

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**DİJİTAL RADYOGRAFİ KULLANILARAK TEĞET TEKNİĞİ İLE
ÇELİK BORULARDA CİDAR KALINLIĞI TAYİNİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat ÇOBANOĞLU

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

OCAK 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**DİJİTAL RADYOGRAFİ KULLANILARAK TEĞET TEKNİĞİ İLE
ÇELİK BORULARDA CİDAR KALINLIĞI TAYİNİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Murat ÇOBANOĞLU
(301001006)**

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Nesrin ALTINSOY

OCAK 2012

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün **301001006** numaralı Yüksek Lisans / Doktora Öğrencisi **Murat ÇOBANOĞLU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“DİJİTAL RADYOGRAFİ KULLANILARAK TEĞET TEKNİĞİ İLE ÇELİK BORULARDA CİDAR KALINLIĞI TAYİNİ ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Nesrin ALTINSOY**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Beril TUĞRUL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

.....
Prof. Dr. Yılmaz TAPTIK
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **16 Aralık 2011**
Savunma Tarihi : **26 Ocak 2012**

Eşim Tülin ve çocuklarım Kemal Emir ve Elifnaz'a,

ÖNSÖZ

Bu Yüksek Lisans Tez Çalışmasında, dijital radyografi sistemi kullanılarak farklı çaptaki boruların teğet tekniği yöntemiyle cidar kalınlıklarının tespitine ilişkin deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada gerek yönlendirme olarak gerekse tezin planlanmasında ve deneysel sonuçların değerlendirilmesinde değerli bilgisini ve zamanını esirgemeyen bana her türlü yardımı sağlayan danışman Hocam Sayın Doç.Dr Nesrin ALTINSOY'a teşekkürü bir borç bilir şükranlarımı sunarım.

Bununla birlikte çalışmanın hazırlanması sırasında değerli bilgilerini ve zamanını esirgemeyen ÇNAEM Koordinatörü Sayın Doç.Dr.Şinasi Ekinci'ye, her türlü desteğinden dolayı ÇNAEM Uzmanı Enis KAPDAN'a, bu zamana kadar bana emeği geçen tüm hocalarıma en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Maddi ve manevi olarak hayatımın her safhasında bana hep destek olan çok sevgili eşim Tülin ÇOBANOĞLU'na sonsuz teşekkür ederim.

Ocak 2012

Murat ÇOBANOĞLU
(Fizik Öğretmeni)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
SEMBOLLER	ixi
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxii
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. RADYOGRAFİ	5
2.1 Elektromanyetik Radyasyonla Klasik Radyografi	6
2.1.1 Radyasyon kaynakları	7
2.1.2 Elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşmesi	9
2.1.3 Görüntü kalite faktörleri.....	12
2.1.3.1 Geometri faktörü	12
2.1.3.2 Film faktörü.....	14
2.1.3.3 Ekran faktörü.....	15
2.1.3.4 Poz süresi	15
2.1.4 Görüntü kalitesi tayini.....	16
2.2 Dijital Radyografi.....	18
2.2.1 Dijital radyografi türleri	19
2.2.1.1 Film dijitalleştirme	19
2.2.1.2 Bilgisayarlı radyografi (CR)	20
2.2.1.3 Direkt radyografi (DR).....	21
2.3 Dijital Radyografide Görüntü Kalitesi	24
2.3.1 Piksel boyutu.....	24
2.3.2 Uzaysal çözünürlük.....	25
2.3.3 Kontrast.....	27
2.3.4 Gürültü	27
2.3.4.1 Sinyal - gürültü oranı	27
3. RADYOGRAFİ YÖNTEMİYLE BORULARDA CİDAR KALINLIĞI TAYİNİ	31
3.1 Çift Cidar Tekniği (DWT).....	33
3.1.1 Çift cidar tek görüntü (DWSI)	33
3.1.2 Çift cidar çift görüntü (DWDI)	34
3.2 Teğet Radyografi Tekniği (TRT)	36
3.2.1 Yarı gölge.....	38
3.2.2 Büyütme faktörü	38
3.2.3 Cidar kalınlığı değerlendirilmesi	39
3.2.4 Teğet radyografi tekniğinin sınırları	42
3.3 Çift Cidar Tekniği Ve Teğet Radyografi Tekniğinin Karşılaştırılması.....	43

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	45
4.1 Dijital Radyografi Sisteminin Tanıtılması	45
4.1.1 X-ışını kaynağı	46
4.1.2 Düzlem panel dedektör	48
4.1.3 Dedektör kontrol ünitesi	49
4.1.4 Kontrol ve görüntüleme ünitesi	49
4.1.5 Sistem bağlantı kabloları	50
4.1.6 Şarj edilebilir piller ve dolum aleti	50
4.2 Deneyde Kullanılan Boru Numuneleri	51
4.3 Deney Düzenegi	52
4.4 Deneyin Yapılışı	54
4.4.1 Çalışma parametreleri	54
4.4.1.1 Kaynak dedektör mesafesi (KDM)	54
4.4.1.2 Kaynak puls değerleri	54
4.5 Yarı Gölgenin Hesaplanması	55
5. DENEY SONUÇLARI	57
5.1 Farklı Çalışma Parametreleri İçin Elde Edilen Deney Sonuçları	57
5.1.1 80 puls ve 600 mm KDM için elde edilen deney sonuçları	58
5.1.2 80 puls ve 700 mm KDM için elde edilen deney sonuçları	66
5.1.3 90 puls ve 600 mm KDM için elde edilen deney sonuçları	72
5.1.4 90 puls ve 700 mm KDM için elde edilen deney sonuçları	78
5.2 Deney Sonuçlarındaki Hata Miktarı	84
5.3 Kullanılan Dijital Radyografi Sistemi İçin L_{max} Değerinin Sınırları	90
6. SONUÇ VE TARTIŞMA	91
KAYNAKLAR	94
ÖZGEÇMİŞ	97

SEMBOLLER

a	: Piksel boyutu
çç	: Çift çizgi
D	: Kararma yoğunluğu
D₀	: Filmin ışınlanmadan önceki yoğunluk değeri
d	: Kaynak-film uzaklığı
d₁	: Kaynak-malzeme uzaklığı
d₂	: Malzeme-film uzaklığı
D_a	: Dış cidar çapı
d_{min}	: Minumum kaynak film uzaklığı
E	: Gelen fotonun enerjisi
E'	: Saçılan fotonun enerjisi
f	: Frekans
f_s	: Örnekleme frekansı
G₂	: Gradyan
I	: Malzemeden geçen ışının şiddeti
I₀	: Filme ulaşan ışının şiddeti
ID	: Boru iç çapı
ID_i	: Boru iç çapının radyograf üzerindeki uzunluğu
K	: Kaynak boyutu
l	: Malzeme kalınlığı
L_{max}	: Işınlardan geçebileceği max malzeme kalınlığı
λ	: Dalga boyu
N	: Gürültü
OD	: Boru dış çapı
OD_i	: Boru dış çapının radyograf üzerindeki uzunluğu
R	: Yalıtım malzemesinin dış yarıçapı
r	: Boru dış yarıçapı
r_c	: Yalıtım malzemesinin yarıçapı
r_d	: Birikimin yarıçapı
r_i	: Borunun iç yarıçapı
r_o	: Borunun dış yarıçapı
S	: Hassasiyet
S	: Sinyal
SNR	: Sinyal Gürültü Oranı
SNR_{meas}	: Ölçülen Sinyal Gürültü Oranı
SNR_n	: Normalize Edilmiş Sinyal Gürültü Oranı
SR_b	: Temel Uzaysal Çözünürlük
KDM	: Kaynak film mesafesi
t	: Borunun gerçek cidar kalınlığı
t_g	: Geometrik cidar kalınlığı
t_i	: Film üzerinde ölçülen cidar kalınlığı
U_g	: Film üstündeki yarı gölge

w	: Düzeltilmiş cidar kalınlığı
w'	: Film üzerinde okunan cidar kalınlığı
w_{nom}	: Nominal cidar kalınlığı
X_c	: Yalıtkan malzemenin kalınlığı
X_d	: Boru içinde taşınan maddenin kalınlığı
X_m	: Birikim kalınlığı
X_s	: Çeliğin kalınlığı
Y_g	: Yarı gölge
θ	: Sapma açısı
μ	: Lineer absorpsiyon katsayısı
μ_c	: Yalıtkan malzemenin zayıflatma katsayısı
μ_d	: Birikimin zayıflatma katsayısı
μ_{eff}	: Efektif zayıflatma katsayısı
μ_m	: Boru içinde taşınan maddenin zayıflatma katsayısı
μ_s	: Çeliğin zayıflatma katsayısı
σ_D	: Tanelilik

KISALTMALAR

IAEA	: Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı
CR	: Bilgisayarlı Radyografi
DR	: Direkt Radyografi
ADR	: Otomatik Hata Arama
USA	: Amerika Birleşik Devletleri
TFT	: İnce Film Transistörü
CCD	: Çift Şarj Aygıtı
IP	: Görüntüleme Kutusu
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
CEN	: Avrupa Standartlar Komitesi
ISO	: Uluslararası Standartlar Teşkilatı
ADC	: Analog Dijital Çevirici
MTF	: Modülasyon Transfer Fonksiyonu
DQE	: Dedektör Kuantum Etkinliği
IQI	: Görüntü Kalite Göstergesi
IPA	: A Sınıfı Görüntüleme Kutusu
IPB	: B Sınıfı Görüntüleme Kutusu
ID	: Boru İç Çapı
DWT	: Çift Cidar Tekniği
TRT	: Teğet Radyografi Tekniği
DWSI	: Çift Cidar Tek Görüntü
DWDI	: Çift Cidar Çift Görüntü
SOD	: Kaynak - Boru Merkezi Arası Uzaklık
OFD	: Film - Boru Merkezi Arası Uzaklık
ICU	: Görüntü Kontrol Ünitesi
CDU	: Kontrol Ve Görüntüleme Ünitesi
AC	: Alternatif Akım
PC	: Kişisel Bilgisayar
STDSAPMA	: Standart Sapma

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Radyografide kullanılan gama ışını kaynaklarının fiziksel özellikleri...	9
Çizelge 2.2 : Telli penetremetrelerin tel çapları.....	17
Çizelge 2.3 : EN 14784-2 standartlarında enerji ve malzeme kalınlığına göre uzaysal çözünürlük.....	26
Çizelge 2.4 : SNR ve $G_2/6_D$ değerleri.....	29
Çizelge 4.1 : Pil üzerindeyken X – ışını kaynağının fiziksel boyutları	47
Çizelge 4.2 : Kaynaktan çıkan X-ışınına ait özellikler	47
Çizelge 4.3 : Pilin elektriksel ve termal özellikleri.....	50
Çizelge 4.4 : Deneyde kullanılan boru numunelerine ait özellikler	51
Çizelge 4.5 : Yarı gölge değerleri.....	55
Çizelge 5.1 : Deneyin çalışma parametreleri.....	57
Çizelge 5.2 : Dış çapı 51 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları	60
Çizelge 5.3 : Dış çapı 57 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları	62
Çizelge 5.4 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları	65
Çizelge 5.5 : Dış çapı 51 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları	67
Çizelge 5.6 : Dış çapı 57 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları	69
Çizelge 5.7 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları	71
Çizelge 5.8 : Dış çapı 51 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları	73
Çizelge 5.9 : Dış çapı 57 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları	75
Çizelge 5.10 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları	77
Çizelge 5.11 : Dış çapı 51 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları	79
Çizelge 5.12 : Dış çapı 57 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları	81
Çizelge 5.13 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları	83
Çizelge 5.14 : Dış çapı 51 mm olan boru numuneleri için mutlak hata değerleri	84
Çizelge 5.15 : Dış çapı 57 mm olan boru numuneleri için mutlak hata değerleri	85
Çizelge 5.16 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numuneleri için mutlak hata değerleri ..	86
Çizelge 5.17 : Dış çapı 51 mm olan boru numuneleri için mutlak hata % değerleri.....	87
Çizelge 5.18 : Dış çapı 57 mm olan boru numuneleri için mutlak hata % değerleri.....	88

Çizelge 5.19 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numuneleri için mutlak hata % değerleri	89
---	----

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Radyografik çekim tekniğinin şematik görünümü	6
Şekil 2.2 : Elektromanyetik spektrum.	7
Şekil 2.3 : Fotoelektrik olay.....	10
Şekil 2.4 : Compton saçılması.	10
Şekil 2.5 : Çift oluşumu.....	11
Şekil 2.6 : Radyograf üzerinde süreksizlik ve çatlak tespiti.....	12
Şekil 2.7 : Geometrik faktörlerin şematik görünümü ve yarıgölge	13
Şekil 2.8 : X-ışını için poz tablosu.....	16
Şekil 2.9 : Telli penetremetre.	17
Şekil 2.10 : Dijital radyografinin endüstrideki uygulama alanları.	18
Şekil 2.11 : Dijital radyografi türleri.	19
Şekil 2.12 : Film dijitalleştirme.	20
Şekil 2.13 : Görüntü plakasının (IP) yapısı.	20
Şekil 2.14 : Görüntü plakalarının (IP) okuma mekanizması.	21
Şekil 2.15 : IP ile bilgisayarlı radyografi.....	21
Şekil 2.16 : Düzlem panel dedektör sinyal zinciri.....	22
Şekil 2.17 : Düzlem panel dedektör ve çekim düzeneği	22
Şekil 2.18 : Dijital radyografi (DR) sistemleri.	23
Şekil 2.19 : Elektronik dijital düzlem panel.	24
Şekil 2.20 : Sinyal-gürültü oranının görüntüye etkisi.....	28
Şekil 3.1 : Paslanma ve aşınmaya uğramış çelik borular	31
Şekil 3.2 : Radyografi yöntemiyle kapalı bir borudan görüntü elde edilmesi ve radyografin görüntüsü	32
Şekil 3.3 : Birikim, paslanma ve aşınmaya uğramış çelik borular ve bu borulara ait radyograf görüntüleri.....	32
Şekil 3.4 : Radyografi yöntemiyle boru çekimi ve cidar kalınlığı tespiti.....	33
Şekil 3.5 : Çift cidar tek görüntü (DWSI) çekim geometrisi.....	34
Şekil 3.6 : Çift cidar çift görüntü (DWDI) çekim geometrisi.....	34
Şekil 3.7 : Çift cidar tekniğine ait boru çekim geometrisi ve şiddet değişimi.....	35
Şekil 3.8 : Çift Cidar Tekniği'nde görüntü değerlendirmesi	35
Şekil 3.9 : Teğet radyografinin çekim geometrisi ve radyografik görüntü.....	36
Şekil 3.10 : Teğet radyografisinde geometrik parametreler	37
Şekil 3.11 : Teğet radyografi tekniği için deney düzeneği ve büyütme faktörü.....	39
Şekil 3.12 : Bir borunun farklı katmanları için zayıflatma katsayıları	40
Şekil 3.13 : Teğet radyografi tekniğinde farklı tip borular için şiddet eğrileri.....	41
Şekil 3.14 : Yalıtımlı bir borunun TRT ile çekilmiş film görüntüsü ve tipik şiddet değişim profili.	42
Şekil 3.15 : Teğet tekniğinde L_{max} değerleri ve tavsiye edilen sınırlar	43
Şekil 4.1 : Deneyde kullanılan “foX-Rayzor” tahribatsız muayene sisteminin elemanları ve kurulum şekli.....	46
Şekil 4.2 : Deneyde kullanılan XRS-3 X ışını kaynağı	46
Şekil 4.3 : X-ışını kaynağının kontrol düğmeleri ve işaretçileri.....	47

Şekil 4.4 : X-ışını tüpünün blok diagramı.....	48
Şekil 4.5 : Düzlem panel dedektör.....	48
Şekil 4.6 : Dedektör kontrol ünitesi.....	49
Şekil 4.7 : Kontrol ve görüntüleme ünitesi.....	49
Şekil 4.8 : Şarjlı pil ve dolum aleti.....	50
Şekil 4.9 : Boru numuneleri.....	52
Şekil 4.10 : Çekim düzeneğinin önden görünüşü.....	52
Şekil 4.11 : Çekim düzeneğinin yandan görünüşü.....	53
Şekil 4.12 : Ölçeklendirilmiş karton ve çekim düzeneğinin şematik gösterimi.....	53
Şekil 5.1 : 1 nolu numunenin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili.....	58
Şekil 5.2 : 2 nolu numunenin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili.....	59
Şekil 5.3 : 3 nolu numunenin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili.....	59
Şekil 5.4 : Dış çapı 51 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.....	60
Şekil 5.5 : 4 nolu numunenin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili.....	61
Şekil 5.6 : 5 nolu numunenin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili.....	61
Şekil 5.7 : 6 nolu numunenin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili.....	62
Şekil 5.8 : Dış çapı 57 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.....	63
Şekil 5.9 : 7 nolu numunenin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili.....	63
Şekil 5.10 : 8 nolu numunenin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili....	64
Şekil 5.11 : 9 nolu numunenin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili....	64
Şekil 5.12 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.....	65
Şekil 5.13 : 1, 2, 3 nolu boru numunelerinin dijital görüntüleri ve piksel şiddeti değişim profilleri.....	66
Şekil 5.14 : Dış çapı 51 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.....	67
Şekil 5.15 : 4, 5, 6 nolu boru numunelerinin dijital görüntüleri ve piksel şiddeti değişim profilleri.....	68
Şekil 5.16 : Dış çapı 57 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.....	69
Şekil 5.17 : 7, 8, 9 nolu boru numunelerinin dijital görüntüleri ve piksel şiddeti değişim profilleri.....	70
Şekil 5.18 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.....	71
Şekil 5.19 : 1, 2, 3 nolu boru numunelerinin dijital görüntüleri ve piksel şiddeti değişim profilleri.....	72
Şekil 5.20 : Dış çapı 51 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.....	73
Şekil 5.21 : 4, 5, 6 nolu boru numunelerinin dijital görüntüleri ve piksel şiddeti değişim profilleri.....	74
Şekil 5.22 : Dış çapı 57 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.....	75
Şekil 5.23 : 7, 8, 9 nolu boru numunelerinin dijital görüntüleri ve piksel şiddeti değişim profilleri.....	76
Şekil 5.24 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.....	78
Şekil 5.25 : 1, 2, 3 nolu boru numunelerinin dijital görüntüleri ve piksel şiddeti değişim profilleri.....	78

Şekil 5.26 : Dış çapı 51 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması	79
Şekil 5.27 : 4, 5, 6 nolu boru numunelerinin dijital görüntüleri ve piksel şiddeti değişim profilleri	80
Şekil 5.28 : Dış çapı 57 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması	81
Şekil 5.29 : 7, 8, 9 nolu boru numunelerinin dijital görüntüleri ve piksel şiddeti değişim profilleri	82
Şekil 5.30 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması	83
Şekil 5.31 : Dış çapı 51 mm olan 1, 2 ve 3 nolu boru numunelerinin mutlak hata mukayese grafiği	84
Şekil 5.32 : Dış çapı 57 mm olan 4, 5 ve 6 nolu boru numunelerinin mutlak hata mukayese grafiği	85
Şekil 5.33 : Dış çapı 60,3 mm olan 7, 8 ve 9 nolu boru numunelerinin mutlak hata mukayese grafiği	86
Şekil 5.34 : Dış çapı 51 mm olan 1, 2 ve 3 nolu boru numunelerinin mutlak hata % mukayese grafiği	87
Şekil 5.35 : Dış çapı 57 mm olan 4, 5 ve 6 nolu boru numunelerinin mutlak hata % mukayese grafiği	88
Şekil 5.36 : Dış çapı 60,3 mm olan 7, 8 ve 9 nolu boru numunelerinin mutlak hata % mukayese grafiği	89
Şekil 5.37 : Dış çapı 60 mm, cidar kalınlığı 6 mm olan boru numunesinin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili	90

DİJİTAL RADYOGRAFİ KULLANILARAK TEĞET TEKNİĞİ İLE ÇELİK BORULARDA CİDAR KALINLIĞI TAYİNİ

ÖZET

Malzeme iç yapısına ilişkin görüntü alma tekniği olan radyografi, malzemelerin iç hatalarının tespiti için kullanılan önemli bir hacimsel tahribatsız muayene yöntemidir. Endüstriyel radyografide genel olarak X-ışını veya gamma ışınlarının kullanımı tercih edilmektedir. Günümüzde film radyografisinin yanısıra dijital radyografi sistemlerinin kullanımı da artmaktadır. Dijital radyografi sistemleri, anında görüntüleme avantajı nedeniyle, korozyon değerlendirilmesinde ve malzeme kaybı (erozyon) değerlendirmelerinde, hafif alaşımlı dökümlerin muayenesinde ve kaynak muayenelerinde kullanım alanı bulmaktadır.

Endüstride kullanılan çelik borularda zaman içinde çeşitli kimyasal veya fiziksel etkiler sonucunda birikim, aşınma, paslanma veya çürüme oluşabilmektedir. Bu etkilerden dolayı çelik boruların cidar kalınlığı belli bir süre sonra değişebilmektedir. Çelik borular petrol, gaz, su ve kimyasal madde taşıyan boru hatları gibi güvenliğin ön planda olduğu alanlarda kullanıldığı için boru cidar kalınlıklarının tespiti büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada amaç, dijital radyografi kullanılarak çelik borularda cidar kalınlığı ölçümü yapmaktır. Boru numunelerinin cidar kalınlıkları radyografik teğet tekniği ile ölçülmüştür. Deneysel çalışmada “foX-Rayzor” dijital radyografi sistemi kullanılarak, farklı çap ve cidar kalınlığındaki boruların X-ışını radyografi çekimleri yapılmıştır. Kullanılan sistem, düzlem panel detektörlü bir sistem olup, dedektörden elde edilen radyografik görüntünün bilgisayara anında aktarılması sayesinde, boruların cidar kalınlıklarını hassas ve hızlı bir şekilde tespit etmek mümkün olmuştur.

Çekimler, çalışma parametreleri olan “kaynak detektör mesafesi” ve “kaynak puls değerleri” değiştirilerek tekrarlanmıştır. Elde edilen dijital görüntüler üzerinden doğrudan cidar kalınlıkları okunmuş ve eş zamanlı olarak da dijital görüntünün piksel şiddeti değişim profilinden faydalanılarak kalınlık tespiti yapılmıştır. Parametrelerin değişimine bağlı olarak hata grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklere göre kaynak detektör mesafesi arttıkça hatanın azaldığı görülmüştür. Puls değişiminin ise hata payını etkilemediği sadece dijital görüntünün kalitesini etkilediği gözlenmiştir.

DETERMINATION OF STEEL PIPE WALL THICKNESS VIA TANGENT TECHNIQUE USING DIGITAL RADIOGRAPHY

SUMMARY

Radiography, defined as an image-reception technique for the internal structure of materials, is a significant, volumetrically non-destructive inspection method which is used for the internal defect detection of materials. The utilization of X-ray or Gamma rays is generally preferred for industrial radiography. Nowadays, the use of film radiography, as well as the use of digital radiography is increasing. Due to the advantage of simultaneous imaging, digital radiography systems have a wide area of use, such as periodically monitoring of conditions, the evaluation of corrosion and material loss (erosion) evaluation, examination of light-alloy castings and weld examinations.

As a result of various chemical or physical effects over time, accumulation, wear, rust or rot may occur in the steel pipes used in industry. Because of these influences, the wall thickness of steel pipes can vary after a certain period of time. Since the steel pipes are used in the areas in which security is at the forefront, such as pipelines carrying oil, gas, water and chemicals, the detection of pipe wall thickness is crucial.

The aim of this study is to make steel pipe wall thickness measurements using digital radiography. The wall thicknesses of pipe samples are measured using the radiographic tangent technique. In the experimental study, X-ray radiography shots of pipes with various diameters and wall thicknesses are done using the digital radiography system, “foX-Rayzor”. This system, having a flat-panel detector, provides a spontaneous transfer of the radiographic image, obtained from the detector, to the computer, and enables the quick and precise detection of pipe wall thicknesses.

The shots are repeated by changing the operating parameters; “source-detector distance” and “resource pulse value”. The wall thicknesses are directly read from the obtained digital images and the thickness detection is simultaneously done with the help of pixel intensity variation profile. The error graphs are plotted depending on the changes of parameters. According to these graphics, the error decreases as the source-detector distance increases. It is also observed, that the change of pulse does not affect the margin of error, but only affects the quality of digital image.

1. GİRİŞ

Tahribatsız muayene yöntemleri, malzeme veya ürüne zarar vermeden yapısındaki süreksizlik ve hatalar ile işlevsel özelliklerinin belirlenmesine olanak sağlayan tekniklerdir. Bu tekniklerin kullanımıyla malzemenin bizzat kendisinin veya bir kısmının üretim aşamasında muayene edilebilmesi mümkün olabilmektedir. Böylece kullanılacak malzemenin veya ürünün özellikleri ve güvenilirliği hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir (Şahin, 2003).

Tahribatsız muayene yöntemlerinin, boşluk ve bileşenlerin belirlenmesi, yapıların doğruluğunun kontrolü, hata ve düzensizliklerin tespiti ve boruların cidar kalınlıklarının ölçülmesi gibi pek çok uygulama alanı bulunmaktadır (Halmshaw, 1995). Tahribatlı muayene yöntemlerinde malzeme, muayene sırasında kullanılamaz hale getirilerek kontrol edilmektedir (Akıncı, 1996). Boru hatları gibi maliyeti yüksek olan ve güvenliğin önemli olduğu alanlarda malzemede herhangi bir hasar meydana getirmeden uygulanabilen tahribatsız muayene yöntemleri tahribatlılara göre daha avantajlıdır (Yılmaz, 1999).

Tahribatsız muayene yöntemleri genelde üç ana gruba ayrılır. Bu gruplar, bileşik tahribatsız muayene yöntemleri, yüzeysel tahribatsız muayene yöntemleri ve hacimsel tahribatsız muayene yöntemleridir. Bunlar arasında en fazla uygulananlar girdap akımları, sıvı penetrant, manyetik parçacık, ultrasonik muayene ve radyografidir (Halmshaw, 1995). Kullanılacak tekniğin seçimi istenilen ölçüme, ekipman erişilebilirliğine ve uygunluğuna, malzemenin yapısına ve durumuna göre değişebilmektedir (Şahin, 2003).

Hacimsel ölçümlerde en fazla kullanılan tahribatsız test yöntemlerinden ikisi ultrasonik testler ve radyografidir. Ultrasonik test yönteminde kullanım alanı geniş olmasına rağmen bazı uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. Özellikle yalıtım elemanı kullanılan malzemelerde bu yöntemin uygulanması zorluklar arz etmektedir.

Yalıtım malzemesinin kaldırılması hem ekonomik hem de zaman açısından önemli kayıplara neden olmaktadır. Bu tür durumlarda genelde tahribatsız muayene yöntemlerinden radyografi tercih edilmektedir (Lee ve Jang, 2001).

Günümüzde gelişen bilgisayar teknolojileri ile birlikte, geleneksel radyografi uygulamalarının yanı sıra, dijital radyografi sistemleri de sağladıkları avantajlar nedeniyle tercih edilmeye başlanmıştır. Bu sistemlerde, görüntünün elde edilmesinde film yerine dijital dedektörlü paneller kullanılmakta ve görüntü bilgisayar teknolojisi sayesinde yüksek hassasiyetle incelenebilmektedir (Wawrzinek ve diğ., 1997).

Dijital radyografi sistemleri, anında görüntüleme avantajı nedeniyle, şartların periyodik izlenmesinde, korozyon değerlendirilmesinde ve malzeme kaybı (erozyon) değerlendirmelerinde, hafif alaşımlı dökümlerin muayenesinde ve kaynak muayenelerinde kullanım alanı bulmaktadır. Dijital radyografik görüntünün en önemli avantajı, gelişmiş görüntü analiz yazılımları ile dijital radyografik muayene görüntüsünde ileri ve detaylı analizlerin yapılabilmesidir.

Dünyada sanayinin ve ekonominin gelişimiyle birlikte madde transferleri için boru hatlarının kullanımı önemli oranda artmıştır ve bu artış büyük bir hızla devam etmektedir. Özellikle boru hatlarında, dayanıklı olması nedeniyle çelik borular tercih edilmektedir. Bu türde çelik borular yaygın biçimde su, kimyasal sıvılar, buhar, doğal gaz, yağ ve petrol gibi maddelerin iletiminde kullanılmaktadır (IAEA, 2005).

İşletme hataları malzemenin kullanım şartlarından kaynaklanmakta olup boruların kullanımı sırasında da zamanla paslanma, çürüme, aşınma ve birikim gibi fiziksel ve kimyasal etkileşimler nedeniyle borunun yapısını bozan etkilenmeler olabilmektedir. Bundan dolayı endüstriyel tesislerde kullanılan boruların kontrolü, emniyet, güvenlik ve ekonomi açısından büyük önem arz etmektedir.

Korozyon ve erozyon gibi etkiler zaman içinde borularda cidar kalınlığında değişime neden olmaktadır. Bu nedenle boru cidar kalınlıklarının pratik ve hızlı yöntemlerle kontrol edilmesi önemlidir (IAEA, 2005). Endüstriyel tesislerde, izolasyonlu, zor pozisyonlarda ve yüksek sıcaklıktaki boru hatlarında korozyon takibi bir çok yöntemin kullanımını sınırlamaktadır.

Radyografi yöntemi, her türlü metal ve plastikler için uygulanabilir olması, yalıtım elemanı sökülmeden, hattın içinde ürün varken ve boru sıcakken muayenenin yapılabilmesi, karmaşık geometrili hat elemanlarının (vana, redüksiyon vb.) kontrolüne olanak sağlaması nedeniyle öne çıkan teknik olmuştur. Dijital radyografi sistemleri ise, hassas kalınlık ölçümü yapılmasını sağlayarak korozyon taraması çalışmalarındaki yerini almış bulunmaktadır.

Radyografi yöntemi ile borularda cidar kalınlıklarının tespiti çift cidar tekniği ve teğet tekniği ile yapılabilmektedir. Teğet tekniği, bazı sınırlamaları olmakla beraber yalıtımlı, iç ve dış korozyonlu ve depozitli boruların cidar kalınlığı tespitinde diğer tekniklere göre daha avantajlıdır (Edaliti ve diğ, 2007).

Bu Yüksek Lisans Tez çalışmasında, “foX-Rayzor” dijital radyografi sistemi kullanılarak teğet tekniği ile çelik boruların cidar kalınlığı tayini amaçlanmıştır. Bunun için, çalışma parametreleri olan “kaynak-detektör mesafesi, KDM” ve “kaynak-puls değerleri” değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Ayrıca, kullanılan dijital radyografi sistemi için, çelik borularda X-ışınlarının katettiği maksimum malzeme kalınlığından (L_{max}) hareketle Teğet Tekniği’nin sınırlarının belirlenmesi de hedeflenmiştir.

2. RADYOGRAFİ

Radyografi tekniği, radyasyonun malzeme içinden geçerek bir film ya da ekran üzerinde iki boyutlu görüntü oluşturmaya prensibine dayanmaktadır. Önemli bir hacimsel tahribatsız muayene yöntemi olan radyografi metodunun tarihçesi 1895 senesinde X-ışınlarının Wilhelm Conrad Roentgen tarafından keşfedilmesine kadar dayanmaktadır. Başlangıçta X-ışınları genellikle tıbbi radyografide kullanılmıştır. Radyografi yöntemi, 1913'de enerjisi 100 KeV'e kadar çıkan yüksek vakumlu X-ışını tüplerinin geliştirilmesinden sonra endüstri alanında da kullanılmaya başlanmış ve böylece endüstriyel radyografinin temelleri atılmıştır. İkinci dünya savaşından sonra gama ışınlarının 1960'lı yıllardan sonra da nötronların kullanılmaya başlanması ile endüstriyel radyografinin sınırları hayli genişlemiştir (Czichos ve diğ., 2006).

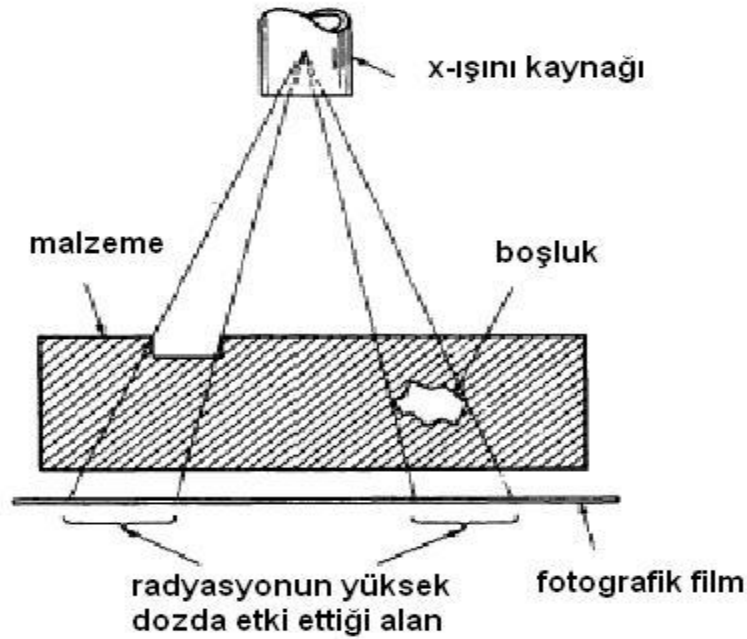
Radyografi yöntemi ile girici radyasyon olarak farklı radyasyon türleri kullanılarak malzemenin iç yapısındaki süreksizlikler hakkında bilgi alınabilmektedir. Yöntemin endüstriyel amaçlı kullanımı, demir ve alaşımları gibi yoğun malzemelerin incelenmesini gerektirdiği için, nüfuziyeti yüksek olan elektromanyetik radyasyonun kullanılması uygun olmaktadır. Bu nedenle endüstriyel radyografide X ve gama radyografi teknikleri öne çıkmaktadır.

Gelişen teknolojiyle birlikte radyografi tekniği de gelişme göstermiş ve günümüzde klasik (filmlili) radyografinin yanı sıra dinamik muayene yapılmasını sağlayan dijital radyografi teknikleri de kullanılmaya başlanmıştır. Klasik radyografi ile dijital radyografinin temel çalışma prensipleri aynı olmakla birlikte görüntünün üzerine alındığı ortam bakımından farklılık göstermektedirler. Dijital radyografide görüntü, film yerine fosfor plakalar üzerine alınmakta ve gelişmiş görüntü analiz yazılımları ile dijital radyografik muayene görüntüsünde ileri ve detaylı analizler yapılabilmektedir. Bilgisayar ekranından, malzemenin dijital radyografi daha etkin ve hızlı analiz edilebilmektedir. Ayrıca sonuçların dijital ortamda olması nedeniyle arşivleme, izlenebilirlik ve geri dönüşüm de en etkin biçimde yapılabilmektedir.

Bu tez çalışmasında dijital radyografi ile endüstriyel bir uygulama yapılması amaçlandığı için önce elektromanyetik radyasyonla gerçekleştirilen klasik (filmlili) radyografi hakkında genel bilgi verildikten sonra dijital radyografi sistemleri tanıtılacaktır.

2.1 Elektromanyetik Radyasyonla Klasik Radyografi

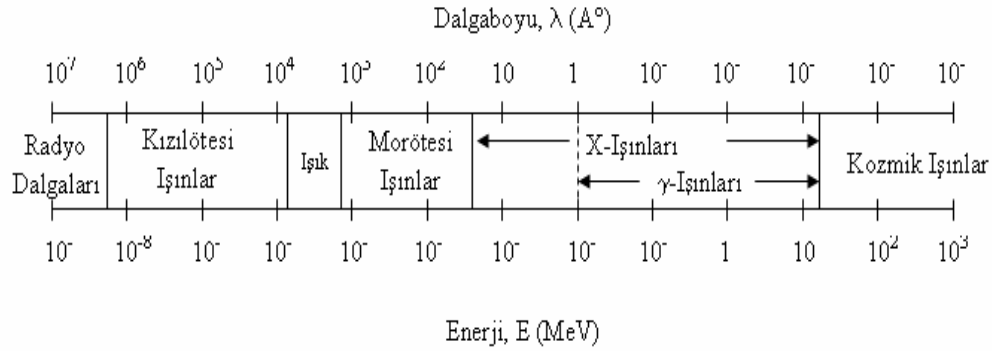
Elektromanyetik radyasyonla radyografide radyasyonun cinsine göre, teknik “X-ışını radyografisi” veya “gama ışını radyografisi” adını almaktadır. Bu teknikde, Şekil 2.1 de görüldüğü üzere, radyasyon kaynağı malzemenin bir tarafına ve film malzemenin diğer tarafına yerleştirilir. Bu filmler daha sonra banyo işlemine tabi tutulur ve ışınımın içinden geçtiği malzemenin iç kısmına ait görüntü elde edilir. Film üzerine alınan bu görüntüye “radyograf” denir. Bu görüntü, malzeme içindeki boşluklar, süreksizlikler veya kalınlık / yoğunluk değişiklikleri nedeniyle oluşur. Radyograf üzerindeki görüntü malzemeden geçen ve filme ulaşan radyasyon şiddeti ile ilgilidir. Radyasyon kaynağından belirli özellik ve miktarda çıkan radyoaktif ışınım malzemeyi geçmesi esnasında zayıflar. Bu şekilde zayıflayarak film üzerine ulaşan ışınlar, farklı yoğunlukta kararmalara neden olarak farklı bölgelere ait görüntüler oluşturur.



Şekil 2.1 : Radyografik çekim tekniğinin şematik görünümü (IAEA, 2005).

2.1.1 Radyasyon kaynakları

Daha önce de belirtildiği gibi endüstriyel radyografide esas itibariyle X ve gama ışınları kullanılmaktadır. Bu ışınlar Şekil 2.2’de görüldüğü gibi farklı dalga boylarında yayınlanan elektromanyetik radyasyonlardır.



Şekil 2.2 : Elektromanyetik spektrum (Becker, 1990).

Elektromanyetik radyasyonların,

- Hızları ışık hızına (3×10^8 m/s) eşittir.
- Geçtikleri ortama enerji transfer ederler. Enerjileri frekansları ile doğru, dalga boyları ile ters orantılıdır.
- Boşlukta doğrusal yayılırlar.
- Maddeyi geçerken absorpsiyon ve yön değiştirme (saçılma) nedeniyle şiddetleri azalır.
- Boşluktaki yayınımları “Ters Kare Kuralı” na uyar. Bir başka deyişle, bir kaynaktan yayılan radyasyonun şiddeti uzaklığın karesi ile ters orantılı olarak zayıflar (Quinn ve Sigl, 1980).
- İzotropiktirler.

X-ışınları, uygun enerjili elektronların atomun çekirdeği ile veya yörüngesindeki elektronlarla etkileşmesi sonucunda oluşur. Hedef atom ile etkileşme şekline bağlı olarak iki tür x-ışını elde edilmektedir. Bunlar karakteristik X-ışınları ve frenleme X-ışınlarıdır.

