



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BORU HATLARI GÜVENLİĞİNDE DAĞITIK AKUSTİK**  
**ALGILAMA SİSTEMİNİN TEKNİK VE EKONOMİK AÇIDAN**  
**İNCELENMESİ**

**TALHA DOĞAN**

**DANIŞMAN**  
**PROF. DR. ALTAN ÇETİN**

**BARTIN-2022**





**T.C.**

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BORU HATLARI GÜVENLİĞİNDE DAĞITIK AKUSTİK ALGILAMA  
SİSTEMİNİN TEKNİK VE EKONOMİK AÇIDAN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TALHA DOĞAN**

**BARTIN-2022**

## **BEYANNAME**

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Altan ÇETİN ve Dr. Mustafa Yurdabal APAK danışmanlığında hazırlamış olduğum “ BORU HATLARI GÜVENLİĞİNDE DAĞITIK AKUSTİK ALGILAMA SİSTEMİNİN TEKNİK VE EKONOMİK AÇIDAN İNCELENMESİ ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

05.09.2022

Talha DOĞAN

## ÖNSÖZ

Dağıtık Akustik Algılama (DAS) teknolojisini, insan vücudundaki sinir ağlarına benzetmek doğru bir yaklaşım olacaktır. İnsan vücudunda sinir ağları ve duyu organlarının ne kadar hayati bir fonksiyonu varsa DAS teknolojisinin de yakın gelecekte teknolojinin hayati öneme sahip bir parçası olacağı aşikardır. Günümüzde daha çok güvenlik alanında kullanılması planlanan DAS teknolojisinin gelecekte birçok alanda kullanılacağını düşünmekteyiz. Henüz gelişmekte olan bu sistem için yatırımlar artırılmalıdır. Ülkemizde yapılması planlanan doğal gaz ve petrol boru hatlarının gerek deniz gerek kara alanlarında DAS teknolojisinden faydalanılması ekonomik ve güvenlik açısından birçok fayda sağlayacaktır. Ayrıca DAS, sismoloji, demir yolu ulaşımı, karayolu ulaşımı, deniz yolu ulaşımı, hava yolu ulaşımı, vahşi yaşam koruma alanları, ormanların yangınlardan korunması vb. yüzlerce alanda güvenlik ve koruma amaçlı etkili bir şekilde kullanılabilir.

Böyle önemli bir teknolojinin ülkemizde yaygın bir şekilde kullanılması için hazırlamış olduğum tezimin ilk ve son aşamasına kadar olan yoğun süreçte, tecrübe, bilgi birikimi ve zorluklara karşı mücadeleci yaklaşımlarıyla beni daima çalışmaya ve araştırmaya yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Altan ÇETİN'e ve ikinci danışmanım Dr. Mustafa Yurdabal APAK'a, en içten teşekkürlerimi sunuyorum. ASELSAN'da DAS sistemi hakkında bilgiler veren Dr. Mehmet Umut DEMİRCİN ve çalışanlarına, akrabalarımın Dr. Mikail PÜRLÜ'ye katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca gerek maddi gerek manevi desteklerini hiç esirgemeyen, emeklerini asla ödeyemeyeceğim değerli annem Neslihan DOĞAN'a, babam Mustafa DOĞAN'a, başta eşim Müberra DOĞAN olmak üzere en zor süreçlerimde moral, motivasyon ve desteklerini esirgemeyen diğer aile fertlerim ve mesai arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak ülkemizde ve tüm dünyada huzurun sağlanması için canlarını feda eden başta şehitlerimiz olmak üzere tüm gazi ve görevi başındaki silah arkadaşlarıma sonsuz şükranlarımı sunuyorum.

Talha DOĞAN

# ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

## **BORU HATLARI GÜVENLİĞİNDE DAĞITIK AKUSTİK ALGILAMA SİSTEMİNİN TEKNİK VE EKONOMİK AÇIDAN İNCELENMESİ**

**Talha DOĞAN**

**Bartın Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Altan ÇETİN**

**İkinci Danışman: Dr. Mustafa Yurdabal APAK**

**Bartın-2022, sayfa: 75**

Sürdürülebilir bir güvenlik anlayışı ile ülkemizde hızla gelişen ve yaygınlaşan boru hattı taşımacılığı güvenliğinde dağıtık akustik algılama sistemlerinin entegrasyonu ve diğer kullanım alanlarının doğru ve ekonomik bir şekilde geliştirilmesi ve genişletilmesi için bu alanda gerçekleştirilecek çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Fiber optik teknolojisindeki son gelişmeler, Dağıtık Akustik Algılama Sistemi (DAS)'ı mevcut araştırmaların ön saflarına taşımıştır. DAS'ın özellikleri dikkate alındığında, boru hattı taşımacılığında güvenilir bir sistem olduğu değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, DAS'ın dayandığı bilimsel altyapı ve sistem elemanları irdelenmiştir. Bu sistemin entegre edilebileceği alanlar genelinde, boru hatları ve özellikle doğal gaz boru hatları hakkında örnekler verilmiştir. Dağıtık akustik algılama teknolojisinin boru hatları güvenliği ve diğer alanlarda kullanım prensipleri ve örneklerini içeren bu çalışma ile bu alanda katkı sunulması amaçlanmıştır. Türkiye'nin boru hatları açısından mevcut durumu ve geleceği değerlendirilerek, boru hatları güvenliğinde DAS entegrasyonunun sağlayacağı teknik ve ekonomik faydalara vurgu yapılmıştır. Ülkemizde daha çok geleneksel yöntemlerle güvence altına alınan doğal gaz ve petrol boru hatlarının 2379 km'lik kısmı için DAS entegrasyonu yapılan yeni bir projenin yatırım değerlendirmesinde Net Bugünkü Değer, İç Getiri Oranı ve Geri Ödeme Dönemi gibi

parametreler ele alınmıştır. Ekonomik analiz sonuçları, boru hatları güvenliğinde DAS entegrasyonun geleneksel yöntemlere göre ilk yatırım maliyetinde %25,3 işletme ve bakım maliyetlerinde %52,8 tasarruf sağladığını ortaya koymaktadır. Projenin on yıllık süreç için yapılan yatırım değerlendirme parametreleri yatırımın uygulanabilirliğinin çok yüksek oranlarda olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Boru hatları güvenliği, dağıtık akustik algılama, enerji güvenliği, kritik enerji alt yapısı, doğal gaz boru hatları

# **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

## **TECHNICAL AND ECONOMIC INVESTIGATION OF THE DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSING SYSTEM IN PIPELINE SECURITY**

**Talha DOĞAN**

**Bartın University**

**Graduate School**

**Department of Civil Engineering**

**Thesis Advisor: Prof. Dr. Altan ÇETİN**

**Second Advisor: Dr. Mustafa Yurdabal APAK**

**Bartın-2022, pp: 75**

There is a need for studies to be carried out in this field for the integration of Distributed Acoustic Detection Systems (DAS) in pipeline transportation security, which is rapidly developing and becoming widespread in our country with a sustainable security understanding, and for the correct and economic development and expansion of other usage areas. Recent advances in fiber optic technology have brought the DAS to the forefront of current research. Considering the features of DAS, it is a reliable system in pipeline transportation. The scientific background and system elements on which the DAS is based were examined in this study. Examples of pipelines, especially natural gas pipelines are given across areas where this system can be integrated. It is aimed to contribute to this field with this study, which includes the principles and examples of the use of distributed acoustic sensing technology in pipeline safety and other areas. The technical and economic benefits of DAS integration in pipeline security are emphasized by evaluating Turkey's current situation and future in terms of pipelines. In the investment evaluation of a new project with DAS integration for 2379 km of natural gas and oil pipelines, which are mostly secured by traditional methods in our country, parameters such as Net Present Value, Internal Rate of Return and Payback Period are considered. The economic analysis results reveal that DAS



integration in pipeline security provides 25.3% savings in initial investment costs and 52.8% in operation and maintenance costs compared to traditional methods. The investment evaluation parameters made for the 10-year period of the project, whose initial investment cost is estimated, show that the applicability of the investment is very high.

**Keywords:** Pipeline safety, distributed acoustic sensing, energy security, critical energy infrastructure, natural gas pipelines.

## İÇİNDEKİLER

BEYANNAME .....	iii
ÖNSÖZ .....	iv
ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLOLAR DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
1.GİRİŞ.....	1
2. BORU HATLARI TAŞIMACILIĞI.....	3
2.1 Petrol Boru Hatları.....	5
2.2 Doğal Gaz Boru Hatları .....	6
2.3 Su Boru Hatları.....	8
2.4 Katı Madde ve Atık Boru Hatları .....	9
3. KRİTİK ENERJİ ALT YAPI GÜVENLİĞİ KAVRAMI VE BORU HATLARI TAŞIMACILIĞINDA GÜVENLİK SİSTEMLERİ .....	11
3.1 Enerji Güvenliği Kavramı.....	11
3.2 Kritik Enerji Altyapı Güvenliği.....	12
3.2.1 Kritik Enerji Altyapı Güvenliğinin Sağlanmasında Ulusal ve Uluslararası Açıdan Hukuki Durum .....	13
3.2.2 Kritik Enerji Altyapı Unsurlarının Güvenliği ve Türkiye'deki Mevcut Durum.....	16
3.2.3 Kritik Enerji Altyapı Unsurlarında Meydana Gelebilecek Tehditler.....	18
3.2.3.1 Terör Faaliyetleri ve Sabotajlar.....	20
3.2.3.2 Siber Saldırı ve Tehditleri .....	21
3.2.3.3 Hırsızlık ve Vandalizm.....	21
3.2.3.4 Doğal Afetler .....	22
3.3 Boru Hatları Taşımacılığında Güvenlik Sistemleri ve Yaşanan Gelişmeler .....	22
3.3.1 Boru Hatları Güvenliğinde Geleneksel Sistemler .....	22
3.3.2 Boru Hatları Güvenliğinde Dağıtık Akustik Algılama Sistemleri (DAS) ..	24
3.4 Boru Hatları Güvenliğinde İnsansız Hava Araçları (İHA) Kullanımı .....	25
3.5 Doğal Gaz Boru Hattı Ağlarının Güvenliğinde Coğrafi Artırılmış	

Görselleştirme .....	28
<b>4. DAĞITIK AKUSTİK ALGILAMA SİSTEMLERİ (DAS) VE UYGULAMA ALANLARI.....</b>	<b>31</b>
4.1 Dağıtık Akustik Algılama Sistemi (DAS).....	31
4.2 Dağıtık Akustik Algılama Sisteminin Algılama Prensipleri.....	32
4.3. DAS'ın Farklı Uygulama Alanları .....	39
4.3.1. Deprem Dalga Sahalarının Fiber Optik Ağ Gözlemleri.....	39
4.3.2 Altyapı Koruma ve Terörle Mücadelede Fiber Optik Kablolar Kullanılarak Dağıtık Akustik ve Sismik Algılama.....	41
4.3.3 Kentsel Alanlarda Boru Hatlarının Güvenliğini Sağlamak için Dağıtık Akustik Sensörlere (DAS) Yapay Zekâ Öğrenim Yaklaşımı .....	46
4.3.3.1. Kentsel Alanlarda Boru Hattı Güvenliği .....	48
4.3.3.2 Veri Kümesi ve Performans Ölçümleri .....	49
<b>5. TEKNİK VE EKONOMİK YÖNDEN ANALİZ .....</b>	<b>50</b>
5.1 Teknik Analiz Verileri.....	50
5.2 Ekonomik Analiz.....	53
5.2.1 Mevcut durum (geleneksel yöntem) için boru hattı güvenliği maliyet analizi.....	53
5.2.2 DAS yöntemi entegrasyonu varsayımıyla boru hattı güvenliği maliyet analizi.....	56
5.2.3 Boru Hatları Altyapı Hasarları ve Maliyet Analizi .....	59
5.2.4 DAS Entegrasyon Projesinin Yatırım Değerlendirilmesi (Net Bugünkü Değer, İç Getiri Oranı ve Geri Ödeme Süresi) .....	62
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>66</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>68</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil

Sayfa

<b>No</b>	<b>No</b>
2.1:	Türkiye Boru Hatları Haritası, .....4
2.2:	Avrupa ve Türkiye Doğal Gaz Dağıtım Şebekesi Uzunlukları/Bin km .....7
2.3:	Türkiye'deki Boru Hatları ve TANAP'ın Geçtiği Güzergâh .....8
2.4:	Farklı Şekillerdeki Pnömatik Boru Sistemleri .....10
3.1:	2019 Yılı Küresel Birincil Enerji Tüketim Oranları .....11
3.2:	Zırhlı Güvenlik Kulübesi .....23
3.3:	İnsansız Hava Aracı İHA .....26
3.4:	Gelişmiş güvenlik ve gözetim amaçlı kullanılan insansız uçak sistemi .....27
3.5:	Hindistan'daki bir boru hattında tespit edilip durdurulan kaçak kazı ve kaçak musluk.....28
3.6:	3D veri simülasyon arayüzü .....29
3.7:	Coğrafi Artırılmış Görselleştirme Sokak Arası Boru Hatları Görünüşü .....30
4.1:	Dağıtık Akustik Algılama Sisteminin Algılama Prensibi .....32
4.2:	Elektromanyetik spektrumdaki Rayleigh, Raman ve Brillouin zirvelerinin şeması.....33
4.3:	Canlı akustik verilerin kayan görüntülerini gösteren şelale ekranı .....35
4.4:	DAS sisteminde 270 PSI basınçlı borudan su sızıntısının oluşturduğu akustik spektrogram.....36
4.5:	DAS'ın farklı akustik etkiler sonucu oluşan şelale ekranı görüntüleri (a) Hareket eden araca ait şelale ekranı (b) Yürüyen insana ait şelale ekranı (c) Silahla ateş eden insana ait şelale ekranı (d) Kazı yapan insana ait şelale ekranı .....37
4.6:	ASELSAN MİDAS-2 DAS Sorgulama Ünitesi .....38
4.7:	MİDAS Uygulama Alanları .....38
4.8:	Orta Alaska Fairbanks şehrindeki depremin DAS dizisi kaydı .....40
4.9:	(a) DAS Akustik Sinyalleri Algılama Prensibi ve İşleme Süreci (b) Tanımlanabilir Akustik Algı Mesafeleri .....43
4.10:	OptaSense Yeraltı Tünel Algılama Algoritması.....44
4.11:	Araç ve Personelin Oluşturduğu Akustik Diyagram .....46
4.12:	SECANS Güvenlik Yönetim Yazılımı Kullanıcı Paneli .....47
5.1:	Protokol Kapsamında Güvenliği Sağlanan Boru Hatları.....50

## **TABLolar DİZİNİ**

**Tablo**

**Sayfa**

<b>No</b>	<b>No</b>
<b>4.1:</b> Saha testinde pratik izinsiz giriş tespiti ve konum sonuçları.....	44
<b>5.1:</b> Boru hattı güvenliği için temin edilen malzeme ve teçhizatın maliyet çizelgesi.....	53
<b>5.2:</b> Boru hattı güvenliğinde geleneksel yöntem için maliyet analizi.....	54
<b>5.3:</b> Boru hattı güvenliğinde DAS yöntemi için maliyet analizi.....	56
<b>5.4:</b> ABD Gaz Boru Hattı Uzunlukları .....	59
<b>5.5:</b> ABD Emtia Bazında Sıvı Tesisler Boru Hattı Uzunlukları .....	60
<b>5.6:</b> ABD 2002-2021 Yılları Arası Boru Hatları Ölüm/Yaralanma Sayıları .....	60
<b>5.7:</b> ABD 2020 Yılı Boru Hattı Önemli Olay Tür ve Sayıları .....	61
<b>5.8:</b> DAS ve Geleneksel Yöntem için İlk Yatırım Maliyetleri Karşılaştırma Tablosu.....	62
<b>5.9:</b> DAS ve Geleneksel Yöntem için İşletme Maliyetleri Karşılaştırma Tablosu.....	63
<b>5.10</b> Ekonomik Analizler .....	65

## **SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

km	: Kilometre
ns	: Nanosaniye
Khz	: Kilohertz (SI birim sisteminde frekans birimidir)
Hz	: Hertz (SI birim sisteminde frekans birimidir)
µm	: Mikrometre

## KISALTMALAR

DAS	: Distributed Acoustic Sensing (Dağıtık Akustik Algılama Sistemi)
GAZBİR	: Türkiye Doğal Gaz Dağıtıcıları Birliği
BM	: Birleşmiş Milletler
TUİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
İSKİ	: İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
OSB	: Organize Sanayi Bölgesi
EPCIP	: European Programme for Critical Infrastructure Protection (Kritik Altyapının Korunması için Avrupa Programı)
TANAP	: Trans Anadolu Doğal Gaz Boru Hattı Projesi
TAP	: Trans Adriyatik Boru Hattı
SCP	: Güney Kafkasya Boru Hattı
LNG	: Liquefied natural gas (sıvılaştırılmış doğal gaz)
AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
BTC	: Bakü-Tiflis-Ceyhan Petrol Boru Hattı
SCP	: Güney Kafkasya Doğal Gaz Boru Hattı (Bakü-Tiflis-Erzurum)
MIPT	: National Memorial Institute for the Prevention Terrorism (Uluslararası Memorial Terörizmi Önleme Enstitüsü)
İGK	: İstihbarat, gözetleme ve keşif
SCADA	: Supervisory Control and Data Acquisition (Veritabanlı Kontrol ve Gözetleme Sistemi)
CNN	: Convolutional Neural Networks (Evrışimli Sinir Ağları)
DTS	: Distributed temperature sensing (Dağıtık sıcaklık algılama)
ASELSAN	: Askerî Elektronik Sanayi
SSW	: Güney Kerte Batı (Yön)

CONOP	: Concept of Operations (Operasyon Kavramı)
PTZ	: Pan-Tilt-Zoom (Çevrilebilen, Eğimli, Yakınlaştırma yapan kamera)
UAS	: Unmanned Aircraft System (İnsansız Hava Aracı)
PHMSA	: Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (ABD Boru Hattı ve Tehlikeli Madde Güvenlik İdaresi)
USD	: Amerikan Doları
SHM	: Structural Health Monitoring (Yapısal Sağlık İzleme)
OTDR	: Optical Time-Domain Reflectometry (Optik Zaman-Alan Reflektometresi)
JGK	: Jandarma Genel Komutanlığı
PAGA	: Public Address General Alarm (Genel Seslendirme Genel Alarm)
TEKNOFEST	: Uluslararası Havacılık, Uzay ve Teknoloji Festivali
COTDR	: Coherent Optical Time-Domain Reflectometry (Tutarlı Optik Zaman-Alan Reflektometresi)

# 1.GİRİŞ

Ülkemizin konumu ve enerji alanındaki gelişmeler ile ulaştırma sistemleri arasında önemli bir yere sahip olan boru hatlarının güvenliğinin sağlanmasında yaygın olarak geleneksel yöntemler (kamera sistemleri, nöbet kulübesi, güvenlik görevlisi) kullanılmaktadır. Hatların uzunluğu, zemin şartlarındaki farklılıklar, hat boyunca birçok noktada elektrik ihtiyacı gerekliliği, hava koşullarından etkilenmesi, çok fazla kamera ve personel ihtiyacının olması ve maliyetlerin çok yüksek olması gibi sebeplerden dolayı etkin ve sürdürülebilir güvenlik açısından geleneksel yöntemler yetersiz kalmaktadır. Ayrıca, geleneksel yöntemlerdeki uzun müdahale süreleri, boru hatlarında ciddi hasarların oluşmasına ve maddi kayıplara neden olmaktadır. Üçüncü şahıs hasarlarının boru hatlarında oluşturduğu deformasyonlar, işletme maliyetlerinin artmasına, patlama riskine, müşteri memnuniyetsizliğine, çevre kirliliğine, hukuki sorunlara ve taşınan tehlikeli maddenin çevreye yayılıp canlı sağlığına zarar vermesine neden olmaktadır (Apak, 2022). ABD Boru Hatlarında 2002-2021 yılları arasında 12163 olay gerçekleşmiş ve olaylar neticesinde 263 adet personel ölmüş, 1112 adet personel yaralanmış, 10.177.936.515 USD maddi gider olmuştur (PHMSA, 2022). Bu durum, boru hatlarının güvenliğinde daha etkin yöntemlerin kullanımına ihtiyacı ortaya koymaktadır.

Fiber optik kablolarının sensör olarak kullanılabilirdiği Dağıtık Akustik Algılama Sistemleri (DAS), son yıllarda uluslararası ölçekte birçok alanda olduğu gibi ulaştırma mühendisliğinde de araştırılan ve kullanılmaya başlanan yeni bir teknolojidir. Bu sistem, özellikle boru hatları ulaşımında gaz ve petrol sızıntı kontrolü, hırsızlığın önlenmesi, tesis çevre güvenliği, boru hattı içi temizleme topu izleme, malzeme karakteristik özelliklerinin kontrolü ve en önemlisi üçüncü şahıs olası hasarlarının (hat üzerinde elle ve/veya makine yapılan kazılar) tespitinin yapılması gibi hususlarda güvenlik açısından önemli faydalar sağlamaktadır. DAS uygulamaları ile çok sayıda tehdidin aynı anda algılanabilmesi, fiber optik kablo boyunca enerji ihtiyacı olmaması, elektromanyetik etkiye duyarsız olması, hava koşullarından etkilenmemesi ve gün boyu kesintisiz gerçek zamanlı takip yapılabilmesi sayesinde boru hattı güvenli bir şekilde işletilecek ve kaynakların daha verimli/efektif kullanılmasını sağlayacaktır.

Sürdürülebilir bir güvenlik anlayışı ile ülkemizde hızla gelişen ve yaygınlaşan boru hattı taşımacılığı güvenliğinde DAS sistemlerin entegrasyonu ve diğer kullanım alanlarının doğru



ve ekonomik bir şekilde geliştirilmesi ve genişletilmesi için bu alanda gerçekleştirilecek çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaç doğrultusunda tez kapsamında, DAS'ın dayandığı bilimsel altyapıya dayanarak sistem elemanları irdelenmiştir. Bu sistemin entegre edilebileceği alanlar genelinde, boru hatları ve özellikle doğal gaz boru hatları hakkında örnekler incelenmiştir. Boru hatları taşımacılığında kullanılan geleneksel ve yeni metotların teknik ve ekonomik açıdan karşılaştırmaları yapılmıştır.

Fiber optik teknolojisindeki son gelişmeler DAS'ı mevcut araştırma çabalarını ön saflara taşımıştır. DAS teknolojisinin özellikleri dikkate alındığında, boru hattı taşımacılığında etkili bir güvenliğin sağlanmasında önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. DAS teknolojisinin ülkemizde kullanımının yaygınlaştırılmasında bu alanda yapılacak çalışmalar faydalı olacaktır. Dağıtık akustik algılama teknolojisinin boru hatları güvenliği ve diğer alanlarda kullanım prensiplerinin ve örnekleri içeren bu tez çalışmamızla bu alanda katkı sunulması amaçlanmaktadır. Bu çalışma ile ülkemiz açısından yeni bir uygulama sayılabilecek DAS sistemlerine ilgi çekilmesi ve uygulama alanlarının yaygınlaştırılması amaçlanmaktadır. Özellikle boru hattı güvenlik problemlerin ortadan kaldırılması, daha etkin ve sürdürülebilir bir şekilde gerçekleştirilmesinde DAS sisteminin önemine vurgu yapılmaktadır.

Bu çerçevede şekillenen tez çalışması, genel olarak dağıtık akustik algılama sistemlerinin teknik altyapısı, uygulama örnekleri ve farklı DAS teknolojilerinin karşılaştırmalarının incelenmesini içermektedir. DAS ekipmanlarının gerçekte nasıl kullanıldığı ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. DAS'ın büyük ölçüde diğer teknolojiler ile bağlantılarına odaklanılmaktadır. Bu bağlamda, DAS'ın somut yetenekleri, gerçek saha çalışmaları ile detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, DAS'ın ek iyileştirme ve araştırmaya ihtiyaç duyduğu alanlar değerlendirilmiş ve DAS teknolojisinin gelişiminde odaklanılması gereken konulara önemli bir altyapı oluşturulmaya çalışılmıştır.

## 2. BORU HATLARI TAŞIMACILIĞI

Ulaştırma türleri; karayolu ulaşımı, demiryolu ulaşımı, havayolu ulaşımı, denizyolu ulaşımı ve boru hattı ulaşımı olmak üzere beş ana ulaştırma türünden oluşmaktadır. Şekil 2.1’de boru hatları haritasında görüldüğü gibi boru hattı taşımacılığı, Türkiye’nin dünyadaki Coğrafi konumu gereği ve Türkiye’nin enerji nakil hatlarının yoğunlukta geçtiği bölge olması açısından oldukça önemli olan bir ulaştırma sistemidir. Boru hattı taşımacılığının ilk yatırım maliyeti diğer ulaştırma türlerinden hem karayolu taşımacılığı hem de denizyolu taşımacılığına göre daha yüksek olmasına karşın, bu ulaştırma modlarına göre daha hızlı ve kesintisiz ve güvenli taşımaya olanak vermesi; taşıma kapasitesi ve işletme maliyetleri dikkate alındığında yapılan yatırımı kısa zamanda geri kazandırmaktadır. Dolayısıyla, petrol ve doğal gaz gibi kritik enerji maddelerinin üretim merkezlerinden tüketim merkezlerine en ekonomik şekilde (kısa zamanda yüksek miktarlar taşınması) boru hatları ulaşım türü ile taşınması ön plana çıkmakta ve önemi her geçen gün artmaktadır. Öncelikle kısa ve küçük boyuttaki hatlar ile başlayan boru hattı taşımacılığı, günümüzde artan talep ve teknolojik gelişmelerle birlikte daha büyük boyut kazanmıştır. Diğer taraftan artan nüfus yoğunluğu ve şehirleşmenin hızlanması, ciddi trafik ve çevre sorunlarına yol açmaktadır. Bu nedenle, boru hatları gelişmiş ülkelerde farklı yüklerin (doğal gaz ve petrol dışında) taşınmasında da kullanılmaktadır. Boru hatları taşımacılık sistemi çevreci, ekonomik ve kesintisiz mal akışını sağlaması nedeniyle, yakın gelecekte önemini arttıracığı düşünülmektedir (Aydemir, 2016).

Ülkemiz; jeostratejik konumunu etkin kullanarak, Avrupa ülkelerinin özellikle petrol ve doğal gaz arz güvenliğini arttırmak için birçok projeleri gerçekleştirmektedir. Bu projeler neticesinde farklı kalite ve özellikteki ham petrolü uluslararası piyasalara sunulabilmek için rafineri istasyonları, petrokimya tesisleri ve sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) ihraç terminalinin bulunduğu entegre bir enerji merkezi haline getirilmiş bir Türkiye hedeflenmektedir. Bu hedef doğrultusunda transit petrol ve doğal gaz boru hattı projelerinde Türkiye’nin bölgesindeki jeopolitik ve stratejik liderliğini sürdürecektir. Türkiye’de toplam doğal gaz ve petrol boru iletim hattı (Şekil 2.1) uzunluğu yaklaşık 20.000 km’dir. Bu hatlardan ülke çapındaki dağıtım hatları oranı diğer hatlara oranla çok daha fazladır. Geriye kalan küçük payı; sınır aşan petrol ve doğal gaz boru hatları, limanlar ve rafineriler arasında faaliyet gösteren petrol boru hatları ve Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü (NATO) petrol şebekeleri oluşturmaktadır (11. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Şûrası, 2013).



Şekil 2.1: BOTAS Türkiye Boru Hatları Haritasından Uyarlanmıştır (URL-1, 2022).

BOTAŞ yetkililerinden alınan bilgilere göre, Sakarya Gaz Sahasında başlatılan sondajlar sonucunda yaklaşık 540 milyar metreküp doğal gaz keşfedilmiştir. Keşfedilen doğal gaz Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı (TPAO) tarafından yaklaşık 150 km deniz tabanından boru hattı inşa edilerek Filyos Limanına ulaştırılacaktır. Kara hattında gazın ulaştırılması için hattın inşası ise BOTAŞ tarafından yapılmaktadır. Filyos Limanına gelen doğal gaz yeni bir doğal gaz boru hattı ile Sakarya'ya kadar getirilerek ülke içerisine Kasım 2022'de dağıtılması planlanmaktadır.

Boru hatları ile taşınan maddeler incelendiğinde sıvı ve gaz maddelerin taşınmasına ek olarak gelişen teknoloji ile birçok yenilikçi yaklaşımlar yapılmıştır. Bu yaklaşımların başında pnömomatik sistemler aracılığıyla kapsüle yerleştirilen madde (katı, sıvı, gaz) veya yolcu taşınması faaliyetleri gelmektedir. Taşınan maddelere göre boru hatları çeşitleri aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır (11. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Şûrası, 2013):

- Petrol Boru Hatları
- Doğal Gaz Boru Hatları
- Su Boru Hatları
- Katı Madde ve Atık Boru Hatları

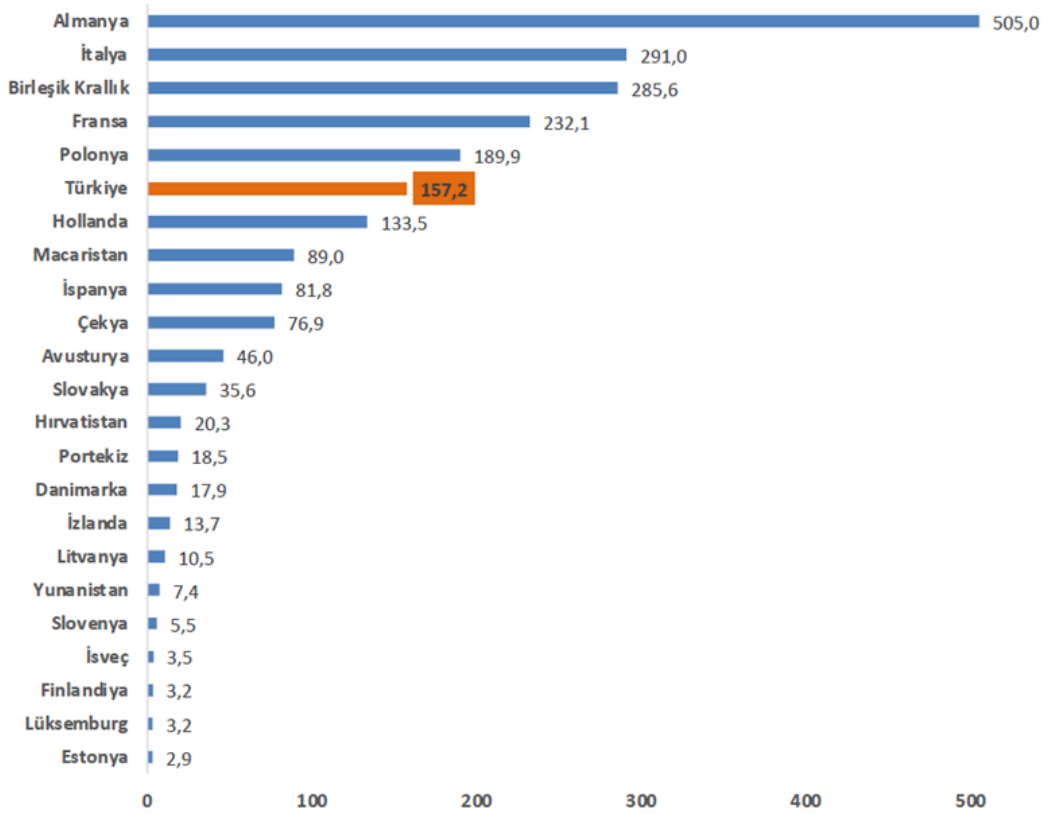
## **2.1 Petrol Boru Hatları**

Dünyada enerjiye olan yüksek arz ve talep oranları, enerjinin arz edilen merkezlerden talep edilen merkezlere olan ulaşımı için çeşitli taşıma türlerini kullanarak ulaştırılmasını elzem kılmaktadır. Boru hattı taşımacılığının ilk yatırım maliyeti kara ve denizyolu taşımacılıklarına kıyasla daha yüksek olmasına karşın diğer taşıma türlerinden daha hızlı, güvenli, çevreci olması ve hava koşullarından etkilenmemesinin yanında yatırımı daha kısa sürede geri ödemesi gibi üstünlükleri bulunmaktadır. Petrol genellikle yer yüzüne çıkarıldıktan sonra boru hatları ile uygun limanlara, buradan da sıvı yük gemileriyle rafinerilere veya doğrudan boru hatlarıyla rafinerilere ulaştırılmaktadır (11. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Şûrası, 2013).

