

8341

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ NÜKLEER ENERJİ ENSTİTÜSÜ

RADYOGRAFİK HATA TESBİTİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Astronom Gülten YILMAZ

(N0194.105)

8341

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Ocak 1999

Tezin Savunulduğu Tarih : 1 Şubat 1999

Tez Danışmanı : Prof.Dr. A. Beril TUĞRUL

Diğer Jüri Üyeleri Yrd.Doç.Dr. Filiz BAYTAŞ 26.2.1999

Yrd.Doç.Dr. Ahmet DURMAYAZ 26.02.1999

ŞUBAT 1999

TC. YÜKSEKÖĞRETİM BAKANLIĞI
DOKÜMANTASYON BİRLİĞİ

ÖNSÖZ

Bu Yüksek Lisans Tez çalışması ile hacimsel bir tahribatsız muayene yöntemi olan radyografi tekniği ile farklı hatalar için hata tesbiti ve hata derinliği ve yerinin rasyonel olarak belirlenmesi ve konu ile yapılan çeşitli uygulamalardan alınan sonuçlar verilmeye çalışılmıştır. Sanayide sıkça kullanılan bir teknik olan radyografi ile uğraşanlar için ve bu konuda daha sonra çalışacaklar için bu çalışmanın yardımcı olacağını umarım.

Bu Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Araştırma Fonu'nca Lisansüstü Tezi Araştırma Projesi olarak desteklenmiştir.

Bu Yüksek Lisans Tez çalışmasında her zaman beni destekleyen, her türlü yardımcı benden esirgemeyen ve en kötü şartlarda bana moral veren Sayın Hocam Prof.Dr. Beril TUĞRUL'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca çeşitli konularda yardımlarını esirgemeyen Araş.Gör.Dr. Birsen AYAZ'a, Araş.Gör.Dr. Nesrin ALTINSOY'a , Araş.Gör. Nilgün DOĞAN'a ve Araş.Gör. Burak BARUTCU'ya teşekkür ederim.

Gülten YILMAZ

Ocak 1999

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
2. RADYOGRAFİ	6
2.1. Radyografi Tekniğinin Temel Prensipleri	6
2.2. Girci Elektromanyetik radyasyonlar	10
2.2.1. Girci Elektromanyetik Radyasyonların Madde İle Etkileşimi	12
2.2.2. X-Işınları ve Gama Işınları	16
2.2.2.1. X-Işınlarının Oluşumu	17
2.2.2.2. X-Işın Kaynakları	18
2.2.2.3. Gama Işınları	21
2.3. Radyografik Görüntü Kalite Faktörleri	25
2.3.1. Geometri Faktörü	26
2.3.1.1. Işınlama Geometrisi	26
2.3.1.2. Yarıgölge	27
2.3.2. Kaynak Faktörü	29
2.3.3. Film Faktörü	29
2.3.4. Ekran Faktörü	32
2.3.5. Poz Süresi Faktörü	32
3. RADYOGRAFİK HATA	38
3.1. Radyografik Hata Tesbiti	38
3.2. Görüntü Kalite Tesbit Yöntemleri ve Görüntü Kalite Göstergeleri	40
3.2.1. Penetremetreler (Görüntü Kalite Göstergeleri)	41
3.2.1.1. Delikli Penetremetre	41
3.2.1.2. Telli Penetremetre	42
3.2.1.3. Basamaklı Penetremetre	43
3.3. Radyografik Hata Tipleri	44
3.3.1. Üretim Hataları	44
3.3.1.1. Birincil Hatalar	44
3.3.1.2. Özgül Hatalar	45
3.3.2. İşletme Hataları	52

