

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



DOĞALGAZ VE PETROL BORU HATLARINDAKİ KAYNAKLI
BAĞLANTILARIN RADYOGRAFİK KONTROLLERİNDE DİJİTAL
RADYOGRAFİ İLE KLASİK YÖNTEMLERİN KIYASLANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İZZET CİHAN AKAT

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. GÜRCAN YILDIRIM

BOLU, OCAK - 2023

KABUL VE ONAY SAYFASI

İzzet Cihan AKAT tarafından hazırlanan “Doğalgaz ve Petrol Boru Hatlarındaki Kaynaklı Bağlantıların Radyografik Kontrollerinde Dijital Radyografi ile Klasik Yöntemlerin Kıyaslanması” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliğiyle kabul edilmiştir. 3/01/2023

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Prof. Dr. Gürcan YILDIRIM
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Başkan
Prof. Dr. Yahya ALTUNPAK
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye
Doç. Dr. Ömer Kadir MORGÜL
Sakarya Üniversitesi

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir,

aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin 23/01/2023 tarihinde Turnitin adlı intihal tespit programından enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı % 14 olarak tespit edilmiştir.

.....
İZZET CİHAN AKAT

ÖZET

**DOĞALGAZ VE PETROL BORU HATLARINDAKİ KAYNAKLI
BAĞLANTILARIN RADYOGRAFİK KONTROLLERİNDE DİJİTAL
RADYOGRAFI İLE KLASİK YÖNTEMLERİN KIYASLANMASI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İZZET CİHAN AKAT
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. GÜRCAN YILDIRIM)**

BOLU, OCAK - 2023

XV + 89

Ülkemiz jeolojik konum olarak hidrokarbon zengini ülkelere komşu olup enerji hatlarının geçiş koridorunda bulunmaktadır. Ulusal ve uluslararası birçok boru hattını barındırmakta ve yenilerinin çalışmaları devam etmektedir. Bu konuda edindiği tecrübe ve bilgi birikimini bir üst noktaya taşımak için yeni teknolojileri yakından takip etmekte ve uygulamalarını gerçekleştirmektedir. Dijital radyografi yöntemi de ülkemizde boru hatlarında yeni uygulanan bir radyografi yöntemidir. 1900’lü yıllardan beri uygulanmaya devam eden klasik radyografi (Gama ve X-Ray) yöntemlerine alternatif olarak kullanılabilmesi hususunda ön çalışmaları yapılmış sistemlerin değerlendirmesine bu çalışmada yer verilmiştir. Radyografideki dijitalleşme adımlarını inceleyerek uygulanan gerçek zamanlı dijital radyografinin altyapısı hakkında bilgi verilmiştir.

Bu tezde, dijital radyografi yönteminin, klasik radyografi yöntemlerine olan üstünlükleri ve zayıflıkları incelenmiş, teknik detaylarıyla birlikte sunulmuştur. Saha şartlarında uygulanabilirliği, elde edilen görüntü kalitesi ve maliyet açısından karşılaştırmaları yapılmıştır. DR yönteminin kendi içerisinde farklı tasarımlarının sahadaki uygulamalara olan etkileri hakkında bilgi verilmiştir. Gerçek zamanlı film değerlendirmenin, eski radyografi yöntemlerine göre hız kazandırıyor olmasının proje takvimi üzerindeki etkilerinden bahsedilmiştir.

Sonuç olarak dijital radyografi yönteminin görüntü kabiliyetinin yüksek olması ve bilgisayar ortamında filtreleme yaparak görünürlüğü arttırmasıyla birlikte kaynak hatalarını yakalamadaki kabiliyetinin çok yüksek olması, anında erişim sağlamaya imkan vermesi, diğer yöntemlerdeki sarf malzemelerini ve proje sonrası depolama maliyetlerini ortadan kaldırması, daha küçük bir ekiple operasyonun gerçekleştirilebilmesi, hızlı ve güvenilir bir yöntem olması ve belirtilmiş olan maliyeti düşürücü sebeplerle birlikte saha uygulamalarında tercih edilmesi önerilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Doğalgaz ve petrol boru hattı, Dijital radyografi, X-ray, Gama, Kaynak

ABSTRACT

COMPARISON OF DIGITAL RADIOGRAPHY AND CLASSIC METHODS FOR RADIOGRAPHIC CONTROL OF WELDED CONNECTIONS IN NATURAL GAS AND OIL PIPELINES

MSC THESIS

İZZET CİHAN AKAT

BOLU ABANT İZZET BAYSAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. GÜRCAN YILDIRIM)

BOLU, JANUARY 2023

XV + 89

Our country is adjacent to hydrocarbon-rich countries in terms of geological location and is located in the transition corridor of energy lines. It houses many national and international pipelines and the works of new ones are continuing. In order to carry the experience and knowledge gained in this field to the next level, it closely follows new technologies and implements their applications. The digital radiography method is also a newly applied radiography method in pipelines in our country. In this study, the evaluation of the systems whose preliminary studies have been carried out in order to be used as an alternative to the classical radiography (Gamma and X-Ray) methods that have been applied since the 1900s is included. By examining the digitalization steps in radiography, information was given about the infrastructure of real-time digital radiography applied.

In this thesis, the advantages and weaknesses of the digital radiography method to the classical radiography methods are examined and presented with technical details. Comparisons were made in terms of applicability under field conditions, image quality obtained and cost. Information has been given about the effects of the different designs of the DR method on the applications in the field. The effects of real-time film evaluation on the project schedule have been mentioned as it increases speed compared to the old radiography methods.

As a result, digital radiography and the method of filtering of the image in a computer environment to increase visibility by doing a high capability in conjunction with the ability to capture errors in the source is very high, allowing you to gain instant access supplies and in other methods of post-project storage costs, eliminate a smaller team carried out the operation to be fast and reliable method to be specified and lowering the cost to be preferred applications in the field of causes have been proposed.

KEYWORDS: Gas and oil pipeline, Digital radiography, X-ray, Gamma source, Welding

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
ETİK BEYAN.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
TABLO LİSTESİ	xi
FOTOĞRAF LİSTESİ	xii
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xiii
TEŞEKKÜR	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1 Dünya'daki Mevcut Doğalgaz ve Petrol Boru Hatları	3
2.2 Türkiye'nin Mevcut Doğalgaz ve Petrol Boru Hatları	5
3. DOĞALGAZ VE PETROL BORULARI KAYNAK YÖNTEMLERİ.10	
3.1 Manuel Kaynak.....	11
3.1.1 Elektrik Ark Kaynağı.....	11
3.1.2 Gaz Altı Kaynağı	16
3.2 Otomatik Kaynak.....	22
4. DOĞALGAZ VE PETROL BORULARI KAYNAK UYGULAMASI.24	
4.1 Kaynağa Hazırlık	24
4.2 Çevre Şartlarının Kontrolü	24
4.3 Kaynak Ağzını Hazırlama	24
4.4 Boruları Ağzılama	25
4.4.1 İç Kelepçe	26
4.4.2 Dış Kelepçe.....	27
4.5 Isıl İşlem	28
4.6 Kaynak Pasoları	29
4.6.1 Kök Paso.....	29
4.6.2 Sıcak Paso.....	29
4.6.3 Dolgu Paso.....	29
4.6.4 Kapak Paso	30
4.7 Kaynak Sonrası İşlemler.....	30
5. DOĞALGAZ VE PETROL HAT BORULARI RADYOGRAFİK MUAYENE YÖNTEMLERİ	31

5.1 Radyoaktivite	31
5.1.1 X-Işını ve Spektrumu	33
5.1.2 Gama Işınları ve Spektrumu	34
5.2 Radyografik Muayene	39
5.2.1 X-Ray Cihazı ile Muayene	40
5.2.2 Gama Cihazı ile Muayene	44
5.3 Radyografik Görüntünün Kalite Etmenleri	49
5.4 Boru Hatlarında Film Çekim Teknikleri.....	56
5.4.1 Tek Cidar Tekniği.....	56
5.4.2 Çift Cidar Tekniği.....	57
5.5 Dijital Radyografi Cihazı ile Muayene.....	58
5.5.1 Dijital Radyografi Türleri.....	59
5.5.2 Dijital Radyografide Görüntüyü Etkileyen Parametreler	62
6. DİJİTAL RADYOGRAFİ İLE KLASİK YÖNTEMLERİN	
KIYASLANMASI VE MALİYET ANALİZİ	67
6.1 Boru Hatlarında Uygulanabilirlik Yönünden Kıyaslanması.....	67
6.2 Görüntü Kalitesi ve Kaynak Hata Tespiti Yönünden Kıyaslanması	69
6.2.1 Görüntü Kalitesinin Deneysel Yöntemlerle İncelenmesi	71
6.3 Maliyet Analizi	81
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	83
8. KAYNAKLAR.....	86

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. 2021 Yılı Küresel Birincil Enerji Tüketim Dağılımı.....	3
Şekil 2.2. 2020 Yılı İtibariyle Dünya Doğalgaz Rezervleri.....	4
Şekil 2.3. 2020 Yılı İtibariyle Dünya Petrol Rezervleri.....	4
Şekil 2.4. Dünya Doğalgaz ve Petrol Boru Hatları.....	5
Şekil 2.5. Türkiye Doğalgaz ve Boru Hatları Haritası.....	9
Şekil 3.1. Manuel Kaynak Yöntemi.....	11
Şekil 3.2. DC Kaynak Makineleri.....	12
Şekil 3.3. Elektrik Ark Kaynağı Elektrot Türleri.....	14
Şekil 3.4. Boru Kaynaklarında Kaynak Pozisyonları.	15
Şekil 3.5. TIG Kaynak Metodu.....	16
Şekil 3.6. TIG Kaynağı Uygulaması.....	17
Şekil 3.7. MIG (Metal Inert Gas) Kaynağı.	17
Şekil 3.8. Koruyucu Gazların Kaynak Havuzu Üzerindeki Etkileri.....	19
Şekil 3.9. MIG/MAG Kaynak Ekipmanları.....	21
Şekil 3.10. Manuel ve Otomatik Kaynak Yöntemi Kaynak Ağızları.	23
Şekil 4.1. Boru Kesme ve Kaynak Ağzı Hazırlama Ekipmanı.....	25
Şekil 4.2. Kaynak Pasoları.....	30
Şekil 5.1. Radyasyon Türleri.	31
Şekil 5.2. Elektromanyetik Dalga Spektrumu.....	32
Şekil 5.3. Molibden Hedefinde 35 keV X-ışınımından Elde Edilen Spektrum.....	33
Şekil 5.4. Tungsten Hedefinde X-ışınımı Kaynaklı Sürekli Işınım Spektrumu.....	34
Şekil 5.5. Ters Kare Yasası Radyasyon Şiddeti Mesafe İlişkisi.....	37
Şekil 5.6. Fotoelektrik Olayı.....	38
Şekil 5.7. Compton Saçılımı.....	38
Şekil 5.8. Çift Oluşumu.....	39
Şekil 5.9. Crookes X-Işını Tüpü.....	39
Şekil 5.10. X-ray Tüpü.....	41
Şekil 5.11. Boru Çapına Göre X-Ray Crawler Modelleri.....	43
Şekil 5.12. Radyografide Kullanılan Gama Işın Kaynakları ve Özellikleri.....	46
Şekil 5.13. Gama Kaynağı Çekirdek Güvenlik Sistemi.....	47
Şekil 5.14. Kişisel Dozimetre.....	48
Şekil 5.15. Doz Hızı Ölçer Cihaz.....	49
Şekil 5.16. Radyografik Görüntü ve Yarı Gölge Oluşumu.....	49
Şekil 5.17. Film Negatifinin Yapısı.....	50
Şekil 5.18. Tek Telli Penetremetre.....	52
Şekil 5.19. Görüntü Kalite Ölçüleri.....	53
Şekil 5.20. Delikli Tip Penetremetreler.....	54
Şekil 5.21. Basamak Tipi Penetremetreler.....	55
Şekil 5.22. Çift Telli Penetremetreler.....	55
Şekil 5.23. Tek Cidar Çekim Teknikleri.....	56
Şekil 5.24. Çift Cidar Çekim Tekniği.....	57
Şekil 5.25. Dijital Radyografi Uygulama Alanları.....	58
Şekil 5.26. Endüstriyel Uygulamalarda DR Cihazı.....	59
Şekil 5.27. Film Dijitalleştirme Cihazı.....	59
Şekil 5.28. IP ile Bilgisayarlı Radyografi.....	60

Şekil 5.29. DR Cihazı.	62
Şekil 5.30. SNR'nin Görüntü Üzerindeki Etkileri.	65
Şekil 6.1. Gama Cihazı ile Çekilmiş Film.	70
Şekil 6.2. DR Cihazı ile Çekilmiş Film.	70
Şekil 6.3. Filtre Uygulanmış Bir DR Filmi.....	71
Şekil 6.4. 18" X-Ray Crawler Cihazı İle Tek Cidar Tek Görüntü Çekimi.....	74
Şekil 6.6. Klasik Yöntemler ile DR Yönteminin Personel Gereksinimleri.	82
Şekil 7.1. DR Dünya Uygulamaları.	85



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 5.1. Endüstriyel Radyo İzotopların Çelik Malzeme Nüfuziyetleri.	35
Tablo 5.2. Bazı Gama Işıma Kaynaklarının Özellikleri.	36
Tablo 5.3. Standart Delikli Tip Penetremetreler.	54
Tablo 5.4. EN-ISO 17636-2 SNR _n Değerleri.	65
Tablo 5.5. A ve B Sınıfı Çekim Teknikleri Minimum SR _b Değerleri.	66
Tablo 6.1. Deney Parçası Kaynak Prosedürü.	72
Tablo 6.2. Kullanılan Boru Özellikleri.	72
Tablo 6.3. Deney Ekipmanları.	75
Tablo 6.4. DR Muayene ve Çekim Tekniği.	78
Tablo 6.5. Ekip ve Ekipman Karşılaştırması.	82
Tablo 6.6. Maliyet Analizi.	83
Tablo 6.7. Üç Farklı Muayene Yönteminin Karşılaştırılması.	83

FOTOĞRAF LİSTESİ

Sayfa

Fotoğraf 3.1. Boru Hatları 6G Pozisyonunda Kaynakçı Testi.	10
Fotoğraf 3.2. Boru Hatlarında Şase Kullanımı.	13
Fotoğraf 3.3. Otomatik Kaynak Makinesi.	22
Fotoğraf 4.1. Kaynak Çadırı ve Kaynak Battaniyesi.	24
Fotoğraf 4.2. İç Kelepçe ile Boru Ağızlama.	27
Fotoğraf 4.3. Dış Kelepçe ile Boru Ağızlama.	28
Fotoğraf 5.1. Gama Cihazı.	44
Fotoğraf 6.1. Applus + RTD Firmasına Ait DR Cihazı.	68
Fotoğraf 6.2. Bars Firmasına Ait DR Cihazı.	68
Fotoğraf 6.3. DR Tie-in Bağlantı Uygulaması.	69
Fotoğraf 6.4. Deneyde Kullanılan X-Ray Crawler Cihazı.	73
Fotoğraf 6.5. X-Ray Cihazı Boru İçerisine Yerleştirilirken.	74
Fotoğraf 6.6. Otomatik Film Banyo Ekipmanı.	76
Fotoğraf 6.7. DR Film Çekimi Markalama İşlemi.	76
Fotoğraf 6.8. DR Cihazı Film Çekimi.	77
Fotoğraf 6.9. X-Ray Crawler ile Çekilmiş Filmin Yoğunluk Ölçümü.	79
Fotoğraf 6.10. X-Ray Crawler ile Çekilmiş Kaynağın Görüntüsü.	79
Fotoğraf 6.11. DR Yöntemi ile Çekilmiş Ham Film Görüntüsü.	80
Fotoğraf 6.12. DR Yöntemi ile Çekilip Filtre Uygulanmış Film Görüntüsü.	80

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

AC	: Alternating Current (Alternatif Akım)
AgBr	: Gümüş Bromür
ANSI	: American National Standards Institute
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BOTAŞ	: Boru Hatları İle Petrol Taşıma A.Ş.
BP	: British Petroleum
Ci	: Curie
Co	: Kobalt
CR	: Computer Radiography
Cs	: Sezyum
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DDA	: Digital Detector Array
DQE	: Detective Quantum Efficiency
DR	: Digital Radiography
EIA	: Energy Information Administrator
EN	: European Norm
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
FFD	: Flange Focal Distance
FSRU	: Fuel Storage and Regasification Unit (Yüzer LNG Depolama ve Gazlaştırma Ünitesi)
GEM	: Global energy Monitor
IAEA	: International Atomic Energy Agency Tez üzerinde düzeltildi
IP	: Image Plate
Ir	: İridyum
ISO	: International Organization for Standardization
ITAB	: Isının Tesiri Altındaki Bölge
İSG	: İş Sağlığı ve Güvenliği
KTTMM	: Kaynak Teknolojileri ve Tahribatsız Muayene Merkezi
kV	: Kilowatt
kVA	: Kilo Volt Ammper
LDA	: Linear Detector Array
LIMBO	: Gemiden Gemiye Ham Petrol Transferi

LNG	: Liquified Natural Gas
mA	: Miliamper
MAG	: Metal Active Gas
MeV	: Megaelectron Volt
MIG	: Metal Inert Gas
MTF	: Modüler Transfer Fonksiyonu
NDT	: Tahribatsız Muayene Yöntemleri
NRC	: National Research Council of Canada
ODTÜ	: Orta Doğu Teknik Üniversitesi
OSL	: Optik Uyarmalı Lüminesans Dozimetre
Se	: Selenyum
SNR	: Signal to Noise Ratio
STS	: Ship to Ship Transfer (Gemiden Gemiye Transfer)
TANAP	: Trans Anadolu Doğal Gaz Boru Hattı
TIG	: Tungsten Inert Gas
TLD	: Termolüminesans Dozimetre
TPAO	: Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı
UEA	: United Arab Emirates Tez üzerinde değiştirildi
UPS	: Kesintisiz Güç Kaynağı (Uninterruptible Power Supply)
UV	: Ultraviyole

TEŞEKKÜR

Öncelikle araştırmam boyunca bana yol gösteren, desteğini esirgemeyen ve verdiği değerli önerilerle tez sürecimi tamamlamamı sağlayan kıymetli danışmanım Sayın Prof. Dr. Gürcan YILDIRIM'a teşekkür ederim. Tezimin deneysel çalışmalarında desteklerini benden esirgemeyen Kaya Kalite personeli Resul Çelikten'e teşekkür ederim. Eğitim sürecimde desteklerini esirgemeyen anneme, babama ve ablama en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez çalışmam boyunca desteğini esirgemeyen, zor zamanlarımda yüzümü güldüren sevgili eşim Mihrican AKAT'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



1. GİRİŞ

Enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayan petrol ve doğalgaz arz ve talep noktaları olarak her zaman birbirine yakın konumlarda bulunmadığından taşınmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Ekonomik değeri yüksek olan bu varlıkların taşınmasında kara ve deniz yoluyla birlikte daha ekonomik, hızlı, çevreci ve güvenilir olan boru hattı taşımacılığında kullanılmaktadır. (Gençkan, 2004)

Jeopolitik olarak hem ham petrol hemde doğalgaz rezervlerinin yüksek olduğu bir bölgede bulunmaktayız. Ülkemiz, Avrupaya uzanan kuzeyden Rus gazının, doğudan Ortadoğu ve Asya bölgelerinin gazını akışını sağlayan boru hatları, Ortadoğu ve Hazar Denizi petrolünün limanlarımıza akışını sağlayan boru hatları ve denizasıırı ülkelere hem petrol hemde doğalgaz arzını sağlayabilecek limanlara sahip olmasıyla birlikte enerji koridoru görevindedir. Üslendiğimiz bu görevi en iyi şekilde yerine getirebilmek için binlerce kilometre boru hattı ağı ile ördüğümüz Ülkemizde kesintisiz şekilde enerji akışını sağlamamız gerekmektedir. Bu sebeple enerjinin taşınımı gerçekleştirilirken üretimden son noktaya kadar her bir adımda kalite ve güvenilirlik önemli bir yer tutmaktadır.

Boru hattı imalatlarında uzun işletme ömrü ve güvenilirlik açısından kaynak kritik bir öneme sahiptir ve bu sebeple kaynak yönteminin seçimi önemlidir. Teknolojinin gelişmesi ve her ortamda kullanılabilirliğinin artması sayesinde manuel kaynak uygulamasının yerini büyük ölçüde otomatik kaynak uygulamaları almıştır. Bu sayede kontrol edilebilirliği yüksek, hassas, güvenilir ve hata payı düşük kaynak imalatları yapılabilmektedir. Boru hatlarında manuel kaynak uygulamasında yoğun olarak elektrik ark kaynağı kullanılırken, otomatik kaynak uygulamalarında ise mekanize edilmiş MIG/MAG kaynağı kullanılmaktadır.

Boru hatlarında kaynaklı imalatın tamamlanmasının ardından kontrolünün sağlanması için tahribatsız muayene yöntemlerinden (NDT) biri kullanılmaktadır. Boru hatlarında kaynağın Uluslararası Standartlar ve Uygulama Prosedürleri doğrultusunda kontrolleri sağlanırken en yaygın olarak aşağıdaki yöntemler kullanılmaktadır. (Salma, 2011)

- Radyografik Test (Radiographic Testing) RT
- Ultrasonik Test (Ultrasonic Testing) UT

Tez konumun temelini oluşturan boru hattı radyografik kontrolleri uygulanan boru çapına ve et kalınlığına göre standartların ön gördüğü doğrultuda

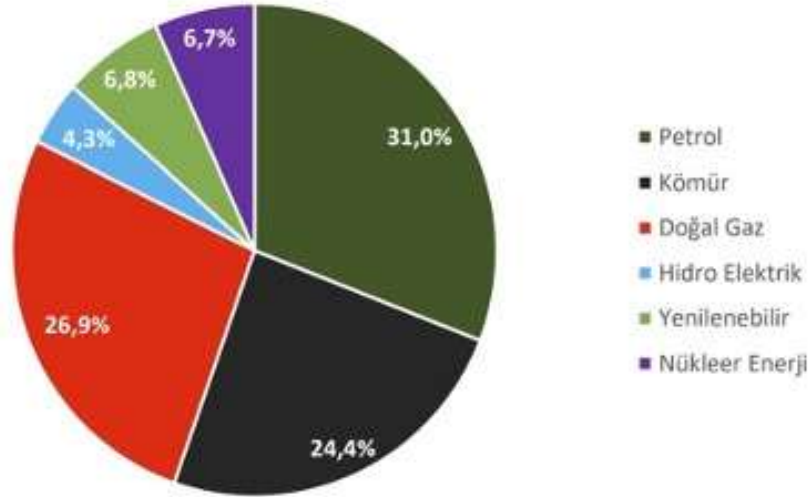
Klasik yöntemler (X-Ray ve Gama cihazı) ve Dijital Radyografi yöntemleriyle yapılabilmektedir. Yöntemler, seçilen radyasyon kaynağından çıkan ışınların (X-Işını, gama ışınları ve parçacık radyasyonu) test malzemesi içinden geçerek muayene edilmek istenilen yüzeye konulmuş filme ulaşması, malzemenin içinden geçen ışınların malzeme süreksizliğine göre farklı şiddetlerde filme yansması ve filmde oluşan bu yansımaları film banyo edildikten veya bilgisayar ortamında işlendikten sonra yorumlanması esasına dayanmaktadır. (Yıldırım, 2015) Teknolojinin ve özellikle bilgisayar destekli sistemlerin gelişmesiyle birlikte dijital radyografi sisteminin temel elemanlarını oluşturan çok katmanlı yüksek çözünürlüklü algılayıcı paneller ve yüksek odaklı X-Ray cihazlarının radyografide kullanılmasına olanak sağlamıştır. Dijital radyografi sisteminde kullanılan ekipmanlar ve yazılımlar vasıtasıyla yüksek odaklı X-Ray cihazından çıkan X-ışınının algılayıcı panelde oluşturduğu görüntü, doğrudan bilgisayara aktararak gerçek zamanlı kontrole olanak sağlamıştır.

Bu tez çalışmasında petrol ve doğalgaz borularındaki kaynaklı bağlantıların radyografik kontrollerinde, klasik yöntemlerin ve dijital radyografi yönteminin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu çalışma, saha şartlarında uygulanabilirliğe, maliyet analizine ve numune üzerinde yapılan deney sonucunda yöntemlerin görüntü ve hata yakalama kabiliyeti üzerine incelemelerde bulunmuştur.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Dünya'daki Mevcut Doğalgaz ve Petrol Boru Hatları

Enerji, ekonomik ve sosyal gelişim açısından bir ülkenin en temel ve sürükleyici gereksinimlerindendir. Bu açıdan, “Enerji Güvenliği” ekonomik güvenliğin ve ulusal güvenliğin ana yapıtaşlarıdır. Enerji, toplumsal yaşamlarımızı sürdürebilmemiz için gerekli olan neredeyse bütün süreçlerin temel girdisi olup; ulaştırma, sanayi ve konut gibi alt sektörlerde yer almaktadır. Günümüz itibari ile Şekil 2.1’de görüldüğü üzere tüketilen enerjinin %82,3’lük kısmını petrol ve doğalgaz gibi fosil kaynaklı yakıtlar oluşturmaktadır. (Langenbrunner, Joly, & Greig, 2022) (TPAO, 2021)



Şekil 2.1. 2021 Yılı Küresel Birincil Enerji Tüketim Dağılımı. (TPAO, 2021)

Küresel bazda petrol ve doğal gaz rezervlerinin kullanımı COVID-19 etkisi, ana tedarikçi ülkelerin uluslararası arenadaki pozisyonları ve çevreci politikaların arttırılması gibi etkenlerden dolayı durağan bir dönem geçiriyor olmasına rağmen (UAE, EIA, BP, ExxonMobil vb.) kurum ve kuruluşların yapmış olduğu projeksiyonlara göre uzun vadede hala birincil enerji olarak konumlarını koruyacakları ve ilerleme gösterecekleri yönündedir.



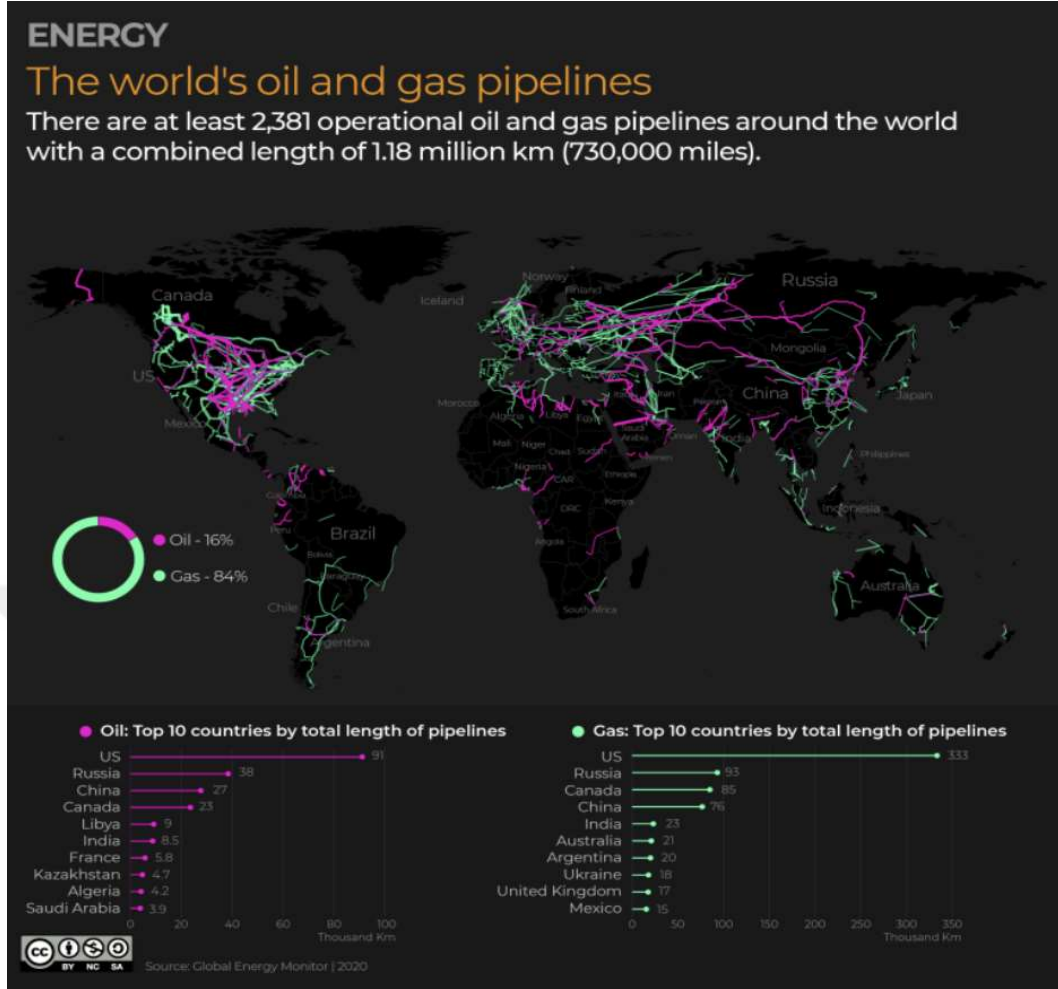
Şekil 2.2. 2020 Yılı İtibariyle Dünya Doğalgaz Rezervleri. (TPAO, 2021)



Şekil 2.3. 2020 Yılı İtibariyle Dünya Petrol Rezervleri. (TPAO, 2021)

Global Energy Monitor (GEM) verilerine göre küresel petrol boru hattı sistemi, petrol endüstrisinin 2021-2022’de artan birim fiyatlar sonucu rekor kırmasıyla birlikte büyük bir gelişme ve ilerleme göstermiştir. %40’ı hali hazırda yapım aşamasında olmakla birlikte yaklaşık 24.000 km boru hattı yapım programındadır. (Global Energy Monitor, 2022)

GEM verilerine göre küresel doğalgaz boru hattı sistemi, yapım aşamasında olan 408 yeni doğalgaz boru hattı, 510 kapasite artırımı ve altyapı geliştirme çalışmalarıyla birlikte ilerleme göstermektedir. (Langenbrunner, Joly, & Greig, 2022)



Şekil 2.4. Dünya Doğalgaz ve Petrol Boru Hatları. (Global Energy Monitor, 2022)

2.2 Türkiye'nin Mevcut Doğalgaz ve Petrol Boru Hatları

Doğalgaz ve petrol boru hattı taşımacılığı alanındaki faaliyetler Boru Hatları ile Petrol Taşıma Anonim Şirketi (BOTAŞ) ve bağlı iştirakleri aracılığı ile yürütülmekte olup;

Ham petrol faaliyetleri:

1) Irak-Türkiye Ham Petrol Boru Hattı ile Irak'ta üretilen ham petrol, Ceyhan Terminaline taşınmaktadır. Gelen petrol Ceyhan terminalinden tankerlere yüklenerek dünya pazarlarına ulaştırılmaktadır. Hattın yıllık taşıma kapasitesi 70.9 milyon tondur.