Karakteristik X-ışınları: Hedef atom üzerine gönderilen elektronlar; hedef atomun yörüngesindeki elektronlarla etkileşerek, aldıkları enerjiyle üst enerji seviyelerine çıkarlar. Kararsız durumdaki bu enerji seviyeleri geri

bozunduğunda dışarıya foton yayınlanır. Enerjileri, seviyeler arasındaki farka eşit olan bu fotonlara *karakteristik X-ışınları* adı verilir.

Frenleme X-ışınları: Elektron demeti, hedef atomun çekirdeğine yaklaştığında, çekirdeğin pozitif yükünden kaynaklanan elektrik alandan etkilenir ve ivmeli hareket yapmaya zorlanarak dışarıya fotonlar yayar. Sürekli bir enerji spektrumuna sahip bu fotonlara *frenleme X-ışınları*, bu olaya da *bremsstrahlung* veya *frenleme radyasyonu* adı verilir (Halmslaw, 1995).

Gama ışını yayılımı "radyoaktivite kavramı" ile açıklanabilir. Radyoaktif bir maddede, atomik kararsızlığa neden olan fazla enerjinin ışıyım enerjisi olarak açığa çıktığı sürekli bir bozunma olayı meydana gelir. Bozunum türüne göre, Alfa (α), Beta (β) ya da Gama (γ) ışınları veya bunlardan bazıları ard arda gözlenebilir. Daha önce de belirtildiği gibi, endüstriyel radyografik muayene için malzemeye nüfuziyeti yüksek olan gama ışınları sıklıkla tercih edilmektedir.

Gama ışıyımını, uranyum bozunum ailesinde olduğu gibi bazen doğal olarak radyoizotop halinde bulunan maddelerden yayılır. Atom çekirdeğinde yapay olarak oluşturulmuş fazla yük de, doğal haliyle ışıyım yaymayan bir maddeyi ışıyım yayar hale getirebilir. Bu işlem, bir nükleer reaktörde (nötron aktivasyonu) olduğu gibi, kararlı haldeki bir atom çekirdeğinin nötron (elektrik olarak nötr parçacıklar) bombardımanına tutularak kararsız (dengesiz) hale getirilmesiyle sağlanabilir. Bu işlem sonunda atomun çekirdeğindeki nötron ve protonların toplamı olan Atom Kütle Numarası değişir. Bu tip aşırı yüklü ve kararsız çekirdek yapay radyoizotop olarak adlandırılır. Ir-192, Co-60, Tm-170, Yb-169 ve Se-75 piyasada en çok kullanılan radyoizotoplardır (Sonat ve Yelbay, 2008).

Gama ışınlarının malzemeyi kat etmesi de malzeme kalınlığına ve gama enerjisine bağlıdır. Ayrıca gama ışını kaynakları radyoaktif madde oldukları için farklı yarı ömürlere sahiptir. Buna ait bilgiler Çizelge 2.1'de verilmektedir.

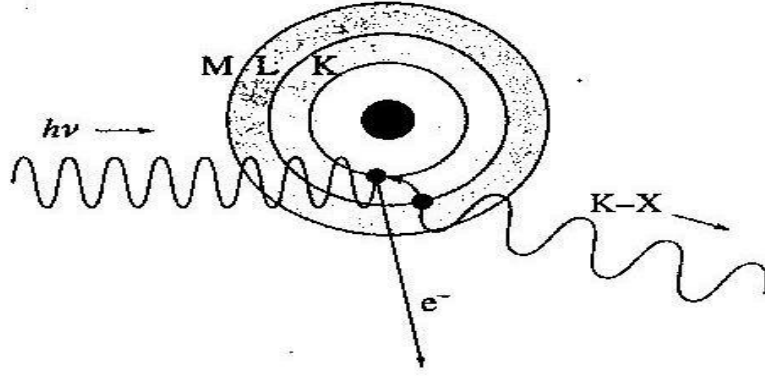
Çizelge 2.1 : Radyografide kullanılan gama ışını kaynaklarının fiziksel özellikleri (Bilge ve Tuğrul,1990).

Kaynak	Enerji (MeV)	Yarı Ömür	Tavsiye Edilen Kalınlık	Kaynak Boyutu (mm)	Doz Hızı (r/s)
Ra-226	0,6; 1,12; 1,76	1590 yıl	5-15 çelik	2x2	0,83
Rn-222	0,6 ve 1,12	3,825 gün	5-25 çelik	0,5x0,5	0,83
Co-60	1,17 ve 1.33	5,3 yıl	5-20 çelik	1x1 4x4	1,35
Cs-137	0,667	33 yıl	2-10 çelik	1x1 3x3	0,35
Ir-192	0,29; 0,58 0,60; 0,61	74 gün	0,5-6cm çelik, 1-10cm Al	0,5x0,5 6x6	0,50
Tm-170	0,084	127 gün	0,5cm çelik, 0,2 -1,2cm Al	2x3 3x3	0,0045

2.1.2 Elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşmesi

X ya da gama radyasyonu cismin üstüne düştüğü zaman bir kısmı cisimden geçer, diğer bir kısmı da absorblanmayıp çeşitli yönlerle saçılır. Gama veya X-ışınları malzemeden geçerken şiddetlerini kaybederler. Bu olaya gama veya X-ışınlarının malzeme içinde soğurulması denir (Bilge ve Tuğrul,1990). Radyasyon malzeme ile etkileşirken başlıca üç farklı olay meydana gelebilir. Bunlar sırasıyla fotoelektrik olay, compton saçılması ve çift oluşumdur (Foldiak, 1986).

Bir fotonun, soğurucu bir atomun elektronuna çarpması sonucu tüm enerjisini o elektrona vermesi ve kendisinin de yok olması durumuna “fotoelektrik olay” denir. Elektron, eşik enerjisi üzerinde enerji aldığından kendi yörüngesinden kopar, bu kopan elektrona “fotoelektron” adı verilir. Bu olayın ardından dış yörüngeden diğer bir elektron, boşluk bulunan yörüngeye geçiş yapar, bu geçişte karakteristik X ışınları yayınlanır. Bunlar, ilk gama radyasyonu ile karşılaştırıldıklarında düşük enerjilidirler. X-ışını fotonunun atılması, sık sık yörünge elektronunun, Auger elektronunun atılmasına neden olur. Genelde bu olayın meydana gelme olasılığı düşük enerjili X ve gama ışınları için yüksektir. Şekil 2.3’te fotoelektrik olayın meydana gelişini görmektedir.

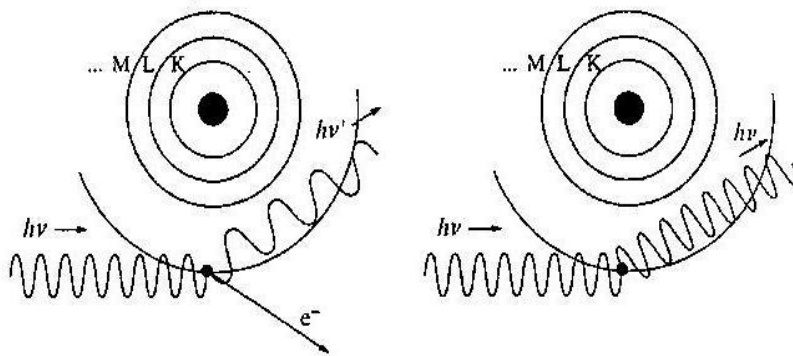


Şekil 2.3 : Fotoelektrik olay (Czichoz ve diğ, 2006).

Compton olayında ise gelen foton malzeme atomunun dış elektronuyla esnek çarpışma yapar ve saçılır. Compton saçılmasında enerji ve momentum korunur, gelen foton enerjisini elektrona verir ve kalan enerjiyle herhangi bir doğrultuda saçılır. Gelen fotonun enerjisi, E , sapma açısı Θ olmak üzere, saçılan fotonun enerjisi E' denklem 2.1'de verilmiştir.

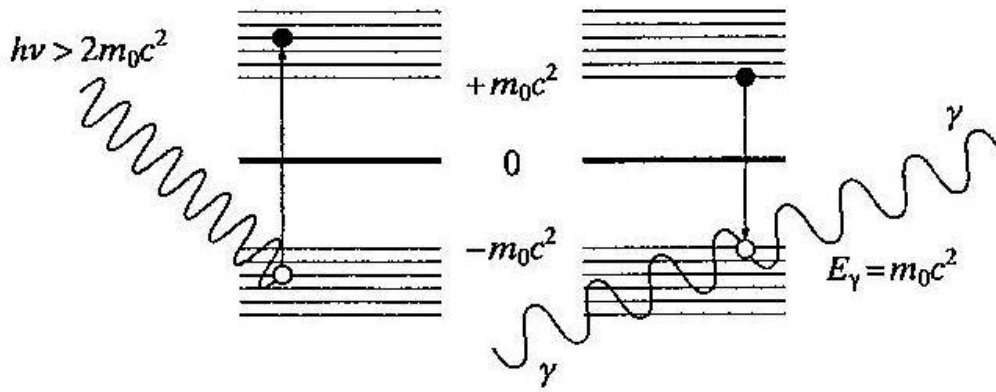
$$E' = \frac{0,51}{1 - \cos\theta - \frac{0,51}{E}} \quad (2.1)$$

Yukardaki denkleme göre, saçılma açısı çok küçükse $\cos \Theta = 1$ olur ve saçılan foton fazla enerji kaybetmeden, Şekil 2.4'teki gibi, yoluna küçük bir sapmayla devam eder. Bununla birlikte $\Theta = 90^\circ$ olması halinde ise saçılan fotonun enerjisi 0,51 MeV'den büyük olamaz. Compton saçılması atom numarasına bağlıdır. Compton saçılması yapan bir foton daha sonra ortamda bir fotoelektrik olay gerçekleştirebilir.



Şekil 2.4 : Compton saçılması (Czichoz ve diğ, 2006).

Eğer fotonun enerjisi 1,02 MeV üzerinde ise foton atomun çekirdeğinin yanından geçerken, kuvvetli bir elektrik alana girer ve foton yok olur (anihilasyon). Bu durumda elektron ve pozitron çifti oluşur. Buna “*çift oluşumu*” denir. Şekil 2.5’te çift oluşumu görülmektedir. Gelen fotonun enerjisinin artmasıyla fotoelektrik ve compton olaylarının olma olasılığı azalır ve çift oluşumu olasılığı artar. Çift oluşumu da fotonun soğurulmasıyla sonuçlanır. Oluşan bazı elektron ve pozitronlar da birbirlerini nötralize ederek *anihilasyon radyasyonuna* sebep olurlar (Bilge ve Tuğrul, 1990).



Şekil 2.5 : Çift oluşumu (Czichoz ve diğ, 2006).

Kalınlığı t olan bir malzeme üzerine paralel olarak girici elektromanyetik ışınlar geldiğinde etkileşim sonucu radyasyonun şiddetinde azalma olur. Girici elektromanyetik radyasyonun zayıflaması, Denklem 2.2’de verilen soğurma kanunu ile ifade edilir (Gardner ve Ely, 1967).

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu t} \quad (2.2)$$

Burada;

I : Malzemeden geçen ışın şiddetini

I_0 : Malzemeye ulaşan ışın şiddetini

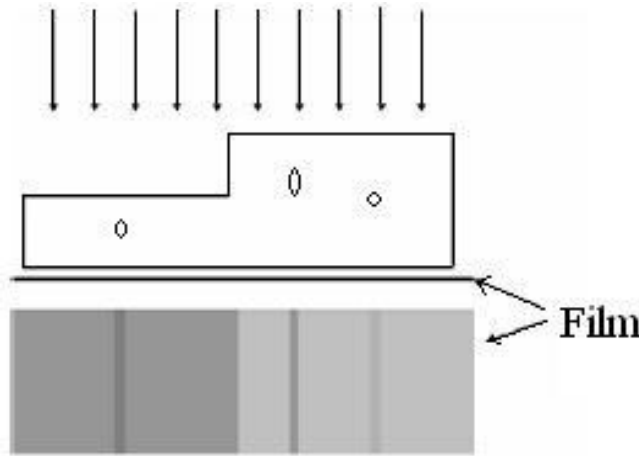
μ : Malzemenin lineer absorpsiyon katsayısını

t : Malzeme kalınlığını

temsil etmektedir.

Denklem 2.2'ye göre girici elektromanyetik radyasyonun zayıflamasında malzeme kalınlığı ve malzemenin cinsi önemli etkenlerdir. Bundan dolayı radyografik görüntünün elde edilmesinde de kullanılan malzeme kalınlığı önemlidir.

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi eğer malzemede boşluk, çatlak gibi süreksizlikler var ise radyograf üzerinde, boşluk ve çatlak kısmına ait görüntüler daha koyu tonda olacaktır. Bunun sebebi boşluktan geçen ışının şiddeti diğer bölgelere göre daha fazladır ve filme daha fazla etki edip koyulaştırır. Yine aynı nedenle Şekil 2.6'da malzemenin kalın bölgesiyle ince bölgesinin film üzerindeki görüntüsü farklı koyuluktadır. İnce bölgenin görüntüsü daha koyu, kalın bölgeninki ise daha açıktır. Bu şekilde oluşan açık ve koyu renkteki bölgelerin değerlendirilmesi sonucu süreksizlik tipi, korozyon ve cidar kalınlığı gibi tespitler yapılabilir.



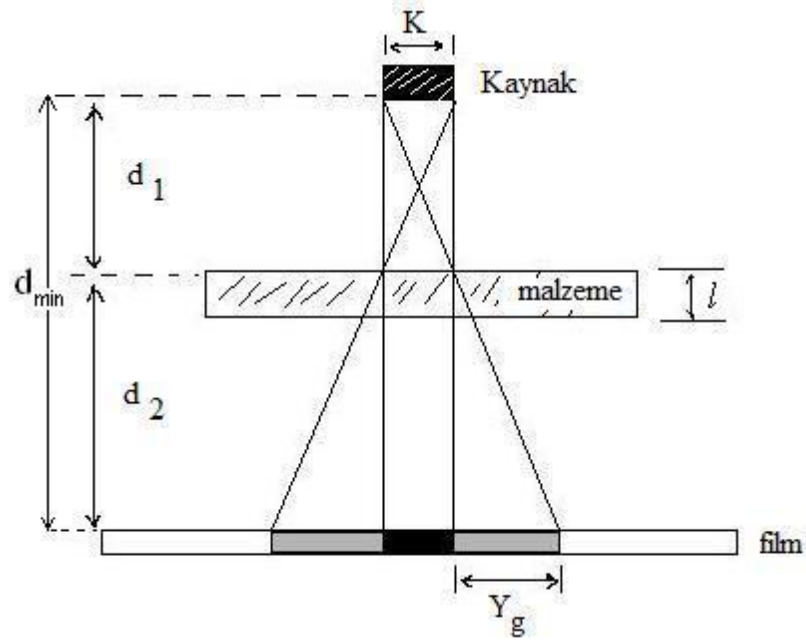
Şekil 2.6 : Radyograf üzerinde süreksizlik ve çatlak tespiti (Sonat ve Yelbay, 2008).

2.1.3 Görüntü kalite faktörleri

Elektromanyetik radyasyonla gerçekleştirilen radyografların kalitesine etki eden beş faktör vardır. Bunlar geometri faktörü, film faktörü, ekran faktörü, poz (ışınlama) süresi ve Bölüm 2.1.1'de bahsedilen radyasyon kaynağı faktörleridir.

2.1.3.1 Geometri faktörü

Geometri faktörü, radyografıta oluşan görüntü kalitesi ile doğrudan ilgili, önemli bir faktördür. Pratikte ideal nokta kaynak kullanılamaması nedeniyle “yarı gölge” oluşmaktadır. Yarı gölge oluşması istenmeyen bir durum olup mümkün olduğunca azaltılmaya çalışılır. Burada önemli olan kaynak, malzeme ve film üçlüsünün yerleşim geometrisidir. Radyografik bir çekimin yerleşim geometrisi ve buna bağlı olarak oluşan yarıgölgenin şematik gösterimi Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7 : Geometrik faktörlerin şematik görünümü ve yarıgölge (Bilge ve Tuğrul, 2008).

Yarı gölge ;

$$Yg = \frac{Kl}{(d_1 - d_2) - 1} \quad (2.3)$$

olarak ifade edilir. Denklem 2.3'te K kaynak boyutunu, d_1 kaynak malzeme uzaklığını, d_2 malzeme film uzaklığını ve l malzeme kalınlığını ifade etmektedir. En kısa malzeme–film uzaklığı, malzemenin kalınlığına bağlı olarak, malzemenin film üzerine yerleştirilmesiyle elde edilir. Yarı gölgeyi azaltmak için malzemenin en dar boyutu kaynak-film arasına gelecek şekilde yerleştirilir. Denklem 2.3'e göre K'nın küçültülmesi veya $(d_1 - d_2)$ in artırılmasıyla yarı gölge azaltılabilir. Yarı gölge yönünden minimum kaynak film uzaklığı (d_{min}), l malzeme kalınlığı olmak üzere;

$$d_{min} \geq 8l \quad (2.4)$$

olmalıdır (Duman, 2000).

Buna göre, her radyografik çekim için kaynak-film mesafesinin uygulayıcı tarafından ayarlanması gereken önemli bir parametre olduğu görülmektedir.

2.1.3.2 Film faktörü

Radyografi çekimleri için özel filmler kullanılır. Film, X ve gama ışınlarıyla etkileşime girerek kararır ve malzemeye ait bilgilerin kaydedilmesini sağlar. Film üzerinde etken madde olarak AgBr (gümüş bromür) kristalleri kullanılır. Bu kristal boyutları filmin kontrast ve tanımına etki eder. Bu kristaller bir araya gelerek “gren” adı verilen tanecikleri oluşturur. Grenlerin büyüklüklerine göre radyografi filmleri üçe ayrılır. Bunlar sırasıyla; ince taneli filmler, orta taneli filmler, iri taneli filmlerdir. Film üzerine görüntü nokta nokta kaydedildiği için tanecik yapısı detayları görüntülemeye önemlidir. İnce taneli film üzerindeki bir grene iri taneliye göre daha fazla ışın isabet eder. Bundan dolayı iri taneli film alması gereken ışını daha çabuk alır ve iri taneli filmler “hızlı film” olarak da isimlendirilir. Aynı mantıkla ince taneli filmler “yavaş film”, orta taneli filmler “orta hızlı film” olarak adlandırılır. Yavaş filmde hızlı filme göre daha fazla detay elde edilir. Endüstride malzeme yapısına ait detay fazla olduğundan yavaş veya orta hızlı filmler kullanılır. Tıpta ise obje radyasyona fazla maruz bırakılmak istenmediğinden hızlı film kullanılır.

Görüntü filmin kararması ile oluşur. Buna göre filme ulaşan ışın I_0 , filmi geçen ışın I olmak üzere kararma yoğunluğu D , denklem 2.5’te verilmiştir (Becker, 1990).

$$D = \log \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (2.5)$$

Endüstriyel radyografide “uygun” bir çekim nitelendirilmesinin olabilmesi için kararma yoğunluğu belli değerler arasında olmalıdır. Bu değerler 2 ile 3,5 arasındadır. Bunun sebebi malzemenin iç yapısına ait en iyi görüntünün bu değerler arasında alınabilmesidir.

Ayrıca radyografin kalitesini ve kararma yoğunluğunu belirleyen iki unsur vardır. Bunlar “tanım” ve “kontrast” tır. Tanım, keskin bir kalınlık değişiminin radyograf üzerine aktarılabilme yetisini ifade eder. Kontrast ise objenin iki ayrı bölgesine ait radyografıta oluşan film kararma yoğunluğu farklılığıdır. Detayların tespiti için bu unsurlar önemlidir (Şişman, 1992).

2.1.3.3 Ekran faktörü

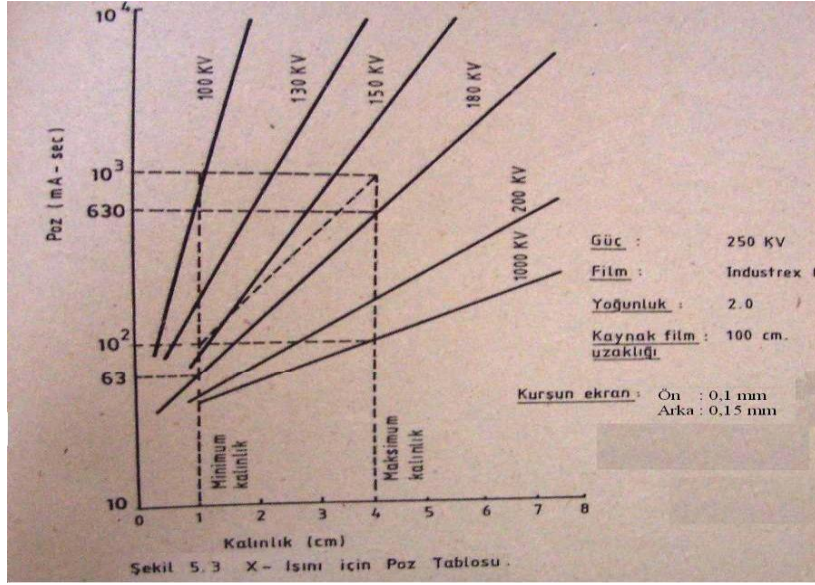
Normal olarak, radyografi filmlerinin her iki tarafında kurşun ekranlar kullanılır. Filmlerin radyasyon kaynağı tarafına bakan yüzeylerine konan kurşun ekranlar, gelen radyasyonu güçlendirmeye ve filme yüzeyinden geri saçılan radyasyonu azaltmaya yararlar. Ön yüzey kurşun ekranlara çarpan fotonlar fotoelektrik olayı ve Compton saçılması yaparlar ve böylece yüksek hızlı elektronlar oluşur. Bu yüksek hızlı elektronlar filmi etkiler. Bu tür ekranlar filmi etkileyen radyasyonu 1,5 – 2 kat arttırırlar. Ön film ekranı olarak kullanılan kurşun kalınlıkları genelde 0,012-0,02 cm arasındadır (Bilge, 1991). Endüstride kurşundan yapılmış ekranlar, tıpta ise tuz ve floresan ekranlar kullanılmaktadır.

Kurşun ekranlar, aynı zamanda filmin diğer yanında da kullanılırlar. Bu ekranlar ön ekrandan oluşan ve filmi geçen yüksek hızlı elektronların geri saçılmasını sağlayarak yeniden filme etki etmesine neden olurlar. Bu arka ekranlar aynı zamanda tabandan, çevreden saçılan radyasyonu en az seviyede tutmaya da yardımcı olurlar. Film arkası kurşun ekranların kalınlığı ise genelde 0,025 – 0,040 cm arasında değişir (Bilge, 1991).

2.1.3.4 Poz süresi

Kaliteli bir radyografik görüntü elde etmek için malzeme belli bir süre radyasyona maruz bırakılmalıdır. Bu süreye “poz süresi” veya “ışınlama süresi” denir. Poz süresi, daha önce bahsedilen diğer dört görüntü kalite faktörü tayin edildikten sonra belirlenir. Poz süresinin belirlenmesi için malzeme kalınlığına göre çizilmiş grafikler ve tablolar bulunmaktadır.

Örnek olarak Şekil 2.8’de, farklı enerjilerdeki X-ışınları için çelik kalınlığına bağlı olarak poz süresi tayin grafiği görülmektedir. Radyografik çekimlerin diğer faktörlerle birlikte kalınlık-süre ilişkisi bu grafiklerden belirlenebilir (Bilge ve Tuğrul, 1990).



Şekil 2.8 : X-ışını için poz tablosu (Bilge ve Tuğrul, 1990).

2.1.4 Görüntü kalitesi tayini

Radyograf üzerinde hatayı belirleyebilmek ve değerlendirebilmek için görüntünün belli bir kaliteye sahip olması gereklidir. Görüntü kalitesi üç faktöre bağlıdır. Bunlar daha önce belirtilen kontrast, yarıgölge ve film granül boyutlarıdır. Kontrast ve yarıgölge; filme, ekranlara ve çekim koşullarına bağlıyken film granül boyutu sadece filme bağlıdır. Çekim koşullarından çıkan yarıgölge tamamen geometrik bir etkiyken, film ve ekranlardan ortaya çıkan fotoğrafik bir etkidir. Bu iki etki birleşerek toplam yarıgölgeyi oluşturur ve ayırtdilmez. Kontrast ise temel olarak çekim esnasında kullanılan radyasyonun enerjisine bağlıdır. Enerji miktarı ne kadar az ise o kadar çok kontrast elde edilir. Kontrast ve görüntü kalitesi, malzeme kalınlığı arttıkça azalır, farklı geometriler de görüntü kalitesini etkiler. Bunun yanında radyasyonun geliş yönü de kontrastta farklılıklara neden olur (Bilge ve Tuğrul, 1990).

Görüntü kalitesinin tayini için “penetremetre” denilen farklı tiplerde görüntü kalite göstergeçleri kullanılır. Bu penetremetreler çekim sırasında malzeme üzerine yerleştirilir ve film üzerinde görülmesi istenir. Penetremeler basamaklı, delikli ve telli tiplerde olabilir (Bilge ve Tuğrul, 1990). Endüstride telli penetremetrelerin kullanımı daha yaygındır. Şekil 2.9’da farklı normlara göre telli penetremetreler gösterilmiştir.



Şekil 2.9 : Telli penetre metre (Edaliti ve diğ, 2000).

DIN 54109 normuna göre tel çapları ve kalite numaraları Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Telli penetre metrelerin tel çapları (Bilge ve Tuğrul,1990).

Görüntü Kalite No	Tel Çapları(mm)	Tel Penetre metre No		
1	3,2	penetre metre 1/7		
2	2,5			
3	2,00			
4	1,6			
5	1,25			
6	1,00			
7	0,80			
8	0,63			penetre metre 6 /12
9	0,50			
10	0,40			
11	0,32			
12	0,25			
13	0,20			
14	0,16			
15	0,12			
16	0,10			

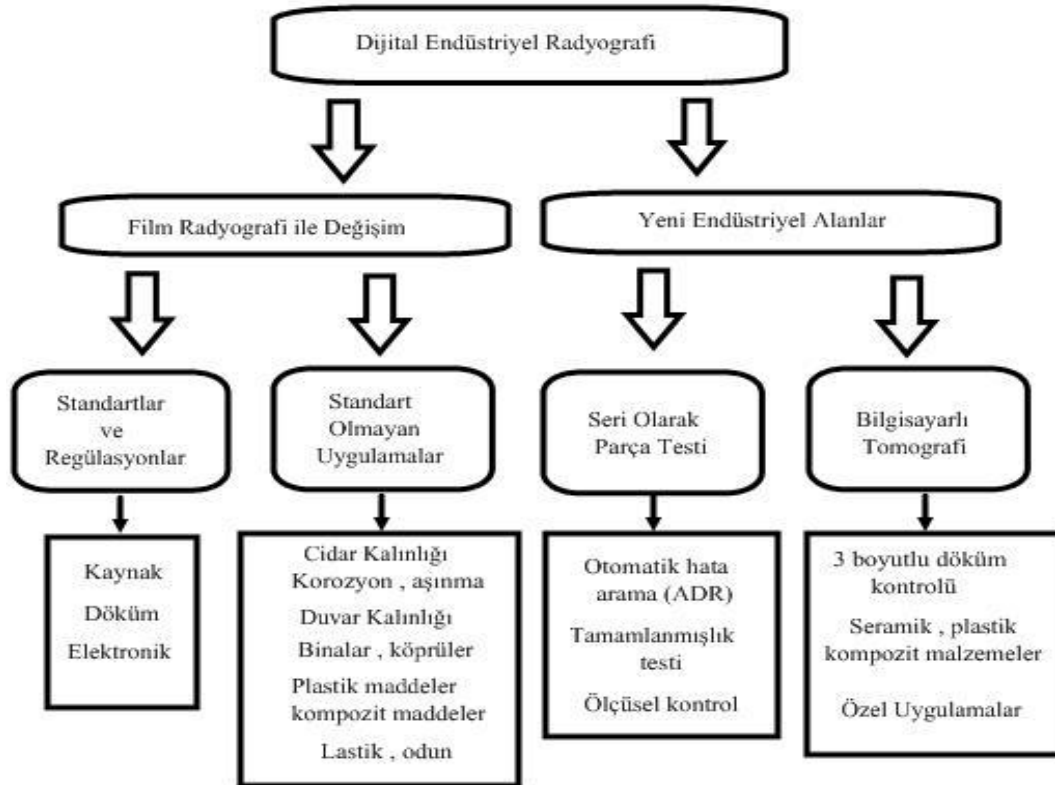
Çekim faktörlerine uygun penetremetre seçmek önemlidir. Çünkü film üzerinde görülebilen en küçük delik veya en ince tel kalınlığına göre hassasiyet tayini yapılmaktadır. Hassasiyet tayini (S) Denklem 2.6 kullanılarak hesaplanmaktadır (Halmshaw, 1991).

$$S(\%) = \frac{\text{Filmde Görülen Tel Kalınlığı}}{\text{Malzeme Kalınlığı}} \times 100 \quad (2.6)$$

Radyografik çekimin “uygun” bir çekim olabilmesi için hassasiyetin %2 veya daha düşük olması istenir.

2.2 Dijital Radyografi

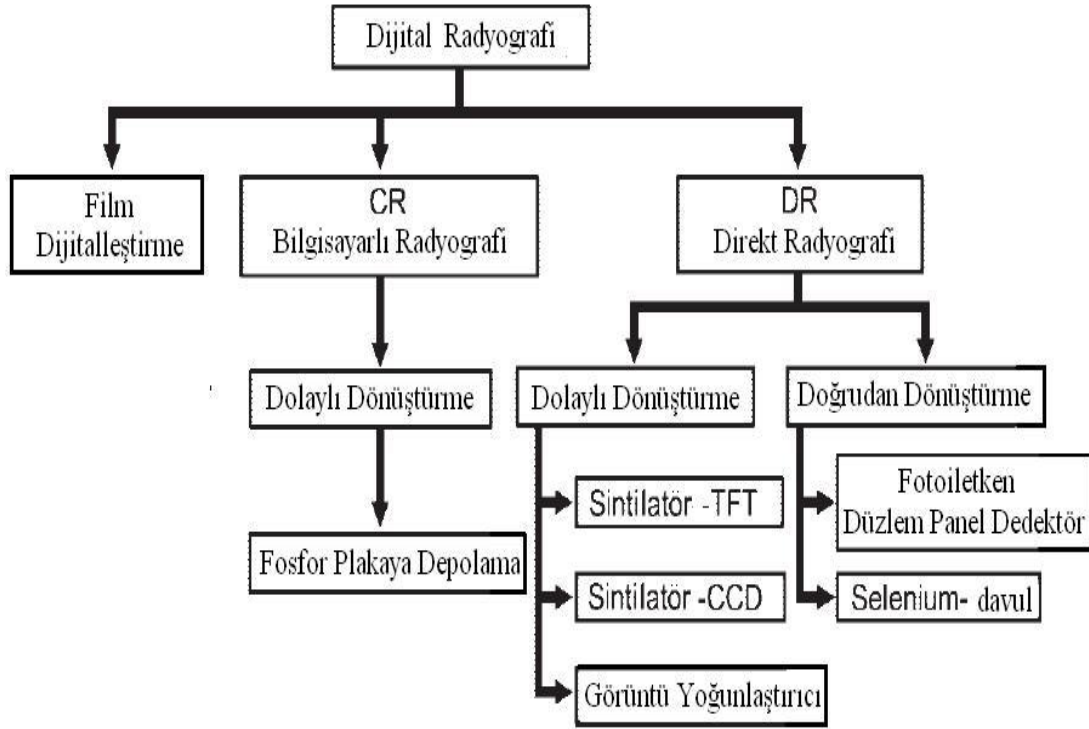
Radyografide, film radyografisi günümüzde tek seçenek değildir. Son teknolojik gelişmelerle tahribatsız muayene uygulamalarında dijital çözümler, hızlı sonuca ulaşım, güvenilirlik ve uzun vadede düşük maliyeti nedeniyle geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Dijital radyografinin endüstriyel uygulamaları Şekil 2.10’da yer almaktadır.



Şekil 2.10 : Dijital radyografinin endüstrideki uygulama alanları (Url-1).

2.2.1 Dijital radyografi türleri

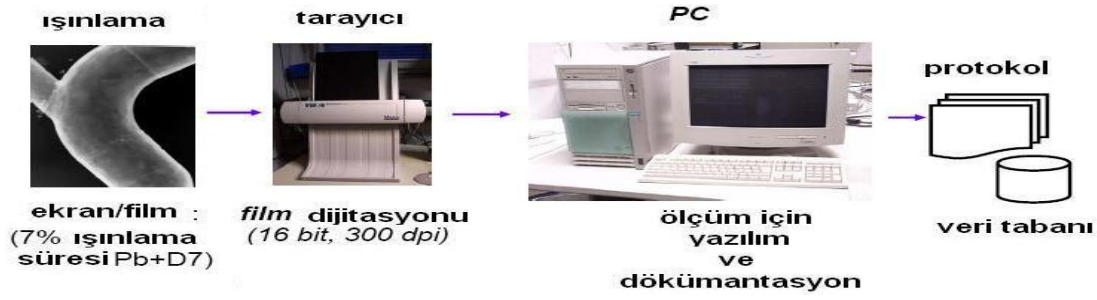
Tahribatsız muayene uygulamalarında üç tür digital radyografi kullanılmaktadır. Bunlar film dijitalleştirme, bilgisayarlı radyografi (CR) ve direkt radyografi (DR) dir. (Patel, 2005). Şekil 2.11’de dijital radyografi türleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.11 : Dijital radyografi türleri (Körner, 2007).

2.2.1.1 Film dijitalleştirme

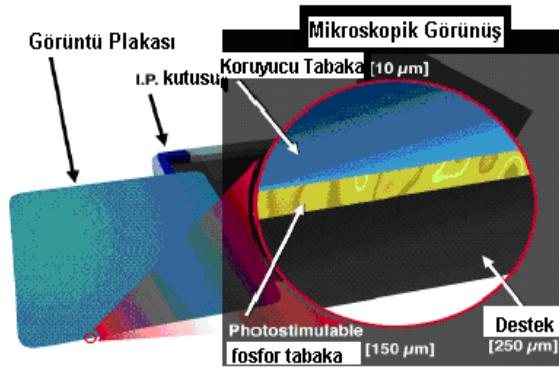
Bu yöntemde, normal radyografi işlemi ile elde edilen film bir tarayıcıya yerleştirilip görüntü okunur ve dijitize edilir. Böylece filminden elde edilen görüntü dijital ortama veri olarak aktarılmış olur. Digital görüntü, normal filme göre üzerinde değişiklik yapılabildiği için daha fazla bilgi elde etme olanağı verir. Ayrıca uzun süre saklanabilir, network yoluyla bilgi iletimi kolay olur ve uzaktan analiz yapılabilir. Dezavantajı ise kimyasal sürecin olması, film maliyeti ve filmin işlenme zamanının uzun olmasıdır. Şekil 2.12’de film dijitalleştirme işlemi görülmektedir (Zscherpel ve Alekseychuk, 2007).



Şekil 2.12 : Film dijitalleştirme (Zscherpel ve Alekseychuk, 2007).

2.2.1.2 Bilgisayarlı radyografi (CR)

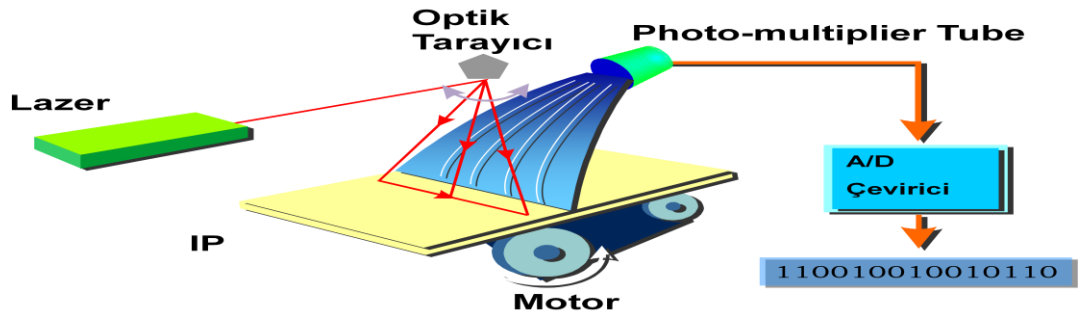
Bilgisayarlı radyografi sistemlerinin temel fiziksel ilkeleri 1980 yılında Rowlands tarafından geliştirilmiştir. Bilgisayarlı radyografi sistemleri klasik radyografideki film-ekran sistemlerine benzeyen sistemlerdir. Temel farklılık kasetlerin yerine görüntü kaydedici fosfor plakaların (IP) kullanılmasıdır. Şekil 2.13’de görüntü plakasının (IP) yapısı verilmiştir.



Şekil 2.13 : Görüntü plakasının (IP) yapısı (Url-2).

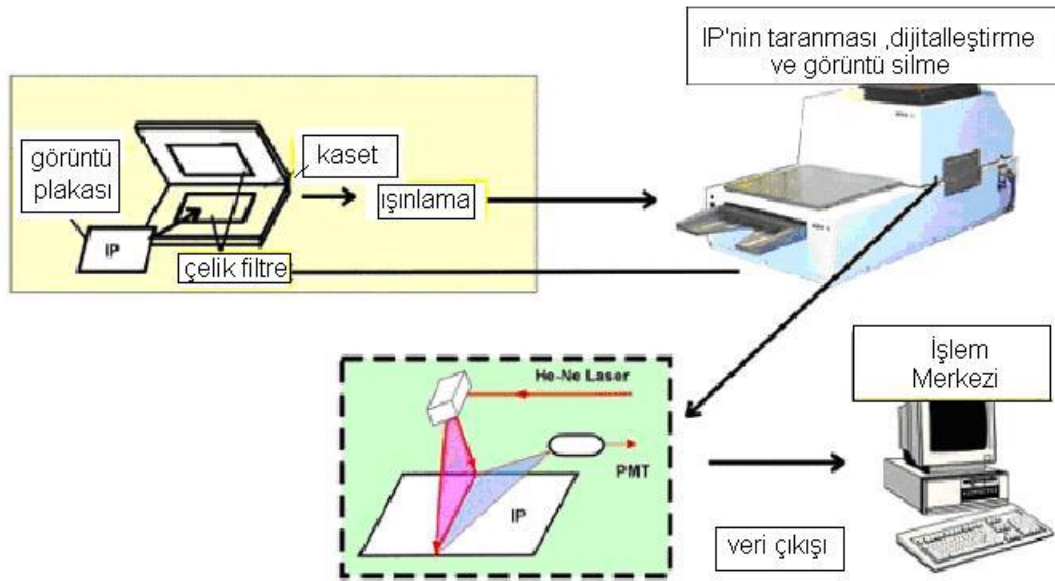
Görüntü, geleneksel radyografide kullanılan boyut ve yapıdaki kasetler içerisine yerleştirilen görüntüleme plakası (IP) üzerinde oluşturulur. Daha sonra bu plaka özel bir cihaz ile okunarak dijital görüntü elde edilir. Bu radyografi türü film radyografisi ile direkt radyografi arasında bir yerde bulunmaktadır.

