



Determination of performance criteria of steel pipes subjected to axial compressive load and bending moment

Ercan Şerif Kaya* 

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Alanya Alaaddin Keykubat University, 07450, Antalya, Türkiye

Highlights:

- An inverse relationship occurs between axial loading and bending capacities for steel pipes
- Premature failures trigger buckling and cause advanced type of damage mechanisms
- Limit state values are reached at lower rotation angles due to high D/t ratio

Keywords:

- Buried pipeline
- Limit states
- Axial compressive load
- Bending moment
- Combined loading

Article Info:

Research Article

Received: 21.11.2021

Accepted: 02.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1026521

Correspondence:

Author: Ercan Şerif Kaya
e-mail:
ercan.kaya@alanya.edu.tr
phone: +90 242 510 61 20

Graphical/Tabular Abstract

Lifelines are one of the most critical infrastructure components that are given to ensure that water, oil and gas transmissions are properly functioning without any service disruption in the aftermath of an earthquake event. Steel pipes are generally designed and oriented on the fault line to meet tensile loads. However, such systems may be subjected to axial compressive loads (combined with bending loads in some cases) and experience premature failures prior to severe damages as seen in Figure A.

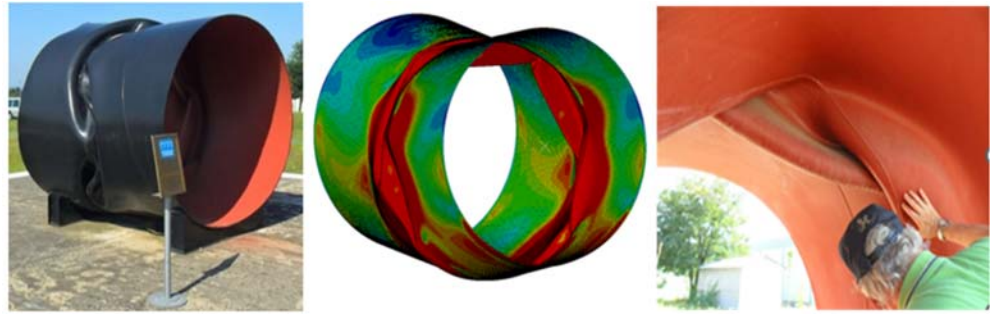


Figure A. Failure mechanism of Thames water pipeline after 1999 Kocaeli earthquake

Purpose:

It is of great importance to understand the progression of post-buckling damage mechanism of steel pipes when subjected to axial compressive and bending loads. In this study, it is mainly aimed to predict the plastic deformation level and principal limit states for given steel pipes with specific D/t ratio and mechanical properties under combined loads.

Theory and Methods:

Three different types of pipe profile are chosen that correspond to the characteristics of water transmission, gas and oil pipelines in Turkey. These high strength steel pipe profiles are modeled by using finite element program and subjected to axial compressive loads followed by bending loads. Capacity demand curves of these pipes are obtained numerically after conducting validation studies in accordance with a previous experimental research work.

Results:

The limit state of high strength steel pipes due to axial load and bending conditions is associated with local buckling which mainly depends on mechanical and geometrical parameters of pipe, initial imperfection and internal pressure. Thames water pipe (with 122 of D/t ratio) has reached its 90% of failure mode when subjected to 4.48° of rotation angle. As for TANAP natural gas pipe (D/t ratio is 50) and BTC oil pipe (D/t ratio is 46), limit state has been reached after 18.77° and 26.64° rotation angles, respectively.

Conclusion:

It is seen that there is an inverse relationship in between axial loading and bending capacities of steel pipes. The limit state values for high strength steel pipes are reached at lower rotation angles due to high D/t ratio. Axial compressive loads give rise to premature failures and promote plastic deformations even under small displacement values. These premature failures form plastic hinge points which are considered to be the beginning of buckling and cause advanced type of buckling damage mechanisms in the following steps.



Eksenel basınç kuvveti ve eğilme momentine maruz çelik boruların performans kriterlerinin saptanması

Ercan Şerif Kaya*

Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 07450, Antalya, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Birleşik yüklemeye maruz çelik boruların tasarımı
- Gömülü çelik boruların performansa dayalı tasarım kriteri
- Yüksek dayanımlı çelik boruların limit durumları

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 21.11.2021

Kabul: 02.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1026521

Anahtar Kelimeler:

Gömülü boru hattı,
limit durumlar,
eksenel basınç yükü,
eğilme momenti,
birleşik yükleme

ÖZ

Gömülü boru hatları su, doğalgaz ve petrol gibi hayati öneme sahip ürünlerin taşınması ve dağıtılması amacıyla kullanılan kritik alt yapı elemanlarıdır. Bu tür enerji nakil sistemleri, güzergahları üzerinde fay hatlarıyla kesişebilmekte, kesişim açısına bağlı olarak kalıcı zemin deformasyonları etkisinde çekme ve basınç gerilmelerine maruz kalabilmekte ve ciddi hasarlar alabilmektedirler. Tasarım ilkesi açısından çelik borularının çekme göçmesine maruz kalması beklenir. Fakat mecburi güzergâh sebebiyle ters ya da bazı yanal atımlı fayların kesilmesi gerektiği durumlarda net eksenel basınç kuvvetleri altında prematüre göçmeler yaşanabilmektedir. Mevcut yönetmeliğe göre, tasarım esasları kesintisiz kullanım ve kontrollü hasar durumlarına karşılık gelen maksimum eksenel çekme ve basınç birim yer değiştirme değerlerine göre belirlenmektedir. Bu çalışma kapsamında, özellikle borularda basınç kaybı ve hasar oluşumuna sebebiyet veren eksenel basınç ve eğilme momenti altındaki limit durumları incelenmiştir. Bu amaçla, Türkiye’de bulunan mevcut boru hatlarını karakterize edecek şekilde, Kullar su isale, Trans-Anadolu-Doğalgaz (TANAP) ve Bakü-Tiflis-Ceyhan Ham Petrol (BTC) boru hatlarına ait D/t oranları ile malzeme karakteristik özellikleri dikkate alınarak üç boyutlu sonlu elemanlar modeli yardımıyla birleşik yüklemeye koşulları altındaki davranışları incelenmiştir. Böylelikle, ötelenme miktarlarına ve rotasyon miktarlarına bağlı olarak borularda oluşacak limit durumlar belirlenmiştir. Söz konusu çalışmada sonuçlarının ülkemizdeki boru hatlarının performans tabanlı tasarımlarında kullanılması beklenmektedir.

Determination of performance criteria of steel pipes subjected to axial compressive load and bending moment

H I G H L I G H T S

- Design of steel pipes under combined loads
- Performance-based design criteria of buried steel pipes
- Limit states of high strength steel pipes

Article Info

Research Article

Received: 21.11.2021

Accepted: 02.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1026521

Keywords:

Buried pipeline,
limit states,
axial compressive load,
bending moment,
combined loading

ABSTRACT

Buried pipelines are critical infrastructure components which employed for delivering and distributing vital products such as water, gas and oil. Such energy transmission lines might cross fault lines on their routes, undergo tension and compression strains due to crossing angle under permanent ground deformations and severely damaged. Steel pipe failures are expected to be due to tensile loads in terms of design issues. However, in cases where reverse or some strike-slip faults have to be crossed due to forced routing, premature failures may occur under net axial compressive loads. According to the current code, the design principles for pipelines are specified due to maximum axial tension and compression deformation values correspond to uninterrupted and controlled damage cases. In this study, limit states due to axial deformations under axial compressive and bending load conditions, which mainly cause loss of pressure integrity and pipe damages, are investigated. For this purpose, corresponding D/t ratios and material properties are considered to characterize the existing pipelines in Turkey such as, Kullar water transmission, Trans-Anatolian-Natural Gas (TANAP) and Baku-Tbilisi-Ceyhan Crude Oil (BTC) pipelines by using three-dimensional finite element model under combined loading conditions. In this way, limit states due to displacements and rotation demands are specified. The results of this study are expected to be used in the performance-based design of steel pipes in Turkey.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : ercan.kaya@alanya.edu.tr / Tel: +90 242 510 61 20