2) Ceyhan-Kırıkkale Ham Petrol Boru Hattı ile Ceyhan Terminalinden Kırıkkale Rafinerisi'ne ham petrol taşınmaktadır. Hattın toplam uzunluğu 448 km ve yıllık taşıma kapasitesi 7.2 milyon tondur.

3) Batman-Dörtyol Ham Petrol Boru Hattı ile Batman, Diyarbakır ve Adıyaman sahalarında üretilen ham petrol Dörtyol Deniz Terminaline ulaştırılmaktadır. Hattın toplam uzunluğu 518 km ve yıllık taşıma kapasitesi 4.5 milyon tondur.

4) Bakü-Tiflis-Ceyhan Ham Petrol Boru Hattı, Hazar menşeli petrolü Gürcistan ve Türkiye üzerinden uluslararası pazarlara ulaştırmak için inşa edilmiş olup BOTAŞ International Limited Şirketi tarafından işletilmektedir. Hattın toplam uzunluğu 1776 km olup 1076 km'si Türkiye'den geçmektedir. Hattın yıllık petrol taşıma kapasitesi 60 milyon tondur.

5) Gemiden gemiye ham petrol transferi (LIMBO), 2019 yılında 4 defa ve 2020 yılında 5 defa olmak üzere toplam 9 defa gerçekleştirilmiştir. LIMBO operasyonları Ceyhan Terminalinde gerçekleştirilmiştir. Bu transfer operasyonları sonucunda yaklaşık 2.4 milyon varil ham petrol gemiden gemiye aktarılmıştır. (Ataş, 2016) (BOTAŞ Genel Müdürlüğü, 2020)

Doğalgaz faaliyetleri:

1) LNG (Sıvılaştırılmış Doğalgaz) İthal Terminali: Marmara Ereğlisi LNG Terminali ülkemizin doğalgaz güvenliğini ve kaynak çeşitlendirmesini sağlamak için 1 Ağustos 1994 tarihinde işletmeye alınmıştır. BOTAŞ'ın Cezayir ve Nijerya şirketleri ile olan LNG Alım Satım Anlaşmaları kapsamında ithal edilen LNG kargolarının ve spot piyasadan alınan LNG kargolarının boşaltımı Marmara Ereğlisi'nde yapılmaktadır. LNG'nin gazlaştırılarak ana iletim hattına verilmesi yine bu terminalde gerçekleştirilmektedir. Terminalde depolanan LNG gazlaştırılarak ulusal iletim hattına sevk edilmektedir. Ayrıca boru hatlarıyla doğalgazın ulaştırılamadığı bölgelere kara tankerleriyle doğalgazın ulaştırılabilmesi için 2002 yılında Terminalde kara tankeri LNG dolum istasyonu tesis edilmiştir.

2) Doğalgaz İthalat ve İhracat Anlaşmaları: BOTAŞ uzun dönemli alım satım anlaşmaları ile Rusya Federasyonu, İran ve Azerbaycan'dan boru hatları ile doğalgaz ithalatı gerçekleştirmektedir. Cezayir ve Nijerya'dan ise LNG ithalatı gerçekleştirilmektedir.

3) Doğalgaz İletim Faaliyetleri: 23 Mayıs 2003 tarihinde EPDK tarafından BOTAŞ'a 30 yıl süreli İletim Lisansı verilmiştir. BOTAŞ iletim hizmetlerini Ankara Doğalgaz İşletme ve Piyasa İşlemleri Bölge Müdürlüğü, İstanbul İşletme Müdürlüğü, Kayseri İşletme Müdürlüğü ve Kırklareli, İzmir, Bursa, Çarşamba,

Erzurum, Konya, Diyarbakır, Kahramanmaraş ve Ankara Şube Müdürlükleri ile sağlar.

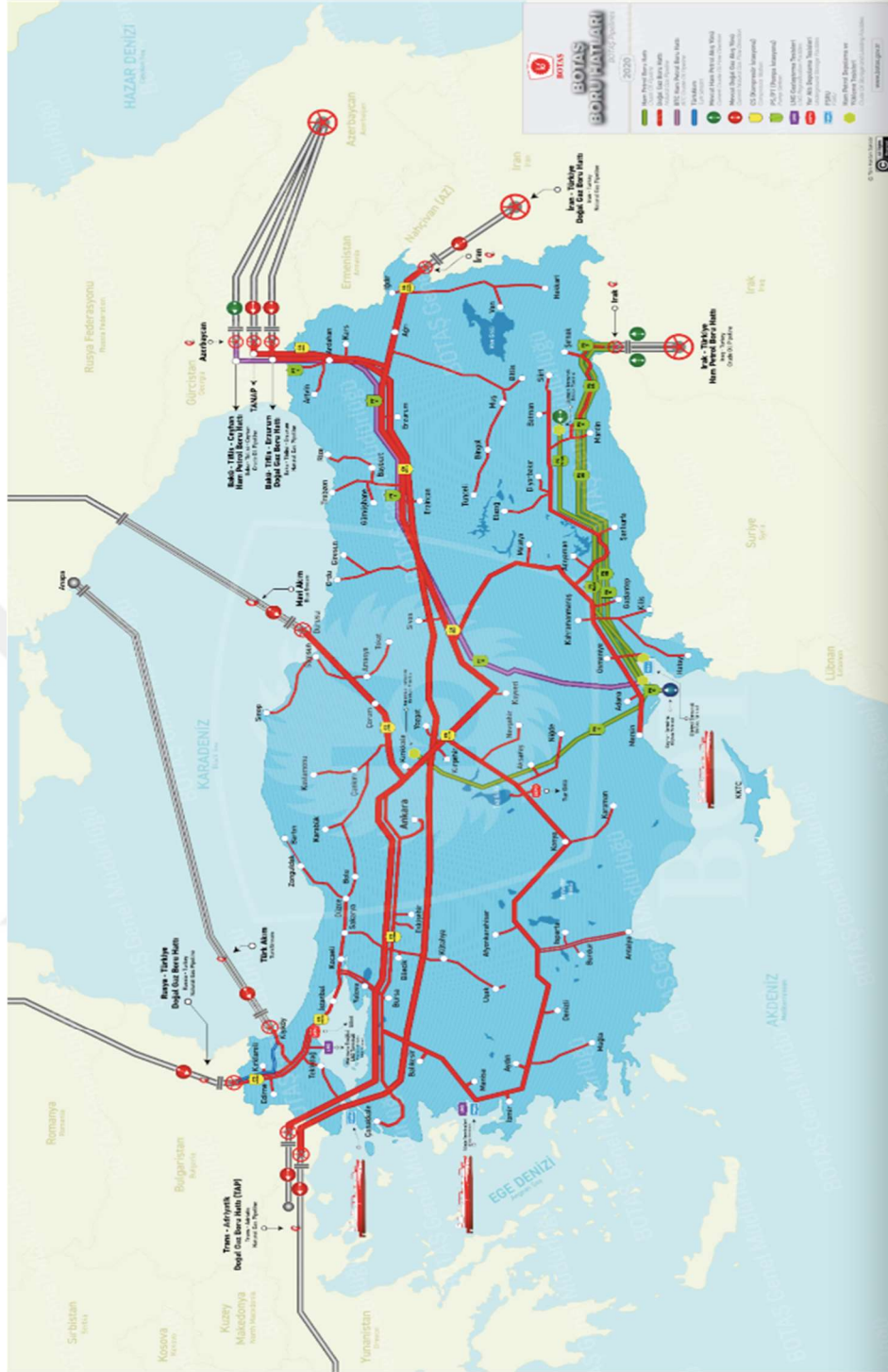
4) Yüzer LNG Depolama ve Yeniden Gazlaştırma Ünitesi (FSRU): Doğalgaz arz güvenliğinin sağlanması ve kaynak çeşitliliğinin artırılması amacıyla BOTAŞ, Dörtyol'da ve Saros Körfezinde olmak üzere 2 adet yüzer LNG depolama ve yeniden gazlaştırma ünitesinin doğalgaz iletim sistemine bağlantısının sağlanmasına yönelik projeler geliştirmiştir. Bu kapsamda dünyanın en büyük FSRU gemisi kiralanarak Dörtyol Yüzer LNG Depolama ve Gazlaştırma Ünitesi işletmeye alınmıştır. Yine aynı kapsamda Güney Kore'de inşa edilen, kabul ve denetim çalışmaları tamamlanan Ertuğrul Gazi gemisi 108 milyon Sm³ doğalgaza eş değer 170.000 m³ LNG depolama kapasitesine sahiptir. FSRU tesisleriyle artık boru hatlarına bağlı kalmadan, farklı kaynak ülke ya da spot piyasalardan gaz tedarik edilebilecek. Öte yandan, Saros Körfezinde yapımı planlanan FSRU İletim Şebekesine Bağlantı Siteminin ise mühendislik çalışmaları tamamlanmış olup, yapım işleri devam etmektedir.

5) Ship to Ship (STS): Gemiden gemiye LNG transferi ilk defa 2018 yılında Dörtyol Terminali iskelesinde gerçekleştirilmiştir. Bugüne kadar 22 defa STS operasyonu gerçekleştirilmiş olup, 2.10 milyar Sm³ gaz iletim hattına verilmiştir.

6) Yer Altı Doğalgaz Depolama Projeleri: Yer altı doğalgaz depolama tesisleri, doğalgazın mevsimsel ve günlük tüketim artışlarında arz-talep dengesini oluşturmak ve arz güvenliğine katkı sağlamak amacıyla kurulmaktadır. Silivri'de bulunan Kuzey Marmara ve Değirmenköy Yer Altı Doğalgaz Depolama Tesisi 2.84 milyar Sm³ gaz depolama kapasitesine sahiptir. Kuzey Marmara Doğalgaz Depolama Tevsi Projesi için ihale süreci devam etmektedir. Öte yandan Tuz Gölü Doğalgaz Yer Altı Depolama Projesinin birinci aşaması 2017 yılında tamamlanmış olup, ikinci aşamasının ise 2021 yılında işletmeye alınması planlanmaktadır. Tuz Gölü Doğalgaz Yer Altı Depolama Genişletme Projesinin ise mühendislik, tedarik ve inşaat ihalesi gerçekleştirilmiş olup, 2023 yılında tamamlanması planlanmaktadır. (Ataş, 2016) (Tüba Bilimler Akademisi, 2021)

Yukarıda bahsedilen faaliyetler dışında BOTAŞ, uluslararası projelerde de rol oynamaktadır. Güney Gaz Koridorunun belkemiği olan Anadolu Geçişli Doğalgaz Boru Hattı Projesi (TANAP) ile Azerbaycan'ın Hazar Denizindeki Şah Deniz Faz-II gaz sahası ve diğer sahalarda üretilen doğalgazın öncelikle Türkiye'ye

ardından da Türkiye-Yunanistan sınırı üzerinden Avrupa'ya iletimi amaçlanmıştır. TürkAkım Gaz Boru Hattı Projesi ile Rusya Federasyonu'ndan ülkemize doğalgaz arzının yanı sıra Rus gazının ülkemiz üzerinden Avrupa'ya iletimi amaçlanmaktadır. Ülkemizden Bulgaristan sınırına kadar uzanan boru hattı kara ve deniz bölümünden oluşmaktadır. Türkmenistan-Türkiye-Avrupa Doğalgaz Boru Hattı Projesi ile Türkmenistan'ın güneyindeki sahalarda üretilen gazın Hazar geçişli bir boru hattı ile Türkiye'ye ve ülkemizden de Avrupa'ya taşınması amaçlanmıştır. Türkiye-Bulgaristan Doğalgaz Boru Hattı Projesi ile Bulgaristan'a kaynak ve güzergâh çeşitlendirmesi sağlamak amaçlanmıştır. İki ülkenin doğalgaz boru hattı sistemlerini entegre etmek amaçlanmış olup, çalışmalar devam etmektedir. Irak-Türkiye Doğalgaz Boru Hattı Projesi ile Irak'taki gazın boru hattıyla ülkemize getirilmesi amaçlanmıştır. Fakat bölgedeki gelişmeler projenin gelişimini etkilemekte olup, şartlara bağlı olarak süreç ilerletilecektir. (Ataş, 2016)



Şekil 2.5. Türkiye Doğalgaz ve Boru Hatları Haritası. (BOTAŞ Genel Müdürlüğü, 2020)

3. DOĞALGAZ VE PETROL BORULARI KAYNAK YÖNTEMLERİ

Doğalgaz ve petrol boru hatlarında kaynak hem teknik açıdan hem de imalat aşamasında bağlı bulunduğu aktivitelerin, dolayısıyla projenin ilerlemesi açısından kritik öneme sahiptir. Ülkemiz tarafından işletilen boru hatlarının yüksek basınç hatları olduğu düşünüldüğünde de boruların kaynaklı bağlantılarının ne denli önemli olduğu görülmektedir. (Bahadori, 2017)

Doğalgaz ve petrol hatlarının geçmişten günümüze artan önemi ile birlikte kullanılan çelik boruların kaynaklı bağlantıları için yeni teknikler ve ilave malzemeler geliştirilerek daha hızlı, mukavemetli ve güvenli olması için birçok çalışmalar yapılmış ve halen devam etmektedir.

Çelik boruların kaynaklı imalatı birçok disiplini bir arada bulundurmaktadır. Bunlar; öncelikli olarak ön etüdü, keşif ve fizibilitesi yapılan güzergaha uygun çap ve klasmanda borunun seçilmesi, uygun kaynak metodunun belirlenerek borunun kaynağa hazır hale getirilmesi, kaynağı gerçekleştirecek ekiplerinin belirlenen prosedüre uygun olarak test edilmesi (Fotoğraf 3.1), onaylanan kaynakçılarla hat kaynağının yapılması ve ardından yapılan tahribatsız muayenedir. (Tepe, 2008)

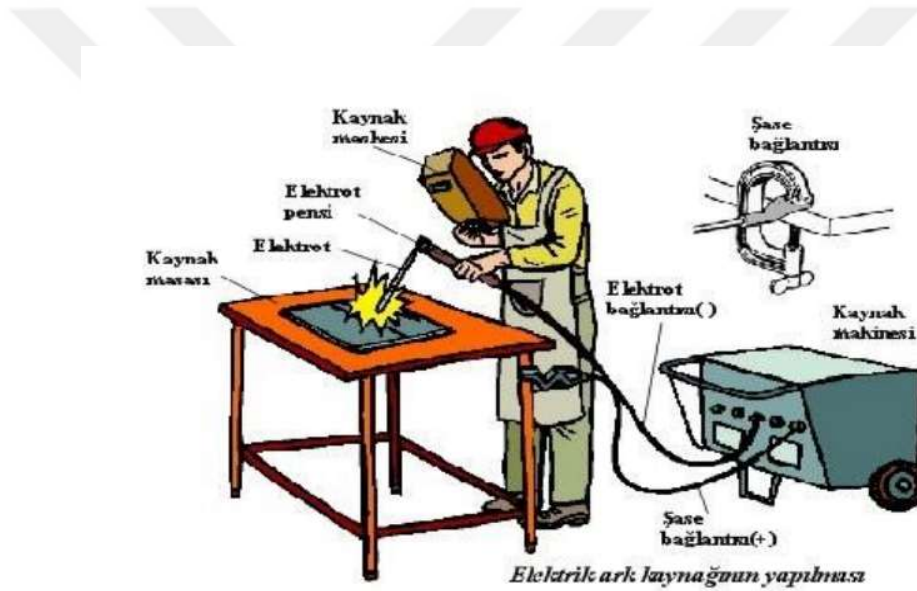


Fotoğraf 3.1. Boru Hatları 6G Pozisyonunda Kaynakçı Testi.

Boru hatlarındaki kaynaklı bağlantı yöntemlerini manuel ve otomatik olarak sınıflandırabiliriz. Küçük çaplarda yaygın olarak manuel kaynak kullanılmaktadır. Büyük çaplarda ise saha şartları ve arazinin el verdiği noktalarda hattın toplam uzunluğu da göz önünde bulundurularak otomatik kaynak yöntemi tercih edilebilmektedir. (Kaluç & Tülbentçi, 2001)

3.1 Manuel Kaynak

Boruların kaynaklı bağlantısının kaynakçı aracılığıyla ana metalin ve takviye telin gerekli ısı kaynağı ile ergitilerek birleştirilmesiyle gerçekleştirilen yöntemdir (Şekil 3.1). Doğalgaz ve petrol boru hatlarında manuel kaynakta yaygın olarak elektrik ark kaynağı kullanılmaktadır.



Şekil 3.1. Manuel Kaynak Yöntemi. (Doğan, 2019)

3.1.1 Elektrik Ark Kaynağı

Bir ergitme kaynağı yöntemidir. Güç kaynağının zıt kutuplar arasında oluşturduğu elektrik akımıyla kaynak elektrotu ve boru ağzları arasında bir elektrik arki meydana getirilir. Elektrik arki boru malzemesi ve elektrotun ergitmesi için gerekli ısı girdisini sağlayarak kaynak havuzu oluşturup birleştirmeyi başlatır. Elektrot üzerinde bulunan örtünün yanarak oluşturduğu gaz korumasıyla birlikte boru çevresi boyunca kaynak havuzu kontrollü bir şekilde ilerletilerek kaynaklı bağlantı gerçekleştirilir. (Gençkan, 2004) (Özkırmaz, 2009)

Kullanılan Ekipmanlar ve Sarf Malzemeleri

Kaynak Makinesi: Elektrik akımı bir elektron hareketidir. Elektronlar (-) kutup olarak adlandırılan katotlardan (+) kutup olarak adlandırılan anoda doğru hareket eder ve elektronların gerçekleştirdiği bu harekete elektrik akımı denir. Bu akışın başlamasında elektron fazlalığı tetikleyicidir ve buna da gerilim denmektedir. Şebeke elektriğinin deki gerilimin insan vücudu açısından tehlikeli olması, gerilim üreteçleri yani kaynak makinelerinin (25-80 Volt) ve (10-600 Amper) aralığında çalışacak şekilde üretilmesine sebep olmuştur. Bu kaynak makineleri ile elektrik arkının oluşturulmasında hem AC hem de DC akım kullanılabilir. (Özkırmaz, 2009) (Komaç, 2014)

AC (Alternatif Akım) tip kaynak makineleri, kaynak trafoları (transformatörleri) olarak da adlandırılır. Kullanım kısıtları mevcuttur, sadece AC akımla çalışabilen elektrot kullanılır (Rutil vb.), pense kablosu ve şase kablosu bölümleri sabit olduğundan kutup değiştirme şansı yoktur. (Özkırmaz, 2009) (Komaç, 2014)

DC (Doğru Akım) tip kaynak makineleri, redresör ve inverter kaynak makineleri olarak adlandırılmaktadır. Şekil 3.2’de görüldüğü üzere hem (+) hem de (-) kutula çalışma imkânı sunar, bu sayede gücü doğrultusunda tüm elektrotları kullanılabilmektedir. Doğalgaz ve petrol boru hatlarında DC kaynak makineleri kullanılmaktadır. (Özkırmaz, 2009) (Komaç, 2014)



Şekil 3.2. DC Kaynak Makineleri. (Komaç, 2014)

Kaynak Kablosu, Pensi ve Şasesi: Kaynak için gerekli elektrik akımının sağlanabilmesi için kaynak makinesinin kutbundan çıkan akımın malzeme üzerinden geçerek makineye geri dönmesi gerekmektedir. Şekil 3.2’de görüldüğü üzere kutuptan çıkan akım kablo vasıtasıyla elektrotu tutan pense ulaşmakta, elektrot üzerinden akarak malzemeye arkı gerçekleştirip Fotoğraf 3.2’de görülen şase ve kablosu vasıtasıyla da kaynak makinesine dönmektedir. (Özkırmaz, 2009) (Komaç, 2014)



Fotoğraf 3.2. Boru Hatlarında Şase Kullanımı.

Elektrotlar: Özel uygulamalar dışında örtülü tip elektrot kullanılmaktadır (Şekil 3.3).

Rutil elektrot, örtü malzemesi %35 Ti_2O ‘den oluşmaktadır. Tutuşturulmaları kolaydır. DC ve AC kaynak makineleri ile çalışabilmektedirler.

Asidik elektrot, örtü malzemesinde demir oksit ve manganez bulunur. Çabuk akan düz dikişler verir. DC ve AC kaynak makineleri ile çalışabilmektedirler.

Oksit elektrot, örtü malzemesi %60 demir oksit (Fe_2O_3 , Fe_3O_4) ‘den oluşmaktadır. Yalnız düşük karbonlu ve alaşımsız çeliklerde kullanılmaktadır.

Selülozik elektrot, örtü malzemesi yandığında gaz haline geçen organik bileşiklerden oluşmaktadır. Her pozisyonda kaynak kabiliyetine sahiptir. Yüksek kaynak sıçraması yapmaktadır. DC ve AC kaynak makineleri ile çalışabilmektedirler. Doğalgaz ve petrol boru hatlarında hat kaynaklarında ve istasyonların kök pasolarında kullanılmaktadır.

Bazik elektrot, örtü malzemesi büyük oranda kalsiyum klorür 'den oluşmaktadır. Örtüleri nem çektiğinden fırınlanmadan kullanılmamalıdır. DC ve AC kaynak makineleri ile çalışabilmektedirler. (Özkırmaz, 2009) (Komaç, 2014)

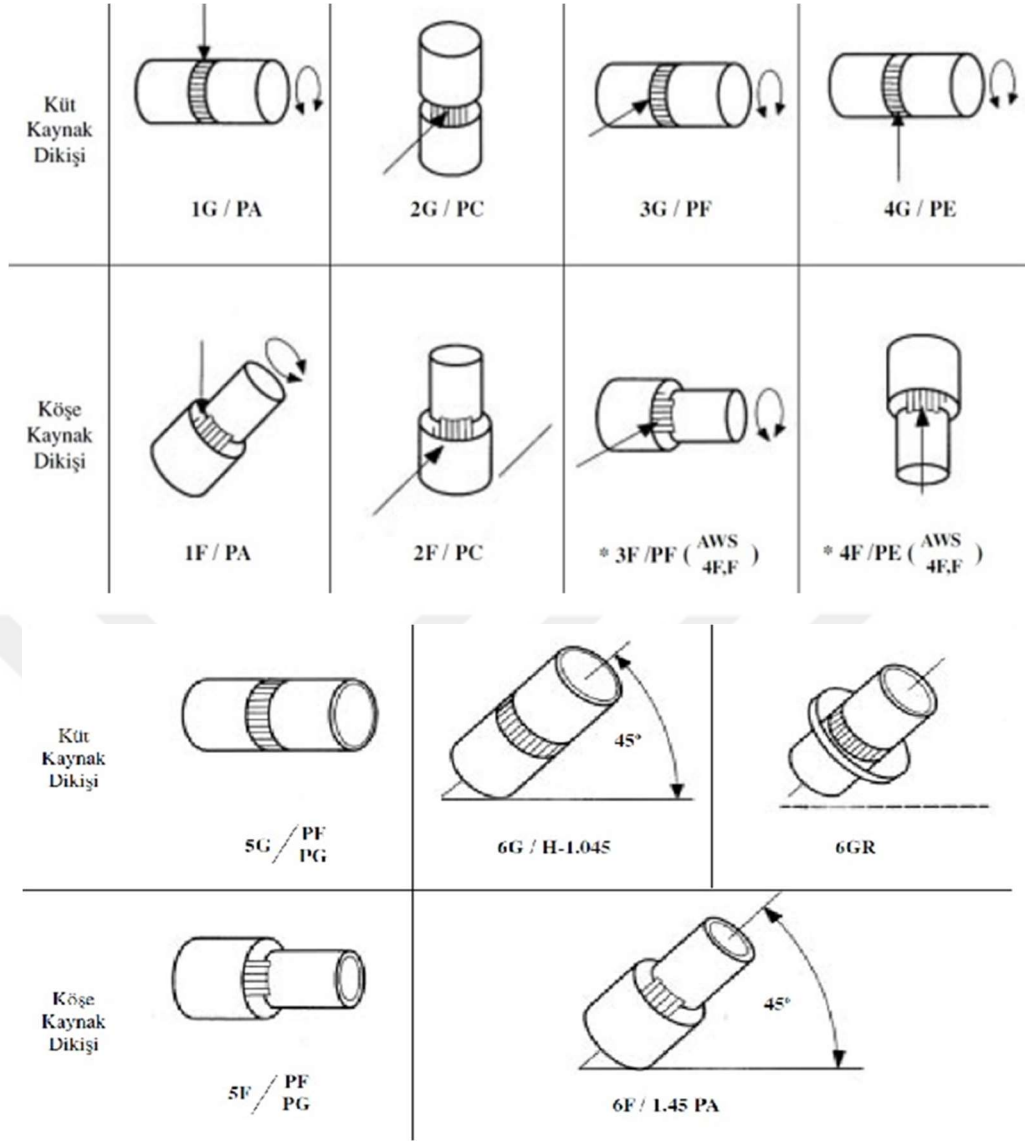
Kaynak dikişinde hidrojen (H) olmaması sağlıklı kaynağın ilk şartlarındandır. H kaynak dikişinde ve ITAB bölgesinde çatlak oluşmasına sebep olur. Bazik elektrotlar düşük H yapıları sayesinde bu riski en aza indirmektedir. Aynı zamanda dinamik zorlamalara karşı dirençleri yüksektir. Doğalgaz ve petrol boru hatlarında istasyon kök üzeri pasolarında ve Hot-Tap gibi kritik kaynak noktalarında kullanılmaktadır. (Gençkan, 2004)



Şekil 3.3. Elektrik Ark Kaynağı Elektrot Türleri.

Kaynak Pozisyonları ve Uygulama Teknikleri

Kaynak pozisyonları kaynatılan parçanın geometrisine göre değişiklik göstermektedir. Doğalgaz ve petrol hat borularının kaynaklarında boru sabit kabul edilerek kaynak için pozisyon alınmaktadır. Şekil 3.4’de görüldüğü üzere saha şartlarında eğimli arazilerin bulunmasından dolayı en uygun pozisyonlar 5G ve 6G olmaktadır. (Baylan, 2015)



Şekil 3.4. Boru Kaynaklarında Kaynak Pozisyonları.

Uygun kaynak pozisyonu seçildikten sonra;

- Kullanılan elektrotun cinsine
- Kullanılan boru ağızlama kelepçesine (iç ve dış kelepçe)
- Açılan kaynak ağzının durumuna
- Kaynağın uygulama geometrisine (Alın, Köşe)
- Malzemenin ısı kapasitesine
- Malzemenin maruz kaldığı yükün cinsine
- Uygulanan boru çapına

göre kaynağın ilerleme yönleri ve kaynakçı sayıları değişmektedir. (Boru Hattı (Pipe Line) İnşaatında Kaynağın Yeri ve Önemi)

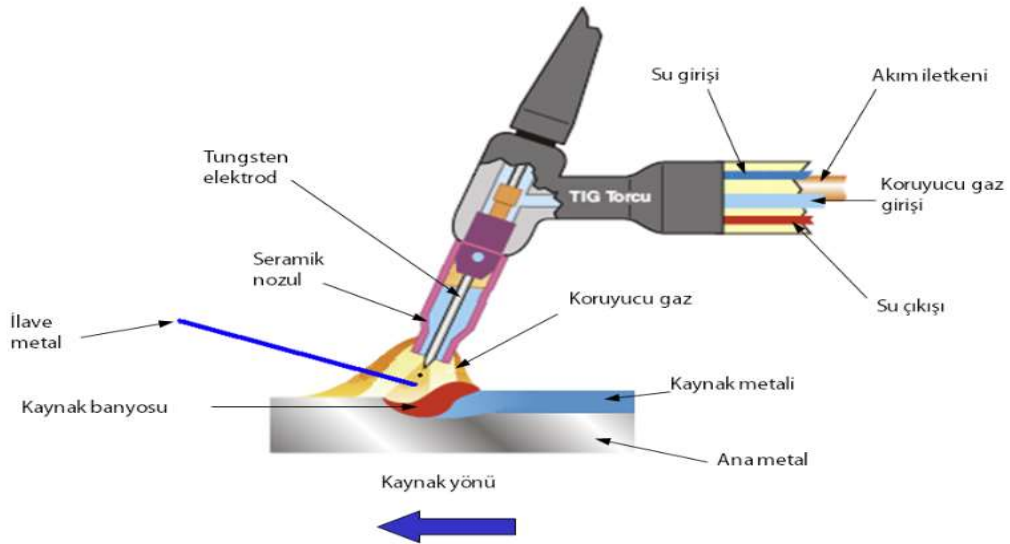
3.1.2 Gaz Altı Kaynağı

Kaynaklı birleştirmenin gerçekleştirileceği bölgede oksijen, azot ve çevrenin doğurabileceği olumsuzlukları ortadan kaldırmak amacıyla çeşitli gazların kullanıldığı, kullanılan gaz ve elektrot cinsine göre türlere ayrılan kaynak yöntemidir. Kullanılan gaz hem kaynak bölgesini çevre ile ayıran bir örtü oluşmasını sağlamakta hem de yanma prosesini hızlandırarak kısa zamanda yüksek ısı açığa çıkmasını sağlamaktadır. (Anık, 1991) (Hüyüktepe, 2019)

Kullanılan elektrot cinsine göre Ergiyen elektrot (MIG-MAG) ve ergimeyen elektrot (TIG) ile gaz altı kaynağı olarak inceleyebiliriz.