X-ışınına maruz kalan plaka üzerinde oluşan renk merkezleri herhangi bir geliştirme yapılmaksızın direkt olarak Şekil 2.14’deki gibi laser tarayıcı tarafından algılanır ve dijital görüntüye dönüştürülür.



Şekil 2.14 : Görüntü plakalarının (IP) okuma mekanizması (Padovani, 2006).

Elde edilen dijital görüntü bilgisayar ortamında depolanır. Plakalar üzerindeki görüntü alındıktan sonra bu görüntü silinebilir ve plaka defalarca kullanılabilir (Mahmutyazıoğlu, 2008). Bilgisayarlı radyografi sistemlerinin çalışma prensibi Şekil 2.15’de verilmiştir.

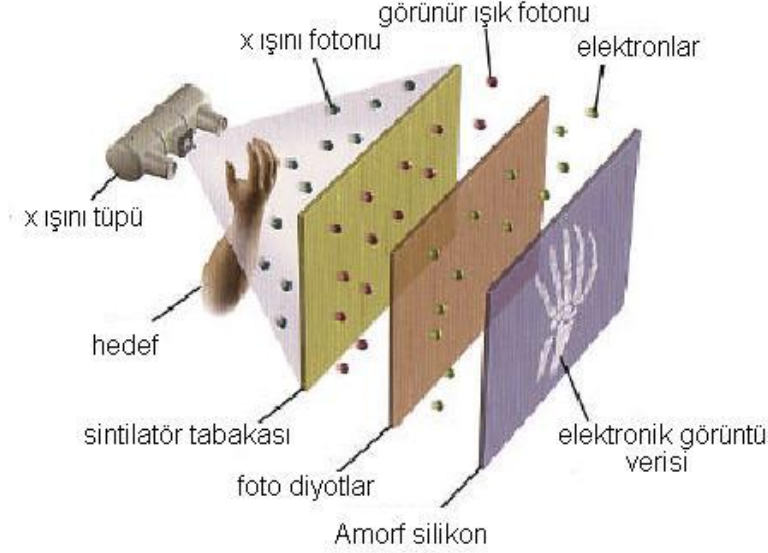


Şekil 2.15 : IP ile bilgisayarlı radyografi (Mahmutyazıoğlu, 2008).

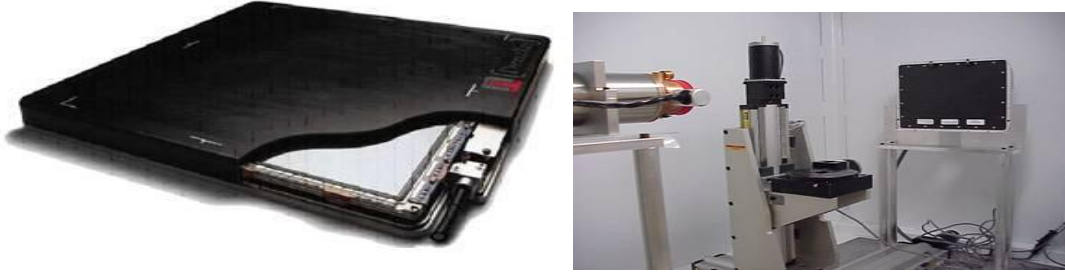
2.2.1.3 Direkt radyografi (DR)

Direkt radyografi sistemlerinde düzlem panel dedektörler kullanılmaktadır. X-ışınları önce düzlem panel dedektörde bulunan fotoiletken maddelerle (amorfl silikon veya amorf selenyum) etkileşirler. Bu etkileşme sonucunda ortaya çıkan elektronlar radyografik görüntünün ortaya çıkmasını sağlar. Panel, bir çok mikro elektronik kapasitör içerir. Bu kapasitörler test edilen malzemenin elektriksel yük desenini oluşturur. Her kapasitörün yükü, dijital görüntüyü oluşturan bir piksele çevrilir.

İşlem, panel dedektörden gelen verilerin görüntü işleme istasyonunu geri besleme yapmasıyla gerçekleşir. Şekil 2.16'da düzlem panel dedektörün sinyal iletim sistemi ve Şekil 2.17'de düzlem panel dedektör ve çekim düzeneği görülmektedir (Url-3).

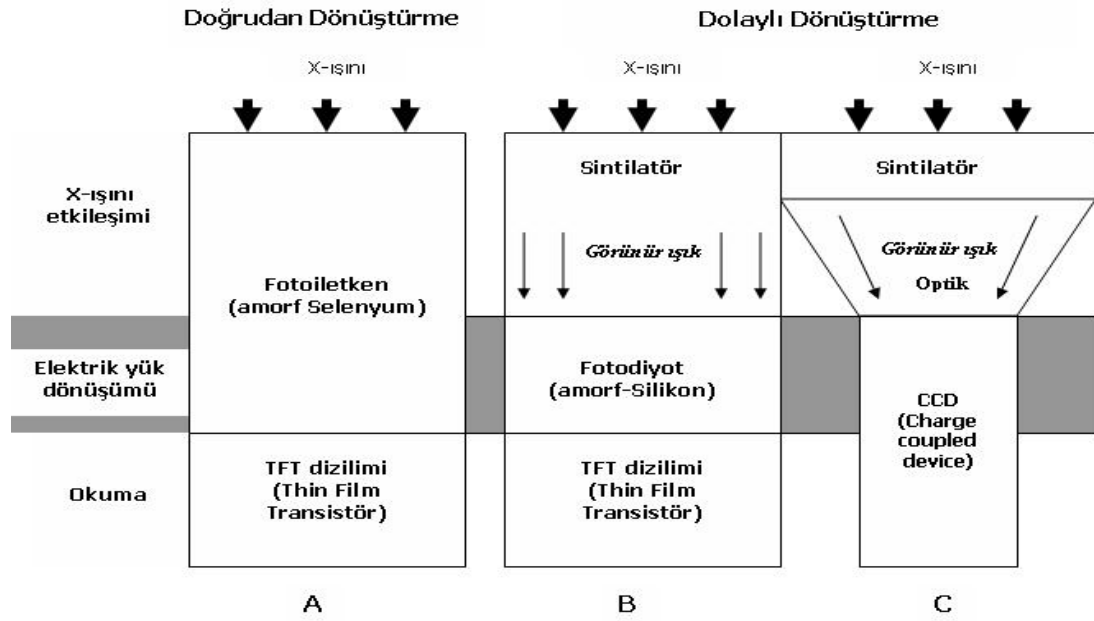


Şekil 2.16 : Düzlem panel dedektör sinyal zinciri (Url-3).



Şekil 2.17 : Düzlem panel dedektör ve çekim düzeneği .

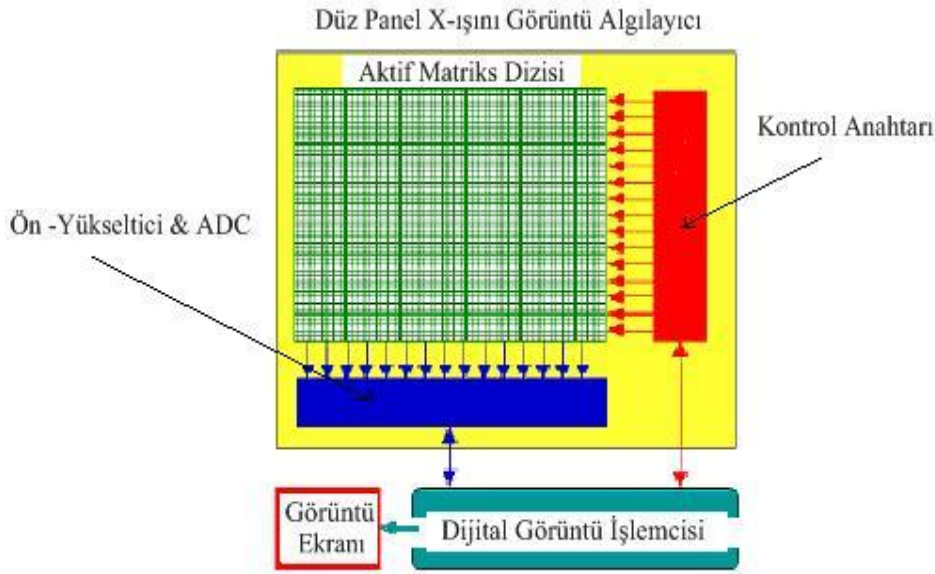
Direkt radyografi sistemleri doğrudan ve dolaylı dönüştürme sistemleri olmak üzere ikiye ayrılır. Doğrudan dönüştürme sisteminde X-ışını, fototiletken bir madde aracılığıyla doğrudan yük değişimi oluşturmakta bu da düzlem panel dedektörleri ve yük çifti dedektörlerle yapılmaktadır. Dolaylı dönüştürme sisteminde ise iki basamaklı bir işlem gerçekleşmektedir. X-ışınları, önce sintilatörlerle (görünür bölge ışınlarına çevirme özellikli) etkileşmekte ve görünür ışığa dönüşmektedir. Daha sonra görünür ışık bir yük değişimi meydana getirmektedir. Her iki sistemde de yük değişimi sonrası ortaya çıkan elektrik akımı elektronik okuma düzenekleri tarafından algılanmakta ve ardından analog-dijital dönüştürme (ADC) işlemi ile dijital veriye çevrilmektedir. Doğrudan dönüştürme ve dolaylı dönüştürme sistemleri Şekil 2.18'de gösterilmiştir (Url-4).



Şekil 2.18 : Dijital radyografi (DR) sistemleri (Url-4).

Daha öncede belirtildiği gibi direkt radyografide kullanılan düzlem-panel dedektörlerin bir çok türü vardır. Bunlardan biri de doğrudan dönüştürme sistemleri içinde yer alan amorf silikonlar üzerine kurulmuş düzlem panel dedektörlerdir. Bu sistem Rowlands ve Yorkston tarafından geliştirilmiştir.

Sistemin görüntüleme tekniği laptop ekranlarındaki teknolojiye benzemektedir. Dizüstü bilgisayarlarda bir çok ekran elemanının birbirine bağlanması gerekir. Fakat düzlem-panel ekranlarda her ekran elemanının ayrı ayrı bağlantısının kurulması yerine yatay ve dikey mantıksal elemanları birleştiren bir grup kablo kullanılır. Bu sayede 1000x1000 matris boyutundaki görüntü için 1000000 bağlantı yerine 2000 bağlantı yeterli olabilmektedir. Düzlem-panel dedektörlerde tüm ekran elemanlarındaki bilgiler görüntüleme için bilgisayara gönderilir (Url-5). Bu yapı Şekil 2.19’da gösterilmektedir.



Şekil 2.19 : Elektronik dijital düzlem panel (Url-2).

2.3 Dijital Radyografide Görüntü Kalitesi

Dijital radyografik görüntüde de film radyografide olduğu gibi hataları belirleyebilmek ve doğru değerlendirmeler yapabilmek için elde edilen görüntünün kalitesi önem taşımaktadır. Film radyografide görüntü kalitesini etkileyen faktörlere Bölüm 1.1.4’de ayrıntılı olarak değinilmiştir. Dijital radyografide görüntü kalitesi, film radyografisine göre bazı farklılıklar göstermektedir. Dijital görüntü kalitesinde, piksel boyutu, uzaysal çözünürlük, kontrast ve gürültü önemli parametrelerdir (Selman, 2000).

2.3.1 Piksel boyutu

Bir görüntünün x ve y eksenlerinde bölünmesiyle matris oluşur. Bu oluşan matrisin en küçük görüntü alanına piksel adı verilir. Her bir piksel bir renk tonuna sahiptir. Bir dijital görüntünün pikseli ne kadar çok ise o görüntünün detayı da o kadar fazladır (Selman, 2000). Dijital görüntü kare şeklindedir, yatay ve düşey sıradaki piksellerin çarpımı sonucu piksel sayısı hesaplanır ve buna da matris denir. Örnek olarak 512x512 matrise sahip 50mmx50mm görüntü alanında her bir piksel 0,1mmx0,1mm boyutlarında olacaktır. Bu da çizgi çiftiyle ifade edilirse, iki piksel dikkate almak gerektiğinden, milimetrede 5 çizgi çiftine (çç) karşılık gelmektedir. Dijital görüntüleme sistemlerinde genellikle 512x512 veya 1024x1024 matrisli görüntüler kullanılır. Dijital radyografide kullanılan renk tonları siyahtan beyaza uzanan bir gri skala oluşturur. Bu skalada her bir renk tonu bir sayıya karşılık

gelmektedir. Yani herbir pikselin rakamsal bir değeri vardır. Böylece bu rakamlarla oynayarak görüntüde değişiklik yapılabilir.

Dijital görüntüdeki renk tonu sayısına “dinamik aralık” denir ve bu sayının artması görüntüyü zenginleştirir. İnsan gözü 30 kadar gri tonu birbirinden ayırabilmektedir, buna karşılık bazı dijital yöntemlerde 2000’in üzerinde gri ton vardır (Url-6).

2.3.2 Uzaysal çözünürlük

Uzaysal çözünürlük, yüksek kontrastlı cisimlerde belirli bir aralıktaki ayırt edilebilen noktaların sayısı olarak tanımlanabilir. Uzaysal çözünürlük matris genişliği ve piksel boyutuyla belirlenmekte olup piksel boyutu uzaysal çözünürlük için sınırlayıcı parametredir. Küçük piksel boyutu ve geniş dedektör alanı uzaysal çözünürlüğü artırmaktadır. Dedektöre uygulanan radyasyon dozunun artırılması çözünürlüğü arttırmaz çünkü artan radyasyonla saçılma miktarı da artar ve bu uzaysal çözünürlüğü olumsuz etkiler.

Analog bir işaretin sayısallaştırıldıktan sonra tekrar elde edilebilmesi için bu sinyal içerisindeki en yüksek frekanslı bileşenden en az iki kat frekansta örneklenmesi gerekir. Bu teoreme *Nyquist teoremi* denir. Örnek olarak f_s örnekleme frekansı, f sinyaldeki en yüksek frekans olmak üzere $f_s > 2f$ olmalıdır. Nyquist teoremine göre bir dedektörün piksel boyutu a ise maksimum ulaşılabilir uzaysal çözünürlük değeri $a/2$ dir. Nyquist frekansı ise $(1/2a)$ şeklinde ifade edilir. $200\mu\text{m}$ piksel boyutunda ulaşılabilir maksimum uzaysal frekans 2,5 çizgi çifti/mm (çç/mm) dir. Genel radyografi uygulamaları için bu değer 0-3 arasındadır. Yüksek çözünürlüğün gerektiği dijital uygulamalarda bu değer > 5 çç/mm olabilir. Daha yüksek çözünürlükler için daha küçük piksel boyutlu dedektörler gerekmektedir (Url-6).

Piksel boyutu dijital bir sistemin uzaysal çözünürlüğünün yalnızca temel belirleyicisidir. Ancak piksel boyutu, uzaysal çözünürlüğü birebir yansıtmaz, çözünürlüğü belirleyen başka faktörler de vardır. Bunlar, modülasyon transfer fonksiyonu (MTF) ve dedektör kuantum etkinliği (DQE) dir (Selman, 2000).

Modülasyon transfer fonksiyonu (MTF), bir dedektörün belirli bir uzaysal frekansta giriş sinyal modülasyonunun çıkışa ne kadar iletebildiğinin ölçüsüdür. Radyografide cisimler farklı hacim ve ovalliğe dolayısıyla farklı gri skalalara sahiptir. Modülasyon transfer fonksiyonu cisimlerin hacimlerini ve çözünürlüklerini aynen çıkış sinyaline

iletmelidir. Ayrıca MTF cisimlerin kontrast farkını da çıkış sinyaline aynen iletmelidir(Şahin,2003;Url-6).

Dedektör kuantum etkinliği (DQE) dedektörün kalitesini belirleyen temel faktörlerden bir tanesidir. DQE değeri, dedektöre gelen X-ışınını sinyale çevirme oranıdır. Bu değer dedektörün girişindeki sinyal/gürültü değerinin çıkıştaki sinyal/gürültü değerine oranını içerir ve aynı zamanda uzaysal frekansın bir fonksiyonudur. İdeal dedektörün DQE değeri “1” dir. Yani soğrulan tüm X-ışınları sinyale çevrilmiştir. Pratikte ise DQE değerleri 0,5 çç/mm uzaysal frekansta 0,45 değerine sınırlanmıştır (Url-6).

Uzaysal çözünürlük değeri standartlardan elde edilebilir. Bu değer incelenerek malzeme kalınlığı ve enerji miktarı belirlenebilir. Buna bir örnek Çizelge 2.3’te verilmiştir.

Çizelge 2.3 : EN 14784-2 standartlarında enerji ve malzeme kalınlığına göre uzaysal çözünürlük (Ewert, 2007).

Radyasyon Kaynağı	Cidar kalınlığı	IPA sınıfı		IPB sınıfı	
		Max. Piksel ebadı (mikro metre)	Çift telli IQL sayısı	Max. Piksel ebadı (mikro metre)	Çift telli IQL sayısı
X-ışını $U_p \leq 50$ kV	$w < 4$	40	> 13	30	$> > 13$
	$4 \leq w$	60	13	40	> 13
X-ışını $50 < U_p \leq 150$	$w < 4$	60	13	30	$> > 13$
	$w \leq 4 < 12$	70	12	40	> 13
	$w \geq 12$	85	11	60	13
X-ışını $150 < U_p \leq 250$	$w < 4$	60	13	30	$> > 13$
	$w \leq 4 < 12$	70	12	40	> 13
	$w \geq 12$	85	11	60	13
X-ışını $250 < U_p \leq 350$	$12 \leq w < 50$	110	10	70	12
	$w \geq 50$	125	9	110	10
X-ışını $350 < U_p \leq 450$	$w < 50$	125	9	85	11
	$w \geq 50$	160	8	110	10
Yb 169, Tm 170		85	11	60	13
Se 75, Ir 192	$w < 40$	160	8	110	10
	$w \geq 40$	200	7	125	9
Co 60		250	6	200	7
X-ışını $U_p > 1$ MeV		250	6	200	7

2.3.3 Kontrast

Radyografik görüntünün oluşumu daha önce Şekil 2.6’da basamaklı bir malzeme ile açıklanmıştı. Film radyografisindeki gibi malzemenin iki farklı kalınlığı arasındaki yoğunluk veya şiddet (I) farkı dijital görüntü üzerinde radyografik kontrast olarak ortaya çıkar (Czichos, 2006). Aslında bu yoğunluk farkı görüntüdeki açık ve koyu bölgeler arasındaki farktır. Görüntü siyah ve beyaz ile sonlanan bir çok gri bölge içeriyorsa bu kontrasta düşük kontrast, az miktarda içeriyorsa buna yüksek kontrast denir. Cismin kalınlığı, yoğunluğu ve atom numarası kontrastı etkiler. Ayrıca radyasyonun enerjisi ve ışınlama süresi de kontrastı etkileyen faktörlerdir (Alan, 2008). Komşu yapılar arasındaki kontrast, bu yapıların farklarının belirlenmesi ve ayrılması için önemli bir faktördür (Aktan, 2008).

2.3.4 Gürültü

Dijital radyografide gürültü, görüntü oluşum basamaklarındaki rastgele etkileşimlerden kaynaklanan, görüntü kalitesini bozan fakat bütünüyle önlenemeyen değişikliklerdir. Tüm dijital radyografi sistemlerinde film radyografisinden farklı olarak bir çok gürültü kaynağı bulunmaktadır. Bunlar elektronik gürültü ve dijitalizasyon gürültüsüdür. Elektronik gürültü, sistem ile birlikte çalışan tüm elektronik aksamın görüntüde yarattığı bozulmadır. Dijitalizasyon gürültüsü ise yüksek bit derinliği ile elde edilen görüntünün düşük bit derinliğinde bir ortamda gösterilmesi durumunda ortaya çıkan gri ton kodlama farklılıklarıdır (Url-6).

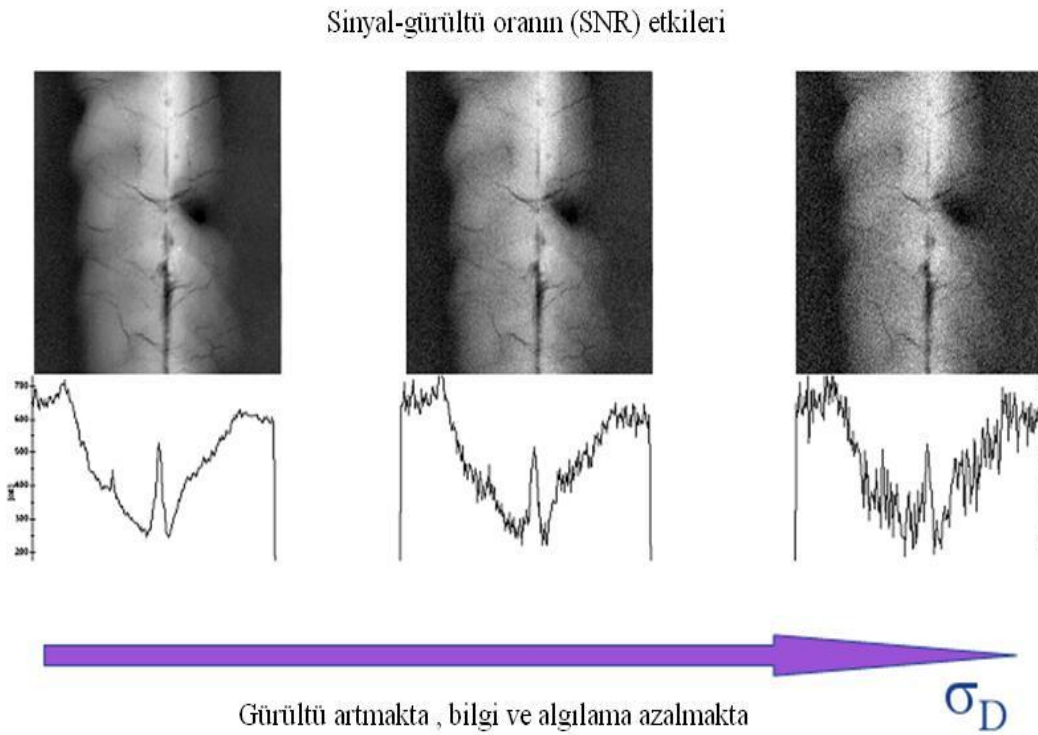
2.3.4.1 Sinyal - gürültü oranı

Sinyal-gürültü oranı, mühendislikte bir sinyalin gürültü tarafından ne kadar etkilendiğini gösteren bir ölçüttür ve kısaca SNR veya S/N olarak gösterilir. Malzemedeki hataları algılamak için en önemli parametre gradyen bölü tanelilik (G_2/σ_D) değeri olup bu büyüklük, uygun sinyal-gürültü oranının hesaplanmasında kullanılmaktadır (Ewert, 2007).

(G_2/σ_D) değerinin SNR değerine çevrilmesi verilen sinyallerin uygulanan dozla doğru orantılı olduğu varsayımı ile yapılır. Non lineer sinyallerin SNR ve uzaysal çözünürlüğü belirlenmeden önce lineerleştirilmesi gerekmektedir. Lineer sistemlerde SNR Denklem 2.7 ile hesaplanabilir.

$$SNR = (G_2 / \sigma_D) / \ln(10) \quad (2.7)$$

Film SNR değerleri 100 mikrometre çaplı dairesel bir diyafram ile ışınım sonrası ölçülür. Diyafram yüzeyi film ve dijital görüntülerin ya da dedektörlerin karşılaştırılması için kare şekilli bir yüzeye çevrilmelidir. Bir piksel $88.6 \times 88.6 \mu m^2$ ve 287 dpi'lık bir çözünürlük yaratır. Piksel ebadı ve alanı önemlidir, çünkü SNR dedektör alanına bağlıdır. SNR artışları piksel alanının karesiyle doğru orantılıdır (Ewert, 2004). Sinyal-gürültü oranının görüntüye etkisi Şekil 2.20'de gösterilmiştir.



Şekil 2.20 : Sinyal-gürültü oranının görüntüye etkisi (Ewert, 2007).

Sınıflandırma için yeni standart önerileri normalize edilmiş SNRn limitlerini gerektirir. Ölçülen SNR_{meas} değeri Denklem 2.8 kullanılarak düzeltilmelidir.

$$SNR_n = SNR_{meas} \times \frac{88,6 \mu m}{SR_b} \quad (2.8)$$

Burada, SR_b temel uzaysal çözünürlüktür (mikrometre) ve efektif piksel ebadına (piksel alanının kare kökü) karşılık gelir. SR_b farklı metodlarla ve değişik mantıklarla ölçülebilir. Standartlarda kolaylığından dolayı duplex wire metodu kullanımı önerilmektedir. Temel uzaysal çözünürlük, U_g yarı gölge olmak üzere Denklem 2.9 yardımıyla bulunur (Ewert, 2007).

$$SR_b = \frac{U_g}{2} \quad (2.9)$$

Çizelge 2.4'te D=2 yoğunluğa karşı gelen G_2/σ_D ve SNR değerleri farklı sistem sınıfları için verilmektedir.

Çizelge 2.4 : SNR ve G_2/σ_D değerleri (Ewert, 2007).

Sistem Sınıfı				Minimum gradient-gürültü değeri	Gürültü-sinyal oranı
Dünya	Avrupa	USA ASTM	Japonya	Do üzerinde D=2	Do üzerinde D=2
ISO 11699-1	CEN 584-1	E1815-01	K7627-97	G_2 / f_D	SNR
T1	C1	Special	T1	300	130
	C2	I		270	117
T2	C3		T2	180	78
	C4			150	65
T3	C5	II	T3	120	52
T4	C6	III	T4	100	43
		W-A	W-A	135	
		W-B	W-B	110	
		W-C	W-C	80	

3. RADYOGRAFİ YÖNTEMİYLE BORULARDA CİDAR KALINLIĞI TAYİNİ

Endüstride kullanılan çelik borularda zaman içinde çeşitli kimyasal veya fiziksel etkilerden dolayı birikim, aşınma, paslanma, çürüme veya oyuklar oluşabilmektedir. Şekil 3.1’de bu tür oluşumlardan örnekler görülmektedir. Bu etkiler sonucunda boruların cidar kalınlığı değişebilmektedir (IAEA, 2005).



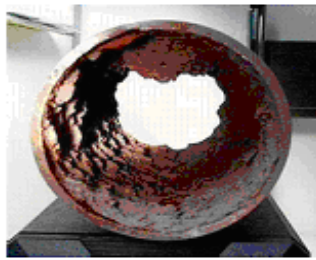
Şekil 3.1 : Paslanma ve aşınmaya uğramış çelik borular (IAEA, 2005).

Kimyasal işlemlerin yapıldığı veya buna benzer uygulamaların olduğu fabrikalarda yapısal güvenilirliğin en temel konularından biri de boruların cidar kalınlıklarının tahribatsız muayene yöntemleriyle ölçülmesidir. Şekil 3.2’deki gibi borular kapalı sistemler olduğundan farklı muayene yöntemleri uygulanmaktadır. Bunlardan biri sıklıkla kullanılan ultrasonik muayene yöntemidir. Fakat çoğunlukla borular yalıtım malzemeleriyle kaplanmış durumdadır. Ultrasonik muayene yapılabilmesi için yalıtım malzemesinin kaldırılması gerekmektedir. Yalıtım malzemesinin kaldırılması işlemi her zaman gerçekleştirilemediği gibi zor ve masraflı da olabilmektedir. Radyografik muayene yönteminde ise yüzeye temas etme zorunluluğu olmadığından rahatlıkla ölçüm yapılabilir (IAEA, 2005; Url-7).

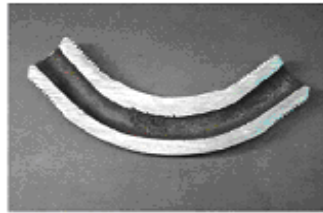


Şekil 3.2 : Radyografi yöntemiyle kapalı bir borudan görüntü elde edilmesi ve radyografin görüntüsü (Zscherpel ve Alekseychuk, 2007)

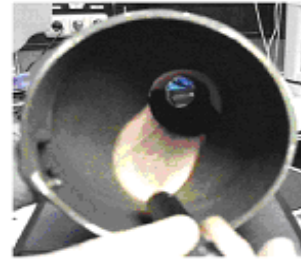
Ayrıca radyografik muayenede borularda oluşan birikim, aşınma vb. erezyonlar radyograf üzerinde Şekil 3.3'teki gibi rahatlıkla ayrıntılı olarak görülebilmektedir.



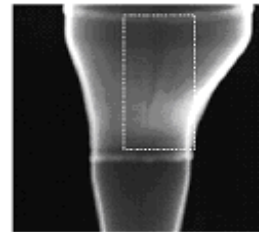
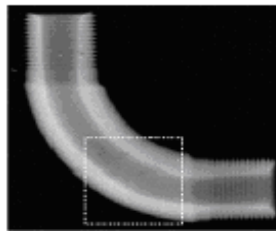
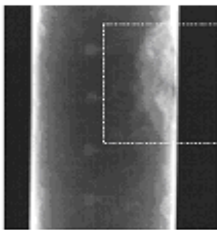
Birikim Ve Paslanma



Aşınma

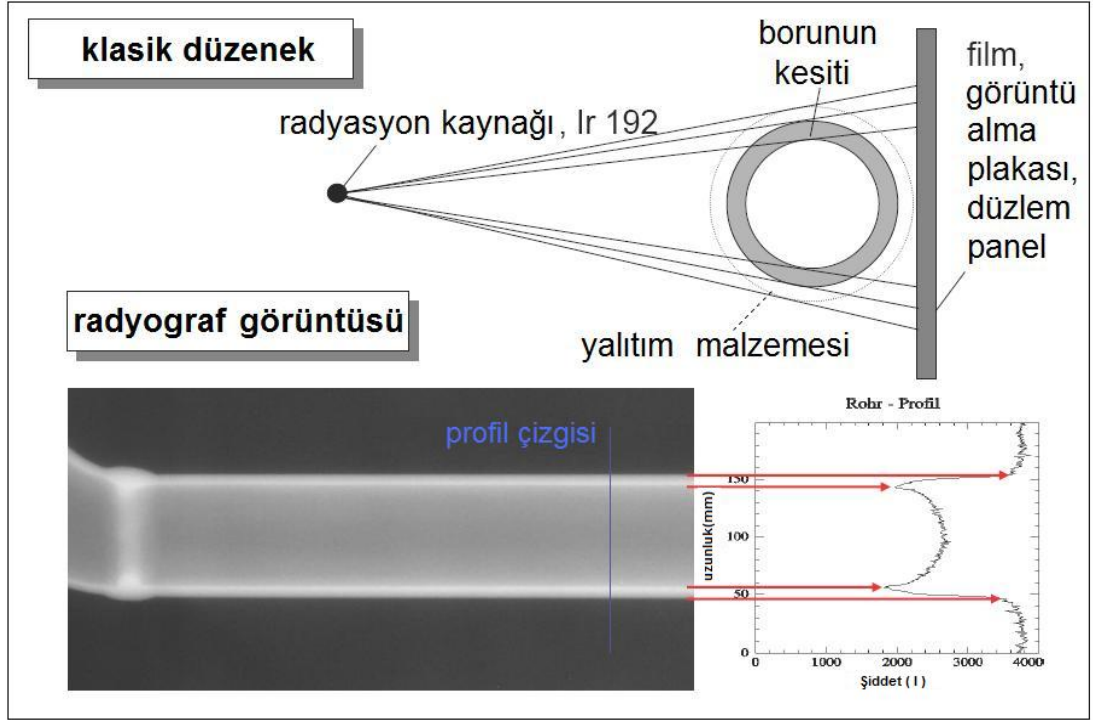


Erezyon



Şekil 3.3 : Birikim, paslanma ve aşınmaya uğramış çelik borular ve bu borulara ait radyograf görüntüleri (Zscherpel ve Alekseychuk, 2007).

Şekil 3.4'te ise radyografi yöntemi ile bir borunun çekim düzeneği ve radyograf görüntüsünden cidar kalınlığının tespiti gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Radyografi yöntemiyle boru çekimi ve cidar kalınlığı tespiti (Zscherpel ve Alekseychuk, 2007).

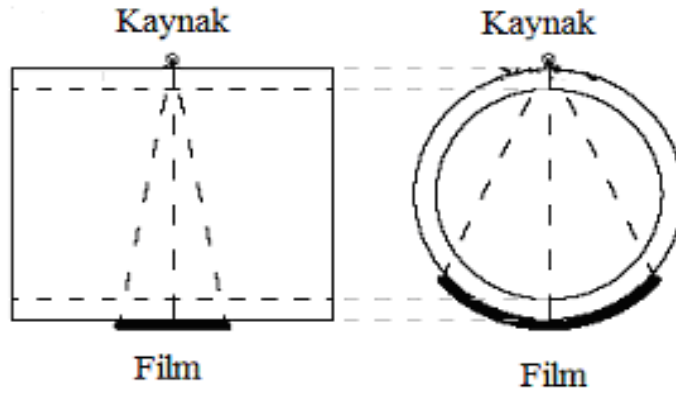
Radyografi kullanılarak bu tür çelik boruların cidar kalınlığı ölçümü iki çeşit çekim yöntemi kullanılarak tespit edilebilmektedir. Bunlardan biri çift cidar tekniği (DWT) diğeri ise teğet radyografi tekniği (TRT) dir.

3.1 Çift Cidar Tekniği (DWT)

Çift cidar tekniğinin iki çeşit uygulaması vardır. Bunlar, “Çift Cidar Tek Görüntü” ve “Çift Cidar Çift Görüntü” teknikleridir.

3.1.1 Çift cidar tek görüntü (DWSI)

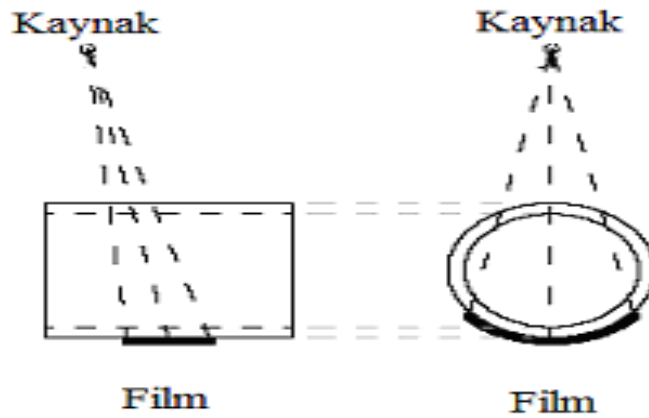
Eğer borunun içine film yada kaynağı koymak için erişim imkanı yoksa, bu yöntem kullanılabilir. Çift cidar tek görüntü tekniği çoğunlukla 85 mm ve daha büyük çaplardaki borular için uygundur. Şekil 3.5’deki gibi kaynak, borunun çapına, gerekli film-kaynak uzaklığına bağlı olarak borunun üzerine veya borudan uzağa yerleştirilebilir.



Şekil 3.5 : Çift cidar tek görüntü (DWSI) çekim geometrisi (Zirnhelt ve diğ, 2003).

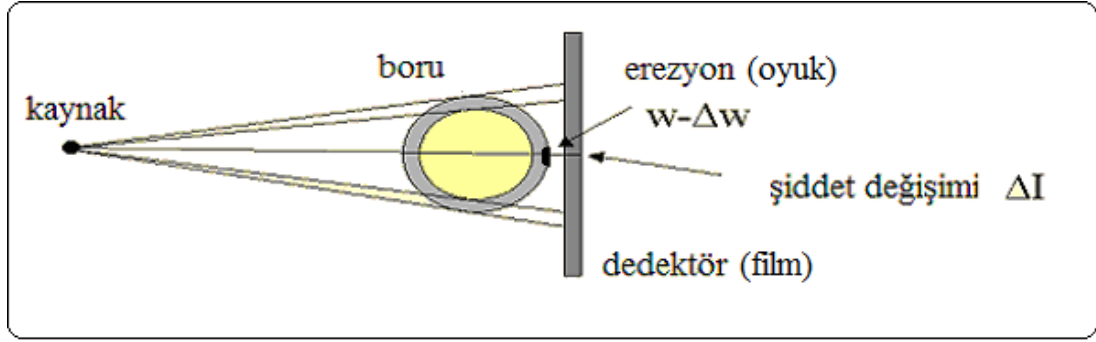
3.1.2 Çift cidar çift görüntü (DWDI)

Bu teknik ise çapı 85 mm'ye kadar olan daha küçük boyuttaki borular için uygundur. Radyasyon kaynağı Şekil 3.6'daki gibi borunun kaynak dikiş yerleri üst üste gelmeyecek şekilde belli bir açı ile yerleştirilir. Genellikle boru 90 derece döndürülerek iki poz çekim yapılır (Zirnhelt ve diğ, 2003).



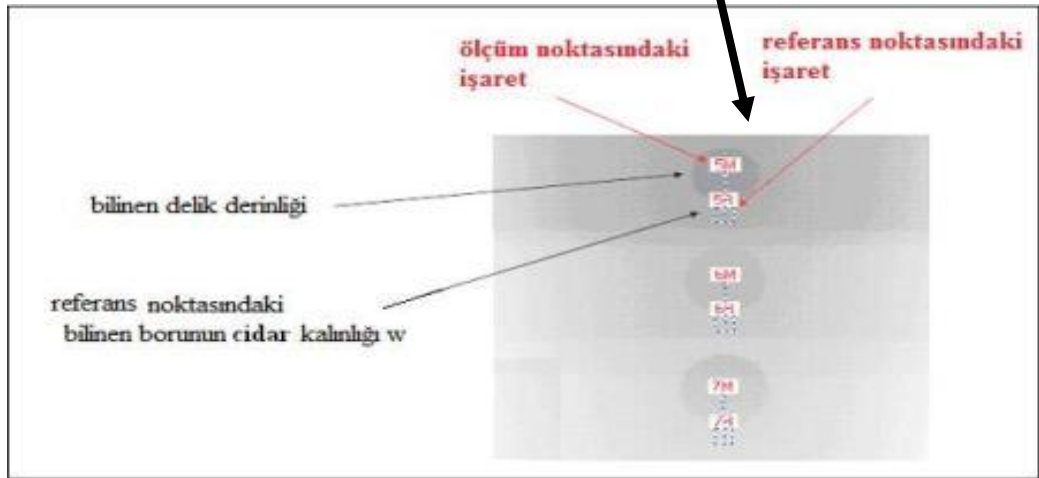
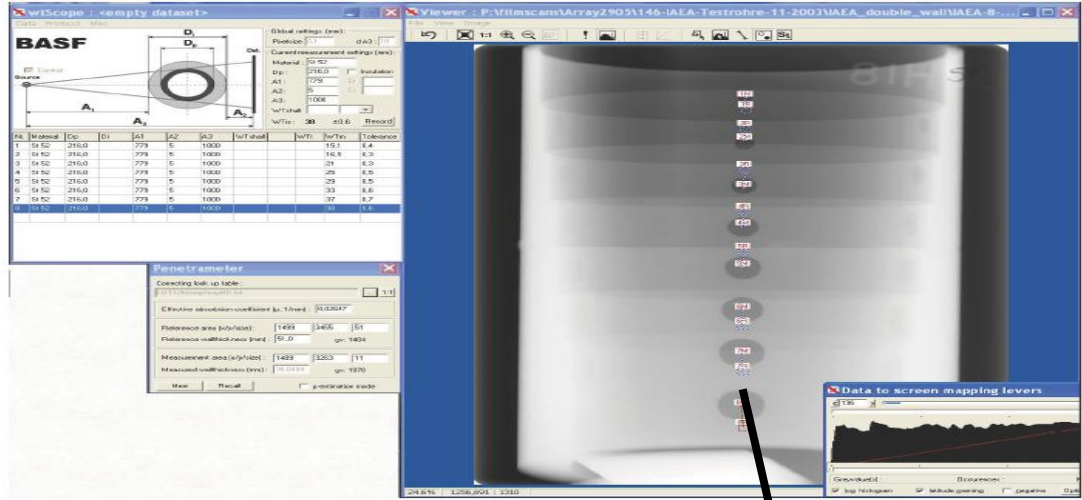
Şekil 3.6 : Çift cidar çift görüntü (DWDI) çekim geometrisi (Zirnhelt ve diğ, 2003).