## 2.2 Doğal Gaz Boru Hatları

Doğal gaz kullanımını binlerce yıl öncesine dayanmaktadır. Tarihi kaynaklar, doğal gazın ilk olarak M.Ö. 900 yıllarında Çin'de kullanıldığını göstermektedir. Doğal gazın yaygın kullanımı ise, 1790'da İngiltere'de başlamıştır. Boru hattı taşımacılığının gelişmesiyle birlikte; 1920'lerde artan doğal gaz kullanımı, II. Dünya Savaşı'ndan sonra da artarak devam etti. Enerji üretim sektöründe doğal gaz kullanımını ilk kez Amerika'da başladı. 1950'li yıllarda dünyada doğal gazın enerji tüketimindeki oranı yaklaşık %10 iken, günümüzde enerji tüketiminin %24'ü doğal gazdan karşılanmaktadır. Dünyanın bilinen doğal gaz rezervlerinin yaklaşık 70 yıllık bir ömre sahip olduğu tahmin edilmektedir. Bilinen doğal gaz rezervleri, enerji eşdeğeri bakımından petrol rezervleri ile aynıdır. Dünyanın kanıtlanmış gaz rezervlerinin yaklaşık dörtte üçü Rusya ve Orta Doğu'da bulunmaktadır. Rusya, İran ve Katar, dünya doğal gaz rezervlerinin yaklaşık %60'ını elinde tutmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri dünya doğal gaz rezervlerinin sadece %3'üne sahip olmasına rağmen, dünya doğal gaz üretiminin %20'sinden fazlasını sağlamaktadır. Dünyanın kanıtlanmış doğal gaz rezervlerinin sadece %2'sine sahip olan 27 Avrupa Birliği (AB) ülkesi, dünyadaki doğal gaz tüketiminin %16'sını oluşturmaktadır (11. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Şûrası, 2013).

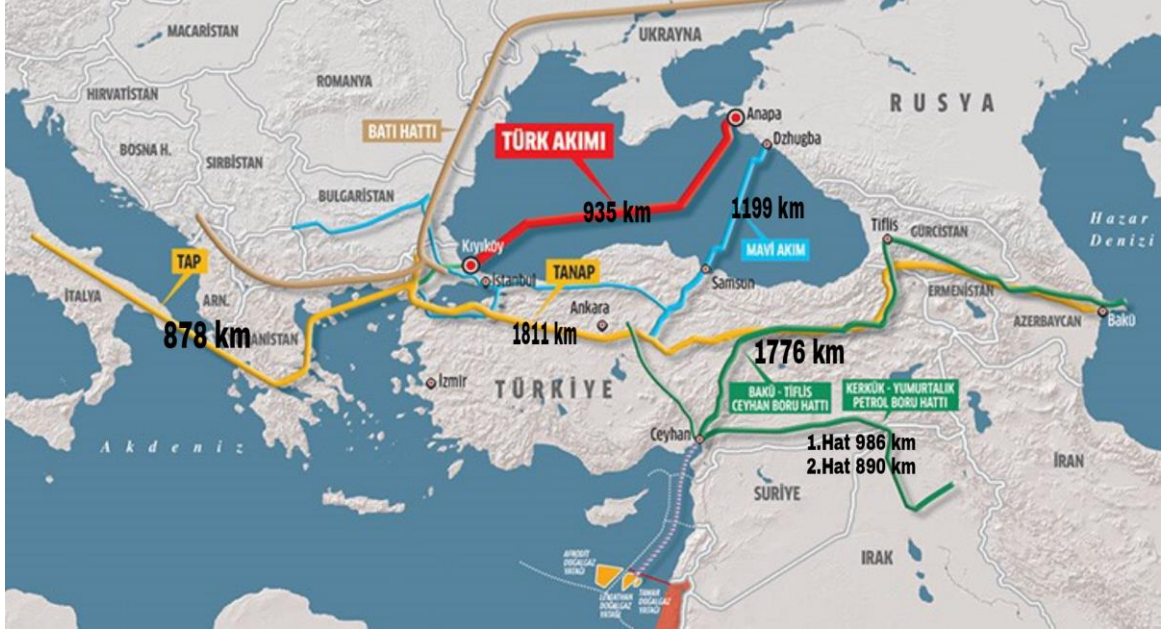
Bugün dünya petrol ticaretinin %38'i boru hatları üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu rakam doğal gazda yaklaşık %75'tir. Amerika Birleşik Devletleri'nde boru hatlarının düşük enerji tüketimi üzerine yapılan bir çalışmada, doğal gaz taşımacılığında kullanılan boru hatlarının tükettiği enerji miktarındaki azalma, demiryolu taşımacılığında sonra ikinci sırada yer almaktadır. Türk Boğaz'larındaki deniz trafiği yükünü azaltan ham petrol ve doğal gaz boru hatlarının genişletilmesi sağlanmalıdır. Öte yandan, 2050 yılına kadar artan ticaret hacmi ve enerji ihtiyacı Türkiye ve çevresindeki coğrafya için göz önüne alındığında, boru hatlarının taşıma türleri içindeki payının %20-25 aralığında olması beklenmektedir (T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2016). Türkiye Doğal Gaz Tüketimi 2020 yılında 47,7 Milyar m<sup>3</sup> hacme ulaşmıştır (GAZBİR 2020 Yılı Doğal Gaz Dağıtım Sektör Raporu , 2020). Şekil 2.2'de görüldüğü gibi Türkiye, Doğal Gaz Dağıtıcıları Birliği (GAZBİR) 2020 yılı verilerine göre doğal gaz dağıtım şebeke uzunluğu 157,2 bin km ile Avrupa ülkeleri arasında altıncı en uzun doğal gaz dağıtım şebeke uzunluğuna sahiptir.



Şekil 2.2: Avrupa ve Türkiye Doğal Gaz Dağıtım Şebekesi Uzunlukları/Bin km (GAZBİR 2020 Yılı Doğal Gaz Dağıtım Sektör Raporu, 2020).

Türkiye ve Azerbaycan enerji iş birliği kapsamında Trans Anadolu Doğal Gaz Boru Hattı Projesi (TANAP), Güney Kafkasya Boru Hattı (SCP) ve Trans Adriyatik Boru Hattı (TAP) projeleri ile Güney Gaz Koridoru denilen Boru Hattı Ulaşım Ağını oluşturmuşlardır. Günümüzde hala geçerliliği devam eden Ortadoğu ve Avrupa'nın en uzun (1.811 km) ve en büyük çaplı (56 inç) boru hattı projesi olma özelliğine sahip TANAP, Azerbaycan'ın Şah Deniz Sahasında üretilen doğal gaz ilk olarak Türkiye'ye, sonrasında Avrupa'ya taşınması hedeflenmektedir. TANAP, Türkiye Gürcistan sınırında Ardahan ilinin Posof ilçesinde bulunan Türkgözü köyünden başlayarak 20 ilden (Ardahan, Kars, Erzurum, Erzincan, Bayburt, Gümüşhane, Giresun, Sivas, Yozgat, Kırşehir, Kırıkkale, Ankara, Eskişehir, Bilecik, Kütahya, Bursa, Balıkesir, Çanakkale, Tekirdağ ve Edirne) geçerek Yunanistan sınırında son bulmaktadır (Şekil 2.3). Bu noktada, Avrupa ülkelerine doğal gaz taşıyacak olan Trans Adriyatik Boru Hattı'na entegre edilen TANAP, Türkiye'nin ve Avrupa Birliği'nin doğal gaz arz güvenliğine ve çeşitliliğine katkıda bulunmayı amaçlamıştır (URL-11, 2021).





Şekil 2.3: Türkiye'deki Boru Hatları ve TANAP'ın Geçtiği Güzergâh (URL-12, 2022).

Azerbaycan doğal gazını Türkiye ve Avrupa'daki alıcılara güvenilir ve uygun maliyetli bir şekilde ulaştırmak amacıyla uluslararası kalite, sağlık, mesleki, sosyal ve çevre güvenliği standartlarına uygun yüksek kapasiteli bir doğal gaz boru hattı inşa etme ve işletme görevini yürüten TANAP, Azerbaycan'ı Türkiye'nin en büyük ikinci gaz tedarikçisi ve Avrupa Birliği'ndeki yeni gaz tedarikçisi olma yolunu açarken, Azerbaycan ile Avrupa Birliği arasındaki mevcut ekonomik ve siyasi iş birliğini daha da geliştirmektedir. TANAP, Türkiye ve Avrupa'da enerji arz güvenliğini artırarak Azerbaycan, Türkiye ve AB'yi birbirine yakınlaştırmakta ve sunduğu potansiyelle küresel enerji jeopolitiğini yeniden şekillendirmektedir. (URL-11, 2021) Güney Gaz Koridoru, AB'nin enerji güvenliği stratejisinin önemli bir parçası ve TANAP sayesinde Hazar Denizi bölgesinden yılda yaklaşık 31 milyar metreküp doğal gaz taşınması planlanmaktadır. (Doğal Gaz Teknolojisi Cihaz ve Sistemleri Dergisi, 2016).

### 2.3 Su Boru Hatları

İnsanlar için diğer enerji kaynaklarından çok daha fazla kritik öneme sahip su kaynakları binlerce yıldır farklı maddelerden yapılmış borular ile taşınmaktadır. Günümüzde su boru hatları, boru hatları ile taşınan sıvı taşıma hatları arasında en çok taşınan sıvı hatlarıdır. Yakın yüzyılda su kaynaklarındaki azalmalar su boru hattı taşımacılığının ülkeler arasında çok uzun ve büyük çaptaki borularla yapılacağını göstermektedir.

2020 yılı Türkiye İstatistik Kurumu (TUİK) Su ve Atıksu İstatistikleri incelendiğinde, Belediye ve köylerde içme suyu/kullanma suyu şebekesi ile dağıtılmak ve çeşitli işletmeler tarafından kullanılmak amacıyla, 2018 yılında su kaynaklarından 9,5 milyar m<sup>3</sup>'ü soğutma amaçlı kullanılmak üzere toplam 17,5 milyar m<sup>3</sup> su temin edilmiştir. 2020 yılına gelindiğinde, su kaynaklarından 9,8 milyar m<sup>3</sup>'ü soğutma amaçlı olmak üzere toplam 18,2 milyar m<sup>3</sup> su hacmi boru hatları ile taşınmıştır.

2020 yılında kullanılan suyun temin edilme oranları ise denizlerden %56'sı, tatlı su kaynaklarından %44'ü(yeraltı sularından %22,5'i ve yüzey sularından %21,5'i olmak üzere) sağlanmıştır. 2020 yılında denizden çekilen suyun %93,9'u soğutma maksatlı çekilmiştir (TUİK Su ve Atıksu İstatistikleri, 2020). İSKİ verilerine göre İstanbul ilinde 15,8 milyon insanın su ihtiyacının karşılanması için 19 bin 891 km uzunluğundaki su şebeke uzunluğu kullanılarak, 2 milyon 866 bin m<sup>3</sup>/gün (2022 yılı 4 aylık ortalama) su taşınmaktadır (URL-7, 2022).

#### **2.4 Katı Madde ve Atık Boru Hatları**

Dünyadaki boru hatları sadece petrol/doğal gaz taşımacılığında değil, aynı zamanda çeşitli madenlerin ve diğer birimleştirilmiş ürünlerin taşınmasında da kullanılmaktadır. Dünyada ve ülkemizde maden cevherinin taşındığı bazı boru hatları:

- Brezilya'daki 550 km'lik Sulu Demir Cevheri Karışımı Boru Hattı (MMX Mineracao e Metalicos SA iron-ore mines in southeastern)
- Çin'deki 171 km'lik Hong Shan Sulu Demir Cevheri Karışımı Boru Hattı
- Brezilya'daki 224 km'lik Paragominas Sulu Boksit Karışımı Boru Hattı
- Türkiye'deki Murgul-Hopa arasında bakır cevheri taşıyan 63 km'lik boru hattı
- Türkiye'deki Soma-Deniş termik santralinden çıkan küllerin nakli için 7,5 km uzunluğundaki boru hattı (11. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Şûrası, 2013)

Gaz basınçlı (Pnömatik) kapsül sistemi, son yıllarda hızla yaygınlaşan ve katı atıkların toplanmasına önemli katkı sağlayan bir sistemdir. Kullanılan kapsül sisteminin en yaygın şekli, tekerlekler üzerinde hareket ettirilmesidir. Kapsül tüplerini taşımak için kullanılan



borular kare veya dikdörtgen (Şekil 2.4) olabileceği gibi genellikle dairesel olabilir (Ralbovsky, 2004).



Şekil 2.4: Farklı Şekillerdeki Pnömatik Boru Sistemleri (Ralbovsky, 2004).

20 yıl önce hayali kurulan Pnömatik Boru Sistemlerine en yakın örnek olarak Hyperloop taşımacılık sistemi örnek verilebilir. Hyperloop, 2012 yılında Elon Musk tarafından tasarlanan yüksek hızlı bir kara taşımacılığı sistemidir. Bu sistem, geniş kentsel alanları birbirine bağlayan kapalı borulardan ve düşük sürtünme sayesinde çok yüksek hızlarda hareket edebilen kapsül benzeri araçlardan oluşur. Hyperloop ile geleneksel metro ve tren sistemleri arasında iki büyük fark mevcuttur. İlk olarak, yolcuları taşıyan kapsül araçlar, sürtünmeyi azaltmak için havanın çoğunun çıkarıldığı tüpler veya tünellerden geçmektedirler. Bu durum, kapsüllerin saatte 750 mil (1207 km/saat) hızla hareket etmesine izin vermektedir. İkinci olarak Hyperloop'da, tekerlekler yerine manyetik kaldırma kuvvetini uygulanmaktadır. (URL-8, 2021)

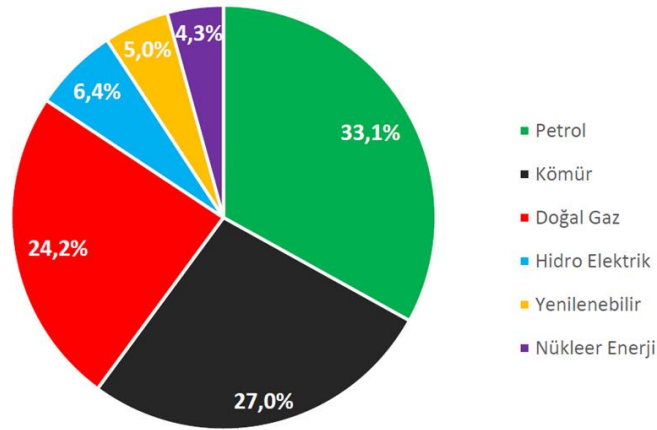
Basıncılı boru içerisindeki tüpler ile yapılan taşımalar, zaman ve maddi tasarruf açısından etkili sistemlerdir. Hemen her gün hastanelerde numunelerin bu sistemlerle taşındığına şahit olunmaktadır. Yakın gelecekte sadece numune, katı maddeler vb. ürünlerin taşınmasıyla yetinilmeyecek ve Hyperloop gibi sistemler taşımacılık sektöründe yaygın olarak kullanılacaktır.

### 3. KRİTİK ENERJİ ALT YAPI GÜVENLİĞİ KAVRAMI VE BORU HATLARI TAŞIMACILIĞINDA GÜVENLİK SİSTEMLERİ

#### 3.1 Enerji Güvenliği Kavramı

Enerji güvenliği kavramı, enerji üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinin alt yapılarına yönelik terörist saldırılardan, yatırım eksikliklerinden kaynaklanan kesintilerden, fırtınaların yaratacağı zararlardan, ambargo, grev, lokavt, iç savaş hatta işgallere varana kadar, bütün olasılıkların göz önünde bulundurulması gereken bir kavramdır. Bu nedenle enerji güvenliği ile ilgili politikalar kurgulanırken, enerji kaynaklarının bulunduğu coğrafya, maliyet, taşıma yolları, arz-talep dengesi ve ithalat bağımlısı ülkelerin uyguladığı askeri yöntemler gibi unsurlar dikkate alınır ve birlikte değerlendirilir (Pamir, 2007).

Enerji, ülkenin ekonomik ve sosyal kalkınması için en temel ve acil gereksinimlerden biridir. Bu bağlamda, "enerji güvenliği" ekonomik ve ulusal güvenliğin hayati bir unsurudur. Enerji, sosyal hayatımızı sürdürebilmemiz için gerekli olan hemen hemen tüm süreçler için vazgeçilmez bir girdidir ve sanayi, ulaşım, konut ve ticari alt sektörlerde kullanılmaktadır. Bugün dünyada tüketilen enerji, çok sayıda enerji kaynağından elde edilirken Şekil 3.1'de dağılım oranları görülen petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil kaynaklar, bu kaynakların yaklaşık %84'ünü oluşturmaktadır (Petrol ve Doğal Gaz Sektör Raporu, 2020).



Şekil 3.1: 2019 Yılı Küresel Birincil Enerji Tüketim Oranları (BP, 2020).

Günümüzdeki güvenlik tehditleri, enerjinin kaynak bölgelerden pazarlara ulaşmaya kadar geçirdiği tüm süreci kapsamaktadır. Enerji kaynaklarına, taşıma hatlarına ve rafineri

kaynaklarına yönelik saldırı ve sabotajlar, deniz yolu ile taşımacılıkta kullanılan vasıtalara yönelik korsan saldırılar ve küresel ölçekte söz sahibi otoritelerin siyasi, ekonomik ve askeri yaptırımları bu tehditlerin en önemlileri olarak sayılabilir (Alkin, 2006). Enerji güvenliğini tehdit eden unsurlar değerlendirildiğinde enerji ithalatına bağımlı olan ülkelerin gayri resmi askeri politikalarının enerji güvenliğinin korunmasına katkıda bulunmaktan ziyade uzun süreçlerde tehlikeli tehdit unsurlarına dönüşen politikalar olduğu görülmektedir. Ülkesine binlerce km uzaklıktaki enerji merkezlerine birçok üst bölgesi kurmaları, gerekirse bölgede gayri resmi silahlı gruplar kurup destek vermeleri bunun en açık örneğidir. Zira enerji hatlarına yapılan sabotajların birçoğu devletlerin kurulmasına destek verdiği silahlı yapılar olduğu görülmektedir.

Ulaşım hatlarının güvenliği kritik öneme sahiptir, çünkü tüketim alanlarına, yani pazarlara ulaşmak için enerji kaynaklarının kilit unsurudurlar. Enerji kaynaklarının piyasalara kesintisiz, daha ucuz ve güvenli bir şekilde ulaştırılmasının sağlanması ulaşım hatlarının güvenliği ile doğrudan alakalıdır. Öte yandan, ulaşım hatlarının güvenliği, enerji kaynaklarının, enerji kaynağının bulunduğu coğrafyadan piyasa coğrafyasına gemi ve boru hattı ile güvenli bir şekilde aktarılmasını içerir. Küresel anlamda, gelişmiş ülkeler sanayileşmiş batı yarımkürede enerji tüketirken, Amerika ve Kuzey Denizi hariç, üretim, çoğunlukla doğu yarımkürede olmaktadır. Bu sebepten dolayı doğudan batıya enerji üretim merkezlerinden, enerji pazarlarına doğru bir uluslararası boyutta enerji taşımacılığı gerçekleşmektedir (Özil, 2004).

Toplumların enerjiye olan taleplerinin artması ile enerji arzı için ekonomik ve hızlı bir taşıma türü olan boru hatları taşımacılığının önemi ile beraberinde güvenliği de sık sık gündeme gelmektedir. Boru hatlarının yapım aşamasından, kullanıma açılması ve işletilmesine kadar olan bu uzun sürecin en önemli aşaması, hattın güvenli bir güzergahta inşa edilmesidir. Boru hatlarının binlerce kilometre uzunluğunda olması ve birçok ülkeden geçmesi hattın güvenliğinin sağlanmasında çeşitli zorluklar ve tehditler ortaya çıkmaktadır.

### **3.2 Kritik Enerji Altyapı Güvenliği**

Avrupa Birliği kritik altyapıların güvenliğinin sağlanması konusunda ilk kez 2004 yılında konuyu gündemine almış ve çalışma başlatmıştır. Bu kapsamda Avrupa Komisyonu tarafından, “Terörizmle Mücadele Kritik Altyapının Korunması” belgesini yayımlamıştır

(Critical Infrastructure Protection, 2004). Bu belge temel alınarak hazırlanan, “Kritik Altyapının Korunması için Avrupa Programı” (European Programme for Critical Infrastructure Protection-EPCIP) ile Birlik üyelerinin kritik altyapı unsurlarının korunması konusunda detaylı bir liste hazırlanmıştır (European Programme for Critical Infrastructure Protection, 2004). Bu gelişmelerden, yaklaşık iki yıl sonra, 12 Aralık 2006 tarihinde “Kritik Altyapının Korunması için Avrupa Programı Direktifi” yayımlanmıştır. Direktifte Avrupa’nın sahip olduğu kritik altyapıların her türlü saldırı vb. olaylara karşı korunması için Birlik üyelerinin ulusal mevzuatlarının bu çerçevede kapsamında yeniden biçimlendirilmesi istenmiştir (The European Programme for Critical Infrastructure Protection (EPCIP), 2006)

AB Komisyonu'nun 2004 tarihli "Terörizmle Mücadele Kapsamında Kritik Altyapıların Korunması" başlıklı, 702 sayılı bildirisinde, kritik altyapı "... İnsanların hayati sosyal işlevlerini, sağlığını, güvenliğini, ekonomik ve sosyal refahını korumak için gerekli olan ve bu işlevlerin sürdürülememesinin bir sonucu olarak bozulma veya yıkımın bir Üye Devlet üzerinde önemli bir etkisi olacak olan ilgili kuruluş, sistem veya parçalar." şeklinde tanımlanmıştır (BTK, 2010).

Japonya’da ise kritik altyapılar;

"Kritik altyapı, insanların sosyal yaşamına ve ekonomik faaliyetlerinde vazgeçilmez olan ve vazgeçilmez hizmetler sunan iş birimlerinden oluşmaktadır. Altyapı işlevi durursa, azalır veya erişilemez hale gelirse, insanların sosyal yaşamları ve ekonomik faaliyetleri altüst olur." olarak tanımlanmıştır (Japan Information Security Policy Council, 2005).

ABD mevzuatında “kritik altyapı” tanımı;

"Amerika Birleşik Devletleri'nin fiziksel veya sanal sistemleri ve hayati varlıkları, varlıkların kapasitesiz bırakılması veya güvenlik, ulusal ekonomik güvenlik, ulusal halk sağlığı veya tüm bunların bir kombinasyonu üzerinde zayıflatıcı bir etkiye sahip olacak yapı" şeklindedir (BTK, 2010).

### **3.2.1 Kritik Enerji Altyapı Güvenliğinin Sağlanmasında Ulusal ve Uluslararası Açıdan Hukuki Durum**

Türkiye'nin doğal gaz ve ham petrol boru hatlarına yönelik terör eylemleri ve hırsızlıkların yaşanması güvenlik sorununu her zaman gündeme getirmektedir. 2010 yılında Ankara'da

yapılan güvenlik toplantısında yetkililer, 86 noktada termal kameralarla izlenen boru hatlarının korunması için ek güvenlik önlemlerinin alınması ve bu önlemlerin başında enerji boru hatlarının korunması ve kontrol altına alınması için insansız hava araçlarının kullanılması kararı almıştır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, enerji boru hatlarının güvenliğinin sağlanması kapsamında askeri tesislerin korunmasında tecrübeye sahip Savunma Sanayiinden Sorumlu Devlet Müsteşarı ile iş birliği yapmış ve iki kurumdan teknik personelden oluşan bir ekip oluşturulmuştur (Akın'dan akt. Savunma Sanayii Müsteşarlığı, 2014).

Geleneksel güvenlik sistemlerine bütünleşmiş yeni bir güvenlik sistemi ile tüm boru hatlarını, istasyonları ve tesisleri korumayı amaçlamaktadır. Proje, Enerji Altyapı Güvenliği adı verilen projenin pilot uygulamasının 2016 yılında tamamlanmasını ve 2019 yılına kadar tüm projenin Türkiye'deki tüm boru hatları ve enerji tesislerine yaygınlaştırılmasını hedeflenmektedir (Akın'dan akt. Sayıştay Başkanlığı, 2013).

Ülkemizde kritik enerji alt yapı unsurlarının korunmasına yönelik çeşitli kanun, yönetmelik ve anlaşmalar bulunmaktadır. 23 Haziran 2000 yılında Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe girmiş olan "**Petrolün Boru Hatları İle Transit Geçişine Dair Kanun**" 6. Maddesi incelendiğinde kritik altyapı güvenliğinin sağlanması konusunda " Madde 6 – Bir transit petrol boru hattı projesi ile ilgili olarak güzergâh belirlenmesi ve değerlendirilmesine ilişkin ilk proje faaliyetlerinden başlayarak tüm proje süreci boyunca ve proje tamamlandıktan sonra, bu Kanun kapsamında yer alan proje faaliyetlerinin söz konusu olduğu bölge içindeki tüm arazi ve tesislerin emniyet ve güvenliği 2495 sayılı Yasa (**Bazı Kurum ve Kuruluşların Korunması ve Güvenliklerinin Sağlanması Hakkında Kanun**) hükümlerine göre sağlanır. Boru hattı ve tesislerin ilave güvenlik ihtiyacı ise, gerekli bina, tesis, malzeme, araç, teçhizat vb. bedeli ilgili kamu kurumu tarafından karşılanmak suretiyle devletin ilgili güvenlik kuvvetince sağlanır" şeklinde ifade edilmiştir (Petrolün Boru Hatları ile Transit Geçişine Dair Kanun, 2000). Kanun maddesinin içinde yer alan 2495 Sayılı Bazı Kurum ve Kuruluşların Korunması ve Güvenliklerinin Sağlanması Hakkında Kanun 10/6/2004 tarihli ve 5188 sayılı Kanunun 27. nci maddesiyle yürürlükten kaldırılmıştır (Bazı Kurum ve Kuruluşların Korunması ve Güvenliklerinin Sağlanması Hakkında Kanun, 1981). Ancak Petrol/Doğal Gaz Boru Hatları Taşımacılığıyla alakalı olarak 30 Nisan 1983 yılında Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren 1553 sayılı **Askeri Yasak Bölgeler ve**

**Güvenlik Bölgeleri Yönetmeliği** hala yürürlükte olup “ Özel Güvenlik Bölgeleri, 21.Maddede Özel güvenlik bölgeleri, yurt savunmasına veya yurt ekonomisine önemli ölçüde katkıda bulunan ve kısmen dahi tahripleri veya geçici bir zaman için faaliyetten alıkonmaları halinde milli güvenlik veya toplum hayatı bakımından olumsuz sonuçlar doğurabilecek kamu veya özel kuruluşlara ait; rafineriler, demir çelik fabrikaları, **bu boru hatları** üzerinde kurulu sabit tesisler ile sınıvlandırılmış **doğal gaz tesisleri ve depoları, petrol, doğal gaz ve içme suyu boru hatları ile arıtma tesisleri, petrol kuyuları, büyük pompa istasyonları, (...)** ,barajlar gibi hayati önemi haiz tesisler..., açıklaması yer almaktadır (Askeri Yasak Bölgeler ve Güvenlik Bölgeleri Yönetmeliği, 1983). İlgili kanun ve yönetmeliklerden anlaşılacağı üzere kritik enerji alt yapı unsurlarından boru hatlarının güvenliğinden sorumlu makam devletin güvenlik birimleridir.

Enerji boru hattı güvenliğinin bir diğer önemli yönü, tehditlerin neden olduğu hasarların milyonlarca doları bulmasıdır. Yapılan anlaşmaların niteliğine bağlı olarak ev sahibi devlet veya ortakları tarafından hasarın açmış olduğu mali zarar karşılanır. Ortaya çıkan mali zarar, sadece boru hattının onarımının maliyetiyle kısıtlı değildir. Mali zarar, boru hattı hasarı sonucu dökülen petrol veya salınan doğal gazın maddi karşılığı ve onarımlar için geçen süre boyunca oluşan işletme kaybının da eklenmesiyle artmaktadır. Bu nedenle, enerji boru hatlarına verilen zarar, yalnızca parasal açıdan bakıldığında bile önemli oranlara ulaşmaktadır. Örneğin 2013 yılında Türkiye’de boru hatlarına yönelik bir sabotaj düzenlenerek yaklaşık 680.000 dolar zarara neden oldu. Aynı yıl boru hatlarına yönelik 89 hırsızlık olayı toplam 2,5 milyon dolar zarara neden oldu (Akın, 2015).