Ergimeyen Elektrotla Yapılan Gaz Altı Kaynağı (TIG)

Tungsten Inert Gas (TIG) kaynaklı bağlantı için gerekli ısı enerjisinin tungsten elektrot ve parça arasında oluşan ark ile sağlandığı, koruyucu gaz ile kaynak banyosunun korunduğu gaz altı kaynak yöntemidir (Şekil 3.5). Kaynak bölgesinin korunması için asal gaz olan Helyum veya Argon kullanılmaktadır. Kaynak ilave metalin eriyerek kaynak havuzuna akması ile birleştirme sağlanmaktadır. Yüksek ısıya maruz kalan torç su ve havanın yardımıyla soğutulmaktadır. (Anık, 1991) (Çelik, 2013) (Kınacı, 2019)



Şekil 3.5. TIG Kaynak Metodu. (Kaynak Akademi, 2021)

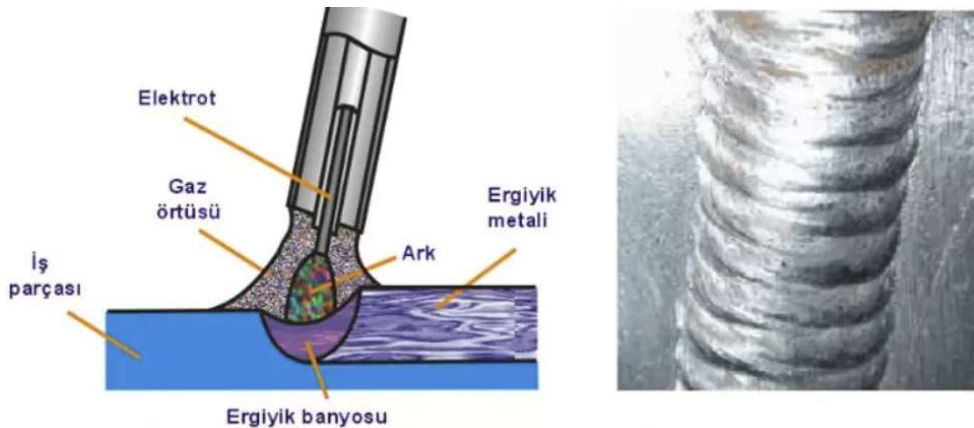
Sahadaki uygulamalarında kullanılan koruyucu gaz ile isimlendirilerek Argon kaynağı da denilmektedir. TIG yöntemi çelik, alüminyum gibi metallere uygulanabildiği gibi demir dışı metallere uygulanabilirliği yönünden önemlidir. (Anık, 1991) (Çelik, 2013) (Kınacı, 2019)



Şekil 3.6. TIG Kaynağı Uygulaması. (İnoks Lazer, 2022)

Ergiyen Elektrotla Yapılan Gaz Altı Kaynağı (MIG-MAG)

Kaynaklı bağlantı için gerekli ısının torç içerisinde sürekli gelen çıplak bir tel üzerinden geçen akım ile parça arasında sağlanarak ergimenin gerçekleştirildiği gaz altı kaynak yöntemidir (Şekil 3.7). Koruyucu olarak kullanılan soy gazın cinsine göre ayrılmaktadır. (Sezgin, 2019) (Hüyüktepe, 2019)



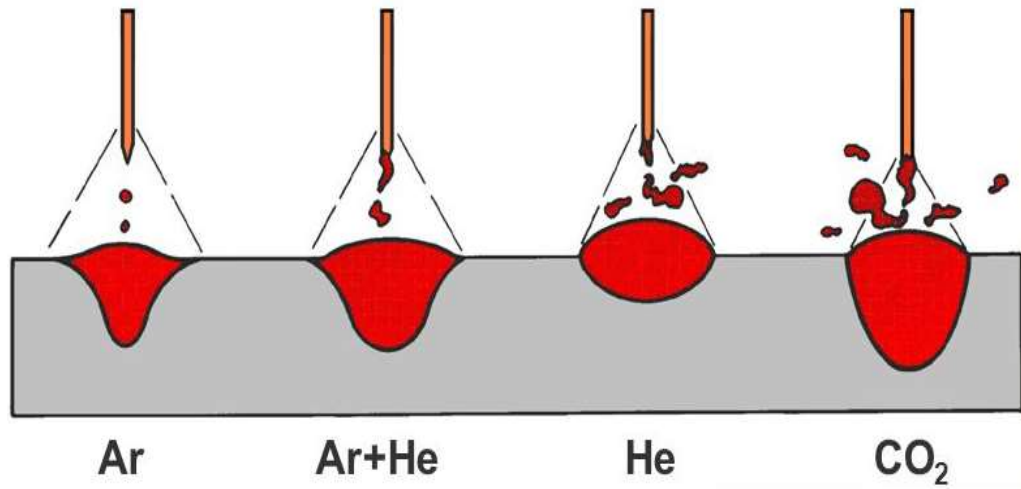
Şekil 3.7. MIG (Metal Inert Gas) Kaynağı. (Cenk Makina, 2022)

MIG (Metal Inert Gas): MIG kaynağı koruyucu olarak inert gazların kullanılmasından ismini almıştır. Saha uygulamalarında SIGMA kaynağı olarak da bilinmektedir. Koruyucu gaz olarak genellikle helyum, argon yada bu gazların belirli oranlarda karışımı kullanılmaktadır. Koruyucu gaz çelik malzeme kaynağına gelindiğinde düşük oranlarda oksijen ve karbondioksit karışımıyla birlikte kaynak bölgesine üflenmektedir. Oksijenin yanmayı hızlandırıcı bir gaz olması ve karışım olarak üflenmesi sayesinde arkın kararlılığı ve yapışma kabiliyeti artmakta bu sayede kaynakta gözenek oluşumunu önlenmektedir.

MIG kaynağında üreteçten doğru akım çekilmekte ve elektrot genellikle (+) kutba bağlanmaktadır. Kaynak işlemi için kaynatılacak olan malzemelerin kalınlığına ve yapısına bağlı olarak gerekli nüfuziyetin sağlanması için akım şiddeti ve uygulama hızı belirlenebilmektedir. Yüksek erime verimi ile birlikte derine nüfuz edebilmesi, kaynak hızının yüksek oluşu, kaynak havuz sıçrantısının ve yanma kaybının düşük oluşu sayesinde birçok malzemenin kaynağı için elverişli bir yöntemdir. Paslanmaz çeliklerin kaynağına da imkan sağlamaktadır. (Anık, 1991) (Hüyüktepe, 2019)

MAG (Metal Active Gas): MAG kaynağı koruyucu olarak aktif gazların kullanılmasından ismini almıştır. MIG kaynağından tek farkı koruyucu gaz olarak karbondioksit gazının kullanılmasıdır. Kullanılan karbondioksit gazının saf, aynı zamanda kuru olması gerekmektedir. Aksi durumda içerisinde bulunabilecek rutubet kaynak havuzunda sıçrantıları sebep olarak gözenek oluşturabilmektedir. Karbondioksit gaz tabakası havanın hidrojen ve azotundan kaynak banyosunu korumaktadır fakat oksidasyonu engelleyememektedir. Yüksek sıcaklıklar altında karbondioksit, karbonmonoksit ve oksijene ayrışmaktadır. Bununla birlikte karbondioksit sıvı haldeki demirle de birleşerek demiroksit oluşturmakta zincirleme reaksiyonla, demiroksitte manganez ve silisyum ile birleşerek bu matallerin kaybına sebep olmaktadır. Malzemede meydana gelen bu kayıpların telafi edilebilmesi için kaynak telinin seçiminde malzemenin bileşimi önem arz etmektedir.

MAG kaynağı çabuk oksitlenebilen parçaların kaynağında kullanılmamaktadır. Büyük oranda çelik malzemelerin kaynağına uygundur. MIG kaynağında olduğu gibi doğru akım kullanılmakta ve elektrot genellikle (+) kutba bağlanmaktadır. Akım şiddeti ayarlanarak ergime kabiliyeti ve bu sayede nüfuziyet kontrol edilebilmektedir. Torç parçaya olabildiğince dik tutularak, kısa ark boyları (1-2 mm) ile çalışılmaktadır. Ark boyunun büyümesi sıçrantı ihtimalini arttırmakta ve gaz kabarcığı oluşumuna sebep olmaktadır. Bütün pozisyonlara uygun bir kaynak yöntemi olması, karbondioksit gazının argon gazına oranla daha az maliyetli olması, yüksek nüfuziyet, yüksek hızda çalışma imkânı sağlaması ve MIG kaynağına oranla Ultra viyole (UV) ışınlarının az olması sebebiyle boru hatlarının kaynağında tercih edilerek kullanılmaktadır. Uygulama sırasında sahanın olumsuz çevre şartlarından etkilenmemesi için rüzgâr ve tüm yabancı maddeleri engelleyecek şekilde tasarlanmış çadırlar kullanılmaktadır. Kök pasosu dahil tüm kaynak pasolarında uygulanabilir bir yöntemdir. (Anık, 1991) (Sezgin, 2019) (Hüyüktepe, 2019)



Şekil 3.8. Koruyucu Gazların Kaynak Havuzu Üzerindeki Etkileri.

MIG/MAG kaynak yöntemi ile elektrik ark yöntemi karşılaştırıldığında;

Avantajları

- Elektrik ark kaynağındaki gibi tükenen ve değiştirilmesi gereken elektrot bulunmadığından daha hızlıdır.
- Cüruf oluşturmadiğından hem cüruf temizleme süresini hem de kaynak pasoları arası cüruf sıkışma riskini ortadan kaldırmaktadır. Daha temiz kaynak dikiş i elde edilmektedir.
- Sürekli beslenen elektrotun çapı düşük olduğundan yüksek akım yoğunluğu oluşturup hızlı metal ergiterek doldurma kapasitesini arttırmaktadır.
- Düşük hidrojen miktarı sayesinde kaynağın içerisinde hidrojen sıkışma riskini azaltmaktadır.
- Derin nüfuziyet sağladığından köşe kaynaklarına uygundur.
- İnce malzeme kaynak kabiliyeti daha yüksektir.
- Yarı otomatik ve otomatik kaynak kullanımına elverişlidir.

Dezavantajları

- Elektrik ark kaynak ekipmanlarına göre daha maliyetli ekipmanlardır.
- Kaynak torcunun çapı büyük olduğundan karmaşık ve dip köşelerde kaynak kabiliyeti düşüktür.
- Kaynak sonrası elektrik ark kaynağında oluşan cüruf gibi bir koruyucu tabaka bulunmadığından soğuma hızı yüksektir. Bu sertleşme eğilimiyle birlikte çatlak riski oluşturmaktadır. Bunun önlenmesi için kaynak sonrası ek koruyucu ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Kullanılan Ekipmanlar ve Sarf Malzemeleri

Kaynak torcu: Kaynak telinin ve koruyucu gazın kaynak bölgesine uygun şekilde akışını sağlayan kaynağı başlatıp kaynak havuzunun kontrolü ile birleştirmeyi gerçekleştiren ekipmandır (Şekil 3.9’da 1 numaralı ekipman).

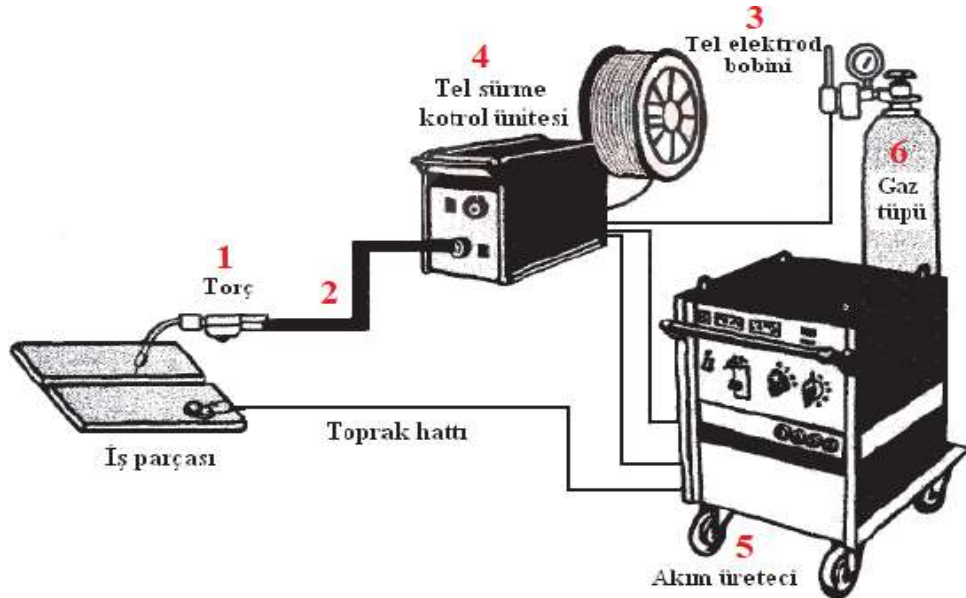
Metal spiral takviyeli torç bağlantı hortumu: Tel şeklinde beslenen elektrodun ve muhafazasının, kaynak kablusunun, koruyucu gaz akış hortumunun ve soğutma suyu giriş/çıkış hortumlarının bulunduğu torç ile üniteler arasında bağlantı sağlayan spiral hortumdur (Şekil 3.9’da 2 numaralı ekipman).

Tel elektrot bobini: Kontrol ünitesiyle birlikte hortum içerisinden torcun ucuna beslemeyi sağlayan kesintisiz tel elektrot (Şekil 3.9’da 3 numaralı ekipman).

Kontrol ünitesi: Kaynak akımını, koruyucu gaz ve soğutma suyu akışı ile tel elektrodun hareketini senkronize bir şekilde gerçekleştiren kumanda merkezidir (Şekil 3.9’da 4 numaralı ekipman).

Kaynak akım Üreteci: Kaynak için ihtiyaç duyulan elektrik akımının üretildiği ve kablolar vasıtası ile kontrol ünitesi üzerinden torca akımı ulaştıran üreteçtir (Şekil 3.9’da 5 numaralı ekipman).

Koruyucu gaz tüpü: Kaynak havuzunun çevrenin olumsuz etkilerinden uzaklaştırılması için ihtiyaç duyduğu, üzerinde basınç düşürme ventili ve gaz debi göstergesi olan gaz tüpü (Şekil 3.9’da 6 numaralı ekipman). (Sezgin, 2019)



Şekil 3.9. MIG/MAG Kaynak Ekipmanları. (Sezgin, 2019)

3.2 Otomatik Kaynak

Gaz altı kaynak yöntemleri olan MIG – MAG kaynak yöntemlerinin mekanize edilmiş halidir. Temelinde elektrik ark yöntemine benzemektedir. Kaynak için gerekli ertitmeyi sağlayan ısı, devamlı beslenen ve ergiyen bir elektrotla kaynak banyosu arasında oluşan ark ve akımın elektrot üzerinde oluşturduğu direnç yoluyla üretilir. Elektrot çıplak bir tel olup, mekanize bir besleme ünitesiyle sabit hızda kaynak havuzuna sevk edilir. Kaynak banyosu ve çıplak tel, atmosfer kirleticilerine karşı torcun ucundan gelen bir gaz veya gaz karışımı (CO_2 , $\text{Ar} + \text{CO}_2$) ile korunur. (Gençkan, 2004) (EWM Group, 2020) (Kaba, 2009)

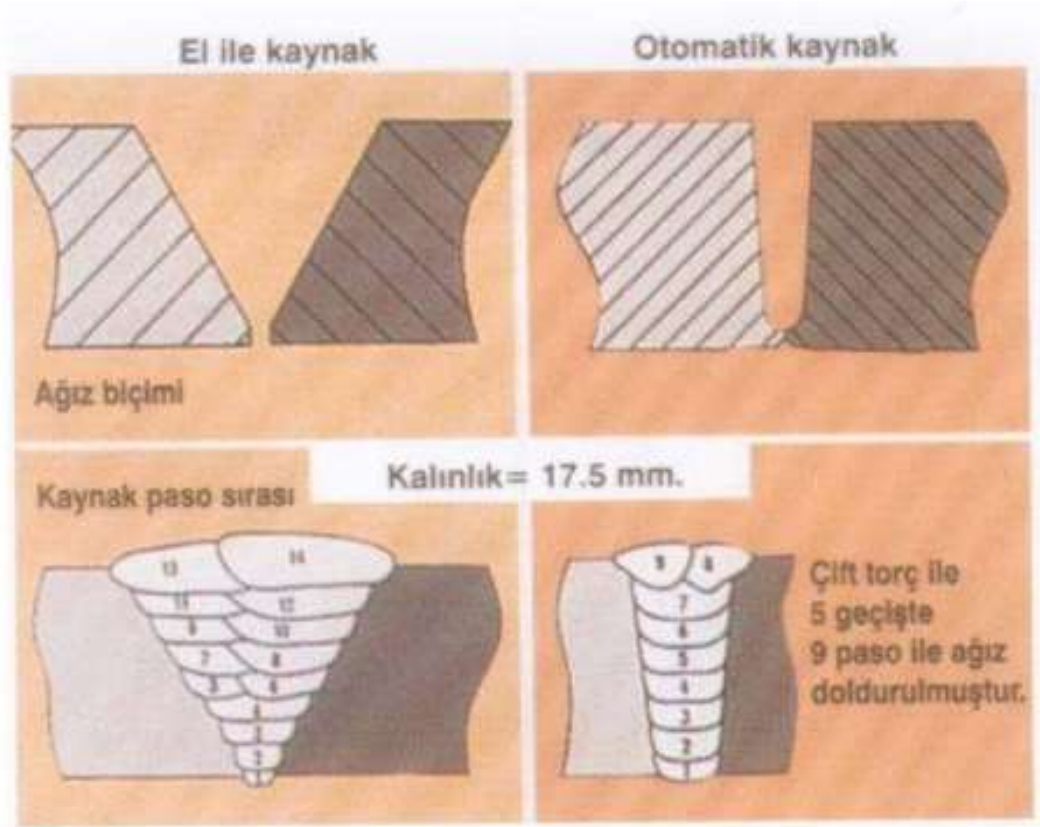
Boru hatlarında ihtiyacın doğmasıyla birlikte hem içten hem dıştan kaynak atabilen makineler tasarlanmıştır. Kaynak ağzı kusurlarını da ortadan kaldırmak için kaynak ağzını hazırlayan ve boruları ağızlayan otomatik kaynak makineleri mevcuttur. (Gençkan, 2004) (EWM Group, 2020)



Fotoğraf 3.3. Otomatik Kaynak Makinesi.

İç ve dış olarak 2 ana üniteden oluşmaktadır. Uygulama, kaynak ağzı açıldıktan sonra aynı zamanda kaynağa imkân kılan hidrolik tahrikli bir iç kelepçenin boruları ağızlaması ile başlar. Kullanılan çıplak tel elektrik ark yönteminde kullanılan elektrotlardan ince olduğundan şekil 3.10’da gösterildiği gibi daha küçük bir kaynak ağzı açıklığı bırakılır. İç kaynak makinesi ile kök kaynağı atıldıktan sonra dış kaynak makinesi ile diğer pasolar atılmaktadır.

Makineler 24” ‘den 60” çapındaki borulara kadar hizmet vermekte olup çap büyüklüğüne göre torç sayısı değişmektedir. Yapılan tüm işlem aşamaları kaynak esnasında koruyucu gazın dağılmasını engellemek amacıyla çadır altında gerçekleştirilmektedir. Tüm safhalar ne kadar mekanize bir ünite olsa da eş zamanlı olarak takip ve tecrübe gerektirmekte olduğu unutulmamalıdır. (EWM Group, 2020)



Şekil 3.10. Manuel ve Otomatik Kaynak Yöntemi Kaynak Ağzıları. (Kaluç & Tülbentçi, 2001)

Otomatik kaynak yöntemiyle insan faktöründen kaynaklı hatalar minimize edilmiş hızlı ve güvenli çalışma ortamı sağlanmıştır.

4. DOĞALGAZ VE PETROL BORULARI KAYNAK UYGULAMASI

4.1 Kaynağa Hazırlık

Sahada ağızları kapalı şekilde dizili olan borular kaynağa başlanmadan önce kapakları çıkarılarak çıplak kısım toz, yağ ve paslardan arındırılmalıdır. Ağız kısımları çelik fırça ile temizlenmelidir. (Kaba, 2009)

4.2 Çevre Şartlarının Kontrolü

Borular ağızlanmadan önce yağış durumu, rüzgâr, toz vb. dış etmenler tespit edilerek gerekli önlemler alınmalıdır. Bu önlemlerin başında Fotoğraf 4.1’de görülen kaynak çadırı gelmektedir. Hava şartlarının çok sertleştiği durumlarda bağlantının ehemmiyeti göz önünde bulundurularak işin durdurulması gerekebilmektedir.



Fotoğraf 4.1. Kaynak Çadırı ve Kaynak Battaniyesi.

Hava sıcaklığının düşük olduğu durumlarda kaynak ağzı hazırlanıp, kaynak işlemine başlamadan önce gerekli olan ön ısıtma ısı tebeşiri/ısı tabancası vasıtasıyla muhakkak kontrol edilmelidir. Isınmanın noktasal değil çevresel, soğumayı geciktirecek şekilde yapılması gereklidir. (Kaba, 2009)

4.3 Kaynak Ağzını Hazırlama

Çevre şartlarına karşı gerekli tedbirler alındıktan sonra hatasız ve kaliteli bir kaynaklı bağlantı yapabilmek için öncelikle kaynak ağzının uygulanacak kaynak yöntemine göre hazırlanması ve boruların ağızlanabilmesi için ağız kısım geometrilerinin karşılıklı olarak uyumlu olması gereklidir.

Boyuna kaynaklı, düz dikişli borularda dikiş noktasında düzleşme, spiral dikişli borularda ise spiral kısmında çatılma olarak ovaliteler oluşabilmektedir. Kabul sınırları içerisinde olan boruların ağızları içten ve dıştan fırça ile temizlenmelidir. Sonrasında kaynak prosedüründe ön görülen kaynak ağzı pahi kontrol edilmeli, ağızdaki dalgalanmalar, spiral kaynak, çentikler vb. durumdan kaynaklı süreksizlikler taş motoru veya kaynak ağzı hazırlama için tasarlanmış ekipmanlar ile temizlenerek son kontrolleri yapılmalıdır. (Komaç, 2014) (Boru Hattı (Pipe Line) İnşaatında Kaynağın Yeri ve Önemi) (Geliş, 2014) (Ertürk & Selamoğlu)

Kaynak ağzı hazırlanmasında uygulanan yöntemler aşağıda listelenmiştir.

- Oksijen ile keserek kaynak ağzı açma
- Plazma ark yöntemi ile keserek kaynak ağzı açma
- Mekanik yöntemler ile talaş kaldırılması ile kaynak ağzı açma



Şekil 4.1. Boru Kesme ve Kaynak Ağzı Hazırlama Ekipmanı. (Direct Industry, 2022)

4.4 Boruları Ağızlama

İki boru ucunun birbirine kaynaklı bağlantısı öncesinde boruların hizalanması ve aynı eksende tutulmasını gerekmektedir. Boruların ağızlanmasında farklı donanımlar kullanılmakla birlikte, bu donanımların seçilmesindeki en önemli faktörler;

- Boru çapı
- Kaynak yöntemi
- Kaynak prosedürüdür.

Yukarıdaki faktörler göz önüne alınarak kaynağa vermek üzere boruları uç uca getirmek için iç veya dış kelepçeler kullanılır.

4.4.1 İç Kelepçe

Hidrolik ve Pnömatik olarak tasarlanmış olan ekipman uç uca getirilmiş boruların ağız kısımlarına yürüyüş takımlarıyla ilerleyerek, her iki boruya da radyal bir kuvvet uygulayıp hem eksenel kaçıklığı almakta hem de kaynak açıklığını sağlamaktadır. İ kelepçe kullanımının artı ve eksi yönleriyle incelersek; (Pneumatic Internal Pipe Clamp, 2022)

- İki boru arasında sökme/takma ve taşıma gerektirmediğinden kaynak prosesini hızlandırmaktadır.
- Boru cidarına iç bası uyguladığından ve gücü her bir piston için ayrı ayrı verebildiğinden eksen kaçıklığını ve ağız ovalite kaynaklı kusurları en aza indirmektedir.
- Yüksek et kalınlıklarında çalışmaya elverişlidir.
- Eğimli alanlarda dış kelepçeye oranla operasyon rahatlığı sağlamaktadır. İş kazası riskini azaltmaktadır.
- Dış kelepede eksen kaçıklığını giderme esnasında yaşanan darbeye ve ezilmeye bağılı hataları minimuma indirmektedir.
- Boru içerisinden yürütölüyor olması ve hidrolik/pnömatik ekipmanların hacim kaplamasından dolayı 12” çapın altında kullanımı yaygın değıldir.
- Tie-in (Kaynaklı bağlantıları gerçekleştirilmiş uzun boru hatlarının birbirine bağlantı kaynağı) bağlantılarında, kaynak bölgesine içeriden ilerleme mesafesinin uzun olmasından dolayı götürölememektedir. Dirsek, Tee gibi bağlantılarda kısıtlı imkân sağlamaktadır.
- Profesyonel bir ekip aracılığıyla kullanılması gerektiğinden ve hava kompresörü, jeneratör, yüksek basınçlı ekipmanlar vb. ile çalıştığından dolayı ek maliyetler doğurmaktadır.
- Kompleks bir yapıya sahip olduğundan pahalı bir ekipmandır ve arıza verme ihtimali yüksek olup tamiratı zaman almaktadır.



Fotoğraf 4.2. İç Kelepçe ile Boru Ağızlama. (The Validation Center, 2020)

4.4.2 Dış Kelepçe

Kafes yapısında bir noktasından döner, diğer noktasından kilitlemeli bir mekanizmaya sahip ekipman, uç uca getirilmiş olan boruya çap boyunca belirli noktalardan temas ederek eksen kaçıklığını gidermekte ve kaynak açıklığını sağlamaktadır. Dış kelepçe kullanımını artı ve eksi yönleriyle değerlendirirsek;

- 2"- 60" çapındaki borular için kullanıma uygundur.
- Boru hatlarında tie-in kaynaklarında iç kelepçe kullanılamayacağından tüm bu bağlantılarda kullanılmaktadır.
- 12" altındaki borularda, dirsek, kaynak boyunlu flanş, tee, redüksiyon, kep ve ara bağlantıların tümünde uygulanabilmektedir.
- Materyal ve çalışma prensibi olarak basit bir yapıda olduğundan ek maliyet doğurmamaktadır.
- Büyük çaplarda kelepçenin taşınmasında ve özellikle eğimli bölgelerde uygulamasında zorluklar yaşanmaktadır.
- El ile operasyon gerçekleştirildiğinden kaynak aktivitesi iç kelepçeye göre daha yavaş ilerlemektedir.
- Boru ağzındaki ovaliteyi ve eksenel kaçıklığı boru dış cidarından her iki boruya birden bası uygulayarak aldığından dolayı iç kelepçeye oranla daha fazla hataya sebebiyet vermektedir.
- Boru ağzılama esnasında kelepçenin boru yüzeyine tam oturmasını ve uygun eksene gelmesini sağlamak için uygulanan darbeler sonucu boru dış cidarında mekanik hasarlara sebebiyet verebilmektedir.

Dış kelepçe uygulamasını özetlersek, kelepçenin içerisine alınan borular Fotoğraf 4.3'deki şekilde kaynak ağız mesafesi, eksenel kaçıklık ve boruların ağız geometrisi kontrol edilerek sabit konuma getirilir. Göz ile kontrol sağlandıktan sonra, ağız geometrisini ölçen ekipmanlar ile kök kaynağının atılacağı açıklık kontrol edilir. İhtiyaç olması halinde borunun taşıyıcı makine ile hareketi sağlanıp kaynak ağızına çakılan kamalardan da faydalanılarak mesafeler ayarlanır, puntalama işlemi ile kök pasosuna hazır hale getirilir. (Boru Hattı (Pipe Line) İnşaatında Kaynağın Yeri ve Önemi) (Komaç, 2014) (Geliş, 2014)



Fotoğraf 4.3. Dış Kelepçe ile Boru Ağızlama.

4.5 Isıl İşlem

Boru malzemesi ile ilave kullanılan elektrot metalinin en iyi şekilde uyum sağlaması, çeliğin ani ısınmaya karşı vereceği soğuk çatlama tepkisinin önlenmesi için boru malzemesine ortam şartlarına ve verilen prosedürlere uygun ön tavlama yapılmalıdır. Bu aynı zamanda sabah erken saatlerde ve soğuk havalar da boru yüzeyinde oluşan rutubeti uzaklaştıracaktır.

Isıl işlem aynı zamanda her kaynak pasosundan önce hem malzemedeki gerilmeleri gidermek hem de oluşabilecek ani soğumaların önüne geçmek için uygulanmalıdır. Bu sayede soğuk çatlakların ve hidrojen kaynaklı hataların önüne geçilmiş olacaktır.

Isıl işlemler onaylı prosedürlerde belirtildiği aralıklarda yapılmalıdır. Kontrolleri ısı tebeşiri veya ısı tabancaları vasıtasıyla kontrol edilmelidir. (Komaç, 2014)

4.6 Kaynak Pasoları

Boruların et kalınlığına göre kaynak ağız bölgesinin doldurulabilmesi için gereken ilave malzeme miktarı değişmektedir. Kaynak prosedüründe belirtilen elektrot cinsi ve çapına uygun şekilde kaynak paso doldurma kabiliyeti ve sayısı belirtilmektedir. Elektrotun kalınlığı ve cinsi, uygulanacak kaynak yöntemi, aynı mesafede farklı paso kalınlıklarına sebebiyet vererek paso sayısını etkilemektedir. (Kaba, 2009)

4.6.1 Kök Paso

Boruların birbirine ilk bağlantısının verildiği ve en hassas imalat gerektiren pasodur. Nüfuziyet ve süreklilik çok önemlidir. Elektrot seçimi boru malzemesi et kalınlığı ve çapa göre seçilmeli, mümkün olduğunca ilave ergiyen metalin yumuşak olmasına özen gösterilmelidir. Elektrik ark yönteminde kök pasoda genellikle 2.5 mm ve 3.25 mm kalınlığında elektrotlar üreticinin (-) kutubuna bağlanarak kullanılır.