DWT ile korozyon ölçümleri TRT'ye göre daha karmaşıktır. DWT'de efektif zayıflama katsayıları (μ_{eff}) ve film üzerinde yoğunluk ölçümü değerlendirilmesi ile boru üzerindeki oyuk veya korozyon derinliği tespiti yapılır. Şekil 3.7'de bir boru üzerinde oluşmuş erezyon ve DWT' ye ait çekim düzeneği görülmektedir. Radyasyonun nüfuz ettiği cidar kalınlığı merkezi projeksiyona bağlı olarak ya da malzemenin şekline bağlı olarak değişebilmektedir.



Şekil 3.7 : Çift cidar tekniğine ait boru çekim geometrisi ve şiddet değişimi (Zscherpel ve Alekseychuk, 2007).

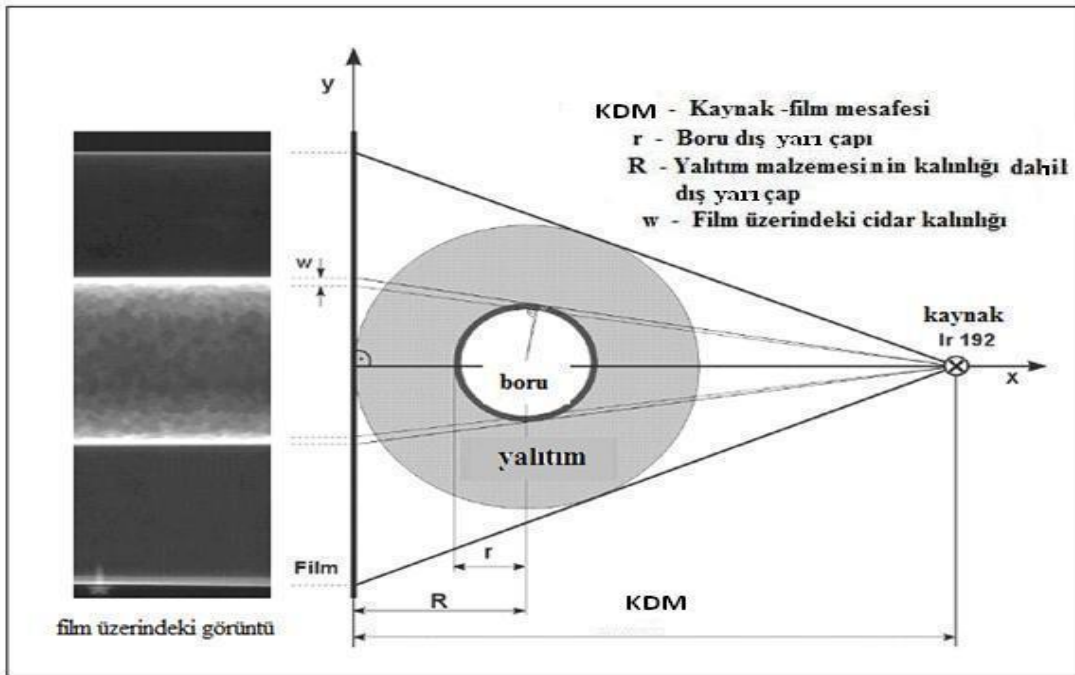
Şekil 3.8’de Çift Cidar Tekniğine ait bir uygulama görülmektedir. Şekilde sağ tarafta ölçüm noktaları işaretlenmiştir, sol tarafta gösterilen tabloda ise geometri ve ölçüm sonuçları özetlenmiştir (Zscherpel ve Alekseychuk, 2007).



Şekil 3.8 : Çift Cidar Tekniği’nde görüntü değerlendirilmesi (Zscherpel ve Alekseychuk, 2007).

3.2 Teğet Radyografi Tekniği (TRT)

Boru muayenesi için kaynakla boru arasında belirli bir geometrik kurulum sağlanıp cidar kalınlığını görüntü üzerinde doğrudan ölçme yöntemine “teğet radyografi tekniği” (TRT) denir. Bu radyografi yönteminde film boruya teğet olacak biçimde borunun altına yerleştirilir ve kaynak filme dik olacak şekilde uygun bir geometrik düzenleme yapılır. Kaynak-film mesafesi (KDM) ayarlanarak boruya radyasyon verilir. Böylece boru cidarının görüntüsü bir film üzerine alınır ve cidar kalınlığının hesaplanması doğrudan bu film üzerinden yapılabilir. Boru cidarının dış ve iç çap sınırlarının doğru değerlendirilebilmesi için çekim geometrisinin uygun bir şekilde yapılması gereklidir. Bunun için kaynak, boru ve film arasında uygun geometrik parametrelerin kullanılması gerekmektedir. Şekil 3.9 da görüldüğü gibi çekilen film üzerinde borunun cidar kalınlığı için orta kısımdaki görüntü yorumlanmayıp yok sayılır. Yanlarda oluşan parlak bölge ise boru cidar kesitinin sınırlarını belirgin bir şekilde gösteren kısımdır (Ekinci ve diğ, 1999).

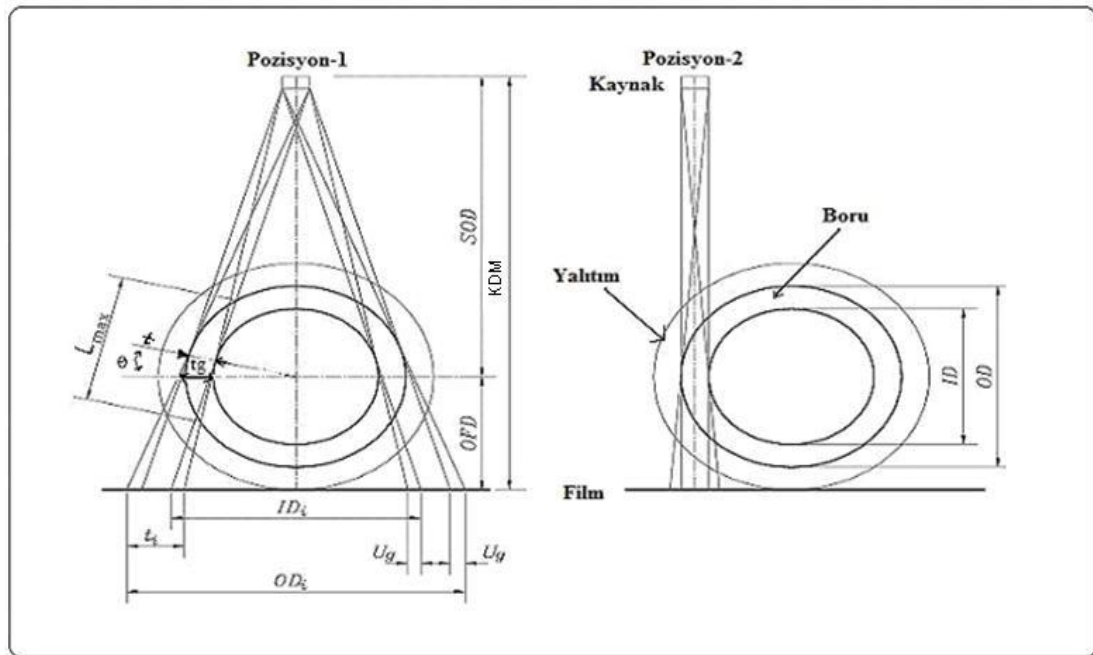


Şekil 3.9 : Teğet radyografinin çekim geometrisi ve radyografik görüntü (Zscherpel ve Alekseychuk, 2007).

Teğet yöntemindeki geometrik parametreler Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Film üzerindeki boru cidar kesitinin sınırları ise kaynak ile boru dış çap (OD) ve iç çap (ID) teğet noktalarından çizilen doğrularla belirlenmektedir. Radyasyonun geçtiği en kalın boru bölgesi ID teğet noktasından geçen kirişin uzunluğudur. Görüntüsü alınan

$$t_g = t_i (KDM - 0,5OD) / KDM \quad (3.1)$$

OD: boru dış çapıdır.



Şekil 3.10 : Teğet radyografisinde geometrik parametreler (Zirnhelt ve diğ,2003).

Şekil 3.10' da görüldüğü gibi “t” borunun gerçek cidar kalınlığıdır. “t_g” ise boruya iç kısmından teğet olarak çizilen paralel doğrunun belirlediği geometrik cidar kalınlığıdır. KDM mesafesinin değişmesiyle boruya içten ve dıştan çizilen teğet doğruları değişebilmektedir. KDM büyüdükçe t ve t_g arasındaki θ açısı azalmaktadır. Eğer KDM çok büyükse θ açısı ihmal edilebilir böylece t_g, t’ye eşit alınabilir. Fakat KDM küçükse bazı trigonometrik işlemlerle düzeltmeler yapılmalıdır (Ekinci ve diğ,1999).

3.2.1 Yarı gölge

X-ışını tüpleri ve radyoaktif kaynaklar nokta şeklinde olmayıp belli bir boyuta sahip olduklarından film üzerinde merkezi projeksiyon çekimlerde her zaman belli bir yarı gölge oluştururlar. Bundan dolayı yarı gölge hesabı mutlaka yapılmalıdır. Şekil 3.10 da yarı gölge U_g olarak gösterilmiştir. U_g aşağıda verilen 3.2 denkleminde bulunabilir (IAEA, 2005).

$$U_g = 2 (K \times 0,5OD) / (KDM - 0,5OD) \quad (3.2)$$

Burada U_g toplam yarı gölge, K kaynak boyutu, OD ise boru dış çapıdır. Eğer KDM büyük veya çekim yapılan boru çapı küçükse U_g ihmal edilebilir. U_g, film üzerinde ölçülen cidar kalınlığı “t_i” nin içinde yer alır. Bundan dolayı gerçek boru cidar kalınlığını bulmak için U_g hesaplanıp “t_i” den çıkarılmalıdır.

Borunun gerçek cidar kalınlığı diğer bir yöntemle göre de, boru dış çapı “OD” ve borunun radyograf üzerindeki görüntüsü “OD_i” yardımıyla bulunabilir. Buna göre aşağıda verilen 3.3 denkleminde borunun gerçek cidar kalınlığı hesaplanabilir (Ekinci ve diğ, 1999).

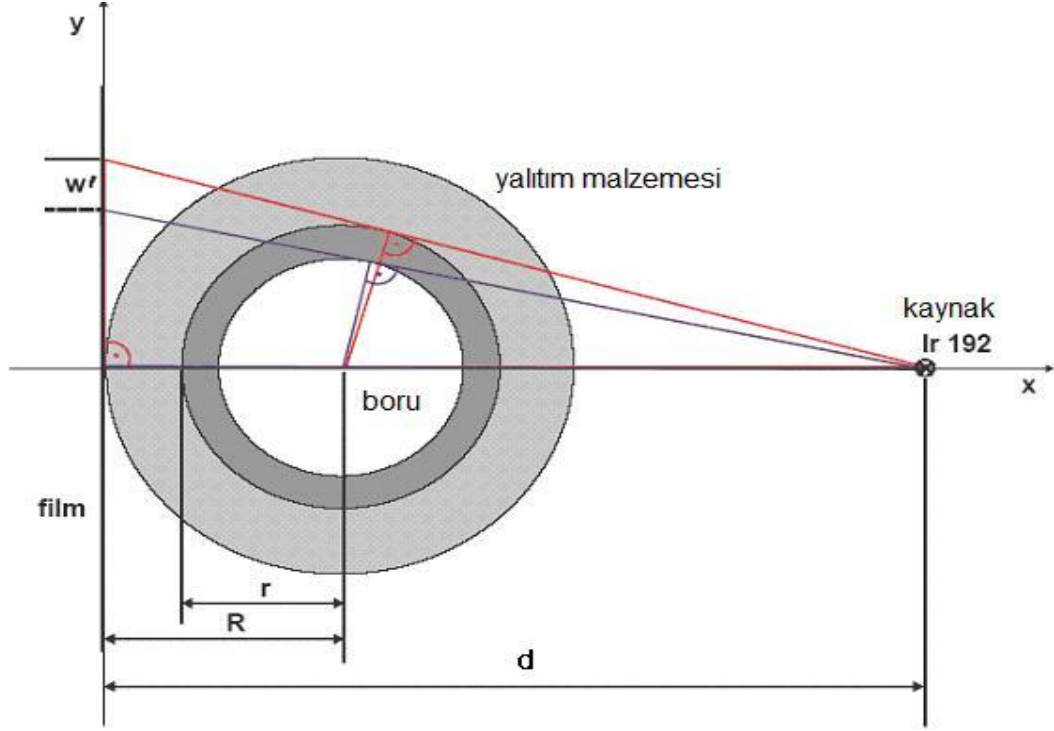
$$t = t_i \times OD / OD_i \quad (3.3)$$

3.2.2 Büyütme faktörü

Şekil 3.11’deki gibi teğet pozlama tekniğinde geometrik düzeneğin yapısından dolayı bir büyütme faktörü vardır. Yani film üzerindeki cidar kalınlığı gerçek kalınlığı vermez. Bundan dolayı büyütme faktörü göz önünde tutularak film üzerinde ölçülen cidar kalınlığı için bir düzeltme yapılmalıdır. Denklem 3.4’den yararlanılarak düzeltilmiş cidar kalınlığı bulunabilir.

$$w = \frac{(d - R)}{d} \cdot w' \quad (3.4)$$

Denklemden w düzeltilmiş cidar kalınlığı, w' film üzerindeki cidar kalınlığı, R borunun yarıçapı (yalıtım malzemesinin kalınlığı dahil), d ise kaynak film mesafesidir (Zscherpel ve diğ, 2006).



Şekil 3.11 : Teğet radyografisi için deney düzeneği ve büyütme faktörü (Zirnhelt ve diğ,2003).

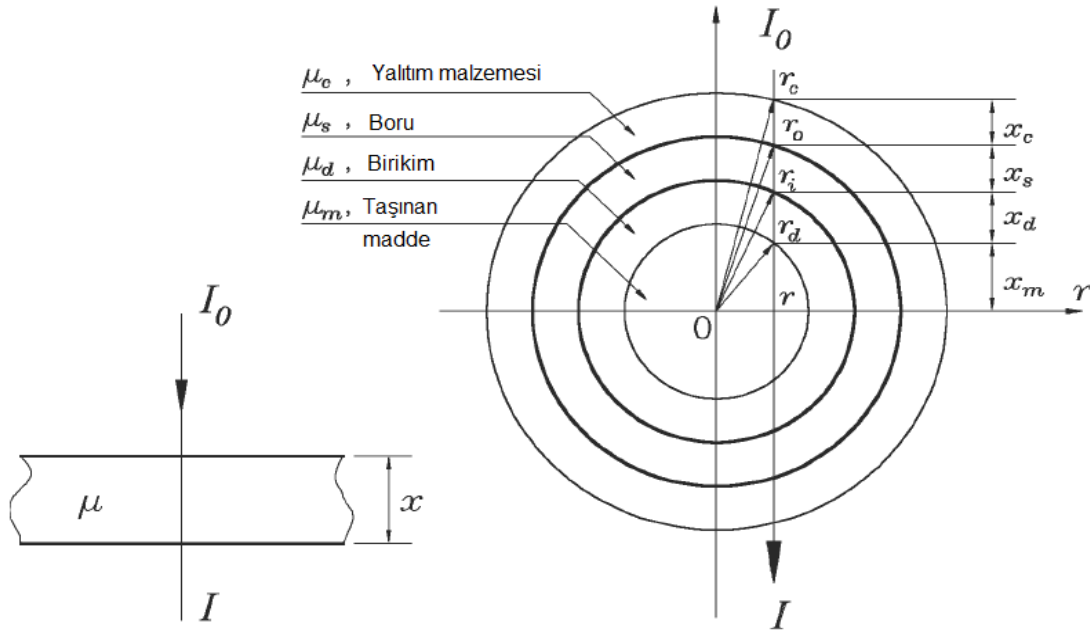
3.2.3 Cidar kalınlığı değerlendirilmesi

Eğer radyasyon kaynağından çıkan ışınlar, içinden madde geçen aynı zamanda birikim oluşmuş ve yalıtım malzemesi ile kaplanmış bir borudan geçiyorsa, Denklem 3.5'den yararlanarak radyasyon şiddeti (I) bulunur;

$$I = I_0 e^{-2(\mu_c X_c + \mu_s X_s + \mu_d X_d + \mu_m X_m)} \quad (3.5)$$

Burada μ_c , μ_s , μ_d , μ_m sırasıyla yalıtkan malzemenin, çeliğin, birikimin ve içinde taşınan maddenin zayıflama katsayılarıdır. X_c , X_s , X_m , X_d ise yine sırasıyla yalıtkan malzemenin, çeliğin, birikimin ve içinde taşınan maddenin kalınlıklarıdır.

Şekil 3.13 te “r” koordinatına göre ışınların geçtiği her katmanın kalınlığı geometrik prensiplerin kullanımıyla hesaplanabilir (Zirnhelt ve diğ, 2003).



Şekil 3.12 : Bir borunun farklı katmanları için zayıflatma katsayıları (Zirnhelt ve diğ, 2003).

- Nüfuz edilen taşınan maddenin kalınlığı ;

$$X_m = \sqrt{r_d^2 - r^2} \quad (3.6)$$

- Nüfuz edilen birimin kalınlığı ;

$$X_d = \sqrt{r_i^2 - r^2} - X_m \quad (3.7)$$

- Nüfuz edilen boru kalınlığı ;

$$X_s = \sqrt{r_o^2 - r^2} - (X_d + X_m) \quad (3.8)$$

- Nüfuz edilen yalıtım malzemesinin kalınlığı ;

$$X_e = \sqrt{r_e^2 - r^2} - (X_s + X_d + X_m) \quad (3.9)$$

Burada r_e yalıtım malzemesinin yarıçapı, r_o borunun dış yarıçapı, r_i borunun iç yarıçapı, r_d ise birikimin yarıçapıdır.

Radyasyon şiddetinin değişimi için genel denklem kullanılarak, farklı boru tiplerine göre özel formül çıkarılabilir:

- Yalıtımsız boş boru ($X_e = 0$, $X_d = 0$, $X_m = 0$):

$$I = I_0 e^{-2\mu_s X_s} \quad (3.10)$$

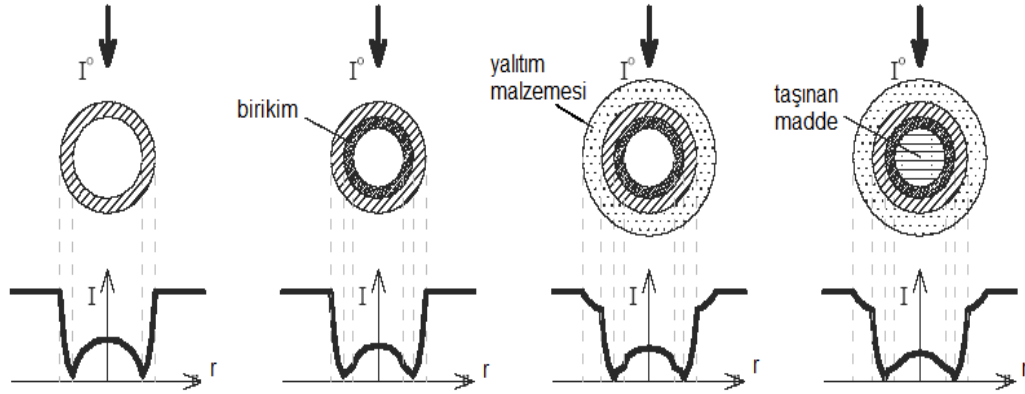
- Yalıtımlı boş boru ($X_d = 0$, $X_m = 0$):

$$I = I_0 e^{-2(\mu_c X_c + \mu_s X_s)} \quad (3.11)$$

- İçinde birikim olan yalıtımlı boş boru ($X_m = 0$):

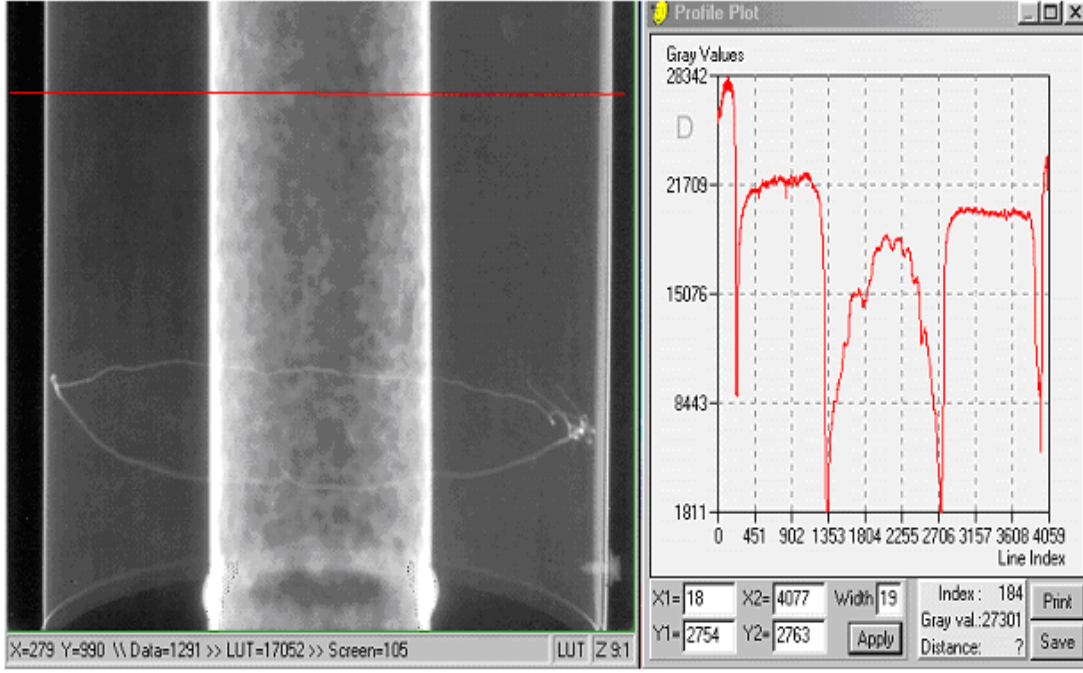
$$I = I_0 e^{-2(\mu_c X_c + \mu_s X_s + \mu_d X_d)} \quad (3.12)$$

Yukardaki denklemleri kullanarak, yarıçapa (r) bağlı olarak radyasyon şiddeti (I) için Şekil 3.13'teki (I - r) eğrileri elde edilir. Eğrilerin dönüm noktaları farklı katmanlar arasındaki sınırlara karşılık gelmektedir. Bu dönüm noktaları arasındaki uzaklık ise tabakaların kalınlığını vermektedir. Şekil 3.13 de farklı tip boruların I - r koordinat sisteminde şiddet değişimine göre dönüm noktaları görülmektedir. Yani I - r koordinat sistemiyle sınırlar belirlenerek de cidar kalınlığı tayini yapılabilir (Zirnhelt ve diğ., 2003).



Şekil 3.13 : Teğet radyografi tekniğinde farklı tip borular için şiddet eğrileri (Zirnhelt ve diğ, 2003).

Şekil 3.14'de ise yalıtımlı gerçek bir borunun film üzerindeki cidar kalınlığı ve aşınmış bölgeleri görülmektedir. Sağ tarafta ise kalınlık değişimine bağlı olarak şiddet değişim eğrileri verilmektedir. Bu şiddet eğrileri film üzerindeki renk değişimine veya gri ton değerine göre çizilmiş eğrilerdir. Daha önce de belirtildiği gibi, Şekil 3.14'de verilen şiddet değişim profilinden dönüm noktaları belirlenip cidar kalınlığı tespiti yapılabilir (Zirnhelt ve diğ, 2003).



Şekil 3.14 : Yalıtımlı bir borunun TRT ile çekilmiş film görüntüsü (sol taraf) ve tipik şiddet değişim profili (sağ taraf) (IAEA, 2005).

3.2.4 Teğet radyografi tekniğinin sınırları

Teğet radyografi tekniğinde X-ışınları veya gama ışınları boruya nüfuz ederken Şekil 3.11’de gösterildiği gibi boru cidarının iç ve dış yüzeylerinden teğet olarak geçerler. X-ışınlarının veya gama ışınlarının malzemeden geçerken katettiği maximum kalınlık, borunun iç teğet yüzeyidir. Söz konusu bu maksimum kalınlık değeri “ L_{max} ” olarak adlandırılır ve aşağıda verilen Denklem 3.13 yardımıyla hesaplanır (Zscherpel ve diğ., 2006).

$$L_{max} = 2w \sqrt{\frac{D_a}{w} - 1} \quad (3.13)$$

Burada;

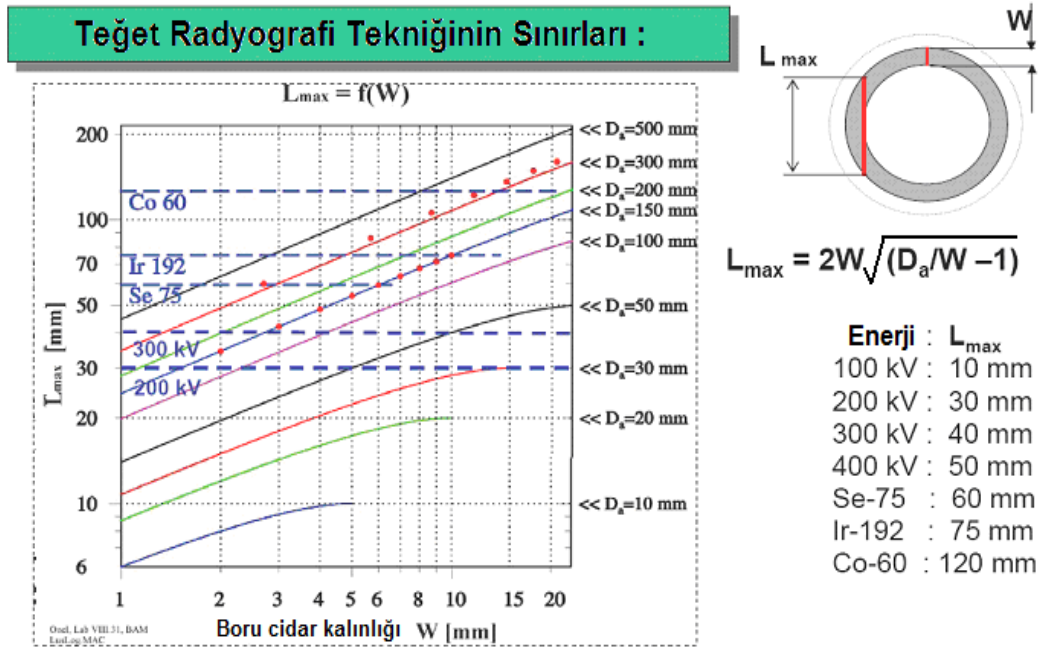
w : cidar kalınlığı,

D_a : $2r$ borunun dış çapıdır.

Teğet radyografi yönteminde boru cidar kalınlığını ölçebilmek için L_{max} değerinin bilinmesi önemlidir. Çünkü boru çekimi için seçilecek kaynağın enerjisi L_{max} ’a göre belirlenmektedir. Teğet yönteminde boruya nüfuz eden radyasyonun katettiği mesafe borunun cidar kalınlığı değil L_{max} kalınlığıdır ve cidar kalınlığından daha büyüktür.

Şekil 3.15 de, dış boru çapına ve kaynağın enerjisine bağlı olarak katedilen maksimum kalınlıklar (L_{max}) verilmiştir. Bu grafikten yararlanarak L_{max} 'a göre uygun enerjili kaynak seçimi yapılmalıdır. Grafikte kesikli çizgiler X veya gama kaynağının üst uygulama sınırını göstermektedir.

Şekil 3.15 de L_{max} 'a bağlı olarak kullanılması gereken kaynak enerjileri de listelenmiştir. Eğer malzeme kalınlığı Şekil 3.15 de gösterilen uygulama sınırının üzerine ulaşırsa kaydedilen görüntü nüfuz edilen bölge hakkında bilgi vermeyecektir. Böyle bir durumda daha yüksek enerjili bir kaynak tercih edilmeli veya çift cidar tekniği uygulanmalıdır (Zscherpel ve diğ., 2006).



Şekil 3.15 : Teğet tekniğinde L_{max} değerleri ve tavsiye edilen sınırlar (Zscherpel ve diğ., 2006).

3.3 Çift Cidar Tekniği Ve Teğet Radyografi Tekniğinin Karşılaştırılması

Çift cidar tekniği ve teğet radyografi tekniği karşılaştırılacak olursa şunlar söylenebilir (IAEA, 2005):

- ✓ Teğetsel radyografi ve yoğunluk ölçüm teknikleri birbirini tamamlayıcı yöntemlerdir. Yalıtılmış bir boru için sadece teğet radyografi tekniği önerilir fakat karmaşık simülasyonlarda çift cidar ölçüm metodu gerekir.

- ✓ Eğer korozyon nedeniyle cidar kalınlığındaki beklenen incelme boru kesitinde düzensiz ise çift cidar tekniği tavsiye edilmez. Çünkü bu yöntem sadece ortalama cidar kalınlığını vermektedir.
- ✓ Teğet radyografi tekniğinde oyuk derinliği ölçümü için düzeneğin oyuğa göre teğet pozisyona getirilmesi çok zaman alır ve çok fazla çekim yapmak gerekir. Bu nedenle çift cidar tekniği, sınırlı çaptaki (≈ 15 cm) küçük borularda oluşan oyukların derinliğinin belirlenmesi için daha uygundur.
- ✓ Çift cidar tekniğinde yüksek bir kontrast elde etmek için düşük enerji kullanımı önerilir. Oyuk derinliğinin yanlış hesaplanmaması için oyuğu (yerel korozyon bölgesini) filme göre doğru yerleştirmek önemlidir. Pozlama sırasında oyuk filmin üstüne gelecek şekilde yatırılmalıdır.
- ✓ Teğet radyografi tekniğinde X-ışınlarının enerjisi seçilirken boru cidarının maksimum nüfuziyet kalınlığı dikkate alınmalıdır. Eğer mümkünse daha iyi tanımlama için X-ışınları yerine Ir-192 radyoizotopu kullanılmalıdır.
- ✓ Çift duvar tekniğinde düşük hızlı filmler tavsiye edilir. Teğet tekniği için, film hızı çok önemli değildir. Bir yoğunlaştırıcı kurşun ekran filmle yakın temas içinde kullanılacaktır. Bir kurşun plaka da film arkasında geri saçılmadan filmi korumak için kullanılır.
- ✓ Cidar kalınlığı veya oyuğun boyutları radyografin mikrodensitometrede taranmasıyla tespit edilebilir. Optik cihazlar veya cetvel gibi diğer araçlar da görüntünün boyutu için kullanılabilir. Çift cidar tekniğinde oyuğun derinliği yoğunluk- kalınlık referans eğrisinden belirlenir.
- ✓ Kullanılan tekniğin doğruluğu ölçüm koşullarına bağlıdır. Olabildiğince yüksek film yoğunluğu kullanmak daha iyi tanımlı bir ölçüm için tavsiye edilir.
- ✓ Sıvı ile dolu operasyonel borularda, boru içindeki birikim ile sıvının yoğunluğu arasında yoğunluk farkı az olduğundan, her iki teknikte de borulardaki birikimin ölçülmesi zor ve sınırlıdır (Zirnhelt ve diğ, 2003).

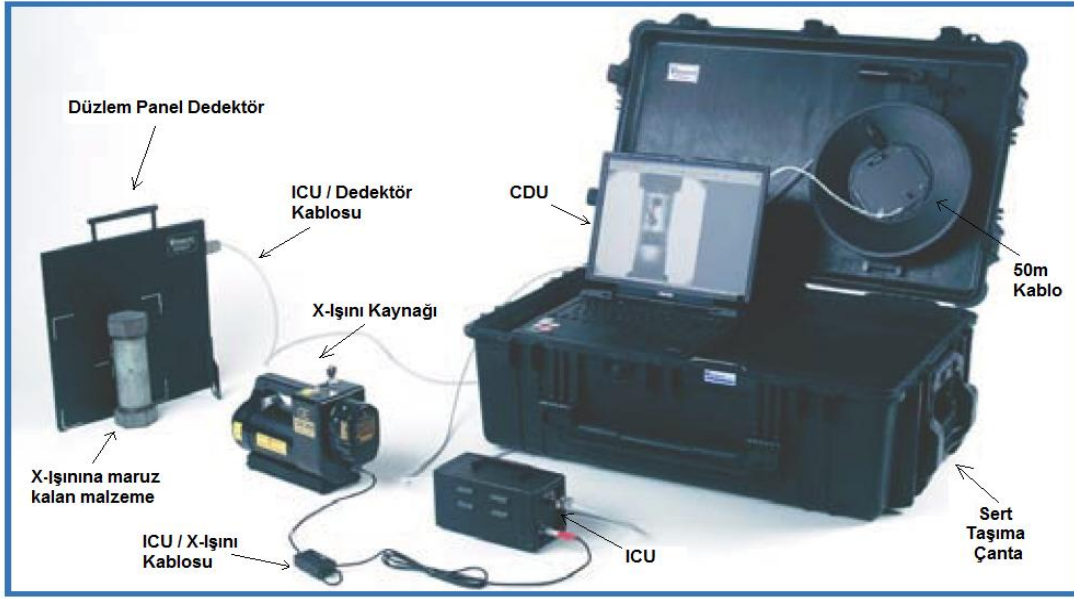
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu yüksek lisans tez çalışmasında amaç, dijital radyografi sistemi kullanılarak çelik boruların cidar kalınlıklarının belirlenmesidir. Çalışmamızda, cidar kalınlığı tayininde kullanılan iki yöntemden biri olan ve ayrıntıları Bölüm 3’de verilen “Teğet Tekniği” kullanılmıştır. Sanayide değişik amaçlarla kullanılan çelik boru numuneleri temin edilerek Bölüm 2 içinde açıklanan çekim parametrelerine uygun olarak radyografik çekimler yapılmıştır. Bu çekimler sonucu elde edilen radyografik görüntülerden boru cidar kalınlıkları tespit edilmiş ve farklı çalışma parametrelerine bağlı olarak, gerçek cidar kalınlığı ile ölçüm sonucu bulunan kalınlık değerleri arasındaki farkdan hareketle hata değerlendirmeleri yapılabilmektedir. Ayrıca, dijital radyografi sistemi ile maksimum tayin edilebilen kalınlık değeri de (L_{max}) bu tez çalışmasında belirlenmiştir.

4.1 Dijital Radyografi Sisteminin Tanıtılması

Bu çalışmada deneyler İTÜ, Enerji Enstitüsü, Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı, Radyografi Laboratuvarında bulunan “foX-Rayzor” dijital radyografi sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1 de görülen “foX-Rayzor” dijital radyografi sistemi, “geniş” uygulama imkanı sağlayan, taşınabilir, düzlem panel dedektörlü bir sistemdir.

Bu sistemler, tahribatsız muayene gerektiren uzay endüstrisi, petro-kimya endüstrisi, elektronik ve güvenlik endüstrisi gibi farklı alanlarda kullanılabilmektedir. “foX-Rayzor” dijital radyografi sistemi, X-ışını kaynağı, Amorf-Silikon (a-Si) düzlem panel dedektör, görüntü kontrol ünitesi (ICU), kontrol ve görüntüleme ünitesi (CDU), bağlantı kabloları ve şarj edilebilir pillerden oluşmaktadır.



Şekil 4.1 : Deneyde kullanılan “foX-Rayzor” tahribatsız muayene sisteminin elemanları ve kurulum şekli.

4.1.1 X-ışını kaynağı

“foX-Rayzor” dijital radyografi sisteminde X-ışınları, Şekil 4.2 de gösterilen XRS-3 X-ışını kaynağı kullanılarak üretilmektedir. Kullanılan X-ışını kaynağı, çok kısa zaman aralığında (bir puls 60 nanosaniye), puls tipi X-ışını üreten bir cihaz olup 270 kVp enerjili X-ışınları üretme kabiliyetindedir. Şekil 4.3’te ise X-ışını kaynağının kontrol modülü görülmektedir.



Şekil 4.2 : Deneyde kullanılan XRS-3 X ışıını kaynağı.



Şekil 4.3 : X-ışını kaynağının kontrol düğmeleri ve işaretçileri.

XRS-3 X-ışını kaynağına ait genel özellikler Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir.

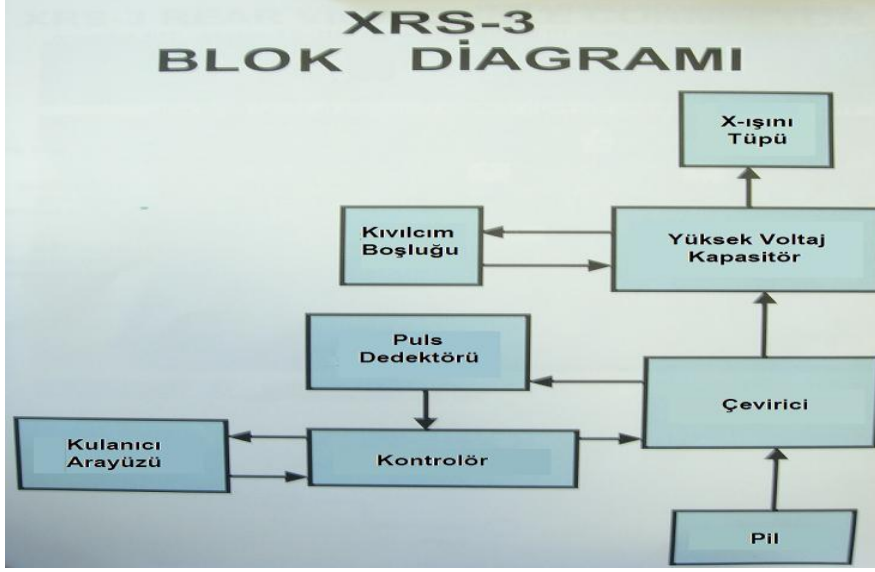
Çizelge 4.1 : Pil üzerindeyken XRS-3 X - ışıını kaynağının fiziksel boyutları.