Birden fazla ülkeden geçen kritik enerji altyapı projelerinin güvenliği için **Hükümetler Arası Antlaşmalar (Intergovernmental Agreement, IGAs)** ile bu antlaşmalara ek olarak ilgili yüklenici şirketler arasında imzalanan sözleşmeler yapılmaktadır. Bu kapsamda bahsi geçen antlaşmaların ve sözleşmelerin hükümleri ile bunların hukuki değerlendirmesi, kritik enerji altyapılarının güvenliği, işletilmesi, bakımı ve kullanıma açılması açısından çok önemlidir.

Bu antlaşma ve sözleşmeler ise, sırasıyla **Ev Sahibi Hükümet Anlaşması** (Host Government Agreement, HGA) ve **Anahtar Teslimi Yapım Sözleşmesi** (Turnkey Agreement) ile **Hükümet Garantisi Anlaşması** (Government Guaranty Agreement)’dir. Bu

antlaşmalardan Hükümetler Arası Antlaşma taraf ülkeler arasındaki ilişkiyi, Ev Sahibi Hükümet Anlaşması her bir ülke ile yatırımcı şirketler arasındaki hak ve yükümlülükleri düzenlemekte, Anahtar Teslimi Yapım Sözleşmesi ise ilgili devlet adına yüklenici firma tarafından hattın kendi devlet sınırları içerisinde kalan kısmının anahtar teslimi için ekonomik şartları belirlemektedir. Ev Sahibi Hükümet Anlaşması'yla projenin kendi topraklarından geçen kısmı için devlet tarafından Ev Sahibi Hükümet Anlaşması ve Anahtar Teslimi Yapım Sözleşmesi kapsamında yükümlülüklerine ilişkin olarak verilen garantileri içermektedir. Hükümetler Arası Antlaşma'da temel olarak tüm ülkelerin Proje'nin gerçekleştirilmesini teminen birbirleriyle aralarındaki karşılıklı mutabakat, anlayış ve yükümlülükler ile proje'ye verecekleri desteklere yer verilmektedir (Çal, 2008)

Özetle Uluslararası Kritik Enerji Altyapı Projelerinde tüm sorumluluklar projeye henüz başlamadan, tüm hususlar Hükümetler Arası Antlaşmalar ile belirlenmektedir. Antlaşmalar ve anlaşmalar doğrultusunda altyapı işletilmekte, olumsuz bir olay olması durumunda hükümler uygulanmaktadır.

### **3.2.2 Kritik Enerji Altyapı Unsurlarının Güvenliği ve Türkiye'deki Mevcut Durum**

Türkiye'de kritik enerji altyapı güvenliği, tesis dışı ve tesis içi güvenlik olarak ikiye ayrılmaktadır. Elektrik ve boru iletim hatları, tesis dışı güvenlik kapsamına girerken LNG terminalleri, petrol rafinerileri, barajlar ve ileriki tarihlerde kurulacak olan nükleer tesis yapıları ise tesis içi güvenliğini oluşturmaktadır. Türkiye'de tesis içi güvenlik kapsamında yer alan kritik enerji altyapı unsurlarından farklı olarak petrol ve doğal gaz boru nakil hatları, ulusal ve uluslararası düzeyde hayati öneme sahip olduklarından ötürü ekonomi, güvenlik ve çevre boyutları bakımından tesis dışı güvenlik kapsamında değerlendirilmektedir. Enerji arz güvenliği ve Türkiye'den geçen boru hattı uzunluğunun 20.000 km olduğu dikkate alındığında, kritik enerji altyapı güvenliği Türkiye için boru hatlarını ön plana çıkarmaktadır (USAK, C.1, 2011).

Enerji güvenliğinin sağlanmasında hayati bir rol oynayan kritik enerji altyapı unsurlarının güvenliği genel hatlarıyla boru hatlarının işletmesinden sorumlu BOTAŞ, jandarma ve diğer kolluk kuvvetlerinin ortaklaşa çalışmalarıyla sağlanmaktadır. Bunlara ek olarak 26 Haziran 2004 tarihinde Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren 5188 sayılı kanun gereği valilikler bünyesinde oluşturulan özel güvenlik birimleri de görev almaktadır (Özel

Güvenlik Hizmetlerine Dair Kanun, 2004). Boru hatlarının güvenliği hususunda Enerji Bakanlığı, BOTAŞ, Genelkurmay Başkanlığı, Jandarma ve Sahil Güvenlik Komutanlığı ortaklaşa çalışmaktadır. Ayrıca, akaryakıt boru hatları, 2565 sayılı kanunun 20. maddesine istinaden “özel güvenlik bölgesi” kapsamındadır (Keçeci’den akt. Askeri Yasak Bölgeler ve Güvenlik Bölgeleri Kanunu, 1981).

Boru hattı tesislerinin özel güvenlik bölgesi kapsamına alınması konusunda son olarak 13 Ağustos 2021 tarihinde Türkiye Cumhuriyeti Resmî Gazetede 4371 sayılı karar yayınlanmıştır. İlgili kararın 11. Maddesinde, BOTAŞ ham petrol ve doğal gaz boru hatları ve bunlara ait tesislerin güvenliği açısından bu boru hatları ve tesisler 2565 sayılı Kanun kapsamına alınacağı, kamulaştırma yapılan özel güvenlik bölgelerine ait arazi (tesis dışındaki boru hatları hariç) BOTAŞ tarafından tel ve duvar gibi engellerle çevrilir ve 100 ile 200 metre aralıklarla; 60 cm x 90 cm ebadında beyaz zemin üzerine kırmızı renkle “BOTAŞ Özel Güvenlik Bölgesi Girilmez” ibaresi ile bu ibarenin Türkçe, İngilizce, Almanca ve Fransızca dillerinde yazılımı olan levhalar konması gerektiği, BOTAŞ tesisleri ve boru hatları güvenliği, BOTAŞ Genel Müdürlüğünün kurumsal kalite, boru hatlarının teknik emniyeti ve güvenli işletimi faaliyetlerinden sorumlu daire başkanlığı ve işletme birimleri tarafından bu Yönetmelik ile özel güvenlik bölgesi ilan edilen BOTAŞ tesisleri 2565 sayılı Kanun ve diğer ilgili mevzuat hükümlerine göre periyodik olarak denetlenmesini sağlar ve sonucu takip edeceği, yetkili makamlarca etrafında özel güvenlik bölgesi kurulması/güncellenmesi uygun görülen boru hattı ve tesisler için özel güvenlik bölgesi öneri dosyaları hazırlanarak BOTAŞ Genel Müdürlüğünce en kısa sürede ilgili valiliğe gönderileceği konularına yer verilmiştir (T.C. Resmî Gazete, 2021). Ayrıca kararda boru hatları ve tesislerinin diğer tesislere olan emniyet mesafeleri de açıklanmıştır.

Tekrardan tesis içi ve dışı güvenlik konusuna bakılacak olursa, tesis içi güvenlikten özel güvenlik şirketleri sorumlu iken, tesis dışı güvenlik ağırlıklı olarak Jandarma Genel Komutanlığı tarafından sağlanmaktadır. Buna ek olarak, 2010 yılı itibariyle Jandarma, stratejik öneme sahip 34 tesisin yanı sıra İran-Türkiye, BTC ve Kerkük-Yumurtalık Ham Petrol Boru Hatları’nı kapsayacak şekilde toplam 2.379 km uzunluğunda ham petrol ve doğal gaz altyapı sistemlerini koruma altına almıştır. Boru hatları boyunca Jandarmaya ait 33 koruma timi ve 35 koruma karakolu bulunmaktadır (USAK, C.1, 2011).



Boru Hatları Güvenliğinin %99'u 2016 yılı öncesinde Türk Silahlı Kuvvetleri (TSK) tarafından sağlanmaktaydı. 2016 yılından sonra Jandarma Genel Komutanlığı (JGK)'nın İç İşleri Bakanlığına bağlanması ile güvenlik sorumluluğu büyük oranda JGK'na geçmiştir (Alsancak, 2010).

Türkiye'de bulunan boru hatlarından; Türkiye-İrak ve Bakü-Tiflis-Ceyhan (BTC) ham petrol boru hattı, Türkiye-İran doğal gaz boru hatları, terminalleri ile ülkenin çeşitli kesimlerine yayılmış bulunan petrol ve doğal gaz iletim hatları Jandarma Birlikleri tarafından genel emniyet ve asayiş hizmetleri kapsamında korunmaktadır. Ayrıca sorumluluk bölgelerinden petrol ve doğal gaz boru hattı geçen iç güvenlik birlikleri tarafından korunmaktadır. Bunlara ilave olarak BTC'nin çok uluslu bir proje olmasından dolayı hattın korunması Türkiye sınırları içinde devlet güvencesindedir. Akdeniz'de İskenderun Körfezindeki deniz terminallerine bağlantısı bulunan Bakü-Tiflis-Ceyhan ve Türkiye- Irak ham petrol boru hatları, deniz terminalinden deniz yolu ile dünya piyasalarına ulaştırılmaktadır. BOTAS'ın Marmara Ereğlisi tesisleri ile doğal gaz depolama ve dağıtım faaliyetlerinin güvenli bir şekilde yürütülmesi için Sahil Güvenlik Komutanlığı tarafından İskenderun Körfezi'nde ve Marmara Denizi'nde bahse konu terminallerin çevresinin denizden güvenliği sağlanmaktadır (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Şûrası, 2013).

Aselsan-Havelsan İş Ortaklığı kapsamında kritik enerji altyapı ve kritik tesislerin korunması amacıyla Petrol ve Doğal Gaz Boru Hattı Güvenliği Projesi için saha başvuruları, 28 Ekim 2018 tarihinde Silopi'de imzalanan anlaşma ile başladı. Proje kapsamında terör faaliyetlerine, sabotaja, hırsızlığa ve izinsiz kazılara karşı kapalı devre kameralar için fiber optik algılama, elektro-görsel algılama, çevre güvenlik radarı, yerel donlar ve alt sistemler ile desteklenen entegre bir yerel ve ulusal güvenlik sistemi ile kritik enerji altyapıları, boru hatları ve hayati önem taşıyan tesisler 7/24 çevredeki tehditlerden korunacaktır (URL-6, 2018).

### **3.2.3 Kritik Enerji Altyapı Unsurlarında Meydana Gelebilecek Tehditler**

Kritik öneme sahip enerji altyapı unsurlarında meydana gelebilecek iki tehdit bulunmaktadır: İlki, tehlikelere karşı güvenlik tedbiri alınabileceği ve gerekli yasal mevzuatın oluşturulmasının yeterli olduğu olağan (sıradan) tehditler; ikincisi ise, genel hatlarıyla ulusal mevzuatın yanında uluslararası düzenleme ve iş birliği gerektiren

öngürülmeyen tehditlerdir (USAK, C.3, 2011).

Olağan (Sıradan) Tehditler:

- Hırsızlık
- İhlaller ve Kazalar
- Vandalizm
- Toplumsal Tepkiler
- Ticari Casusluk

Öngürülmeyen Tehditler:

- Terör Faliyetleri
- Siber Saldırıları
- Sabotajlar
- Doğal Afetler (USAK, C.3, 2011).

Boru Hatları Taşımacılığında hattın inşa aşamasından kullanıma açılması ve işletilmesi aşamasına kadar olan uzun sürecin en önemli unsuru hattın güvenli bir güzergahta inşa edilmesi unsurudur. Boru Hatlarının binlerce km uzunluğunda olması ve birçok ülkeden geçmesi hattın güvenliğinin sağlanmasında çeşitli tehditler yol açmaktadır.

1991'deki Körfez Savaşı, 2003 yılındaki Irak ve Afganistan Savaşı, 2006 ve 2009 yıllarında Ukrayna'da yaşanan gaz krizi, 2008'deki Rusya-Gürcistan Savaşı, bölgesel istikrarsızlıklar ve enerji arzında, pazar ülkeler arasında endişelere yol açmıştır. Son gelişmeler dikkate alındığında, Arap Baharı ile Kuzey Afrika'yı da içine alan 2010'daki Libya Savaşı, 2011 yılında başlayan Suriye iç savaşı ile ortaya çıkan, terör saldırıları, etnik ve dinsel çatışmalar ve siyasal istikrarsızlıklar, enerji arz güvenliğini tehlikeye düşürecek sonuçlar çıkarabilmektedir (Biol, 2019). Nitekim 2022 yılında Rusya ve Ukrayna arasında yaşanan savaş, Avrupa'ya birçok kritik enerji maddesinin sevkiyatında yavaşlama ve duraksamalara neden olmuş ve tüm dünyada ekonomik krizlere yol açmıştır. Savaşın etkisi ile birçok fosil yakıtın fiyatları artmıştır. Artan enerji fiyatları enflasyon oranlarının artmasına neden olmuştur.

Boru hatlarını tehdit eden unsurların başında sabotaj amaçlı terör saldırıları, siber saldırılar, hırsızlık/kaçakçılık, kazalar ve doğal afetler gelmektedir. Tahmin edilemeyen tehditler

olarak sınıflandırılan bu unsurlara yönelik olarak küresel ölçekte düzenlemeler ve iş birliklerinin sağlanması gerekmektedir. Ayrıca bunlara ek olarak boru hatlarının kontrol ve gözlemlenmesi amacıyla kurulmuş SCADA (Veritabanlı Kontrol ve Gözetleme Sistemi) sistemlerine yönelik olabilecek olan siber saldırılar da değerlendirilmelidir (Pipeline Security Guidelines, 2018).

Yukarıda belirtildiği gibi inşa edilen hatların işletilmesi esnasında da bazı güvenlik kuralları konulması ve uygulanması gerekmektedir. Büyük boyutlarda gerçekleşen endüstriyel kazaların arasında boru hatlarının önemli bir yer tuttuğu görülmektedir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki boru hatları tehlikeli olayların tür ve sayıları incelendiğinde sadece 2020 yılında boru hatları kazaları neticesinde 15 kişi ölmüş, 40 kişi yaralanmıştır. Bu kazaların nedenlerine baktığımız zaman korozyon nedeniyle %16,5- kazı hasarı nedeniyle %11,9- doğal afetler nedeniyle %4,5- bilinmeyen nedeniyle %2,4- teknik yanlışlıklar nedeniyle %12,3- malzeme/kaynak/donanım nedeniyle %45,6- diğer dış etkenler (elektrik arki, yangın, patlama) nedeniyle %6,8 oranlarında olduğu tespit edilmiştir (PHMSA, 2022). Mutlaka güvenlik yönetim sistemi kurmak ve sorunlara tümleşik biçimde yaklaşmak gerekmektedir.

### **3.2.3.1 Terör Faaliyetleri ve Sabotajlar**

Kritik enerji altyapı unsurlarına yönelik terör faaliyetlerinin temel amaçları, “üretici ülkeleri piyasadan, transit ülkelerinin elde ettiği gelir ve saygınlıktan ve tüketici ülkeleri ihtiyaç duydukları enerji kaynaklarından yoksun bırakmak, hükümetler üzerinde siyasi baskı ve uluslararası arenada sansasyon oluşturmaktır” (USAK, C.3, 2011). Uluslararası Memorial Terörizmi Önleme Enstitüsü (MIPT, National Memorial Institute for the Prevention Terrorism) tarafından yapılan araştırmaya göre, “1990-2005 yılları arasında boru hatlarına yönelik üç yüz otuz terörist saldırı düzenlenmiş, 1998-2007 yılları arasında gerçekleştirilen terör saldırılarının yüzde birinin kritik enerji altyapı unsurlarına (boru hatlarına) yönelik olduğu görülmektedir. Saldırı düzenlenen ülkeler ise Kolombiya, Pakistan ve Irak gibi transit ve kaynak ülkeler olduğu görülmektedir” (Toft vd., 2010). Sabotaj ve saldırıların amacı ise, boru hatlarının taşıdığı petrol ve doğal gazın akışını kesintiye uğratmak, mali açıdan ülkeleri zora sokmak ve en önemlisi siyasi mesaj vermektir. Dolaylı olarak, enerji fiyatlarının yükselmesine, piyasadaki istikrarın bozulmasına, ekolojik deformasyon ile can kayıplarına neden olmaktadır (USAK, C.3, 2011). Türkiye'nin yer aldığı ve yakın çevresinde bulunan Ortadoğu, Kafkasya, Güney Amerika ve Afrika gibi kaynak ve istikrarsız bölgelerdeki terör

saldırılarının %35'i kritik enerji altyapı tesislerindedir (Giroux, 2009).

### **3.2.3.2 Siber Saldırı ve Tehditleri**

Kritik altyapı sistemlerinin yönetimi ve izlenmesinde Veritabanlı Kontrol ve Gözetleme Sistemi, SCADA olarak isimlendirilen kontrol sistemleri kullanılmaktadır (Karabacak, 2011). SCADA sistemi kurumsal ağlar üzerinden denetimi sağlamakta ve yönetilmektedir. Bu durumda, kritik altyapı unsurlarını siber tehlikelere karşı birincil hedef haline getirmektedir. Siber saldırılar, verilerin çalınması ve erişiminde sorun yaşanarak uygulamaların bloke edilmesi şeklinde “verilere” ve çeşitli zararlı yazılım ve virüsler aracılığıyla elektronik ortama bağlı şebekelerin çökmesi sonucu olarak da “kontrol sistemlerine yönelik saldırılar” olmak üzere iki şekilde gerçekleşmektedir (USAK, C.3, 2011). Dünya Ekonomik Formu öngörülerine göre, siber tehdidin artması ve bunun küresel maliyetinin on yıl içerisinde yaklaşık olarak 250 milyar dolar olması beklenmektedir (World Economic Forum, 2008). 2022 yılında ise siber tehditlerin küresel maliyetleri trilyon dolarlarla ifade edilmektedir.

### **3.2.3.3 Hırsızlık ve Vandalizm**

Bu saldırılara en açık olan yapılar petrol ve doğal gaz boru hatlarıdır. Geçiş güzergahları itibariyle boru hatlarının hepsi toprak altından geçemediği için açık hedef haline gelmektedir. Hırsızlık olayları; hattın delinmesi, kelepçe ile patlatılması veya hatlara vana takılması şeklindedir. Bu saldırıya maruz kalan nakil hatları fiziki hasarlara uğramakla beraber, onarımı için petrol pompalanmasının kesilmesiyle petrol fiyatlarını arttırmakta ve hattın ömrünü kısaltarak uzun vadede ekolojik tahribatlara yol açmaktadır. Vandalizm ise, sebepsiz ve keyfi herhangi bir şeyi tahrip etme olayı olduğundan dolayı, ekonomik ve toplumsal infiallere neden olan bir tehdit olarak karşımıza çıkmaktadır (Keçeci, 2013).

Boru hattı güvenliğine karşı diğer tehditlerin başında yasadışı vana çekilmesi gelmektedir. 2003-2008 yılları arasında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre, yüzlerce yasadışı vana olayları meydana gelmiştir. 2006 yılından itibaren Türkiye'nin özellikle güvenlik birimleri, Jandarma, diğer ilgili devlet kurumları ve boru hattı boyunca gelişmiş elektronik algılama güvenlik sistemlerinin proaktif çabaları sayesinde azalmalar olmuştur (URL-9, 2009).

BOTAŞ'ın ham petrol boru hatlarından hırsızlık yaparken yakalananlar, Türk Ceza Kanunu'nun 142. maddesi uyarınca enerji nakil tesislerinde suç işlemiş olup, nitelikli hırsızlıktan 12 yıl hapis cezasına çarptırılır. Gece ilgili suçun işlenmesi durumunda ise ceza, Türk Ceza Kanunu'nun 143. maddesi uyarınca 18 yıla kadar artırılmaktadır. Ayrıca, Türk Ceza Kanunu'nun 152. maddesi "kamu malına zarar vermek" suçundan 21 yıla kadar hapis cezası verilmektedir (URL-6, 2018).

### **3.2.3.4 Doğal Afetler**

Deprem, sel, yangın, hortum vb. afetler hem insan hayatına hem de ülke ekonomisine olumsuz etki etmekle birlikte ne zaman ne şekilde olacağı bilinmemekte veya bilinmesi durumunda yalnızca etkisini azaltmaya yönelik tedbirler alınabilmektedir. 2005 yılında ABD'yi vuran Katrina Kasırgası, 2007'de İngiltere'de meydana gelen sel felaketi ve son olarak 2011 senesinde Japonya'da meydana gelen deprem felaketi sonrasında Fukushima Nükleer Santrali faciası enerji altyapı tesis ve sistemlerini olumsuz etkilemekle kalmamış hem ekolojik hem de beşerî yıkımlara neden olarak ülke ekonomilerine milyar dolarlık zararlar vermiştir (USAK, C.3, 2011).

Petrol ve doğal gaz nakil boru hatları enerji kaynaklarının kesintisiz, devamlı ve güvenli bir şekilde diğer bölgelere ulaştırılmasını sağlayarak bu sayede enerji güvenliğine pozitif katkı sağlayan kritik altyapı unsurları olarak görülmektedir. Boru hatlarının düzenli çalışmasına engel teşkil edebilecek her türlü kaza, saldırı veya tehdit ekonomik ve siyasi kayıpların yanı sıra güven kayıplarına da neden olmaktadır. Kritik enerji altyapı güvenliğinin sağlanması, enerji arz ve talep güvenliği kadar elzem ve bunlarla doğrudan bağlantılı bir konudur.

## **3.3 Boru Hatları Taşımacılığında Güvenlik Sistemleri ve Yaşanan Gelişmeler**

### **3.3.1 Boru Hatları Güvenliğinde Geleneksel Sistemler**

Güvenlik Sistemi denildiğinde akla gelen ilk cihaz güvenlik kameralarıdır. Güvenlik kameraları 1942 yılında Almanya'da icat edilmesi ile günümüze kadar birçok teknolojik gelişime uğrayarak geliştirilmiştir. Güvenlik kameraları güvenliğin sağlanmasında önemli bir yer tutsa da boru hatları taşımacılığında güvenliğin sağlanması için tek başına yetersiz kalmaktadır. Binlerce kilometre uzunluğundaki boru hatlarını kameralar ile izlemek ve güvenlik kulübeleri inşa etmek gibi fikirlerle güvenliğinin sağlanması imkansızdır. Ayrıca

hattın her kesimine kamera veya kulübe koymak imkansızdır.

Güvenlik sorunlarının artması doğal olarak kamera güvenlik sistemlerine olan ihtiyacı da artırmaktadır. Güvenliğin sağlanması için birçok kamera donanımı ve programı kullanılmaktadır. Ancak bu işlemlerde kamera görüntüleri sürekli olarak kaydedilir ya da sadece kamera görüntüleri görevli tarafından ekranlardan izlenebilmekte ve sadece bir güvenlik sorunu oluştuğunda müdahale edilebilmektedir. Görevli bir personelin ekrana en fazla 30 dakika boyunca dikkatlice bakması mümkündür. Öte yandan, kamera verileri kullanılan belleği doldurduğu için uzun süre saklanamamaktadır. Hareket Sensörlü Kameralarda kayıt işlemi sadece hareket anında yapıldığından bellek kısa sürede doldurulmaz aynı zamanda yakalanan nesnelere her harekette bildirim vermeleri nedeniyle gözden kaçması engellenir ve ayrı bir kayıt tutmaya gerek kalmaz (Çakır ve Babacan, 2011).

Terör saldırıları kapsamında koruma noktalarında ani saldırılar sonucu birçok silahlı kuvvetler personeli şehit olmuştur. Bu kapsamda nöbet, gözetleme ve güvenlik kulubelerinde ani saldırılara karşı zırhlı yapıları kullanılmaktadır (Şekil 3.3). Zırhlı yapıların yüksek maliyetleri değerlendirildiğinde, özellikle terör ve sabotaj tehditi olabileceği değerlendiren boru hatları güzergahlarında kullanılması daha ekonomik olacaktır.



Şekil 3.2: Zırhlı Güvenlik Kulübesi (URL-5, 2019).

### 3.3.2 Boru Hatları Güvenliğinde Dağıtık Akustik Algılama Sistemleri (DAS)

Dağıtık Akustik Algılama Sistemleri (DAS) akustik oluşum yapan tüm sesleri algılayan ve bunları önceden kaydı yapılan akustik frekanslar ile karşılaştırarak akustik algının cinsini ve konumunu bulmamıza yarar. Akustik algılama işlemini saniyeler içinde yapar, konumunu belirler ve yönetim merkezine gerekli uyarıyı verir. Böylelikle büyük maddi ve manevi kayıpların oluşması önlenir.

DAS Boru Hatları Taşımacılığının sadece güvenliğini sağlamakla kalmaz. Boru hatları yüzlerce km uzunlukta olması nedeniyle boru hattı boyunca geçen fiber hat akustik algıma yaparken aynı zamanda sismik frekansları da algılar. Sismik frekansları algılaması Sismoloji Biliminin gelişimi açısından çok önemli gerçek veriler elde etmemizi sağlar. Depremin merkez üstünün belirlenmesi, fay hattı oluşumunun konumu, deprem dalgalarını yönünün belirlenmesi gibi birçok bilgi edinmemizi sağlar.

DAS Boru Hatları Taşımacılığında kullanılan güvenlik sistemlerinin ana unsuru konumundadır. Boru Hatları taşımacılığında kullanılan İnsansız Hava Araçları (İHA), DRON'lar gibi araçların güvenliğin sağlanması için yaptığı devriye uçuşlarında yüzlerce km. uçuş yaparlar. Herhangi bir tehdit olduğunda konumun tespitini yapmaları bazen birkaç saati bazen günleri alabilir. Boru hattında DAS olması durumunda tahdit bölgesi saniyeler içerisinde tespit edilir ve hava araçlarının bölgeye hızlı bir şekilde intikali sağlanmış olur.

Farklı şirketler tarafından 1,850 km.'lik Trans Anadolu Doğal Gaz Boru Hattı'na (TANAP) yenilikçi güvenlik, izleme ve haberleşme teknolojisi sistemleri uygulanmıştır. Hattın güvenlik, telekomünikasyon, SCADA sistemleri için "Ana Kontrol Merkezi" ve boru hattı güzergâhındaki fiber optik kablo montajının gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bu proje kapsamında dünyada ilk kez, deniz altı boru hattında çapa sürüklenmesi ve boru hattında kaçak meydana gelmesi gibi boru hattına zarar verebilecek olayların tespitinde fiber optik algılama sistemi kurulmuştur. Projede ağır hava ve arazi şartları altında, 4.000 km'nin üzerinde fiber optik kablo yerleştirilmiş ve kontrol ve telekomünikasyon sistem verileri boru hattı boyunca uzanan fiber optik kablolarla iletilmiştir. Emsalleri arasında dünyanın en uzun boru hattı olan bu sistem, çok yüksek boyutlardaki verileri işleme kapasitesine sahip geniş bir haberleşme ağı sağlamaktadır. Boru Hattı Tehlike Algılama Sistemi tüm boru hattını kontrol etmektedir. Bu sistem 1.300 adetten fazla kamera ve 650 adet "Kontrollü Geçiş

Sistemi” noktasını içermektedir (URL-10, 2018).

Ayrıca, IP telefon (Kriptolu veya kullanıcı adresli, kablosuz geniş bant aralığına sahip telsiz/telefon,) sistemi üzerinden tüm tesisler arasında ara yüz oluşturan güçlü bir saha haberleşme sistemi kullanılmaktadır. 2.900 hoparlörüyle, IP telefon sistemlerine entegre Genel Seslendirme Genel Alarm (Public Address General Alarm, PAGA) telsiz sistemleri bulunmaktadır. Boru hattının tümünü Ana Kumanda Merkezinden (Main Control Center, MCC) kontrol eden ve izleyen SCADA sistemi kurulmuştur. Ana Kumanda Merkezlerine ek Kontrol Merkezleri kurulmuştur. Kontrol Merkezleri sayesinde operatör, belli bir boru hattında veya boru hattının tamamında kimin işlem yaptığını ve nereden kontrol edildiklerini her zaman görebilecek ve kontrol edebilecektir. Birden fazla kontrol operatörü olan kurulumlarda, bu tarz özelliklere sahip güvenlik sistemlerinin olması kontrol mekanizmasını güçlendirmektedir. SCADA, hem fiber optik tabanlı Boru Hattı Tehlike Algılama sistemine gelen bilgileri kullanan, hem de model tabanlı iki ayrı kaçak algılama sistemine ara yüz oluşturmaktadır. Fiber tabanlı sistem ayrıca boru hattı içi temizlik piglerinin takibi için de kullanılmaktadır (URL-10, 2018).

Başka bir firma tarafından, TANAP boru hattı boyunca uzanan kompresör istasyonlarının güvenilir ve emniyetli bir şekilde işletilmesi taahhüt altına alınmıştır. Proje kapsamındaki istasyonlara tam entegre kontrol ve emniyet çözümleri, teknoloji, mühendislik ve destek hizmetleri sağlamaktadır. Sistemler, Dağıtık kontrol sistemleri (Distributed Control Systems-DCS) modülleri, acil emniyetli duruş sistemleri ve güvenlik sistemleri, yangın alarm panelleri ve proses içi ve proses alanı dışı pek çok detektör ve ekipmanı içeren kapsamlı bir yangın ve gaz emniyet çözümünü kapsamaktadır. TANAP istasyonlarında kullanılan bu sistem, tüm proses kontrol ve emniyet sistemleri ile otomasyon yazılımını tek bir mimari altında birleştirmektedir. Sistem insanlara, çevreye veya boru hattına zarar verebilecek durumları tespit etmek, müdahale etmek ve önlemek için operatör farkındalığını yükseltmekte ve boru hattı boyunca kesintisiz olarak sevkiyat yapılmasına katkıda bulunmaktadır (Doğal gaz Teknolojisi Cihaz ve Sistemleri Dergisi, 2016).