Uygulanması esnasında çok faz salınım hareketi verilmeden boru iç kısmına nüfuziyet hassas takip edilerek kaynak yapılmalıdır. Kaynak arkında oluşan cürufun nüfuziyeti yüksek olduğundan ve kaynağın en önemli kısmını oluşturduğundan kaynak sonrası taş motoru ile temizliğe çok dikkat edilmelidir. Temizlik esnasında kök çok inceltilmemeli delinmemelidir.

Kök pasosu mukavemeti çok yüksek olmadığından dolayı boru kesinlikle hareket ettirilmeden diğer pasoya geçilmelidir. (Boru Hattı (Pipe Line) İnşaatında Kaynağın Yeri ve Önemi) (Kaba, 2009)

4.6.2 Sıcak Paso

Kök pasonun atılmasının ardından temizlik sonrası zaman kaybetmeden ön tavlama yapılarak sıcak paso atılmaktadır. Üreteç (+) kutupta köke oranla yüksek amperde uygulanır. Boru malzemesiyle emişmeyi gerçekleştirebilmek için kaynak el hareketleri kullanılmaktadır. Kaynak sonrası temizliğine dikkat edilmelidir. (Boru Hattı (Pipe Line) İnşaatında Kaynağın Yeri ve Önemi) (Kaba, 2009)

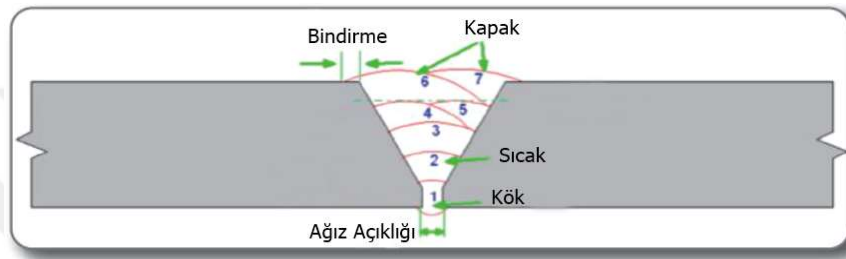
4.6.3 Dolgu Paso

Sıcak pasonun temizlenmesinin ardından ön tavlama yapılarak dolgu pasosuna geçilir. Malzemenin et kalınlığına ve kaynak ağzının açıklığına göre birden fazla dolgu pasosu atılabilir. Boru malzemesine emişmeyi sağlayabilmek için sıcak pasosunda olduğu gibi kaynak el hareketleri kullanılmaktadır. Boru malzemesinin sıfırına kadar kaynak ağzı doldurulacak şekilde kaynak yapılmalıdır. Elektrot başlangıç ve bitirişlerinde malzeme kalınlıkları ve cüruflar gözetilerek

temizlik yapılmalıdır. (Boru Hattı (Pipe Line) İnşaatında Kaynağın Yeri ve Önemi) (Kaba, 2009)

4.6.4 Kapak Paso

Kaynağın görünür kısmını oluşturduğundan kaynak el hareketlerini düzgün vermeye özen gösterilmelidir. Önceki pasolardaki kadar taş motoru ile temizleme imkânı bulunmadığından tek seferde yüksek kalitede kaynak yapılmalıdır. Kaynak genişliği ve yüksekliği, başlangıç ve bitiş noktalarındaki bindirmeler prosedürde gösterilen geometrik limitlerin dışına çıkmamalıdır. (Boru Hattı (Pipe Line) İnşaatında Kaynağın Yeri ve Önemi) (Kaba, 2009)



Şekil 4.2. Kaynak Pasoları.

4.7 Kaynak Sonrası İşlemler

Kaynaklı bağlantısı tamamlanan borunun kapak pasosundaki cürufırları, boru malzemesinde ve kaynak üzerinde oluşan sıçrantılar titizlikle temizlenmelidir. Kapaktaki kaynak yükseklikleri eğe yardımıyla boru malzemesine zarar vermeden temizlenmelidir.

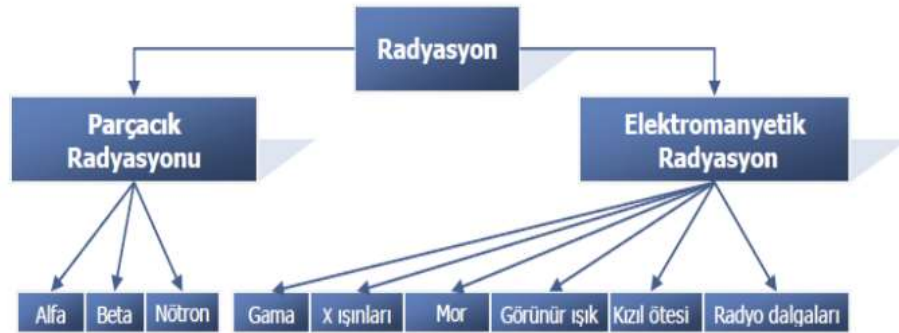
Kaynakta tamir yapılması gerektiği durumlarda belirlenen metrajlar taş motoru ile derinlik verisine göre hatayı tespit edene kadar temizlenmelidir. Ön tavlama yapıldıktan sonra kaynağı kapak seviyesine gelene kadar yapılmalıdır. Tamir kaynakları uç uca bağlı uzun borularda gerçekleştirildiğinden dolayı köke kadar olan yarmalarda ve bağlantının tamamen kesilerek yapıldığı birleştirmeler de hava akımının etkisine çok maruz kalınmaktadır. Kaynak yapılmadan önce bu hesaba katılarak gerekli önlemler kesinlikle alınmalıdır. (Kaba, 2009) (Komaç, 2014)

5. DOĞALGAZ VE PETROL HAT BORULARI RADYOGRAFİK MUAYENE YÖNTEMLERİ

5.1 Radyoaktivite

Radyasyon, atom altı parçacıklar formunda iç dönüşüm geçirerek veya elektromanyetik dalgalar yayabilen bir kaynaktan yayımlanan, boşlukta ve madde içerisinde ilerleyebilen enerji salınımı ve aktarımıdır. Kaynağın yapısına göre enerji salınımı, parçacıklar veya elektromanyetik dalgalar tarafından gerçekleştirilmektedir (Şekil 5.1). Radyasyonu tanımlayan parametreler; (Köse, 2014) (Yaşar, 2010)

- Enerjisi (Düşük veya yüksek enerjili)
- Yayanım türü (Parçacık veya elektromanyetik)
- Kaynağı (Doğal veya yapay)
- Aktivitesi



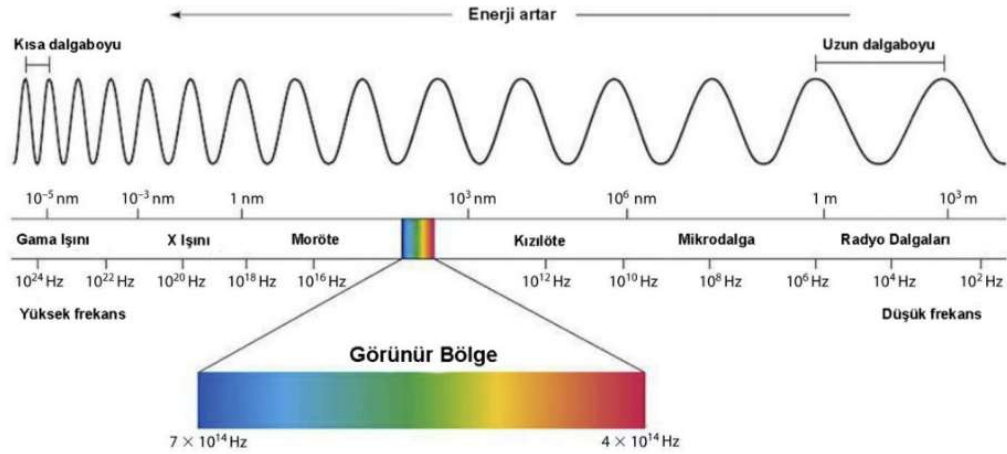
Şekil 5.1. Radyasyon Türleri. (Köse, 2014)

İyonize Radyasyon

Atomdan elektron koparabilecek yani iyonize edebilecek enerji seviyelerine sahiptir bu yüzden yüksek enerjili radyasyon olarak tanımlanır. Alfa, Beta, Gama ve X-Işınlarıdır.

İyonize Olmayan Radyasyon

Etkileşim içerisinde olduğu maddeyi iyonize edemez sadece uyarabilmektedir, bu yüzden düşük enerjili olarak tanımlanır. Radyo dalgaları, kızılötesi ve mor ötesi ışık, görünür ışık ve mikrodalgalar örnek verilebilir.



Şekil 5.2. Elektromanyetik Dalga Spektrumu. (Türkiye Zeka Vakfı, 2021)

Elektromanyetik dalgalar, dalga boyları ve buna bağlı olan frekans (bir saniyede tekrarlanan dalga sayısı) ve enerjilerine göre sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırmaya elektromanyetik dalga spektrumu denmektedir (Şekil 5.2). Elektromanyetik spektrum üzerinde incelediğimiz tüm radyasyonlarda yüksüz ve kütsüz fotonlar tarafından enerji taşınımı gerçekleşmektedir. İyonize edici elektromanyetik radyasyon çekirdekten yayımlanıyorsa gama yörüngeden yayımlanıyorsa X-ışını olarak ifade edilmektedir. (Yaşar, 2010)

Kaynaklı birleştirmelerin tahribatsız muayenesinde iyonize radyasyon kullanılarak yapılan radyografik muayeneler en yaygın yöntemlerdir.

Işıma yoluyla ortaya çıkan elektromanyetik enerjiyi sayısal olarak ifade etmek gerekirse, foton enerjisi, kuantum olarak bilinen “*paket enerji*” olarak tanımlanır ve frekans ile doğru orantılı olarak;

$$E = h \times V$$

h: Planck sabiti – [6.626176 E-34 J x Hz-1]

V: elektromanyetik radyasyon frekansı [Hz] olarak ifade edilir. (Deligöz, 2010)

Denklemdaki frekans ise;

c: Işık hızı [m/sn]

λ_0 : Dalga boyu [m, A_0] olmak üzere, aşağıdaki gibi ifade edilebilir. (Deligöz, 2010)

$$V = c / \lambda_0$$

Elektronvolt, bir elektronun vakum ortamında 1 V potansiy farkı oluşturması için vermesi gerekli enerji miktarını ifade eden bir sabit değerdir.

$$1 \text{ eV} = 1.602176 \text{ E-19 Joule}$$

Işık hızı 300 E+6 m/s olarak hesap edilerek yukarıdaki denklemler birleştirilirse aşağıdaki eşitlik elde edilir. (Deligöz, 2010)

$$E = h \times c / \lambda_0$$

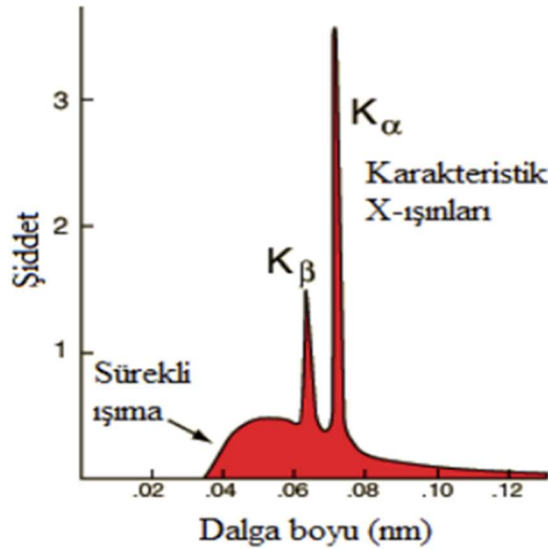
Bu yeni eşitlikte h ve c değerlerini yerine koyarsak ve eşitliği endüstriyel uygulamalarda tercih edilen dalga boyunu Armstrong cinsinden belirtirsek, elektromanyetik radyasyon enerjisi kiloelektronvolt cinsinden şöyle ifade edebiliriz. (Deligöz, 2010)

$$E (\text{keV}) = 12.4 / \lambda_0 (\text{\AA})$$

5.1.1 X-Işını ve Spektrumu

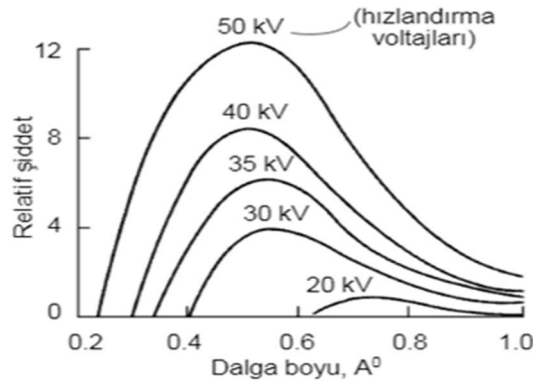
X-ışınımı, elektronların uyarılarak bir üst enerji seviyesine çıkıp ardından kararlı duruma gelmek için bir alt enerji seviyesine inmesiyle meydana gelmektedir. Ortaya çıkan bu enerji farkı foton için elektromanyetik radyasyon enerjisini dolayısıyla x-ışınımı oluşturmaktadır. (Deligöz, 2010)

Atomda meydana gelen x- ışınımı sonucu yayılan enerji yörüngeler arasındaki fark kadar olduğundan, her zaman sabit ya da karakteristik bir özellik göstermesiyle birlikte *Karakteristik X-Işını* olarak ifade edilir. Malzeme giricilikleri düşüktür. (Deligöz, 2010) (Yıldırım, 2015)



Şekil 5.3. Molibden Hedefinde 35 keV X-ışınımından Elde Edilen Spektrum.
(Küçük, 2018)

Atomun çekirdeğine gelen yüksek hızlı elektron demeti, çekirdeğin pozitif yükündeki elektrik alandan etkilenir, ivmeli hareket eder ve dışarıya fotonlar yayar. Sürekli bir enerji spektrumundaki fotonlar *Sürekli X-Işınları* olarak adlandırılır. Enerji atılması sonucu, enerjideki azalma ile ortaya çıkan sürekli x-ışınlarına bremsstrahlung (frenleme ışıınımı) da denilmektedir. (Deligöz, 2010) (Yıldırım, 2015)



Şekil 5.4. Tungsten Hedefinde X-ışınımı Kaynaklı Sürekli Işıınım Spektrumu.

5.1.2 Gama Işınları ve Spektrumu

Radyoaktif çekirdek, atom çekirdeklerinin parçacık ve enerji salınımıyla kendiliğinden bozunmasıdır. Bu bozunma olayı çekirdek kararlı duruma geçinceye kadar devam etmektedir. Kararlı olmayan çekirdekler ise “*radyoizotop*” olarak adlandırılmaktadır. Elektromanyetik radyasyon özelliğine sahip bu radyoizotopların yaydığı radyasyona Gama(γ) ışıması denir. (Deligöz, 2010) (Yıldırım, 2015)

Doğal radyoizotoplar, doğada kendiliğinden bulunan kararsız çekirdeklerdir. Örnek olarak Radon-222 ve Radyum-226 verilebilir.

Yapay radyoizotoplar ise atom çekirdeğine yapılan nötron bombardımanıyla elde edilir. Reaktörlerde gerçekleştirilen bu işlemde çekirdeğin kütle numarasının artması sonucu izotopun kararsız hale gelerek, radyoaktif olmasıdır. Üretilen bazı radyoizotoplar kısa yarı ömre sahip iken radyografide gama kaynağı olarak yaygın kullanılan Iridyum-192, Kobalt-60 ve Selenyum-75 endüstri uygulamalarında kullanılabilecek yarı ömre sahiptirler (Tablo 5.1). (Deligöz, 2010) (Yıldırım, 2015) (Yaşar, 2010)

Tablo 5.1. Endüstriyel Radyo İzotopların Çelik Malzeme Nüfuziyetleri. (Deligöz, 2010)

Radyoizotop	Uygulamada Et Kalınlığı (Çelik) – mm	Toplam Penetrasyon – mm
İridyum 192	12 – 62	100
Kobalt 60	19 – 150	250
Sezyum 137	5 - 30	40

Gama ışınlarının yükü ve kütlesi yoktur, ışıma sırasında çekirdeğin kütle ve atom numarası değişmez ve çekirdek başka bir çekirdeğe dönüşmez. İyonlaştırıcı özellikleri meydana getirdikleri elektronlarla (fotoelektron, Compton elektronu) sağlanır. (Dolaylı iyonizasyon). Ortaya çıkan enerjileri 3 MeV den fazla değildir. (Yıldırım, 2015)

Radyoaktivitenin Ölçülmesi, Bozunma ve Yarı Ömür

Radyoaktif bir maddenin aktifliğini gösteren birim “Curie”dir. Radyoaktif maddenin 1 saniyede 3.7×10^{10} atom bozunmaya uğraması 1 curie’yi ifade eder. SI birim sisteminde ise Becquerel kullanılır ve saniyede 1 parçalanma yapan çekirdeğin aktivitesini ifade eder. (Deligöz, 2010) (Yaşar, 2010)

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ bozunma/saniye}$$

Her radyoaktif çekirdek birim zamanda belirli oranda bozunuma uğrar. Bu bozunma hızı her radyoizotop için belirli bir değerdir. (Deligöz, 2010)

Sayısal olarak ifade etmek gerekirse N adet atom içeren radyoizotopun bozunma sabiti λ ise;

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \times N$$

Radyoizotopun başlangıçtaki atom sayısı N_0 olarak kabul edilirse aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$N = N_0 \times e^{-\lambda t}$$

Radyoaktif atom sayısının başlangıçtaki atom sayısının yarısına düşmesi için geçen süre ise “yarı ömür” olarak adlandırılır.

$$N_0/2 = N_0 \times e^{-\lambda t_{1/2}}$$

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda$$

Yarı ömür radyoizotopun miktarına bağlı değildir. Tablo 5.2’de görüldüğü üzere azalma radyoizotopun atomik yapısıyla ilgilidir ve bir süre sonra radyoizotopun aktivitesi (enerjisi) kullanılamayacak kadar azalır. (Deligöz, 2010)

Tablo 5.2. Bazı Gama Işıma Kaynaklarının Özellikleri. (Deligöz, 2010)

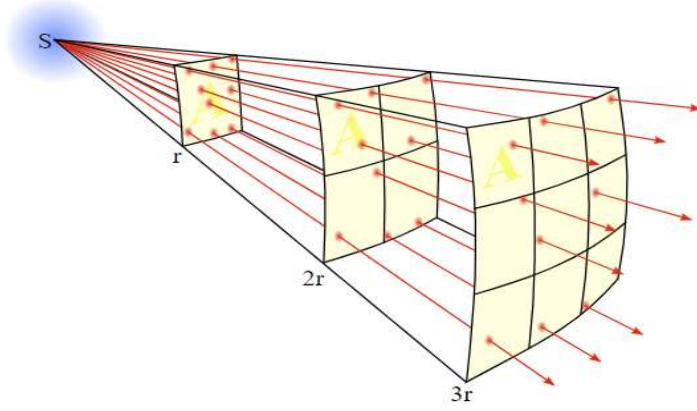
Radyoizotop Cinsi	Açıklama	Gama Enerji (MeV)	Yarı Ömür	Tavsiye Edilen Malzeme Kalınlığı	Boyutu	Doz Hızı (RHM)
Doğal	Ra-226	0.6, 1.12, 1.76	1590 Yıl	5 – 15 cm Çelik	2 x 2	0.83
Doğal	Rn-222	0.6, 1.12	3.825 Gün	5 – 25 cm Çelik	0.5 x 0.5	0.83
Yapay	Co-60	1.17, 1.33	5.3 Yıl	5 – 20 cm Çelik	1x1 – 4x4	1.35
Yapay	Cs-137	0.667	33 Yıl	2 – 10 cm Çelik	1x1 – 3x3	0.35
Yapay	Ir-192	0.29, 0.58, 0.60, 0.61	74.3 Gün	0.5 – 6 cm Çelik 1 – 10 mm Al	0.5x0.5 – 6x6	0.50
Yapay	Tm-170	0.084	127 Gün	0.5 cm Çelik 0.2 – 1.2 cm Al	2x3 – 3x3	0.0045

Radyasyon Şiddeti ve Ters Kare Kuralı

Elektro manyetik dalgaların yayılımı ters kare kanununa uymaktadır. Işığın uzayda üç boyutlu küresel biçimde yayılmasından dolayı merkezinde radyasyon kaynağı olan r yarıçaplı kürenin yüzeyindeki radyasyon miktarı, aynı merkezli 2r yarıçapındaki kürenin yüzeyindeki radyasyon miktarına eşit olacaktır. Bu da demek oluyor ki radyasyon şiddeti kare yüzey için 2r yarıçapında 4 kat azalmaktadır (Şekil 5.5). (Yaşar, 2010) (Yıldırım, 2015)

$$I_1 / I_2 = r_2^2 / r_1^2$$

Radyografi açısından değerlendirildiğinde film mesafesi 2 kat arttığında aynı film yoğunluğunu elde etmek için pozlama süresini 4 kat arttırmak gerekecektir.



Şekil 5.5. Ters Kare Yasası Radyasyon Şiddeti Mesafe İlişkisi.
(Yıldırım, 2015)

Elektromanyetik Radyasyon ile Etkileşim

Gama ve X ışınları, bir madde üzerine düşürüldüğünde bir kısmı cismin üzerinden geçebilmekte bir kısmı saçılmakta bir kısmı ise malzeme tarafından soğurulmaktadır. Işınların malzeme üzerinden geçmesi sırasında kaybedilen radyasyon miktarı ışının enerjisine, malzeme yoğunluğuna ve kalınlığına bağlıdır.

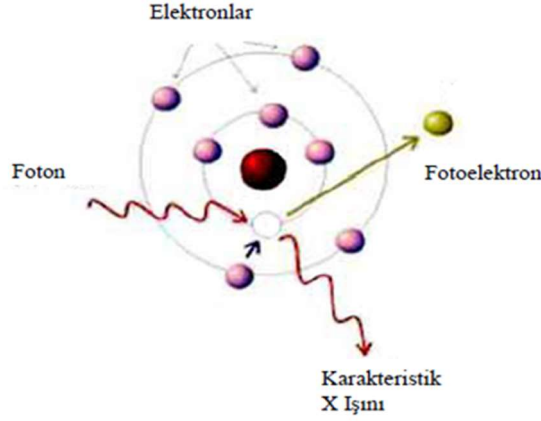
X kalınlığında bir malzeme için I_0 şiddetinde bir ışının I kadarı cismi geçebilecektir. μ doğrusal soğurma katsayısı ve x radyasyonun geçtiği malzeme kalınlığı olmak üzere aşağıdaki eşitlik ifade edilebilir.

$$I = I_0 \times e^{-\mu x}$$

Elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşimini etkileyen ana faktörler aşağıdaki gibidir.

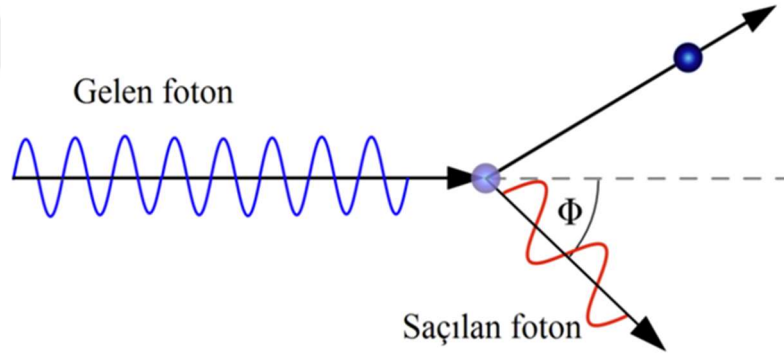
- Fotoelektrik Olay
- Compton Saçılımı
- Çift oluşumu

Fotoelektrik Olay: Düşük enerjili fotonun soğurucu bir atomla çarpışıp tamamının sağırulması “fotoelektrik olay” olarak bilinir. Şekil 5.6’da görüldüğü üzere foton ile etkileşime giren elektron, fotonun enerjisini aldıktan sonra atomdan fırlayarak uzaklaşır. Fotoelektronun atılmasından sonra; dış yörüngeden diğer bir elektron, boşluk bulunan yörüngeye geçer ve bu geçişte karakteristik X ışınları saçılır. (Deligöz, 2010) (Yaşar, 2010)



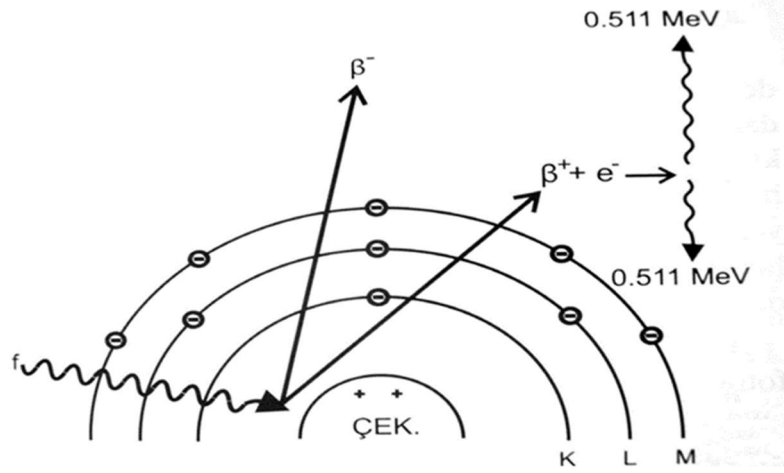
Şekil 5.6. Fotoelektrik Olayı. (Yaşar, 2010)

Compton Saçılımı: Dış yörüngedeki gevşek bağlı eelektron, enerjisi kendisine kıyasla çok daha büyük olan bir fotonla çarpışması ile meydana gelen olaya Compton Saçılması denir. Foton çarpışmayı gerçekleştirdikten sonra enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır, enerjisinin miktarına oranla bir açıda saçılarak yoluna devam eder (Şekil 5.7). (Deligöz, 2010) (Yaşar, 2010)



Şekil 5.7. Compton Saçılımı. (Bilim Fili, 2017)

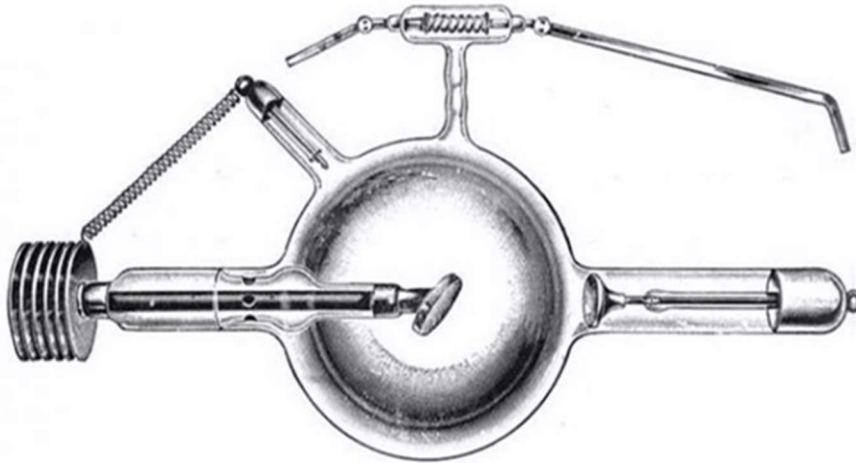
Çift Oluşumu: Enerji seviyesi 1.02 MeV üzerinde olan fotonlar atom çekirdeğinin yakınlarından geçerken çekirdek yakınında aynı anda biri (-) yüklü elektron diğeri (+) yüklü pozitron olmak üzere iki parçacık oluşturur. Bu şekilde elektromanyetik bir dalgadan madde oluşturulmuş olur ve çift oluşumu olarak adlandırılır. (Deligöz, 2010) (Yaşar, 2010)



Şekil 5.8. Çift Oluşumu.

5.2 Radyografik Muayene

Tahribatsız muayene yöntemlerinin geniş bağlamda en eskilerinden olan radyografi muayenesinin temeli X ışınlarının Wilhelm Conrad ROENTGEN tarafından 1900'li yılların sonunda keşfedilmesine dayanır. 1930'lu yıllarda Amerikan donanmasının kaynak muayenesinde kullanmasına kadar sağlık alanında hizmet veren X ışınları endüstriyel alanda tahribatsız muayenenin temelini oluşturmuştur. Çekirdek ile ilgili çalışmaların hız kazanmasıyla Gama ve Nötron ışımlarının da radyografide kullanılmasıyla çeşitlilik artmıştır. (Seçim, 2011) (Salma, 2011)



Şekil 5.9. Crookes X-Işını Tüpü. (Çeyrek Mühendis, 2021)

Radyografi, kaynaktan gerçekleşen iyonlaştırıcı ışımının nüfuziyet kabiliyetinden yararlanarak, malzemenin içerisinden geçirilip görüntü oluşturmak için bir film/panel üzerine aktarılmasıyla uygulanan yaygın bir tahribatsız muayene yöntemidir. Günümüzde radyografi uygulamaları çoğunlukla Ir-192, Se-75, Co-60 gibi gama ışını yayan iyonlaştırıcı radyasyon kaynaklarını bulunduran cihazlar ve X ışını üreten üreteçlerle yapılmaktadır. (Boru Hattı (Pipe Line) İnşaatında Kaynağın Yeri ve Önemi) (Kaba, 2009)

X ve Gama ışınlarının en önemli özellikleri malzeme içine nüfuz edebilmeleridir. Malzemelerin katı ve saydam özellikte olmaması gerekmektedir. İçerisinden geçen ışınlar malzemenin geçtiği bölgesindeki yoğunluk, kalınlık, süreksizlik ve farklı malzeme konsantrasyonlarına bağlı olarak absorbe edilir. Bu ışınların bir kısmının malzemenin içerisinde hapsediği malzemenin diğer tarafına geçemediği anlamına gelmektedir. Bu ışınlar arasındaki karşıya geçen ışınların bir film/panel üzerine düşürülmesi sonucunda oluşturulan fotografik kayıt bize malzeme hakkındaki bilgileri vermektedir. (Kaba, 2009) (Boru Hattı (Pipe Line) İnşaatında Kaynağın Yeri ve Önemi)

Fotografik görüntüde ince ve az yoğun bölgeler koyu, kalın ve yoğunluğu diğer bölgelerden fazla olanlar ise açık olarak görünür. Bu bağlamda yoğunluk farkı oluşturan hacimsel iç hataların tespit edilmesinde etkili bir yöntemdir.