1. Giriş (Introduction)

İçme suyu, doğalgaz ve petrol ürünlerinin iletiminde kullanılan nakil hatlarının depremleri takip eden süreçte bölge halkının yaşamsal ihtiyaçlarını kesintisiz olarak temin etmeye devam etmesi oldukça büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda, yaşam hatları olarak da adlandırılan boru hatları üzerinde oluşabilecek hasarlara bağlı herhangi bir kesinti veya kaçak sebebiyle sağlık sorunlarından çevre felaketlerine, ekonomik kayıplardan can kayıplarına kadar birçok istenmeyen durumla karşılaşmak mümkündür [1-4]. Deprem etkisine maruz kalmış boru hatları üzerinde yapılmış olan çalışmalarda, borular üzerinde deneyimlenmiş en ciddi hasarların fay kesişim bölgelerindeki ani kalıcı zemin deformasyonlarına bağlı olarak meydana geldiği bilinmektedir. Bununla birlikte çok nadir de olsa dalga yayılımına bağlı olarak bu hatlarda geçici kesintiler olduğu rapor edilmiştir [2]. Bu durumun açıklaması ise son yapılan bir çalışmaya göre, dalga yayılımı altında farklı zemin özelliklerine bağlı geçiş noktalarında görülen tanecik davranışının birbirine zıt yönde hareket eğiliminde olması ve akordeon etkisi oluşturmaya başlamıştır [5]. Bu tür hasarlardan kaynaklı sızıntıların tespitleri daha zor olup bu amaçla geliştirilen alternatif yöntemler mevcuttur [6]. Günümüzde artan modelleme ve analiz kabiliyetlerine paralel olarak geliştirilen zemin-boru etkileşim modelleri yardımıyla, fay-boru kesişim noktalarındaki etkin parametrelerin boru davranışı üzerindeki etkileri [7, 8] ve farklı malzeme sınıfına ait boruların fay kesişim davranışları [9] detaylı olarak incelenmiştir. Buna göre, boruların fay kesişim noktasında özel olarak konumlandırılması ve kalıcı yer hareketlerinin olduğu durumlarda basınç gerilmelerinin oluşmasının önlenmesi ve çekme gerilmelerine mukavemet gösterecek şekilde tasarlanmış olması gerekmektedir. Bununla birlikte, emniyetli gömme derinliği, hendek kazımı ve uygun yastıklama malzemesi kullanılması da hasar oluşumu ihtimalini azaltmak adına önem taşımaktadır. Çelik boru profillerinin su, doğalgaz ve petrol iletim hatlarında kullanılmasının yanında ayrıca yüksek dayanım özelliğine bağlı olarak çelik yapılarda da çapraz eleman olarak sıklıkla kullanıldığı ve eksenel yükler altında çalışarak yapısal performansa katkı sunduğu görülmektedir [10]. Bu bağlamda, boru profillerinin eksenel ve birleşik yükler altındaki davranışlarının daha iyi bilinmesi gerekmekte ve özellikle burkulma sonrası davranışlarının araştırılması ihtiyacı doğmaktadır.

Basınç gerilmeleri altında çelik boruların ne denli ciddi hasarlara maruz kalabileceğinin en iyi örneği 2,2 metre çapındaki Kullar çelik su isale hattıdır [3]. 1999 Kocaeli depreminde 3,0 metrelik bir yanal atımlı fay hareketi oluşmuş, bu kalıcı deformasyon neticesinde ise boru hattının fay kesişim noktasında yanlış konumlandırılmasına bağlı olarak boruların temel tasarım prensibi olan çekme gerilmelerinin yüklenilmesi yerine ciddi basınç gerilmeleri ve deformasyonlara maruz kalması ile sonuçlanmıştır. Dolayısıyla, fay kesişim noktasının etkisinde kalan boru hattının üzerinde iki noktada ağır hasar olduğu ve üçüncü bir noktada ise küçük çaplı bir yırtılma meydana geldiği gözlenmiştir. Çelik boru üzerindeki bu hasarlar, saha çalışmasında oluşturulmuş raporlardan elde edilen zemin parametreleri ve boruya ait değerlere bağlı kalınarak geliştirilmiş olan üç boyutlu sonlu elemanlar modeli yardımıyla gerçeğe uygun bir şekilde simüle edilmiş ve gerçek durumla bire bir uyumlu bir şekilde hasar mekanizmalarının olduğu gözlenmiştir [11]. Bu anlamda, kalibre edilmiş olan bu modeller yardımıyla, gerçek durumdan herhangi bir fark olmaksızın boruların deprem hareketine bağlı davranışlarını tahmin edebilmek mümkün olmakta ve ihtiyaca yönelik çalışmalar neticesinde gerek deprem öncesi (tasarım süreci) gerek deprem sonrasında gerekli önlemlerin alınabilmesi amacıyla limit durumlara ait verilerin elde edilebilmesi mümkün olmaktadır. Ülkemizde boru hattı sistemleri deprem yönetmeliği kapsamında su, doğalgaz, petrol ve atık su sistemleri birlikte ele alınmıştır [12]. Buna

göre, karasal ve kıyı ötesi gömülü boru hatlarında oluşacak en büyük eksenel basınç ve çekme gerilmeleri kesintisiz kullanım ve kontrollü hasar durumları için verilmiş olan değerlere göre sınırlandırılmıştır. Bu çalışma kapsamında, boruların birleşik yüklemeye koşulları altında (eksenel ve eğilme yüklemeleri) maruz kaldığı basınç gerilmeleri kaynaklı limit durumlarının Türkiye'deki farklı amaçlarla kullanılmakta olan boru tiplerini karakterize edecek şekilde belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla mevcut projelerden içme suyu hattına karşılık olarak Kullar su isale hattı, doğalgaz hattına örnek olması için TANAP boru hattı ve petrol hatları için ise Bakü-Tiflis-Ceyhan (BTC) boru hattına ait malzeme özellikleri referans seçilerek bir çalışma yürütülmüştür.

Özellikle çelik yapılarda ve kafes sistemlerde yüksek dayanım özelliğine bağlı olarak sıklıkla kullanılan çelik boru profillerinin davranışını incelemek amacıyla yürütülmüş deneysel bir araştırmaya ait veriler, bu çalışmanın amacı olan limit durumların güvenilir bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla kalibrasyon çalışmalarında kullanılmıştır [13, 14]. Dolayısıyla, öncelikle üç boyutlu deney modelinin sonlu elemanlar ortamında modellenmesi ve doğrulanması yapılmış ve ardından Türkiye'deki karakteristik boru hatlarına ait kesit ve malzeme özellikleri dikkate alınarak özellikle eksenel basınç kuvveti ve eğilme momentleri altındaki çelik boruların performans kriterlerinin belirlenmesine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmanın neticesinde elde edilecek veriler ışığında, Türkiye'deki boruların performansa dayalı tasarım esaslarının belirlenmesine ait çalışmalar yapılması hedeflenmektedir.

2. Sonlu Elemanlar Modeli (Finite Element Model)

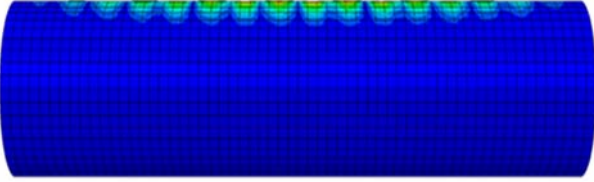
Bir önceki kısımda bahsi geçen deneysel çalışmada [13], iki farklı uzunlukta ve iki farklı kesit özelliğine sahip boru profili, deney numunesi olarak kullanılmıştır, Şekil 1. Buna göre, kısa olan boru numuneleri 1,5 metre uzunlukta olup (S) harfi ile gösterilirken, uzun olan boru numuneleri 5,0 metre uzunlukta olup (L) harfiyle gösterilmiştir. Ayrıca, 355,6 mm çapında ve 12,5 mm et kalınlığında olan kesit profili (A) kesit, 323,9 mm çaplı ve 10,0 mm et kalınlığındaki kesit profili ise (B) kesit olarak ifade edilmiştir. Böylece, AS, AL, BS veya BL olarak isimlendirilmiş numunelere ait boyut özellikleri yukarıda verilen değerlere uygun olacak şekilde görülebilmektedir.

Deneysel test düzeneğinin ve numunelerinin maruz kalacağı yüklemeye prosedürünün sonlu elemanlar ortamında modellenmesi ve kalibrasyon çalışmaları için ABAQUS/CAE yazılımı tercih edilmiştir [15]. Çelik borulara ait kesitler için kabuk elemanlar (S4R) kullanılmış, mesnet koşulları için tek taraflı eksenel yüklemeye izin vermek amaçlı sabit ve hareketli mesnetler tanımlanmıştır. Boruların uç noktalarında ise, ötelenme ve dönme serbestliklerinin tek bir noktada temsil edildiği bağlantı (TIE) sınırlaması tanımlanmış ve sınır koşulları bu noktaları temsil eden referans noktalarına atanmıştır. Plastik malzeme davranışı için TS590 çelik sınıfına ait mekanik özellikler plastik davranış modeli tanımlanmasında kullanılmıştır.