### **3.4 Boru Hatları Güvenliğinde İnsansız Hava Araçları (İHA) Kullanımı**

Ülkemizde son yirmi yılda İnsansız Hava Araçları (İHA) sayısı katlanarak artmaktadır. İHA'lar Savunma Sanayi başta olmak üzere fotoğrafçılık, akıllı tarım gibi birçok farklı



alandaki kullanılmaktadır. 2021 yılı Eylül ayında İstanbul Atatürk Hava Limanında Uluslararası Havacılık, Uzay ve Teknoloji Festivali (TEKNOFEST) düzenlenmiş olup binlerce yarışmacı yüzlerce farklı ülkeden katılmıştır. Birçok İHA sistemi tanıtılmış ve İHA teknolojileri üzerine yarışmalar yapılmıştır. Her geçen gün İHA'lara olan ilginin artmasıyla İHA'ların kullanımı için farklı birçok fikir ortaya çıkmaktadır. Bu fikirlerden biri de Şekil 3.4'de görülen İHA'lar ile Boru Hatlarının korunması fikridir. Bu fikrin gelişmesiyle güvenlik sisteminin bir parçası olarak İHA'lar kullanılmaktadır. Ancak İHA'ların sadece kendi başlarına kullanılmasıyla Boru Hatlarının güvenliğinin sağlanması imkansızdır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için geleneksel boru hattı güvenlik sistemlerine ek erken uyarı sistemleri kullanılmalıdır. Erken uyarı sistemleri hassas algılamalar yapabilen, tehdidi sınıflandırabilen ve tehdidin konumunu hassas bir şekilde tespit edebilen kabiliyetlerde olmalıdır. Bu sayede boru hatlarına yönelik tehditler etkili bir şekilde önlenir.



Şekil 3.3: İnsansız Hava Aracı İHA (URL-3, 2018).

Dağıtık Akustik Algılama (DAS) Teknolojisi, tüm dünyada binlerce kilometrik boru hattında konuşlandırılarak kanıtlanmıştır. DAS teknolojisi bir tehdidi algılayabilir ve saniyeler içinde alarm verebilir, ancak bir güvenlik ekibinin özellikle mesafelerin uzun olduğu veya arazinin zor olduğu yerlerde sahaya gidip müdahale edilmesi zaman alabilir. Bu noktada İnsansız Hava Araçları (İHA) veya Drone teknolojisinin hızla ilerlemesi, boru hattı boyunca tehdidin DAS tarafından tespit edilmesi ve belirlenen koordinatlara uçabilen bir İHA (Şekil 3.5)'yi otomatik olarak tehdit bölgesine hızla yönlendirmesi fikrini ortaya çıkartmıştır. Doğru konum belirlenmesiyle İHA, tehdit hedefine ulaşabilecek, görsel ve termal kameralarıyla net görüntüler sağlayabilecektir. İHA'nın gece operasyonları için sessiz çalışma modu ve güçlü LED ışıklarına sahip olması suçluların tespitini ve caydırılmasını

sağlayacaktır. Böylece tespit edildiklerini anlayacaklar ve devam etmekten vazgeçeceklerdir. Bu sayede boru hattında başlayan sıcak musluk girişimi sonlandırılarak sıvı dökülmesi ve temizlenmesi masrafları önlenecektir. İHA kolluk kuvvetlerine güncel durum hakkında bilgi sağlayacak, sahaya gitmeden önce suçluların silah yeteneklerini değerlendirmesine olanak sağlayarak kolluk kuvvetlerinin kişisel güvenliğini korumuş olacaktır (Berlin Pipeline Technology Conference, 2020).



Şekil 3.4: Gelişmiş güvenlik ve gözetim amaçlı kullanılan insansız uçak sistemi (Berlin Pipeline Technology Conference, 2020).

Tipik bir projede, izin verilen maksimum tepki süresi 45 dakika olarak hesaplanabilir ve bu nedenle 1 veya 2 dakika içinde fırlatılabilen ve 20 m/s'de (72 km/saat) uçabilen bir İHA ile, izin verilen sürede yaklaşık 50 km'yi kapsayacak şekilde koruyabilir. Bu, bir İHA'nın 100 km'lik boru hattını kapsayabileceğini ve dolayısıyla uzun bir boru hattı için İHA istasyonlarının 100 km'lik aralıklarla yerleştirilmesi gerektiğini belirleyecektir. Daha hızlı bir tepki süresi gerekiyorsa, İHA fırlatma alanlarının birbirine daha yakın olması gerekecektir. Bir DAS ve İHA güvenlik sistemi (izleme ve müdahale amaçlı) kurmanın maliyeti, bir operatörün bir dökülmeyi temizleme maliyetinin bir kısmıdır. Bu nedenle ilk yatırım maliyetinin geri dönüş süresi, başarısız sıcak tapalamaların neden olduğu dökülmelerin önlenmesi veya başka yollarla ortaya çıkan (Jeoteknik aktivite, korozyon) bir sızıntıya mümkün olan en erken yanıtın verilmesi sonucu kaybın ne kadarlık kısmının önlendiğinin ölçülmesiyle hesaplanır (Berlin Pipeline Technology Conference, 2020).

Güvenlik personelinin güvenliği de önemli bir husustur. Daha az yolculuk yaparak, personel daha az trafik kazası riskiyle karşı karşıya kalacak ve zarar verebilecek suçlularla karşılaşma olasılığı daha düşük olacaktır. Bir suçluya yüzleşilmesi gerekse bile, İHA kaç kişinin bulunduğu ve hangi silahlara sahip olabileceğine dair kanıt sağlayacak, böylece güvenlik

ekibi yeterince hazırlıklı olabilir ve doğru teçhizatla müdahale edebilir. Tüm bu güvenlik teknolojisi, boru hatlarının yasadışı olarak sıcak tapalamayı (kaçak musluk bağlama) önlemek ve sızıntılara hızlı bir şekilde yanıt vermek, böylece çevresel felaketleri önlemek ve temizlik için gereken yüksek maddi tutarlardan tasarruf etmek için entegre bir algılama ve müdahale sistemi oluşturmak amaçlı tasarlanmıştır (Berlin Pipeline Technology Conference, 2020).

Dağıtık Akustik Algılama teknolojisi, boru hattı için bir tehdit oluşturan ve alarm verebilecek faaliyetler tarafından üretilen titreşimleri ve akustik imzaları tanımak için bir fiber optik algılama kablosu kullanır. Entegre İHA sistemi, bilgileri bir alarma iletebilir, doğrudan uçuş yönetimi uygulamasına programlayabilir ve mümkün olan en kısa sürede yanıt vermek ve suçluları uyarmak için kameraları ve diğer yükleri taşıyan (Kargo vs.) bir İHA gönderebilir. Şekil 3.6'da Hindistan'daki bir boru hattında kaçak kazı ve tapa düzeneği tespit edilip İHA kullanılarak durdurulmuştur (Berlin Pipeline Technology Conference, 2020).



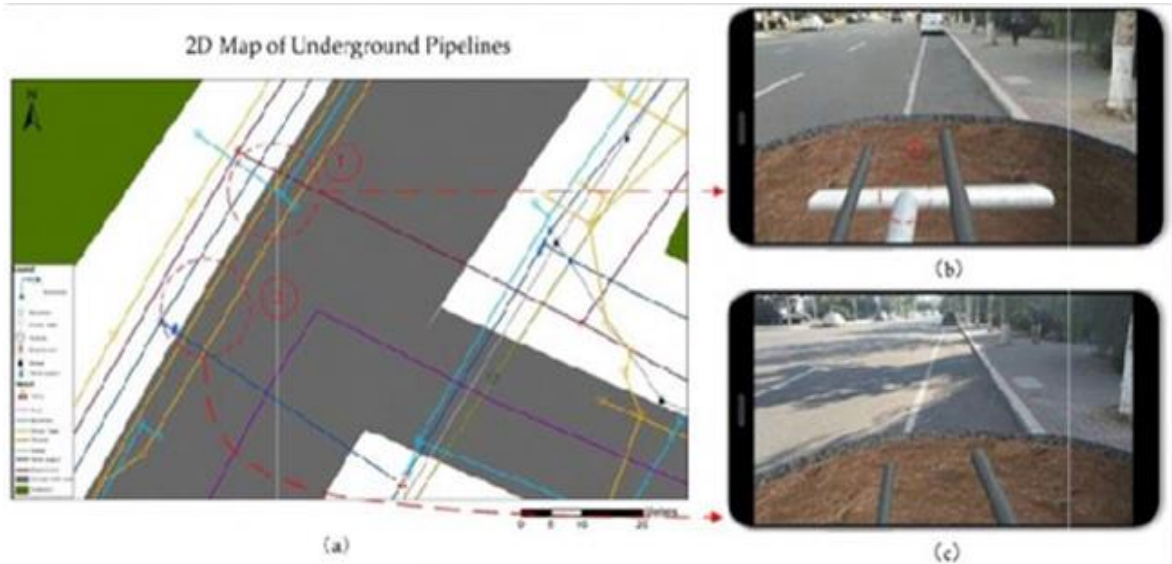
Şekil 3.5 Hindistan'daki bir boru hattında tespit edilip durdurulan kaçak kazı ve kaçak musluk (Berlin Pipeline Technology Conference, 2020).

### 3.5 Doğal Gaz Boru Hattı Ağlarının Güvenliğinde Coğrafi Artırılmış Görselleştirme

Kazı veya onarımdan önce yeraltı borularının ve diğer altyapıların bulunması uzun zamandır bir sorundur. Son dönemlerde altyapı sistemlerinin tespitinde önemli düzeyde teknolojik bir

gelişme yaşanırken, uygulamada tam olarak yaygınlaşmamıştır. Yeni kurulum veya mevcut altyapıların onarımı için kazıların yerinin tespitinde meydana gelen hatalar önemli maliyetlere, can ve mal kayıplarına sebep olmaktadır. Bu nedenle, doğru bir şekilde yerleştirilmiş boru hattı altyapısı ve kazı güvenliğini artırmak için yeni çözümlere ihtiyaç vardır. Yapılan bir çalışmada, yeni bir görsel sistem tasarlamak için artırılmış gerçeklik ile birlikte boru hattının coğrafi uzamsal veri tabanının birleşimi açıklanmaktadır (Gajjar, 2020).

Boru hatlarının ve diğer yeraltı yardımcı hatların 3B modelleri mevcut coğrafi uzamsal verilerden oluşturulur ve daha sonra operatöre yeraltında var olan hatların konumu ve türü hakkında görsel bilgiler sağlamak için coğrafi referanslı Artırılmış Gerçeklik (AR) kullanılarak gerçek görünümünün üzerine bindirilir (Şekil 3.7: a) Bu yöntemde android platformu için akıllı telefonlar kullanılır. Operatörün konumuna bağlı olarak, tüm işlem hattı ve ilgili bilgiler (sistem, boru boyutu, boru tipi, ortak numara vb.) mobil ekranda görselleştirilir (Şekil 3.7: b-c) Bu yöntem, merkezi bir yapı ile yönetimin verimliliğini sağlar ve AR verilerinin anında görselleştirilmesini imkân tanır. Böylelikle, düzensiz kazalara anında müdahale için stratejik desteği sağlayacak coğrafi bilgi verilerini kullanarak hata aralığını en aza indirir.



Şekil 3.6: 3D veri simülasyon arayüzü (Gajjar, 2020).

Bu yöntem ile yeraltı kamu hizmetleri için doğru konum bilgileri üreterek ve çıktı verilerine dayanarak yeraltı yardımcı sistemleri denetleyen süpervizörlere yeraltı sistem kesitleri

gösterilerek (Şekil 3.8) sahadaki gerçeklik duygusu geliştirilir. Bu yöntem, kullanıcı bir araç üzerinde hareket ederken yeraltı kesitlerine bağlı, gerçek zamanlı verileri işleyebilen bir yeraltı gezgini olarak da kullanılabilir. Yeraltı altyapısının yönetimi için mobil AR verilerini kullanma yöntemi, sadece mevcut diğer çalışmalardan farklılaşmakla kalmaz, aynı zamanda yönetim verimliliğini için çok önemli bir alan teşkil etmektedir (Gajjar, 2020).



Şekil 3.7: Coğrafi Artırılmış Görselleştirme ile Sokak Arası Boru Hatları Görünüşü (Gajjar, 2020).



## 4. DAĞITIK AKUSTİK ALGILAMA SİSTEMLERİ (DAS) VE UYGULAMA ALANLARI

### 4.1 Dağıtık Akustik Algılama Sistemi (DAS)

Fiber optik kablolarının sensör olarak kullanılabilirdiği DAS sistemleri, son yıllarda uluslararası ölçekte birçok alanda olduğu gibi ulaştırma mühendisliğinde de araştırılan ve kullanılmaya başlanan yeni bir teknolojidir. Bu sistem, özellikle boru hatları ulaşımında gaz ve petrol sızıntı kontrolü, hırsızlığın önlenmesi, tesis çevre güvenliği, boru hattı içi temizlik sünger piglerini izleme, malzeme karakteristik özelliklerinin kontrolü ve en önemlisi olası üçüncü şahıs hasarlarının (hat üzerinde elle ve/veya makine yapılan kazılar) tespitinin yapılması gibi hususlarda güvenlik açısından önemli faydalar sağlamaktadır. DAS uygulamalarında çok sayıda tehdidin aynı anda algılanabilmesi, fiber optik kablo boyunca enerji ihtiyacı olmaması, elektromanyetik etkiye duyarsız olması, hava koşullarından etkilenmemesi ve gün boyu kesintisiz gerçek zamanlı takip yapılabilmesi sayesinde boru hattı güvenli bir şekilde işletilecek ve kaynak israfının önüne geçilebilecektir.

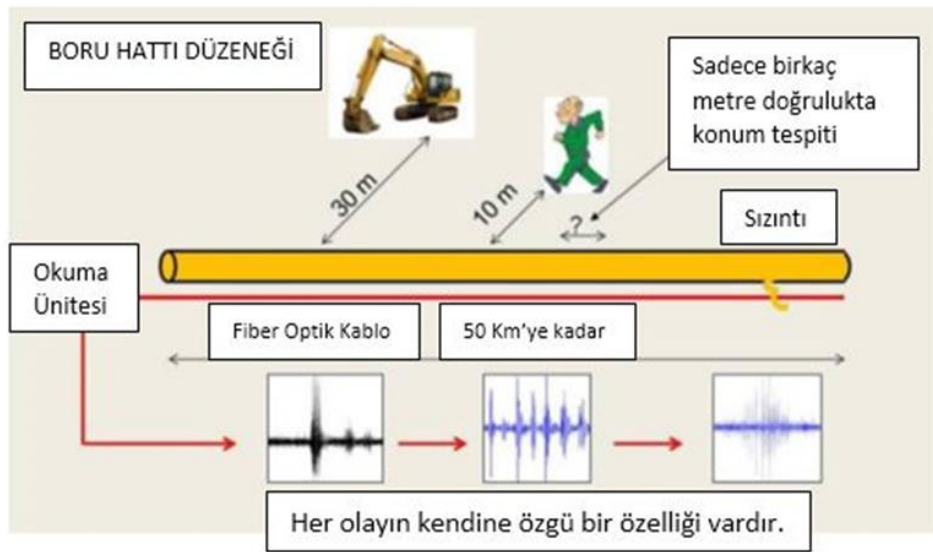
Optik fiber sensörler genel olarak iki grupta sınıflandırılabilir: Nokta Sensörleri ve Dağıtık Sensörler. Nokta sensörleri yalnızca dönüştürücünün bulunduğu yeri ölçer ve ışığı dönüştürücüye ve dönüştürücüden bir okuma ünitesine iletmek için bir optik fiber kablo kullanır. Genellikle nokta sensörleri, bir dizi dönüştürücünün, sinyallerin okuma ünitesine ve okuma ünitesinden iletilmesi için aynı optik fiberi kullanacağı şekilde çoklanır. Öte yandan, dağıtık sensörlerde, optik fiberin kendisi algılama elemanıdır ve optik yolda ek dönüştürücüler yoktur. Okuma ünitesi radar tarzı bir sürece göre çalışır. Fibere bir dizi darbe gönderilir ve doğal olarak oluşan geri saçılan ışık zamana karşı kaydedilir. Bunu yaparken, dağıtık sensör fiber boyunca tüm noktaları ölçer. Daha da önemlisi, optik fiber tipik olarak standart telekom fiberidir ve örneğin, önceden kurulmuş bir telekom kablosuna veya önceden kurulmuş bir nokta sensörüyle iletişim kurmak için kullanılan mevcut bir kabloya dahil edilebilir (Parker vd., 2014).

Sistem, sorgulama ünitesine bağlı bir fiber optik kıldan oluşur ve fiber optik kablo genellikle yeraltında konumlandırılır. Sorgulama ünitesi, fiber üzerinden sürekli olarak yüksek frekanslı bir ışık darbesi gönderir ve geri saçılan spektrumu analiz eder. Fiberden belirli bir mesafeye kadar herhangi bir aktivite (yürüyen bir kişi veya hareket eden bir araba gibi) veya

bir boru sızıntısı oluşması sonucu, fiber materyalin molekülleri tarafından emilerek akustik enerji üretilir. Bu akustik enerji, okuma birimi tarafından analiz edilerek geri saçılmış spektrumda bir faz kaymasına neden olur. Olayın yeri ise darbenin başlatılması ile geri saçılan ışığın alınması arasında geçen sürenin ölçülmesiyle belirlenir (Radar prensibi – Sabit Işık Hızında). Tek bir okuma ünitesi, 50 km. mesafeye kadar birkaç metre hassasiyette bir olayı algılayabilmektedir (URL-2, 2016).

#### 4.2 Dağıtık Akustik Algılama Sisteminin Algılama Prensibi

Dağıtık algılama, özünde “time of flight” (Uçuş süresi-bir ortamda bir nesne, parçacık veya dalganın bir mesafe kat etmesi için geçen süre) olarak bilinen ilkeyi kullanır. Dağıtık akustik sistemler, radar veya herhangi bir modern ölçüm teknolojisi ile karşılaştırılabilir. Dağıtık akustik sistemler, özel bir algılama noktası gerekmediğinden büyük mesafeleri ölçmek için çok basit ve etkili bir sistemdir. Dağıtık algılamanın diğer teknolojilerden farkı sistemin tamamen bağımsız olmasıdır. Işık kaynağı ölçülen ortam dışında hiçbir şeye maruz kalmaz. Fiber optik dağıtık algılamada bir lazer ışığı, bir fiber optik kablo ile tamamen kapsülendir, bu da ışık kaynağının çevrenin bir fonksiyonu olarak dağılmasını ortadan kaldırır. Sonuç olarak, fiber optik dağıtık algılama, bir optik fiberden aşağı doğru giden lazer ışığının yansıma özelliklerinin yalnızca optik fiberin kendisini etkileyen Şekil 4.1’de görülen etkenler nedeniyle oluşan (beko loder, hareket eden insan, sızıntı vb.) sıcaklık, gerilim veya ses gibi faktörlerle değişmesi gerçeğinden yararlanır (Tanimola ve Hill, 2009).

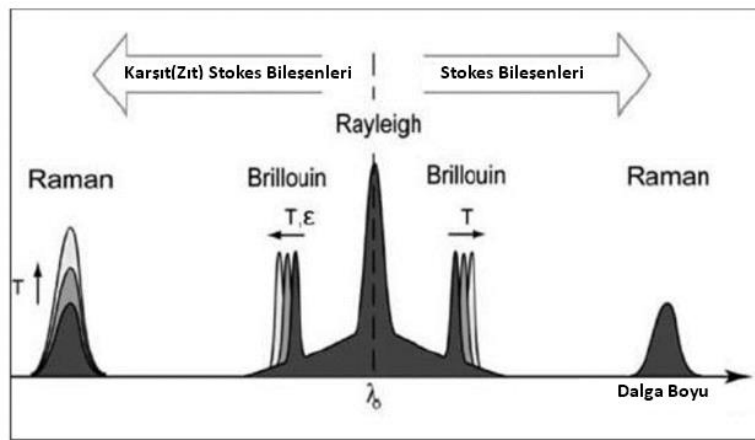


Şekil 4.1: Dağıtık Akustik Algılama Sisteminin Algılama Prensibi (URL-2, 2016).

Dağıtık algılama, en temel biçimiyle, uçtan uca birleştirilmiş binlerce küçük aynadan oluşan izole, bağımsız bir sistem olarak düşünülebilir. Bu düzenlemede, her bir ayna, temelde yapısal bir seviyede geçici olarak değiştirilebilir; aynanın yansıtıcı özelliklerinde ölçülebilir değişikliklerle sonuçlanır. Bir ayna bir sıcaklık, gerilim veya sese (basınç dalgaları-aynı zamanda vibro-akustik rahatsızlık olarak da bilinir) maruz kaldığında, aynanın fiziksel yapısı geçici olarak değişir ve bunun sonucunda aynanın yansıtıcı özellikleri değişir. Aynı ayna farklı bir sıcaklık, gerilim veya sese maruz kalırsa, aynanın fiziksel yapısı ve aynanın yansıtıcı özellikleri, değişikliği belirtmek için değiştirilecektir. Dağıtık algılama, yukarıda belirtildiği gibi aynanın maruz kaldığı fiziksel etkilerin doğrudan bir sonucu olan yansıtıcı özelliklerdeki bu değişikliği doğru bir şekilde ölçme prensibi ile çalışmaktadır (Kimbell, 2013).

Yansıtıcı özelliklerdeki değişiklikleri ölçmek için dağıtık algılamada, Rayleigh, Raman ve Brillouin tabanlı sistemler olarak bilinen üç tür ölçüm sistemini kullanılmaktadır. Bu isimlendirme, analiz edilen sinyalin frekansı ve elektromanyetik spektrum içindeki ayrık zirvelerden türetilmiştir (Şekil 4.2) (Tanimola ve Hill, 2009). Daha spesifik olarak, bir fiber optik kablodaki ışık saçılımı üç spektral kısım içerir:

- Kullanılan lazer kaynağının dalga boyu ile doğrudan ilişkili olan Rayleigh saçılması,
- Fotonlardan daha uzun dalga boylarına kaydırılan Stokes çizgi bileşenleri (daha düşük frekans)
- Rayleigh'den daha kısa dalga boylarına (daha yüksek frekans) kaymış fotonlardan olan Anti-Stokes hattı bileşenleri (Molenaar vd., 2012).



Şekil 4.2: Geri Saçılan elektromanyetik spektrumdaki Rayleigh, Raman ve Brillouin şeması “T” sıcaklık, “ε” gerilim, “λ” Dalga Boyu (Frings ve Walk, 2011).



Fiber optik dağıtık algılama, farklı tepe noktalarının benzersiz özelliklerinin yanı sıra frekanslardaki farklılıkları kullanarak, sıcaklık, gerilim ve sesin benzersiz özelliklerini ölçme yeteneğine sahiptir. Dağıtık sıcaklık algılama (DTS, Distributed temperature sensing systems) için Raman tabanlı bir sistem kullanılır. Bu sistemde, Anti-Stokes bandındaki Raman bileşeninin yoğunluğu sıcaklığa bağlıken, Stokes bandındaki Raman bileşeni pratikte sıcaklıktan bağımsızdır. Fiber kablo boyunca herhangi bir noktadaki sıcaklık, bu nedenle, Anti-Stokes'lerin Stokes ile yansıyan ışık yoğunluklarına oranı hesaplanarak belirlenebilir (Kimbell, 2013).

Benzer şekilde, Dağıtık Gerilim Algılama (DSS), Anti-Stokes bandında gerilim bağımlı ve Stokes bandındaki gerilimden bağımsız bir Brillouin sistemi kullanır. Raman sistemleri, DTS gerilim hassasiyeti olmaksızın 0,01 °C'den daha iyi çözünürlükle çok doğru sıcaklık ölçümleri sağlayabilir. Brillouin sistemleri (DSS) için sıcaklığı ölçebilir ancak gerilime karşı son derece hassastır, bu nedenle dağıtık gerilim ölçümleri sağlamaktadır (Molenaar vd., 2012; Tanimola ve Hill, 2009).

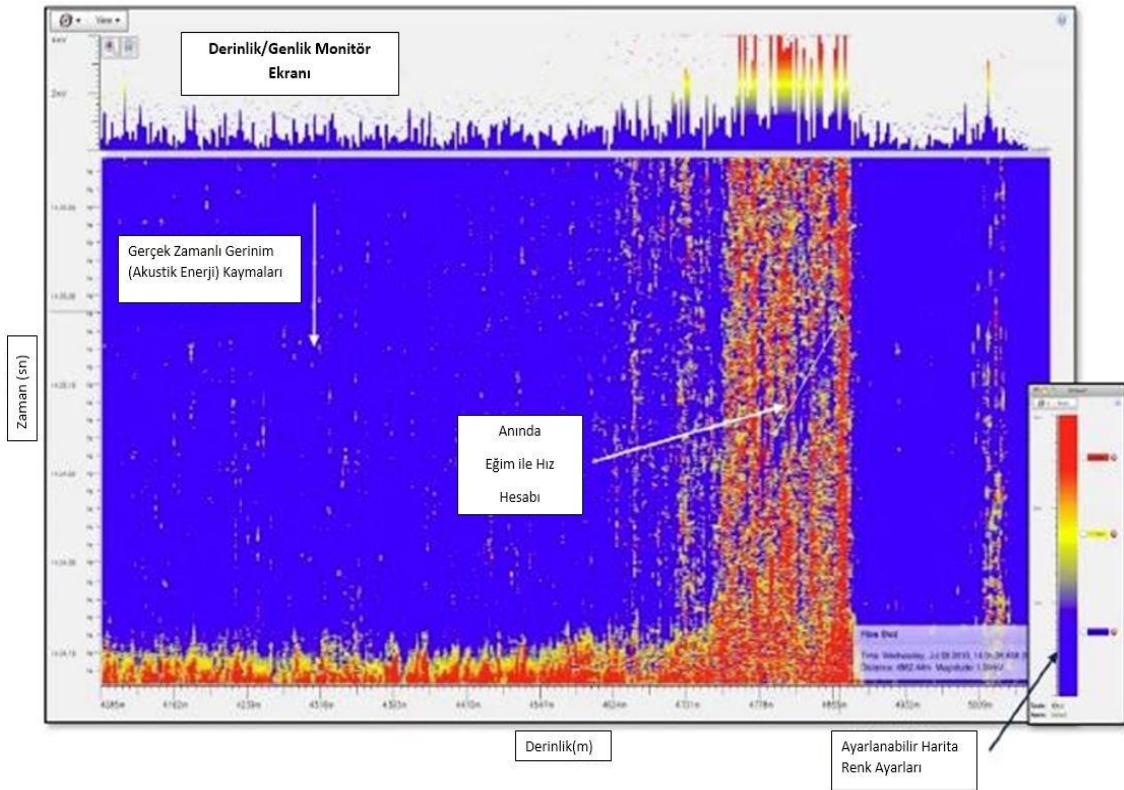
DAS sisteminde, sesi (basınç dalgaları) ölçmek için bir Rayleigh sistemi kullanılmaktadır. Bir Rayleigh sistemi, fiberde harici titreşimlerle (fiber optik kabloya çarpan bir basınç dalgasının neden olduğu doğrudan mekanik hareket) indüklenen çok küçük gerilmeleri tespit ederek çalışmaktadır. Akustik yetenek, Rayleigh sinyalinin sürekli olarak yüksek frekansta örneklenmesinden meydana gelmektedir. Bu, fiber optik kablonun sonuna kadar gidiş ve geriye dönüşünü (kabaca ışık hızı) yapmak için yalnızca bir optik darbenin uçuş süresi ile sınırlı olmaktadır (Molenaar vd., 2012).

Numunelerin elde edildiği hız nedeniyle, bir "gürültü" ile ilişkili tüm bir basınç dalgası tespit edilebilmektedir. Etkili bir şekilde DAS'ın fiber optik kablonun etrafında olan olayları "dinlediği" anlamına gelmektedir. DAS, fiber optik kablonun etrafında ne olduğunu "dinleyerek", başlangıçta "gürültüye" (basınç dalgası) neyin yol açtığına ilişkin makul çıkarımlara izin vermektedir (Molenaar vd., 2012).

Rayleigh saçılması yoluyla, kablodan aşağı iletilen ışık, algılanabilmesi için sürekli olarak geri saçılan veya "yankı" ışığı yankılandırır. Bir optik fiberdeki ışık yaklaşık 0,2 m/ns'de hareket ettiğinden, 10 ns'lik bir ışık darbesi, yayıldıkça fiberde yaklaşık 2 m yer kaplar.

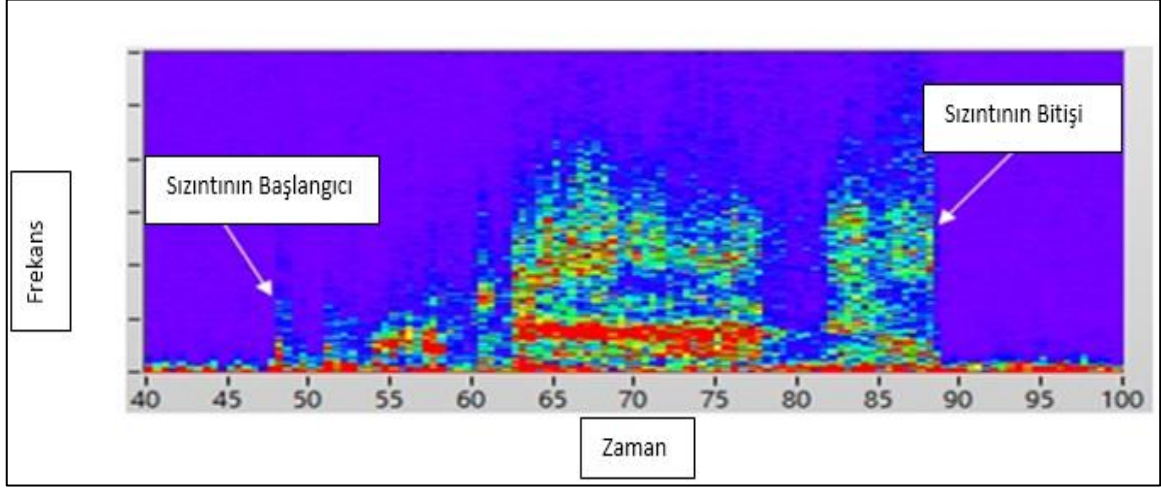
DAS'ın potansiyeli, optik yankı tepkisindeki her 10 nanosaniyelik zamanın, fiberin 1 m'lik bir kısmından (10 ns'lik iki yönlü zaman) gelen yansımalarla ilişkilendirilebilmesidir. Her 100  $\mu$ s (microsecond)'de tekrarlanan bir darbe üreterek ve döndürülen optik sinyali sürekli işleyerek, prensip olarak, 10 kHz'lik bir örnekleme hızında 10 km'ye kadar fiberin her metresi sorgulanabilir. Fiberin ortamındaki değişiklikler nedeniyle optik geri saçılmadaki yerel değişiklikler, fiberin hem uzayda hem de zamanda neredeyse sürekli örnekleme ile sürekli bir sensör dizisi olarak kullanılmasının temeli olabilir (Daley vd., 2013).