Uzunluk	40,6 cm
Genişlik	11,5 cm
Yükseklik	10 cm
Ağırlık	5,7 kg

Çizelge 4.2 : Kaynaktan çıkan X- ışıınına ait özellikler.

Her pulstaki X-ışını dozu	2,6mR ‘den 4.0mR ‘e (.026-.024mSv)
Bir pil için puls sayısı	4000
Saniyedeki puls sayısı	15 (nominal)
XRS-3 için beklenen ömür	100.000 puls minimum
X-ışını kaynağının boyutu	3mm
Maksimum foton enerjisi	270 kVp
X ışıını pulsunun genişliği(süresi)	60 nanosaniye

XRS-3 X-ışını kaynağının çalışma mekanizmasına ait blok diagram Şekil 4.4’te verilmiştir.



Şekil 4.4 : X-ışını tüpünün blok diagramı.

4.1.2 Düzlem panel dedektör

“foX-Rayzor” dijital radyografi sisteminde görüntü, Şekil 4.5’de gösterilen Amorf-Silikon Düzlem Panel dedektör ile elde edilmektedir. Bu panelin kalınlığı 13 mm, aktif görüntüleme alanının (panel üzerinde köşeleri ve merkezi beyaz olarak işaretlenmiş alan) ebatları ise yaklaşık 22 cm x 22 cm ($\approx 482\text{cm}^2$) boyutlarındadır. Düzlem panel dedektör ile 14 bit’lik, 3.5 çç/mm çözünürlükte görüntü elde edilmektedir. Dedektöre ait destek ayakları sayesinde istenilen pozisyonda yerleşim yapılabilmektedir.



Şekil 4.5 : Düzlem panel dedektör.

4.1.3 Dedektör kontrol ünitesi

Dedektör Kontrol Ünitesi (ICU) foX-Rayzor sisteminin kalbi durumundadır. ICU, dedektörle CDU arasında bağlantı sağlayan ara birimdir. ICU, CDU'dan gelen komutları alıp çevirerek X-ışını kaynağını ve düzlem panel dedektörü kontrol eder. Düzlem panel dedektörden gelen verileri işlemiden geçirip CDU'ya gönderir. Ayrıca düzlem panel dedektöre güç ICU'dan sağlanır. Şekil 4.6'da dedektör kontrol ünitesinin kablo bağlantı noktaları görülmektedir.



Şekil 4.6 : Dedektör kontrol ünitesi.

4.1.4 Kontrol ve görüntüleme ünitesi

Kontrol ve görüntüleme ünitesi, foX-Rayzor yazılım programıyla çalışan bir dizüstü bilgisayardır. Yazılım programı, düzlem panel dedektörünü kontrol eder, elde edilen görüntüyü ekranda gösterir, çoğaltır, düzenler ve veri olarak kaydeder. Böylece operatör uzaktan görüntü alma ve bunun analizi ile ilgili tüm işlemleri çok kısa bir süre içinde bilgisayardan yapabilmektedir. Şekil 4.7'de kontrol ve görüntüleme ünitesi görülmektedir.



Şekil 4.7 : Kontrol ve görüntüleme ünitesi

4.1.5 Sistem bağlantı kabloları

Sistemi oluşturan elemanlar arasındaki bağlantı:

- ICU/CDU bağlantı kablosu,
- ICU/X-ışını kablosu,
- ICU/Düzlem Panel Dedektör kablosu,
- AC güç kablosu,
- ICU için şarj kablosu

ile sağlanmaktadır.

4.1.6 Şarj edilebilir piller ve dolum aleti

Sistemde şarj edilebilir 2 adet pil bulunmaktadır. X-ışını kaynağına güç bu şarjlı pil tarafından sağlanmaktadır. Şekil 4.8 de şarj edilebilir piller ve dolum aleti görülmektedir. Pile ait özellikler Çizelge 4.3 de verilmiştir.



Şekil 4.8 : Şarjlı pil ve dolum aleti.

Çizelge 4.3 : Pilin elektriksel ve termal özellikleri.

Her pulstaki X-ışını dozu	2,6mR ‘den 4.0mR ‘e (.026-.024mSv)
Bir pil için puls sayısı	4000
Saniyedeki puls sayısı	15 (nominal)
XRS-3 için beklenen ömür	100.000 puls minimum
X-ışını kaynağının boyutu	3mm
Maksimum foton enerjisi	270 kVp
X ışını pulsunun genişliği(süresi)	60 nanosaniye

4.2 Deneyde Kullanılan Boru Numuneleri

Deneylerde 9 farklı boru numunesi kullanılmıştır. Söz konusu boru numuneleri farklı çap ve cidar kalınlıklarında olup BORUSAN A.Ş'den temin edilmiştir. Boru numunelerinin her biri 20 cm uzunluğunda dikişli borulardır ve üretim standartları TS EN 10217-2, P 235 GH (ST 37,8) ve daha üst kalitede malzemelerdir. Bu tür borular özellikle sanayide, kazan, buhar ve eşanjör borularında kullanılmaktadır. Boru numuneleri, kullanılan dijital radyografi sisteminde üretilen X-ışınlarının enerjisi ve boruların L_{max} değerleri göz önünde tutularak, uygun çap ve cidar kalınlığında seçilmiştir. Bölüm 3'de enerjiye bağlı L_{max} grafiği ve L_{max} belirlenmesinde kullanılan denklem verilmiştir. Deneyde kullanılan boru numunelerinin dış çapları, cidar kalınlıkları ve L_{max} değerleri Çizelge 4.4 te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 : Deneyde kullanılan boru numunelerine ait özellikler.

Boru Numune No	Dış Çap (mm)	Cidar Kalınlığı (mm)	L_{max} değerleri(mm)
1	51	2,9	23,62
2		3,2	24,74
3		3,6	26,13
4	57	2,9	25,05
5		3,2	26,24
6		3,6	27,73
7	60.3	2,9	25,80
8		3,2	27,03
9		3,6	28,57

Şekil 4.9 da deneyde kullanılan boru numuneleri görülmektedir. Böylece deneylerde 3 farklı çapta ve herbir çap için 3 farklı cidar kalınlığında boru numunesi ile çalışılmıştır.



Şekil 4.9 : Boru numuneleri.

4.3 Deney Düzeneği

Deney düzeneği, Radyografi Laboratuvarı ışınlama odasında, boru çekimleri için uygun geometri ve kaynak-dedektör mesafesine (KDM) göre Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de gösterildiği gibi hazırlanmıştır. Çekimler, Bölüm 3.2’de anlatılan “Teğet Tekniği” ne uygun olarak yapılmıştır.

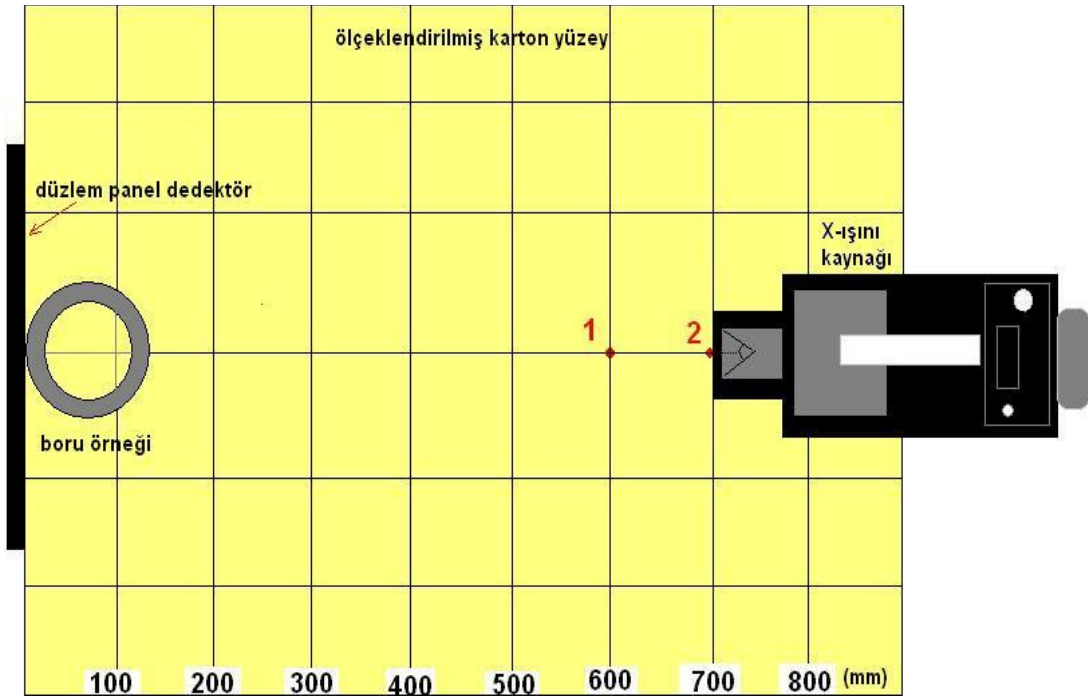


Şekil 4.10 : Çekim düzeneğinin önden görünüşü.



Şekil 4.11 : Çekim düzeneğinin yandan görünüşü.

Düzgün bir geometri ve KDM için Şekil 4.12’de şematik olarak gösterilen ölçeklendirilmiş bir karton kullanılmıştır. Her çekimde, boru numunesi düzlem panel dedektör önüne dik bir pozisyonunda ve X-ışını cihazını ortalayacak biçimde yerleştirilmiştir.



Şekil 4.12 : Ölçeklendirilmiş karton ve çekim düzeneğinin şematik gösterimi.

4.4 Deneyin Yapılışı

Boru numunelerinin radyografi çekimi, cidar kalınlıkları tayin edilmek üzere, Bölüm 4.3 te anlatılan deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. CDU kullanılarak çekimler, Radyografi Laboratuvarının kumanda odasında, nükleer güvenlik açısından yeteri uzak bir mesafeden kontrollü bir şekilde tüm numuneler için yapılmış ve dijital radyografik görüntüler elde edilmiştir. Elde edilen bu görüntüler CDU'ya kaydedilmiştir. Çekimler farklı çalışma parametrelerine göre tekrarlanmıştır.

4.4.1 Çalışma parametreleri

Dijital radyografi sisteminde çalışma parametreleri kaynak-dedektör mesafesi (KDM) ve X-ışını kaynağının puls değerleridir.

4.4.1.1 Kaynak dedektör mesafesi (KDM)

Kaynak-dedektör mesafesine ve önemine Bölüm 2'de geometri faktörü anlatılırken (kaynak-film mesafesi olarak) değinilmişti. Kaynak-dedektör mesafesi, görüntü kalitesi ve yarı gölge için önemli bir parametredir. Düzgün bir geometri ve kaynak-dedektör mesafesi için, Şekil 4.12'de görülen, 100 mm aralıklarla ölçeklendirilmiş bir karton malzeme kullanıldığı belirtilmiştir.

Deneylerde iki farklı kaynak-dedektör mesafesi belirlenmiş ve çekimler bu mesafelerden yapılmıştır. Çalışılacak kaynak-dedektör mesafeleri belirlenirken, söz konusu mesafenin literatürde önerilen, boru çapının 10 katı veya üzerinde olması hususuna dikkat edilmiştir (Harara, 2005). Bu mesafeler 1. Pozisyon için 600 mm, 2. pozisyon için 700 mm olarak alınmış ve iki farklı mesafeden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

4.4.1.2 Kaynak puls değerleri

Deneyde kullanılan X-ışını kaynağı, puls tipi X-ışını üreten bir cihazdır ve 270 kVp (kilovolt peak) enerjili X-ışınları üretebilmektedir. Çizelge 4.2 de kaynaktan çıkan X-ışınına ait özellikler verilmiştir. Buna göre bir puls 60 nanosaniyedir. Çalışmamızda, kullanılan boru numunelerinin L_{max} değerleri için uygun olduğu ön denemelerle belirlenen 80 ve 90 puls değerleri ile çekimler yapılmıştır. Sistemin son puls değeri 99 puls'tur. Bu değerlere ek olarak kalın malzemeler için *pnt* (penetrasyon) modu bulunmaktadır. Dijital radyografi sistemimiz için cidar kalınlığı

ölçümüne yönelik sınır değerleri belirlerken 99 puls, *pnt* modu ile birlikte kullanılmıştır.

4.5 Yarı Gölgenin Hesaplanması

Yarı gölge (U_g) konusu Bölüm 3.2.1’de anlatılmış ve hangi parametrelere bağlı olarak değiştiği açıklanmıştı. Buna göre iki farklı kaynak-dedektör mesafesi (600 mm ve 700 mm) ve boru numunelerinin dış çaplarına bağlı olarak yarı gölgeler (U_g) hesaplanmıştır. Tek radyasyon kaynağı kullanıldığı için kaynak boyutu (K) sabit ve 3 mm’dir. Çizelge 4.5’te bu parametrelere göre hesaplanan U_g değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Yarı gölge değerleri.

Boru Numune No	Dış Çap (mm)	U_g (KDM =600 mm)	U_g (KDM =700 mm)
1,2,3	51	0,133159269	0,113417346
4,5,6	57	0,149606299	0,12732688
7,8,9	60,3	0,158725981	0,135030231

5. DENEY SONUÇLARI

Bölüm 4’de ayrıntılı olarak tanıtılan "foX-Rayzor" dijital radyografi sistemi kullanılarak, boru numunelerinin radyografik görüntüleri elde edilmiştir. Elde edilen dijital görüntü üzerinde cidar kalınlığı farklı iki yol kullanılarak tespit edilmiştir. İlk olarak boru cidarı, dijital görüntü üzerinden doğrudan kalınlık değeri ölçülerek, ikinci olarak da dijital görüntünün piksel şiddeti değişim profilinden faydalanılarak kalınlık tespiti yapılmıştır. Doğrudan kalınlık okumak ve aynı zamanda piksel şiddeti değişim profilini elde etmek için Görüntü Araç çubuğunda yer alan Çizgi Profil (line profil) ikonu kullanılarak borunun dışından itibaren boru üzerinde yatay bir çizgi elde edilmiştir. Bunun sonucunda ekranda piksel şiddeti değişim profilini gösteren bir grafik oluşmuştur. Piksel şiddeti değişim profili eğrisinin başlangıç ve birinci dönüm noktası arasındaki mesafe cidar kalınlığına karşılık gelmektedir. Buna bağlı olarak eğrinin başlangıç noktası ile dönüm noktası birleştirildiğinde, boru görüntüsü üzerinden de takip edilerek cidar kalınlığı okunmuştur. Cidar kalınlığının sınırlarını belirginleştirmek amacıyla araç çubuğunda yer alan “Keskinleştirme” (sharpen) ikonu da kullanılmıştır.

5.1 Farklı Çalışma Parametreleri İçin Elde Edilen Deney Sonuçları

Bölüm 4.4 de ayrıntılı olarak anlatılan çalışma parametreleri, Çizelge 5.1’de bir arada verilmektedir.

Çizelge 5.1 : Deneyin çalışma parametreleri.

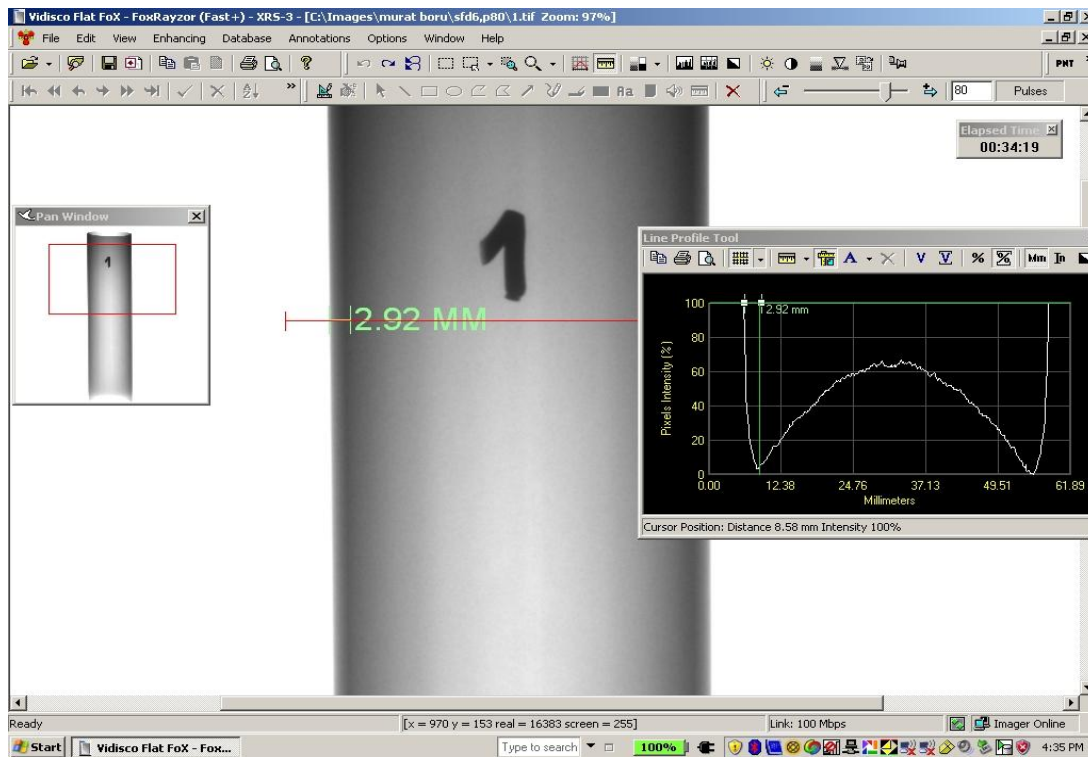
Puls değeri	KDM (mm)
80	600
	700
90	600
	700

Böylelikle deneyler 4 farklı çalışma koşulunda gerçekleştirilmiş ve deney sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmiştir.

5.1.1 80 puls ve 600 mm KDM için elde edilen deney sonuçları

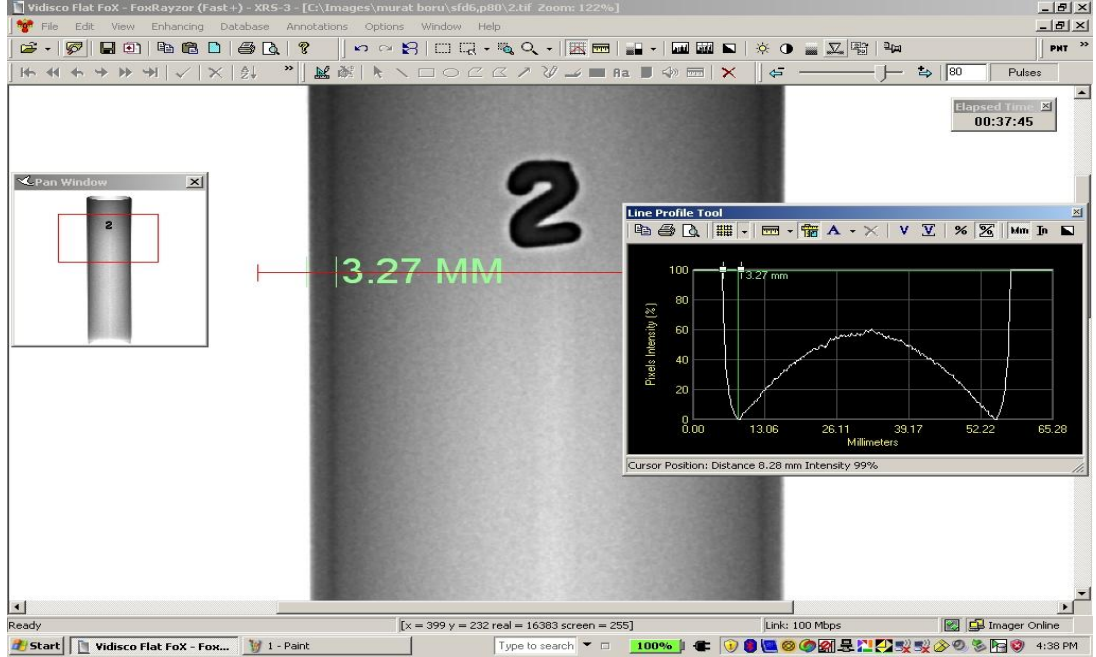
80 puls kullanılarak KDM 600 mm olacak şekilde Bölüm 4.2 de tanıtılan 9 farklı boru numunesi için ayrı ayrı çekimler yapılmıştır. Bu çekimlere ait dijital görüntüler, tipik piksel şiddeti değişim profilleri ve ölçüm ile bulunan cidar kalınlıklarının gerçek cidar kalınlıkları ile karşılaştırılmasına ilişkin sonuçlar aşağıda verilmiştir.

51 mm çaplı 1 nolu boru numunesinin dijital görüntüsü ve tipik piksel şiddeti değişim profili Şekil 5.1 de verilmektedir.



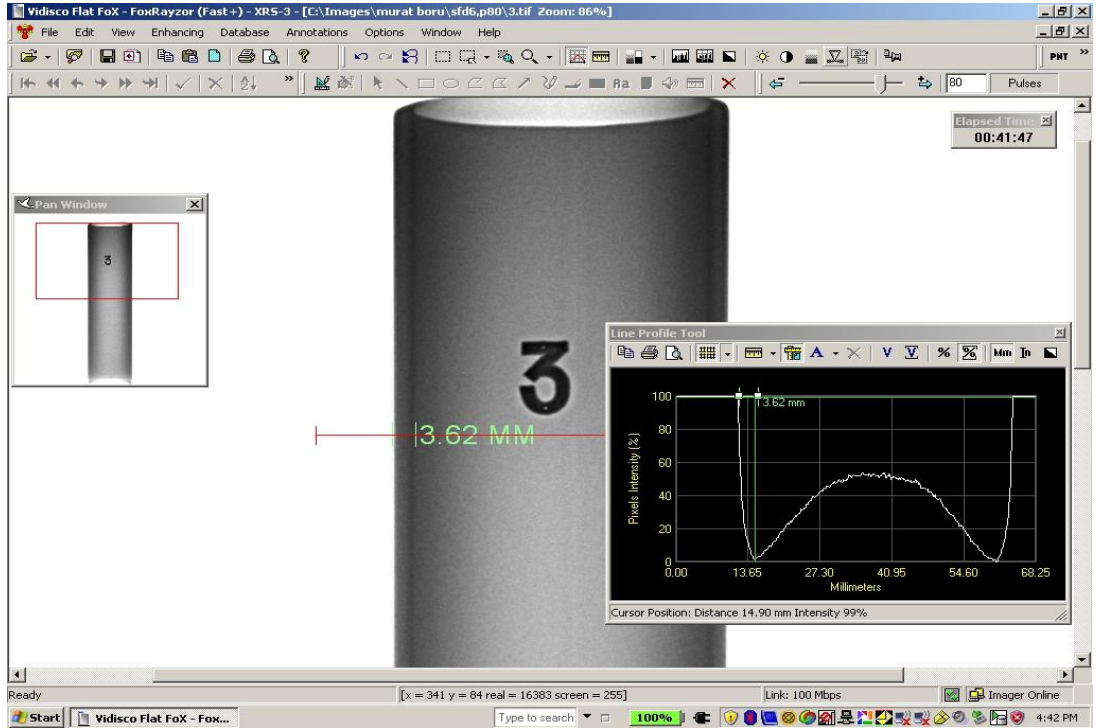
Şekil 5.1 : 1 nolu numunenin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili.

51 mm çaplı 2 nolu boru numunesinin dijital görüntüsü ve tipik piksel şiddeti değişim profili Şekil 5.2 de görülmektedir.



Şekil 5.2 : 2 nolu numunenin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili.

51 mm çaplı 3 nolu boru numunesinin dijital görüntüsü ve tipik piksel şiddeti değişim profili Şekil 5.3 de verilmektedir.



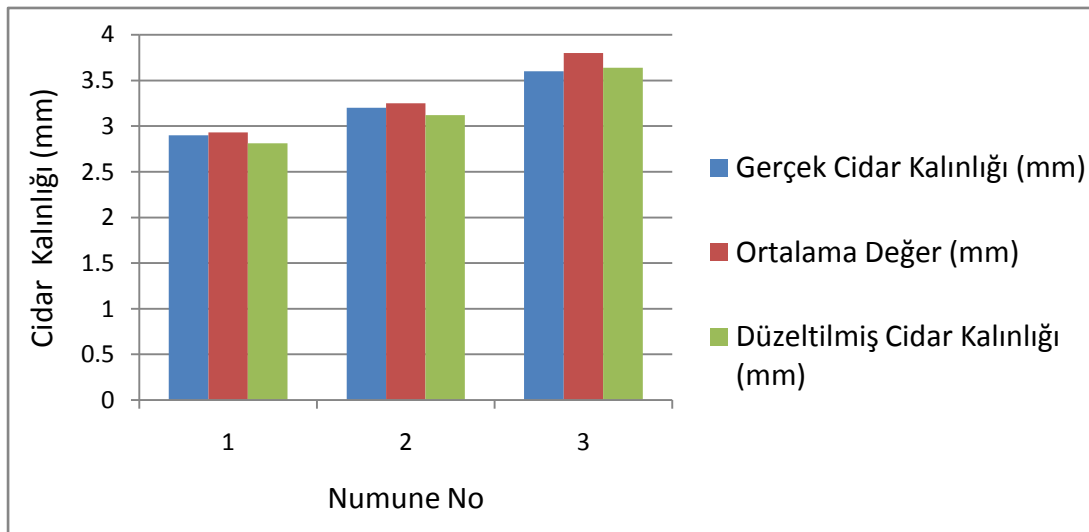
Şekil 5.3 : 3 nolu numunenin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili.

Herbir boru numunesine ilişkin elde edilen dijital görüntü üzerinde aynı bölgeden 3 farklı kalınlık değeri okunup aritmetik ortalaması alınmış, Excel 2007 programında ‘STDSAPMA’ formülü yardımıyla da standart sapmalar hesaplanmıştır. Dijital görüntü üzerinde okunan cidar kalınlıklarının ortalaması kullanılarak Denklem 3.4 yardımıyla düzeltilmiş cidar kalınlığı hesaplanmış ve bu değerler Çizelge 5.2’de birarada verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Dış çapı 51 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları.

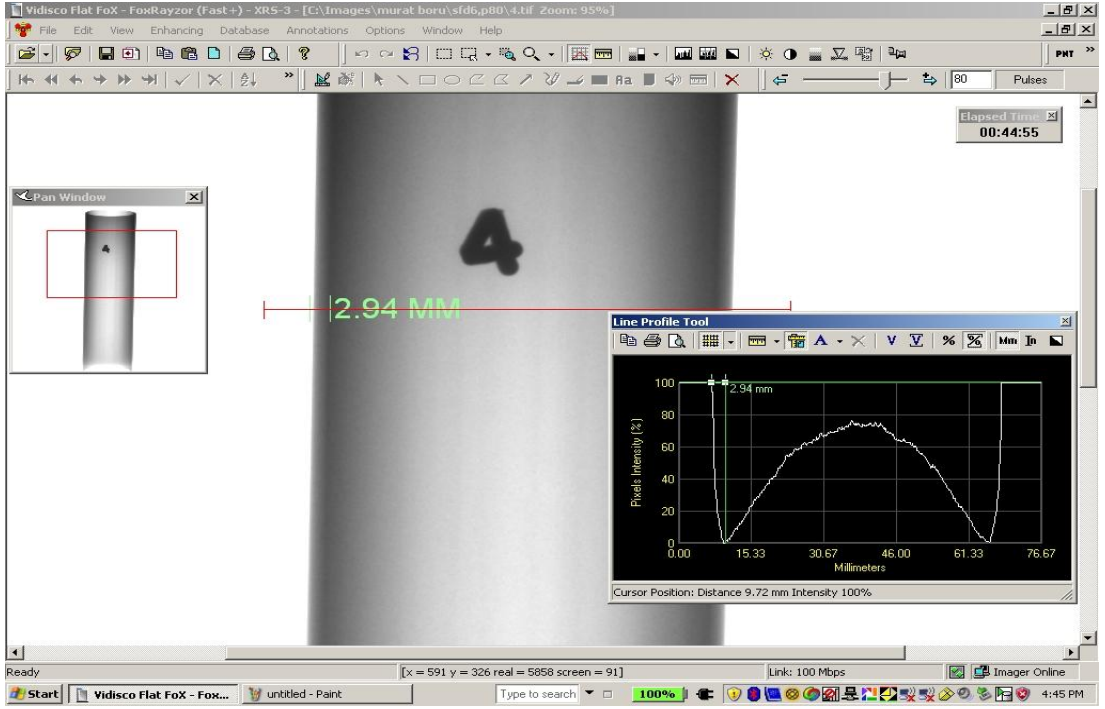
Numune No	Cidar Kalınlığı (mm)	Dijital görüntü üzerinde okunan cidar kalınlıkları (mm)				
		1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	Ortalama Değer (w')	Düzeltilmiş Cidar Kalınlığı (w)
1	2,9	2,92	2,97	2,89	$2,93 \pm 0,04$	2,81
2	3,2	3,27	3,34	3,15	$3,25 \pm 0,09$	3,12
3	3,6	3,62	3,89	3,89	$3,80 \pm 0,15$	3,64

Dış çapı 51 mm olan 1, 2, 3 nolu boru numunelerine ilişkin dijital radyografi sistemi ile tayin edilen boru cidar kalınlıklarının gerçek değerler ile karşılaştırılması Şekil 5.4’ te görülmektedir.



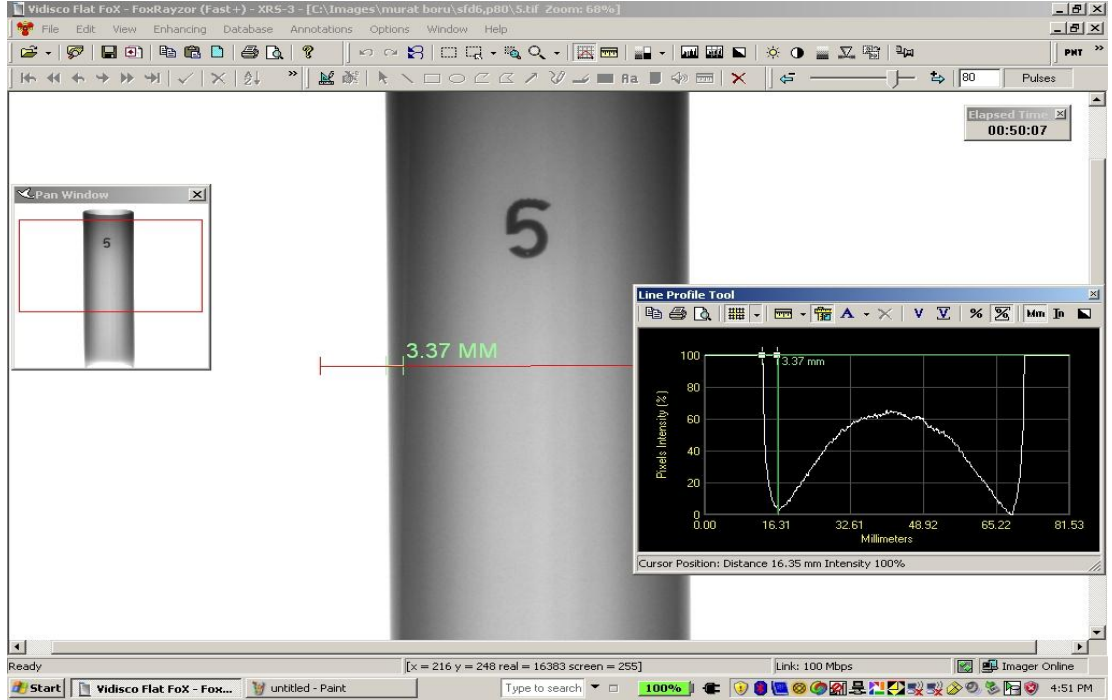
Şekil 5.4 : Dış çapı 51 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.

57 mm çaplı 4 nolu boru numunesinin dijital görüntüsü ve tipik piksel şiddeti değişim profili Şekil 5.5 de verilmektedir.



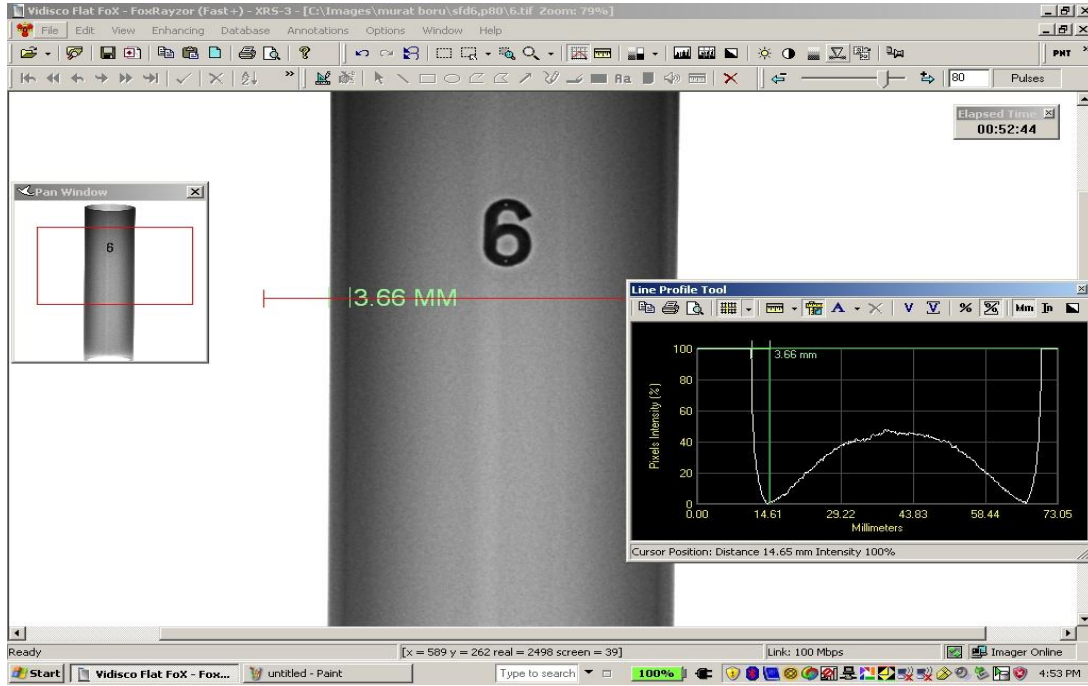
Şekil 5.5 : 4 nolu numunenin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili.

Şekil 5.6 da, 57 mm çaplı 5 nolu boru numunesinin dijital görüntüsü ve tipik piksel şiddeti değişim profili verilmektedir.



Şekil 5.6 : 5 nolu numunenin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili.

57 mm çaplı 6 nolu boru numunesinin dijital görüntüsü ve tipik piksel şiddeti değişim profili Şekil 5.7 de verilmektedir.



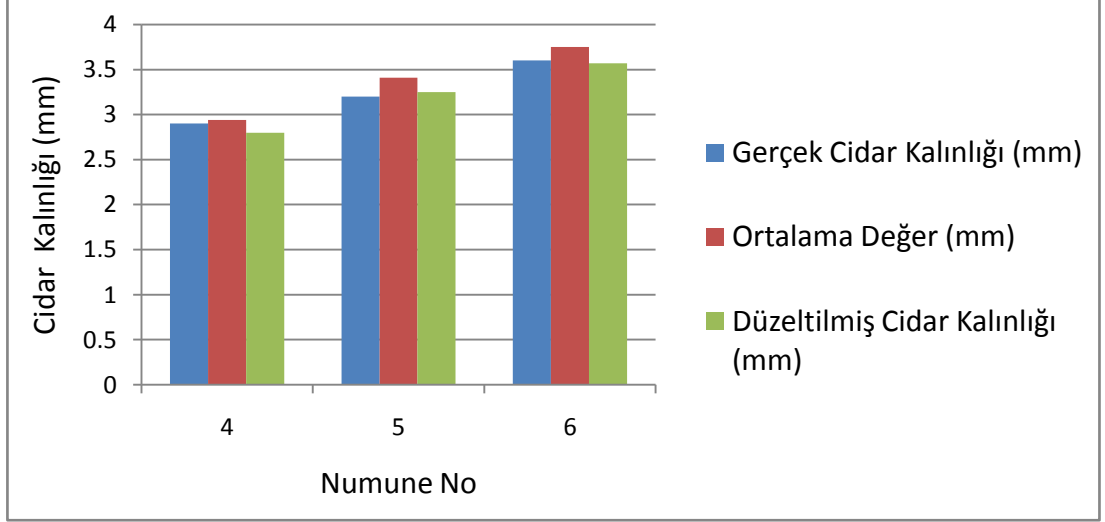
Şekil 5.7 : 6 nolu numunenin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili.

4, 5, 6 nolu numunelerin dijital görüntüler üzerinde okunan cidar kalınlıklarının ortalaması alınarak, Denklem 3.4 yardımıyla düzeltilmiş cidar kalınlıkları hesaplanmış ve ortalama değerle birlikte standart sapmalar (Excel 2007 programında ‘STDSAPMA’ formülüyle hesaplanmıştır) Çizelge 5.3’de birarada verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Dış çapı 57 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları

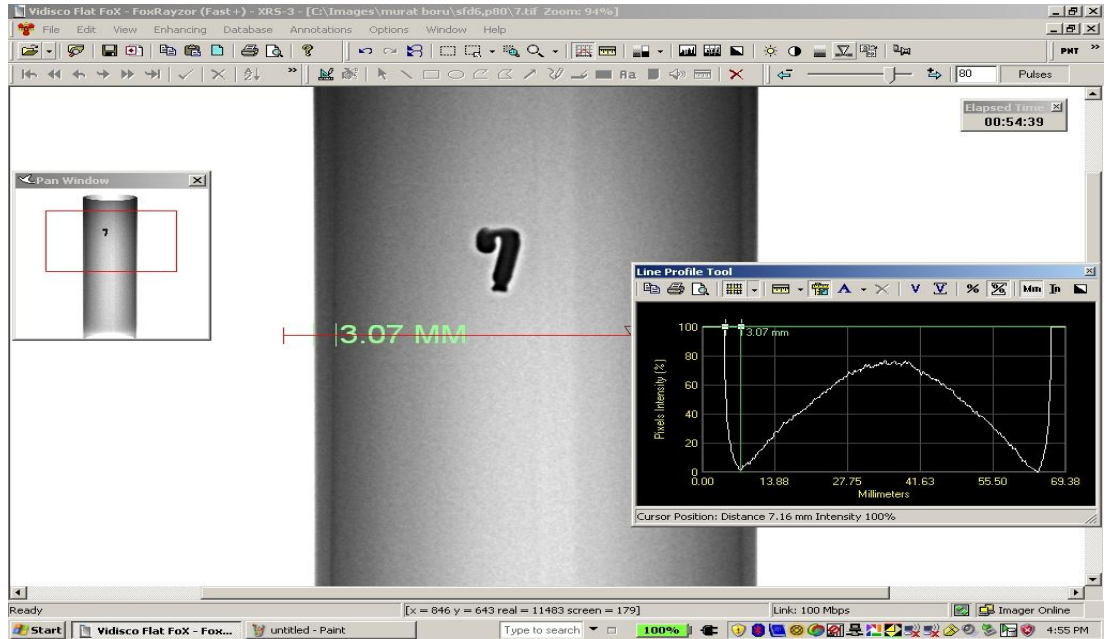
Numune No	Cidar Kalınlığı (mm)	Dijital görüntü üzerinde okunan cidar kalınlıkları (mm)				
		1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	Ortalama Değer (w')	Düzeltilmiş Cidar Kalınlığı (w)
4	2,9	2,94	3,04	2,85	2,94 ± 0,09	2,8
5	3,2	3,37	3,41	3,45	3,41 ± 0,04	3,25
6	3,6	3,66	3,9	3,69	3,75 ± 0,13	3,57

Dış çapı 57 mm olan 4, 5, 6 nolu boru numunelerine ilişkin dijital radyografi sistemi ile tayin edilen boru cidar kalınlıklarının gerçek değerler ile karşılaştırılması Şekil 5.8’ de görülmektedir.