Deneysel bir çalışmanın sonlu elemanlar metodu yardımıyla modellenmesi esnasında gerçek davranışın yakalanabilmesi adına modele geometrik kusur tanımlanması oldukça önemlidir. Üretim esnasında numuneler üzerinde oluşan rezidüel gerilmelerden kaynaklı kusurların simülasyon modeline tanıtılmasını sağlamak amacıyla belirli bir noktaya kuvvet uygulanması, deplasman tanımlanması veya öz değer analizinden elde edilen mod şekillerinin başlangıç geometrisi olarak kullanılması sıklıkla tercih edilen yöntemlerdendir. Bu çalışma kapsamında, sadece eğilme etkisi altındaki borulardan elde edilen mod şekilleri dikkate alınmıştır (Şekil 2).



Şekil 1. Deneysel test altındaki kısa ve uzun boru numuneleri [13] (Short and long pipe samples under experimental test)



Şekil 2. Eğilme yüklemesine göre mod şekli ve başlangıç kırışıklığı (Initial wrinkles due to mod shape under bending loading)

Deneysel çalışmaya ait yükleme prosedüründe, öncelikle her bir numune profiline ait (AS, AL, BS ve BL) kritik burkulma yükünü belirlemek amacıyla aksel yük etkisi altındaki reaksiyon değerleri bulunmuştur. Buna göre AS, AL, BS ve BL için kritik aksel burkulma yükleri 10254, 7961, 10857 ve 7812 kN olarak hesaplanmıştır. Birleşik yükleme durumu için kısa boru (S) numunelerine, ilk olarak kritik aksel burkulma yüklerinin sırasıyla %13, 25, 50 ve 75'ine karşılık gelen yük değerleri uygulandıktan sonra boru eğilme yüküne maruz bırakılarak burkulmanın gerçekleştiği durumdaki maksimum moment ve dönme talepleri Tablo 1 içerisinde belirtildiği şekliyle (POURNARA) elde edilmiştir. Yine aynı tablo içerisinde sonlu elemanlar analizine göre (SEA) elde edilen değerler de gösterilmiştir.

Benzer şekilde uzun borular (L) için de kritik aksel burkulma yükleri %25, 50 ve 75 oranında aksel yük olarak boru numunelerine etki ettirilmiş ve sonrasında sabit aksel yük altında elde edilen maksimum moment ve dönme açısı talepleri Tablo 2 içerisinde deneysel ve analiz sonuçlarını içerecek şekilde verilmiştir.

Yükleme prosedürü neticesinde elde edilen deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar çalışması neticesinde elde edilen maksimum moment değerleri kısa boru numuneleri için Şekil 3 üzerinde, uzun boru numuneleri için Şekil 4 üzerinde gösterilmiştir.

Buna göre, "POURNARA" olarak adlandırılmış olan deneysel çalışma sonuçlarının "SEA" eğrisi olarak gösterilen nümerik analiz sonuçlarıyla son derece uyumlu olduğu görülmüştür. Bu çalışma ve önceden yapılmış benzer çalışmalarda da [16-17] gözlemlenmiş olduğu üzere, sürekli veya kaynaklı borularda küçük deplasmanlar altında dahi borunun kritik burkulma durumuna geldiği dolayısıyla mümkün olduğunca aksel basınç yüklemelerinden kaçınılması gerekliliği özellikle ince duvarlı ($D/t > 20$) borular için dikkat edilmesi gereken bir husus olarak ortaya çıkmaktadır. İç basıncın olmadığı ve sadece aksel yükleme ile ilave eğilme momentleri altındaki (birleşik yükleme koşulları) boru davranışları incelendiğinde, aksel yük

artışına paralel olarak borudaki moment taşıma kapasitesinin azaldığı görülmektedir.

Yükleme prosedürü tamamlandıktan sonraki aşamada, boru numunelerinin deforme olmuş durumları dikkate alınarak mesnet bölgelerinde görülen toplam dönme açıları Şekil 5 ve Şekil 6 üzerinde gösterildiği şekliyle elde edilmiştir. Şekil 3 ve Şekil 4 de görülen eğrilere benzer şekilde moment kapasitesini düşmesi numunelerin yüksek aksel yük almasına bağlı olarak geliştiği için düşük aksel yüklerde dönme taleplerinin de fazla olduğu görülmektedir.

Şekil 5 içerisinde A ve B kesit profilli kısa borulara ait numunelerin maruz kaldığı aksel yükler ile dönme açısı talepleri görülmektedir. Şekil 6'da ise uzun borular için elde edilmiş değerler hem deneysel hem de nümerik analiz sonuçlarını içerecek şekilde görselleştirilmiştir.

Deneysel çalışmanın doğrulanmasının ardından Türkiye'deki mevcut boru hatlarını karakterize eden D/t oranları ve malzeme özelliklerine bağlı olarak su isale hattı, doğalgaz ve petrol taşıma hatlarının birleşik yükleme koşulları altındaki limit durumlarına ilave olarak burkulma sonrası ileri seviye boru deformasyonlarını gösteren çalışmalar sonraki kısımlarda ele alınmıştır.

3. Türkiye'deki Karakteristik İçme Suyu İsale, Doğalgaz ve Petrol Boru Hatları (Characteristic Water Transmission, Gas and Oil Pipelines in Turkey)

Ülkemizde bulunan ve servis sağlayan boru hatlarına örnek olması açısından üç farklı amaca yönelik kullanılan boru hatlarını temsil eden profiller seçilmiştir. Bunlardan 10 bar işletme basıncı ile çalışan ve 1999 Kocaeli depreminde basınç gerilmelerine bağlı aldığı hasarlar sebebiyle kapsamlı şekilde incelenmiş ve raporlanmış olan Kullar su isale hattı, şehirlerarası iletimi sağlamak amacıyla daha yüksek işletme basınçları altında çalışan (40 ila 80 bar) doğalgaz ve petrol boru hatları temsil etmesi için ise TANAP ve BTC boru hatları jenerik projeler olarak seçilmiştir.

3.1. Thames Kullar Su İsale Boru Hattı (Thames Kullar Water Transmission Pipeline)

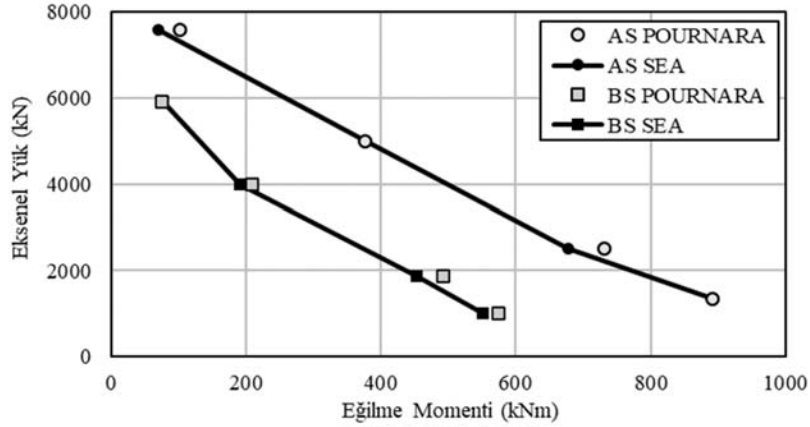
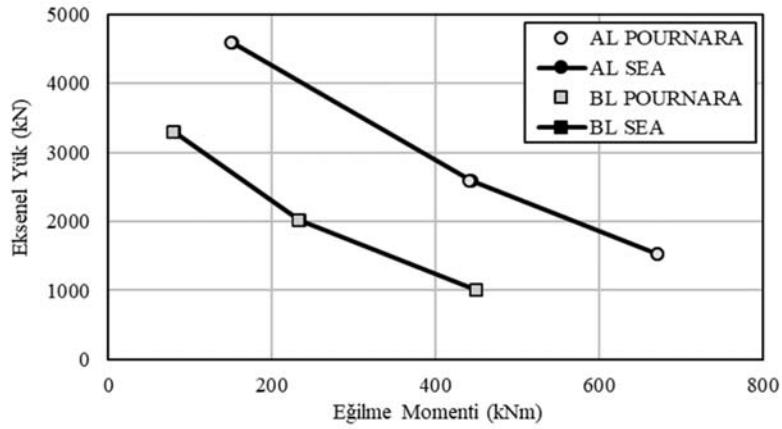
Kuzey Anadolu fay hattının Sapanca bölümünde 55 derecelik bir fay kesişimi yapmış olan Kullar su isale hattı için 2,2 metre çapına ve 18 mm et kalınlığına sahip bir çelik boru profili kullanılmıştır. Bununla birlikte kullanılan malzemenin API 5L B sınıfı (241 MPa) çelik malzemesi olduğu belirtilmiş ve 10 Bar'lık bir işletme basıncı altında hizmet vermekte olduğu rapor edilmiştir [3]. Aynı rapor içerisinde,

Tablo 1. Kısa boru numunelerinin deney ve analiz sonuçlarına göre eksenel yük, maksimum moment ve dönme açısı değerleri (Axial load, maximum moment and rotation values of short pipe samples due to experimental and analysis results)