5.2.1 X-Ray Cihazı ile Muayene

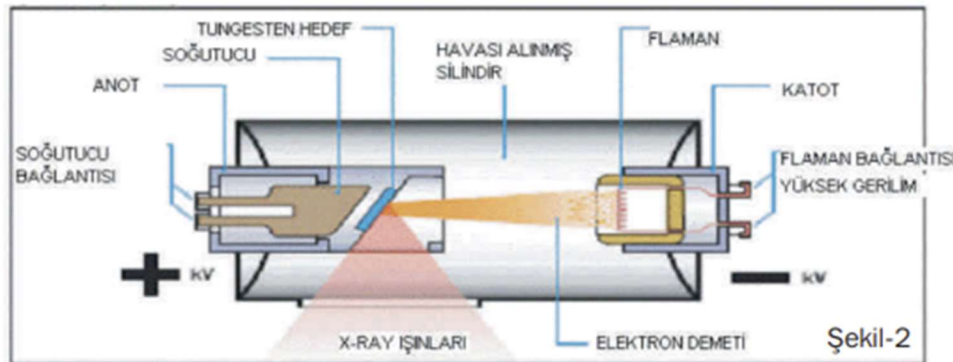
X ışınları üreteçte üretilen elektronların yüksek hızda bombardımanı sonucunda oluşmaktadır. Odaklama kabı (Thungsten Anot), çıkan elektronları tel (Katot) vasıtasıyla yönlendirir. Meydana gelen çarpışma ile yüksek ısı ve X ışınları meydana gelir. Ortaya çıkan yüksek ısıyı uzaklaştırmak için yağ ve su soğutmalı sistemler kullanılır. Oluşan x ışınlarının test edilecek parçanın üzerine gönderilmesi ve ardından malzemeyi geçen ışınların film üzerine yansıtılması sonucunda görüntü elde edilir. X ışınlarının üretiminde demetin şiddeti ve enerjisi (Giricilik Gücü) film kalitesine etki etmektedir. (Salma, 2011) (Seçim, 2011)

X Işını Tüpü ve Soğutulması

X ışınlarının üretimi x ışını tüpleri ile elde edilmektedir. X ışını tüpü, cam veya yüksek termal ve mekanik şoka dayanıklı metal-seramik bir zarf (muhafaza) içine uygun şekilde konumlanmış vakum ortamındaki bir anot ve bir katottan oluşmaktadır. Sistemdeki ısıtılmış tel flaman elektron kaynağı görevi görmektedir. Anoda yüksek pozitif yük uygulanarak, elektronların yüksek hızda hareketi, bununla birlikte katodun negatif yükü de elektronları iterek bir elektron demeti olarak anoda yönelimini sağlamaktadır. Katot anodun içine gömülü hedefe odaklanmıştır. Yüksek hızdaki elektronlar hedefe çarparak kesintisiz şekilde karakteristik x ışınları üretmektedir. Bremstrahlung prosesi olarak bilinen bu sistemde çekirdek, elektronlardan aldığı enerjiyi, yüksek enerjili x ışınları olarak dışarı yayar. Karakteristik x ışınları ise flamandan çıkan yüksek hızdaki elektronların orbital elektronlarla çarpışması sonucu dar bantlı ve yüksek yoğunluklu olarak üretilir. Kaliteli bir x ışını üretebilmek için hedef malzemenin aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekmektedir. (Kınacı, 2019) (Yıldırım, 2015)

- Yüksek atom numarası
- Yüksek ergime noktası
- Düşük buhar basıncı

Yüksek hızlı elektronların hedefe çarpması sonucu elde ettiğimiz x ışınması sırasında oluşan enerjinin çok büyük kısmı ısıya dönüşmekte ve bu ısı hedefin ergimesine, çatlamasına ve kullanılamaz hale gelmesine sebep olabilmektedir. Bu sebeple x ışını tüpünü soğutmak için su veya ısı transferi yüksek yağlar sistem içerisinde pompa vasıtasıyla dolaştırılmaktadır. (Kınacı, 2019) (Yıldırım, 2015)



Şekil 5.10. X-ray Tüpü. (Ülker, 2010)

Anot ve Katot

Anot yüksek enerjili elektronların çarptığı bölümdür. Bu esnada yüksek ısılar oluşmaktadır. Isı transferi yoluyla bu ısının uzaklaştırılması için genellikle anotlar bakır malzemeden seçilmektedir. Anodun katot tarafına bakan tarafına hedef malzemesi gömülmektedir ve yaygın olarak tungsten tercih edilmektedir. (Deligöz, 2010)

Katot, flaman aracılığıyla elektron kaynağı görevi gören elemandır. Negatif yüklü elektroda odaklama kabı meydana getirecek uygun bir şekil verilmektedir. Yüksek ısıyla birlikte ortaya çıkan elektronları hedefe doğru bir demet olarak iletmektedir. Malzeme olarak ısıya dayanıklı saf demir veya nikel kullanılmaktadır. (Deligöz, 2010) (Kaba, 2009)

Hedef Malzeme

X-ışını tüpünde kullanılan hedef, elektronun anoda çarptıkları yüzün içine gömülen bir metal parçasıdır. Kullanılan malzemenin yüksek atom numarası, yüksek ısı iletkenlik, yüksek ergime noktası ve düşük buhar basıncı gibi özelliklere sahip olması gerekir. Yaygın olarak tungsten malzeme kullanılmaktadır. (Turgut, 2005)

Kontrol Paneli ve Güç Kaynağı

X ışını kontrol paneli, ihtiyaç duyulan x ışını enerjisini ve anot ile katot arasında uygulanan voltajı kontrol etmektedir. Cihaz üzerinden akım ve voltajla birlikte, süre ayarı yapılabilmektedir. (Deligöz, 2010) (Turgut, 2005)

Güç kaynağı, ihtiyaç duyulan akımın üretilmesi için kullanılan üreteçlerdir. Doğru ve alternatif akım tipleri mevcuttur. (Deligöz, 2010)

X-Ray Cihazı ile Radyografide Boru Hatları Uygulamalarına Genel Bakış

X ışınlarının şiddeti, belli bir zaman aralığında, birim alandan geçen veya birim alana çarpan ışınların sayısıdır. (Seçim, 2011) (Salma, 2011)

X ışınlarının enerjisi, ışınların malzemeye olan giricilik kabiliyetini ifade eder. Malzemeye gelen elektronların hızı arttırılırsa çarpma kuvveti de artarak daha kısa boylu yani daha girici X ışınları elde edilecektir. Bu giricilik gücü aynı zamanda X ışını üreteğine uygulanan voltajla doğrudan ilişkilidir. (Salma, 2011) (Seçim, 2011)

Doğalgaz ve petrol boru hatlarında yaygın kullanılan X ışını cihazını Şekil 5.11’de görülen X-RAY Crawler olarak adlandırmaktayız. Sistemin geometrik tasarımı kullanılacağı boru çapına göre ayarlanmaktadır. Tüp borunun içerisinde ilerleyerek çekim gerçekleştirdiği için yaygın olarak 12” ve üzerindeki çaplardaki borularda uygulamaları yapılmaktadır. Daha küçük çaplarda ise özel uygulama gerektirmektedir.



Şekil 5.11. Boru Çapına Göre X-Ray Crawler Modelleri.

Cihazın genel özellikleri;

- -40 C ° ye kadar sıcaklıklarda çalışma kabiliyetine sahiptir.
- Crawlerın tekerlekli arabası X-Ray cihazını ve tüpünü sürmek için bağımsız pil gücüne sahiptir.
- Sabit potansiyelli x-ray tüpü yüksek yoğunluklu görüntüler sağlayarak küçük odak noktaları verir ve bu nedenle yüksek hata tespit yeteneği sunar.
- Radyasyon parametreleri piller boşalmışken bile korunan enerjiden bağımsız özel bir hafızada saklanır. Pil durumu crawlerin kapsadığı mesafe ile tanımlanan önceden belirlenmiş bir seviyeye ulaştığında bir geri kazanım sistemi otomatik olarak devreye girer ve borudan çıkması için crawlera komut verir.
- Crawlerlar montajı kolaylaştırmak için yüksek derece entegre modüller kullanılarak tasarlanmıştır.
- İzotoplar veya manyetik belirteçler crawlerın tam konumlandırılması için muayene edilecek kaynağın dış yüzeyleri üzerine yerleştirilir. (X-Ray Crawler, 2015)

X-RAY Crawler tekerlekli arabası borunun ağzından girerek üzerinde bulundurduğu enerji kaynağı vasıtasıyla filmi çekilecek olan kaynak contasına doğru ilerleyip otomatik merkezleme gerçekleştirmektedir. Çekim için üretece verilen enerji ile üretilen ışınlar panoramik olarak kaynağı radyasyona maruz bırakıp, dıştan sarılı film üzerine çekim işlemini gerçekleştirmektedir. Bu şekilde bir pozlamada film üzerinde kaynağın görüntüsü oluşturulmaktadır.

5.2.2 Gama Cihazı ile Muayene

Gama cihazı, radyoaktif kaynak, kaynak tutucu, muhafaza kabı ve kumanda mekanizmasından oluşmaktadır (Fotoğraf 5.1). Radyoaktif kaynak (Yarı Ömürlü Çekirdek) sağlam sızdırmaz ve radyoaktif hale gelmeyen malzemeden yapılmış (Kurşun, Thungsten, Zenginleştirilmiş Uranyum) bir kapsül içerisine yerleştirilmektedir. (Salma, 2011)

Gama ışını cihazı içerisinde çok radyoaktif bir element bulundurduğundan cihazın açık ve kapalı durumlarının kontrolü büyük önem arz etmektedir. Günümüzdeki saklama tekniğinin öncesinde yaşanan iş kazaları sonucunda geliştirilen çoklu kilit mekanizmalarına sahip uzaktan kumandalı bir kontrol sistemi vardır. Kapalı durumda olduğunda bile çekirdek ısımaya devam ettiğinden içine yerleştirildiği kapsül ile çekim aşamasında ulaşması gerektiği noktayı kontrol eden bir mekanizmaya sahiptir.



Fotoğraf 5.1. Gama Cihazı.

Gama cihazı operasyonel anlamda konik, radyal ve küresel ışıma sağlayabilmektedir. Cihaz, çekim yapılacak parçanın geometrisine uygun pozisyonlara ayarlandıktan sonra çekirdeğin belirlenen konuma götürülüp malzeme et kalınlığı, çekirdeğin yarılanma ömründen kalan gücü vb. etkenlere göre gerekli süre beklenip, ışımanın gerçekleşmesiyle işlem sonlanır. Işımanın üzerine düşürüldüğü fotografik parçanın muayenesi için oluşturulmuş olur. (Kaba, 2009) (Salma, 2011)

Radyoizotoplar ve Özellikleri

Gama ışını yayan radyoizotoplar kullanılmaktadır. Malzemenin cinsine, et kalınlığına ve geometrisine göre değişken enerji seviyelerindeki radyoizotoplar seçilmektedir (Şekil 5.12). Bu seçim yapılırken yukarıdaki kısıtlarla birlikte cihazın tasarımından kaynaklı geometrisinin ve yapısının saha çalışmalarında uzaktan kumandalı bir şekilde çalışmaya imkân vermesi gerekmektedir. İdeal bir radyoizotop aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır. (Yaşar, 2010)

- Boyut olarak radyoizotop mümkün olabildiğince küçük olmalıdır. Enerjinin noktasal olarak çıkabiliyor olması çekim kalitesini arttıracaktır.
- Sabit ve yüksek enerjili ışın demeti yayması ve saçılmaların minimum olması gerekmektedir.
- Işın demetindeki ışın yoğunluğu (Curie) mümkün olduğunca yüksek olmalı, görüntünün elde edilebilmesi için gerekli poz süresini minimumda tutmalıdır. Uzun yarı ömürlü olmalıdır.
- Radyoaktif ışımanın gerçekleştiği bölgede radyoizotopun başka maddeler ile etkileşimi bulunmamalıdır. Film çekim esnasında kirlenici etki oluşumu minimuma indirilmelidir. (Kaba, 2009)

Kaynak	Yarı Ömür	Gama Enerjileri (MeV)	Doz Hızı R/hr 1m uzakta-1 Ci	Tavsiye Edilen Kalınlık	Normal Kaynak Boyutu
Co-60	5,3 yıl	1,17-1,33	1,3	50-225 mm çelik	1×1,4×4 mm
Ir-192	74,3 gün	0,45	0,48	12-75 mm çelik	0,5×0,5 mm
Cs-137	30 yıl	0,661	0,39	25-100 mm çelik	1×1, 3×3 mm
Se-75	120 gün	0,4-0,066	0,224	8-30 mm	1×1, 3×3 mm

Şekil 5.12. Radyografide Kullanılan Gama Işın Kaynakları ve Özellikleri.
(Yıldırım, 2015)

Radyoizotopların Zırhlanması ve Cihaz Ekipmanları

Radyoizotoplar Şekil 5.13’de görüldüğü üzere dayanımı yüksek, sızdırmaz ve aktif hale gelmeyen malzemeden imal edilmiş bir zırh içinde tutulması gerekmektedir. Bu zırh paslanmaz çelikten üretilmiş, silindirik veya küre şeklindeki radyoizotop içerisine yerleştirilmeden teste tabi tutulmuş, sızdırmazlığı sağlamak için kaynakla kapatılmış bir yapıdadır. (Kaba, 2009) (Salma, 2011)

Radyoizotopun zırhlanması uluslararası standartlarda garanti altına alınmıştır. ANSI, IAEA, ISO, NRC gibi uluslararası kuruluşlarca belirtilen şekillerde üretilir ve sertifika onayı alınır.

Bir gama ışını cihazı; radyoizotop, radyoizotop tutucu, muhafaza kabı ve kumanda mekanizmasından oluşmaktadır. Cihazın güvenli kullanımı için, klavuz hortum, kolimatör, üç ayak sistemi, çeşitli sabitleyici ve gergiler bunlarla birlikte tehlike (radyoizotop arızaları) durumunda kullanılmak üzere ıraksak makas, tutucu, pense ve içi kurşun bilye dolu torbalar bulundurulmalıdır. Cihazın yapısal bileşenleri aşağıda incelenmiştir. (Kaynak Teknolojisi ve Tahribatsız/Uygulama Merkezi, 2021)



Şekil 5.13. Gama Kaynağı Çekirdek Güvenlik Sistemi.

Muhafaza Kabı ve Radyoizotop Tutucu: Muhafaza kabı yukarıda da belirtildiği üzere koruyucu bir zırh görevinde olup radyoizotopun yaydığı radyasyonun doz hızını azaltacak ya da radyoizotop ile direk teması engelleyecek yapıdadır. Bu zırh görevini gerçekleştirmek için en yaygın kullanılan malzeme kurşundur. Fakat kurşunun ağır bir yapıda olması, cihazın sahada el ile taşınmasını zorlaştırdığından yeni uygulamalarda malzeme olarak tungsten ve zenginleştirilmiş uranyumun kullanılarak sistem hafifletilmiştir. (Deligöz, 2010) (Salma, 2011)

Kapsül üzerinde kaynak tutucuya tutturulmasını sağlayacak bir parça bulundurmaktadır. Kaynak tutucu radyoaktif kaynak ile muhafaza kabı arasındaki bağlantıyı gerçekleştirmektedir. (Kaba, 2009) (Salma, 2011)

Muhafaza kaplarında; hareket edebilirlik ve çalışma mekanizmalarına göre çeşitlilik göstermektedirler. Hacim ağırlık ve tasarıma bağlı hareket edebilirlik kriterleri sınıfını, çalıştırma mekanizması kategorisini belirlemektedir. 2 sınıf ve 2 kategori mevcuttur. (Salma, 2011)

- P(Portatif/taşınır) sınıf, muhafaza kapları bir kişi tarafından taşınabilen.
- M(Mobile/hareketli) sınıf, muhafaza kabının hareket etmesini sağlayan teknik donanım barındıran.

Birinci kategori cihazlarda kaynak çalışır durumda iken muhafaza kabından çıkarılmaz. Pozlama, kaynağın önündeki zırhı kaldırarak veya kapsülle beraber kaynağı döndürerek gerçekleştirilir.

İkinci kategori cihazlarda muhafaza kabındaki çekirdek çelik kablo ve makaranın bulunduğu uzaktan kumanda sistemiyle ışınlama kabına gönderilerek pozlama yapılır. Doğalgaz ve petrol boru hatlarında yaygın olarak 2. Tip cihazlar kullanılmaktadır. (Salma, 2011)

Gönderme Borusu ve Kumanda Mekanizması: Muhafaza kabının önüne takılan ve izotopu pozlama noktasına gönderen esnek ve sert bir borudur. Radyo izotopu süren çelik yay ve yayın etrafındaki kablonun sarılacağı makara, radyoizotopu ileri geriye sürmeye yarayan kol ve dişli grubundan meydana gelir. Bu şekilde radyasyon kaynağından 20-25 metre uzaktan kontrol sağlanabilmektedir. (Kaba, 2009) (Salma, 2011)

Radyasyon Ölçüm Sistemleri

Ülkemizdeki uygulamalarda gama ışıınım cihazları ISO 3999 standardına uygun üretilmiş olmalıdır. Gama cihazları aynı zamanda radyoizotopun taşınması içinde kullanıldığından B sınıfı taşıma kabı şartlarını sağlamalı ve ilgili testlerle sertifikalandırılmış olmalıdır. Tüm bunların sağlanıyor olması film çekimi esnasında veya taşıma esnasında problemlerle karşılaşılmayacağı anlamına gelmemektedir. Cihaz her kullanım öncesi;

- Radyasyon ölçümleri
- Fiziksel kontroller
- Mastar kontrolleri

Yapılmış ve kayıt altına alınmış olmalıdır. Bunların yanı sıra radyoizotop sürekli iyonlaştırıcı radyasyon yaydığından ve iyonlaştırıcı radyasyonun canlı hücreler üzerinde büyük olumsuz etkileri olduğundan alınan dozun takip edilmesi gerekmektedir. Dozun takibi için radyasyon ölçüm cihazları ile ölçüm alınmaktadır ve ışıma tipine uygun cihaz seçimine dikkat edilmelidir.

Dozimetre: Dozimetreler pasif radyasyon ölçüm cihazlarıdır (Şekil 5.14). Isı veya optik uyarımlı TLD ve OSL dozimetreler radyasyon dozuna bağlı veriyi cihazda ışık olarak yayarlar. Böylece dozimetrenin kullanıldığı sürede vücudun almış olduğu doz hesaplanmış olur. Dozimetre sıfırlanarak tekrar tekrar kullanılabilir. (Kaynak Teknolojisi ve Tahribatsız/Uygulama Merkezi, 2021)



Şekil 5.14. Kişisel Dozimetre. (Troy-Met Analitik, 2022)

Doz hızı ölçer cihazlar: Radyasyondan korunmak için dozimetreler tek başına yeterli olmayacaktı. Aslında en önemli konu radyasyon kaynağına ne kadar maruz kalındığıdır. Bu durumu bize anlık olarak söyleyebilecek olan cihazlar ise Şekil 5.15’de görülen doz hızı ölçerlerdir. Çalışma prensipleri, gaz dolu bir hacmin içinde meydana gelen iyonlaşmayı anlık olarak ölçmeleridir. Ekranlı ve ekransız (set edilen değere, genellikle 7.5 mikro sivert, geldiğinde uyarın beeper) tipleri mevcuttur. (Kaynak Teknolojisi ve Tahribatsız/Uygulama Merkezi, 2021)



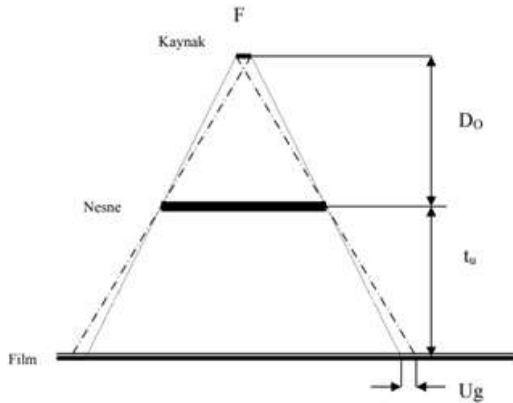
Şekil 5.15. Doz Hızı Ölçer Cihaz. (TES Electrical Electronic Corp., 2014)

5.3 Radyografik Görüntünün Kalite Etmenleri

Başlıca 5 etmeden söz edilebilir. Bunlar geometrik faktör, radyasyon kayağı faktörü, film faktörü, pozlama süresi ve ekran faktörüdür.

Geometrik Faktör

Çekirdeğin sonsuz küçüklükte bir nokta gibi olamamasından dolayı görüntü olayında oluşacak yarı gölgeler netliği azaltacaktır. Netliği bozan bu yarı gölgeler çekirdeğin görüntü alınmak istenen noktaya olan optimum mesafesi ve ışımanın film üzerine dik düşürülmesiyle minimize edilmektedir. (Salma, 2011) (Seçim, 2011)



$$U_g = F \cdot (t_u / D_o)$$

U_g : Geometrik yarıgölge (mm),

F : Kaynak boyutu,

D_o : Kaynak malzeme uzaklığı,

t_u : Malzeme film uzaklığıdır.

Şekil 5.16. Radyografik Görüntü ve Yarı Gölge Oluşumu. (Yaşar, 2010)

Radyasyon Kaynağı Faktörü

Etki eden faktörler çekirdeğin boyutu şiddeti ve enerjisidir. X ışını tüpü gerilim (kV) değeri değiştirilerek enerji değiştirilebilir. Akım (mA) değiştirilerek x ışınlarının miktarı ayarlanabilmektedir. Radyasyon enerjisi kalite faktörü, şiddeti kantite faktörü olarak ifade edilebilmektedir. Bunlar kumanda mekanizmasından kolaylıkla kontrol edilebilmektedir.

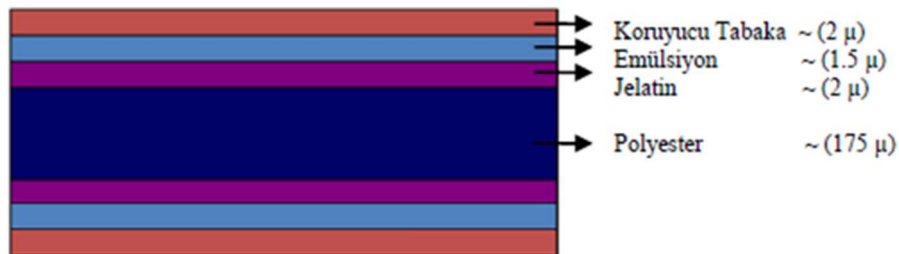
Gama ışınlarının enerjisi radyoizotopun enerjisi (MeV) ile ifade edilmektedir. Kantite faktörü ise radyoizotopun aktivitesi (Ci) ile ilgilidir. Çekirdekler sürekli olarak ışıdıklarından enerjileri yarılanma ömürleriyle paralel olarak düşünülmelidir. Enerji değiştirilmek istendiğinde çekirdeğin kendisinin değiştirilmesi gerekmektedir. (Salma, 2011)

Radyografik Film Faktörü ve Banyolama

Film faktörü, filmin hızı ve emülsiyonda bulunan AgBr kristallerinin boyutlarıyla orantılıdır. Kristallerin boyutu filmin kontrast ve tanımlanmasına etki eder. Diğer etmenler sabit tutulduğunda film hızı, kristallerin boyutuyla ters orantılıdır.

Negatif film yoğunluk değeri poz süresine bağlı olarak “hızlı” değerlendirilebilir. Hızlı film az pozlama süresini ifade eder fakat okunabilirlik açısından uygulama prosedürünün öngördüğü yoğunluk değerini yakalayacak süre, çekirdeğin yarı ömrü de hesap edilerek belirlenir.

Şekil 5.17’de görülen film, tabanı olarak saydam asetat ve polyester kullanılmaktadır. Filmlerin 2 tarafı elektromanyetik radyasyona ve ışığa duyarlı emülsiyonla kaplanmıştır ve bu poz süresini kısaltmaktadır. Dış bölümdeki jelatin ise mekanik hasarlara karşı koruma sağlamaktadır.



Şekil 5.17. Film Negatifinin Yapısı. (Yaşar, 2010)

Filmde oluşacak olan gizli görüntü AgBr kristallerinin iyonize edilmesiyle oluşmaktadır. Filmin görünür hale gelebilmesi için AgBr tanecikleri siyah metalik gümüş taneciklerine indirgenirler. (Kaba, 2009) (Salma, 2011) (Seçim, 2011)

Radyografisi çekilip film negatifi oluşturulduktan sonra gizli görüntüyü ortaya çıkarmak için kimyasallar vasıtası ile banyolama yapılmaktadır. Otomatik sistemler mevcut olmakla birlikte prensip olarak aşağıda tarif edildiği şekilde çalışmaktadır.

Geliştirme banyosu, gizli imajda bulunan gümüş iyonlarının görünür siyah metalik gümüşe çevrilmesini sağlayan reaksiyondur. Kimyasal olarak indirgeyici ve solvent bulunmaktadır. İndirgeyici gerekli elektron transferini sağlamaktadır. Geliştirici çözeltinin %80'i su kalanı ise solventten oluşmaktadır. Ph değeri (9,5-11,5), sıcaklık ve reaksiyon süresi film kalitesi üzerinde etki yaratmaktadır. Geliştiricide uzun süre beklenmesi film kontrastını (görünürlük) düşürmektedir. Optimum süreler teknik verilerle sabittir.

Durdurma banyosu, %2-3 su ile asetik veya sitrik asit çözeltisi yardımıyla sürecin durdurulmasıdır. Kısa sürelerde tamamlanmaktadır (30 sn – 1 dk). Tespit banyosu, gümüş tuzlarının film üzerinden uzaklaştırılması amacıyla yapılmaktadır. Yıkama banyosu, filmin su ile yıkanarak tüm çözelti kimyasallarından arındırılmasıdır. (Kaba, 2009) (Yaşar, 2010)

Pozlama Süresi

Filmin okunurluğunun en önemli kriterlerinden olan film yoğunluğunun sağlanabilmesi için uygun poz süresinin hesaplanması gerekmektedir. Bu süre poz çizelgeleri vasıtasıyla hesaplanmaktadır. Çizelgelerde farklı negatif film türü, ışın kaynağı (Gama, X ışını), film – odak mesafesi (FFD), belirli yoğunluk ve banyo koşullarına göre hazırlanmıştır. Bu parametreler doğrultusunda farklı et kalınlığındaki malzemelerin ışınma süreleri hesaplanmaktadır. (Kaba, 2009) (Salma, 2011) (Seçim, 2011)

Ekran Faktörü

Radyografik film sandviç bir ekran çifti şeklindedir. Ekranlar ise alta ve üste konulan ince levhalardır. Ekranların başlıca görevi film üzerine gelen radyasyonu ön ekran üzerinden elektron koparılmasıyla arttırmaktır. Ön ekran olarak metal, kurşun daha yüksek enerjili ışımalarda ise çelik ve bakır kullanılmaktadır.

Arka ekranlar ise film üzerine gelebilecek olan yansımaları engellemek amacıyla kullanılır ve daha kalınlardır. Saha uygulamalarında ekranlar, zarar görmemesi için karton, plastik veya metal kasetler içerisine konulmaktadır. (Kaba, 2009) (Salma, 2011) (Seçim, 2011)

Görüntü Kalite Belirteçleri

Elde edilen görüntünün standartlara uygunluğunun kontrolünde kullanılan yardımcı ekipmanlardandır. Penetremetre olarak adlandırılmaktadırlar. Bu penetremetreler ışımanın üzerinden geçirildiği malzeme kalınlığına ve muayene standartlarında istenilen kısıtlara göre belirlenmektedir. 3 çeşidi mevcuttur. (Kaynak Teknolojisi ve Tahribatsız/Uygulama Merkezi, 2021)

- Tel tipi
- Kademeli delikli tip
- Plaka tipi

ASTM standardına göre yaygın olarak plaka tipi, EN, ISO standartlarında ise genellikle tel tipi penetremetreler kullanılmaktadır.