Dağıtık algılamanın ana bileşenleri, standart fiber optik telekomünikasyon kablo ve koruyuculu kablo içinde muhafaza edilen hafif darbeleri lazer kullanarak algılayan bir ölçüm cihazından oluşmaktadır. Daha sonra bir detektör, fiber kablo boyunca ilerleyen ışık darbesini belirli bir ölçüm sistemini (Rayleigh, Raman veya Brillouin) kullanarak (geri saçılımı) ölçmektedir. Ölçüm, fiber optik kablo boyunca tüm konumların üzerindeki sıcaklık, gerilim veya ses efektlerinin hesaplamasına olanak tanımaktadır. DAS sistemlerinde, akustik algının konumu ve türünün belirlenmesinde şelale ekranı denilen akustik spektrogramlar oluşmaktadır (Şekil 4.3) (Warren vd., 2012).



Şekil 4.3: Canlı akustik verilerin kayan görüntülerini gösteren şelale ekranı (Warren vd., 2012).

Şekil 4.4’de 270 PSI basınçlı borudan su sızıntısının oluşturduğu akustik algı görülmektedir. Frekansın büyüklüğüne göre renklendirme yapılmaktadır. Kırmızı renk daha yüksek frekansı mavi renk daha düşük frekansı belirtmektedir.

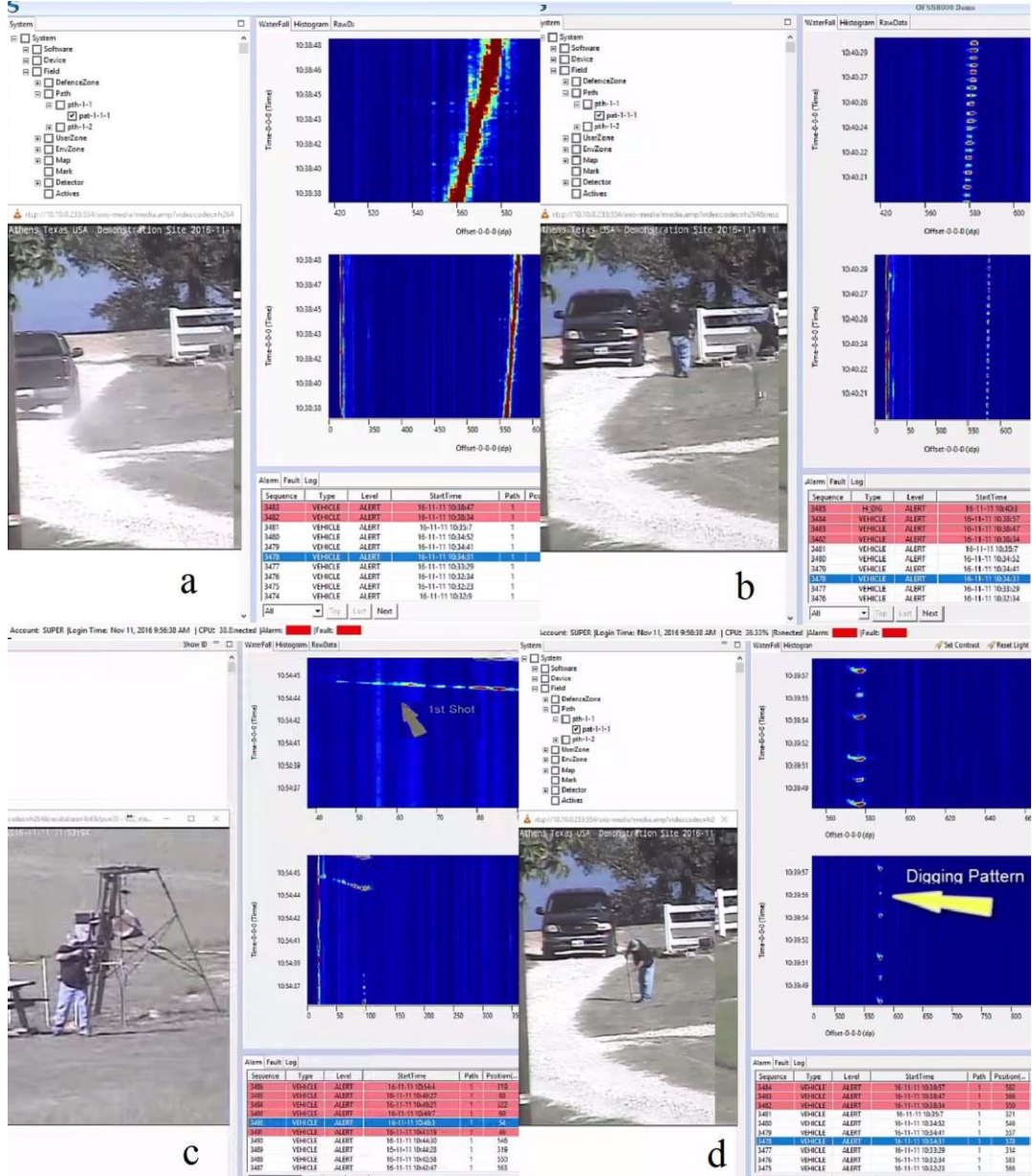


Şekil 4.4: DAS sisteminde 270 PSI basınçlı borudan su sızıntısının oluşturduğu akustik spektrogram (Wang vd., 2018).

Ayrıntılı gösterimin en büyük faydası operatörün sadece akustik algılar kullanarak, kamera olmadan bile tehdit cinslerinin son derece güvenilir bir şekilde değerlendirilmesini ve tespitini sağlayabilmesidir (Duckworth ve Ku, 2013).

DAS teknolojisinin güvenlik alanında, özellikle de boru hatları güvenliğinde kullanımının yaygınlaşmasının en büyük sebeplerinden biri sistemin diğer güvenlik sistemleri ile kolay entegre edilebilmesi ve bu sayede güvenlik açısından hiçbir boşluk bırakmamasıdır. Sistemin dahil edildiği güvenlik sistemleri incelendiğinde geleneksel yöntemlerin biraz daha gelişmiş hali olan SCADA sistemlerine dahil edildiği gözlenmiştir. SCADA sistemindeki kamera, alarm sistemi ve güvenlik personeli üçlüsüne DAS’ın entegrasyonu ile güvenlik entegrasyonu tamamlanmaktadır.

DAS’ın sağlayabileceği bilgi tipinin örnekleri, Şekil 4.5’te gösterilmektedir. Şekil 4.5a-d’de görüleceği üzere, boru hattına yaklaşan bir araçtan ve ona doğru yürüyen bir kişiden gelen sesleri algılamaktadır. Araç ve ayak sesleri şelale ekranında açıkça görülmektedir. Otomatik uyarılar oluşturulmaktadır. Operatörün kolaylıkla uyarıyı yorumlayabilmesi için GIS (Görüntü İzleme Sistemi) ekranına bir uyarı simgesi gönderilmektedir. Bu sayede operatör, boru hattına ulaşmış bir şahsın, hatta zarar vermek için henüz kazı aktivitesine başlamadan önce, uyarıyı işleme almak için yeterli bilgiye sahip olmasına imkân sağlamaktadır.

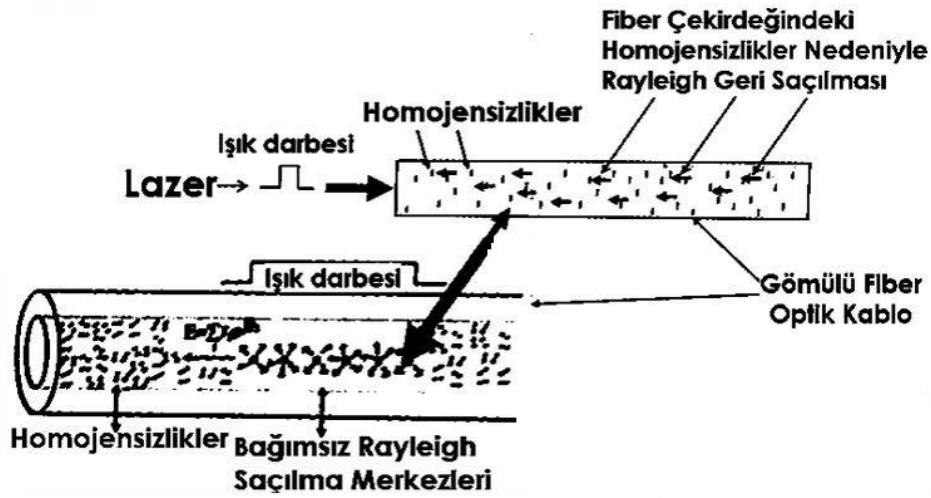


Şekil 4.5: DAS'ın farklı akustik etkiler sonucu oluşan şelale ekranı görüntüleri (a) Hareket eden araca ait şelale ekranı (b) Yürüyen insana ait şelale ekranı (c) Silahla ateş eden insana ait şelale ekranı (d) Kazı yapan insana ait şelale ekranı (URL-13, 2022).

DAS sistemleri üzerinde araştırma ve geliştirmeler giderek artmaktadır. Ülkemizde Askerî Elektronik Sanayi ve Ticaret A.Ş. (ASELSAN) tarafından Multi Purpose Distributed Acoustic Sensor (MİDAS) sistemi geliştirilmiştir. MİDAS-2 sistemi, yürüme/koşma, el ve makine kazısı, tel-çit kesme, sızıntı tespiti gibi akustik algıları ayrı ayrı algılayabilme, konum tespiti yapabilme ve aynı zamanda tehdidin cinsine göre sistemin takip edildiği merkezde alarm üretebilmektedir. Ayrıca sahip olduğu yazılıma makine öğrenmesi teknikleri ile yeni tehditlere ait akustik frekanslar tanıtarak tehdit olarak algılaması



sağlanabilmektedir. Sistem yapay zekâ teknolojisi kullanarak akustik sınıflandırma yapmaktadır. Bir sorgulama ünitesi ile 50 km'ye varan menzilde fiber optik hat sensör haline getirilebilmekte ve tehditlerin algılaması sağlanabilmektedir (Şekil 4.6). Sistemin en büyük avantajlarından bir tanesi de standart fiber optik kabloya entegre edilerek kullanılabilmesidir. Aynı zamanda diğer sensörlerle kolay entegre edilebilmektedir. Hızlı kurulum ve kalibrasyona sahip MİDAS -2 sistemi ve zengin akustik verilere ve uygulama alanlarına sahiptir (Şekil 4.7) (URL-4, 2020).



Şekil 4.6: ASELSAN MİDAS-2 DAS Çalışma Prensibi (ASELSAN Bilgi Notlarından Esinlenilmiştir).



Şekil 4.7: MİDAS Uygulama Alanları (URL-4, 2020).

### **4.3. DAS'ın Farklı Uygulama Alanları**

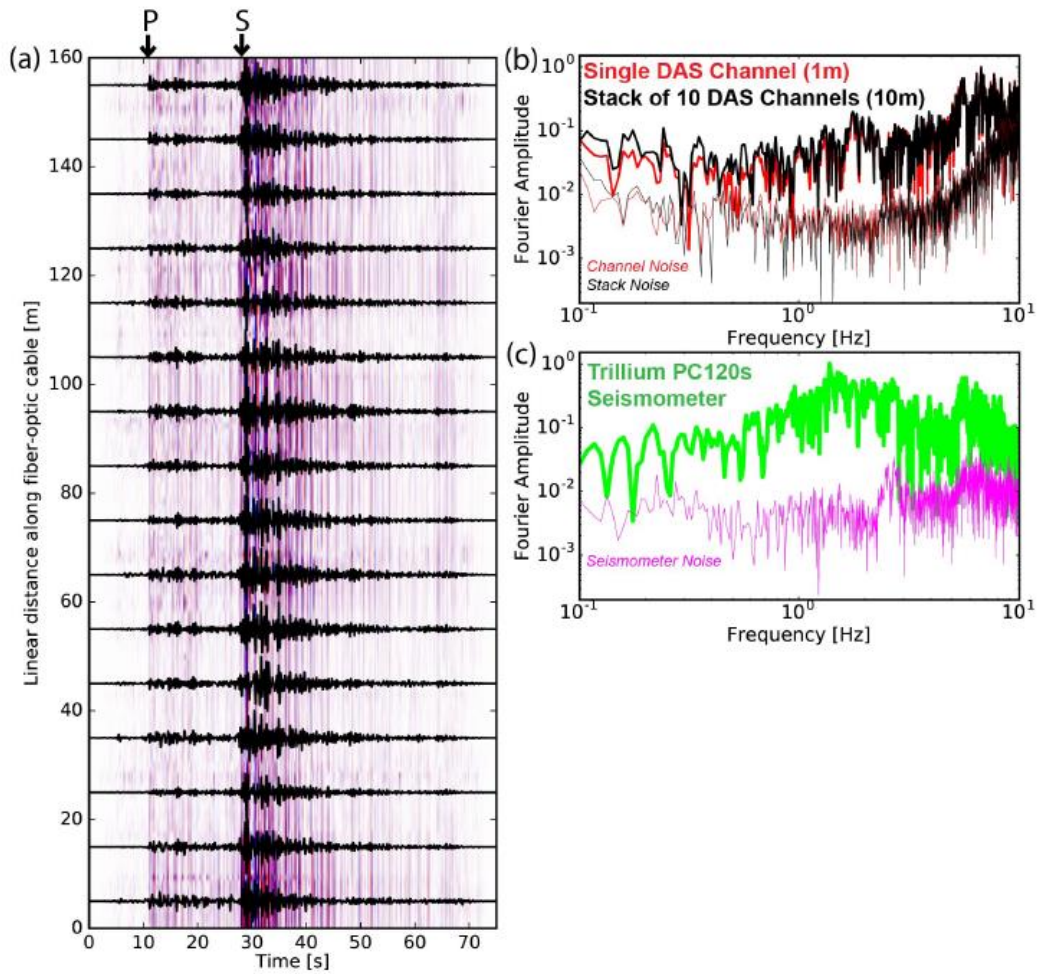
#### **4.3.1. Deprem Dalga Sahalarının Fiber Optik Ağ Gözlemleri**

Lindsey (2019) çalışmasında, yeni bir sismik ölçüm yaklaşımı olan fiber optik tabanlı dağıtık akustik algılamanın (DAS), deprem sismolojisinde, fiberin bir ucunda çalışan tek bir aletle onlarca kilometre boyunca, metre ölçeğinde sismik dalga alanı bilgilerini sunmak için nasıl kullanılabileceğini ele almıştır (Lindsey, 2019).

DAS, standart telekomünikasyon fiber optik kablolarını, 1 m. veya daha az hassas algılama noktası ayrımları ile uzun bir tek bileşenli, sıralı gerinim veya gerinim hızı sensörleri serisi olarak yeniden kullanır. DAS yöntemi, fiberin bir ucunda bulunan ve amacı fiberi kısa darbelerle aydınlatmak ve daha sonra Rayleigh geri saçılmış ışığın yüksek oranlı optik interferometrisini gerçekleştirmek olan bir lazer sorgulayıcı ünitesini kullanmaktadır. Geri saçılmış fotonlar, fotonun kat ettiği doğrusal fiber mesafe ile orantılı bir zamanda sorgulayıcı ünitesine geri döner. İnterferometriden alınan faz kayması, gerinimdeki değişikliklerle yarı doğrusal olarak orantılıdır (Lindsey'den akt. Grattan ve Meggitt, 2000). Bu, DAS'ın esasen her numunede tüm fiber optik hareketini araştırdığı anlamına gelir. Zaman örnekleme, genellikle sismik uygulamalar için yaklaşık 8-10 m olarak ayarlanan sistemin gösterge uzunluğu olarak adlandırılan minimum uzamsal örnekleme karşılık gelir (Posey vd., 2000).

Sismologların geleneksel olarak erişimden yoksun olduğu bölgelerde on binlerce algılama konumuna sahip sismik diziler olarak önceden var olan telekomünikasyon fiber optik ağlarından yararlanma imkânı, yer biliminin birçok alanı için heyecan verici bir gelecek potansiyelini temsil ediyor. Kentsel sismik tehlike analizi, küresel sismik görüntüleme, açık deniz denizaltı volkanı çalışmaları, nükleer patlama izleme ve mikro-deprem karakterizasyonu dahil olmak üzere çeşitli temel ve uygulamalı bilim konuları DAS'tan yararlanabilir. Yakın yüzey çalışmalarında, DAS tarafından sağlanan yüksek mekansal yoğunluk ve genişletilebilir aralık, yeraltı suyu hidrolojisini karakterize etmek ve donmuş toprak permafrost çözünmesini metre ölçeğinde çözünürlük ve havza ölçeğinde diyafram açıklığı ile incelemek için ortam gürültüsü yöntemleriyle birlikte kullanılabilir (Dou vd., 2017).

26 Ağustos 2016'da meydana gelen Orta Alaska Fairbanks şehrinde meydana gelen depremin DAS sistemi tarafından elde edilen akustik kaydı Şekil 4.8'de görülmektedir. Deprem Fairbanks'ın 150 km SSW (Güney Kerte Batı)'sında gerçekleşmiştir. (Şekil 4.8a) 160 m uzunluğunda NE(Kuzey Doğu)-SW(Güney Batı) yönlerinde kazılmış bir hat üzerinden Orta Alaska depreminin örnek DAS kayıtlarını göstermektedir. Ana P ve S dalgası verileri, DAS'daki standart gürültü seviyesini gösteren grafiğin üzerine açıkça kaydedilmiştir. Görüntünün üzerine 10m ortalamalarla (siyah izler) veriler çizilmiştir. Hat boyunca, olay çevresindeki dört dakikalık DAS veri penceresi ve deprem olmadan dört dakikalık bir süre boyunca kaydedilen arka plan gürültü seviyesi için normalleştirilmiş Fourier genlik spektrumunu karşılaştırılması Şekil 4.8b'de görülmektedir. Şekil 4.8c'de aynı yerde bulunan sismometrenin yatay bir bileşeni için eşdeğer Fourier genlik spektrumunu göstermektedir (Lindsey vd., 2017).



Şekil 4.8: Orta Alaska Fairbanks şehrindeki depremin DAS dizisi kaydı (a) 10m kanal aralığına sahip DAS verileri (b-c) Fourier Genlikleri (Lindsey vd., 2017).

Sismik dizi deneyleri, yoğun nüfuslu bölgelerde dünyayı incelemenin faydalarını örneklemektedir. DAS, özellikle açık denizlerin tehlikeli bölgelerinde, verileri karada kolaylıkla erişime açık bir hale getirebilmektedir. Okyanus tabanı boyunca dağılmış bir sensör ağı olarak uzanan milyonlarca metre fiber optik kablodan yararlanarak, yüksek maliyetlere ve enerji iletiminde gecikmelere neden olacak zararları önlemek için deprem erken uyarı sistemlerini harekete geçirebilir (Lindsey vd., 2017)

Özetle DAS'ın sismolojide kullanılmasındaki en büyük amaç deprem oluşumlarının hassas bir şekilde kayıtlarının tutulması ve olası depremleri, deprem oluşumu başlamadan önce tahmin edilmesi şeklinde özetlenebilir. Deprem oluşumu başladığı anda ise henüz insan yaşamına etki etmeden bir kaç saniye öncesinde tespit edilerek deprem alarmı verilmesiyle birçok maddi ve manevi zararın önüne geçilmesi hedeflenmektedir.

#### **4.3.2 Altyapı Koruma ve Terörle Mücadelede Fiber Optik Kablolar Kullanılarak Dağıtık Akustik ve Sismik Algılama**

Birçok altyapı koruma ve terörle mücadele uygulaması, personel, araç ve uçak izinsiz girişlerini veya diğer yasadışı faaliyetleri tespit etmek için uzun mekansal kapsamlar üzerinde akustik ve sismik algılama gerektirir. Farklı amaçlar için önceden kullanılan standart fiber kablolardan, düşük gürültü, yüksek uzamsal çözünürlük ve yüksek dinamik aralık ile dağıtık akustik ve sismik gerinim algılamak mümkündür. Bu, çoğu durumda, mevcut fiber optik iletişim altyapısının sensör olarak kullanılabilceği anlamına gelir. Bir uygulamada, OptaSense firmasının Tutarlı Optik Zaman-Etki Alanı Yansıtıcısı (Coherent Optical Time-Domain Reflectometry, COTDR) sistemi, "sanal sensör" kanalları oluşturmak için yalnızca Rayleigh'in tek modlu fiberlerin optik kusurlarından ışığı geri çekmesini kullanır. Tipik bir sistem, geniş diyafram algılama için 50 km'ye kadar standart tek modlu fiber için 1 kHz bant genişliğinde 4000 kanal sağlar. Sistemler ayrıca kanallar arasında faz ve genlik tutarlılığı sağlayan hassas algılama için 5 km'nin üzerinde 20 kHz örnekleme sağlayabilir ve sinyal işleme kazancı, hassas hedef konum tahmini ve takibi ve hız/dalga sayısı analizi için verilerin hüzmelenme (beamforming) veya istiflenme yöntemi kullanılarak tamamen tutarlı işlemeye olanak tanır (Duckworth ve Ku, 2013).

OptaSense şu anda dünya çapında petrol ve doğal gaz boru hatlarına üçüncü şahıs izinsiz giriş ve sızıntı izleme gibi birçok alanda uygulanmıştır. Yüksek güvenliğin çevre ve sınırların

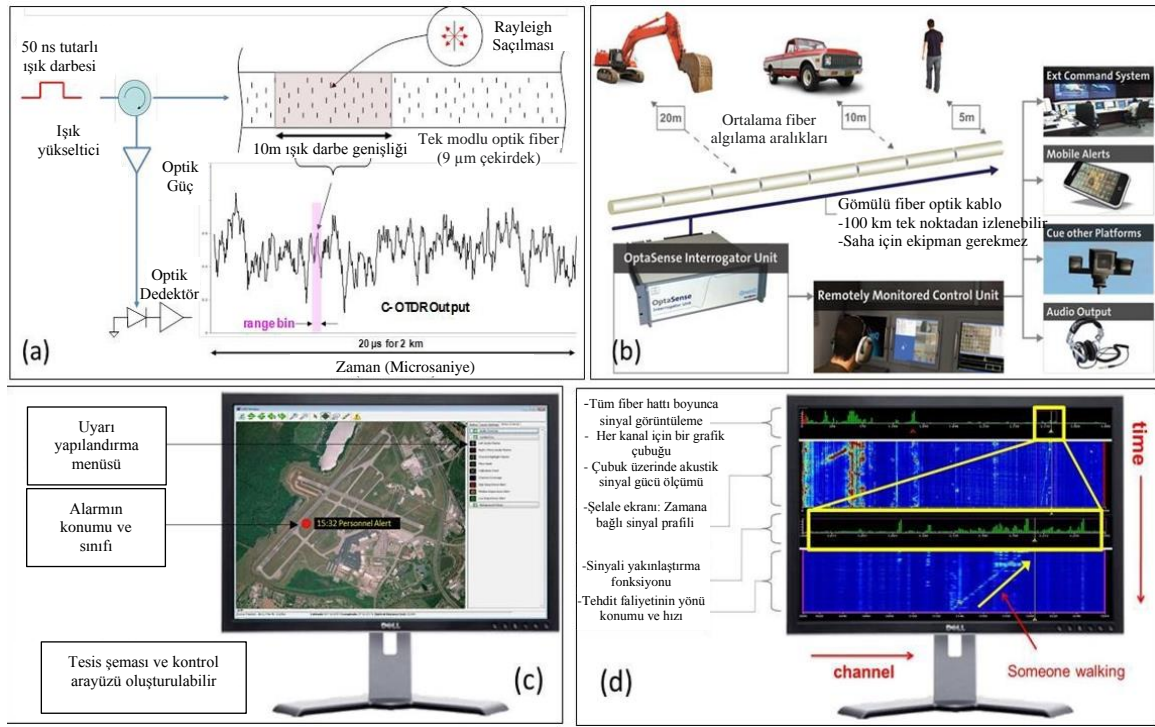


faaliyeti ve yetkisiz geçişlerin tespitinde, trafik koşullarını göstermek ve kazaları tespit etmek için karayollarında, hırsızlığı, vandalizmi ve tehlikeli bölgelerdeki yetkisiz personelin belirlenmesinde, raydan çıkmalara neden olabilecek, raylara kaya düşmelerini ve rayların ve yuvarlanma yüzeylerinin durumunu tespit etmek için demiryolu hatlarında ve standart sismik dizileri değiştirme potansiyeline sahip sıkı gaz ve karbon tecrit uygulamalarında kullanılmaktadır (Mestayer vd., 2011). Çoğu durumda, iletişim ve Dağıttık Sıcaklık Algılama (Distributed Temperature Sensing, DTS) gibi diğer kullanımlar için önceden var olan kablolardan yararlanılabilir ve özel bir kablo maliyetinden tasarruf edilebilir (Duckworth ve Ku, 2013).

Yakın gelecekte DAS teknolojisi demiryolu ulaşımında, hat kaynaklı tren kazalarını yüksek oranda engelleyeceği aşıkardır. Demir yolu hatlarına çekilecek fiber kablo sayesinde raylarda oluşan akustik dalgalar bir merkezde değerlendirilecek, çeşitli sınıflandırmalar yapılarak hatta herhangi bir deformasyon olup olmadığı belirlenebilecektir. Deprem, sel, heyelan ve üçüncü şahıs kişilerin hatta vereceği zararlar tespit edilip, tren yola çıkmadan önce deformasyon giderilebilecektir. Bu sayede tren ve içindeki yolcular zarar görmeyecek birçok maddi ve manevi kaybın önüne geçilecektir. Demiryolu hatlarında kullanılan binlerce km fiber kablolar, diğer bilimsel araştırmalar için akustik algılama yapabilen bir fiber aę olma imkânı sağlayacaktır. Özellikle depremlerle alakalı sismik algılamalar çeşitli deprem araştırma enstitüleri ile paylaşılarak depremin önceden algılanabilmesi için bilimsel katkıda bulunulacaktır.

COTDR'nin temel uygulaması, fiberden aşağı doğru ilerlerken optik darbenin ayak izi içindeki Rayleigh saçılmalarından saçılan ışığın tutarlı toplamını ölçer. Darbeler arasındaki kırılma değişikliklerinin uzunluğu veya dizini, döndürülen darbenin büyüklüğünü ve fazını değiştirerek, gidiş-dönüş süresi tarafından tanımlanan aralık kutusundaki her sanal sensör için darbe tekrar hızında zaman serisi verir. (Şekil 4.9a) Bu zaman serileri, kablonun etrafındaki akustik veya termal ortam hakkında bilgi sağlamak için OptaSense yazılımındaki sinyal işleme algoritmaları tarafından işlenir. Örneğin, bir boru hattına yönelik potansiyel tehditlerin konumu ve faaliyetleri gibi. Bu uyarılar harici komut sistemlerine veya mobil cihazlara sahip saha operatörlerine aktarılabilir. Yüksek güvenliklı çevreler için, PTZ (kaydırma ve eğimli yakınlaştırma yapabilen, sesle aktif hala gelebilen ve dönebilen) kamera sistemleri kullanılabilir (Şekil 4.9b). Ana operatör ara yüzü, izlenen ve korunan alanın

haritasına veya görüntülerine sahip tam donanımlı bir ekrandır. OptaSense, operatörün tehdidi kolay tanımlayabilmesi için takip, komuta, kontrol, konum ve tehdit etkinliğinin sınıflandırılmasıyla yüksek güvenilirlikte bir uyarı verir. Tehdidin akustik imzası ve tehdidin sonraki müdahale faaliyetleri de vaka kayıtları için görüntülenir ve belgelenir (Şekil 4.9c) (Duckworth ve Ku, 2013).

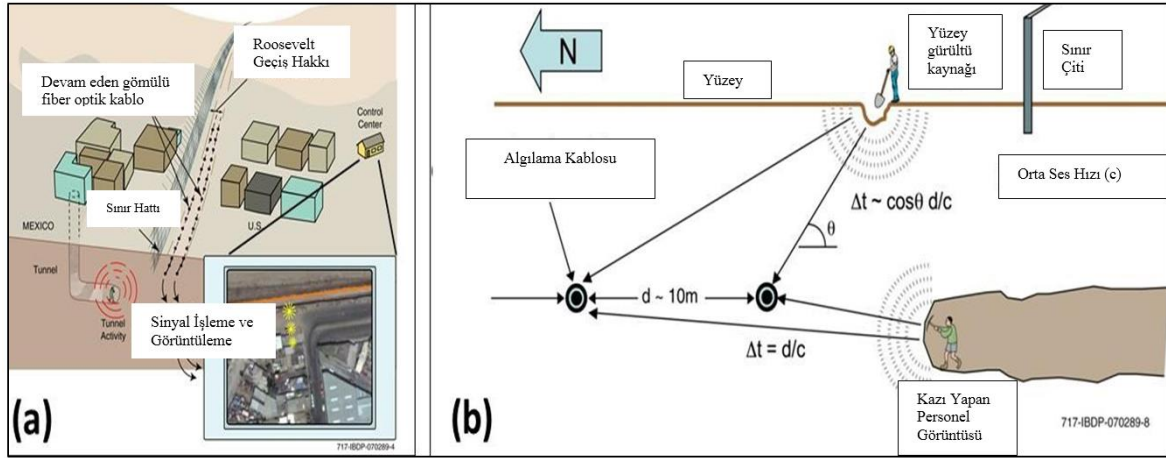


Şekil 4.9: (a) DAS Akustik Sinyalleri Algılama Prensibi ve İşleme Süreci (b) Tanımlanabilir Akustik Algı Mesafeleri (c) DAS Haritalandırma (d) DAS Şelale Ekranı (Duckworth ve Ku, 2013).

Verilerin detayları, etkinliklerin akustik imzalarını uzay ve zamanın bir işlevi olarak gösteren şelale ekranları aracılığıyla (Şekil 4.9d) elde edilebilir. Bunlar, tehdit etkinliklerini daha iyi anlamak için farklı görüntüleme parametreleriyle kaydırılabilir, yakınlaştırılabilir ve yeniden oynatılabilir. Akustik veriler hoparlörler veya kulaklıklar aracılığıyla dinlemek için seçilebilir. Daha fazla operatör değerlendirmesi için esasen "işitsel" bir PTZ kameralar kullanılabilir (Duckworth ve Ku, 2013).