Numune Adı	N (kN) POURNARA	Mmax (kNm) POURNARA	Dönme Açısı (°) POURNARA	Mmax (kNm) SEA	Dönme Açısı (°) SEA	Deplasman (mm) SEA
AS13	1340	891	2,6	894	2,0	0,84
AS25	2500	732	1,9	677	1,5	1,57
AS50	5000	377	1,1	378	0,8	3,14
AS75	7600	102	0,4	70	0,3	4,76
BS13	1000	575	2,4	552	1,7	0,86
BS25	1865	492	1,8	454	1,2	1,61
BS50	3980	209	1,0	191	0,5	3,43
BS75	5922	76	0,5	77	0,2	5,12

Tablo 2. Uzun boru numunelerinin deney ve analiz sonuçlarına göre eksenel yük, maksimum moment ve dönme açısı değerleri (Axial load, maximum moment and rotation values of long pipe samples due to experimental and analysis results)

Numune Adı	N (kN) POURNARA	Mmax (kNm) POURNARA	Dönme Açısı (°) POURNARA	Mmax (kNm) SEA	Dönme Açısı (°) SEA	Deplasman (mm) SEA
AL25	1530	670	4,4	671	2,6	2,53
AL50	2590	441	3,3	444	1,6	4,28
AL75	4588	150	1,7	151	0,6	7,58
BL25	1000	450	4,2	450	3,0	2,27
BL50	2020	232	3,0	234	1,4	4,59
BL75	3298	79	1,5	81	0,6	7,49

**Şekil 3.** Kısa borular için eğilme moment kapasiteleri (Bending moment capacity for short tubes)**Şekil 4.** Uzun borular için eğilme moment kapasiteleri (Bending moment capacity for long tubes)

1999 Kocaeli depreminde 3,0 metrelik yanal atımlı fay etkisi altında boru eksenine dik olarak 2,5 metrelik bir ötelenme görülmüş olduğu,

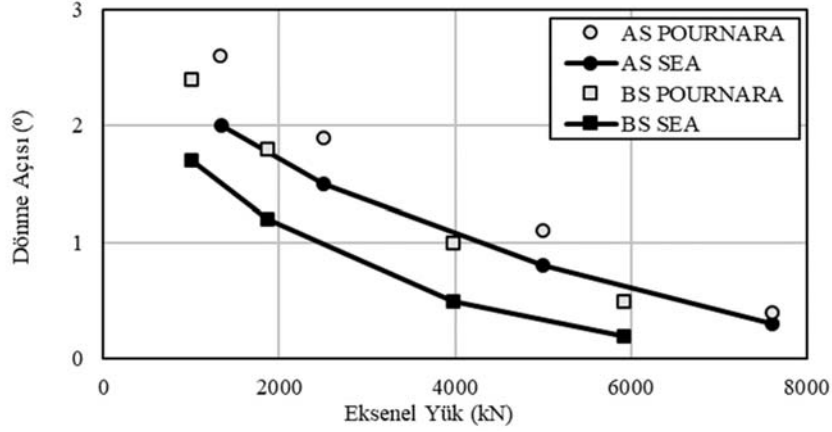
bunun neticesinde 1,7 metrelik bir eksenel kısalma olduğu ve bunun mafsal noktalarındaki ortalama birim kısalmanın %20 mertebelerine

denk gelmekte olduğu belirtilmiştir. Şekil 7 içerisinde ağır hasar almış iki noktaya ait verilen görseller ve mafsal noktalarındaki eksenel basınç yüklerine bağlı gelişen katlanma olayı görülmektedir.

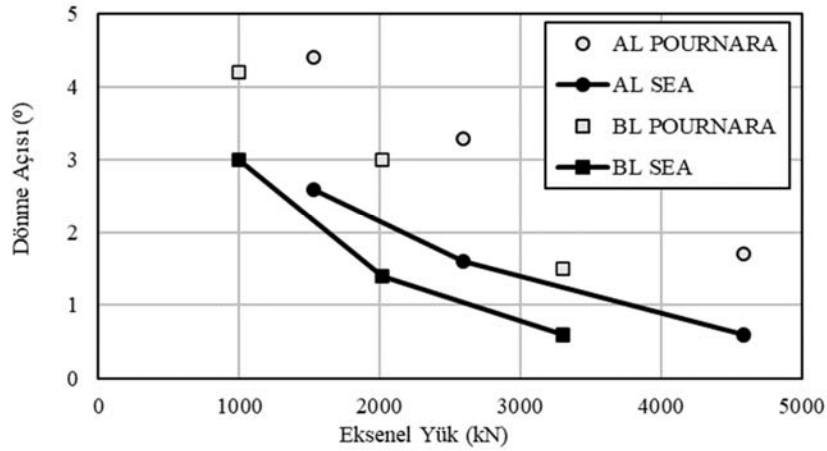
3.2. Trans Anadolu Doğalgaz Boru Hattı (Trans Anatolian Natural Gas Pipeline)

Azerbaycan doğalgazının Türkiye toprakları üzerinden geçerek Avrupa'ya iletilmesi amacıyla planlanan Trans Anadolu Doğalgaz

Boru Hattı (TANAP) toplamda 1850 km'lik bir güzergâh üzerinden geçmektedir. Hatta kullanılan boru malzemesinin API 5L X70 PSL-2 sınıfı (483 MPa) çelik malzemesi olduğu bilinmektedir. Hattın Ardahan-Eskişehir arasında kalan kısmında 140 cm (56'') çapında, Eskişehir-Edirne arasında kalan kısmında 120 cm (48'') çapında boru kullanıldığı belirtilmiştir [18]. Güzergâh üzerinde kullanılacak boru hattı et kalınlığının artan tehlikelere bağlı olarak ilgili tasarım faktörlerince belirlenmiş değerlere göre belirlendiği ifade edilmiştir. Buna göre, 140 cm çapındaki boru için kullanılan et kalınlıklarının



Şekil 5. AS ve BS kesitleri için artan eksenel yük altındaki dönme açısı talepleri
(Rotation demands under increasing axial loads for AS and BS section tubes)



Şekil 6. AL ve BL kesitleri için artan eksenel yük altındaki dönme açısı talepleri
(Rotation demands under increasing axial loads for AL and BL section tubes)



Şekil 7. Eksenel basınç yüklerine bağlı oluşan boru çapındaki azalma [11] (Reduction of pipe diameter due to axial compressive loads)

risk faktörüne göre 19,45, 23,34 ve 28,01 mm olarak alındığı belirtilmişken, 120 cm çapındaki borular için bu değerler 16,67, 20,01 ve 24,01 mm olarak belirlenmiştir. Ancak fay kesişim bölgelerinde 140 cm çaplı borular için kullanılan et kalınlığının 28,01 mm olduğu, 120 cm çaplı borular için bu değerin 24,01 mm olduğu belirtilmiştir.

3.3. Bakü-Tiflis-Ceyhan Ham Petrol Boru Hattı (Baku-Tbilisi-Ceyhan Crude Oil Pipeline)

Bakü Sangaçal terminalinden gelen ham petrolün Azerbaycan, Gürcistan ve Türkiye üzerinden geçerek Akdeniz kıyısında bulunan Ceyhan deniz terminaline taşınmasına yönelik planlanmış olan ve toplam uzunluğunun (1776 km) 1076 km'si Türkiye sınırları içerisinde geçen petrol boru hattına Bakü-Tiflis-Ceyhan (BTC) boru hattı ismi verilmiştir [19]. Bu proje kapsamında, Türkiye genelinde kullanılan boru çapı 107 cm (42") olmuşken sadece deniz kıyısına yakın bölgede 86 cm (34") çaplı boru profili tercih edilmiştir. Bununla birlikte kullanılan boru malzemesi API 5L X65 sınıfı (448 MPa) çelik malzemesine ait mekanik özelliklere sahiptir. Boruya ait et kalınlığının güzergâha bağlı olarak 9 ila 23 mm değerleri arasında sürekli olarak değiştiği gözlenmektedir. Buna göre, çalışma kapsamında yüksek basınçlı boruların sahip olması hedeflenen D/t oranlarına karşılık gelmesi amacıyla kabul edilen boru et kalınlığı 23 mm olarak alınmıştır.