Tel Tipi Penetremetreler: Koruyucu bir kaplama içerisinde her biri aynı metalden yapılmış farklı kalınlıklarda tellerden oluşan belirteçlerdir (Şekil 5.18). Telli penetremetreler ile radyografik hassasiyet belirlenirken, penetremetre malzemenin muayene bölgesine yerleştirildikten sonra görünen en ince tel görüntüsü tespit edilmektedir. Bulunan bu tel çapı o bölgedeki malzemenin kalınlığına oranlanmaktadır. (Kaynak Teknolojisi ve Tahribatsız/Uygulama Merkezi, 2021) (Yaşar, 2010)



MODEL				Tel No	Çap (mm)
W1	W6	W10	W13		
40 – 160 mm				W1	3.200
				W2	2.500
				W3	2.000
				W4	1.600
				W5	1.250
				W6	1.000
	12.5 – 50 mm			W7	0.800
				W8	0.630
				W9	0.500
				W10	0.400
				W11	0.320
				W12	0.250
		5 – 20 mm	2.5 – 10 mm	W13	0.200
				W14	0.160
				W15	0.125
				W16	0.100
		W17		0.080	
		W18		0.063	
		W19		0.050	

Şekil 5.19. Görüntü Kalite Ölçüleri. (Yaşar, 2010)

Delikli Tip Penetremetreler: ASTM dizayn penetremetrelerdir. Üç delikli dikdörtgen şeklinde bir metalden yapılmışlardır (Şekil 5.20). Üzerinde kurşunla yazılmış sayının 1000 katı kadar kalınlık değerini ifade etmektedir. Muayene edilen malzeme ile penetremetre malzemesi aynıdır ve genellikle malzeme kalınlığının %2' si kadarlardır. Standart bir penetremetre kalınlığı (T) penetremetreyi tanıtan işaretin %2'si kalınlığındadır. (Kaynak Teknolojisi ve Tahribatsız/Uygulama Merkezi, 2021) (Yaşar, 2010)

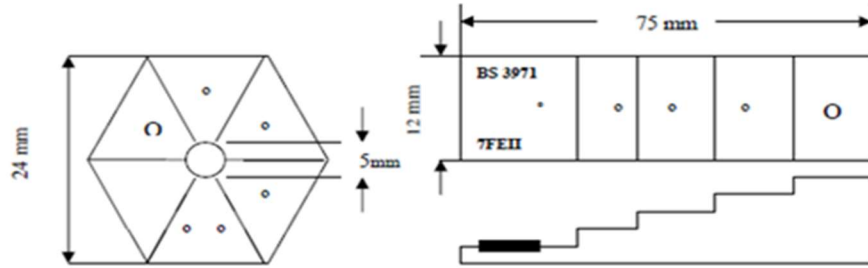


Şekil 5.20. Delikli Tip Penetremetreler. (Mak Elektronik, 2022)

Tablo 5.3. Standart Delikli Tip Penetremetreler. (Kaba, 2009)

Malzeme kalınlığı (in)	Penetremetre no	T	1T delik çapı(in)	2T delik çapı (in)	4T delik çapı (in)
0,250	25	0,005	0,010	0,020	0,040
0,375	37	0,008	0,010	0,020	0,040
0,500	50	0,010	0,010	0,020	0,040
0,625	62	0,013	0,013	0,025	0,050
0,750	75	0,015	0,015	0,030	0,060
0,875	87	0,018	0,018	0,035	0,070
1,100	1,0	0,020	0,020	0,040	0,080
1,125	1,1	0,023	0,023	0,045	0,090
1,250	1,2	0,025	0,025	0,050	0,100
1,500	1,5	0,030	0,030	0,060	0,120

Basamaklı penetremler: BS 3971'e göre imal edilmişlerdir. Şekil 5.21'de görüldüğü üzere çeşitli kalınlıklarda basamaklar mevcuttur ve basamak kalınlığına eş çapta bir veya iki dikine delik mevcuttur. Basamaklı tip penetremler muayene bölgesine yerleştirildikten sonra görülebilen en küçük delik çapının numune kalınlığına oranının yüz ile çarpımıdır. (Kaynak Teknolojisi ve Tahribatsız/Uygulama Merkezi, 2021) (Yaşar, 2010)



Basamak no	Çap ve basamak kalınlığı (mm)	Basamak no	Çap ve basamak kalınlığı (mm)
1	0,125	10	1
2	0,16	11	1,25
3	0,2	12	1,6
4	0,25	13	2
5	0,32	14	2,5
6	0,4	15	3,2
7	0,5	16	4
8	0,63	17	5
9	0,8	18	6,3

Şekil 5.21. Basamak Tipi Penetremler. (Yaşar, 2010)

Çift Telli Penetremler: Kullanım amaçları yarı gölge miktarının belirlenmesidir. Standartların belirlediği ilgili muayene sınıfı ve parça kalınlığına bağlı olarak minimum yarı gölge değerini göstermektedir. Telfi prensibinde de kullanılmaktadır. Telfi prensibi dahil istenilen değer dedektör tarafından sağlanamazsa, dedektör reddedilmektedir. (Kaynak Teknolojisi ve Tahribatsız/Uygulama Merkezi, 2021)

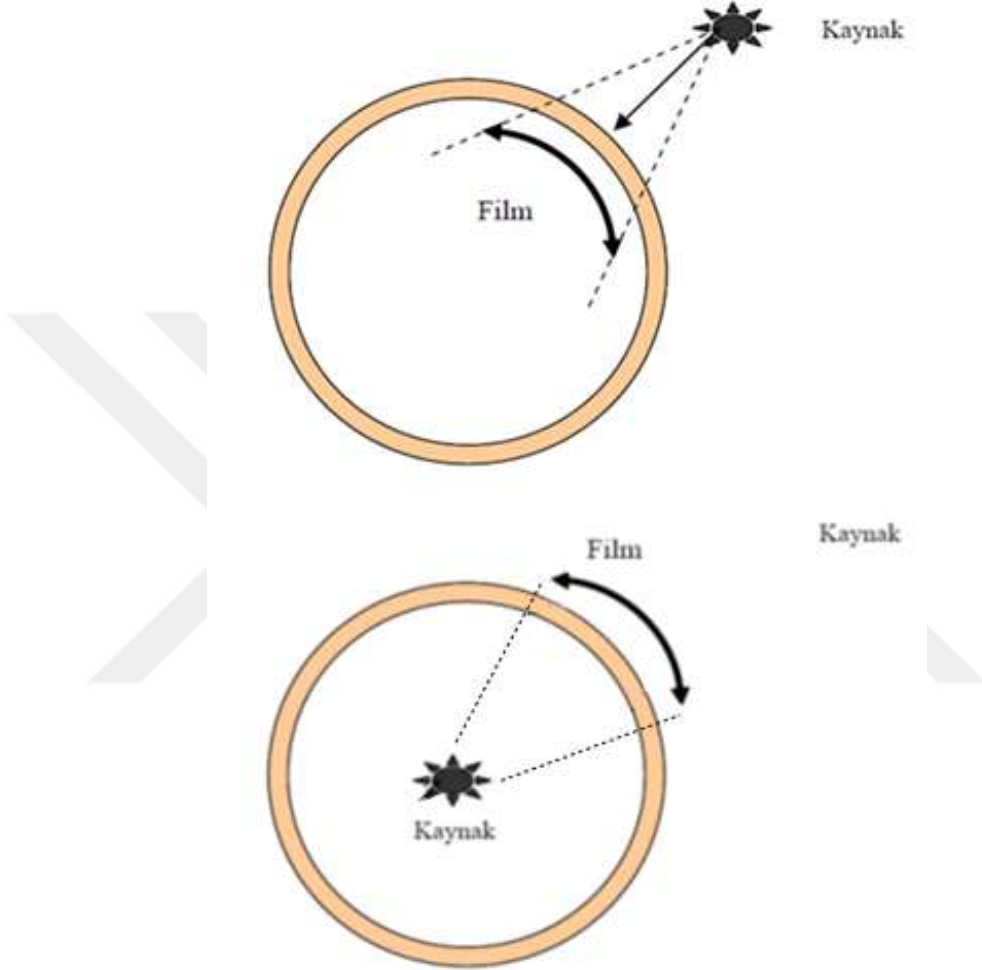


Şekil 5.22. Çift Telli Penetremler.

5.4 Boru Hatlarında Film Çekim Teknikleri

5.4.1 Tek Cidar Tekniği

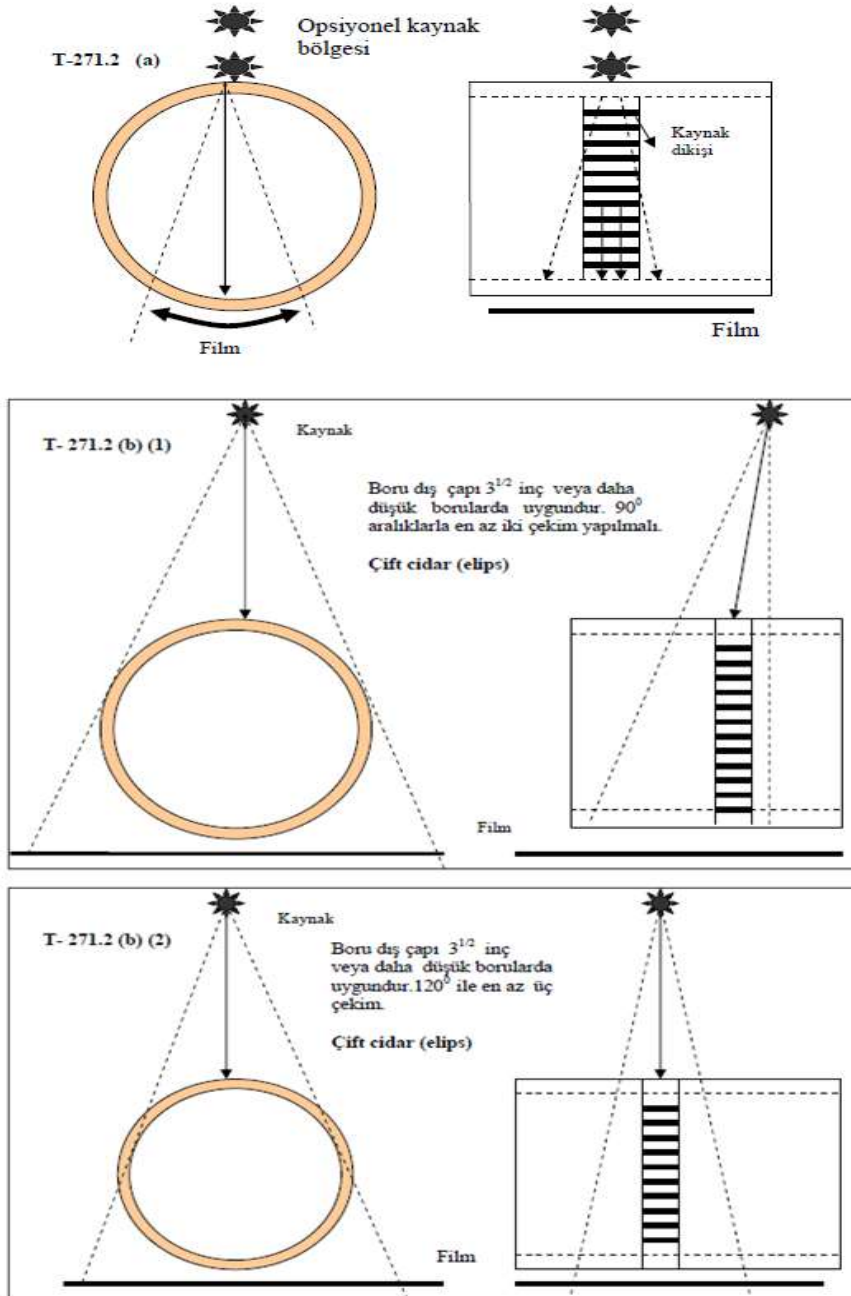
Işıma tek cidardan geçerek görüntü oluşturmaktadır (Şekil 5.23). Boru dış çapı 89 mm üzerinde uygulanmaktadır.



Şekil 5.23. Tek Cidar Çekim Teknikleri. (Kaba, 2009)

5.4.2 Çift Cidar Tekniği

Işıma çift cidardan geçerek görüntü oluşturmaktadır (Şekil 5.24). Tek cidar tekniğinin uygulanamadığı veya pratik olmadığı durumlarda kullanılmaktadır. Çift-cidar görüntü için sadece kaynak tarafı penetremetre kullanılacaktır. İstenilen geometrik düzgünlük değerinin aşılmadığından emin olmak için dikkat edilmelidir. (Deligöz, 2010) (Yaşar, 2010)



Şekil 5.24. Çift Cidar Çekim Tekniği. (Yaşar, 2010)

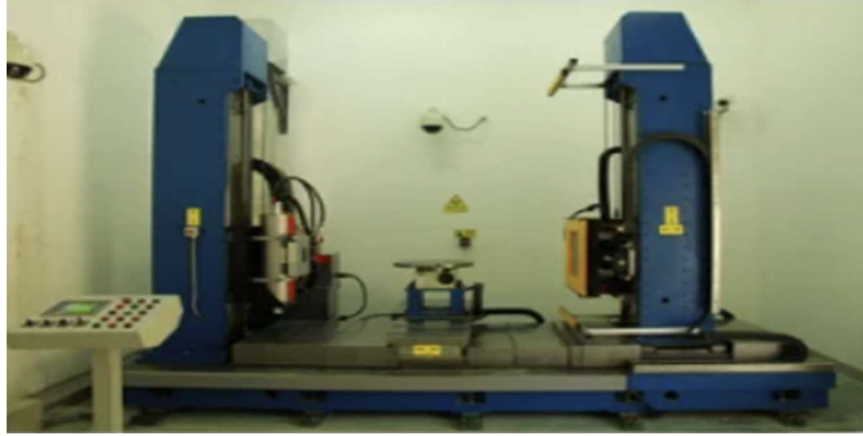
5.5 Dijital Radyografi Cihazı ile Muayene

Film radyografisi için son teknolojik gelişmelerle birlikte klasik sistemler (Gama, X-Ray) günümüzde tek seçenek olarak kalmamıştır. İhtiyaçların artmasıyla birlikte hızlı sonuca ulaşma, güvenilirlik ve uzun vadede düşük maliyet hedefleriyle birlikte dijital radyografi endüstride yerini almıştır ve birçok alanda kullanılmaktadır (Şekil 5.25). (Yıldırım, 2015) (Yelbay, Kaleli, Aydın, & Gür, 2021)

DİJİTAL RADYOGRAFI			
Klasik Radyografinin Kullanıldığı Alanlar		Yeni Endüstriyel Alanlar	
Standart Uygulamalar	Standart Olmayan Uygulamalar	Seri Parçaların Muayenesi	Bilgisayarlı Radyografi
Kaynak Dikişleri, Dökümler, Elektronik	Kalınlık Ölçümü, Korozyon, Aşınma, Yapılar, Köprüler, Plastikler, Kompozitler	Otomatik muayeneler, Boyut Kontrolleri, Bütünlük Kontrolü	3D Döküm, İnceleme, Seramikler, Kompozitler, Plastikler, Özel Uygulamalar

Şekil 5.25. Dijital Radyografi Uygulama Alanları. (Yıldırım, 2015)

Dijital radyografi, klasik yöntemlerin kullandığı film negatiflerinin yerine algılayıcı dedektörlerin kullanıldığı radyografi yöntemi olarak tanımlanabilir. Klasik yöntemler ile dijital radyografi arasında bir geçiş olarak da bilgisayarlı radyografi (CR) gösterilebilir. DR yönteminde kullanılan algılayıcı dedektörlerin (Gelen ışına radyasyonunun yansıdığı görüntüleme plakası vasıtasıyla dijital sinyale dönüştüren sistemler) temelini oluşturmaktadır.



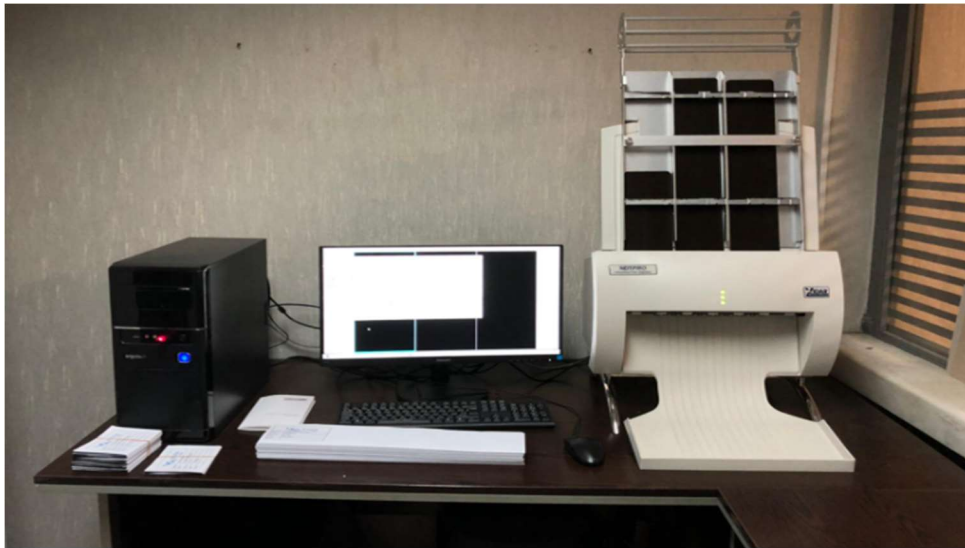
Şekil 5.26. Endüstriyel Uygulamalarda DR Cihazı.

5.5.1 Dijital Radyografi Türleri

Tahribatsız muayene metodu olarak 3 tür dijital radyografi kullanılmaktadır. Bunlar klasik yöntemlerle çekilen filmin dijitalleştirilmesi, bilgisayarlı radyografi (CR) ve direkt radyografidir (DR). (Çobanoğlu, 2012)

Film Dijitalleştirme

Klasik radyografi yöntemleriyle çekilen filmlerin bir tarayıcı vasıtasıyla görüntü okunur şekilde dijitalize edilmesidir. Bu sayede filmde elde edilen görüntü dijital ortama veri olarak aktarılmış olur. Bir ağ üzerinden erişilebilir konuma gelmeleri değerlendirmeyi kolaylaştırmakta uzaktan erişime imkân sağlamaktadır. Film negatifinin zamanla ortam şartlarından etkilenme ve stoklamadaki kusurlardan dolayı zarar görmesi sonucunda ileride değerlendirilememe riskini de ortadan kaldırır. (Çobanoğlu, 2012) (HT-RTD System for Weld Inspection, 2021)

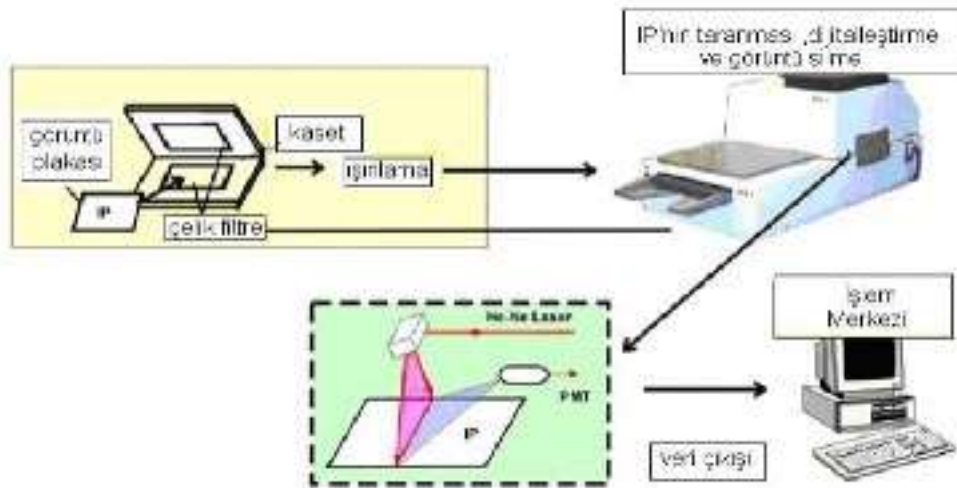


Şekil 5.27. Film Dijitalleştirme Cihazı.

Bilgisayarlı Radyografi (CR)

Klasik uygulanan radyografi sistemlerine benzemektedir. Temel farklılık ise kullanılan film kasetlerinin yerine fosfor plakalarının (IP) kullanılmasıdır. Görüntü klasik yöntemlerde uygulanan boyut ve kasetler içerisine yerleştirilen IP plaka üzerinde oluşturulur. Görüntü tarayıcı cihaz ile okunarak dijital görüntü elde edilir. Okuma işlemi, X ışınına maruz kalan plaka üzerinde oluşan renklerin herhangi bir ek geliştirici olmaksızın lazer tarayıcı tarafından algılanıp dijitalle dönüştürülmesi olarak gerçekleşmesidir. (Çobanoğlu, 2012)

Alınan görüntü bilgisayar ortamında depolanmaktadır. Kullanılan IP plaka üzerindeki oluşturulan film silinerek, plaka yeniden kullanılabilir. Genel çalışma prensibi Şekil 5.28’de gösterilmektedir. (Çobanoğlu, 2012)



Şekil 5.28. IP ile Bilgisayarlı Radyografi. (Çobanoğlu, 2012)

Dijital film (IP) üzerinde 5 mikron tane boyutlarında, 100-300 μm kalınlığında kaplanmış X ışınlarına hassas fosfor tabaka bulunur. Fosfor plaka genellikle baryumun halid grubu elementlerinden bromür ile yaptığı (BaFBr:Eu) bileşiktir.

Çalışma prensibi, fosfor plaka üzerine düşen x ışınlarının belirli enerji seviyesinde hapis kalmasını sağlanmasıyla başlar. Tarayıcıya yerleştirilmiş olan dijital film üstüne gönderilen 600 nm dalga boyundaki kırmızı lazer, hapis olan elektronların tekrar eski konumlarına 400 nm dalga boyunda mavi bir ışık olarak dönmelerine olanak verir. Burada X ışını dozuna bağlı olarak elde edilen mavi ışık bir foton çoğaltıcı ile toplanarak dijital görüntüye dönüştürülür.

Dijital filmler yatay veya dairesel olarak taranabilmektedirler. Tarayıcı belirlenen parametreler vasıtası ile görüntüyü oluşturmakta, bu parametreler görüntü kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu parametreler aşağıda listelenmiştir. (Kaynak Teknolojisi ve Tahribatsız/Uygulama Merkezi, 2021) (Yelbay, Kaleli, Aydın, & Gür, 2021)

- Tarama çözünürlüğü
- Lazer odak boyutu
- Lazer gücü
- Foto çoklayıcı voltajı
- Tarayıcı dönme hızı

Dijital Radyografi (DR)

Dijital radyografi bir bilgisayarlı radyografi yöntemi olarak düşünülebilir. Kullanılan algılayıcı panel IP panel gibi görüntüyü elde etmek için tarama işlemine gerek duymamaktadır. Çekimin gerçekleştirildiği anda görüntü oluşmaktadır.

DR sisteminin algılayıcısı düzlem panel detektörlerdir. Üreteçten gelen X-ışın malzemenin üzerinden geçirilerek önce panelde bulunan fotoiletken maddelerle etkileşir. Etkileşim sonucunda ortaya çıkan elektronlar görüntüyü meydana getirirler. Panel elektronik bir algılayıcıdır. İçinde mikro kapasitörler bulundurmaktadır. Gelen ışınların fotoiletken maddelerle etkileşiminden oluşan elektronlar, kapasitörler vasıtasıyla test parçasını elektriksel yük olarak resmetmektedir. Her kapasitörün yükü 1 piksel olarak işlenir. Panel detektörden gelen piksel verileri görüntü işleme istasyonu aracılığıyla ham datadan görüntüye dönüştürülür. (Seçim, 2011) (Salma, 2011)

Dijital radyografi uygulamasında farklı teknolojilere sahip algılayıcı panel olarak belirttiğimiz dedektörler kullanılmaktadır. Bu dedektörler algılayıcının dizilimine göre DDA (Digital detector array) ve LDA (Linear detector array) olarak adlandırılırlar. (Kaynak Teknolojisi ve Tahribatsız/Uygulama Merkezi, 2021)

LDA dedektörlerde sensörler tek sıra halinde, DDA dedektörlerde ise sensörler tek sıra değil iki düzlem olarak yerleştirilmişlerdir. Bu sayede tek bir pozlamada daha geniş bir alanın görüntülenmesi sağlanmaktadır.

Dijital radyografi, doğrudan ve dolaylı dönüştürme sistemleri olarak 2 başlıkta incelenebilir. (Çobanoğlu, 2012)

Doğrudan dönüştürme sistemleri; X ışınının foto iletken madde aracılığıyla doğrudan yük değişimi oluşturması.

Dolaylı dönüştürme sistemleri; X ışınlarının önce sintilatörlerle etkileşiminin sağlandığı ve görünür ışığa dönüştürüldüğü sonra yük değişiminin meydana getirildiği 2 basamaklı bir yapıdır.

Her iki sisteminde yük değişiminden kaynaklı oluşan elektrik akımları elektronik okuyucular tarafından algılanmakta ve analog-dijital dönüşümü sağlanarak dijital veriye dönüştürülmektedir. Sistem elemanları Şekil 5.29’da gösterilmiştir. (Çobanoğlu, 2012)



Şekil 5.29. DR Cihazı.

5.5.2 Dijital Radyografide Görüntüyü Etkileyen Parametreler

Klasik film değerlendirmesinde olduğu gibi DR yönteminde de hataların tespitinde görüntü kalitesi büyük önem arz etmektedir. Dijital radyografide görüntüyü etkileyen parametrelerin başında piksel boyutu, uzaysal çözünürlük, kontrast ve gürültü gelmektedir. (Çobanoğlu, 2012)

Piksel Boyutu

Görüntü x-y eksenine bölünmüş bir matris olarak değerlendirildiğinde en küçük görüntü alanı pikseldir. Her piksel ayrı bir renk tonuna sahiptir. Görüntümüzün içerisinde ne kadar çok piksel barındırıyorsak görüntünün detayı da o kadar yüksek olmaktadır. Dijital görüntü kare şeklindedir, yatay ve dikey sıradaki piksellerin çarpımı sonucunda matris hesaplanır. Genellikle 512x512 ve 1024x1024 matris düzeni kullanılmaktadır.

Dijital radyografide siyahtan beyaza uzanan gri tonlamalı bir renk skalası bulunmaktadır. Her renk bir sayıya karşılık gelmekte bu sebeple her bir piksel ayrı bir sayıyı ifade etmektedir. Yani rakamlarla oynayarak görüntüde değişiklik yapılabilir. (Çobanoğlu, 2012) (ODTÜ KTTMM, 2020)

Uzaysal Çözünürlük

Yüksek kontrastlı cisimlerde belirli bir aralıktaki ayırt edilebilen noktaların sayısı olarak tanımlanabilir. Uzay çözünürlük matris genişliği ve piksel boyutuyla belirlenmekte olup, piksel boyutu sınırlayıcı parametredir. Yani çözünürlüğü arttırmak için küçük piksel ve geniş dedektör alanı sağlanmalıdır.

Nyquist teoremine göre analog bir işaretin sayısallaştırılmasından sonra tekrar elde edilebilmesi için en yüksek frekanslı bileşenden en az iki kat frekansta örneklem olmalıdır. Teoreme göre bir dedektörün piksel boyutu ise maksimum ulaşılabilir uzaysal çözünürlük değeri $a/2$ dir. 200 μm piksel boyutunda maksimum ulaşılabilir uzaysal frekans 2,5 çizgi çifti/mm dir. Radyografi uygulamalarında bu değer 0 ile 5 arasında değişmektedir. (Çobanoğlu, 2012) (ODTÜ KTTMM, 2020)

Piksel boyutunun yanında uzaysal çözünürlüğü modüler transfer fonksiyonu (MTF) ve dedektör quantum etkinliği (DQE) 'de etkilemektedir. (ODTÜ KTTMM, 2020) (Çobanoğlu, 2012)

Modüler transfer fonksiyonu (MTF); Belirli bir uzay frekansında giriş sinyal modülasyonunun çıkışa ne kadar iletildiğini ifade eder. Cisimlerin yapısı gereği sahip oldukları gri skalalarının çıkışa ne kadar iletildiğinin bir ölçütüdür. Bunun yanında kontrast farkının da çıkışa aynen iletimi önemlidir.

Dedektör quantum etkinliği; Dedektörün kalitesini belirleyen temel faktördür. Dedektör üzerine gelen X-ışınlarının sinyale dönüşme oranını ifade eder. Yani detektöre girişteki sinyal/gürültü değerinin çıkıştaki sinyal/gürültü değerine oranını içerir. İdeal DQE değeri "1" iken pratikte DQE 0.5 çizgi çifti/mm uzay frekansta 0.45 değerine sınırlanmıştır. (ODTÜ KTTMM, 2020) (Çobanoğlu, 2012)

Kontrast

Klasik film radyografisindeki malzemenin farklı kalınlıktaki bölgeleri arasındaki yoğunluk ve şiddet farkı dijital radyografide kontrast olarak değerlendirilir. Bu yoğunluk farkı açık ve koyu bölgelerin arasındaki farktır. Cisimlerin kalınlığı, yoğunluğu ve atom numarası kontrastı etkiler. Bunların yanında radyasyon enerjisi ve ışınlama süresi de etkileyen faktörler arasındadır. (Çobanoğlu, 2012) (ODTÜ KTTMM, 2020)

Gürültü

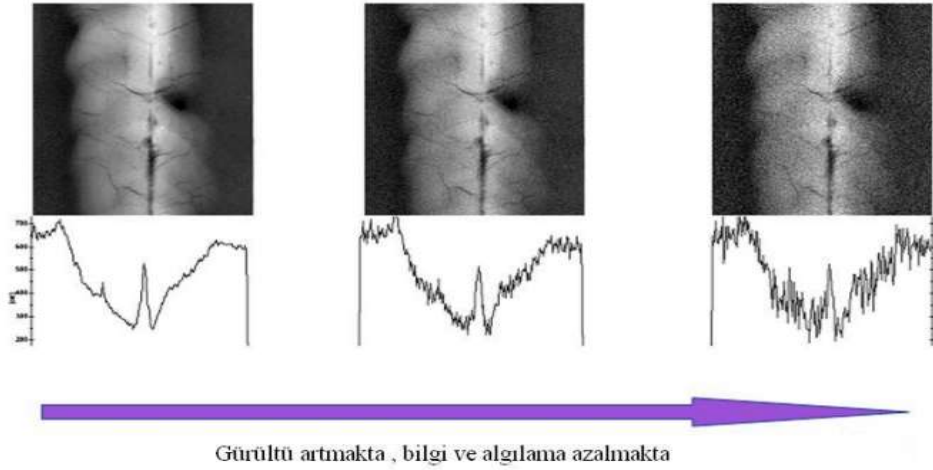
Dijital radyografide gürültü, görüntü oluşurken istenmeyen etkileşimlerden kaynaklanan, görüntü kalitesini bozan değişikliklerdir. Bunlar elektronik gürültü ve dijital gürültüdür. (Çobanoğlu, 2012)

Elektronik gürültü; Sistemin çalışan tüm bileşenlerinin görüntü üzerinde yarattığı bozulmalardır.

Dijital gürültü; yüksek bit derinliğinde elde edilen görüntünün düşük bit derinliğinde bir ortama aktarımı sonucu oluşan gri ton kodları arasındaki farklılıklardır.

Sinyal gürültü oranı SNR olarak ifade edilen ve sinyalin gürültü tarafından ne kadar etkilendiğini gösteren parametredir. Malzemedeki hataları algılamadaki en önemli parametre olan gradyan bölü tanelilik değeri olup uygun sinyal gürültü oranının hesaplanmasında kullanılır. Sinyallerin uygulanan X ışını dozuyla doğru orantılı olduğu varsayılır. (Çobanoğlu, 2012) (ODTÜ KTTMM, 2020)

Film SNR değerleri 100 µm çaplı dairesel bir diyafram ile ışınlama sonrası ölçülür. Dedektör kare yapıda olduğu için dairesel yapıdan kare yapıya çevrimi gerçekleştirilir. Her bir piksel 88.6x88.6 µm ve 287 dpi'lık bir çözünürlük yaratmaktadır. Piksel alanı ve ebadı önemli olmakla birlikte SNR artışı pikselin karesiyle doğru orantılıdır. SNR etkisi Şekil 5.30'da görülmektedir.