Kentsel alanlarda yol sağındaki sınır boyunca konuşlandırılan çift hatlı kablo hem yüzey aktivitesini hem de tünel oluşturmayı veya derinlemesine kullanmayı (Şekil 4.10a)'da görüldüğü gibi algılayabilir. İki veya daha fazla kablo hattı kullanılıyorsa, sınırın her iki tarafındaki evleri birbirine bağlayan tünelleme faaliyetinin konumu, derinliği ve yönü ayırt

edilebilir. Bu tür kablolar yatay yönlü delme (Horizontal Directional Drilling, HDD) teknikleri veya hendekleme ile (Şekil 4.10b) monte edilebilir (Duckworth ve Ku, 2013).



Şekil 4.10: (a) OptaSense Yeraltı Tünel Algılama Algoritması, (b) Yeraltı Tünel Algılama Formülüzasyonu (Duckworth ve Ku, 2013).

Çin'deki 220 km uzunluğundaki ulusal sınır hattının güvenlik izlemesi için tamamen dağıtık bir fiber optik izinsiz giriş ve saldırı tespit sisteminin saha testi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Çok ölçekli dalgacık ayrışması, yapay izinsiz giriş (intrusion) bileşenlerini, çevresel tehditleri ve dalgalı arka planları etkili bir şekilde ayırmak için kullanılır. Bilindiği kadarıyla, bu örnek Çin'de uzun mesafeli sınır güvenliği izleme için zorlu hava koşulları düşünülerek tam dağıtık bir fiber çit (-55° C ila +50° C arasında geniş sıcaklık aralığı vb.) kullanılan ilk saha denemesidir. Sahada test edilen izinsiz giriş tespiti ve konum sonuçları Tablo 4.1'de verilmiştir (Wu vd., 2014).

Tablo 4.1: Saha testinde izinsiz giriş tespiti ve konum sonuçları.

	<b>Alarm Seviyesi I</b>	<b>Alarm Seviyesi II</b>	<b>Alarm Seviyesi III</b>
Toplam Olay Örnekleri	200	800	200
Doğru Algılama Oranı (%)	%100	%99,75	%87,50
Hata aralığında(konum) bulunan örnekler (yüzde): ±50m	197 (%98,50)	739 (%92,60)	144 (%82,28)
Hata aralığında(konum) bulunan örnekler (yüzde): ±100m	197 (%98,50)	754 (%94,49)	159 (%90,86)

Sonuçlar üç farklı alarm seviyesi için üç gruba ayrılabilir:

Alarm seviyesi I: Algılama oranının en yüksek ve konum hatasının en düşük olduğu ılıman havaya sahip bazı sabit arka plan içindir.

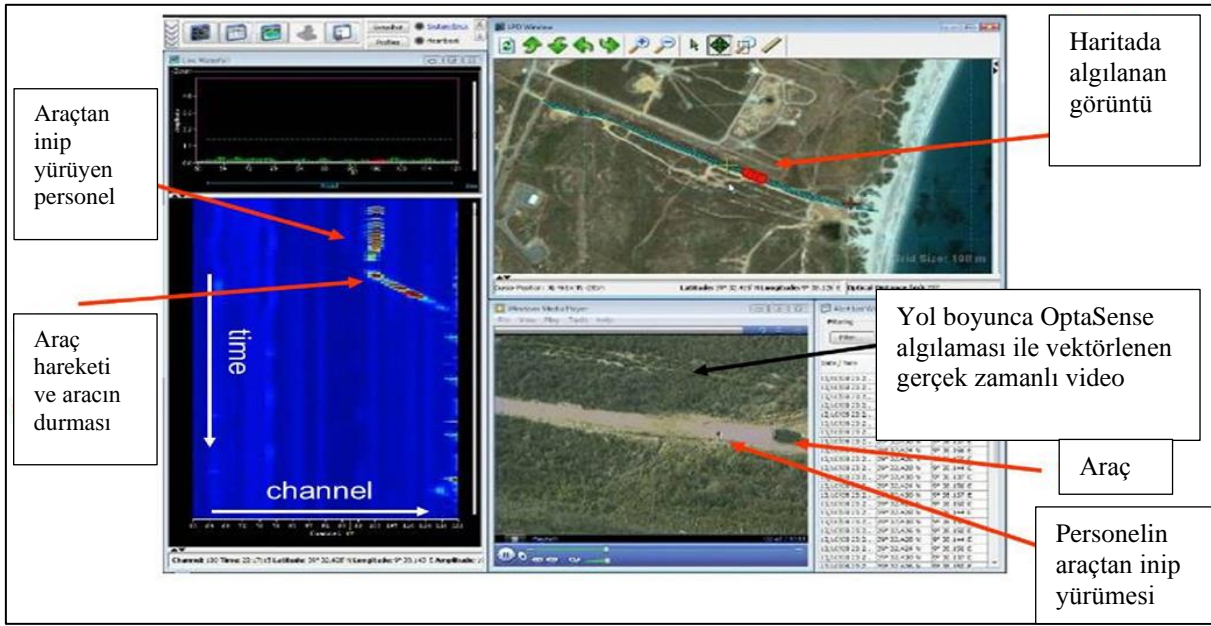
Alarm seviyesi II: Rüzgârlı havaya sahip bazı normal ortamlar içindir ve algılama ve konum performansı ortadır.

Alarm seviyesi III: Esas olarak, kuvvetli rüzgâr, şiddetli fırtına ve benzeri gibi hava koşullarına sahip bazı ekstrem ortamlar içindir ve bunlar için algılama ve konum performansından fedakârlık edilerek rahatsız edici alarm oranı (Nuisance Alarm Rate, NAR) düşürülür (Wu vd., 2014).

DAS sisteminin farklı hava koşulları karşısında algılama değerlerinin değişiklik gösterdiği Tablo 4.1’de görülmektedir. İlıman ve rüzgâr şiddetinin olmadığı hava koşullarında doğru algılama oranı %100 olup, konum tespiti çok daha doğru yapılmaktadır. Kuvvetli rüzgâr, şiddetli fırtına vb. ağır hava koşullarında doğru algılama oranı %87,50 değerlerine düşmüş ve konum hatası yüksek seviyelere çıkmıştır.

NATO Imperial Hammer 2008 yılı tatbikatında DAS teknolojisinin askeri alanlardaki faydalarını ortaya çıkarmak adına sınır hatlarında çeşitli testleri yapılmış ve Şekil 4.11’de görüldüğü gibi hassas sonuçlar elde edilmiştir. Bir insanın yürümesi ve bir aracın hareket etmesi şeklin sol kısmında görüldüğü gibi diyagramdan kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. Sınırları ve boru hatlarını izlemeye ek olarak, kaçak avlanmaya maruz kalan vahşi yaşam sığınakları çevresinde çevre güvenliği için DAS ideal bir uygulama olacaktır. Bu tarz uygulamalarda, yaygın olarak 40 km'lik alanlar (vahşi yaşam sığınakları çevresinde) tek bir DAS sistemi tarafından korunabilir. Bununla birlikte, arazi engebeli olması nedeniyle bir tespit yapıldıktan sonra kara kuvvetleri tarafından hızla değerlendirilmesi veya engellenmesi zordur. Kaçak avcılarının çevre sınır hattı boyunca silah atışı yapması durumunda veya çevreye sızmaya çalışmalarında, avcılarını tespit amaçlı bir İnsansız Hava Aracı (Unmanned Aircraft Systems, UAS)’nı hızla yönlendirmek, tespit için ilk adım olabilir. Bu uygulama, kaçak avcılarının yasadışı olarak öldürülen hayvanı almaya gidene kadar mevcut çit algılama sensörlerini tetikleyerek kullanılan bir Operasyon Kavramı (Concept of Operations,

CONOP)'dir. Kaçak avcılar yakalanamasa bile deriler, boynuzlar veya fil dişleri kurtulabilir. DAS'ın erken uyarı özelliği bu uygulamada son derece önemlidir (Duckworth ve Ku, 2013).

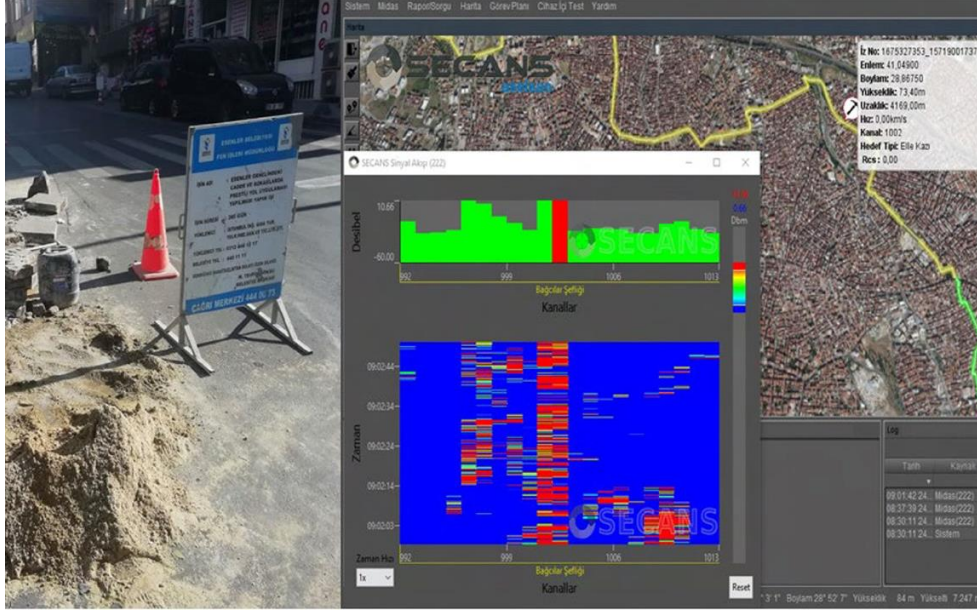


#### 4.3.3 Kentsel Alanlarda Boru Hatlarının Güvenliğini Sağlamak için Dağıtık Akustik Sensörlere (DAS) Yapay Zekâ Öğrenim Yaklaşımı

Üçüncü şahıs müdahalesi, operatörler için gelir kaybının yanı sıra güvenlik ve çevre için büyük risk oluşturan boru hattı arızalarının ve kazalarının önde gelen nedenlerinden biridir. Özellikle kentsel alanlarda izinsiz ve koordinasyonsuz altyapı ve inşaat çalışmaları sıvı ve gaz boru hatları için ciddi tehdit oluşturmaktadır. Müdahaleci faaliyetlerin etkili bir şekilde tespiti ve zamanında önleyici bir hareket çok önemlidir. Fiber optik Dağıtık Akustik Sensörler (DAS), üçüncü şahıs tehdit algılama için kullanışlı ve kanıtlanmış araçlardır. Dağıtık Akustik Algılama (DAS), bir dizi akustik sensör olarak boru hattına paralel olarak gömülü standart telekomünikasyon fiber optik kabloyu kullanan bir algılama teknolojisidir. Kentsel alanlarda müdahaleci faaliyetlerin tespiti ve sınıflandırılması, tehdit alarm oranlarını en aza indirirken, yüksek yoğunluklu kentsel aktivite gürültüsü nedeniyle zorlu bir sorundur. Kentsel ortamda sağlam bir çözüm, son teknoloji ses etkinliği tanıma ve anormal algılama algoritmalarından yararlanan çok aşamalı yapay zekâ öğrenim “machine learning-ML” yaklaşımı gerektirir. İstanbul’da yapılan bir çalışmada, DAS’ın kentsel alanlardaki uygulamaları (Şekil 4.12) için üç aşamalı bir tehdit algılama algoritması önerilmektedir.



Algoritmanın ilk aşaması, kısa ses kliplerini Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks, CNN) ile sınıflayan ses tanımadır. Algoritmanın ikinci aşaması, bir dizi ses klibindeki etkinlik desenlerini tanıyan model tabanlı olay algılamadır (Sahinoglu vd., 2020).



Şekil 4.12: SECANS Güvenlik Yönetim Yazılımı Kullanıcı Paneli (Sahinoglu vd., 2020).

Algoritmanın son aşaması, akustik dizinin birden fazla kanalındaki verileri, tehdit alarmlarını azaltmak için hareketli titreşim kaynaklarını modellemek için birleştirmektedir. Önerilen algoritma, İstanbul'daki doğal gaz boru hattının güvenliğini sağlamak için yüksek nüfuslu kentsel alanlarda devreye alınmıştır. Sistem, çok düşük bir tehdit alarm hızına sahip birden fazla üçüncü şahıs tehdit örneğini başarıyla algılayabilmiştir (Sahinoglu vd., 2020).

DAS, standart bir fiber optik kablodaki titreşimleri Rayleigh geri saçılım temeline dayanan akustik bir sinyale dönüştüren bir algılama teknolojisidir. Faza duyarlı OTDR ölçüm tekniği, bir fiber optik kabloda tutarlı ışık darbelerinin iletimine dayanır ve kablodaki moleküler kusurlar nedeniyle ayna gibi davranan saçılma merkezlerinden yansımaları ölçer. Yansımaların varış zamanı ve alınan sinyal içeriğindeki değişiklik, kablodaki tahmini mesafeye göre farklı aktivite türlerinin sınıflandırılmasına izin verir. Sonuç olarak, alınan veriler, çözünürlüğün ve kanal sayısının donanım bileşenlerine ve hesaplama yeteneklerine bağlı olduğu bir dizi eşit dağıtık akustik sensörden gelen sinyaller olarak temsil edilebilir (Zinsou vd., 2019)

DAS teknolojisi, boru hattı izleme ve izinsiz giriş algılama gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalar için, alınan akustik sinyalleri düşük alarm hızına sahip son derece doğru aktivite alarmlarına dönüştürmek için etkili veri işleme teknikleri gereklidir. Alana ve müşterilerin talebine bağlı olarak, sinyal işleme teknikleri aktivite algılamada kabul edilebilir bir performansa ulaşabilir. Ancak kentsel alanlar gibi gürültülü ortamlarda son derece doğru aktivite sınıflandırması son teknoloji yapay zekâ öğrenim teknikleri gerektirir. DAS sensör yeteneklerini ve gerekli görevleri dikkate alan yapay zekâ öğrenim teknikleri, çeşitli alanlarda ve uygulamalarda umut verici sonuçlar sunar. Genel görev, kentsel alanlarda boru hatlarının güvenliğini sağlamak için faaliyet tanıma, daha küçük görevlerin tanımlanmasını gerektiren böl ve fethet yaklaşımıyla çözülebilir. Bu görevlerin bazılarını çözmek için yaygın olarak kullanılan ML teknikleri vardır. Ancak bazıları yenilikçi bir bakış açısıyla ML sorununa dönüştürülebilir. Yaygın olarak kullanılan ses tanıma tekniğini, aktivite kalıplarını tanımak için model tabanlı bir algoritma ile birleştiren 3 aşamalı bir girişim algılama algoritması önerilmektedir. Önerilen çözümün son adımında, sorunu ML teknikleri ile etkili çözümlerin bulunabileceği bir görüntü tanıma görevi olarak yeniden tanımlayarak, tehdit alarm hızını azaltmak için yenilikçi bir yaklaşım sunulmaktadır (Sahinoglu vd., 2020).

#### **4.3.3.1. Kentsel Alanlarda Boru Hattı Güvenliği**

Genel olarak, boru hattından hırsızlıkları önlemek için kırsal alanlara tehdit algılama sistemleri kurulur. Bu bölgeler düşük gürültü kaynaklarına sahiptir ve net etkinlik sinyalleri nedeniyle bu alandaki tehditleri tespit etmek daha kolaydır. Kentsel alanlarda hırsızlık olasılığı düşük olsa da altyapı çalışmalarına bağlı istemsiz hasarlar çok sık meydana gelmektedir. Kırsal alanlarda, aktivite tespitinin birincil zorluğu, farklı toprak türleri ve hava koşulları gibi değişen doğal faktörlerdir. Kentsel alanlarda, verilen çevresel zorluklara yapay gürültü kaynakları eklenir. Trafik, insan faaliyetleri, aydınlatma direkleri, geçiş yolları kentsel alanlarda gürültü kaynaklarına örnek olarak verilebilir. Kentsel alanlardaki arka plan gürültüsü, faaliyetlerin algılanmasını zorlaştırır ve yanlış alarm oranını artırır. Kentsel alanlardakiyle aynı algılama oranını korumak için ek hatalı alarm azaltma algoritmaları gerekir. Kentsel alanlarda boru hattı güvenliği uygulaması için altyapı çalışmalarının erken aşamalarda tespit edilmesi gerekmektedir. Genel olarak, Asfalt kesimi, Kıрма işlemi, Delme işlemi, Ekskavatör (Kazma işlemi), Manuel Kazma gibi faaliyetlerden bir veya daha fazla faaliyet boru hatlarında hasara neden olmaktadır (Sahinoglu vd., 2020).

#### 4.3.3.2 Veri Kümesi ve Performans Ölçümleri

Algoritmalar geliştirmek ve sistemin performansını değerlendirmek için bilgilendirici performans ölçümlerine sahip kapsamlı bir veri kümesine ihtiyacımız vardır. İki farklı kayıt türüne ve bu iki türe karşılık gelen iki farklı ölçüme sahibiz. İlk veri türü, etkinlik konumunu ve 100 kanala (10 m genişliğinde) yayılan komşu yerleri kapsayan ve kaydedilen etkinlik klipleridir. Bunlar algılama oranını incelemek için kullanılır. Farklı alanlarda kaydedilen etkinlik kliplerinin farklı etkinlik türleri için çeşitlendirilmesi önemlidir. 4 farklı etkinlik için 5 farklı bölgeden toplanan 1000 etkinlik senaryosu mevcuttur. Ayrıca, performansı objektif olarak değerlendirmek için standart kayıtlara sahip olmak önemlidir. Algılama oranı, doğru algılama sayısının kayıt sayısına oranı olarak hesaplanır. İkinci veri türü, çeşitli coğrafi konumları kapsayan uzun kayıtlardan oluşur. 5 farklı alanda uzun kayıtlar alınmakta olup kayıtların toplam süresi 5000 kanal verisi için 10 gündür. Normalleştirilmiş ölçü birimlerine sahip olunması gerekir, bu nedenle alarm sayılarının, gün cinsinden kanal sayısı sürelerine oranı alınmaktadır. Sonuç olarak, yanlış alarm oranı, 50 km boyunca bir günde alarm sayısı tahminini vermektedir (Sahinoglu vd., 2020).



## 5. TEKNİK VE EKONOMİK YÖNDEN ANALİZ

Bu bölümde, Türkiye'deki boru hatlarının güvenliğinin sağlanmasında mevcut durum dikkate alınarak ulaşılan bilgiler ışığında ihtiyaç duyulacak teçhizat/malzeme alımı ve işletme/bakım giderleri açısından yaklaşık bir maliyet analizi yapılmıştır. Aynı boru hatlarının DAS ile güvenliğinin sağlanması durumunda ortaya çıkabilecek maliyetle karşılaştırılmıştır.

### 5.1 Teknik Analiz Verileri

Türkiye'de kritik enerji alt yapılarından boru hatlarının güvenliğinin sağlanması için BOTAŞ ve Jandarma Genel Komutanlığı arasında ilk iş birliği 1986 yılında imzalanan protokol ile başlamıştır. Bu protokol ile Irak-Türkiye Ham Petrol Boru Hattının korunması amaçlanmıştır (Keçeci, 2013).

14 Haziran 2006 yılında yeniden bir protokol imzalanmış ve bu protokol kapsamında Şekil 5.1'de farklı renklerde güzergahları belirtilen boru hatlarından 641 km'lik Irak-Türkiye Ham Petrol Boru Hattı, 1076 km'lik Bakü-Tiflis-Ceyhan Ham Petrol Boru Hattı ve Türkiye-İran Doğal Gaz Boru Hattı'nın 662 km'lik kısmı (Ankara- Doğubayazıt aralığı) Jandarma Asayiş Birlikleri ve Jandarma'nın bünyesinde oluşturulmuş Koruma Karakolları ve Koruma Timleri tarafından korunması konusunda anlaşma yapılmıştır (Akın, 2015).



Şekil 5.1: Protokol Kapsamında Güvenliği Sağlanan 2379 Km'lik Boru Hatları.

İran-Türkiye doğal gaz boru hattı, Irak-Türkiye ham petrol boru hattı ve Bakü-Tiflis-Ceyhan ham petrol boru hatlarının güvenliğinin sağlanmasında, köy korucuları ile jandarma kuvvetleri iş birliği içinde Batman ve Siirt gibi bölgelerden geçen diğer büyük boru hatlarının korunmasını sağlamaktadırlar. Birçoğu Sivas'ın doğusunda konumlanan bu boru hatlarının terör tehdidi nedeniyle güvenliğinin sağlanması konusunda birçok aksaklıklar yaşanmıştır. Terörden uzak Sivas'ın batısında bulunan boru hattı ve tesislerin korunması ise özel güvenlik personeli tarafından sağlanmaktadır. Güvenlik personelinin denetleme yetkisi polis teşkilatına aittir ve gerektiğinde polis veya jandarma olaylara müdahale edebilmektedir. Boru hatlarının güvenliğinin sağlanmasındaki mekanizmalar değerlendirildiğinde Türk makamlarının terör tehdidi faktörünü göz önünde bulundurdukları anlaşılmaktadır. Devlet yetkililerinin boru hatlarına yönelik güvenlik tehditlerini düşük risk derecesinde gördüğü ve genel asayiş ve güvenlik önlemleri kapsamında değerlendirdiği söylenebilir. Ancak kritik enerji alt yapı unsurları güvenliğinin genel asayiş ve güvenlik kapsamının dışında farklı bir kategori altında sağlanması ihtiyacı da tartışılmıştır. Ayrıca yeni boru hattı projeleriyle boru hattı sayısının artacağı göz önüne alındığında, başta jandarma olmak üzere güvenlik güçlerinin yükünün artacağı dikkat çekmektedir. Bu durum, kamu güvenliği görevlerinin yanı sıra boru hatlarının güvenliğinin sağlanmasında aşırı iş yükü ve etkin bir hizmet sunulmaması gibi endişeleri de beraberinde getirmektedir (İşeri, 2015).

Yukarıda görüldüğü gibi jandarma, BOTAŞ ile toplam 2.379 kilometrelik enerji boru hattının korunmasında büyük rol oynamaktadır. Çünkü bu hat ve tesislerin büyük çoğunluğu kırsal alanlarda, yani jandarmanın yetki alanına giren bölgelerde bulunmaktadır. Jandarma, 36 koruma ekibiyle kırsal alanlardaki 35 istasyon bünyesinde boru hatlarının güvenliğini sağlıyor. BOTAŞ, bu ekiplerin fiziksel güvenlik için ihtiyaç duydukları yapı ve malzemeleri sağlamaktadır. Bu, karakol binasının inşasını ve yenilenmesini, zırhlı araçların tedarikini, kızılötesi kameraları ve kapalı devre kamera güvenlik sistemlerini içermektedir (İşeri, 2015).

Sayıştay'ın 2012 yılında BOTAŞ ve BOTAŞ'a bağlı tesislerinde denetim yapmış ve denetim hakkında rapor yayınlamıştır. Raporda, kritik enerji alt yapılarından özellikle boru hatlarında hırsızlık ve sabotaj girişimlerinin arttığını, bu olayların önlenmesi bazı önlemlerin alınması gerektiğini açıklamıştır. Bu önlemler;

- Hırsızlık ve sabotaj girişimlerinin yoğunlukta olduğu bölgelerde Jandarma ile yeni bir protokol imzalanarak bu bölgelerde yeni karakollar kurulup önlemlerin artırılması gerektiği,
- Ham Petrol Boru Hattı ve Doğal Gaz Boru Hatlarında Erken Uyarı Sistemleri kurulması, ihbar-ödül sisteminin uygulanması gerektiği,
- BOTAŞ'a bağlı Ceyhan ve Dörtüol İşletme Müdürlükleri'nde çalışan hat kontrol personellerinin sayısının artırılarak, son teknolojik teçhizatla donatılmış ve haftalık denetim yapan devriye ekiplerinin oluşturulması gerektiği (Akın'dan akt. Sayıştay Başkanlığı, 2013).

Sayıştay'ın güvenlik tedbirleriyle alakalı olarak önerileri 2013 yılında Jandarma Genel Komutanlığı ile BOTAŞ Genel Müdürlüğü tarafından dikkate alınmış ve yeni kurulacak bir komisyon marifetiyle değerlendirilmesi kararlaştırılmıştır.

Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurulu 2019-2023 yılları arası stratejik planı incelediğinde yüksek kapasiteli sabit, mobil ve kablosuz geniş bant aralıklı şebekelerin ve hizmetlerin yaygınlaştırılması ile fiber altyapının geliştirilmesi sağlanarak Türkiye'nin bilgi toplumuna dönüşüm sürecinin hızlandırılmasının amaçlandığı görülmektedir. Devlet yatırımlarının önümüzdeki yıllarda da fiber altyapı üzerine devam edeceği aşıkardır (BTK, 2019).

Mayıs 2017'de Boru Hatlarının Korunması ve geçmişte yapılan protokollerin değerlendirilmesi amaçlı İçişleri Bakanlığı ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı arasında yeni bir protokol imzalanmıştır. Protokol kapsamında Boru Hattı Güvenliği konusunda sorumlu makamların BOTAŞ ve JGK olarak belirlendiği değerlendirilmektedir nitekim bir yıl sonra Mayıs 2018'de protokoller bakanlık seviyesinde değil BOTAŞ ve JGK arasında yapılmıştır. Yapılan protokoller olumlu neticeler vermiş ve Türkiye'de 2022 yılına kadar görevi sadece Boru Hatlarının korunması olan toplam 34 karakol ve 64 koruma timi kurulduğu bilgisine ulaşılmıştır. Bunlara ilave olarak yüzlerce İç Güvenlik Karakolları gerekli durumlarda Boru Hatlarının korunmasına yönelik destek vermektedir. BOTAŞ ise bölge şubeleri açmış ve bünyesine özel güvenlik ekiplerini dahil etmiştir. BOTAŞ, ASELSAN ve HAVELSAN ile çeşitli anlaşmalar doğrultusunda Erken Uyarı Sistemleri kurduştur. Erken Uyarı Sisteminin ana bileşenini DAS sistemi oluşturmaktadır.

Koruma Timleri, hat boyunca güvenlik amaçlı devriyeler atmaktadır. Koruma karakolları ise genel olarak vana ve basınç istasyonlarında görev yapmaktadırlar. Koruma Timleri ve Koruma Karakollarına dahil edilen DAS sistemli Erken Uyarı Sistemleri boru hatlarına yönelik sabotaj, kaçak kazı, sıcak musluk girişimlerini çok yüksek oranda engellemiştir.

## 5.2 Ekonomik Analiz

Ülkemizdeki boru hatlarının yukarıda teknik analiz başlığı altında verilen kesimleri için mevcut güvenlik altyapısı esas tutularak ihtiyaç duyulan malzeme ve teçhizat alımlarını içeren ilk yatırım maliyeti ve yıllık işletme maliyetleri hesaplanmıştır. Aynı boru hattı kesimi için DAS sisteminin entegrasyonu ile tasarlanan yeni güvenlik planı ile ekipman ve teçhizat ile kolluk kuvvetinde oluşacak azalmalar göz önünde bulundurularak yeni bir maliyet analizi gerçekleştirilmiştir.

DAS erken uyarı sisteminin sağladığı faydalardan en önemlisi boru hatlarında oluşan üçüncü şahıs hasarlarının önlenmesidir. Dolayısıyla, DAS entegrasyonu ile hasarların önlenmesi ile elde edilecek faydalar ekonomik analize dahil edilmiştir. Boru hatları güvenliğinde DAS sisteminin entegrasyon projesinin yatırım değerlendirme analizleri gerçekleştirilmiştir.

### 5.2.1 Mevcut durum (geleneksel yöntem) için boru hattı güvenliği maliyet analizi

Akın, 2015'den yararlanılarak, 2006 yılında imzalanan protokol ile 2010 yılına kadar Türkiye'deki enerji boru hatlarının güvenliği için alınan bazı askeri malzemelerin dünya piyasalarındaki ortalama rayiç bedelleri baz alınarak bir maliyet çizelgesi oluşturulmuştur (Tablo 5.1). 2010 yılından sonra malzeme alımı olmamıştır.

Tablo 5.1: Boru hattı güvenliği için temin edilen malzeme ve teçhizatın maliyet çizelgesi (Piyasa rayiç bedelleri baz alınmıştır).

Malzeme/Teçhizat	Miktar (Adet)	Birim Fiyat (USD)	Toplam Tutar (USD)
Hafif taktik zırhlı araç	111	230.000	25.530.000
Devriye müdahale aracı	119	33.000	3.927.000
Gece görüş dürbünü	86	4.300	369.800
Gece görüş el dürbünü	7	6.200	43.400
El dürbünü	122	300	36.600
Araç telsizi	54	800	43.200
Gece görüş gözlüğü	86	4.850	417.100
Mayın detektörü	110	3.700	407.000
<b>Toplam:</b>			<b>30.774.100</b>

Tablo 5.1’de, BOTAŞ ve Jandarma kuvvetlerinin Türkiye’deki toplam 2379 kilometrelik enerji boru hatlarının 2006-2010 yılları arasında güvenliğinin sağlanması için imzalanan protokol kapsamında BOTAŞ tarafından tedarik edilen bazı askeri malzemelerin (karakol yapım maliyetleri hariç) toplam maliyeti yaklaşık olarak 30.774.100 USD olarak hesaplanmıştır. Tablo 5.2 ve Tablo 5.3’te 2.379 kilometrelik enerji boru hattının güvenliğinin sağlanması için geleneksel yöntemler ve geleneksel yöntemlere ek olarak DAS’ın entegre edilmesi ile oluşan ekonomik durum gösterilmiştir.

Tablo 5.2: Boru hattı güvenliğinde geleneksel yöntem için maliyet analizi.