4. Yüksek Dayanımlı Çelik Borular İçin Performans Kriterleri (Performance Criteria for High Strength Steel Pipes)

Yüksek dayanımlı boruların limit durumları, eksenel yük ve eğilme momenti altında oluşan bölgesel burkulma olayına bağlı olarak gerçekleşmektedir. Bölgesel burkulma olayı ise genellikle boruya ait mekanik ve geometrik parametre değerlerine, boru numunesi üzerindeki geometrik kusurlara ve içerisindeki işletme basıncına bağlı olarak gelişmektedir. Wijewickreme [20] limit durumları eksenel basınç altındaki davranışlarını %10 ve %90 göçme oluşması ihtimallerine karşılık gelecek eksenel yer değiştirme (ϵ) değerlerine bağlı olarak belirlenmiştir. Buna göre geliştirilen Eş. 1 ve Eş. 2 değerleri aşağıda verilmiştir.

$$(\epsilon_1) = 0,4 t/D \text{ (%10 göçme ihtimali)} \quad (1)$$

$$(\epsilon_2) = 2,4 t/D \text{ (%90 göçme ihtimali)} \quad (2)$$

Ülkemiz kullanılan güncel yönetmeliğe göre [12] karasal gömülü boru hatlarının kalıcı zemin deformasyonlarına bağlı kesintisiz kullanım (KK) ve kontrollü hasar (KH) durumlarına karşılık gelen en büyük eksenel basınç birim yer değiştirme değerleri ise olarak tanımlanmıştır.

$$(\epsilon_3) = 0,437 (t/D)^{1,72} [1-0,892(p/p_y)]^{-1} (E/\sigma_y)^{0,70} (1,09 - (A/t)^{0,086}) \leq 0,02 \text{ (KK)} \quad (3)$$

$$(\epsilon_4) = 1,76 t/D \leq 0,04 \text{ (KH)} \quad (4)$$

Bu denklemlerde kullanılan simgelerden t : boruya ait et kalınlığı, D : boru çapı, p : iç basınç, p_y : akma gerilmesi seviyesinde çevresel

gerilme yaratan iç basınç, E : boru malzemesine ait elastisite modülü, σ_y : akma gerilmesi, A : alın kaynak noktasında boru ucu çıkıntısı boyu ifadelerine karşılık gelmektedir. Buna göre kesintisiz kullanım ve kontrollü hasar durumları için kabul edilen en büyük yer değiştirme değerleri sırasıyla %2 ve %4 olarak belirlenmiştir.

5. Parametrik Çalışma (Parametric Study)

Parametrik çalışma için kullanılacak olan boru kesitlerine ait geometrik ve mekanik özellikler Tablo 3 içerisinde özetlenmiştir. Buna göre, belirtilen malzeme dayanımları, boru çapı (D), et kalınlığı (t) değerlerine göre üç boyutlu doğrusal olmayan sayısal model yardımıyla analizler yürütülmüştür.

Sonlu elemanlar modelinin geliştirilmesi için dikkate alınan deneysel çalışmadakinden farklı olarak kuvvet uygulanması yerine eksenel doğrultuda artan deplasman tanımları yapılmış olup ikinci aşamada ise eksenel deplasman sabit tutulurken artan eğilme yüklemesine bağlı olarak boru profillerine ait eksenel kuvvete karşılık gelen dönme açısı talepleri belirlenmiştir. Bu işlemler Tablo 3 içerisinde belirtilen tüm farklı kesit özellikleri için hem başlangıç geometrisinin oluşturulduğu mod analizleri (BUCKLE) hem de ileri seviye burkulma hasarlarının belirlendiği ikinci aşama analizlerini (RIKS) kapsayacak şekilde tekrar edilmiştir. Burkulma analizlerinde ise 10-20-30-40-50-60 mm olacak şekilde farklı deplasman tanımlarını takip eden süreçte eğilme analizleri yapılmıştır. Ayrıca, sayısal çalışmalarda kullanılan modele ait boru uzunluğunun çapa oranı 2:1 olacak şekilde güncellenmiş olup diğer tüm sınır koşulları doğrulama çalışmasındaki şartlara bağlı kalınarak gerçekleştirilmiştir.

5.1. Kullar Su İsale Boru Hattı Analizleri (Kullar Water Transmission Pipeline Analyses)

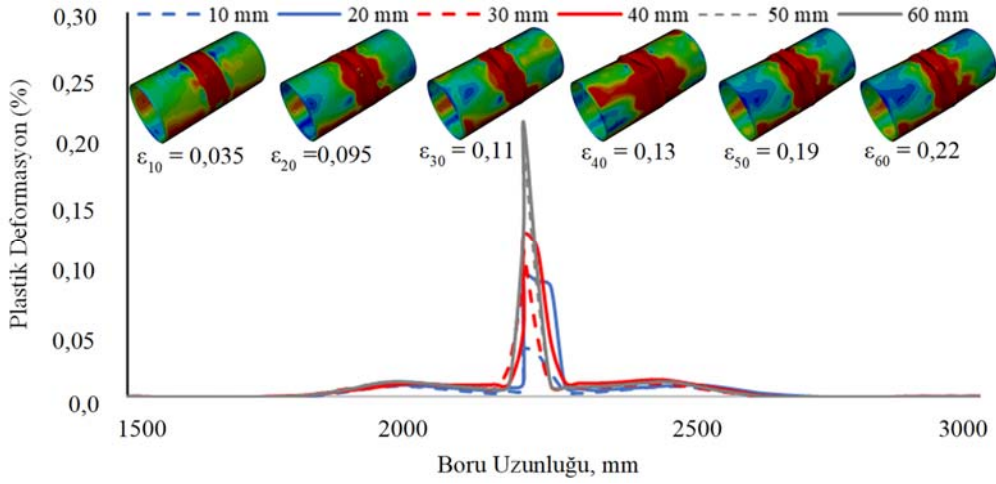
Şekil 8'de Kullar borusuna uygulanan eksenel deplasman tanımlarına göre elde edilen plastik deformasyon değerleri gösterilmiş olup her bir eksenel yüklemeye durumuna karşılık gelen deformasyon şekilleri gösterilmiştir.

Buna göre, sadece eksenel net basınç yüklerine maruz bırakılan Kullar çelik borusu üzerinden elde edilen plastik deformasyon değerlerinden (Şekil 8), Kullar için hazırlanan raporlar [3] ve daha önceki sayısal analiz [11] hesaplamalarına göre belirlenen ortalama eksenel kısılma oranına ($\epsilon_P = \%20$) karşılık gelen eksenel deplasman değeri yaklaşık olarak 60 mm olarak elde edilmiştir. Burkulma başlangıcı olarak tanımlanabilecek olan bu noktadan itibaren ileri aşama burkulma mekanizması oluşuma sebebiyet veren plastik mafsalsız noktası oluşmakta ve bu nokta üzerinde boru çeperleri içe katlanarak eksenel doğrultudaki deplasman talebinin tamamına yakınına karşılıklı çalışmaktadır. Borunun çapında, artan eksenel sıkışma sebebiyle meydana gelen çap azalması durumu Şekil 9'da verilmiştir.

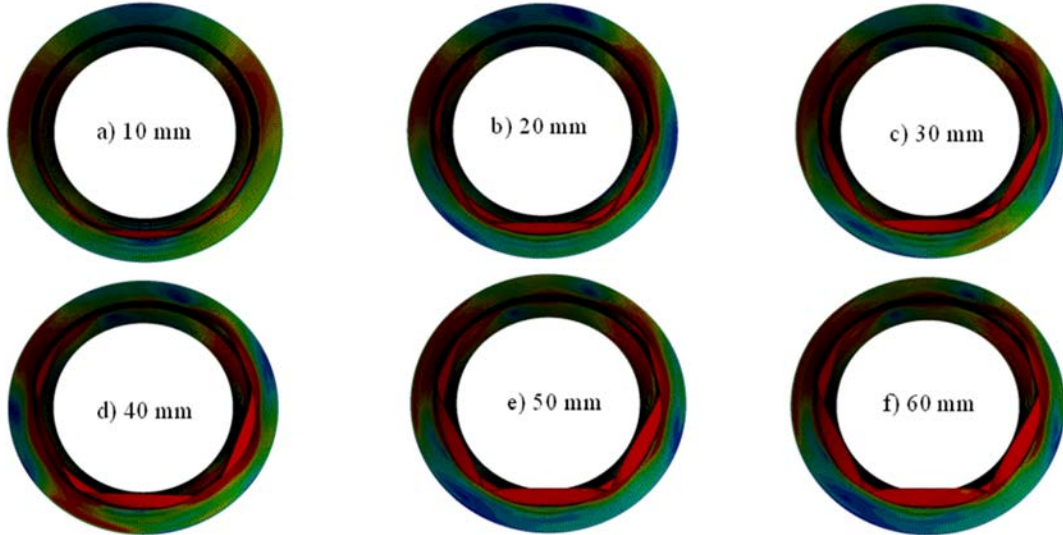
Eksenel yük tanımlaması ve plastik mafsalsız oluşumunu takip eden aşamada, yanal atım veya ters fay atımı durumunu temsilen eğilme etkisine maruz bırakılan borudaki (Şekil 10) hasar mekanizmasının gelişimi incelenip hangi deplasman ve açılar altında Kesintisiz Kullanım ve Kontrollü Hasar limit durumlarının oluştuğu incelenmiştir.