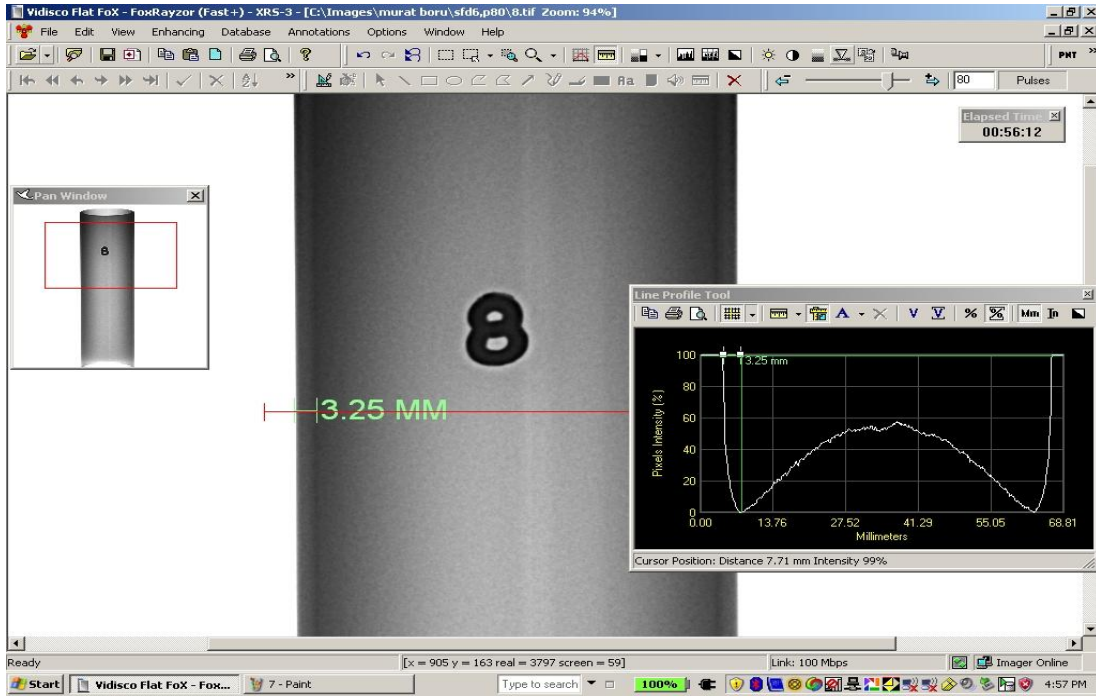
Şekil 5.8 : Dış çapı 57 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.

60,3 mm çaplı 7 nolu boru numunesinin dijital görüntüsü ve tipik piksel şiddeti değişim profili Şekil 5.9 da verilmektedir.



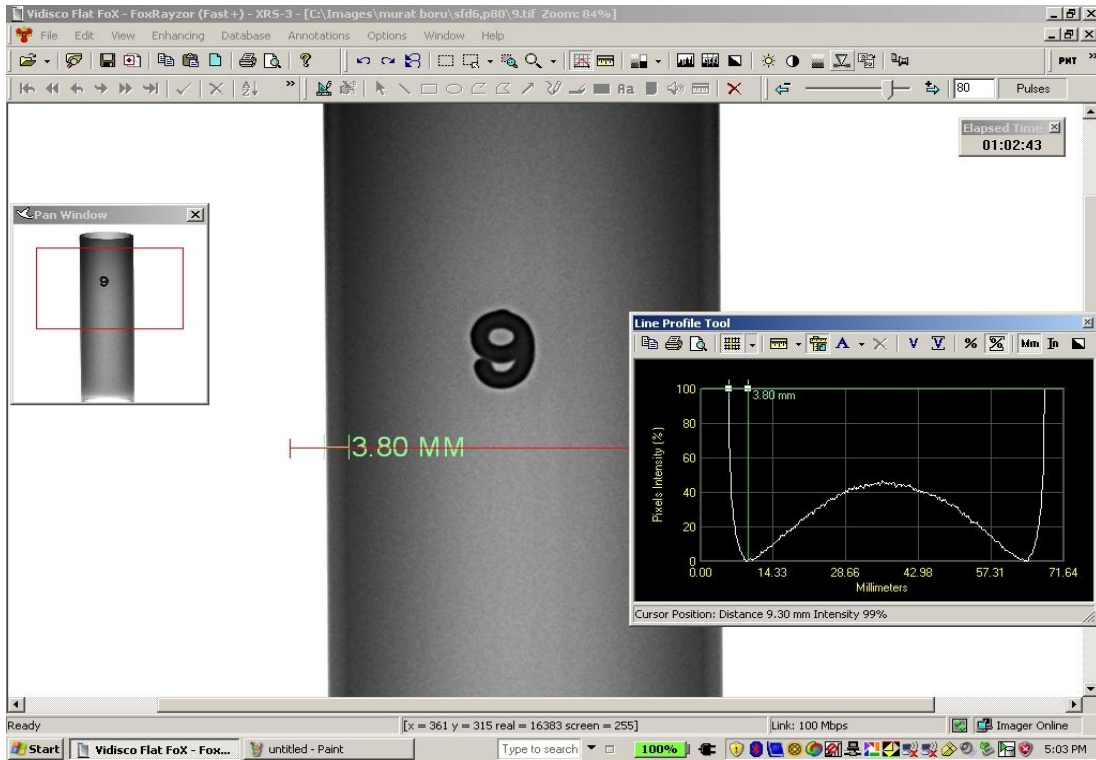
Şekil 5.9 : 7 nolu boru numunesinin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili.

60,3 mm çaplı 8 nolu boru numunesinin dijital görüntüsü ve tipik piksel şiddeti değişim profili Şekil 5.10 da verilmektedir.



Şekil 5.10 : 8 nolu numunenin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili.

60,3 mm çaplı 9 nolu boru numunesinin dijital görüntüsü ve tipik piksel şiddeti değişim profili Şekil 5.11 de verilmektedir.



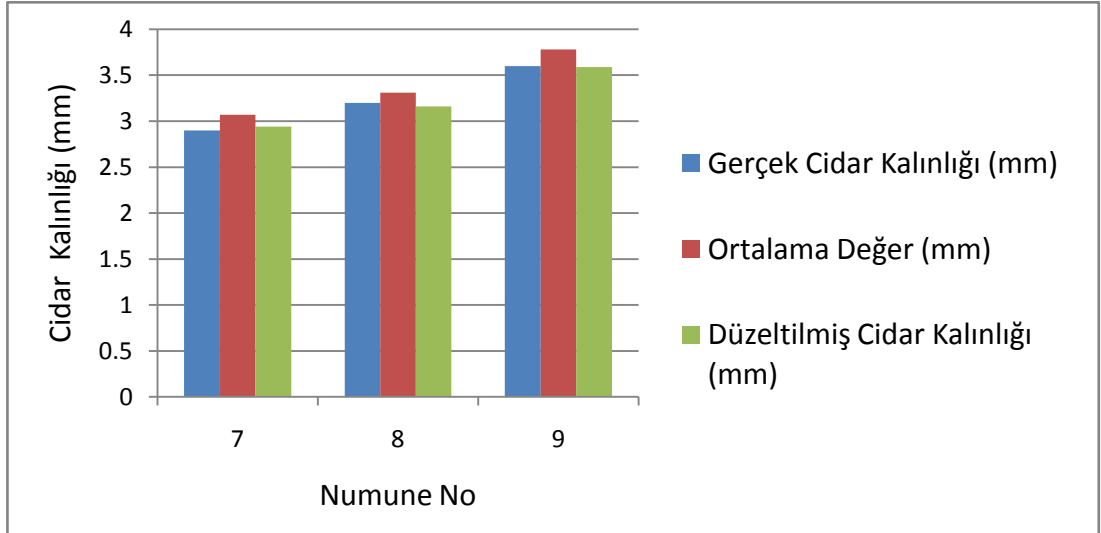
Şekil 5.11 : 9 nolu numunenin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili.

7, 8, 9 nolu numunelerin dijital görüntüler üzerinde okunan cidar kalınlıklarının ortalaması alınarak, Denklem 3.4 yardımıyla düzeltilmiş cidar kalınlıkları hesaplanmış ve ortalama değerle birlikte standart sapmalar (Excel 2007 programında ‘STDSAPMA’ formülüyle hesaplanmıştır) Çizelge 5.4’te birarada verilmiştir.

Çizelge 5.4 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları.

Numune No	Cidar Kalınlığı (mm)	Dijital görüntü üzerinde okunan cidar kalınlıkları (mm)				
		1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	Ortalama Değer (w')	Düzeltilmiş Cidar Kalınlığı (w)
7	2,9	3,07	3,08	3,05	$3,07 \pm 0,01$	2,94
8	3,2	3,25	3,36	3,32	$3,31 \pm 0,05$	3,16
9	3,6	3,8	3,71	3,82	$3,78 \pm 0,05$	3,59

Dış çapı 60,3 mm olan 7, 8, 9 nolu boru numunelerine ilişkin dijital radyografi sistemi ile tayin edilen boru cidar kalınlıklarının gerçek değerler ile karşılaştırılması Şekil 5.12’ de görülmektedir.

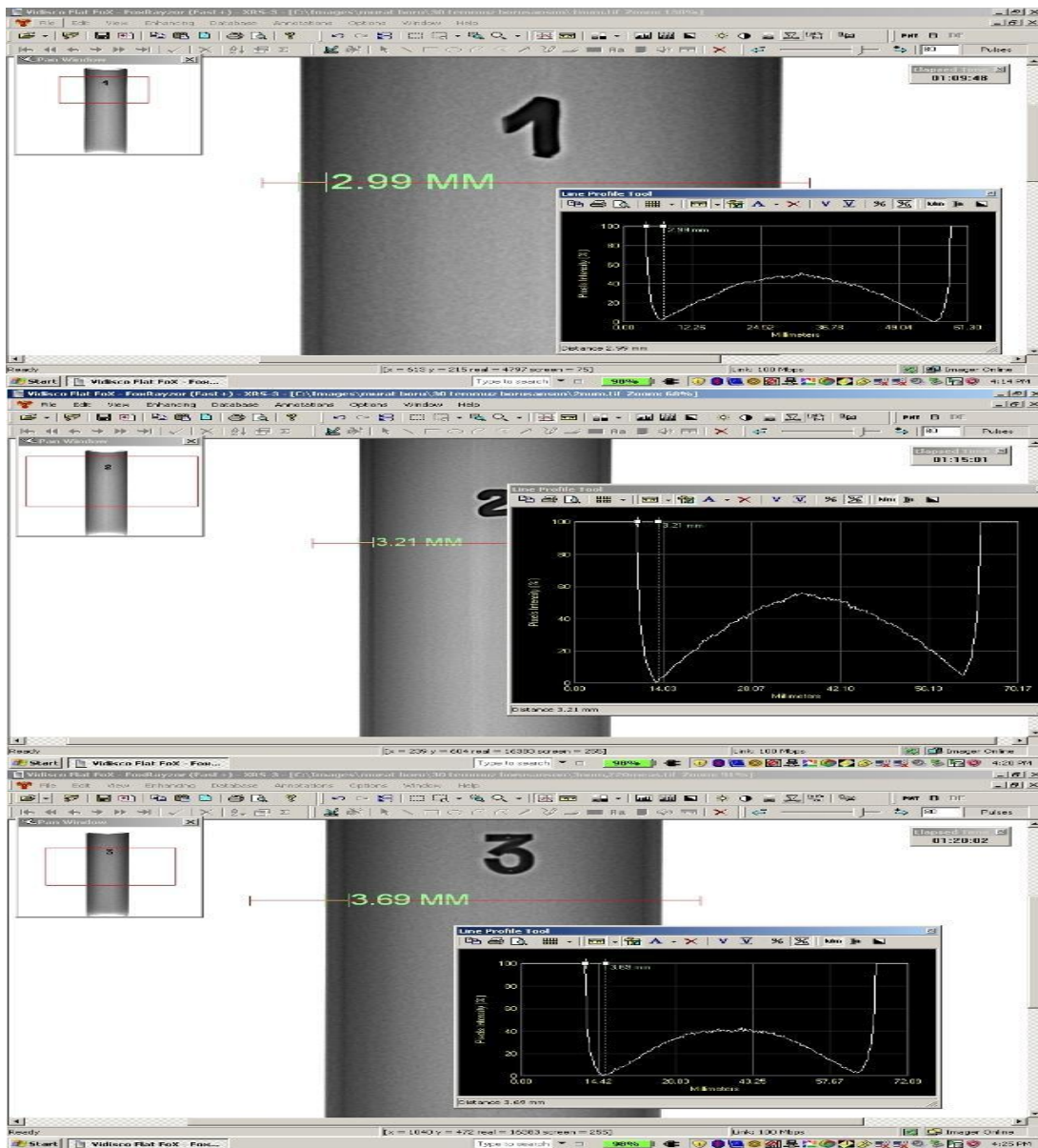


Şekil 5.12 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.

5.1.2 80 puls ve 700 mm KDM için elde edilen deney sonuçları

80 puls kullanılarak KDM 700 mm olacak şekilde Bölüm 4.2 de tanıtılan 9 farklı boru numunesi için ayrı ayrı çekimler yapılmıştır. Bu çekimlere ait dijital görüntüler, tipik piksel şiddeti değişim profilleri ve ölçüm ile bulunan cidar kalınlıklarının gerçek cidar kalınlıkları ile karşılaştırılmasına ilişkin sonuçlar aşağıda verilmiştir.

51 mm çaplı 1, 2, 3 nolu boru numunelerinin dijital görüntüleri ve tipik piksel şiddeti değişim profili Şekil 5.13’de verilmektedir.



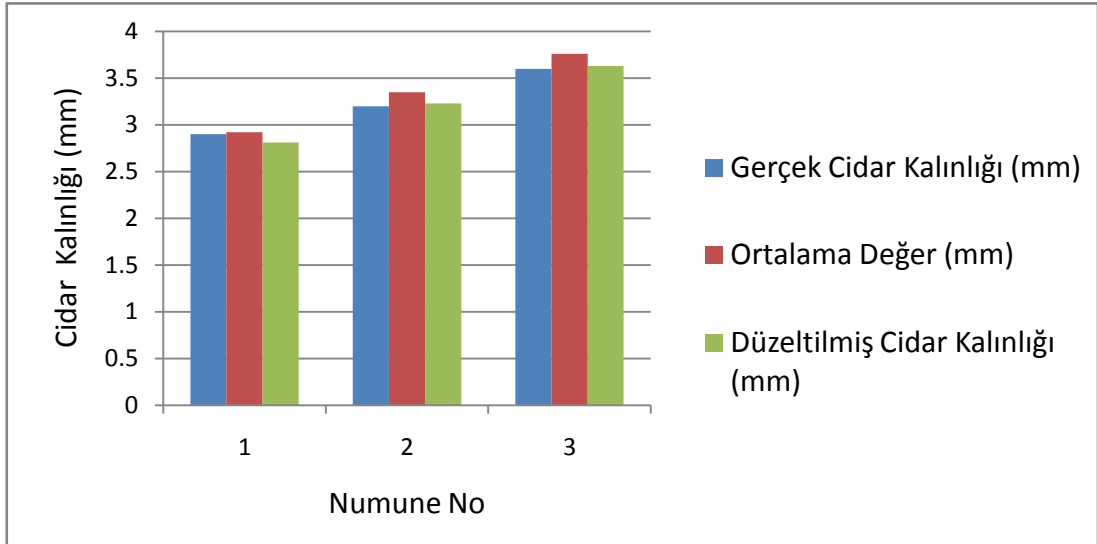
Şekil 5.13 : 1, 2, 3 nolu boru numunelerinin dijital görüntüleri ve piksel şiddeti değişim profilleri.

1, 2, 3 nolu numunelerin dijital görüntüler üzerinde okunan cidar kalınlıklarının ortalaması alınarak, Denklem 3.4 yardımıyla düzeltilmiş cidar kalınlıkları hesaplanmış ve ortalama değerle birlikte standart sapmalar (Excel 2007 programında ‘STDSAPMA’ formülüyle hesaplanmıştır) Çizelge 5.5’de birarada verilmiştir.

Çizelge 5.5 : Dış çapı 51 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları.

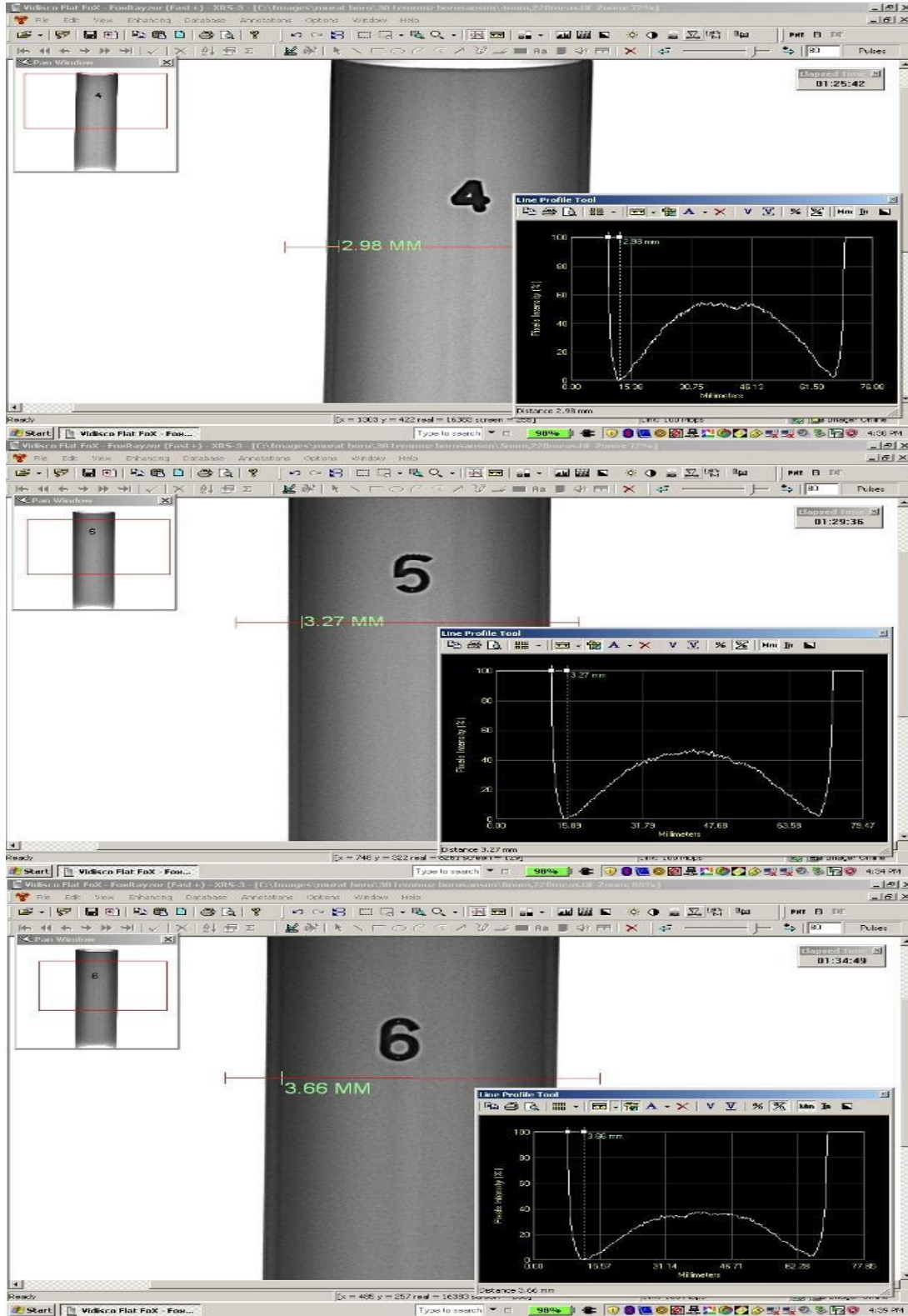
Numune No	Cidar Kalınlığı (mm)	Dijital görüntü üzerinde okunan cidar kalınlıkları (mm)				
		1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	Ortalama Değer (w')	Düzeltilmiş Cidar Kalınlığı (w)
1	2,9	2,99	2,79	2,97	$2,92 \pm 0,11$	2,81
2	3,2	3,21	3,4	3,45	$3,35 \pm 0,12$	3,23
3	3,6	3,69	3,75	3,85	$3,76 \pm 0,08$	3,63

Dış çapı 51 mm olan 1, 2, 3 nolu boru numunelerine ilişkin dijital radyografi sistemi ile tayin edilen boru cidar kalınlıklarının gerçek değerler ile karşılaştırılması Şekil 5.14’ de görülmektedir.



Şekil 5.14 : Dış çapı 51 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.

57 mm çaplı 4, 5, 6 nolu numunelerin dijital görüntüleri ve tipik piksel şiddeti değişim profili Şekil 5.15’de verilmektedir.



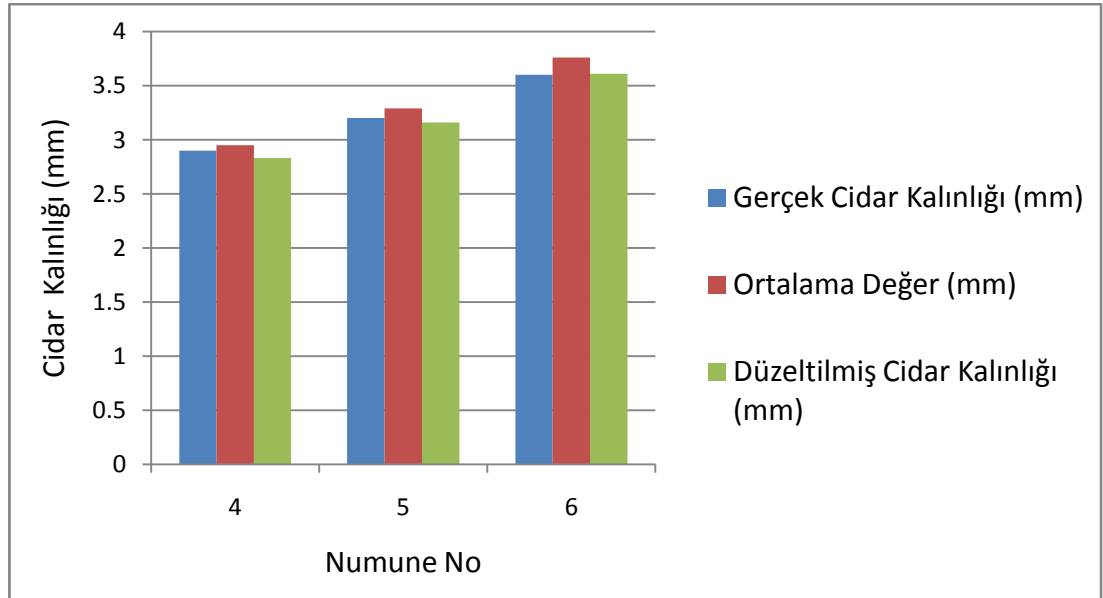
Şekil 5.15 : 4, 5, 6 nolu boru numunelerinin dijital görüntüleri ve piksel şiddeti değişim profili.

4, 5, 6 nolu numunelerin dijital görüntüler üzerinde okunan cidar kalınlıklarının ortalaması alınarak, Denklem 3.4 yardımıyla düzeltilmiş cidar kalınlıkları hesaplanmış ve ortalama değerle birlikte standart sapmalar (Excel 2007 programında ‘STDSAPMA’ formülüyle hesaplanmıştır) Çizelge 5.6’da birarada verilmiştir.

Çizelge 5.6 : Dış çapı 57 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları.

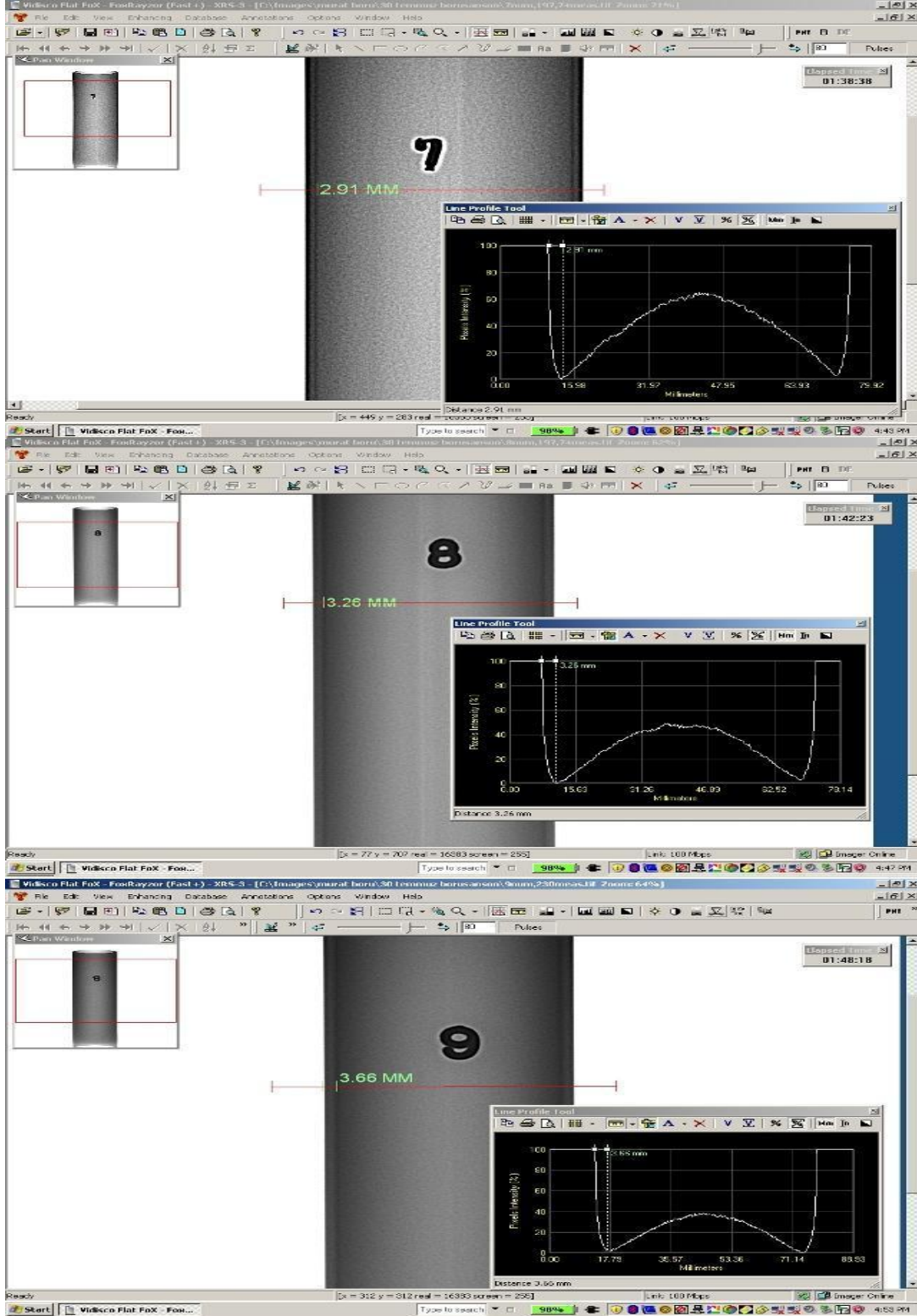
Numune No	Cidar Kalınlığı (mm)	Dijital görüntü üzerinde okunan cidar kalınlıkları (mm)				
		1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	Ortalama Değer (w')	Düzeltilmiş Cidar Kalınlığı (w)
4	2,9	2,98	3,01	2,87	2,95 ± 0,07	2,83
5	3,2	3,27	3,22	3,38	3,29 ± 0,08	3,16
6	3,6	3,66	3,79	3,83	3,76 ± 0,08	3,61

Dış çapı 57 mm olan 4, 5, 6 nolu boru numunelerine ilişkin dijital radyografi sistemi ile tayin edilen boru cidar kalınlıklarının gerçek değerler ile karşılaştırılması Şekil 5.16’ da görülmektedir.



Şekil 5.16 : Dış çapı 57 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.

60,3 mm çaplı 7, 8, 9 nolu numunelerin dijital görüntüleri ve tipik piksel şiddeti değişim profili Şekil 5.17’de verilmektedir.



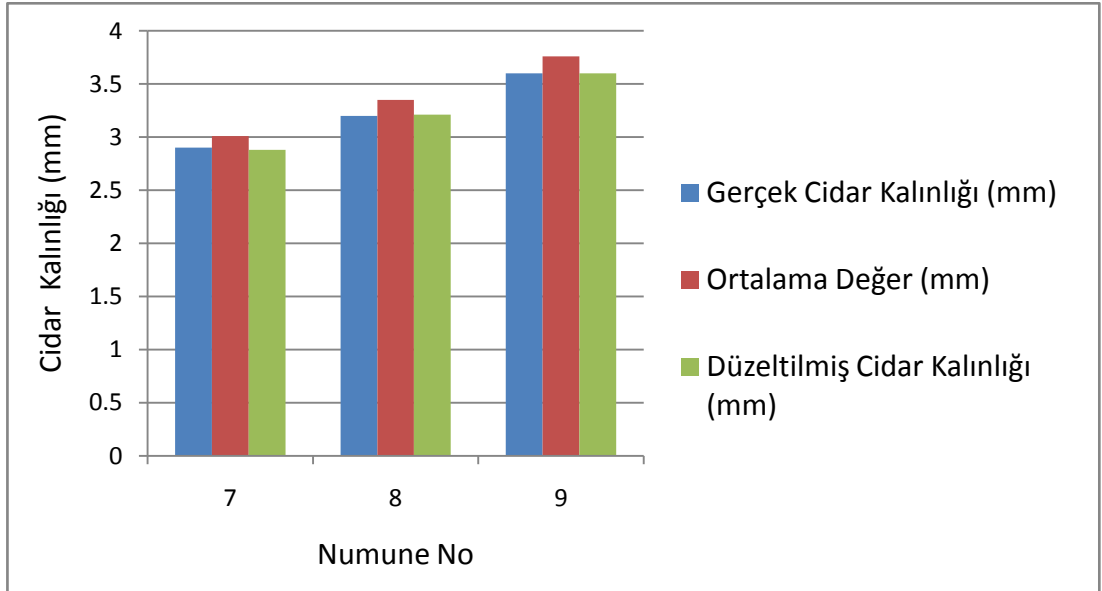
Şekil 5.17 : 7, 8, 9 nolu boru numunelerinin dijital görüntüleri ve piksel şiddeti değişim profili.

7, 8, 9 nolu numunelerin dijital görüntüler üzerinde okunan cidar kalınlıklarının ortalaması alınarak, Denklem 3.4 yardımıyla düzeltilmiş cidar kalınlıkları hesaplanmış ve ortalama değerle birlikte standart sapmalar (Excel 2007 programında ‘STDSAPMA’ formülüyle hesaplanmıştır) Çizelge 5.7’de birarada verilmiştir.

Çizelge 5.7 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları.

Numune No	Cidar Kalınlığı (mm)	Dijital görüntü üzerinde okunan cidar kalınlıkları (mm)				
		1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	Ortalama Değer (w')	Düzeltilmiş Cidar Kalınlığı (w)
7	2,9	2,91	3,07	3,04	3,01 ± 0,08	2,88
8	3,2	3,26	3,39	3,4	3,35 ± 0,07	3,21
9	3,6	3,66	3,83	3,79	3,76 ± 0,08	3,6

Dış çapı 60,3 mm olan 7, 8, 9 nolu boru numunelerine ilişkin dijital radyografi sistemi ile tayin edilen boru cidar kalınlıklarının gerçek değerler ile karşılaştırılması Şekil 5.118’ de görülmektedir.

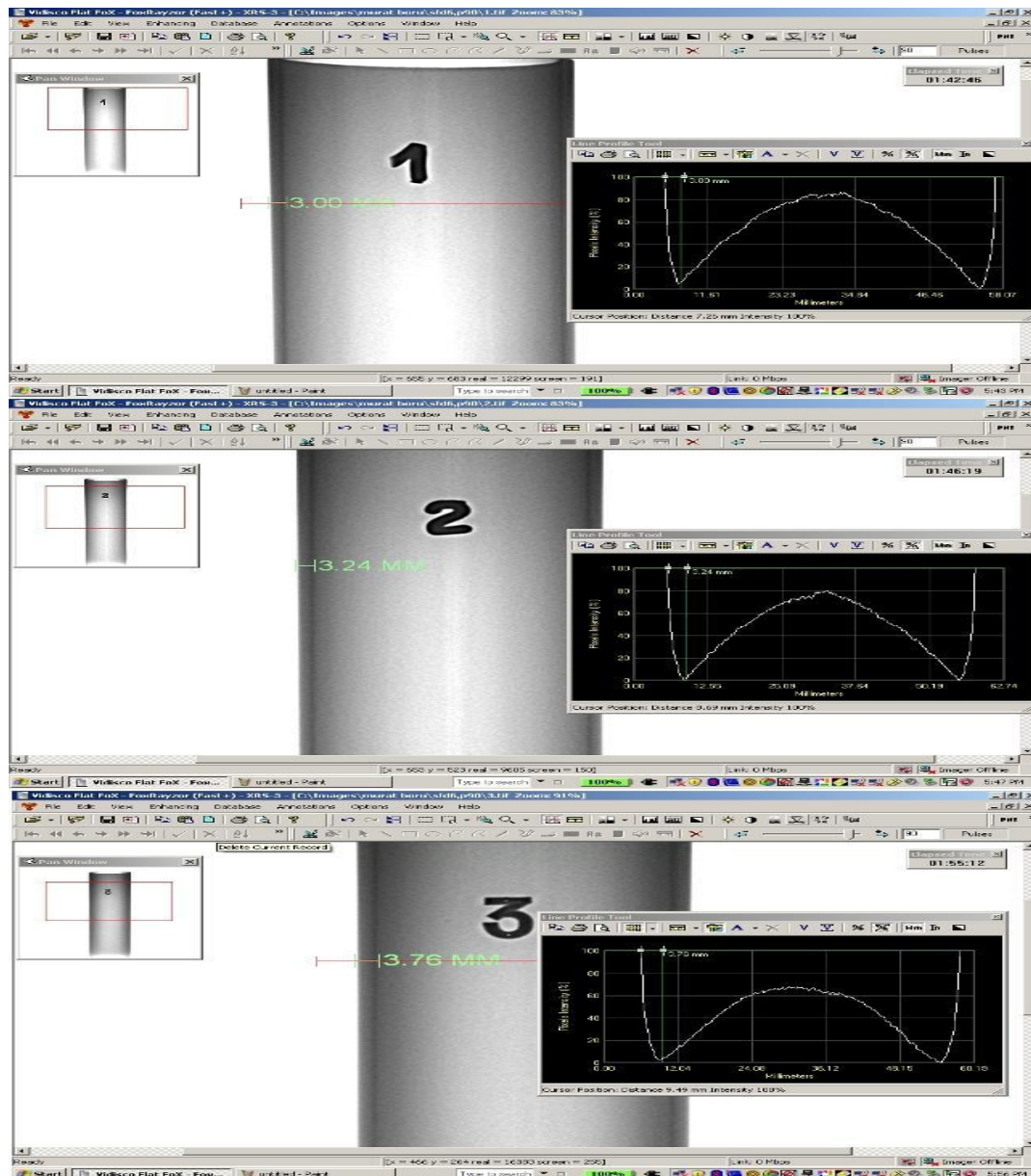


Şekil 5.18 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.

5.1.3 90 puls ve 600 mm KDM için elde edilen deney sonuçları

90 puls kullanılarak KDM 600 mm olacak şekilde Bölüm 4.2 de tanıtılan 9 farklı boru numunesi için ayrı ayrı çekimler yapılmıştır. Bu çekimlere ait dijital görüntüler, tipik piksel şiddeti değişim profilleri ve ölçüm ile bulunan cidar kalınlıklarının gerçek cidar kalınlıkları ile karşılaştırılmasına ilişkin sonuçlar aşağıda verilmiştir.

51 mm çaplı 1, 2, 3 nolu numunelerin dijital görüntüleri ve tipik piksel şiddeti değişim profili Şekil 5.19'da verilmektedir



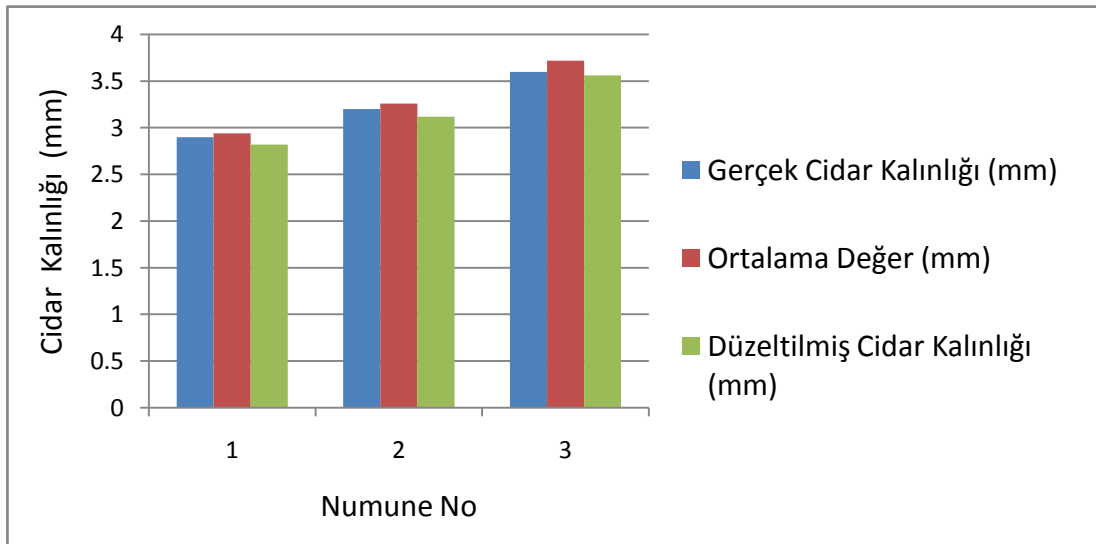
Şekil 5.19 : 1, 2, 3 nolu boru numunelerinin dijital görüntüleri ve piksel şiddeti değişim profili.