İlk yatırım Maliyeti (2379 km için)				İşletme ve Bakım Maliyeti (Yıllık) (2379 km için)			
Malzeme/Teçhizat	Miktar (Adet)	Birim Fiyat (USD)	Toplam Tutar (USD)	Malzeme/Teçhizat	Miktar (adet)	Birim Fiyat (USD)	Toplam Tutar (USD)
Hafif taktik zırhlı araç	111	230.000	25.530.000	Hafif taktik zırhlı araç bakım giderleri	111	685	76.035
Devriye müdahale aracı	119	33.000	3.927.000	Devriye müdahale aracı bakım giderleri	119	404	48.076
Gece görüş dürbünü	86	4.300	369.800	Araçlara ait yakıt giderleri	230	9.900	2.277.000
Gece görüş el dürbünü	7	6.200	43.400	Teçhizatların kalibrasyon ve bakımı	465	10	4.650
El dürbünü	122	300	36.600	Güvenlik Karakolu bakım giderleri	34	1.000	34.000
Araç telsizi	54	800	43.200	Güvenlik Karakolu enerji giderleri	34	847	28.798
Gece görüş gözlüğü	86	4.850	417.100	Personel giderleri	1788	9.882	17.669.016
Mayın dedektörü	110	3.700	407.000				
Güvenlik karakolu	34	50.000	1.700.000	<b>1 Yıllık İşletme ve Bakım Maliyeti</b>		<b>Toplam:</b>	<b>20.137.575</b>
<b>Toplam:</b>			<b>32.474.100</b>	<b>10 Yıllık İşletme ve Bakım Maliyeti</b>		<b>Toplam:</b>	<b>201.375.750</b>

Tablo 5.2’yi oluşturulurken Tablo 5.1’deki araç ve teçhizata ek olarak 2022 yılına kadar inşa edilen 34 adet güvenlik karakolu eklenerek yatırımın ilk yatırım maliyeti hesaplanmıştır. Ayrıca Tablo 5.2’de 10 yıllık bakım ve işletme maliyetleri yer almaktadır. Toplam boru hattı mesafesi (2.379 km) için 34 adet güvenlik karakolu inşa edildiğinden her güvenlik karakoluna 70 km (2.379 km/34 adet) sorumluluk sahası düşmektedir. Bir güvenlik karakoluna ait bakım giderleri yıllık ortalama 1.000 USD olarak hesaplanmıştır. Güvenlik

karakolunun her birinin enerji gideri ortalama yıllık 847 USD'dir (Hesaplamalarda 2020-2021 yılları arasında 30 adet personeli olan, 2 katlı bir askeri birimin ortalama bakım ve enerji giderleri baz alınmıştır).

Tablo 5.2'de 86 adet gece görüş dürbünü, 122 adet el dürbünü, 7 adet gece görüş el dürbünü (devriye araçları için), 54 adet araç telsizi (hafif taktik zırhlı araçların üzerinde hali hazırda araç telsizi bulunmakta olup normal devriye araçlarında bulunmayanlar için ayrıca temin edilecektir), 86 adet gece görüş gözlüğü (kritik alan devriyesi gerçekleştiren araç personeli için), 110 adet mayın dedektörü (kritik alan devriyesi gerçekleştiren araç personeli için) olmak üzere toplam 465 adet teçhizat bulunmaktadır. Teçhizatların kalibrasyon ve bakımı düşük maliyette olup her biri için ortalama 10 USD'dir.

2.379 km'lik mesafe 230 adet araç ile korunması planlanmaktadır. Devriye için araç başına düşen mesafe 10,3 km/araç (2.379 km/230 adet) oranında çıkmaktadır. Devriye gidiş ve dönüş olarak yapıldığında toplam mesafe 20,6 km olmaktadır. 3 saatlik periyotlarla 24 saat içerisinde 8 adet devriye atılması planlanmaktadır. Bir aracın bir yıl boyunca devriye için kat ettiği mesafe 60.152 km (20,6 km x 8 adet x 365 gün)'dir. 60.152 km'lik mesafe için bir aracın yakıt gideri (Hafif taktik zırhlı araç ve devriye müdahale aracı yakıt ortalaması 0,16 lt/km'dir) yaklaşık 9.900 USD (60.152 km x 0,16 lt/km x 1,0286 USD/lt)'dir. Yakıt fiyatları hesaplamalarda 1,0286 USD/lt olarak alınmıştır. Araçların bakım masrafları yıllık yaptıkları km'ye göre değişiklik göstermektedir. 60.152 km için yıllık bakım masrafı (3 yıl sonunda lastik değişimi dahil) hafif taktik zırhlı araçların her biri için 685 USD, devriye müdahale araçlarının her biri için 404 USD olarak hesaplanmıştır.

Personel giderleri olarak maaş, sigorta, yemek ve servis ücreti dahil bir personel için yıllık tutar 9.882 USD (14.000 TL x 12 Ay / 17 TL/USD)'dir. 34 adet güvenlik karakolunun her birinde ortalama 30 kişi görev yapmakta, 64 adet güvenlik timinin her birinde ise ortalama 12 kişi görev yapmaktadır. Toplam 1.788 personel ((34 adet karakol x 30 kişi) + (64 adet tim x 12 kişi)) için yıllık gider 17.669.016 USD (1788 adet personel x 9.882 USD) olarak hesaplanmıştır. (Hesaplamalarda döviz kuru: 1 USD = 17 TL alınmıştır).

2022 yılına kadar 34 adet güvenlik karakolu inşa edilmiştir. Karakollar genellikle 2 katlı (zemin +1) olacak şekilde planlanmıştır. Güvenlik Karakollarının inşa maliyeti yaklaşık 50.000 USD'dir. Geleneksel yöntemler için ilk yatırım maliyeti **32.474.100 USD**, 1 yıllık bakım ve işletme maliyeti ise **20.137.575 USD** yapmaktadır.

## 5.2.2 DAS yöntemi entegrasyonu varsayımıyla boru hattı güvenliği maliyet analizi

Tablo 5.3'te mevcut hatların güvenliği için geleneksel güvenlik yöntemlerine DAS sisteminin entegre edilmesi durumunda güvenliğin sağlanmasında yapılan yeni planlamaya göre gerekli karakol ve teçhizat sayıları belirlenmiş ve bu sayılar dikkate alınarak ilk yatırım maliyetleri ve işletme maliyetleri hesaplanmıştır. Ortaya çıkan maliyetler Tablo 5.2'de ki maliyetlerle karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.3: Boru hattı güvenliğinde DAS yöntemi için maliyet analizi.

İlk yatırım Maliyeti (2379 km için)				İşletme ve Bakım Maliyeti (Yıllık) (2379 km için)			
Malzeme/Teçhizat	Miktar (Adet)	Birim Fiyat (USD)	Toplam Tutar (USD)	Malzeme/Teçhizat	Miktar (Adet)	Birim Fiyat (USD)	Toplam Tutar (USD)
Hafif taktik zırhlı araç	48	230.000	11.040.000	Hafif taktik zırhlı araç bakım giderleri	48	705	33.360
Devriye müdahale aracı	48	33.000	1.584.000	Devriye müdahale aracı bakım giderleri	48	419	20.112
Gece görüş dürbünü	27	4.300	116.100	Araçlara ait yakıt giderleri	72	12.014	865.008
Gece görüş el dürbünü	53	6.200	328.600	Teçhizatların kalibrasyon ve bakımı	292	10	2.920
El dürbünü	53	300	15.900	Güvenlik Karakolu Bakım giderleri	24	1000	2.400
Araç telsizi	53	800	42.400	Güvenlik Karakolu enerji giderleri	24	847	3.912
Gece görüş gözlüğü	53	4.850	257.050	Personel giderleri	864	9.882	8.538.048
Mayın dedektörü	53	3.700	196.100	MİDAS Sorgulayıcı ünitesi bakım giderleri	48	50	2.400
Güvenlik Karakolu	24	50.000	1.200.000				
MİDAS Sorgulayıcı ünitesi ve diğer ekipmanlar (Bir karakola 2 cihaz yerleştirilecek)	48	100.000	4.800.000				
Fiber Optik kablo açık tranşeye döşeme maliyeti	2379	2.000	4.758.000	<b>1 Yıllık İşletme ve Bakım Maliyeti</b>	<b>Toplam:</b>	<b>9.506.656</b>	
<b>Toplam:</b>			<b>24.338.150</b>	<b>10 Yıllık İşletme ve Bakım Maliyeti</b>	<b>Toplam:</b>	<b>95.066.560</b>	

Yeni düzenlemeyle, ASELSAN A.Ş tarafından üretilen MİDAS sisteminin her 50 km’de bir adet güvenlik karakoluna entegre etmek yeterli olmaktadır. 50 km’lik hat üzerinde elektrik enerjisine gereksinim duyulmamaktadır. MİDAS sisteminin bakım ve işletme maliyetleri oldukça düşük olmasının yanında cihaz oldukça uzun ömürlüdür. MİDAS cihazının yıllık bakım giderleri çok düşük olup 2379 km için toplam 2.400 USD/Yıl olarak hesaplanmıştır.

50 km’lik güzergâh için (fiber optik kablo çekilmesi hariç) cihaz, yazılım, kurulum, bilgisayar sistemi dahil maliyeti yaklaşık 100.000 USD’dir. Aynı boru hatları için yaklaşık 48 adet (2379 km/50 km) MİDAS-2 cihazına ihtiyaç olmakla beraber, aynı güvenlik karakoluna zıt yöndeki 50 km uzunluğundaki fiber optik kablolar bağlandığında bir güvenlik karakolu 100 km’lik bir mesafeyi koruyabilmektedir. Bu sayede cihazların entegre edilip korunacağı 24 adet güvenlik karakoluna (her karakola 2 cihaz) ihtiyaç duyulacak ve cihaz maliyeti toplam 4.800.000 USD (24 adet x 2 adet x 100.000 USD) olacaktır.

Fiber optik kablo açık tranşeye döşeme maliyeti (fiber optik kablo dahil) 1 km için yaklaşık 2.000 USD’dir. 2379 km’lik hat için maliyeti yaklaşık 4.758.000 USD (2.000 USD x 2.379 km) olmaktadır. Ayrıca DAS sistemlerinde fiber hatlar için elektrik enerjisine ihtiyaç duyulmamaktadır. Yalnızca 50 km aralıklarla kurulan güvenlik karakollarına elektrik enerjisi verilmesi yeterli olacaktır.

Güvenlik sitemine DAS’ın entegre edildiği yeni sistemde karakol sayısı 34 adetten 24 adete düşmektedir. Güvenlik karakolu ve boru hattında üst düzey güvenlik sağlamak için, her bir güvenlik karakoluna 2 adet devriye müdahale aracı ve 2 adet zırhlı araç planlanmaktadır. Araçlardan 2 tanesi devriye faaliyetini icra ederken 1 adet araç güvenlik karakolunda her an göreve çıkmaya hazır halde bekletilecek ve diğer araçlar devriye faaliyetinden döndükten belli bir süre sonra hazır bekletilen araç belirmen yönde devriyeye çıkacaktır. 1 adet araç yedek araç olarak karakol garajında bekletilecektir. Devriye faaliyeti gündüz ve gece birer defa yapılacaktır. 72 adet araç aktif devriye faaliyeti icra ederken 24 adet araç yedek araç olarak garajda bulundurulacaktır. Toplam araç sayımız 230 adet araçtan 96 adet araç sayısına düşecektir. 134 adet araç tasarruf edilecektir.

DAS sayesinde 24 saat için 8 devriye faaliyetine olan ihtiyaç ortadan kalkacak yalnızca gündüz ve gece birer defa olmak üzere 3 adet araçla 2 devriye faaliyeti icra edilmesi yeterli olacaktır. Ayrıca DAS’ın test ve kontrolü açısından devriye faaliyeti icra edilirken araçların



oluşturduğu akustik veriler güvenlik karakolunda bulunan DAS sayesinde kontrol edilecek, bu durum sistemin günlük test edilmesi açısından büyük bir avantaj sağlayacaktır. Ayrıca devriyeler en fazla 30 km/saat hızla atılmaktadır, bu hızın üzerinde devriye atan araçlar DAS monitöründe bulunan şelale ekranından tespit edilerek kontrolü sağlanacaktır.

Her bir araç 50 km gidiş, 50 km dönüş ve bunu günde 2 sefer yapmak üzere toplam 200 km mesafe katedeceği planlanmaktadır. Araçların yakıt tüketimi ortalama (Hafif taktik zırhlı araç ve devriye müdahale aracı yakıt ortalaması) 0,16 lt/km'dir. Yılda 1 adet araç 73.000 km (365 gün x 200 km) yapacak olup yakıt gideri 12.014 USD (73.000 km x 0,16 lt/km x 1,0286 USD/lt) hesaplanmıştır.

Araçların bakım masrafları yıllık yaptıkları km'ye göre değişiklik göstermektedir. 73.000 km için yıllık bakım masrafı (3 yıl sonunda lastik değişimi dahil) bir adet hafif taktik zırhlı araç için 705 USD, bir adet devriye müdahale aracı için 419 USD yapmaktadır.

Teçhizatlar ise 27 adet gece görüş dürbünü (24 adet karakol için, 3 adet yedek), 53 adet gece görüş el dürbünü (48 adet devriye aracı, 5 adet yedek), 53 adet el dürbünü (devriye araçları için), 53 adet araç telsizi (hafif taktik zırhlı araçların hepsinde araç telsizi halihazırda bulunmakta olup bulunmayan devriye araçları için), 53 adet gece görüş gözlüğü (devriye araçları için), 53 adet mayın dedektörü (devriye araçları için) olmak üzere toplam 292 adet teçhizat bulunmaktadır. Teçhizatların kalibrasyon ve bakımı yıllık 2.920 USD (292 adet x 10 USD)'dir.

Personel giderleri ve sayısı ise; araç sayısındaki tasarruf nedeniyle sürücü ve gözetleyici personel sayısında azalma sağlanacaktır. 96 adet aracın 24 tanesi güvenlik karakollarında yedekte bekletilecektir. 72 adet araç için, her bir araca bir adet sürücü, bir adet gözetleyici gündüz ve gece ayrı ayrı olacak şekilde 288 adet personel (72 adet x 2 adet x 2 adet) planlanmaktadır.

Karakol sayısının düşürülmesi ve devriye faaliyetlerinin azaltılması nedenleri ile karakollardaki personel sayılarında da azalma olacaktır. DAS'ın entegre edilmesiyle her karakol için 30 kişilik bir ekibe ihtiyaç kalmayacak olup 12 adet personel gündüz, 6 adet personel gece nöbetçi kalmak suretiyle 18 adet personel yeterli olacaktır. 24 karakol için toplam 432 adet personel (24 adet x (12 adet + 6 adet)) ve tüm personeller için %20 yedek

personel (hastane, izin, acil durum vb. durumları için) bulundurmak şartıyla toplam 864 adet personel ((288 adet + 432 adet) %20 + (288 adet + 432 adet)) yeterli olacaktır.

Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'den görüldüğü üzere boru hattı güvenliğinde DAS kullanımında, ilk yatırım maliyeti geleneksel yöntemlere oranla %25,1 daha düşük olmaktadır. Aynı zamanda 10 yıllık işletme ve bakım maliyetleri karşılaştırıldığında DAS %52,8 tasarruf sağlamaktadır.

### 5.2.3 Boru Hatları Altyapı Hasarları ve Maliyet Analizi

Boru hattı güvenliğinde DAS entegrasyon yatırımının değerlendirilmesi aşamasında boru hatlarında oluşan üçüncü şahıs hasarlarının sağlayacağı ekonomik faydanın belirlenmesine çalışılmıştır. Bu konuda ülkemizde söz konusu boru hatları için detaylı verilere ulaşılamamıştır. Dolayısıyla, Amerika Birleşik Devletleri Boru Hattı ve Tehlikeli Madde Güvenlik İdaresi (PHMSA, U.S. Department of Transportation, Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration) tarafından paylaşılan verilerden yararlanılmıştır.

Merkezi Washington DC'de bulunan Amerika Birleşik Devletleri Boru Hattı ve Tehlikeli Madde Güvenlik İdaresi ofisleri ülke genelinde beş bölgede yer almaktadır. PHMSA, 1970'den beri Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'nde bulunan boru hattı olay raporlarını toplamaktadır. Günümüzden geçmişe doğru 20 yıllık periyodlarla nedenleri ve konumuyla ilgili ayrıntıları içeren boru hattı olaylarını çeşitli rapor formatlarını birleştirerek paylaşmaktadır. PHMSA, ABD'de bulunan toplam 2.849.140 Mil (4.585.246 km)'lik boru hattı uzunluğu Gaz Boru Hattı Uzunlukları (Tablo 5.4) ve Emtia Bazında Sıvı Tesisler Boru Hattı Uzunlukları (Tablo 5.5) olarak sınıflamaktadır.

Tablo 5.4: ABD Gaz Boru Hattı Uzunlukları (PHMSA, 2022).

Sistem Türü	Uzunluk/Mil
Gaz Dağıtım	2.300.576
Gaz Toplama	17.082
Gaz İletim	301.515
<b>Genel Toplam</b>	<b>2.619.174</b>

Tablo 5.5: ABD Emtia Bazında Sıvı Tesisler Boru Hattı Uzunlukları (PHMSA, 2022).

Madde	Uzunluk/Mil	Tank
Bioyakıt	17	9
CO <sub>2</sub>	5.339	0
Ham Petrol	84.761	3.381
HVL Flamm Toxic	75.613	293
Rafine Edilmiş PP	64.236	4.984
<b>Genel Toplam</b>	<b>229.966</b>	<b>8.667</b>

PHMSA Boru Hatları ve istasyonlarında yaşanan ölüm/yaralanma sayılarını ve maddi karşılıklarını güncel olarak tutmaktadır. Tablo 5.6’da Boru Hatlarında yaşanan olay sayıları, olaylar neticesinde yaralanma ve ölüm sayıları ve bunların maddi giderleri, dolar cinsinden sunulmuştur. Tablo 5.7’de PHMSA ABD 2020 yılı boru hattı önemli olayların ayrıntıları ve maddi karşılıkları verilmiştir.

Tablo 5.6: ABD Boru Hatları 2002-2021 Yılları Arası Tüm Olay, Ölüm ve Yaralanma Sayıları (PHMSA, 2022).

Takvim Yılı	Sayı	Ölüm	Yaralanma	Toplam Maliyet (USD)
2002	642	12	49	102.167.588
2003	670	12	71	139.044.004
2004	671	23	60	267.836.502
2005	719	17	47	1.245.463.189
2006	639	21	36	151.983.767
2007	610	15	49	153.772.432
2008	659	8	56	564.830.840
2009	627	13	64	179.070.183
2010	586	22	108	1.692.501.887
2011	588	13	55	426.330.261
2012	571	12	57	229.852.664
2013	617	9	44	368.993.939
2014	706	19	95	368.066.350
2015	712	11	48	351.449.851
2016	632	16	87	376.497.725
2017	646	7	32	340.276.223
2018	634	7	78	2.262.348.696
2019	657	11	36	351.035.300
2020	577	15	40	385.902.665
<b>Genel Toplam</b>	<b>12.163</b>	<b>263</b>	<b>1.112</b>	<b>10.177.936.515</b>

Türkiye’de bulunan boru hatlarında meydana gelen olayların maddi karşılıklarına ulaşamadığı için ABD’deki boru hattı olayları ve maddi karşılıkları baz alınarak ülkemiz şartlarına uyarlanmasında temel bir yaklaşım geliştirilmiştir.

Tablo 5.7: ABD 2020 Yılı Boru Hattı Tüm Olay Tür ve Sayıları (PHMSA, 2022).

Bildirilen Olay Nedeni	Olay Nedeni Alt Türü	Sayı (adet)	Oran (%)	Ölüm (adet)	Yaralanma (adet)	Toplam Maliyet (USD)
Kazı Hasarı	İşçi/Müteahhit Kazı Hasarı	7	1.2	0	0	4.156.970
	Önceki Kazı Hasar Nedenli	3	0.5	0	0	1.190.480
	Üçüncü Şahıs Kazı Hasarı	59	10.2	7	11	29.398.364
<b>Toplam Kazı Hasarı</b>		<b>69</b>	<b>11.9</b>	<b>7</b>	<b>11</b>	<b>34.745.814</b>
Toplam Korozyon Hasarı		95	16.5	0	0	33.623.890
Toplam Elektrik Arkı, Yangın/Patlama Hasarı		39	6.8	6	11	10.076.483
Toplam Personel Yanlış İşlem Yapması Hasarı		71	12.3	1	5	7.378.731
Toplam Malzeme / Kaynak / Donatma Hasarı		263	45.6	1	4	163.396.630
Toplam Doğal Kuvvet Hasarları		26	4.5	0	1	126.430.122
Toplam Diğer Tüm Nedenler Hasarı		14	2.4	0	8	10.250.995
<b>Genel Toplam</b>		<b>577</b>	<b>100.0</b>	<b>15</b>	<b>40</b>	<b>385.902.665</b>

Tablo 5.7’de verilen 2020 yılında yaşanan 577 adet boru hattı olaylarından, 59 adet olay üçüncü şahıs kazı hasarı nedeni olup, 18 adeti Doğal Gaz İletim Hatlarında ve Ham Petrol Boru Hatlarında meydana gelen üçüncü şahıs kazı olaylarıdır. 18 adet kazı olayının yaşandığı boru hatların toplam uzunluğu **77.420 km’dir**. 18 adet olayın meydana getirdiği zararın maliyeti toplam **18.339.766 USD’dir**. Buradan;

Birim Maliyet  $18.339.776 \text{ USD} / 77.420 \text{ Km} = 236,9 \text{ USD/Km}$

Hasar Bedeli  $2379 \text{ Km} \times 236.8 \text{ USD/Km} = 563.347 \text{ USD}$

Altyapı Kazılarını %90 Tespit Etme Durumunda Maliyetten Tasarruf = **507.227 USD/Yıl**

ABD Haziran 2022 Enflasyonu **%9,1**’dir (U.S. Bureau of Labor Statistics, 2022).

Yatırımın Net Nakit Tutarı: **-24.338.150 USD** olarak bulunmuştur.

Kazı Hasarlarından Tasarruf: **507.227 USD** (2379 Km’lik Hatta Önlenebilir Hasar Bedeli)

## 5.2.4 DAS Entegrasyon Projesinin Yatırım Değerlendirilmesi (Net Bugünkü Değer, İç Getiri Oranı ve Geri Ödeme Süresi)

Tablo 5.8’de boru hattı güvenliği için DAS ve geleneksel yöntem için ilk yatırım maliyetleri karşılaştırılmıştır. İlk yatırım maliyetleri kapsamında oluşan tasarruflar aşağıda verilmiştir;

Karakol Sayısından Tasarruf: **500.000 USD** (1.700.000 USD – 1.200.000 USD)

Araç Sayısından Tasarruf: **16.833.000 USD** (29.457.000 USD – 12.624.000 USD)

Teçhizat Sayısından Tasarruf: **360.950 USD** (1.317.100 USD – 956.150 USD)

Tablo 5.8: DAS ve Geleneksel Yöntem için İlk Yatırım Maliyetleri Karşılaştırma Tablosu

Geleneksel Yöntem İlk Yatırım Maliyetleri (2379 km için)				DAS Entegreli Yöntem İlk Yatırım Maliyetleri (2379 km için)			
Malzeme/Teçhizat	Miktar (Adet)	Birim Fiyat (USD)	Toplam Tutar (USD)	Malzeme/Teçhizat	Miktar (Adet)	Birim Fiyat (USD)	Toplam Tutar (USD)
Hafif taktik zırhlı araç	111	230.000	25.530.000	Hafif taktik zırhlı araç	48	230.000	11.040.000
Devriye müdahale aracı	119	33.000	3.927.000	Devriye müdahale aracı	48	33.000	1.584.000
<b>Toplam araç</b>	<b>230</b>	<b>-</b>	<b>29.457.000</b>	<b>Toplam araç</b>	<b>96</b>	<b>-</b>	<b>12.624.000</b>
Gece görüş dürbünü	86	4.300	369.800	Gece görüş dürbünü	27	4.300	116.100
Gece görüş el dürbünü	7	6.200	43.400	Gece görüş el dürbünü	53	6.200	328.600
El dürbünü	122	300	36.600	El dürbünü	53	300	15.900
Araç telsizi	54	800	43.200	Araç telsizi	53	800	42.400
Gece görüş gözlüğü	86	4.850	417.100	Gece görüş gözlüğü	53	4.850	257.050
Mayın dedektörü	110	3.700	407.000	Mayın dedektörü	53	3.700	196.100
<b>Toplam teçhizat</b>	<b>465</b>	<b>-</b>	<b>1.317.100</b>	<b>Toplam teçhizat</b>	<b>292</b>	<b>-</b>	<b>956.150</b>
<b>Toplam güvenlik karakolu</b>	<b>34</b>	<b>50.000</b>	<b>1.700.000</b>	<b>Toplam güvenlik karakolu</b>	<b>24</b>	<b>50.000</b>	<b>1.200.000</b>
				MİDAS sorgulayıcı ünitesi ve diğer ekipmanlar	48	100.000	4.800.000
				Fiber optik kablo açık tranşeye döşeme maliyeti	2.379	2.000	4.758.000
<b>Toplam geleneksel yöntem ilk yatırım maliyeti</b>			<b>32.474.100</b>	<b>Toplam DAS entekleli yöntem ilk yatırım maliyeti</b>			<b>24.338.150</b>

Tablo 5.9’da boru hattı güvenliği için DAS ve geleneksel yöntem için işletme maliyetleri karşılaştırılmıştır. İşletme maliyetleri kapsamında oluşan tasarruflar aşağıda verilmiştir;

Yakıttan Tasarruf: **1.411.992 USD** (2.277.000 USD – 865.008 USD)

Personel Giderlerinden Tasarruf: **9.130.968 USD** (17.669.016 USD – 8.538.048 USD)

Bakım Giderlerinden Tasarruf: **79.489 USD** (162.761 USD – 83.272 USD)

Enerjiden Tasarruf: **8.470 USD** (28.798 USD – 20.328 USD)

Tablo 5.9: DAS ve Geleneksel Yöntem için İşletme Maliyetleri Karşılaştırma Tablosu

Geleneksel Yöntem İşletme ve Bakım Maliyeti (Yıllık) (2379 km için)				DAS Entegreli Yöntem İşletme ve Bakım Maliyeti (Yıllık) (2379 km için)			
Malzeme/Teçhizat	Miktar (adet)	Birim Fiyat (USD)	Toplam Tutar (USD)	Malzeme/Teçhizat	Miktar (Adet)	Birim Fiyat (USD)	Toplam Tutar (USD)
Hafif taktik zırhlı araç bakım giderleri	111	685	76.035	Hafif taktik zırhlı araç bakım giderleri	48	705	33.840
Devriye müdahale aracı bakım giderleri	119	404	48.076	Devriye müdahale aracı bakım giderleri	48	419	20.112
Toplam teçhizatların kalibrasyon ve bakım giderleri	465	10	4.650	Toplam teçhizatların kalibrasyon ve bakım giderleri	292	10	2.920
Güvenlik karakolu bakım giderleri	34	1.000	34.000	Güvenlik karakolu bakım giderleri	24	1.000	24.000
				MİDAS sorgulayıcı ünitesi bakım giderleri	48	50	2.400
<b>Toplam bakım giderleri</b>	<b>729</b>	<b>-</b>	<b>162.761</b>	<b>Toplam bakım giderleri</b>	<b>460</b>	<b>-</b>	<b>83.272</b>
<b>Toplam araçlara ait yakıt giderleri</b>	<b>230</b>	<b>9.900</b>	<b>2.277.000</b>	<b>Toplam araçlara ait yakıt giderleri</b>	<b>72</b>	<b>12.014</b>	<b>865.008</b>
<b>Toplam güvenlik karakolu enerji giderleri</b>	<b>34</b>	<b>847</b>	<b>28.798</b>	<b>Güvenlik karakolu enerji giderleri</b>	<b>24</b>	<b>847</b>	<b>20.328</b>
<b>Toplam personel giderleri</b>	<b>1.788</b>	<b>9.882</b>	<b>17.669.016</b>	<b>Personel giderleri</b>	<b>864</b>	<b>9.882</b>	<b>8.538.048</b>
<b>1 Yıllık işletme ve bakım maliyeti</b>		<b>Toplam:</b>	<b>20.137.575</b>	<b>1 Yıllık işletme ve bakım maliyeti</b>		<b>Toplam:</b>	<b>9.506.656</b>
<b>10 Yıllık işletme ve bakım maliyeti</b>		<b>Toplam:</b>	<b>201.375.750</b>	<b>10 Yıllık işletme ve bakım maliyeti</b>		<b>Toplam:</b>	<b>95.066.560</b>

DAS teknolojisi entegreli güvenlik sistemi projesinin yatırım değerlendirme aşamasında 10 yıllık süreç için Net Bugünkü Değer (NBD), İç Verim/Karlılık Oranı (Internal Rate of Return-IRR) ve Geri Ödeme Süresi parametreleri hesaplanmıştır. Yatırımın ekonomik analizi için Tablo 5.10 düzenlenmiştir. Burada maliyetler ABD doları olarak dikkate alındığından analizlerde iskonto oranı %9,1 olarak alınmıştır. Microsoft Excel programı ile yapılan hesaplamalar sonucu oluşturulan Tablo 5.10'dan yararlanılarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

$$NBD = \left\{ \sum_{i=1}^{10} \left( \frac{Bürüt\ Kar_i}{(1 + \%9,1)^i} \right) \right\} + (-)İlk\ Yatırım\ Maliyeti$$

Net Bugünkü Değer (NBD) = **152.087.243 USD**

İç Verim Oranı (IRR) Yıllık = **%88,07**

Geri Ödeme Süresi = **2 Yıl**

Boru hatları güvenliğinde DAS teknolojisinin geleneksel güvenlik sistemlerine entegrasyonu ile oluşan maddi durum hakkında yaptığımız ekonomik analiz sonucunda geri ödeme süresi 2 yıl gibi çok kısa bir süre çıkmıştır. Net Bugünkü Değer hesaplamasında 10 yıllık dönem değerlendirilmiş ve ilk yatırım maliyetinin yaklaşık 6 katı oranında maddi karşılığa ulaşılmıştır. İç Verim Oranı **%88,07** gibi çok yüksek bir oran çıkmıştır. Bu oranlar değerlendirildiğinde projenin yatırıma dönüştürülmesi ve uygulanabilirliği çok yüksek oranlarda olduğu hesaplanmıştır.