Şekil 5.30. SNR'nin Görüntü Üzerindeki Etkileri. (Çobanoğlu, 2012)

SNR, standartların zorunlu kıldığı görüntü kalitesinin belirlenebilmesi için dijital görüntüde elde edilmesi gerekli bir değerdir. SNR değeri dedektörün uzaysal çözünürlük değerine bağlı olarak değişeceğinden, değer normalize edilerek kullanılmalıdır. Minimum SNR değerleri EN ISO 17636-2 standardında belirtildiği şekilde Tablo 5.4'de verilmiştir. (Kaynak Teknolojisi ve Tahriratsız/Uygulama Merkezi, 2021) (Yelbay, Kaleli, Aydın, & Gür, 2021)

Tablo 5.4. EN-ISO 17636-2 SNR_n Değerleri. (EN-ISO 17636-2 Standart)

Radyasyon Kaynağı	Nüfuziyet Kalınlığı, w mm	Minimum SNR _n ^c		Metal ekranların tip ve kalınlığı mm
		Sınıf A	Sınıf B	
X-ışını gerilimleri ≤ 50kV		100	150	Yok
X-ışını gerilimleri ^d >50kV ila 150 kV		70	120	0' dan 0,1'e kadar (Pb)
X-ışını gerilimleri ^d >150kV ila 250 kV		70	100	0' dan 0,1'e kadar (Pb)
X-ışını gerilimleri ^d >250kV ila 350 kV	≤ 50	70	100	0' dan 0,3'e kadar (Pb)
	> 50	70	70	0' dan 0,3'e kadar (Pb)

DR görüntü kalitesinin belirteçleri olarak uluslararası standartlarda genellikle tel ve delikli tip görüntü belirteçleri kullanılmaktadır. Işınlanan toplam kalınlığa bağlı olarak ilgili standardın öngördüğü kalınlık ve çapa sahip olan telin film üzerinde görülmesi gereklidir. DR yönteminde kullanılacak olan dedektörün hata ayırt etme kabiliyetini ölçmek içinde bu belirteçlerle birlikte çift telli penetremetre belirtecinde kullanılması gerekmektedir. Bu sayede dedektörün veya görüntünün uzaysal çözünürlüğü hesaplanmaktadır. EN ISO 17636-2 standardına göre A ve B sınıfı görüntü kalite şartları minimum değerleri Tablo

5.5’de belirtilmiştir. (Kaynak Teknolojisi ve Tahribatsız/Uygulama Merkezi, 2021)
(Yelbay, Kaleli, Aydın, & Gür, 2021)

Sınıflandırma için normalize edilmiş SNR_n limitleri gereklidir. Ölçülen SNR_{meas} değeri denklemler kullanılarak düzeltilmelidir. (Çobanoğlu, 2012)

$$SNR_n = SNR_{meas} \times \frac{88,6\mu m}{SR_b}$$

Buradaki SR_b değeri temel uzaysal çözünürlüktür ve efektif piksel ebadına (Piksel Alanının Karekökü) karşılık gelmektedir. U_g yarı gölge olmak üzere SR_b değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$SR_b = \frac{U_g}{2}$$

Tablo 5.5. A ve B Sınıfı Çekim Teknikleri Minimum SR_b Değerleri. (EN-ISO 17636-2 Standart Table B.13, Table B.14)

Sınıf A : Çift telli GKB, ISO 19232-5		
Nüfuz edilen kalınlık w^a mm	Minimum GKB değeri ve maksimum yarı gölge (ISO 19232-5) ^b mm	Maksimum temel uzamsal çözünürlük (tel kalınlığına ve tel aralığına denk) ^b ($SR_{b, görüntü}$) mm
$w \leq 1$	D 13 0,10	0,05
$1 < w \leq 1,5$	D 12 0,125	0,063
$1,5 < w \leq 2$	D 11 0,16	0,08
$2 < w \leq 5$	D 10 0,20	0,10
$5 < w \leq 10$	D 9 0,26	0,13
$10 < w \leq 25$	D 8 0,32	0,16
$25 < w \leq 55$	D 7 0,40	0,20
$55 < w \leq 150$	D 6 0,50	0,25
$150 < w \leq 250$	D 5 0,64	0,32
$w > 150$	D 4 0,80	0,40

Sınıf B : Çift telli GKB, ISO 19232-5		
Nüfuz edilen kalınlık w^a mm	Minimum GKB değeri ve maksimum yarı gölge (ISO 19232-5) ^b mm	Maksimum temel uzamsal çözünürlük (tel kalınlığına ve tel aralığına denk) ^b ($SR_{b, görüntü}$) mm
$w \leq 1,5$	D 13+ 0,08	0,04
$1,5 < w \leq 4$	D 13 0,10	0,05
$4 < w \leq 8$	D 12 0,125	0,063
$8 < w \leq 12$	D 11 0,16	0,08
$12 < w \leq 40$	D 10 0,20	0,10
$40 < w \leq 120$	D 9 0,26	0,13
$120 < w \leq 200$	D 8 0,32	0,16
$w > 200$	D 7 0,40	0,20

6. DİJİTAL RADYOGRAFİ İLE KLASİK YÖNTEMLERİN KIYASLANMASI VE MALİYET ANALİZİ

6.1 Boru Hatlarında Uygulanabilirlik Yönünden Kıyaslanması

Doğalgaz ve petrol boru hatları, sıvı veya gaz bir yakıtın uç uca bağlı bir boru sistemi vasıtasıyla tüketilmek veya pazarlanmak üzere bir noktadan başka bir noktaya uzun mesafeli taşınmasıdır. Bu taşıma kara üzerinden, ihtiyaç duyulması durumunda açık deniz üzerinden de gerçekleştirilmektedir. Boru hattı coğrafi olarak her zaman eğimsiz düz alanlardan geçmemektedir. Denizaşırı geçişler, yüksek eğimli dağlık araziler, dere yatakları, karayolları, şehir merkezine yakın bölgeler gibi hem kritik hem de imalatlar açısından zorlu birçok noktadan geçmektedir. Böyle noktalarda imalat aşamalarının hem çok hızlı hem de hatasız bir şekilde tamamlanması önem arz etmektedir. İmalat aşamalarından biri olan radyografinin belirtmiş olduğumuz kritik noktalardaki uygulaması, klasik yöntemler (Gama ve X-Ray cihazı) ve gerçek zamanlı dijital radyografi ile yapılması durumundaki avantaj ve dezavantajları aşağıda incelenmiştir. (Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2013)

Dijital radyografi sistem elemanları tasarıma, uygulandığı boru çapına, et kalınlığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Görüntünün oluşmasını sağlayan ana elemanlar benzerlik göstermesine karşın hareketi sağlayan mekanizmalar, merkezleme elemanları, güç üreten üniteler ve besleyicilerde farklılıklar bulunmaktadır. Kimi tasarımlar elle taşınacak boyutlarda olmasına karşın kimi tasarımlar taşıyıcı makine gerektirmektedir.

Fotoğraf 6.1'deki DR cihazı, sahada yüksek eğimli, yağıştan veya toprak yapısı kaynaklı yumuşak zeminle karşılaşılan bölgelerde çalışma zorluğu yaşayacaktır.



Fotoğraf 6.1. Applus + RTD Firmasına Ait DR Cihazı.

Fotoğraf 6.2'deki DR cihazı ise el ile taşınabilmesi yönünden kaynaklı bağlantıların radyografisinde ulaşım problemini ortadan kaldırmıştır.



Fotoğraf 6.2. Bars Firmasına Ait DR Cihazı.

Dijital radyografi sistemi çekim sürelerini istenilen en iyi görüntü seviyesinde bile birkaç dakikaya kadar indirebilmiştir. Tie-in bağlantılarında uygulanabilir olmasıyla birlikte kaynaklı bağlantıların radyografisinde %100 çekim kapasitesine sahiptir.



Fotoğraf 6.3. DR Tie-in Bağlantı Uygulaması.

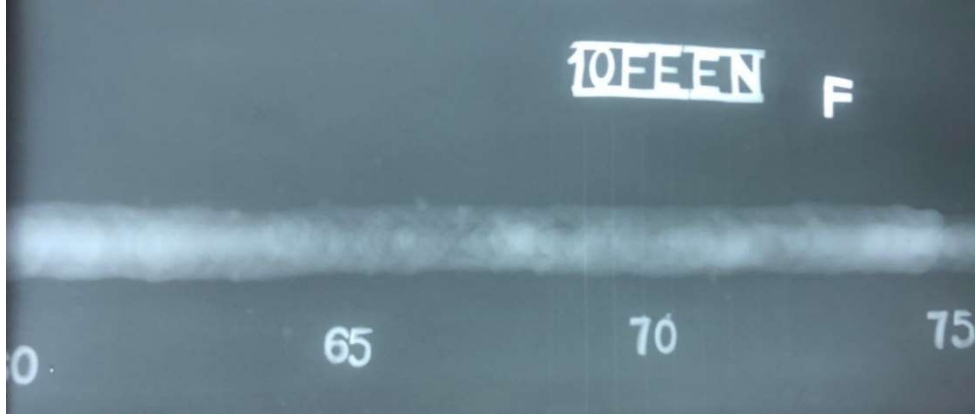
Klasik yöntemlerden olan Gama cihazı ve X-Ray cihazı ile radyografik muayene taşıma kolaylıkları yönünden arazi şartlarından çok etkilenmemektedir. Fakat boru çapı ve film geometrisi hesap edilerek film çekiminin boru içerisinden yapılması gerektiği durumlarda; boru içinin su, çamur vb. kirleticilerle dolu olması, yürür mekanizmasına zarar verdiğinden ve eğimin yüksek olduğu noktalarda sabit durmasının zor olmasından dolayı film çekimi için merkezleme sıkıntıları yaşanmaktadır.

6.2 Görüntü Kalitesi ve Kaynak Hata Tespiti Yönünden Kıyaslanması

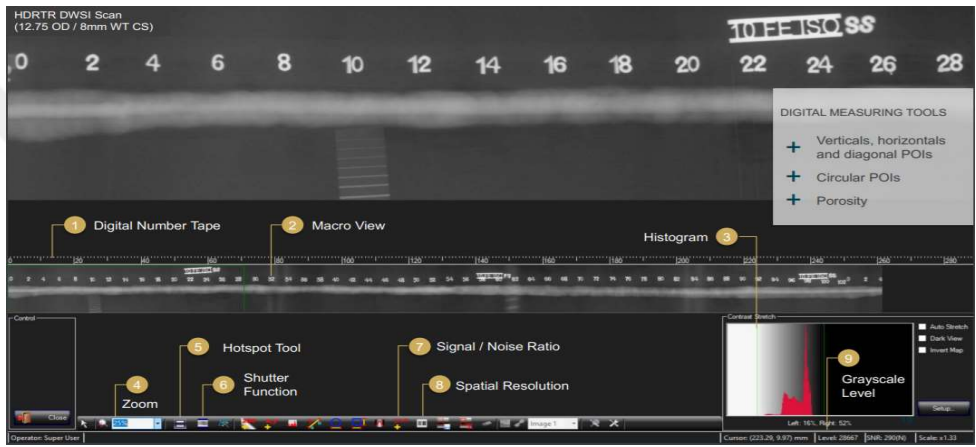
Petrol boru hatları sızıntı durumunda çevreye karşı tehlikeli kirletici özelliğe sahiptir. Doğalgaz boru hatlarıyla birlikte yüksek basınçlarda iletimleri gerçekleştirilmektedir. Taşıdıkları gaz ve sıvı yakıtın maddi değerleri yüksektir. Tüm bunlar göz önüne alındığında boruların kaynaklı bağlantılarının radyografik değerlendirmesinde hataların doğru tespiti büyük önem arz etmektedir. (Tüba Bilimler Akademisi, 2021)

Gama ve X-Ray cihazı ile radyografide film kasete yerleştirilirken, sahada borunun üzerine sarılırken, film çekimi tamamlandıktan sonra filmin banyosu esnasında ve filmin değerlendirme için görüntüleyiciye (viewer) gelene kadarki süreçte mekanik anlamda hatalar oluşabilmektedir. Buna karşın DR yönteminde film negatifine ihtiyaç duyulmayıp, görüntü direkt panel üzerinden algılandığından tüm bu riskler ortadan kalkmaktadır.

Kaynak hatalarının tespitinde ise film görüntüsünün siyah ile beyaz arasındaki gri tonlamaları ne kadar yüksekse hatalar o kadar görünür olmaktadır. Şekil 6.1’de Gama ve Şekil 6.2’de DR cihazı ile çekilen kaynak bağlantılarının film görüntüleri mevcuttur. (Çobanoğlu, 2012)

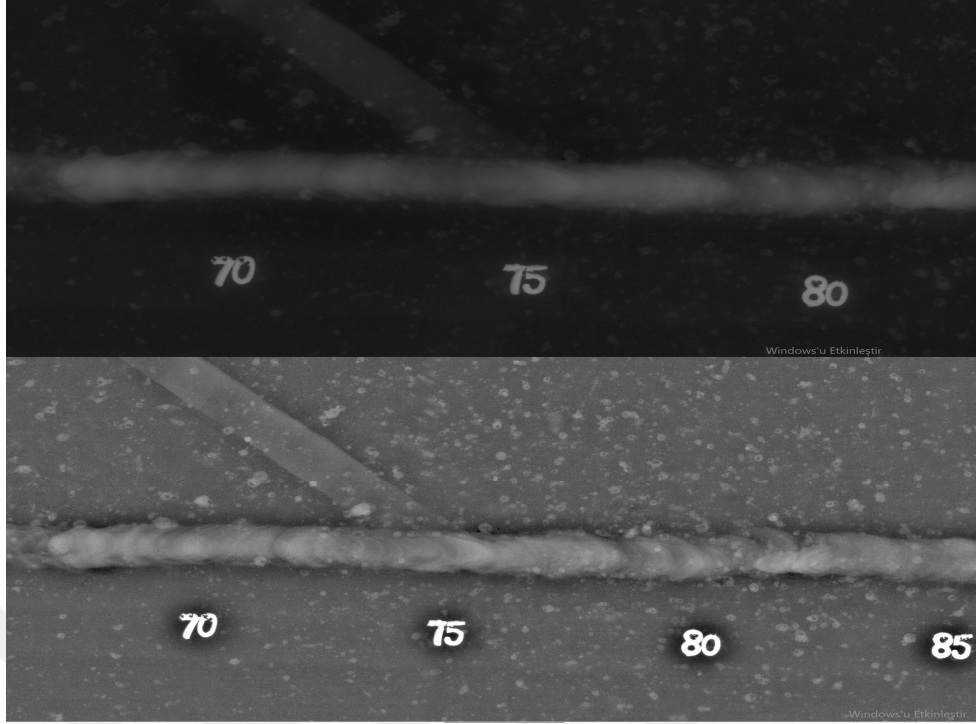


Şekil 6.1. Gama Cihazı ile Çekilmiş Film.



Şekil 6.2. DR Cihazı ile Çekilmiş Film.

Görüntülerden anlaşılacağı üzere DR yönteminin görüntü kalitesi klasik yöntemlerden daha yüksektir. Bunun yanı sıra DR yönteminin bilgisayar kontrollü olmasının verdiği avantajla birlikte gri tonlamalarında değişiklik yaparak (filtre) hataların daha görünür hale gelmesine imkân sağlamaktadır.



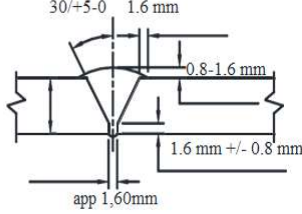
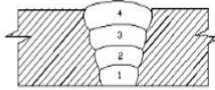
Şekil 6.3. Filtre Uygulanmış Bir DR Filmi.

6.2.1 Görüntü Kalitesinin Deneysel Yöntemlerle İncelenmesi

Bu bölümde deneysel olarak görüntü kalitelerinin karşılaştırması yapılacaktır. Klasik radyografi yöntemlerinden X-Ray Crawler cihazı ve DR yöntemi ile çekilmiş filmler değerlendirmeye alınacaktır.

Kullanılan kaynak yöntemini tarif eden uygulama prosedürü detayları Tablo 6.1’de gösterildiği şekildedir. Uygulama 6G pozisyonunda 2 karşılıklı kaynakçı vasıtasıyla elektrik ark kaynağı yöntemi kullanılarak, dış kelepçe ile boru ağzılaması gerçekleştirilmiş 18” çapında 7.14 mm et kalınlığındaki borunun, 4 kaynak pasosu atılarak birleştirilmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6.1. Deney Parçası Kaynak Prosedürü.

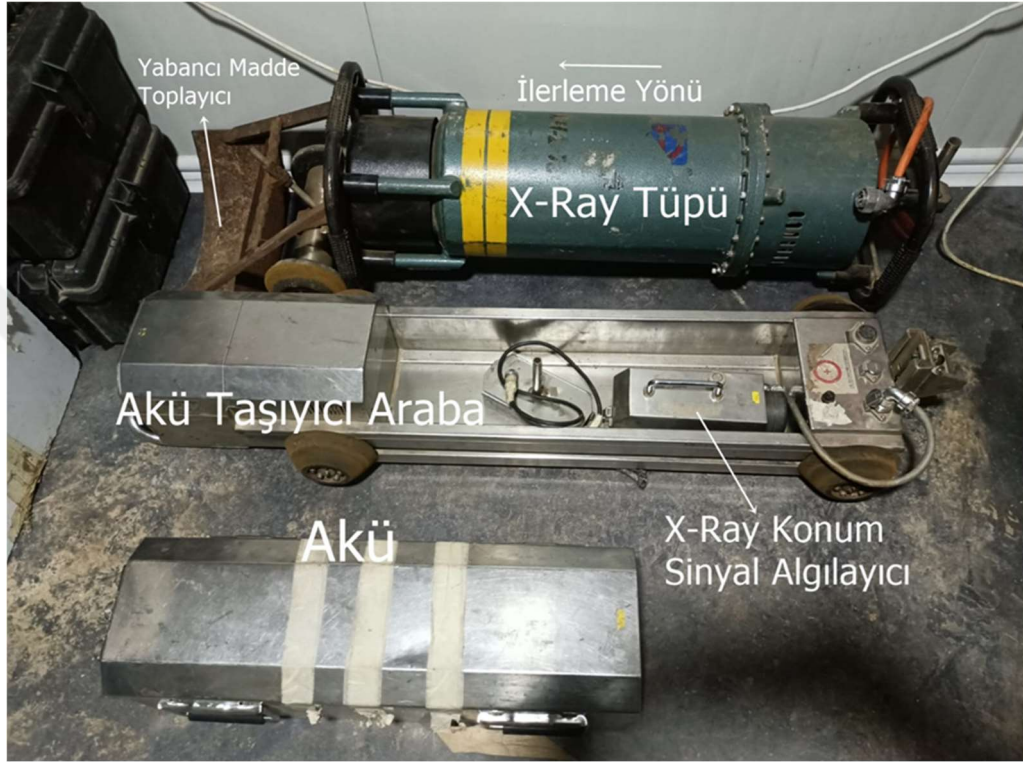
PROSEDURE		Method : SMAW		REFERENCES					
WPS No : WPS-01		Weld : Main Line Welding		API 1104					
Date : 06.09.2022		Welder : 2 Persons		ASME B31.8					
Revision : 0		Position : 6G							
Description : ISSUED FOR APPROVAL		Direction : Root - Uphill / Other - Downhill							
JOINT DESIGN		PASS SEQUENCE		MATERIAL DESCRIPTION					
				API 5L PSL2 X52 Pipe Diameter : 18" inch Pipe Wall Thickness : 7,14mm					
		APP. THICKNESS OF SEQUENCE							
				Pipe Wall Thickness : 7,14 mm					
				1	ROOT 1,9 mm				
				1	HOT 1,9 mm				
				1	FILL 2,44 mm				
				1	CAP 1,9 mm				
ELECTRODE PROPERTIES ACC. TO PASSES									
Pass	Electrode Type	Electrode Diameter	Amps	Volts	Polarity	Current	Weld Speed (mm/min)	Time Lapse (min)	Temp. Between Passes °C
Root	E6010 5P+	3,25 mm	90-100 A	26-32 V	-	DC	80 - 120	5	----
Hot	E8010 P1	3,25/4,00 mm	80-120 A	27-34 V	+	DC	80 - 120	5	100-150 °C
Fill	E8010 P1	4,00 mm	80-120 A	27-34 V	+	DC	80 - 120	5	100-150 °C
Cap	E8010 P1	4,00 mm	80-120 A	27-34 V	+	DC	80 - 120	5	100-150 °C
Electrode Manufacturer			Root: Lincoln Electric		Hot, Fill and Cap : Böhler Electric				
ELECTRODE DESCRIPTION						PREHEATING			
				Pipe Wall Thickness : 7,14 mm					
				ROOT	HOT	FILL	CAP	Heating Condition All Conditions	
AWS Code				A 5.1	A 5.1	A 5.1	A 5.1		
Electrode				E6010 5P+	E8010 P1	E8010 P1	E8010 P1	Heating Temp. 150 °C	
Diameter				3,25 mm	3,25/4,00 mm	4,00 mm	4,00 mm		
Storage	In Package							Heating Tool	
Carriage	In Package							Propane Torch	
Drying	-----							PREHEATING	
DEFINITION OF WELDING APPLICATION									
Type of Joint	Number of Passes			Removal of Line-up Clamp		Spacer Machine		Cleaning	
V Type	WALL T: 7,14 mm			After Completion of %50 Root Pass		External Clamp		Power Grinding and/or Brushing	
	4 Passes								

Tablo 6.2. Kullanılan Boru Özellikleri.

Boru İmalat Tipi	Boru Sınıfı ve Et kalınlığı	Mekanik Özellikleri		Kimyasal Özellikleri				
		Akma Dayanımı Min. MPa	Kopma Dayanımı Min. MPa	C% Max.	Si% Max.	Mn% Max.	P% Max.	S% Max.
Spiral Dikiş	API 5L PSL2 X52 7.14 mm	360	460	0,18	0,45	1.40	0,025	0,010

Deney Numunesinin X-Ray Crawler Cihazı ile Radyografik Muayenesi

X-Ray Crawler cihazı ile muayene yapılırken, cihaz borunun içerisine yerleştirildikten sonra yürüyüş takımları vasıtasıyla kaynak noktasına aküden beslenerek operatör tarafından ilerletilmektedir. Deneyde kullanılan ekipmanlar Fotoğraf 6.4’de görülmektedir.



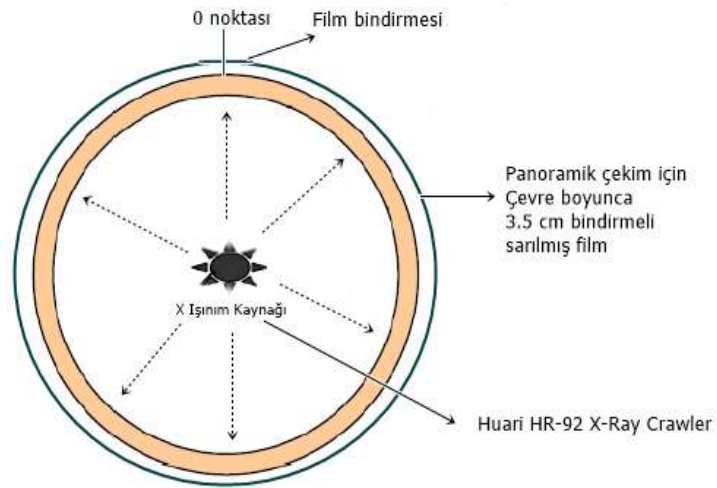
Fotoğraf 6.4. Deneyde Kullanılan X-Ray Crawler Cihazı.

Panoramik olarak film çekimi gerçekleştirileceğinden film, çevrenin tamamı boyunca 0 noktasında 3,5 cm bindirmeli olacak şekilde sarılmaktadır. Markalama işlemi kaynak numarasına göre kurşun belirteçlerle, uzunluk ise kurşun belirteçler içeren mezura vasıtasıyla yapılmaktadır. Tek telli penetremetreler 3 adet 120° arayla, çift telli penetremetre ise 0 noktasına 1 adet yerleştirilmektedir. Filmle ilgili işlemler yapıldıktan sonra X-ray Crawlerın Kaynak noktasına ışınlaması için merkezlemesi yapılmaktadır.



Fotoğraf 6.5. X-Ray Cihazı Boru İçerisine Yerleştirilirken.

Film çekimi Şekil 6.4’de gösterildiği gibi panoramik olarak boru merkezinden yapılan x ışınımı ile tek cidar üzerinden gerçekleştirilmektedir. Çekim süresi kullanılan Huari X-Ray Crawler ile 150 kV enerjide yaklaşık 25 saniye sürmektedir.



Şekil 6.4. 18” X-Ray Crawler Cihazı İle Tek Cidar Tek Görüntü Çekimi.

Tablo 6.3. Deney Ekipmanları.

Deney Ekipmanları	
Cihaz:	X-Ray Crawler (Huari H-92)
Şiddeti:	150-250 kV
Boyutu:	1 x 3,5
Film Sınıfı:	D4
Film Ebadı:	10 x 155 cm
Film Metraji:	143,5 cm
Film Bindirme Metraji:	3,5 cm
Kurşun Ekran:	Filmin ön ve arkasına 0,125 mm
Densitometre (Yoğunluk Ölçer):	KOWOTEST (Densorapid D)
Film Yoğunluğu:	2-3 aralığında
Görüntü Oluşturma:	Tek cidar, tek görüntü
Işınım mesafesi:	9" (228,6 mm)
Malzeme Et Kalınlığı:	7,14 mm
Poz Süresi:	25 +/- 5 saniye
Görüntü Kalite Belirteçleri (Penetremetre):	Tek telli penetremetre 13 FE EN (13-19) Çift telli penetremetre (13 çift) EN 19234-5
Penetremetre Kabul Koşulları:	Tek telli W 14 ve Çift telli D 12
Penetremetre Kullanımı:	Film tarafı 3 adet tek telli penetremetre (120 ⁰ açıyla) Film tarafı 1 adet çift telli penetremetre
Hassasiyet:	0,16 / 7,14 x 100 = 2,24
Markalama:	Kurşun harfler ve rakamlar, Mezura Kurşun belirteçli
Film Banyo Ekipmanları:	Otomatik Banyo (Indux 900E)
Test Sınıfı:	EN 17636-1 Sınıf "B"
Kullanılan Standartlar:	API 1104, ASME Section V Article 2, EN – 17636-1
Radyasyon Güvenlik Önlemleri:	Kişisel dozimetre ve radyakmetre

Film banyo ekipmanı olarak INDX 900E otomatik banyo kullanılmıştır.



Fotoğraf 6.6. Otomatik Film Banyo Ekipmanı.

Deney Numunesinin DR Cihazı ile Radyografik Muayenesi

DR Cihazı ile muayene yapılırken, öncelikle markalama kaynak numarasına göre kurşun belirteçlerle, uzunluk ise kurşun belirteçler içeren mezura vasıtasıyla yapılmaktadır. Tek telli penetremetreler 1 adet saat yönünde genellikle 15° denk gelen kısma, çift telli penetremetre ise 0 noktasına 1 adet yerleştirilmektedir.



Fotoğraf 6.7. DR Film Çekimi Markalama İşlemi.

Algılayıcı panel kaynak bağlantısını merkezleyecek şekilde döner ayaklarındaki mıknatıslar yardımıyla boru üzerine yerleştirilmektedir. Handle, (X-ray tüpü ile algılayıcı panel ara bağlantı ekipmanları) tüpde üzerinde barındıran ekipman, algılayıcı panele bağlanmaktadır. Bu bağlantı şekli X-ray tüpünün algılayıcı panele 90° açıyla bakmasını sağlamaktadır. DR cihazının boru üzerinde yürütmesi sırasında kayma gerçekleşmemesi için vidalı bir mekanizma ile sabitlemesi yapılmaktadır.

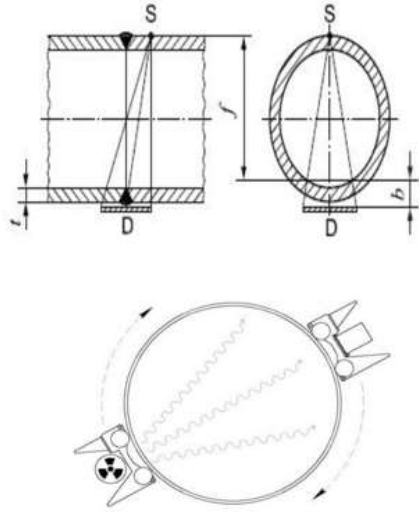


Fotoğraf 6.8. DR Cihazı Film Çekimi.

Film çekim işlemine başlanması için, sistem gereksinimi olan 220 volt enerjinin sağlanması gerekmektedir. Bu enerji 3 kVA ve 220 volt çıkışlı jeneratör vasıtasıyla sağlanmakta, sistemin stabil çalışabilmesi ve jeneratörün durmasına karşın UPS vasıtasıyla enerji kesintisi olmadan sistem stabil hale getirilmektedir. Bu enerji X-Ray tüpünün ve diğer sistemlerin beslenmesini sağlamaktadır. X-Ray kontrol ünitesi vasıtasıyla X-Ray tüpü beslenmekte ve sistem film çekmeye hazır hale gelmektedir.

Film çekim işlemi sistemle uzaktan haberleşen bir bilgisayar vasıtası ile kontrol edilmektedir. Sistem arızalarının kontrolünü de gerçekleştiren haberleşme ünitesinden onay alındıktan sonra çekim işlemi bilgisayar üzerinden başlatılmaktadır. X-Ray tüpünden çıkan odaklanmış ışınların çift cidar geçerek oluşturduğu tek film görüntüsü algılayıcı panel üzerine yansımaktadır. Film görüntüsü çekimle aynı anda bilgisayar ekranına yansımakta ve sistem üzerinde kayıt edilmektedir.

Tablo 6.4. DR Muayene ve Çekim Tekniği.