Tablo 3. Parametrik çalışmada kullanılan boru kesitlerinin ait geometrik ve mekanik özellikler
(Geometric and mechanical properties of pipe sections used in the parametric study)

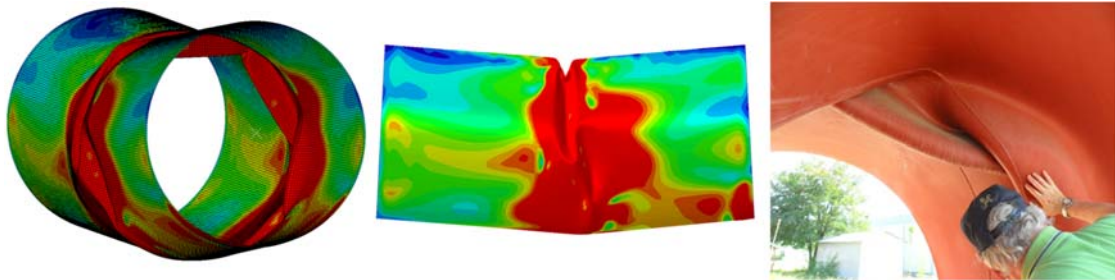
	KULLAR	TANAP	BTC
Çelik Sınıfı	API 5L B	API 5L X70 PSL-2	API 5L X65
Akma Dayanımı σ (MPa)	241	483	448
Boru Çapı D (mm)	2200	1200	1060
Et kalınlığı t (mm)	18	24	23
D/t	122	50	46



Şekil 8. Kullar boru hattının aksel deplasmanlar altındaki plastik deformasyon değerleri
(Plastic deformation values of Kullar pipeline under axial deformations)



Şekil 9. Kullar çelik borusunun boru çapında meydana gelen altıgen formulu azalma
(Hexagonal shaped reduction in pipe diameter of Kullar steel pipe)



Şekil 10. Kullar borusunun aksel yer değiştirme ve eğilme momenti altındaki hasar mekanizmasına karşın gerçek durum
(Damage mechanism of Kullar pipe under axial displacement and bending moment vs real case)

Buna göre, Kullar borusuna etki ettirilen aksel yer değiştirme süresince meydana gelen %10 göçme ihtimali (Eş. 1) ve kesintisiz kullanım durumları ile plastik mafsallı oluşumundan sonra artan dönme etkisi sebebiyle kesitte oluşan %90 göçme ihtimali durumu (Eş. 2) ve Kontrollü Hasar durumları Şekil 11 içerisinde verilmiştir. Bu değerlere karşılık gelen boru deformasyonları ise yine Şekil 11 üzerine gösterilmiştir. Buna göre fay atımlarına bağlı oluşan küçük

deplasman değerlerinde dahi basınç gerilmelerinden kaynaklı plastik mafsallı oluşma ihtimali mevcuttur. Aksel yüklemenin devamında borularda yaklaşık olarak $\phi = 4,48^\circ$ lik ilave bir dönme olması durumunda %90 oranında göçme ihtimali sınırına, $\phi = 8,30^\circ$ lik dönme olması durumunda da kontrollü hasar ihtimali durumuna ulaşıldığı görülmüştür. Bununla birlikte, %10 göçme ve kesintisiz kullanım sınırları sırasıyla %0,329 ve %0,20 olarak hesaplanmıştır.

5.2. TANAP Doğalgaz Boru Hattı Analizleri (TANAP Natural Gas Pipeline Analyses)

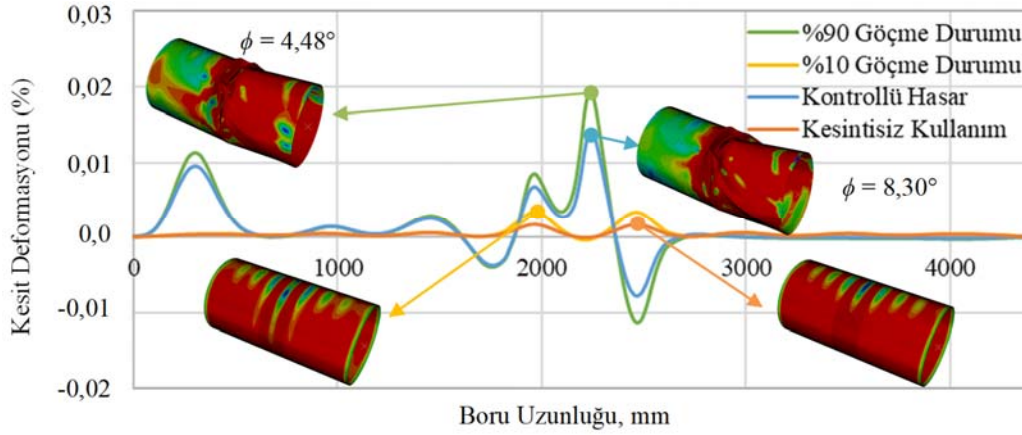
Gaz ve petrol boru hatlarının su isale hatlarından farklı olarak daha yüksek basınçlarda ürün iletimi yapması beklenmektedir. Dolayısıyla, bu hatlara ait boruların D/t oranları daha küçük değerlerde olmaktadır. Şekil 12’de TANAP boru hattına ait boru kesiti için yapılan çalışmalar neticesinde plastik deformasyon değerleri artan eksenel yüklenme değerlerine karşılık gelecek şekilde belirlenmiştir. Bu yüklemelere bağlı meydana gelen boru çapı daralmaları Şekil 13 içerisinde verilmiştir. TANAP boru hattına ait hem Wijewickreme [20] tarafından tanımlanmış hem de deprem yönetmeliği [12] içerisinde belirtilmiş olan sınır durumlara karşılık gelen birim deformasyon değerleri Şekil 14 içerisinde verilmiştir.

Şekil 14 incelenecek olursa, kesintisiz kullanım ve %10 göçme ihtimali sınır değerleri sırasıyla %0,60 ve %0,80 olarak elde edilmiştir. Diğer taraftan kontrollü hasar ve %90 göçme ihtimali sınır değerleri ise %3,52 ve %4,8 olarak hesaplanmış olup bu sınır durumlara borunun ilave olarak $\phi = 17,21^\circ$ ve $\phi = 18,77^\circ$ dönme talepleri neticesinde ulaşılmıştır. Kullar boru hattından farklı olarak düşük D/t oranlarında daha fazla dönme açısı etkisi altında göçme ihtimali ve kontrollü hasar durumlarının oluştuğunu görülmektedir.

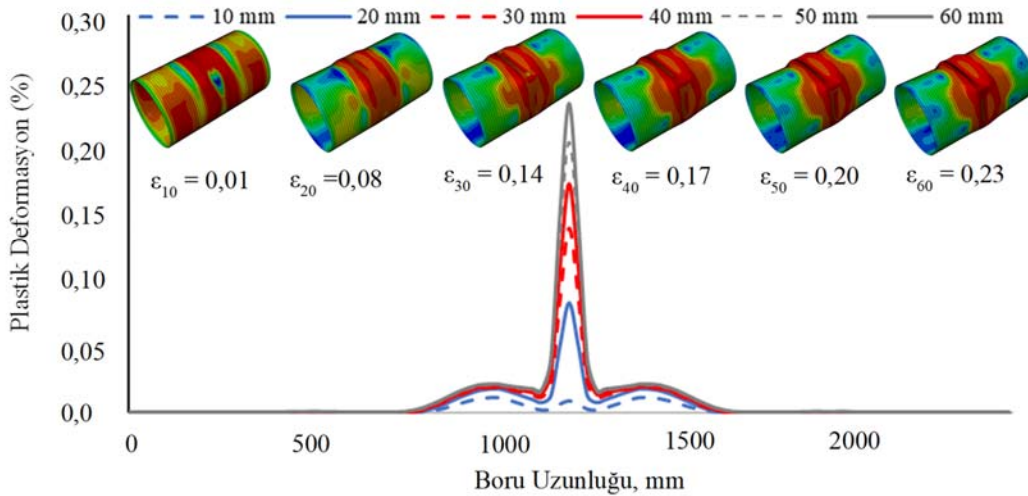
5.3. BTC Ham Petrol Boru Hattı Analizleri (BTC Crude Oil Pipeline Analyses)

Son olarak BTC boru hattı için yapılan analizler neticesinde elde edilen plastik deformasyon değerleri Şekil 15 içerisinde karşılık gelen boru deformasyon şekilleriyle birlikte verilmiştir.