Tablo 5.10 Ekonomik Analizler

Tasarruflar (+)	1.Yıl (USD)	2.Yıl (USD)	3.Yıl (USD)	4.Yıl (USD)	5.Yıl (USD)	6.Yıl (USD)	7.Yıl (USD)	8.Yıl (USD)	9.Yıl (USD)	10.Yıl (USD)	
<b>Kazı Hasarlarından Tasarruf</b>	507.227	553.384	603.742	658.683	718.623	784.018	855.363	933.201	1.018.122	1.110.772	
<b>Yakıttan Tasarruf</b>	1.411.992	1.539.071	1.677.588	1.828.571	1.993.142	2.172.525	2.368.052	2.581.177	2.813.483	3.066.696	
<b>Personel Giderlerinden Tasarruf</b>	9.130.968	9.952.755	10.848.503	11.824.868	12.889.107	14.049.126	15.313.547	16.691.767	18.194.026	19.831.488	
<b>Enerjiden Tasarruf</b>	8.470	9.232	10.063	10.969	11.956	13.032	14.205	15.483	16.877	18.396	
<b>Bakım Giderlerinden Tasarruf</b>	79.489	86.643	94.441	102.941	112.205	122.304	133.311	145.309	158.387	172.642	
<b>Karakol Sayısından Tasarruf</b>	500.000	545.000	594.050	647.515	705.791	769.312	838.550	914.020	996.281	1.085.947	
<b>Araç Sayısından Tasarruf</b>	16.833.000	18.347.970	19.999.287	21.799.223	23.761.153	25.899.657	28.230.626	30.771.383	33.540.807	36.559.480	
<b>Teçhizat Sayısından Tasarruf</b>	360.950	393.436	428.845	467.441	509.510	555.366	605.349	659.831	719.215	783.945	
<b>Toplam</b>	<b>28.832.096</b>	<b>31.427.491</b>	<b>34.256.519</b>	<b>37.340.209</b>	<b>40.701.487</b>	<b>44.365.339</b>	<b>48.359.004</b>	<b>52.712.170</b>	<b>57.457.198</b>	<b>62.629.364</b>	
<b>İşletme Giderleri Toplam (-)</b>	9.506.656	10.362.255	11.294.858	12.311.395	13.419.421	14.627.169	15.943.614	17.378.539	18.942.608	20.647.442	
<b>Yakıt Maliyeti</b>	865.008	942.859	1.027.716	1.120.210	1.221.029	1.330.922	1.450.705	1.581.268	1.723.583	1.878.705	
<b>İşgücü Maliyeti</b>	8.538.048	9.306.472	10.144.055	11.057.020	12.052.152	13.136.845	14.319.161	15.607.886	17.012.595	18.543.729	
<b>Enerji Giderleri</b>	20.328	22.158	24.152	26.325	28.695	31.277	34.092	37.160	40.505	44.150	
<b>Bakım Giderleri</b>	83.272	90.766	98.935	107.840	117.545	128.124	139.655	152.224	165.925	180.858	
<b>Brüt Kar</b>	<b>19.325.440</b>	<b>21.065.236</b>	<b>22.961.661</b>	<b>25.028.814</b>	<b>27.282.066</b>	<b>29.738.171</b>	<b>32.415.390</b>	<b>35.333.631</b>	<b>38.514.591</b>	<b>41.981.922</b>	
<b>Dönem (Yıl)</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Yatırımın Net Nakit Tutarı</b>	<b>-24.338.150</b>	<b>19.325.440</b>	<b>21.065.236</b>	<b>22.961.661</b>	<b>25.028.814</b>	<b>27.282.066</b>	<b>29.738.171</b>	<b>32.415.390</b>	<b>35.333.631</b>	<b>38.514.591</b>	<b>41.981.922</b>
<b>1.Adım: Bugünkü Değer Hesabı</b>	<b>-24.338.150</b>	<b>17.713.510</b>	<b>17.697.700</b>	<b>17.681.905</b>	<b>17.666.124</b>	<b>17.650.357</b>	<b>17.634.605</b>	<b>17.618.868</b>	<b>17.603.145</b>	<b>17.587.436</b>	<b>17.571.742</b>
<b>2.Adım: Kümülatif Toplam</b>	<b>-24.338.150</b>	<b>-6.624.640</b>	<b>11.073.060</b>	<b>28.754.965</b>	<b>46.421.089</b>	<b>64.071.447</b>	<b>81.706.052</b>	<b>99.324.920</b>	<b>116.928.065</b>	<b>134.515.501</b>	<b>152.087.243</b>
<b>Net Bugünkü Değer</b>	<b>152.087.243</b>	<b>USD</b>									
<b>İç Verim Oranı</b>	<b>%88,07</b>	<b>10 YILLIK</b>									
<b>Geri Ödeme Süresi</b>	<b>2</b>	<b>YIL</b>									



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, DAS teknolojisinin genel kullanım alanları araştırılmış, sistemin teknik altyapısı hakkında bilgiler sunulmuştur. Türkiye'nin boru hatları açısından mevcut durumu ve geleceği değerlendirilerek, boru hatları güvenliğinde DAS entegrasyonunun sağlayacağı teknik ve ekonomik faydalara vurgu yapılmıştır. Ülkemizde güvenliğinin büyük oranda geleneksel yöntemlerle sağlandığı doğalgaz ve petrol boru hattının 2379 km'lik kısmı için DAS entegrasyonu yapılan yeni bir projenin yatırım değerlendirilmesi için bazı ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu ekonomik analiz sonuçları:

Boru hatları güvenliğinde DAS entegrasyonun geleneksel yöntemlere göre ilk yatırım maliyetinde **%25,1** işletme ve bakım maliyetlerinde **%52,8** tasarruf sağladığını ortaya koymaktadır. Elde edilen bilgiler ve yapılan öngörüler ışığında ilk yatırım maliyeti **24.338.150 USD** olarak belirlenen projenin 10 yıllık süreç için yapılan yatırım değerlendirme parametreleri yatırımın uygulanabilirliğinin çok yüksek oranlarda olduğunu göstermektedir.

Petrol ve Doğal Gaz İletim Hatlarında meydana gelecek en ufak bir olayda, olayın yaşandığı alana itfaiye, ambulans, güvenlik görevlisi ve jandarma/polis gönderilmesi, sıvı akışının kesilmesi, limanda gemilerin bekletilmesi, boru hattı sigorta maliyetlerinin artması, çevreye sızıntı varsa, araziden yaklaşık 10 yıl süreyle ürün alınamaması, toprak taşıma işlemleri yapılması gibi birçok olumsuz ve masraflı sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Petrol hatlarında akışı kesmek kısmen kolay olmasına karşın yüksek basınçlı gaz boru hatlarında akışın kesilmesi faktörü çok zorlayıcı bir durumdur. Yüksek basınçlı Doğal Gaz iletim hattında akışın kesilmesi sonucu tekrar hatta gaz akışı sağlanması yaklaşık üç hafta sürmektedir. Bu olumsuzlukların maddi boyutu milyon dolarla ifade edilmektedir.

DAS'ın bilimsel çalışma prensiplerinin ve boru hatları güvenliğinde kullanılmasının mevcut yöntemlere göre sağlayacağı faydalar dikkate değerdir. Ülkemizde yapılması planlanan doğal gaz ve petrol boru hatlarının gerek deniz gerek kara alanlarında DAS teknolojisinden faydalanılması ekonomik ve güvenlik açısından birçok fayda sağlayacaktır.

Ülkelerin enerjiye olan zorunlu ihtiyacı göz önünde bulundurulduğunda DAS teknolojisi gibi ekonomik ve üstün güvenlik imkânı sağlayan sistemlere olan ihtiyaç giderek artacaktır.

Ülkemizde son yıllarda Doğal Gaz arama çalışmaları artmış ve Sakarya Gaz Sahasında yaklaşık 540 milyar metreküp doğal gaz keşfedilmiştir. Keşfedilen doğal gaz yaklaşık 150 kilometre deniz tabanından boru hattı ile karaya ulaştırılacaktır. DAS sistemindeki çalışmalar incelendiğinde sistemin deniz tabanında da verimli bir şekilde kullanılabilirdiği görülmüştür. DAS sistemi için fiber hat, boru hattına çekilerek, hattın güvenliği en üst düzeyde sağlanmalıdır. DAS sistemlerinin kullanım alanlarının genişletilmesi ile sağlanacak olan ekonomik ve çevresel fayda yanında, saniyeler içinde boru hatlarında meydana gelen deformasyonlar ve üçüncü şahıs zararları tespit edilerek güvenlik sistemlerinin işlevsel ve yapısal performansı iyileştirilecek ve ülke çapında kullanımının yaygınlaştırılmasında önemli katkılarda bulunacaktır.

Türkiye, enerji ile ilgili tüm tarafların sektörün görünürlüğünü ve kritik enerji altyapı güvenliğini artırmak için tedbirlerini planlamalıdır. Bu sayede, kurumsal bir hafıza oluşturulup uzmanlık alanları belirlenebilir. Bu amaçlar doğrultusunda Türkiye kritik bir enerji merkezi olarak enerji sektöründeki konumunu geliştirmeli ve enerji altyapı güvenliği konusunda dünyanın diğer enerji arz bölgelerine rol model olarak hizmet vermelidir.

Dağıtık Akustik Algılama (DAS) teknolojisi hiç şüphesiz yakın gelecekte ulaştırma sistemlerinin (kara, deniz, hava, boru hatları) tümünde, deprem tespit çalışmalarında, ormanlarda, vahşi yaşam koruma alanlarında, sınır hatlarında, köprülerde titreşim ve akustik emisyon izleme, rüzgâr türbini kanatları gibi kompozit yapılarda çatlak izleme, tünellerdeki yüzer demiryolu ray yataklarını ölçme vb. birçok yeni alanda etkili bir şekilde kullanılacaktır. Demiryolu, köprü, tünel gibi ulaşım yapılarında zamana bağlı Yapısal Sağlık İzleme (SHM) adı verilen ölçümler yapılabilecektir. Ayrıca sismolojide kullanılmak üzere boru hatlarına çekilen fiber hatlardan yararlanılabilir. Fiber hatlardan alınan veriler Deprem Araştırma Enstitüsünde değerlendirmeler sonucunda depremin başlangıç konumu, şiddeti, depremin yönü ve olası gelecek depremlerin tahmininin yapılması ve birkaç saniye öncesinde toplumların uyarılması gibi faydalar sağlayacaktır. İnsan vücudundaki sinir ağları ve duyu organlarına benzettiğimiz bu sistem, günümüzde daha çok güvenlik alanında kullanılması planlanmaktadır. Henüz gelişmekte olan bu sistemin kamusal ve özel alanlarda uygulamaları için yatırımlar artırılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Akın, H. (2015). Türkiye’de Enerji Boru Hattı Taşımacılığında Güvenlik. Yüksek Lisans Tezi, Polis Akademisi, Güvenlik Bilimleri Enstitüsü, Ulaşım Güvenliği ve Yönetimi Anabilim Dalı, Ankara, s. 77-78.
- Alkin, K., Atman, S. (2006). Küresel Petrol Stratejilerinin Jeopolitik Açından Dünya ve Türkiye Üzerindeki Etkileri, İstanbul Ticaret Odası Yayını, İstanbul, 47 s.
- Alsancak, H. (2010). The Role of Turkey in Global Energy, Journal of Energy Security, May 2010 Issue, [http://www.ensec.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=247:the-role-of-turkey-in-the-global-energy-bolstering-energy-infrastructure-222-security&catid=106:energysecuritycontent0510&Itemid=361](http://www.ensec.org/index.php?option=com_content&view=article&id=247:the-role-of-turkey-in-the-global-energy-bolstering-energy-infrastructure-222-security&catid=106:energysecuritycontent0510&Itemid=361) (11.02.2022)
- Apak M.Y., Ozen H., Calis M., Gogeli B., Ataoglu S. (2022). Applications of utility tunnels for natural gas pipelines, Tunn. Undergr. Sp. Technol. İstanbul, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104243>.
- Askeri Yasak Bölgeler ve Güvenlik Bölgeleri Yönetmeliği. (1983). Yönetmelik No. 1553, Resmi Gazete 18033, 30 Nisan 1983, <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/21.5.835949.pdf> (03.07.2022)
- Askeri Yasak Bölgeler ve Güvenlik Bölgeleri Kanunu. (1981). Kanun No. 2565. Resmî Gazete 17552, 22 Aralık 1981, <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=2565&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5>, (07.05.2022)
- Aydemir H. (2016) Türkiye’de Boru Hattı Ulaştırması: Genel Durumu, Uluslararası Karşılaştırmalar ve Hedef ile Politikalara Yönelik Öneriler, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi, s. 400-406.
- Bazı Kurum ve Kuruluşların Korunması ve Güvenliklerinin Sağlanması Hakkında Kanun. (1981). Kanun No. 2495, Resmî Gazete 17410, 24 Temmuz 1981, <https://teftis.ktb.gov.tr/yazdir?A9482ECA11E23023EECDFA0B63FB295D>, (03.07.2022)
- Berlin Pipeline Technology Conference. (2020). Fotech Solution, Integrated Solution of DAS with UAVs for Pipeline Protection, *Pipeline Technology Conference*, Berlin, pp 3-8. <https://www.fotech.com/media/1505/fotech-technical-paper-das-uav-integration-lr-2.pdf>, (24.06.2022)
- Birol, S. (2019). Boru Hatları Özelinde Avrupa Birliği Kritik Enerji Altyapı Güvenliği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2019, 45 s.
- BP (2020) Statistical Review of World Energy, *BP p.l.c., 1 St James’s Square Report*, London, SW1Y 4PD, UK, pp 10. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>

- BTK (2010). Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu, *Kritik Altyapuların Korunması Raporu*, Bilgi Teknolojileri ve Koordinasyon Dairesi Başkanlığı, s. 3-4, <https://docplayer.biz.tr/18166085-Kritik-altyapularin-korunmasi.html> (13.02.2022).
- BTK (2019) Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurulu, *2019-2023 Stratejik Planı Raporu*, GMK Bulvarı Demirtepe / ANKARA, 2019, s. 73-89, <https://www.btk.gov.tr/uploads/pages/yayinlar-stratejik-planlar/bilgi-teknolojileri-ve-iletisim-kurumu-2019-2023-stratejik-planl-published-revised-at-27-05-19.pdf>, (15.02.2022).
- Critical Infrastructure Protection. (2004). Communication from the Commission to the Council and the European Parliament, [http://europa.eu/legislation\\_summaries/justice\\_freedom\\_security/fight\\_against\\_terrorism/133259\\_en.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/justice_freedom_security/fight_against_terrorism/133259_en.htm) (03.07.2022)
- Çal S. (2008). Bakü-Tiflis-Ceyhan Boru Hattı Projesi Kapsamındaki Anlaşmaların Hukuki Yönden Değerlendirilmesi, Ankara Üniversitesi SBF Dergisi, Cilt 63, Sayı 04, s. 89-134.
- Çakır H., ve Babacan, H.K. (2011). Hareketi Algılayan Kamera Destekli Güvenlik Programı, Bilişim Teknolojileri Dergisi, Cilt 4, Sayı 2, Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, s. 19-24.
- Daley, T.M., Freifeld, B.M., Ajo-Franklin, J., Dou, S., Pevzner, R., Shulakova, V., Kashikar, S., Miller, D.E., Goetz, J., Henninges, J., Lueth, S. (2013). Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring. *The Leading Edge* 32: 699-706 <https://doi.org/10.1190/tle32060699.1>
- Doğal Gaz Teknolojisi Cihaz ve Sistemleri Dergisi. (2016). Tanap Boru Hattı İçin Honeywell Kontrol ve Emniyet Sistemi, B2B Medya / Teknik Sektör Yayıncılık, Kadıköy / İstanbul, sayı 199, 27 s. [https://www.dogalgaz.com.tr/yayin/236/tanap-boru-hatti-icin-honeywell-kontrol-ve-emniyet-sistemi-secildi\\_7391.html#.YUeECVUzaUk](https://www.dogalgaz.com.tr/yayin/236/tanap-boru-hatti-icin-honeywell-kontrol-ve-emniyet-sistemi-secildi_7391.html#.YUeECVUzaUk), (05.05.2022)
- Dou, S., Lindsey, N., Wagner, A.M., Daley, T.M., Freifeld, B., Robertson, M., Peterson, J., Ulrich, C., Martin, E.R., ve Ajo-Franklin, F.B. (2017). Distributed acoustic sensing for seismic monitoring of the near surface: A traffic-noise interferometry case study, *Scientific reports journal*, 7 (11620): 1-10
- Duckworth, G.L., ve Ku, E.M. (2013). Distributed Acoustic and Seismic Sensing Using COTS fiber optic cables for Infrastructure Protection and Counter Terrorism OptaSense, Inc. 27 Moulton St., Cambridge, MA, USA, 8711 (87110): 1-14.
- European Programme for Critical Infrastructure Protection. (2004). EPCİP, Communication from the Commission of 12 December 2006 on a European Programme, Critical Infrastructure Protection, Official Journal C 126, 7.6.2007, [http://europa.eu/legislation\\_summaries/justice\\_freedom\\_security/fight\\_against\\_terrorism/133260\\_en.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/justice_freedom_security/fight_against_terrorism/133260_en.htm), (05.02.2013).

- Frings, J., Walk, T. (2011). Distributed Fiber Optic Sensing Enhances Pipeline Safety and Security, OGEM, Oil, Gas (Hamburg); Journal Volume: 37; Journal Issue: 3, March 2011, pp. 132-136.
- Gajjar, Y. (2020). Geo Augmented Visualisation for improving safe operations of Natural Gas Pipeline Network, Pipeline Technology Journal 4/2020, pp. 52-55.
- GAZBİR 2020 Yılı Doğal Gaz Dağıtım Sektörü Raporu. (2020) Türkiye Doğal Gaz Dağıtıcıları Birliği, Çankaya / ANKARA s. 5-6, [https://www.gazbir.org.tr/uploads/page/2020\\_Yili\\_Dogal\\_Gaz\\_Sektoor\\_Raporu.pdf](https://www.gazbir.org.tr/uploads/page/2020_Yili_Dogal_Gaz_Sektoor_Raporu.pdf) (08.05.2022)
- Giroux, J. (2009). Targeting Energy Infrastructure: Examining the Threat in North Africa and Broader Implications (ARI). Real Instituto Elcano, The Elcano Royal Institute, RN Researcher in Terrorism and Political Violence at the Center for Security Studies (CSS), ETH, Zurich, Germany, pp. 1-10.
- Grattan, K.T.V. and Meggitt. B.T. (2000) Optical Fibre Sensor Technology: Advanced Applications- Bragg Gratings and Distributed Sensors, Kluwer Academic Publishers, City University, Boston / Dordrecht/ London, pp. 40-61.
- İşeri, E. (2015). Addressing Pipeline Security Regime of The Prospective Regional Energy Hub Turkey, Security Journal, 1(28), pp.1-15.
- Japan Information Security Policy Council. (2005). Action Plan on Information Security Measures for Critical Infrastructures, Decision by the Information Security Policy Council, December 13, 2005, Tokyo / Japan, p. 2, [http://www.nisc.go.jp/eng/pdf/actionplan\\_ci\\_eng.pdf](http://www.nisc.go.jp/eng/pdf/actionplan_ci_eng.pdf), (22.06.2022).
- Karabacak, B. (2011). Karabacak, B. (2011). Kritik altyapılara yönelik siber tehditler ve Türkiye için siber güvenlik önerileri, Siber Güvenlik Çalıştayı, Bilgi Güvenliği Derneği, Ankara, 29, s. 1-11.
- Keçeci F., O. (2013). Türkiye’de Kritik Enerji Altyapı Güvenliği: Bakü-Tiflis-Ceyhan Ham Petrol Boru Hattı Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Uluslararası İlişkiler Bölümü Anabilim Dalı, Bolu, s. 100-127.
- Kimbell, J.F. (2013). History And Analysis Of Distributed Acoustic Sensing (Das) For Oilfield Applications, Master Of Science, Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University, Texas, pp. 2-5.
- Lindsey N. J. (2019). Fiber-optic Seismology in Theory and Practice, A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Earth and Planetary Sciences in the Graduate Division, University of California, Berkeley, pp. 5-150
- Lindsey N. J., Martin, E. R., Dreger, D. S., Freifeld, B., Cole, S., James, S. R., Biondi, B.L., ve Ajo-Franklin, J. B. (2017). Fiber-optic network observations of earthquake wavefields. Geophysical Research Letters, 44 (23): 11792–11799.

<https://doi.org/10.1002/2017GL075722>

- Mestayer, J., Cox, B., Wills, P., Kiyashchenko, D., Lopez, J., Costello, M., Bourne, S., Ugueto, G., Lupton, R., Solano, G., Hill, D., and Lewis, A. (2011). Field Trials of Distributed Acoustic Sensing for Geophysical Monitoring, SEG Expanded Abstracts Vol. presented at the Soc. of Exploration Geophysicists Annual Meeting, San Antonio, Texas, (30): 4253 – 4257
- Molenaar, M.M., Fidan, E., Hill, D.J. (2012). Real-Time Downhole Monitoring of Hydraulic Fracturing Treatments Using Fiber Optic Distributed Temperature and Acoustic Sensing, Society of Petroleum Engineers, Paper SPE 152981, presented at the 2012 SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference and Exhibition, Vienna / Austria, pp. 1-13
- Özel Güvenlik Hizmetlerine Dair Kanun (2004). (Kanun No. 5188). Resmî Gazete 25504, 10 Haziran 2004, <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.5188.pdf> (03.07.2022)
- Özil, E. (2004). Dünyadaki Stratejik Enerji Kaynakları ve Ulaşım Yolları, Dünya ve Türkiye'deki Enerji ve Su Kaynaklarının, Ulusal ve Uluslararası Güvenliğe Etkileri 15-16 Ocak 2004: Bildiriler, Soru-Cevaplar, Katkılar ve Konuşma Metinleri, Harp Akademileri Komutanlığı Yayınları İstanbul, 2004, s. 41-91.
- Pamir, N. (2007). Küresel Enerji Politikaları ve Türkiye IV. Enerji Sempozyumu, Küresel Enerji Politikaları ve Türkiye Gerçeği, Ankara, s. 16-83
- Parker, T., Shatalin, S., Farhadiroushan, M. (2014). Distributed Acoustic Sensing-a new tool for seismic applications. First Break Journal, 32 (2): 61-69. DOI: <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2013034>.
- Petrolün Boru Hatları ile Transit Geçişine Dair Kanun. (2000). Kanun No. 4586, Resmî Gazete 24094, 29 Haziran 2000, <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.4586.pdf> (03.07.2022)
- Petrol ve Doğal Gaz Sektör Raporu (2020). Türkiye Petrolleri A.O. 2020 yılı Petrol ve Doğal Gaz Sektör Raporu, Türkiye Petrolleri Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı ve Hazine ve Maliye Bakanlığı, T.C. Resmi Gazete, 16 Aralık 2020. <https://www.tpao.gov.tr/file/2106/2020-petrol-ve-dogal-gaz-sektor-raporu-47460b743c70c609.pdf>
- Pipeline Security Guidelines. (2018). U.S. Department of Homeland Security, Transportation Security Administration (TSA), pp. 26-30, [https://www.tsa.gov/sites/default/files/pipeline\\_security\\_guidelines.pdf](https://www.tsa.gov/sites/default/files/pipeline_security_guidelines.pdf), (24.05.2022)
- PHMSA. 2022, U.S. Department of Transportation, Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, 1200 New Jersey Avenue, SE, Washington, DC 20590 United States, <https://www.phmsa.dot.gov/data-and-statistics/pipeline/data-and-statistics-overview>, (01.08.2022)

- Posey, R., Johnson, G.A., ve Vohra S.T. (2000). Strain sensing based on coherent Rayleigh scattering in an optical fibre, Copyright The Institution of Engineering & Technology Sep, Electronics Letters, 36(20): 1688-1689.
- Ralbovsky, F. (2004). Feasibility of Underground Pneumatic Freight Transport in New York City. Final Report, NYSERDA, Agreement No. 7643, 2004.
- Sahinoglu, E., Demircin, U., Altan, O., Gevrekci, M., Machine Learning Approach to Distributed Acoustic Sensors (DAS) for Securing Pipelines in Urban Areas, 4th Special Edition for the ptc- Pipeline Technology Conference, Pipeline Technology Journal 4/2020, pp. 38-39
- Sayıştay Başkanlığı. (2013). Boru Hatları ile Petrol Taşıma Anonim Şirketi 2013 Yılı Denetim Raporu, Ankara, s. 5-77
- Savunma Sanayii Müsteşarlığı, (2014), Petrol ve Doğal Gaz Boru Hatlarının Güvenliği Projesi Bilgi İstek Dökümanı, Ankara.
- Tanimola, F. ve Hill, D. (2009). Distributed Fiber Optic Sensors for Pipeline Protection, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 1(4): 134-143.
- T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı. (2016). Türkiye Ulaşım ve İletişim Stratejisi Raporu, Hedef 2023, [http://www.sp.gov.tr/upload/xSPTemelBelge/files/93C5Y+Turkiye\\_Ulasim\\_velle\\_tisim\\_Stratejisi.pdf](http://www.sp.gov.tr/upload/xSPTemelBelge/files/93C5Y+Turkiye_Ulasim_velle_tisim_Stratejisi.pdf), 125 s. (21.03.2021).
- T.C. Resmî Gazete (2021). Karar No. 4371, Resmî Gazete 31567, 13 Ağustos 2021, s. 31-32, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/08/20210813.pdf> (18.07.2022).
- The European Programme for Critical Infrastructure Protection (EPCIP). (2006). The European Commission, Brussels / Belgium, p. 123, [http://europa.eu/rapid/press-release\\_MEMO-06-477\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-06-477_en.htm), (05.06.2022).
- Toft, P., Duero, A. and Bieliakuskas, A. (2010). Terrorist Targeting and Energy Security, *Energy Policy*, 38(8): 441-4421.
- TUIK Su ve Atıksu İstatistikleri. (2020). Türkiye İstatistik Kurumu Verileri, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Su-ve-Atıksu-Istatistikleri-2020-37197>
- USAK C.1. (2011). Kritik Enerji Altyapı Güvenliği Projesi Sonuç Raporu C.1: Türkiye’de Kritik Enerji Altyapı Güvenliği: Mevcut Durum, Sorunlar ve Öneriler, Uluslararası Stratejik Araştırmalar Kurumu, *Enerji Güvenliği Araştırmalar Merkezi (EGAM)*, s. 11-12.
- USAK C.3. (2011). Kritik Enerji Altyapı Güvenliği Projesi Sonuç Raporu C.3: Kritik Enerji Altyapısı ve Güvenliği, Uluslararası Stratejik Araştırmalar Kurumu, *Enerji Güvenliği Araştırmalar Merkezi (EGAM)*, s. 20-21.

- U.S. BUREAU OF LABOR STATISTICS. (2022). Division of Consumer Prices and Price Indexes, Suite 3130, 2 Massachusetts Avenue NE, Washington, DC 20212-0001, <https://www.bls.gov/cpi/>, (01.08.2022)
- Wang, C., Olson, M., Sherman, B., Dorjkhand, N., Mehr, J., ve Senstar S.S. (2018) Reliable leak detection in pipelines using integrated DdTS temperature and DAS acoustic fiber-optic sensor, 24 December 2018 International Carnahan Conference, Security Technology (ICST), Montreal / Canada / USA. pp. 1-8.
- Warren, M., Lisoway, B., Banks, K. (2012). Fiber Optic Distributed Acoustic Sensing of Multiple Fractures in a Horizontal Well, *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*, 2012 SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, The Woodlands, TX, 6-8 February, p. 4.
- World Economic Forum. (2008). A World Economic Forum Report in collaboration with Citigroup, Marsh ve McLennan Companies (MMC), Swiss Re, Wharton School Risk Center, Zurich Financial Services, p. 17, [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Global\\_Risks\\_Report\\_2008.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2008.pdf), (03.07.2022)
- Wu, H., Wang, Z., Peng, F., Peng, Z., Li, X., Wu, Y., ve Rao, Y. (2014). Field test of a fully-distributed fiber-optic intrusion detection system for long-distance security monitoring of national borderline, Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications (Ministry of Education), University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, P. R. China, 9157: 1-4
- Zinsou, R., Liu, X., Wang, Y., Zhang, J., Wang, Y., Jin, B. (2019). Recent Progress in the Performance Enhancement of Phase-Sensitive OTDR Vibration Sensing Systems, *Sensors Journal*, İsviçre, 19(7): 1709, doi:10.3390/s19071709
11. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Şûrası. (2013). Boru Hatları Çalışma Grubu Raporu, T.C. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Ankara, s. 1-58.
- URL-1 (2022). BOTAŞ Türkiye Doğal Gaz ve Petrol Boru Hatları Haritası, <https://www.botas.gov.tr/Sayfa/dogal-gaz-ve-petrol-boru-hatlari-haritasi/168>, (19.05.2022)
- URL-2 (2016). Inventec b.v. Dağıtık Akustik Algılama, <https://www.inventec.nl/nl-nl/werkvelden/security.aspx>, (15.02.2022)
- URL-3 (2018). [http://www.dogalgaz.com.tr/yayin/323/boru-hatlari-ihalar-ile-korunacak\\_24402.html#.YTUwqLAzaUk](http://www.dogalgaz.com.tr/yayin/323/boru-hatlari-ihalar-ile-korunacak_24402.html#.YTUwqLAzaUk), (05.05.2022)
- URL-4 (2020). *ASELSAN MIDAS İhlal Tespit Sistemi*, [https://www.aselsan.com.tr/MIDAS2TR\\_6782.pdf](https://www.aselsan.com.tr/MIDAS2TR_6782.pdf), (15.02.2022)
- URL-5 (2019). <https://www.doruksafe.com/zirhli-kubule.html>, (11.06.2022)
- URL-6 (2018). <https://www.botas.gov.tr/Icerik/boru-hatlarimiz-yerli-guvenlik/44>, (11.06.2022)



- URL-7 (2022). <https://www.iski.istanbul/web/tr-TR/kurumsal>, (24.05.2022)
- URL-8 (2021). <https://teknoloji.org/hyperloop-nedir-ulasimda-devrim-yaratacak-teknoloji/>,(24.05.2022)
- URL-9 (2009). Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, [http://www.enerji.gov.tr/yayinlar\\_raporlar/Arz\\_Guvenligi\\_Strateji\\_Belgesi.pdf](http://www.enerji.gov.tr/yayinlar_raporlar/Arz_Guvenligi_Strateji_Belgesi.pdf), (11.05.2022)
- URL-10 (2018). <https://new.abb.com/news/detail/7356/abb-kontrol-ve-guvenlik-sistemi-tanap-dogalgaz-akisinin-yonetilmesi-ve-korunmasini-sagliyor>, (05.05.2022)
- URL-11 (2021). <https://www.tanap.com/tanap-projesi>, (05.06.2022)
- URL-12 (2022). <https://galeri.uludagsozluk.com/r/ingiltere-yerine-t%C3%BCrkiye-yi-ab-ye-alal%C4%B1m-2113628/>, (28.05.2022)
- URL-13 (2022). Bandweaver fiber optic monitoring sensors and integrated technologies, <https://www.youtube.com/channel/UCNoLYgy-xBmHTovPjx5K3MQ/videos>, (06.07.2022).

