behaviour of buried pipelines: 3D finite element approach. *Advances in Civil Engineering*.
- Sarvanis, G. C., & Asteris, P. G. (2017). Permanent earthquake-induced actions in buried pipelines: Numerical modeling and experimental verification. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*.
- Uckan, E., Bakir, B. S., & Ozdemir, Z. (2015). A simplified analysis model for determining the seismic response of buried steel pipes at strike-slip fault crossings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- Yoshizaki, K., Tsukamoto, D., & O'Rourke, T. D. (2001). Large-scale experiments of permanent ground deformation effects on steel pipelines. *International Conference on Earthquake Engineering*.

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Elif Seray Saygın

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2018-2022, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

Yayınları ve Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- 2025, Sözlü Bildiri, Kalıcı Zemin Deformasyonları Altında Gömülü Boru Hatlarının Basitleştirilmiş Analizi, ICHEAS 10th International Conference on Health, Engineering and Applied Sciences, Dubai, Birleşik Arap Emirlikleri, 1–3 Kasım 2025.
- Saygın, E. S. (2025). Kalıcı Zemin Deformasyonları Altında Gömülü Boru Hatlarının Basitleştirilmiş Analizi. ICHEAS 10th International Conference on Health, Engineering and Applied Sciences Bildiri Kitabı, s. 159.
- 2025, Sözlü Bildiri, Seismic Performance of Buried Continuous Pipelines Subjected to Permanent Ground Deformations, 5th International Siirt Conference on Scientific Research, Siirt, Türkiye, 28–30 Kasım 2025.
- Saygın, E. S. (2025). Seismic Performance of Buried Continuous Pipelines Subjected to Permanent Ground Deformations. 5th International Siirt Conference on Scientific Research Bildiri Kitabı, s. 31.