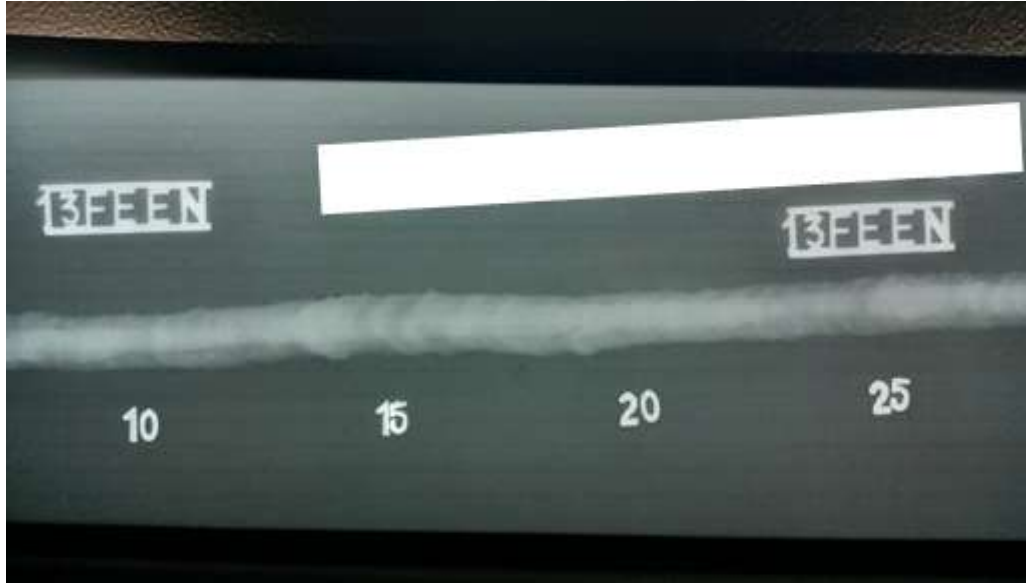
Gerekli Bilgiler	18"-7,14mm	TS EN 17636-2 Madde 7.1.8 Şekil 14; 
Kullanılacak Penetrametre Tipi	13 FEEN - ÇİFT TELLİ	
Gerekli Tel No (Tek Telli)	W14	
Gerekli Tel No (Çift Telli)	D12	
Gerekli Normalize SNR	140	
FFD (mm)	488	
Scan Mode	Frontal	
Voltaaj (kV)	200 kV	
Current (mA)	4.5 mA	
Exposition (sec)	1.00	
Frame rate (fps)	1.00	
Position count	29	
Frame count	18	
Frame overlap (mm)	10	
Elapsed Scan Time (dk)	10	
Görüntü Kayıt Formatı	Diconde	
Görüntü Teslim Formatları	HAM görüntü BARS data (dikilmemiş) Dikilmiş DICONDE	
Dosya Kayıt Teslimi	Harici Hardisk	

Deney Kaynağının Film Görüntülerinin İncelenmesi

X-Ray Yöntemi ile Çekilen Film Görüntüleri



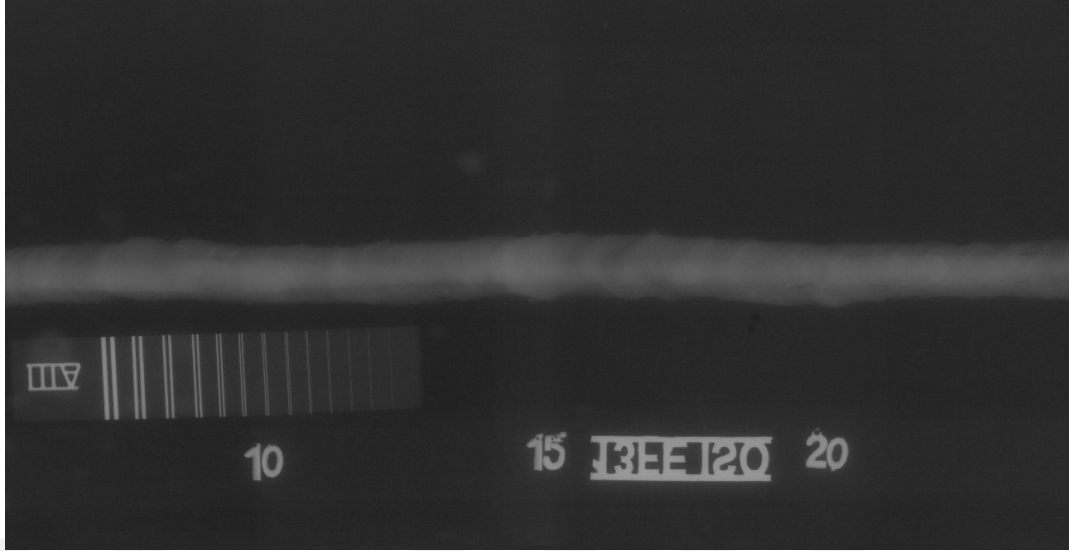
Fotoğraf 6.9. X-Ray Crawler ile Çekilmiş Filmin Yoğunluk Ölçümü.



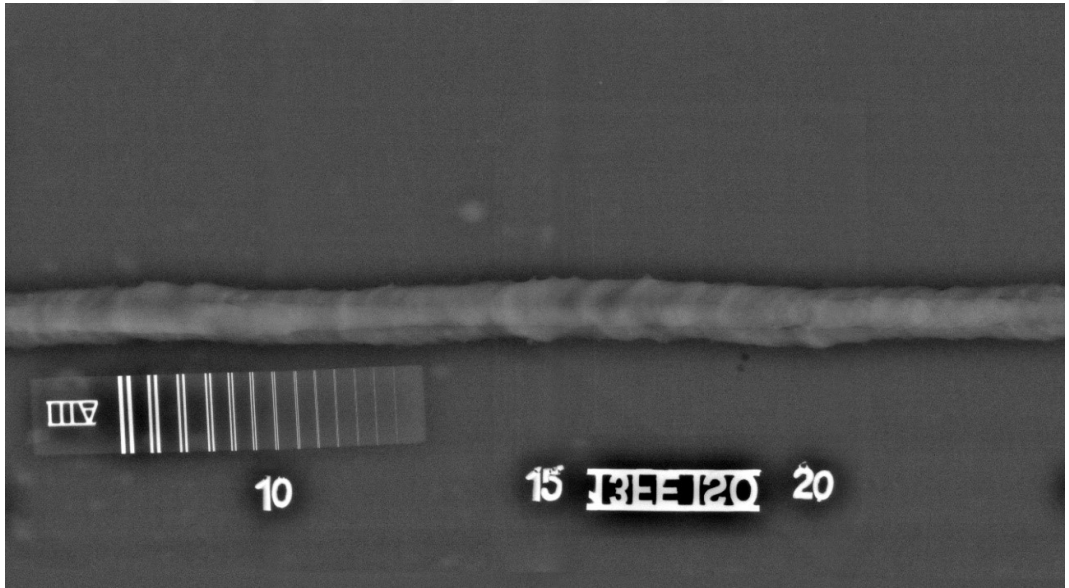
Fotoğraf 6.10. X-Ray Crawler ile Çekilmiş Kaynağın Görüntüsü.

Yukarıda X-Ray Crawler yöntemi ile film çekimi gerçekleştirilmiş kaynağın yoğunluk kontrolü ve sonrasında değerlendirilmek üzere görüntüleyici (Viewer) adı verilen ışık kaynağında görüntüsü verilmiştir.

DR Yöntemi ile Çekilen Film Görüntüleri:



Fotoğraf 6.11. DR Yöntemi ile Çekilmiş Ham Film Görüntüsü.



Fotoğraf 6.12. DR Yöntemi ile Çekilip Filtre Uygulanmış Film Görüntüsü.

Yukarıda DR yöntemi ile film çekimi gerçekleştirilmiş kaynağın görüntüsü verilmiştir. Deney kaynağı üzerinde, aynı bölgenim hem X-Ray hem de DR görüntüleri incelendiğinde 15 – 20 cm metraj aralığında kaynak haz bölgesindeki et kalınlığı farkından oluşmuş olan görüntünün tespiti X-Ray yöntemine göre DR yönteminde daha net ve filtreler yardımıyla daha kolay tespit edilebilmektedir. Filtreleme yöntemi ile kaynak et kalınlığı boyunca hangi derinlikte kaynak hatası olduğunun tespiti de kolaylaşmaktadır.

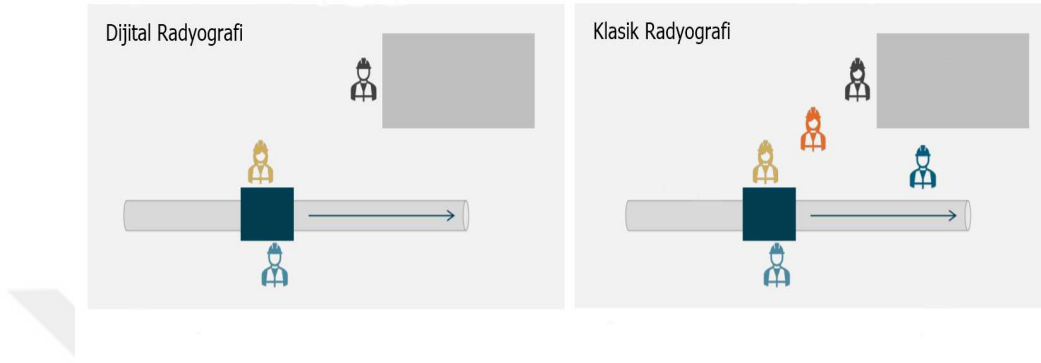
6.3 Maliyet Analizi

Doğalgaz ve petrol boru hatları, projelendirilmesinden işletmeye alınmasına kadar belirli bir takvim programı içerisinde takip edilmektedir. Projelendirmesi tamamlandıktan sonra imalat safhasına geçilen boru hattı birbirini takip eden aktiviteler olarak ilerlemektedir. Bu aktiviteler içerisinde radyografi projenin hem zamanında hem de mali anlamda takvim dahilinde bitirilebilmesi için kritik öneme sahiptir. (Tepe, 2008)

Gelişen teknoloji ile birlikte klasik radyografi yöntemlerinden DR' a geçiş yapılmasıyla, yüksek maliyetli birçok sarf malzemesiyle birlikte ekip ve ekipmanlarda değişimler olmuştur. DR yönteminin ilk yatırım maliyetleri yüksek olmasından dolayı pahalı bir yöntem olarak düşünülmektedir fakat proje süresince diğer giderlerle birlikte hesaplandığında maliyet yönünden klasik yöntemlerden daha avantajlı olduğu görülmüştür. Maliyeti etkileyen faktörleri incelersek; (X-Ray Crawler, 2015)

- Sarf malzemelerine ihtiyaç duyulmamaktadır. (Film, kaset vb.) Tedarik zincirinden kaynaklanabilecek maliyet kayıpları ortadan kaldırılmıştır.
- Kimyasal atıklara ihtiyaç duyulmamaktadır. (Film banyo ekipmanları) Satın alınmasına ve bertarafı için harcama yapılmasına gerek kalmamaktadır.
- Karanlık oda, fazla ekipmandan ve film depolama ihtiyacından kaynaklı geniş bir alan ihtiyacı kalmamıştır. Daha küçük iş sahasında çalışma yapılabilir.
- Sistem bluetooth ile uzaktan kumandalı çalıştığından saha çalışmalarında güvenli ekipman olarak değerlendirilmekte İSG maliyetlerini düşürmektedir.
- Filmlerin depolanması için klima kontrollü depolama alanı ihtiyacını ortadan kaldırılmıştır.
- Proje sonrasında filmlerin dijitalleştirme maliyeti ortadan kalkmıştır.
- Az personele ihtiyaç duyulduğundan, personel maaş gideri düşmektedir (Şekil 6.5).
- Kayıp ve hasarlı film sebebiyle oluşabilecek masraflar ortadan kaldırılmıştır.
- Otomatik arşivleme ve Proje sonrası dosya ulaşım kolaylığı, işin tesliminden sonraki süreçlerdeki maliyeti azaltmaktadır.

- Hızlı film çekim ve değerlendirmenin hemen yapılabilmesine imkân kılması yüksek verimde iş yürütümüne ve projenin takvim zamanı içinde bitirilebilmesine imkân kılmaktadır. Bu sayede cezai işlemlerden kaynaklanabilecek maliyet ortadan kaldırılmıştır. (X-Ray Crawler, 2015)



Şekil 6.5. Klasik Yöntemler ile DR Yönteminin Personel Gereksinimleri.

Şekil 6.6’ de görüldüğü üzere DR yöntemi daha az ekip ve ekipman ile çalışmaktadır. Tablo 6.5’de ise sistemlerin ekipman ve operasyon gereksinimleri incelenmiştir.

Tablo 6.5. Ekip ve Ekipman Karşılaştırması.

Dijital Radyografi Gereksinimleri	Klasik Radyografi Gereksinimleri
DR cihazı	Karanlık oda
DR taşıma aracı	Film banyosu
X-Ray Crawler	X-Ray Crawler
İzotop saklama sahası	İzotop saklama sahası
	Film
	Karanlık oda cihaz kalibrasyonları
	Film için kimyasal
	Kimyasal depolama
	Kimyasal bertarafı
	Film dijitalleştirme
	Film stoklama

Tablo 6.6’de yaklaşık 28.000 adet hat kaynağı, 7000 adet tie-in kaynağı yapılan 42” çapında bir boru hattının radyografi maliyetinin klasik yöntemlerle ve DR yöntemi ile çekilmesi yönünden karşılaştırılması yapılmıştır. Görüldüğü üzere 300 günlük bir çalışma takvimi için personel ve ekip-ekipman giderleriyle birlikte denetim giderleri, filmlerin dijitalleştirme giderleri hesap edildiğinde klasik radyografide 24.1 milyon \$ maliyet çıkarken dijital radyografide maliyet 15.8 milyon \$ ‘a düşmüştür. Bununla birlikte 8.3 milyon dolar maliyette düşüş sağlanmıştır.

Tablo 6.6. Maliyet Analizi.

	Dijital Radyografi	Klasik Radyografi
Hat kaynağı	28.000 adet	28.000 adet
Tie in kaynağı	7.000 adet	7.000 adet
Personel sayısı	21 adet	35 adet
Günlük Ücret (10saat/gün)	52.500 \$/gün	77.000 \$/gün
Çalışma gün sayısı	300 gün	300 gün
Dijitalleştirme maliyeti	0	125.000 \$
Denetim giderleri	0	900.000 \$
Maliyet	15.8milyon \$	24.1 milyon \$

Tablo 6.7’de uzun periyotta sistemlerin aynı iş gücü için yıllık ve 10 yıllık ek maliyetleri incelenmiştir. Görüldüğü üzere İlk yatırım maliyeti olarak DR sistemi en yüksek olmasına rağmen ek giderleriyle birlikte değerlendirildiğinde en avantajlı yöntem olmaktadır.

Tablo 6.7. Üç Farklı Muayene Yönteminin Karşılaştırılması. (ODTÜ KTTMM, 2020)

Üç Farklı RT Muayene Yönteminin Karşılaştırılması						
İlk Satın Alma	İlk yatırım	Yıllık Bakım/Servis	Yan Gereksinimler ve Atık Yönetimi	30.000 Görüntü/Yıl	Toplam Yıllık Maliyet	Her 10 Yıllık Ek Maliyet
Gama ve X-ray Işınım kaynağı cihazı, film ve donanımları, kimyasallar, film görüntüleyicileri (viewer)	\$40.000	\$4.000	\$4.500	\$113.000	\$121.500	\$1.255.000
CR: CR okuyucu görüntüleme cihazı, 20 görüntüleme paneli	\$125.000	\$12.500	\$1.500	\$10.000	\$24.000	\$365.000
DR: DR paneli ve DR ışınım kaynağı cihazı	\$160.000	\$16.000	\$1.000	\$0	\$17.000	\$330.000

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Doğalgaz ve petrol boru hatlarının radyografisinde kullanılan klasik radyografi yöntemleri ile dijital radyografi yöntemi, çalışmamızda öncelikli olarak boru hatlarında kullanılabilirliği yönünden incelenmiştir. Tüm arazi şartları göz önüne alındığında 1900'lü yıllardan beri uygulamaları başarıyla gerçekleştirilen klasik radyografi sistemleri ile birlikte dijital radyografinin de portatif tasarımlarıyla zor arazilerdeki performansı, film çekim süreleri, tie-in bağlantıları dahil kaynaklı bağlantıların %100'ünde uygulanabilir olması göz önüne alındığında başarılı olduğu görülmüştür.

Görüntü kalitesi incelendiğinde DR yönteminin klasik radyografi yöntemlerinden, kullandığı algılayıcı paneldeki görüntü işleme kapasitesinin çok yüksek olması, bilgisayar entegrasyonu ile birlikte görüntüyü oluşturan siyah ile beyaz arasındaki gri tonlarını filtreleme imkânı vermesi, film banyosunda oluşabilecek tüm hataların ortadan kalkmış olması, kendi çekiminden kaynaklı hataların anlık görüntü kontrolü sayesinde dakikalar içerisinde tolere edilebilir olması yönünden üstündür.

Dijital radyografinin ilk yatırım maliyeti, cihaz ve ek eğitim giderleri klasik radyografi yöntemlerine göre yüksek olmaktadır. Dijital radyografi yöntemi kullandığı algılayıcı panelin yüksek teknoloji ürünü olması, sistemin dünya üzerinde üreticisinin kısıtlı olması, hasar aldığı durumlarda tamirinin mümkün olmaması sebebiyle yüksek ek maliyet gerektirmektedir. Tüm ek maliyetlere rağmen uzun vadede değerlendirdiğimizde ise aynı iş kapasitesi için daha az personel, daha az ekipmana gereksinimi, sarf malzeme ihtiyacı olmaması, hatalara anında müdahale imkânı sağlaması, film stoklama ihtiyacını ortadan kaldırması sebebiyle maliyet daha düşük olmaktadır.



Şekil 7.1. DR Dünya Uygulamaları.

Sahada uygulanabilirliğinin yüksek olması, kaynak hatalarına anında müdahale imkânı sağlamasıyla birlikte projenin takviminde gecikmelere neden olmaması, görüntü kalitesinin yüksek olması, dijital kopya ile uzaktan erişim imkânı olması, stoklama ve geriye dönük film kontrolüne hızlı cevap vermesiyle birlikte maliyet etkin oluşu sebepleriyle doğalgaz ve petrol boru hatlarında dijital radyografi tercih sebebi olmalıdır.

8. KAYNAKLAR

(Bu tez çalışmasında APA atıf sistemi kullanılmıştır.)

- Anık, S. (1991). *Kaynak Tekniği El Kitabı*. İstanbul: Gedik Eğitim Vakfı.
- Ataş, G. (2016). *Türkiye Boru Hattı Analizi*. <https://slideplayer.biz.tr/slide/10243750/> adresinden alındı.
- Bahadori, A. (2017). *Oil and Gas Pipelines and Piping Systems- Design, Construction Management, and Inspection*. Elsevier Inc.
- Baylan, O. (2015, Nisan). *Kaynak Pozisyonları*. <https://www.metaluzmani.com/kaynak-pozisyonlari-2/> adresinden alındı.
- Bilim Fili. (2017). *Kuantum Kuramına Genel Bir Bakış*. <https://bilimfili.com/kuantum-teorisine-genel-bir-bakis> adresinden alındı.
- Boru Hattı (Pipe Line) İnşaatında Kaynağın Yeri ve Önemi. (tarih yok). Magmaweld: [https://www.magmaweld.com.tr/Content/UserFiles/OerlikonKutuphanesi/Boru_hatti_\(pipe_line\)_infaatinda_kaynagin_yeri_ve_onemi.pdf](https://www.magmaweld.com.tr/Content/UserFiles/OerlikonKutuphanesi/Boru_hatti_(pipe_line)_infaatinda_kaynagin_yeri_ve_onemi.pdf) adresinden alındı.
- BOTAŞ Genel Müdürlüğü. (2020). *2020 Almanak*. <https://www.botas.gov.tr/uploads/galeri/5932-2020-almanak.pdf> adresinden alındı.
- Cenk Makina. (2022). *Gaz Altı Kaynak Nasıl Yapılır*. <https://www.cenkmakina.com.tr/kisa-bilgiler/gaz-alti-kaynak-nasil-yapilir--> adresinden alındı.
- Çelik, O. (2013). *Gazaltı (MAG) Kaynağında Kullanılan Rutil, Bazik ve Metal Özlü Tellerin Kaynak Metal Özelliklerine Etkisinin Araştırılması*. Ankara: Gazi Üniversitesi.
- Çeyrek Mühendis. (2021). *X Işınları II – X Işını Tüpü*. <https://www.ceyrekmuhendis.com/x-isinlari-ii-x-isini-tupu/> adresinden alındı.
- Çobanoğlu, M. (2012). *Dijital Radyografi Kullanılarak Teğet Tekniği İle Çelik Borularda Cidar Kalınlığı Tayini*. İstanbul: İTÜ.
- Deligöz, C. (2010). *Radyografik Muayene Yöntemi İle Petrol Boru Hatlarındaki Borularda Kaynak Dikişi ve Diğer Hataların İncelenmesi*. İstanbul: İTÜ.
- Direct Industry. (2022). *Portable Pipe Cutting and Beveling Machine MCA*. <https://www.directindustry.com/prod/gbc-uk/product-216417-2228523.html> adresinden alındı.
- Doğan, A. (2019). *Mardin İli Şehir İçi Doğalgaz Borularındaki Kaynak Hatalarının Tahribatlı ve Tahribatsız Muayene Yöntemleri İle İncelenmesi*. Batman: Batman Üniversitesi.
- Ertürk, İ., & Selamoğlu, A. (tarih yok). *Çelik Boruların Çevresel Kaynağı. X.Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*.

- EWM Group. (2020). *Welding Dictionary MIG/MAG*. https://www.ewm-group.com/documents/misc/Welding_Dictionary_MIG-MAG.pdf adresinden alındı.
- Geliş, K. (2014). *Kaynak Teknolojisi Ders Notları*. https://abs.cu.edu.tr/Dokumanlar/2016/MK%20226/756768739_kaynak-teknolojisi_makine.pdf adresinden alındı.
- Gençkan, H. D. (2004). *Doğal Gaz Boru Hatlarında Orbital Kaynak Teknolojisi Kullanılarak Yapılan Kaynakların Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi*. İstanbul: İTÜ.
- Global Energy Monitor. (2022, Eylül). *Crude Awakening*. Global Energy Monitor: <https://globalenergymonitor.org/wp-content/uploads/2022/08/GEM-Oil-Pipelines-Briefing-2022.pdf> adresinden alındı.
- HT-RTD System for Weld Inspection. (2021). Shawcor: <https://www.shawcor.com/integrity-management-solutions/ndt-equipment-systems/products/hd-rtr-for-weld-inspection> adresinden alındı.
- Hüyüktepe, E. (2019). *Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımlı X65 Boru Hattı Çeliklerinde Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Ankara: Gazi Üniversitesi .
- İnoks Lazer. (2022). *Eskişehir Kaynak*. <http://inokslazer.com.tr/hizmet-eskisehir-kaynak-15> adresinden alındı.
- Kaba, S. (2009). *Doğal Gaz Boru Hatlarındaki Kaynaklı Birleştirmelerin Radyografik Muayenesi*. Ankara: Gazi Üniversitesi.
- Kaluç, E., & Tülbentçi, K. (2001). Boru Hatlarında Otomatik MIG/MAG Kaynak Yönteminin Kullanımı. *III.Ulusal Kaynak Teknolojisi Kongresi*.
- Kaynak Akademi. (2021). *Tig Kaynak Yöntemi* . <https://kaynakakademi.com/tig-argon-kaynak-yontemi/> adresinden alındı.
- Kaynak Teknolojisi ve Tahribatsız/Uygulama Merkezi. (2021). *Dijital Radyografi Uygulama El Kitabı*. Ankara: ODTÜ.
- Kınacı, B. F. (2019). *Endüstriyel Tesislerde Doğalgaz Çelik Boru Kaynak Uygulamaları ve Kaynaklı Bağlantıların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Sivas: Sivas Cumhuriyet Üniversitesi.
- Komaç, E. (2014). *Teknik Eğitim El Kitabı*. <https://docplayer.biz.tr/39992949-Teknik-egitim-el-kitabi.html> adresinden alındı.
- Köse, M. (2014). *Nükleer Tıp Uygulamalarında Kullanılan Radyoizotopların External Doz Dağılımı*. Yozgat: Bozok Üniversitesi.
- Küçük, İ. (2018). *X – Işını Floresans Spektroskopisi (XRF) Deney Föyü*. Bursa: Bursa Teknik Üniversitesi.
- Langenbrunner, B., Joly, J., & Greig, A. (2022, Şubat). *Pipe Dreams*. Global Energy Monitor: https://globalenergymonitor.org/wp-content/uploads/2022/02/GEM_GasPipelineReport2022_r7.pdf adresinden alındı.

- Mak Elektronik. (2022). *Plaka Tip Delikli Penetremetreler*. <https://makelektronik.com.tr/d/545/Plaka-Tip-Delikli-Penetremetreler.html> adresinden alındı.
- ODTÜ KTTMM. (2020). *Dijital Radyografi Seviye 1+2*. <https://indtokulu.com/> adresinden alındı.
- Özkırmaz, E. (2009). *Kaynaklı Bağlantıların Tahribatsız Muayene Yöntemiyle Optimum Kaynak Değerlerinin Belirlenmesi*. Mersin: Mersin Üniversitesi.
- Pneumatic Internal Pipe Clamp*. (2022). Plan Teknik: <https://www.planteknik.com/pneumatic-internal-pipe-clamp/> adresinden alındı.
- Salma, A. (2011). *Tahribatsız Muayene Metotları ve Doğal Gaz Boru Hatlarındaki Kaynaklı Bağlantıların Radyografik Araştırılması*. Kayseri: Erciyes Üniversitesi.
- Seçim, C. (2011). *Tahribatsız Muayene Yöntemleri ve Uygulama Alanları*. Hatay: Mustafa Kemal Üniversitesi.
- Sezgin, M. (2019). *API Borularının Gazaltı Kaynak Yöntemiyle Kaynaklanabilirliği ve Mikro Yapı-Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Ankara: Gazi Üniversitesi.
- Tepe, E. (2008). *Doğalgaz Boru Hattı İmalatının Tasarım, Tesisat, İnşaat ve Montaj Esasları-Uygulanan Kontrol Yöntemleri*. İTÜ.
- TES Electrical Electronic Corp. (2014). *Noise Dose Meter*. http://www.tes.com.tw/en/product_detail.asp?seq=384 adresinden alındı.
- The Validation Center. (2020). *Wireless Remote O2 Sensor for Pipeline Welding fitted to Internal Line Up Clamp*. <https://www.tvcalx.co.uk/wireless-remote-o2-sensor/> adresinden alındı.
- TPAO. (2021). *Petrol ve Doğalgaz Sektör Raporu*. Ankara: TPAO Yayıncılık.
- Troy-Met Analitik. (2022). *İleri PED+ Kişisel Radyasyon Dozimetresi*. <https://www.troy-met.com/analitik/urun/203/ped-kisisel-radyasyon-dozimetresi> adresinden alındı.
- Turgut, T. (2005). *Kaynak Dikişleri İçin Muayene Planlarının Çıkarılmasındaki Esaslar*. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Tüba Bilimler Akademisi. (2021). *TÜBA Doğalgaz Raporu*. Ankara.
- Türkiye Zeka Vakfı. (2021). *Elektromanyetik Spektrum: Gökyüzü Ne Renktir?* <https://www.tzv.org.tr/#/haber/6187> adresinden alındı.
- Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı. (2013). *Şura Sonuç Bildirgesi*. <https://www.utikad.org.tr/images/BilgiBankasi/11ulastirmadenizcilikvehaberlesmesurasisonucbildirgesi-2652.pdf> adresinden alındı.
- Ülker, D. (2010). *X-RAY Tabanlı Güvenlik Sistemleri*. https://www.emo.org.tr/ekler/73e687d938d4513_ek.pdf?dergi=599 adresinden alındı.
- Yelbay, İ., Kaleli, T., Aydın, İ., & Gür, H. (2021). Boruların Kalite Kontrolünde Dijital Radyografi Uygulamaları. *Mühendis ve Makina*, 20-29.
- Yıldırım, H. (2015). *Karbon Çeliği Borularında Dijital Radyografi Kullanılarak Korozyon Tespiti*. İstanbul: İTÜ.

Yaşar, T. (2010). *Radyografi Yöntemi İle Kaynak Dikişlerinde Hata Tespiti*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.

X-Ray Crawler. (2015). ENKON: <https://www.enkon.com.tr/x-ray-crawler/> adresinden alındı.



İZZET CİHAN AKAT

MAKİNE MÜHENDİSİ

İŞ DENEYİMİ

Başmühendis - BOTAŞ

- ✓ Saha projelerinde proje koordinatörü

Mühendis – SAVUNMA SANAYİİ MÜSTEŞARLIĞI

2017

- ✓ Hava savunma – Uzay biriminde proje yürütümü

Mühendis – KIRŞEHİR ŞEKER FABRİKASI

2017

- ✓ Mühendis olarak vardiya amirliği, mühendislik hizmetleri

Stajyer Mühendis – BORUSAN HOLDİNG

2017

- ✓ Stajyer mühendis olarak bir ay boyunca kurum stajı yapmak

Stajyer Mühendis – İSTANBUL TERSANESİ KOMUTANLIĞI

2017

- ✓ Stajyer mühendis olarak imalat atölyelerinde bir ay boyunca staj yapmak

EĞİTİM

Makine Mühendisliği – ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ

2017

Makine Mühendisliği – ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ

2017

Gazi Anadolu Lisesi

2017

SERTİFİKALAR

İş Sağlığı ve Güvenliği Sertifikası (C sınıfı)

2017

Şantiye Şefliği Sertifikası

2017

Sihhi Tesiat Belgesi

2017



İLETİŞİM



İzzet Cihan Akat



EK BİLGİLER



DOĞUM YERİ



DOĞUM TARİHİ



MEDENİ DURUMU



EHİYET

YETENEKLER

Sunum Becerisi

Proje Yönetimi

Zaman Yönetimi

Analitik Düşünme

Solid Works ve Solid CAM

AutoCAD

MS Office Programları

Sportif Aktiviteler

Dil Bilgisi

TÜRKÇE – Anadil

İNGİLİZCE – İleri Seviye