1, 2, 3 nolu numunelerin dijital görüntüler üzerinde okunan cidar kalınlıklarının ortalaması alınarak, Denklem 3.4 yardımıyla düzeltilmiş cidar kalınlıkları hesaplanmış ve ortalama değerle birlikte standart sapmalar (Excel 2007 programında ‘STDSAPMA’ formülüyle hesaplanmıştır) Çizelge 5.8’de birarada verilmiştir.

Çizelge 5.8 : Dış çapı 51 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları.

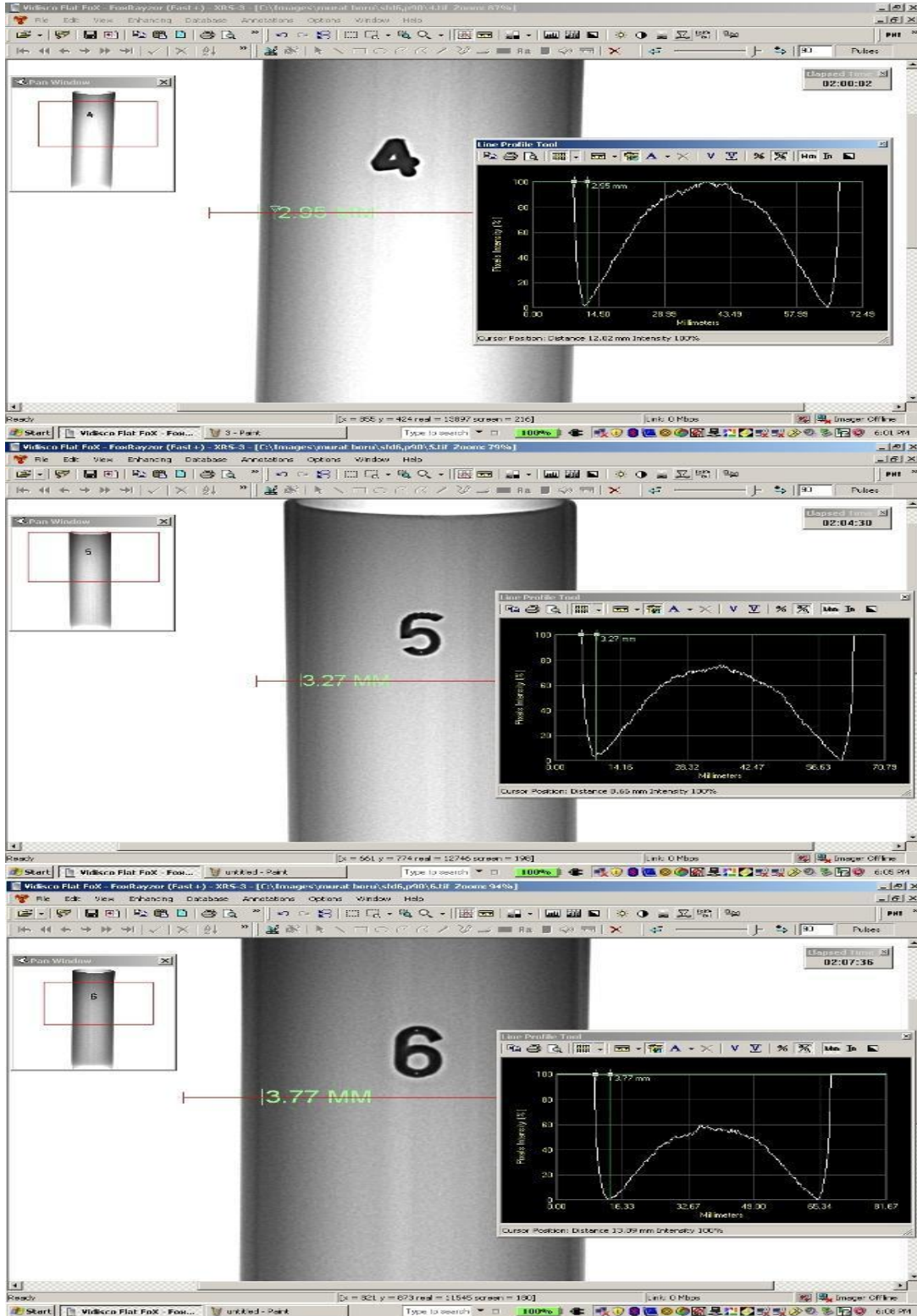
Numune No	Cidar Kalınlığı (mm)	Dijital görüntü üzerinde okunan cidar kalınlıkları (mm)				
		1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	Ortalama Değer (w')	Düzeltilmiş Cidar Kalınlığı (w)
1	2,9	3	2,88	2,94	$2,94 \pm 0,06$	2,82
2	3,2	3,24	3,35	3,2	$3,26 \pm 0,07$	3,12
3	3,6	3,76	3,62	3,78	$3,72 \pm 0,08$	3,56

Dış çapı 51 mm olan 1, 2, 3 nolu boru numunelerine ilişkin dijital radyografi sistemi ile tayin edilen boru cidar kalınlıklarının gerçek değerler ile karşılaştırılması Şekil 5.20’ de görülmektedir.



Şekil 5.20 : Dış çapı 51 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.

57 mm çaplı 4, 5, 6 nolu numunelerin dijital görüntüleri ve tipik piksel şiddeti değişim profili Şekil 5.21’de verilmektedir.



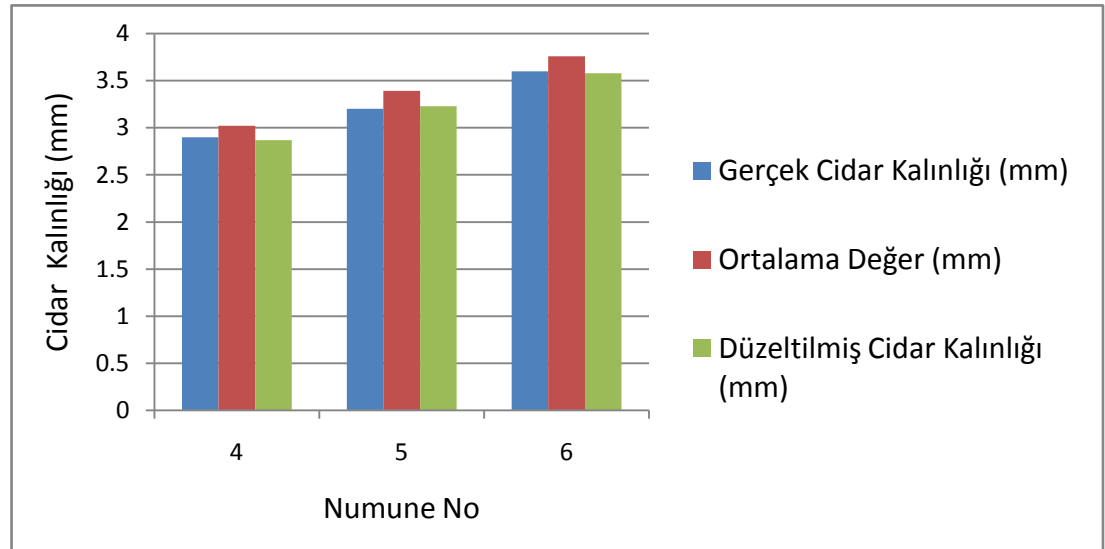
Şekil 5.21 : 4, 5, 6 nolu boru numunelerinin dijital görüntüleri ve piksel şiddeti değişim profili.

4, 5, 6 nolu numunelerin dijital görüntüler üzerinde okunan cidar kalınlıklarının ortalaması alınarak, Denklem 3.4 yardımıyla düzeltilmiş cidar kalınlıkları hesaplanmış ve ortalama değerle birlikte standart sapmalar (Excel 2007 programında ‘STDSAPMA’ formülüyle hesaplanmıştır) Çizelge 5.9’da birarada verilmiştir.

Çizelge 5.9 : Dış çapı 57 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları.

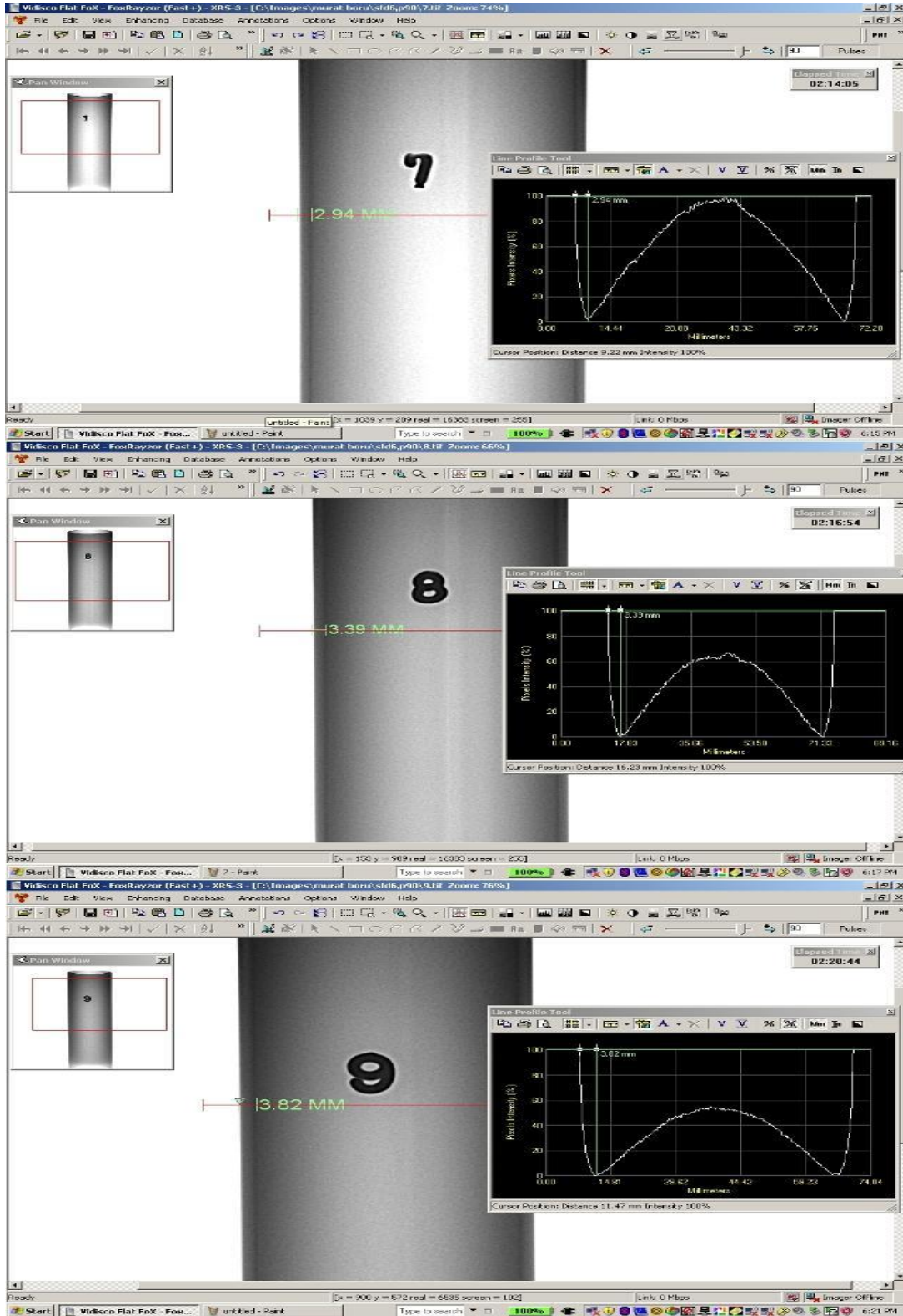
Numune No	Cidar Kalınlığı (mm)	Dijital görüntü üzerinde okunan cidar kalınlıkları (mm)				
		1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	Ortalama Değer (w')	Düzeltilmiş Cidar Kalınlığı (w)
4	2,9	2,95	3,05	3,05	3,02 ± 0,05	2,87
5	3,2	3,27	3,5	3,39	3,39 ± 0,11	3,23
6	3,6	3,77	3,79	3,72	3,76 ± 0,03	3,58

Dış çapı 57 mm olan 4, 5, 6 nolu boru numunelerine ilişkin dijital radyografi sistemi ile tayin edilen boru cidar kalınlıklarının gerçek değerler ile karşılaştırılması Şekil 5.22’ de görülmektedir.



Şekil 5.22 : Dış çapı 57 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.

60,3 mm çaplı 7, 8, 9 nolu numunelerin dijital görüntüleri ve tipik piksel şiddeti değişim profili Şekil 5.23'de verilmektedir.



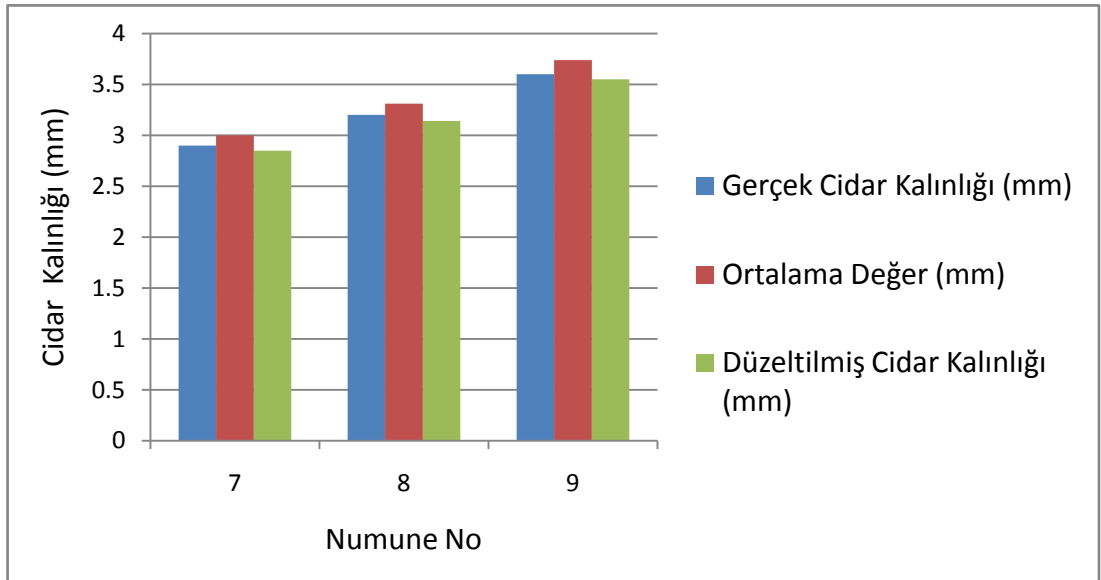
Şekil 5.23 : 7, 8, 9 nolu boru numunelerinin dijital görüntüleri ve piksel şiddeti değişim profili.

7, 8, 9 nolu numunelerin dijital görüntüler üzerinde okunan cidar kalınlıklarının ortalaması alınarak, Denklem 3.4 yardımıyla düzeltilmiş cidar kalınlıkları hesaplanmış ve ortalama değerle birlikte standart sapmalar (Excel 2007 programında ‘STDSAPMA’ formülüyle hesaplanmıştır) Çizelge 5.10’da birarada verilmiştir.

Çizelge 5.10 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları.

Numune No	Cidar Kalınlığı (mm)	Dijital görüntü üzerinde okunan cidar kalınlıkları (mm)				
		1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	Ortalama Değer (w')	Düzeltilmiş Cidar Kalınlığı (w)
7	2,9	2,94	3,07	2,99	$3 \pm 0,06$	2,85
8	3,2	3,39	3,24	3,3	$3,31 \pm 0,07$	3,14
9	3,6	3,82	3,69	3,71	$3,74 \pm 0,07$	3,55

Dış çapı 60,3 mm olan 7, 8, 9 nolu boru numunelerine ilişkin dijital radyografi sistemi ile tayin edilen boru cidar kalınlıklarının gerçek değerler ile karşılaştırılması Şekil 5.24’ te görülmektedir.

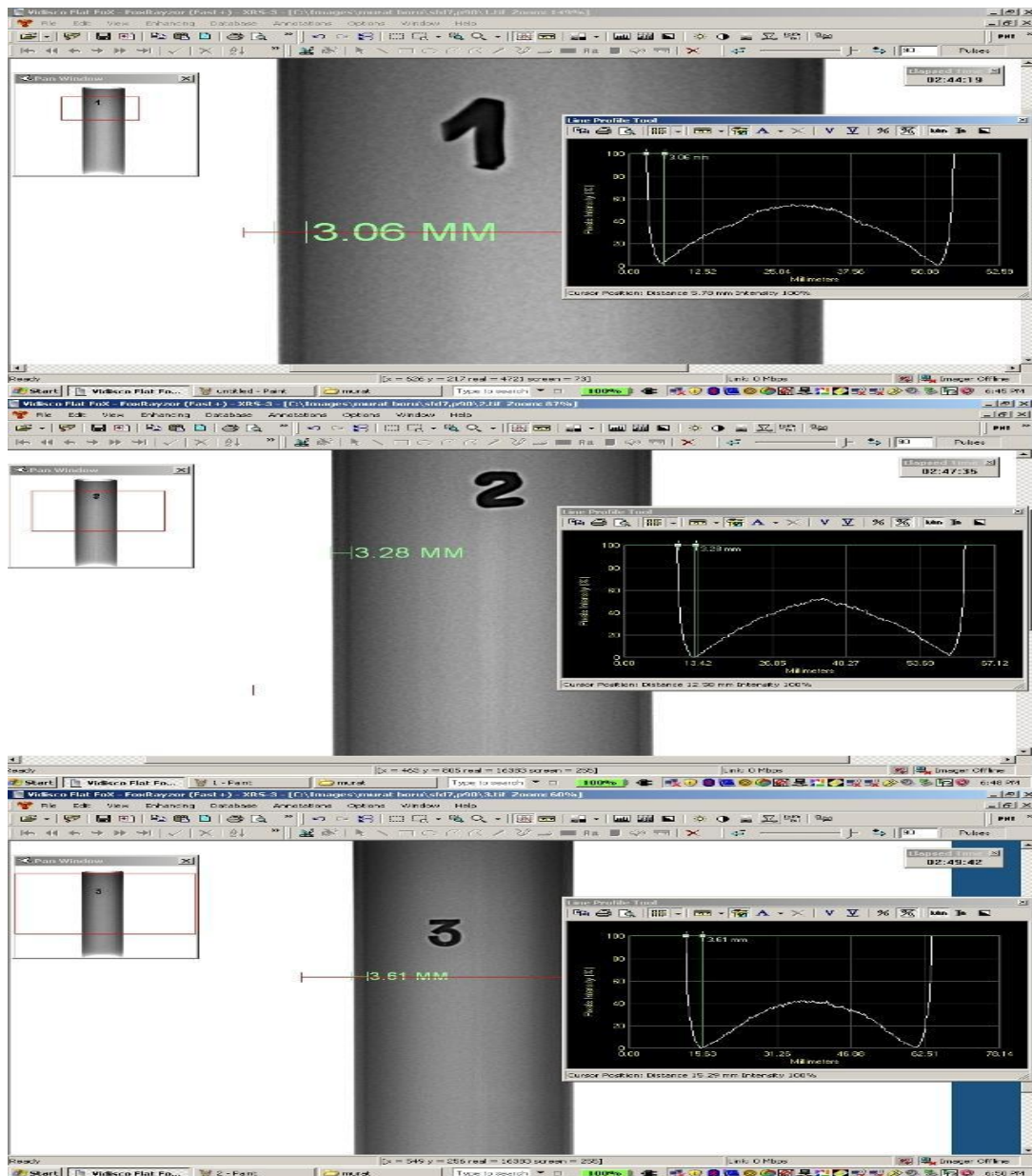


Şekil 5.24 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.

5.1.4 90 puls ve 700 mm KDM için elde edilen deney sonuçları

90 puls kullanılarak KDM 700 mm olacak şekilde Bölüm 4.2 de tanıtılan 9 farklı boru numunesi için ayrı ayrı çekimler yapılmıştır. Bu çekimlere ait dijital görüntüler, tipik piksel şiddeti değişim profilleri ve ölçüm ile bulunan cidar kalınlıklarının gerçek cidar kalınlıkları ile karşılaştırılmasına ilişkin sonuçlar aşağıda verilmiştir.

51 mm çaplı 1, 2, 3 nolu numunelerin dijital görüntüleri ve tipik piksel şiddeti değişim profili Şekil 5.25’de verilmektedir.



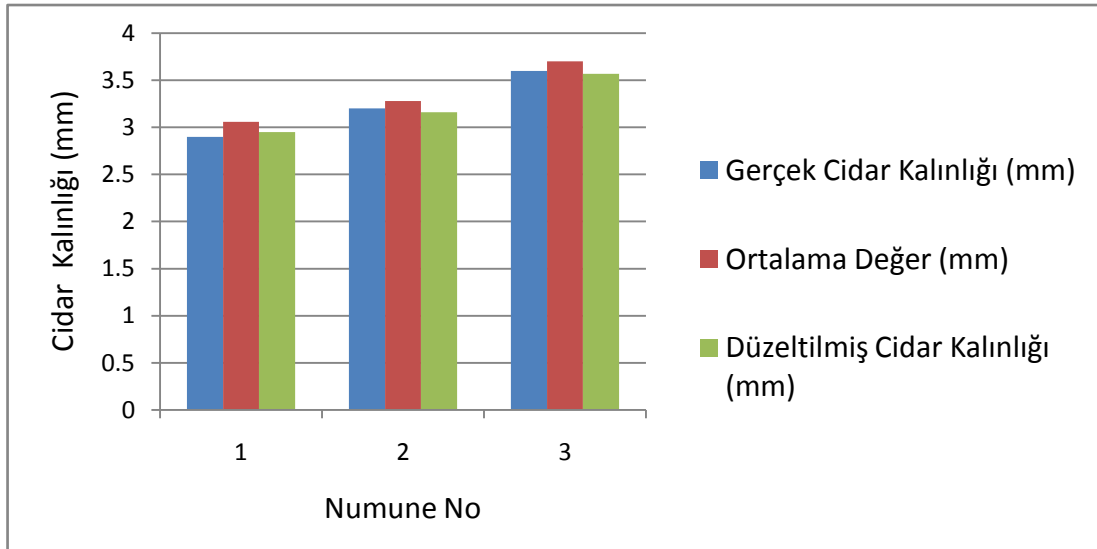
Şekil 5.25 : 1, 2, 3 nolu boru numunelerinin dijital görüntüleri ve piksel şiddeti değişim profili.

1, 2, 3 nolu numunelerin dijital görüntüler üzerinde okunan cidar kalınlıklarının ortalaması alınarak, Denklem 3.4 yardımıyla düzeltilmiş cidar kalınlıkları hesaplanmış ve ortalama değerle birlikte standart sapmalar (Excel 2007 programında ‘STDSAPMA’ formülüyle hesaplanmıştır) Çizelge 5.11’de birarada verilmiştir.

Çizelge 5.11 : Dış çapı 51 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları.

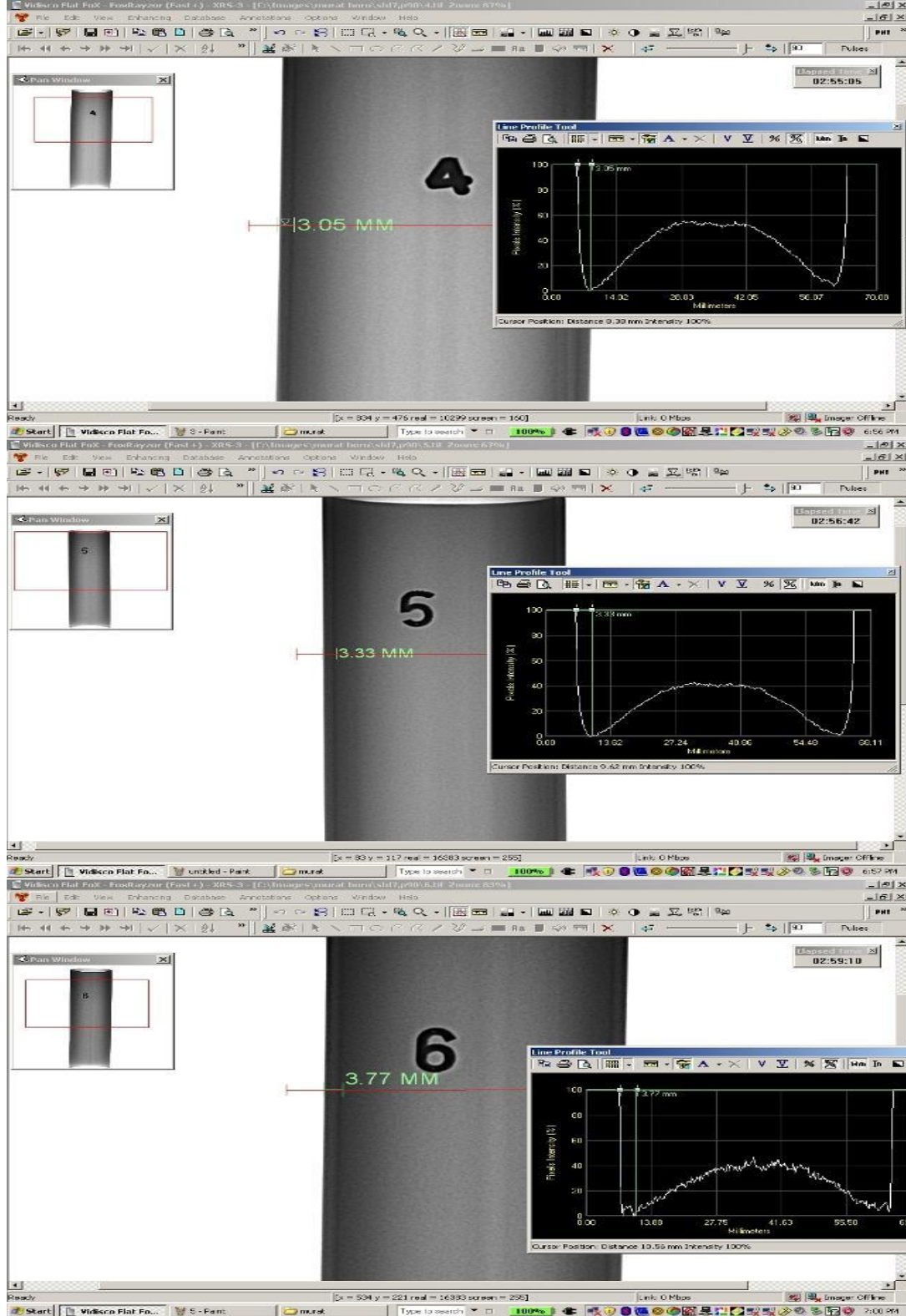
Numune No	Cidar Kalınlığı (mm)	Dijital görüntü üzerinde okunan cidar kalınlıkları (mm)				
		1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	Ortalama Değer (w')	Düzeltilmiş Cidar Kalınlığı (w)
1	2,9	3,06	2,98	3,15	$3,06 \pm 0,08$	2,95
2	3,2	3,28	3,3	3,26	$3,28 \pm 0,02$	3,16
3	3,6	3,61	3,76	3,73	$3,7 \pm 0,07$	3,57

Dış çapı 51 mm olan 1, 2, 3 nolu boru numunelerine ilişkin dijital radyografi sistemi ile tayin edilen boru cidar kalınlıklarının gerçek değerler ile karşılaştırılması Şekil 5.26’ da görülmektedir.



Şekil 5.26 : Dış çapı 51 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.

57 mm çaplı 4, 5, 6 nolu numunelerin dijital görüntüleri ve tipik piksel şiddeti değişim profili şekil 5.27'de verilmektedir.



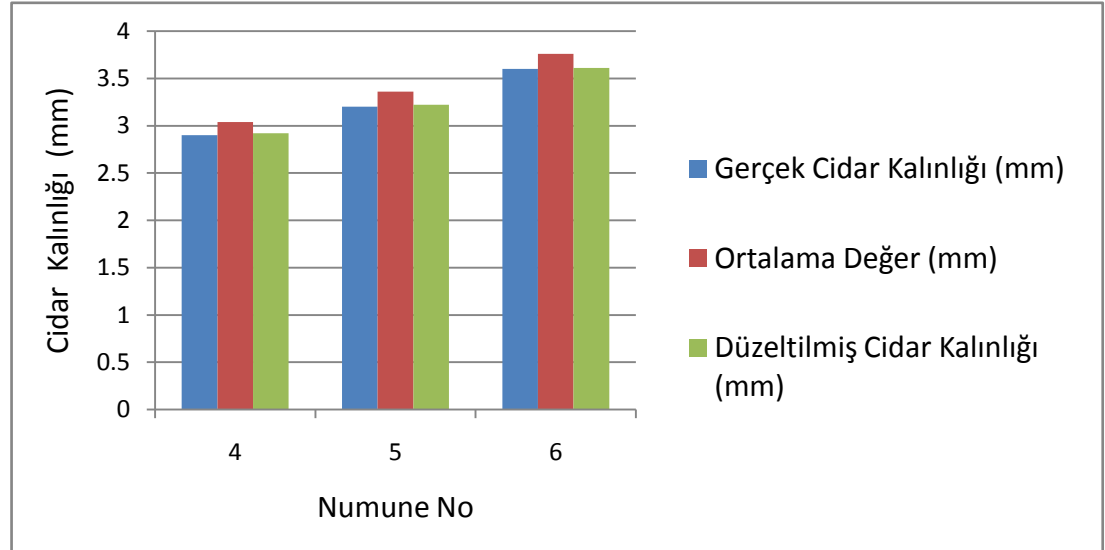
şekil 5.27 : 4, 5, 6 nolu boru numunelerinin dijital görüntüleri ve piksel şiddeti değişim profili.

4, 5, 6 nolu numunelerin dijital görüntüler üzerinde okunan cidar kalınlıklarının ortalaması alınarak, Denklem 3.4 yardımıyla düzeltilmiş cidar kalınlıkları hesaplanmış ve ortalama değerle birlikte standart sapmalar (Excel 2007 programında ‘STDSAPMA’ formülüyle hesaplanmıştır) Çizelge 5.12’de birarada verilmiştir.

Çizelge 5.12 : Dış çapı 57 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları.

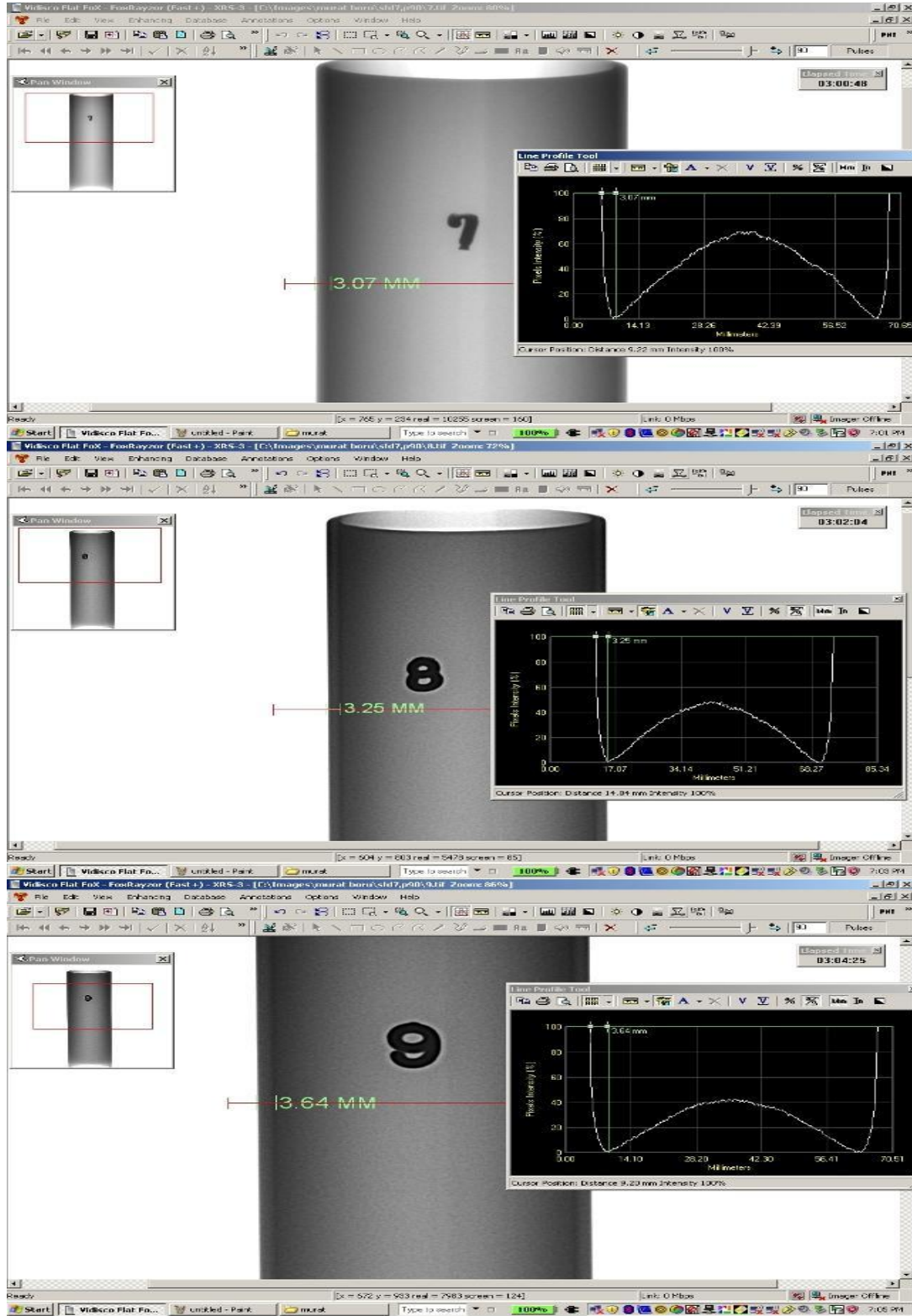
Numune No	Cidar Kalınlığı (mm)	Dijital görüntü üzerinde okunan cidar kalınlıkları (mm)				
		1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	Ortalama Değer (w')	Düzeltilmiş Cidar Kalınlığı (w)
4	2,9	3,05	2,98	3,09	$3,04 \pm 0,05$	2,92
5	3,2	3,33	3,45	3,29	$3,36 \pm 0,08$	3,22
6	3,6	3,77	3,71	3,81	$3,76 \pm 0,05$	3,61

Dış çapı 57 mm olan 4, 5, 6 nolu boru numunelerine ilişkin dijital radyografi sistemi ile tayin edilen boru cidar kalınlıklarının gerçek değerler ile karşılaştırılması Şekil 5.28’ de görülmektedir.



Şekil 5.28 : Dış çapı 57 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.

60,3 mm çaplı 7, 8, 9 nolu numunelerin dijital görüntüleri ve tipik piksel şiddeti değişim profili Şekil 5.29'da verilmektedir.



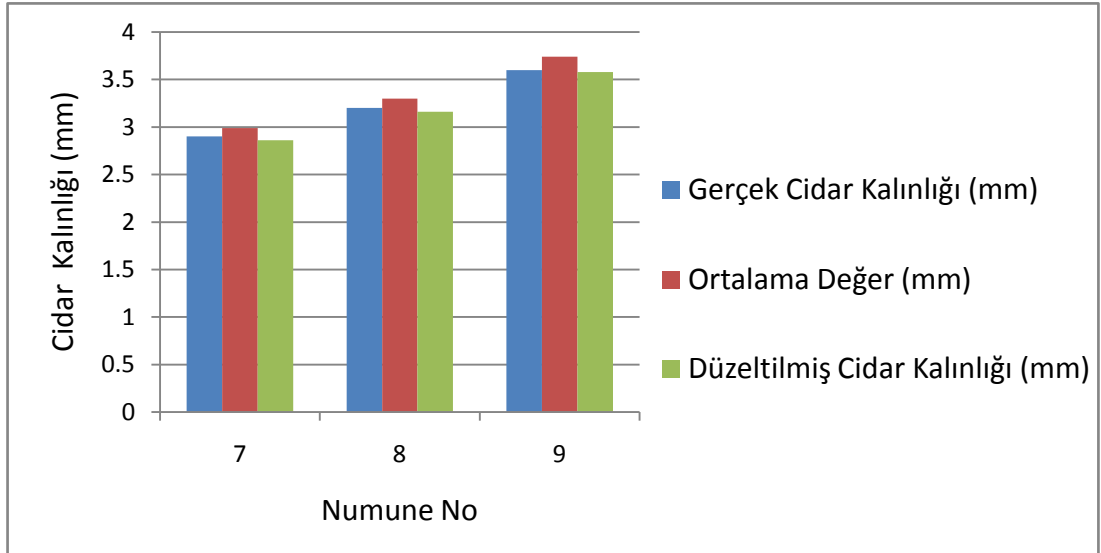
Şekil 5.29 : 7, 8, 9 nolu boru numunelerinin dijital görüntüleri ve piksel şiddeti değişim profili.

7, 8, 9 nolu numunelerin dijital görüntüler üzerinde okunan cidar kalınlıklarının ortalaması alınarak, Denklem 3.4 yardımıyla düzeltilmiş cidar kalınlıkları hesaplanmış ve ortalama değerle birlikte standart sapmalar (Excel 2007 programında ‘STDSAPMA’ formülüyle hesaplanmıştır) Çizelge 5.13’de birarada verilmiştir.

Çizelge 5.13 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numuneleri için dijital görüntü üzerinde okunan ve düzeltilmiş cidar kalınlıkları.

Numune No	Cidar Kalınlığı (mm)	Dijital görüntü üzerinde okunan cidar kalınlıkları (mm)				
		1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	Ortalama Değer (w')	Düzeltilmiş Cidar Kalınlığı (w)
7	2,9	3,07	2,89	3,01	$2,99 \pm 0,09$	2,86
8	3,2	3,25	3,37	3,29	$3,3 \pm 0,06$	3,16
9	3,6	3,64	3,83	3,74	$3,74 \pm 0,09$	3,58

Dış çapı 60,3 mm olan 7, 8, 9 nolu boru numunelerine ilişkin dijital radyografi sistemi ile tayin edilen boru cidar kalınlıklarının gerçek değerler ile karşılaştırılması Şekil 5.30’ da görülmektedir.