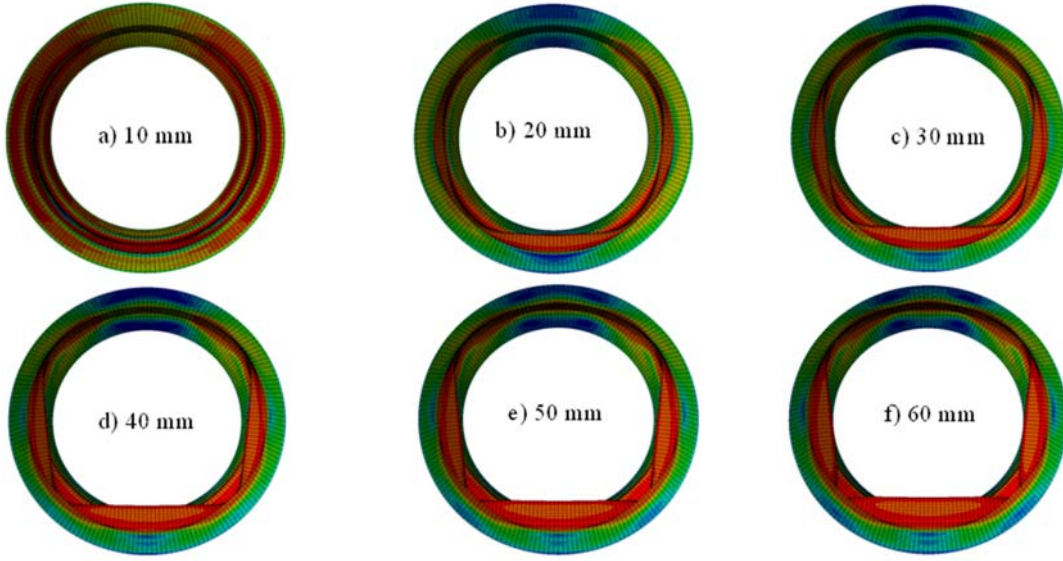
Buna göre, özellikle eksenel basınç yüklerine maruz kalan boru hatlarında deplasman taleplerinin tolere edilebilmesinin oldukça zor olduğu görülmekte ve buna karşılık ondüveli boru profili kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir. Ayrıca Kullar boru hattında ($D/t = 122$) oluşan içe katlanma modeli yüksek D/t oranına bağlı olarak çokgen formunda (Şekil 9) oluşuyorken daha düşük D/t oranına sahip TANAP ($D/t = 50$) ve BTC ($D/t = 46$) boru hatları için dörtgen formunda (Şekil 13 ve Şekil 16) oluşmaktadır. Şekil 17 içerisinde BTC petrol hattına ait elde edilen limit durum değerleri sırasıyla kesintisiz kullanım ve %10 göçme durumları için %0,87 ve %0,71 olarak elde edilmişken, bu değerler kontrollü hasar ve %90 göçme ihtimali durumları için %3,81 ile %5,20 olarak bulunmuştur. Kritik limit durumlara ulaşması için burudan talep edilen dönme açısı değerleri sırasıyla kontrollü hasar ve %90 göçme durumları için $\phi = 23,16^\circ$ ve $\phi = 26,64^\circ$ (Şekil 17) olarak elde edilmiştir.



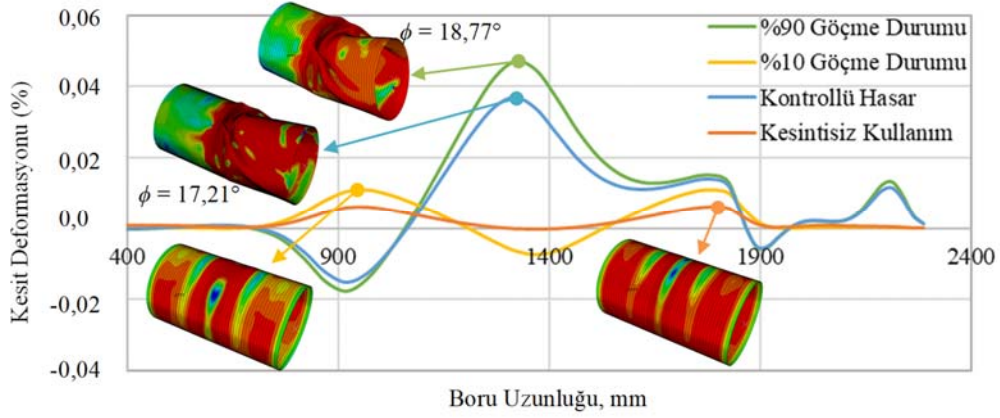
Şekil 11. Kullar boru hattına ait sınır durum değerleri (Limit states values of the Kullar pipeline)



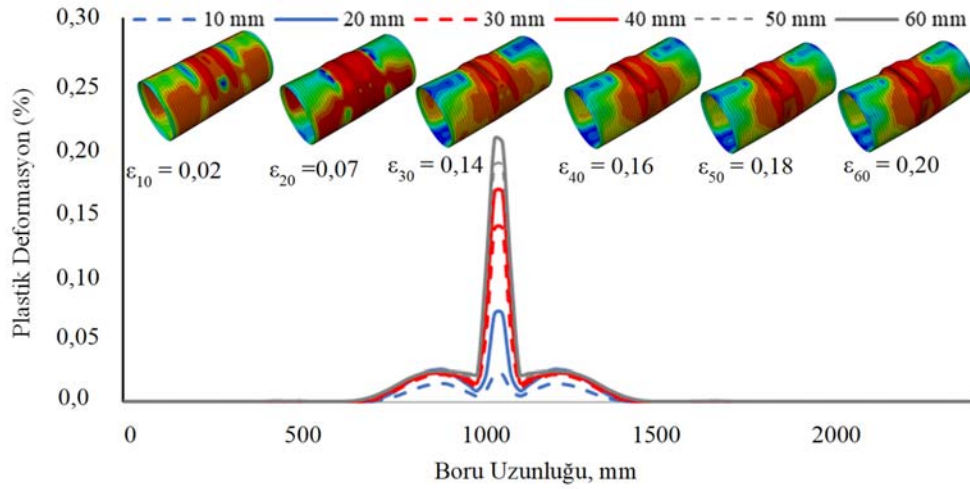
Şekil 12. TANAP boru hattı plastik deformasyon değerleri (Plastic deformation values of TANAP pipeline)



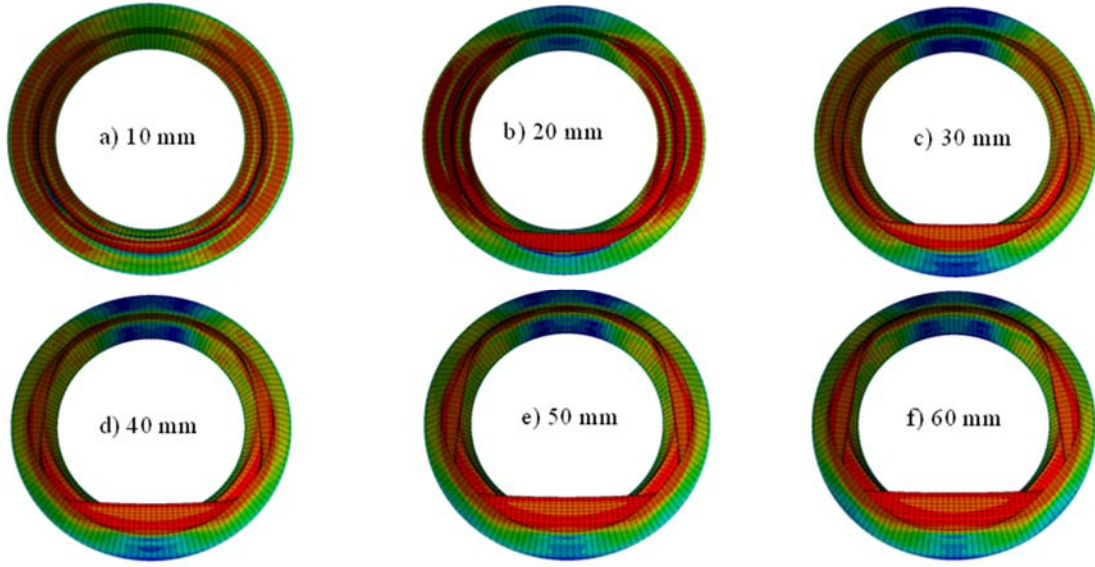
Şekil 13. TANAP çelik borusunun boru çapında meydana gelen dörtgen formulu azalma (Tetragonal shaped reduction in pipe diameter of TANAP steel pipe)