Şekil 5.30 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numunelerinin dijital radyografi sistemi ile ölçülen cidar kalınlıklarının gerçek değerlerle karşılaştırılması.

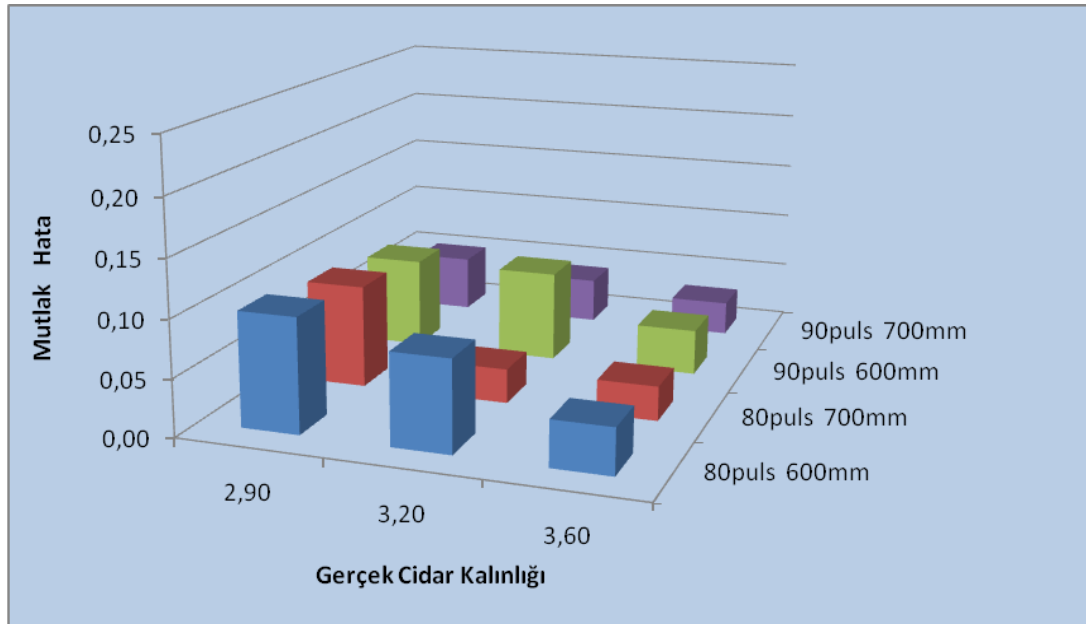
5.2 Deney Sonuçlarındaki Hata Miktarı

Yapılan deneylerde gerçek cidar kalınlıkları ile ölçümler sonucu elde edilen düzeltilmiş cidar kalınlıkları arasındaki fark alınarak mutlak hata değerleri elde edilmiştir.

Dış çapı 51 mm olan 1, 2 ve 3 nolu numuneler için mutlak hata değerleri Çizelge 5.14 ve Şekil 5.31’de verilmiştir.

Çizelge 5.14 : Dış çapı 51 mm olan boru numuneleri için mutlak hata değerleri.

Numune no	Cidar Kalınlığı (mm)	MUTLAK HATA			
		80 puls 600 mm	80 puls 700 mm	90 puls 600 mm	90 puls 700 mm
1	2,9	0,09	0,09	0,08	0,05
2	3,2	0,08	0,03	0,08	0,04
3	3,6	0,04	0,03	0,04	0,03

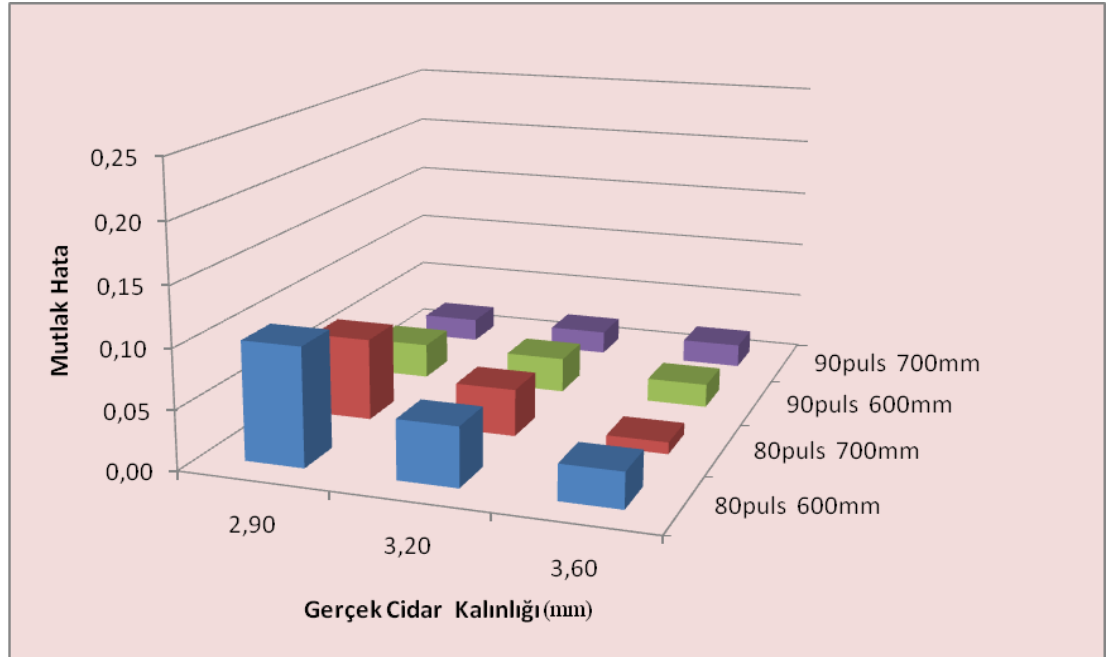


Şekil 5.31 : Dış çapı 51 mm olan 1, 2 ve 3 nolu boru numunelerinin mutlak hata mukayese grafiği.

Dış çapı 57 mm olan 4, 5 ve 6 nolu numuneler için mutlak hata değerleri Çizelge 5.15 ve Şekil 5.32’de verilmiştir.

Çizelge 5.15 : Dış çapı 57 mm olan boru numuneleri için mutlak hata değerleri.

Numune no	Cidar Kalınlığı (mm)	MUTLAK HATA			
		80 puls 600 mm	80 puls 700 mm	90 puls 600 mm	90 puls 700 mm
4	2,90	0,10	0,07	0,03	0,02
5	3,20	0,05	0,04	0,03	0,02
6	3,60	0,03	0,01	0,02	0,02

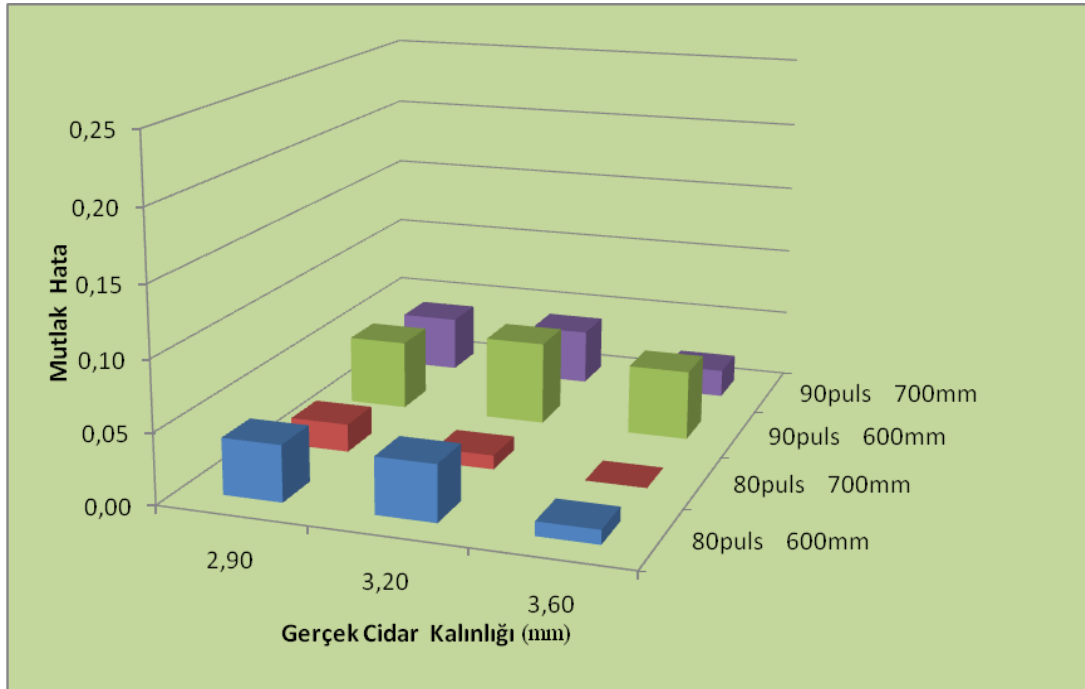


Şekil 5.32 : Dış çapı 57 mm olan 4 , 5 ve 6 nolu boru numunelerinin mutlak hata mukayese grafiği.

Dış çapı 60,3 mm olan 7, 8 ve 9 nolu numuneler için mutlak hata değerleri Çizelge 5.16 ve Şekil 5.33’de verilmiştir.

Çizelge 5.16 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numuneleri için mutlak hata değerleri.

Numune no	Cidar Kalınlığı (mm)	MUTLAK HATA			
		80 puls 600 mm	80 puls 700 mm	90 puls 600 mm	90 puls 700 mm
7	2,90	0,04	0,02	0,05	0,04
8	3,20	0,04	0,01	0,06	0,04
9	3,60	0,01	0,00	0,05	0,02



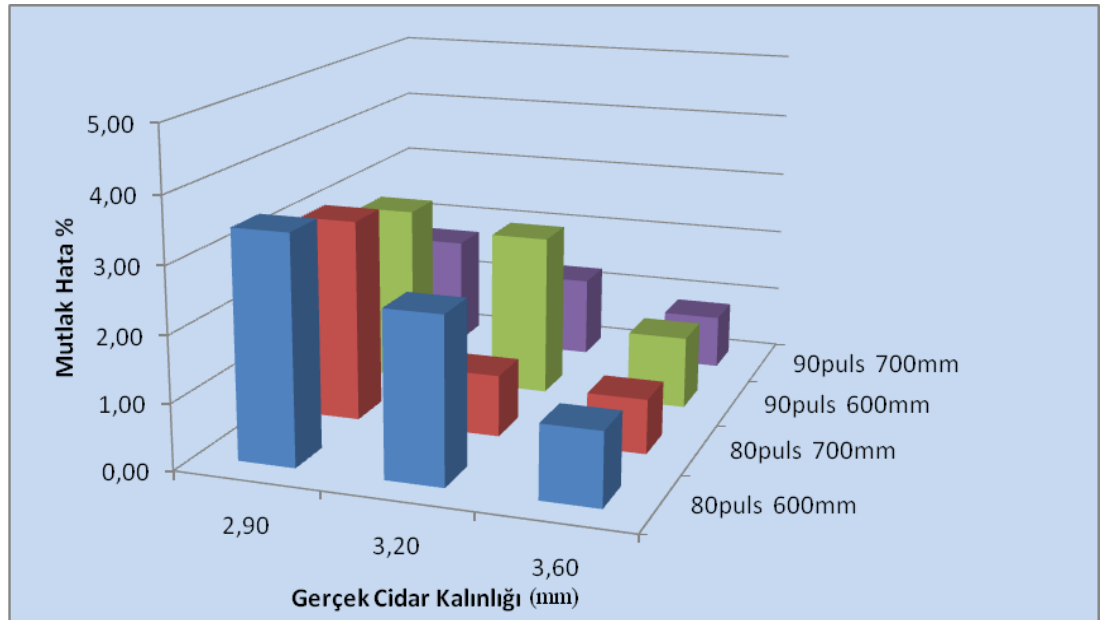
Şekil 5.33 : Dış çapı 60,3 mm olan 7, 8 ve 9 nolu boru numunelerinin mutlak hata mukayese grafiği.

Deneyde elde edilen sonuçlara göre mutlak hata % değerleri ve mukayeseli grafikleri ise aşağıda verilmiştir.

Dış çapı 51 mm olan 1, 2 ve 3 nolu numuneler için mutlak hata % değerleri Çizelge 5.17 ve Şekil 5.34’de verilmiştir.

Çizelge 5.17 : Dış çapı 51 mm olan boru numuneleri için mutlak hata % değerleri.

Numune no	Cidar Kalınlığı (mm)	MUTLAK HATA %			
		80puls 600mm	80puls 700mm	90puls 600mm	90puls 700mm
1	2,9	3,45	3,1	2,76	1,72
2	3,2	2,5	0,94	2,5	1,25
3	3,6	1,11	0,83	1,11	0,83

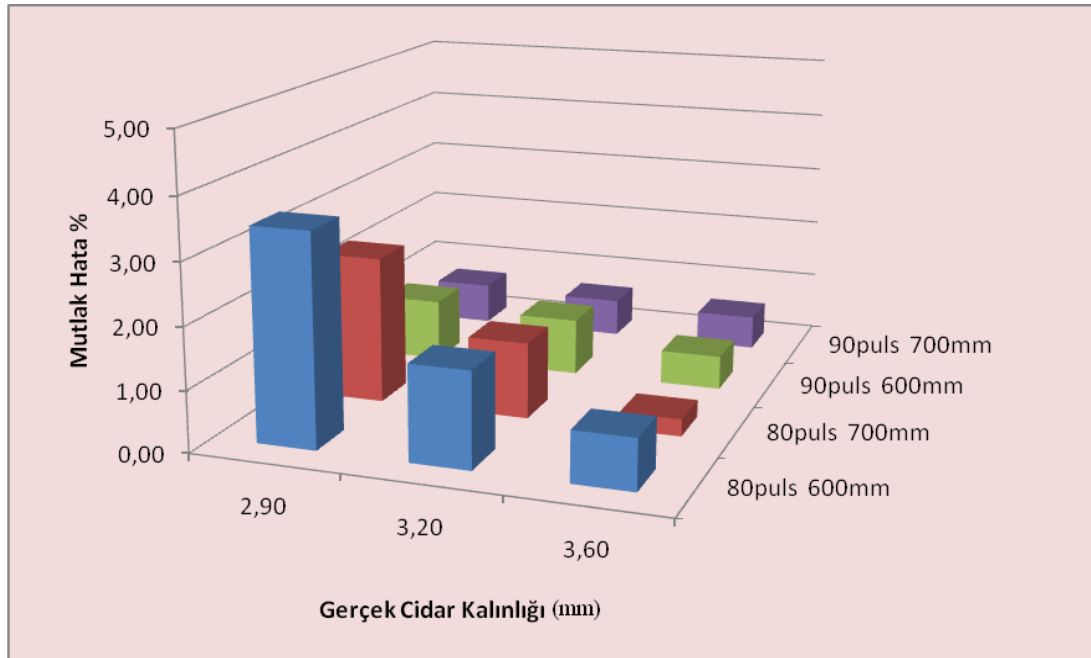


Şekil 5.34 : Dış çapı 51 mm olan 1, 2 ve 3 nolu boru numunelerinin mutlak hata % mukayese grafiği.

Dış çapı 57 mm olan 4, 5 ve 6 nolu numuneler için mutlak hata % değerleri Çizelge 5.18 ve Şekil 5.35’de verilmiştir.

Çizelge 5.18 : Dış çapı 57 mm olan boru numuneleri için mutlak hata % değerleri.

Numune no	Cidar Kalınlığı (mm)	MUTLAK HATA %			
		80puls 600mm	80puls 700mm	90puls 600mm	90puls 700mm
4	2,9	3,45	2,41	1,03	0,69
5	3,2	1,56	1,25	0,94	0,63
6	3,6	0,83	0,28	0,56	0,56

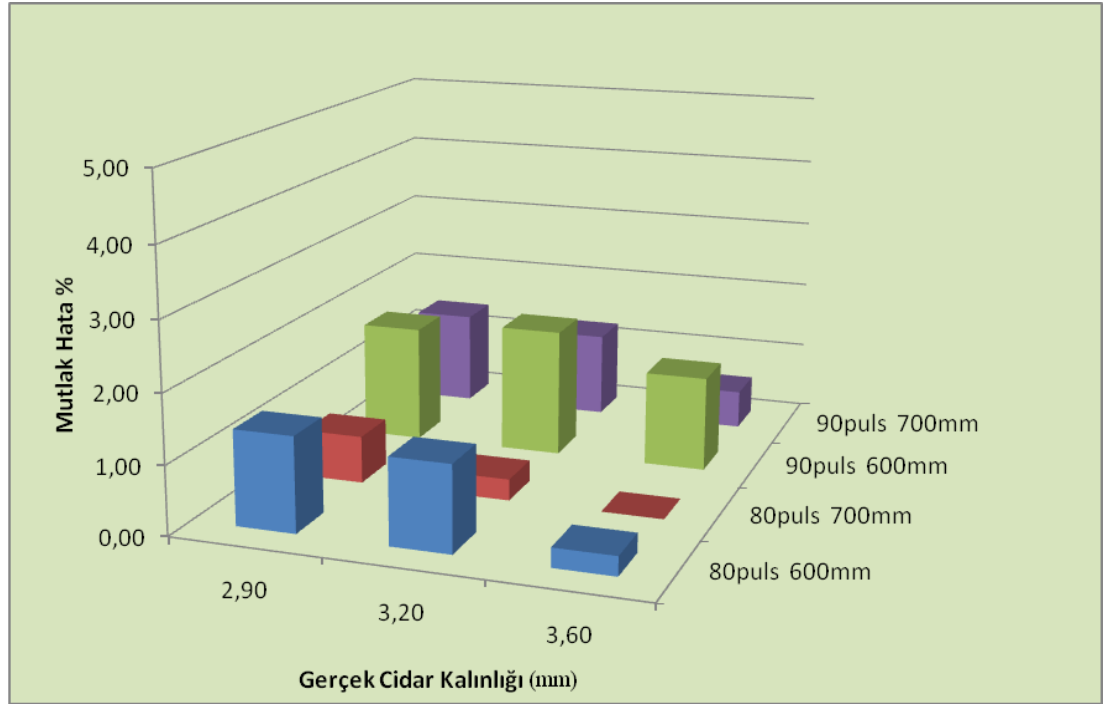


Şekil 5.35 : Dış çapı 57 mm olan 4 , 5 ve 6 nolu boru numunelerinin mutlak hata % mukayese grafiği.

Dış çapı 60,3 mm olan 7, 8 ve 9 nolu numuneler için mutlak hata % değerleri Çizelge 5.19 ve Şekil 5.36’da verilmiştir.

Çizelge 5.19 : Dış çapı 60,3 mm olan boru numuneleri için mutlak hata % değerleri.

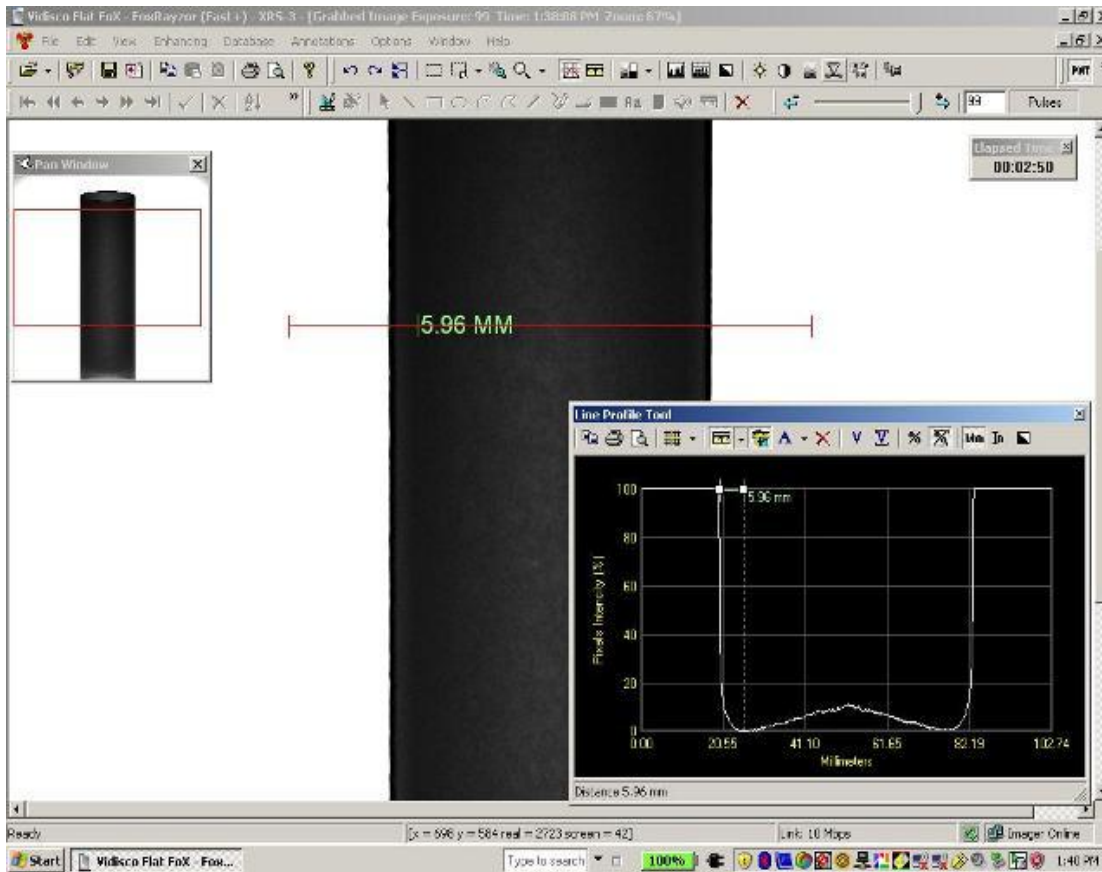
Numune no	Cidar Kalınlığı (mm)	MUTLAK HATA %			
		80puls 600mm	80puls 700mm	90puls 600mm	90puls 700mm
7	2,9	1,38	0,69	1,72	1,38
8	3,2	1,25	0,31	1,88	1,25
9	3,6	0,28	0	1,39	0,56



Şekil 5.36 : Dış çapı 60,3 mm olan 7, 8 ve 9 nolu boru numunelerinin mutlak hata % mukayese grafiği.

5.3 Kullanılan Dijital Radyografi Sistemi İçin L_{max} Değerinin Sınırları

Deneyde kullanılan dijital radyografi sistemi ile teğet tekniği kullanılarak ölçülebilecek maksimum boru cidar kalınlığını tespit etmek için özel bir numune kullanılmıştır. Denklem 3.13'e göre L_{max} değeri 36 olan borunun dış çapı 60 mm ve cidar kalınlığı 6 mm'dir. Bu boru, X-ışını kaynağının enerjisi ve Şekil 3.15'deki Enerji- L_{max} grafiğindeki değerler göz önünde tutularak seçilmiştir. Sistemin yazılım programındaki Araç Çubuğundan X-ışını kaynağının maksimum puls değeri (99 puls) ve *pnt* modu seçilerek dijital radyografi sistemimiz için firma tarafından önerilen minimum kaynak- dedektör mesafesinden (KDM=500mm) çekim yapılmıştır (foX-Rayzor, 2006). Bu çalışma parametreleri ile elde edilen dijital görüntü ve piksel şiddeti değişim profili Şekil 5.37'de verilmiştir.



Şekil 5.37 : Dış çapı 60 mm, cidar kalınlığı 6 mm olan boru numunesinin dijital görüntüsü ve piksel şiddeti değişim profili.

$L_{max}>36$ olan boru numuneleri ile deneme çekimleri yapılmış ancak cidar kalınlığını belirleyebilecek bir görüntü elde edilememiştir.

6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu Yüksek Lisans Tez çalışmasında, dijital radyografiden faydalanarak teğet yöntemi ile, çelik borularda cidar kalınlıklarının tespit edilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, kullanılan dijital radyografi sistemi için, X-ışınlarının katettiği maksimum malzeme kalınlığından (L_{max}) hareketle, yöntemin sınırlarının belirlenmesi de bu çalışmada amaçlanmıştır. Bunun için farklı cidar kalınlığı ve çaplara sahip çelik boru numunelerinin, Bölüm 4'de tanıtılan çalışma parametreleri kullanılarak dijital görüntüleri elde edilmiştir.

Çalışmamızda deneyler, dijital radyografi sisteminin parametreleri olan puls değeri ve kaynak dedektör mesafesi (KDM) değiştirilerek 4 farklı koşulda gerçekleştirilmiştir (Çizelge 5.1). Her bir boru için cidar kalınlıkları, dijital görüntüden ve piksel şiddeti değişim profili üzerinden tespit edilmiştir. Bunun için, dijital görüntü üzerinde 3 farklı kalınlık değeri okunarak bu değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır ve Excel programında 'STDSAPMA' formülü yardımıyla da standart sapmalar hesaplanmıştır. Bu ortalama kalınlık değerlerinden hareketle Denklem 3.4 yardımıyla da düzeltilmiş cidar kalınlıkları bulunmuştur.

4 farklı çalışma koşulunda yapılmış dış çapı 51 mm olan 1, 2, 3 nolu boru numuneleri için, Şekil 5.4, Şekil 5.14, Şekil 5.20 ve Şekil 5.26 gerçek cidar kalınlığı, ortalama değer ve elde edilen (düzeltilmiş) cidar kalınlıklarının karşılaştırılmasına ilişkin grafikler verilmektedir. Aynı amaçla, dış çapı 57 mm olan 4, 5, 6 nolu boru numuneleri için (Şekil 5.8, Şekil 5.16, Şekil 5.22 ve Şekil 5.28) ve dış çapı 60.3 mm olan 7, 8, 9 nolu boru numuneleri için de (Şekil 5.12, Şekil 5.18, Şekil 5.24 ve Şekil 5.30) gerçek cidar kalınlığı, ortalama değer ve elde edilen (düzeltilmiş) cidar kalınlıklarının karşılaştırılmasına ilişkin grafikler elde edilmiştir.

Dijital görüntülerden elde edilen piksel şiddeti değişim profilleri incelendiğinde, puls değerleri aynı kalmak üzere KDM arttıkça piksel şiddetinin azaldığı görülmüştür. Buna ilişkin olarak 80 puls 600 mm KDM için elde edilen sonuçlar (Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3; Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7; Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11) 80 puls

700 mm KDM için elde edilen sonuçlarla (Şekil 5.13, Şekil 5.15, Şekil 5.17) ve 90 puls 600 mm KDM için elde edilen sonuçlar (Şekil 5.19, Şekil 5.21, Şekil 5.23) 90 puls 700 mm KDM için elde edilen sonuçlarla (Şekil 5.25, Şekil 5.27, Şekil 5.29) karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

Tez çalışmamızda kullanılan dijital radyografi sisteminde, daha önce Bölüm 5'te de değinildiği gibi, cidar kalınlığı ölçümü iki şekilde yapılabilmektedir. Bunlar; dijital radyografik görüntü üzerinden sınırların belirlenip kalınlığın doğrudan tespiti ve piksel şiddeti değişim profili kullanılarak eğrinin dönüm noktasına göre yapılan ölçümlerdir. Buna göre, piksel şiddeti değişim eğrisinde dönüm noktasının keskin olması daha kolay ve doğru ölçüm yapılmasına olanak sağlamaktadır. KDM arttıkça piksel şiddeti değişim profilinin maksimum noktası azalırken aynı zamanda dönüm noktalarının keskinliği de azalmaktadır. Böylece doğru ve hassas bir kalınlık ölçümünden de uzaklaşmaktadır. Bu durum göz önünde bulundurularak, KDM arttıkça, cidar kalınlığı ölçümünün sadece dijital radyografik görüntüden yapılması tarafımızdan önerilmektedir.

KDM aynı kalmak üzere, puls değerlerindeki değişimin piksel şiddeti değişim profiline etkisi incelendiğinde ise beklentimiz doğrultusunda, piksel şiddetinde artış olduğu görülmüştür. Aynı zamanda piksel şiddeti değişim profilinin dönüm noktalarının keskinliği de artmıştır. Buna göre, puls değerinin artmasıyla piksel şiddeti değişim profilinden cidar kalınlığını tespit etmek kolaylaşmaktadır.

Yapılan deneylerde gerçek cidar kalınlıkları ile ölçümler sonucu elde edilen düzeltilmiş cidar kalınlıkları arasında farklılıklar olduğu gözlenmiştir. Sonuçları daha iyi irdeleyebilmek için, elde edilen kalınlık değerlerine ilişkin mutlak hata ve yüzde mutlak hatanın belirlenmesi yoluna gidilmiştir.

Dış çapı 51 mm olan 1, 2, 3 nolu boru numuları için 4 farklı çalışma koşulunda elde edilen sonuçların mutlak hata mukayese grafiği Şekil 5.31'de verilmiştir. Benzer şekilde dış çapı 57 mm olan 4, 5, 6 ve dış çapı 60,3 olan 7, 8, 9 nolu boru numunelerine ilişkin grafikler sırasıyla Şekil 5.32 ve Şekil 5.33'de yer almaktadır. Elde edilen mutlak hata grafiklerine göre cidar kalınlığı arttıkça mutlak hata değerlerinin genel olarak azalmakta olduğu görülmektedir. Şekil 5.31-Şekil 5.33'de verilen grafiklerde puls değeri sabit kalmak üzere KDM arttıkça mutlak hata

azalmıştır. Bu durum, KDM arttıkça teğet tekniğinden dolayı oluşan yarı gölgenin azalması ile açıklanabilir. Yarı gölge azaldıkça ölçülen cidar kalınlığı, gerçek cidar kalınlığına yaklaşmakta ve hata azalmaktadır.

Pulsdaki değişimin görüntü kalitesine etkisi olduğu (Şekil 5.31, Şekil 5.32 ve Şekil 5.33) gözlenmekle birlikte mutlak hataya etkisi konusunda kesin bir yargıya varılamamıştır. Çalışmamızda incelenen boru numuneleri için ($23 < L_{max} < 29$) maksimum mutlak yüzde hata 3,45 olarak bulunmuştur. Bu değer kabul edilebilir doğruluk sınırları içindedir (IAEA, 2005). Yapılan değerlendirmeler sonucunda, deneylerde uygulanan çalışma parametreleri arasında, optimum çalışma koşulunun 90 puls 700 mm olduğu söylenebilir.

Çalışmamızda kullanılan *Fox Rayzor* dijital radyografi sisteminde X-ışını kaynağının sabit ve belirli bir enerjisi vardır. Bundan dolayı Teğet Tekniği için Bölüm 3.2.4'te de açıklandığı gibi radyasyonun malzeme içinde kat edebileceği mesafe L_{max} ile sınırlıdır. Bu çalışmanın amaçlarından biri de *Fox Rayzor* dijital radyografi sistemi ile ölçülebilecek maksimum boru cidar kalınlığını tespit etmek ve sınırlarını belirlemektir. X-ışını kaynağının maksimum puls seviyesi ve *Fox Rayzor* dijital radyografi sistemi için tavsiye edilen minimum KDM ile, cidar kalınlığı 6 mm, dış çapı 60 mm ($L_{max}=36$) olan boru numunesinin radyografik çekimi yapılarak Şekil 5.37'de verilen görüntü elde edilmiştir. Şekil 5.37'de piksel şiddeti değişim profilinde dönüm noktası belirgin olmadığı için sadece radyografik görüntü üzerinden cidar kalınlığı tespit edilebilmiştir. $L_{max} > 36$ olan boru numuneleri ile deneme çekimleri yapılmış ancak cidar kalınlığını belirleyebilecek bir görüntü alınamamıştır.

Bu Yüksek Lisans Tez çalışmasında, *Fox Rayzor* dijital radyografi sistemi ile farklı çap ve cidar kalınlıklarında boru numuneleri ile radyografik çekimler yapılmış, teğet tekniği kullanılarak boruların cidar kalınlıkları radyografik görüntüden ve piksel şiddeti değişim profilinden tespit edilmiştir. Puls ve KDM parametrelerine göre mutlak hata ve mutlak yüzde hata değişimi incelenip yorumlanmış ve kullanılan dijital radyografi sisteminin, teğet tekniği ile cidar kalınlığı ölçümü için L_{max} sınırı belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Akıncı, Ş.B.** (1996). Endüstriyel Radyografide Farklı Zemin Ortamlarının Saçılma Etkisinin Görüntü Kalitesine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Aktan, A.M.** (2008). Dijital Ve İleri Görüntüleme Teknikleriyle Lamina Duragrafisinin Ve Alveolar Kemik Defektlerin Saptanması: İn vitro-calisma - Selçuk üni, Konya.
- Alan, A.** (2008). Kronik Periodontitisli Bireylerde Konvansiyonel Periapikal Radyografi Ve Dijital Subtraction Radyografi Veri Etkinliklerinin Karsilastirilmesi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Becker, G.L.** (1990). Radiographic NDT, DuPont NDT Systems, Wilmington.
- Bilge A.N ve Tuğrul, B.** (1990). Endüstriyel Radyografinin Esasları, İ.T.Ü. Rektörlük Ofset Atölyesi, İstanbul.
- Bilge, A.N.** (1991). Endüstride Nükleer Teknikler, İ.T.Ü. Rektörlük Ofset Atölyesi, İstanbul.
- Czichos, H., Saito, T., Smith, L.** (2006). Springer Handbook of Materials Measurement Methods, Springer, Würzburg, Germany.
- Duman, M.** (2000). Radyografi İle Kaynak Dikişi Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Edalati, K., Rastkhah, N., Kermani, A., Seiedi, M., Movafeghi, A.** (2007). The use of radiography for thickness measurement and corrosion monitoring in pipes, International Journal of Pressure Vessels and Piping 83 (2006) 736–741 Tehran, Iran.
- Ekinci, Ş., Aksu, M., ve diğ.** (1999) Büyük Çaplı (>8 İnç) Korozyonlu Borularda Radyografik Teğet Tekniği İle Cidar Kalınlığı Ölçümü, 1.Uluslararası Tahribatsız Muayene Sempozyumu Ve Sergisi, Ankara.
- Ewert U.** (2007). Codes and Standards in Digital Industrial Radiology, BAM, Chennai, India.
- Foldiak, G.** (1986). Industriail Application of Radioisotopes, Elsevier, Amsterdam.
- foX-Rayzor,** (2006). User Manuel, VIDISCO Ltd.
- Gardner, R.P., Ely, R.L.** (1967). Radioisotope Measurement Applications in Engineering, Reinhold Publ. Corp., New York.

- Halmshaw, R.** (1991). Nondustrictive Testing, Hodder & Stoughton Ltd., London
- Halmshaw, R.** (1995). Industrail Radiology:Theory And Practice, Chapman & Hall, London.
- Harara, W.** (2005). Evaluation of Corrosion and Deposit in Pipes By Radiography, IAEA-TECDOC-1445, Vienna, Austria.
- IAEA.** (2005). International Atomic Energy Agency, Developments of Protocols for Corrosion and Deposits Evaluation in Pipes by Radiography, IAEA-TECDOC-1445, Vienna, Austria.
- Körner, M.** (2007). Advances in Digital Radiography: Physical Principles and System Overview, From the Department of Clinical Radiology, University Hospital Munich, Nussbaumstr Munich, Germany
- Lee, S.S. and Jang, B.G.** (2001). Thickness Evaluation of Pipes Using Density Profile on Radiographs, Seoul, Korea.
- Mahmutyazıoğlu, N.** (2008). Dijital Radyografi-Radyoskopi-Bilgisayarlı Radyografi-Cr (TS EN 14784-1, TS EN 14784-2), 3rd International Non-Destructive Testing Symposium and Exhibition, İstanbul.
- Mix, P.E.** (1987). Introduction To Nondustrictive Testing, John Wiley & Sons, New York.
- Padovani, R.** (2006). Basic Principle of Flat Panel Imaging Detectors, Training Course, Digital Projection Radiography Trier, Germany
- Patel, R.J.** (2005). Digital Applications of Radiography, www.ndt.net - 3rd MENDT - Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition - 27-30 Nov 2005 Bahrain, Manama.
- Quinn ve Sigl, R.A. and Sigl, C.C.** (1980). Radiography İn Modern İndustry, Eastman Kodak Company, New York.
- Selman,** (2000). The Fundamentels Of İmaging Physics And Radiobiology, 9th edition, Charles. C. Thomas Publisher.
- Sonat, E.E., Yelbay, H.İ.** (2008). Dökümlerin Radyografik Muayenesinde Kullanılan Standartlar, ODTÜ Kaynak Teknolojisi Ve Tahribatsız Muayene Araş./Uyg Merkezi, Ankara.
- Şahin, N.** (2003). X-ışını Radyografi Tekniğine İlişkin Görüntü Kalite Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Tuğrul, B., Baydoğan, N., Altınsoy, N., Dizar, D., Yağcı, E.** (2008). Otomotiv Parçalarının Radyografik İncelemeleri, İ.T.Ü. Enerji Enstitüsü, Ayazağa Kampüsü, Maslak, İstanbul.
- Şişman, F.Ç.** (1992). Radyografik Performans Ve Görüntü Rezolüsyonu Tayini, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Wawrzinek, T., Zscherpel, U., Bellon, C.** (1997). Wall Thickness Determination in Digital Radiography, BAM, Berlin, Germany.
- Yılmaz, G.** (1999). Radyografik Hata Tesipiti, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul.

Zirnhelt, J., Einav, I., Infanzon. S. (2003). Radiographic Evaluation of Corrosion and Deposits: An IEA Co-ordinated Research Project, Rio de Janeiro-RJ-Brasil.

Zscherpel, U., Ewert, U. (2007). Computed Radiography, BAM Berlin Division VIII.3, Kalpakkam, India.

Zscherpel, U., Ekinci, Ş. (2006). Radiographic Evaluation of Corrosion and Deposits in Pipelines: Result of an IAEA Co-ordinated Research Programme, NDT 2006-Mo.2.4.1, İstanbul Turkey.

Url-1 <<http://www.ndt.net/search/docs.php3?id=4516>>, alındığı tarih: 18.04.2011.

Url-2<<http://www.nla.org.za.com/tangentialradiography.pdf>>, alındığı tarih: 06.03.2011.

Url-3<<http://www.varian.com/flatpanelxrayimaging.pdf>>, alındığı tarih: 15.10.2011.

Url-4 <<http://www.mustafasecil.com/dijitalradyoloji.pdf>>, alındığı tarih: 10.05.2011.

Url-5<<http://www.elektronikmuhendisleri.blogspot.com/2010/04/duzlem-panel-dedektorler.html>>, alındığı tarih: 25.06.2011.

Url-6<<http://www.elektronikmuhendisleri.blogspot.com/2010/04/sayisal-dedektorlerde-goruntu.html>>, alındığı tarih: 25.06.2011.

Url-7<<http://www.ndt.net/apcndt2001/papers/1209/1209.html>>, alındığı tarih: 10.05.2011.

Url-8 <<http://www.dqe.com.tr/tahribatsiz-003.php>>, alındığı tarih: 10.05.2011.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Murat ÇOBANOĞLU

Doğum Yeri ve Tarihi: Malatya 31.051977

Adres: Halkalı / İSTANBUL

Lisans: Fizik , Marmara Üniversitesi