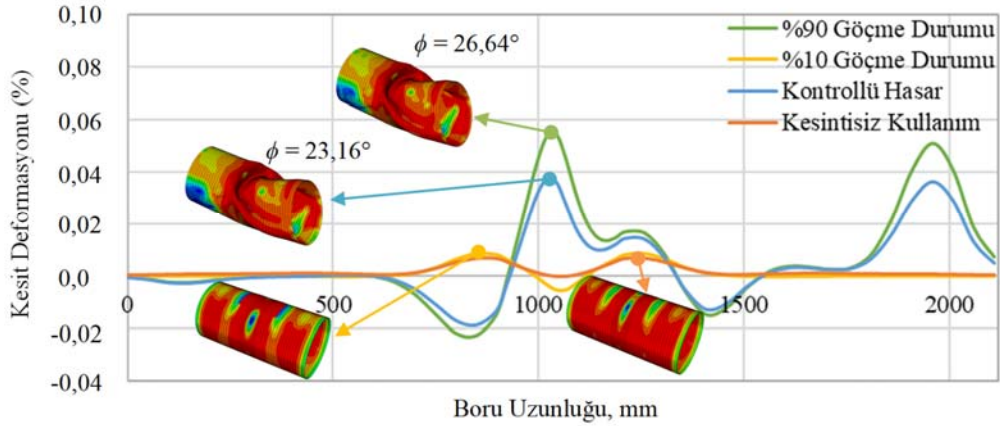
Şekil 14. TANAP boru hattına ait sınır durum değerleri (Limit states values of the TANAP pipeline)



Şekil 15. Eksenel deformasyonlara bağlı BTC boru hattı plastik deformasyon değerleri



Şekil 16. BTC çelik borusunun boru çapında meydana gelen dörtgen formulu azalma (Tetragonal shaped reduction in pipe diameter of BTC steel pipe)



Şekil 17. BTC boru hattına ait sınır durum değerleri (Limit states values of the BTC pipeline)

6. Sonuçlar (Conclusions)

Yanal atımlı ve ters fay hareketlerine bağlı olarak aksel ve birleşik yüklere maruz kalan boru hatları, geliştirilen üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar modeli yardımıyla incelenmiştir. Buna göre, aksel yükler altında oluşan deplasman taleplerinin sürekli çelik borular tarafından tolere edilebilmesinin oldukça zor olduğu görülmektedir. Küçük deplasmanlar altında dahi burkulma başlangıç sayılan plastik mafsalları oluşabilmekte ve takip eden aşamalarda ileri seviye burkulma hasar mekanizmaları oluşmaktadır. Yapılan sayısal analiz çalışmaları yardımıyla, bu hususta elde edilen çıkarımlar ve bunlara karşı alınması gereken önlemler aşağıdaki şekliyle sıralanmıştır.

- Su isale, doğalgaz veya petrol boru hatlarının fay kesişim noktalarındaki konumlandırmasından yola çıkarak basınç yüklerine mi yoksa tasarım prensibi olan çekme yüklerine mi maruz kalacağı anlaşılabilir. Basınç yüklerine maruz kalacak borularda burkulma başlangıç noktaları aksel doğrudaki küçük deplasmanlar altında oluşmaya başlamakta ve boru çeperlerindeki

içe katlanma mekanizması neticesinde plastik mafsalları dönüştürerek gelen deformasyon taleplerinin tamamına yakını bu noktalarda karşılanmaktadır.

- Mevcut boru hatlarında oluşması muhtemel basınç gerilmelerinin karşılanabilmesi adına ondüleli boru tipi kullanılmasında fayda görüldüğü gibi projelendirme aşamasında mümkün olduğu kadar boru güzergahının herhangi bir ters veya yanal atımlı fay hareketi neticesinde çekme yüklerini karşılayacak şekilde konumlandırılması önerilmektedir.
- Borularda artan D/t oranına bağlı olarak limit durum değerlerine (%10 göçme, KK, %90 göçme ve KH) daha düşük dönme açılarında ulaşıldığı görülmüş olup yüksek işletme basıncı altındaki boruların bu anlamda daha yüksek dönme taleplerine karşılık verebilecekleri anlaşılmaktadır.
- Borularda görülen ileri seviye boru deformasyonlarının D/t oranına bağlı olarak yüksek oranlar için çokgen formda, düşük oranlar için dörtgen formda oluştuğu görülmüştür.
- Çekme yükleri altındaki davranışından farklı olarak çelik boruların aksel basınç yükleri altındaki ileri seviye burkulma davranışlarının anlaşılması ve buna yönelik performansla bağlı

tasarım amaçlı farklı parametreleri (işletme basıncı, zemin etkisi, fay kesişim açısı boruya ait mekanik özellikler ve D/t oranları) dikkate alan çalışmaların yapılması ihtiyacı görülmektedir. Bununla birlikte, ileride yapılacak çalışmalarda içe katlanma mekanizmalarına bağlı olarak yüksek sismik performanslı boru tasarımları yardımıyla plastik mafsal bölgelerinin güçlendirilerek artan deformasyon talebini karşılayabilecek şekilde geliştirilmesi ve boru çeperinde küçük yırtılmalara bağlı oluşacak basınç kayıplarının önüne geçecek çalışmalar yapılması planlanmaktadır.

İleri seviye burkulma deformasyonlarının kolaylıkla belirlenebilmesi için ileriki çalışmalarda kompleks 3 boyutlu doğrusal olmayan zemin-boru etkileşim modellerinin yanı sıra basitleştirilmiş yay-boru modelleri kullanılarak performans tasarımı değerlendirmelerinin kolaylaştırılacağı etkin ve hızlı bir model oluşturulması hedeflenmektedir.

Kaynaklar (References)

1. Uckan E., Lifeline damage caused in the 23 October (Mw= 7.2) 2011 and 9 November (M= 5.6) 2011, Van earthquakes in eastern Turkey, In International efforts in Lifeline earthquake Engineering, 51-58, 2014.
2. Uckan E., Akbas B., Kaya E. S., Cakir F., Ipek C., Makaracı M., Ataoglu S., Design issues of buried pipelines at permanent ground deformation zones, Disaster Science and Engineering, 2 (2), 53-58, 2016.
3. Eiding J., Performance of Thames Water 2.2 Meter Diameter Pipeline at North Anatolian Fault Crossing, In G&E Engineering Systems Inc. Report No. 48.01.01, prepared for Rennselaer Polytechnic Institute, National Science Foundation, May 9, 2001.
4. Eiding J.M., O'Rourke M., Bachhuber J., Performance of pipelines at fault crossings. In Proceedings, 7th US National Conference on Earthquake Engineering, July, 2002.
5. Psyrras N., Kwon S., Gerasimdis S., Sextos A., Can a buried gas pipeline experience local buckling during earthquake shaking?, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 116, 511-529, 2019.
6. Akkaya A.E., Talu M.F., Extended kalman filter based IMU sensor fusion application for leakage position detection in water pipelines, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 32 (4), 1393-1404, 2017.
7. Vazouras P., Karamanos S.A., Dakoulas P., Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30 (11), 1361-1376, 2010.
8. Vazouras P., Karamanos S.A., Dakoulas P., Mechanical behavior of buried steel pipes crossing strike-slip faults, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 41, 164-180, 2010.
9. Kaya E.S., Uckan E., Cakir F., Akbas B. A 3D nonlinear numerical analysis of buried steel pipes at strike-slip fault crossings, Gradeninar, 68, 815-823, 2016.
10. Aksar B., Akbas B., Kaya E.S., Cakir F., Relative story displacements and torsional effects caused by strength variations in concentrically braced frames, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (1), 13-30, 2018.
11. Kaya E.S., Uckan E., O'Rourke M.J., Karamanos S.A., Akbas B., Cakir F., Cheng Y. Failure analysis of a welded steel pipe at Kullar fault crossing. Engineering Failure Analysis, 71, 43-62, 2017.
12. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği, 2021.
13. Pournara A.E., Karamanos S.A., Mecozzi E., Lucci A., Structural resistance of high-strength steel CHS members, Journal of Constructional Steel Research, 128, 152-165, 2017.
14. Varelis G.E., Karamanos S.A., Buckling of high-strength steel cylinders under cyclic bending in the inelastic range, Journal of Pressure Vessel Technology, 136 (2), 1-11, 2014.
15. ABAQUS, Users' manual, version 6.7, RI, USA, Simulia, 2008.
16. Reid S.R., Plastic deformation mechanism in axially compressed metal tubes used as impact energy absorbers, Int. J. Mech. Sci., 12 (35), 1035-1052, 1993.
17. Tsetseni S., Karamanos S.A., Axial compression capacity of welded-slip pipeline joints, Journal of transportation engineering, 133 (5), 335-340, 2007.
18. Korkmaz Ö., Boru Hattı ve Yer Üstü Tesisleri İnşaat Aktiviteleri Genel Bakış. Trans Anatolian Pipeline Project, 2019.
19. Cebeci E.B., Boru Hatları Ekonomisi Tarife Belirleme Kriterleri, YL Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2010.
20. Wijewickreme D., Honegger D., Mitchell A., Fittell T., Seismic Vulnerability Assessment and Retrofit of a Major Natural Gas Pipeline System: A Case History, Earthquake Spectra, 21 (2), 539-567, 2005.