3.4. Radyografik Hata Derinliğinin Belirlenmesi	52
3.4.1. Paralaks (Çift Işınlama) Metodu	53
3.4.1.1. Benzer Üçgen Bağıntısı	55
3.4.1.2. Rijid Paralaks Metodu	56
3.4.1.3. Tek Markalama Metodu	58
3.4.1.4. Çift Markalama Metodu	59
3.4.2. Radyografik Yoğunluk Metodu İle Hata Derinliğinin Belirlenmesi	64
3.4.3. Çift Film-Çift Çekim Metodu	64
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	65
4.1. Deney Koşulları	66
4.2. X-Işını Radyografisi İle Hata Tesbit Çalışmaları	69
4.2.1. Özel Numuneler Kullanılarak Yapılan Hata Tesbit Çalışmaları	69
4.2.2. X-Işını İle Genel Hata Tesbit Çalışmaları	72
4.3. Gama Radyografisi İle Hata Tesbiti	76
4.3.1. Özel Numuneler Kullanılarak Yapılan Hata Tesbit Çalışmaları	76
4.3.2. Gama Radyografisi İle Genel Hata Tesbit Çalışmaları	79
4.4. Hata Derinliği Tesbit Çalışmaları ve Deney Düzenekleri	80
4.4.1. X-Işını Radyografisi İle Hata Derinliği Tesbit Çalışmaları	80
4.4.1.1. Paralaks Metodu Uygulaması	80
4.4.1.2. Radyografik Yoğunluk Metodu Uygulaması	83
4.4.1.3. Çift film-Çift Çekim Metodu İle Hata Derinliği Tesbiti	84
4.4.2. Gama Radyografisi İle Hata Derinliği Tesbiti	85
4.4.2.1. Paralaks Metodu Uygulamaları	85
4.4.2.2. Radyografik Yoğunluk Metodu Uygulamaları	87
4.4.2.3. Çift film-Çift Çekim Metodu Uygulamaları	88
5. DENEY SONUÇLARI	90
5.1. X-Işını Radyografisi İle Hata Tesbiti Çalışmalarının Sonuçları	90
5.1.1. X-Işını Radyografisi İle Özel Numuneler Kullanarak Yapılan Hata Tesbit Çalışmalarının Sonuçları	90
5.1.2. X-Işını Radyografisi İle Genel Hata Tesbit Çalışmalarının Sonuçları	93
5.2. Gama Işını Radyografisi İle Hata Tesbiti Çalışmalarının Sonuçları	98
5.2.1. Gama Işını Radyografisi İle Özel Numuneler Kullanarak Yapılan Hata Tesbit Çalışmalarının Sonuçları	98
5.2.2. Gama Radyografisi İle Genel Hata Tesbit Çalışmalarının Sonuçları	100
5.3. Hata Derinliği Tesbiti Çalışmalarının Sonuçları	101
5.3.1. X-Işını Radyografisi ile Hata Derinliği Tesbit Çalışmalarının Sonuçları	101
5.3.1.1. X-Işını Radyografisi İle Paralaks Metodu Kullanılarak Yapılan Hata Tesbiti Uygulamalarının Sonuçları	101
5.3.1.2. X-Işını Radyografisi İle Radyografik Yoğunluk Metodu Kullanılarak Yapılan Hata Tesbiti Uygulamalarının Sonuçları	110
5.3.1.3. X-Işını Radyografisi İle Çift Film-Çift Çekim Metodu Kullanılarak Yapılan Hata Tesbiti Uygulamalarının Sonuçları	113

	<u>Sayfa No</u>
5.3.2. Gama Radyografisi ile Hata Derinliği Tesbit alışmalarının Sonuçları	113
5.3.2.1. Gama Radyografisi İle Paralaks Metodu Kullanılarak Yapılan Hata Tesbiti Uygulamalarının Sonuçları	113
5.3.2.2. Gama Radyografisi İle Radyografik Yoğunluk Metodu Kullanılarak Yapılan Hata Tesbiti Uygulamalarının Sonuçları	121
5.3.2.3. Gama Radyografisi İle ift Film-ift ekim Metodu Kullanılarak Yapılan Hata Tesbiti Uygulamalarının Sonuçları	123
6. SONUÇLAR VE TARTIşMA	125
KAYNAKLAR	131
ÖZGEçMİş	133



KISALTMALAR

NDT	: Non-destructive Testing
ASTM	: American Society for Testing and Materials
mA	: Miliamper
MeV	: Milyon elektron volt
kV	: Kilivolt



TABLO LİSTESİ

SayfNo

Tablo 2.1. Gama Radyografisinde Kullanılmış ve Endüstriyel Radyografi İçin Önemli Bazı Radyoizotoplar ve Özellikler.....	7
Tablo 2.2. Co-60 İçin Poz Süresi Tablosu.....	36
Tablo 3.1. Telli penetremetrelerde Tel Kalınlıkları.....	43
Tablo 4.1. X-Işını Radyografi Çekimi Deney Koşulları.....	72
Tablo 4.2. X-Işını Radyografisi İle Genel Malzeme Çekim Koşulları.....	75
Tablo 4.3. Ekstrüzyon Kalıbı, Arkeolojik Dövme Levha ve Alüminyum Profile Ait Deney Koşulları.....	75
Tablo 4.4. Gama Radyografisi Çekim Koşulları.....	78
Tablo 4.5. Gama Radyografisi İle İncelenen Potaya Ait Deney Koşulları.....	79
Tablo 4.6. Hata Derinliği Tesbiti İçin Çekim Koşulları.....	81
Tablo 4.7. Şekil 4.16'daki Işınlamaya İlişkin Deney Koşulları.....	82
Tablo 4.8. Deney Koşulları.....	83
Tablo 4.9. 90°'lik Açılı İle İki Ayrı Radyografik Çekim (Çift Film-Çift Çekim Tekniği).....	84
Tablo 4.10. 40, 50 ve 95 mm Kalınlığındaki Çekim Setleri İçin Deney Koşulları	86
Tablo 4.11. Derinlik-Yoğunluk Çalışmasına Ait Deney Koşulları.....	87
Tablo 4.12. Çift Film-Çift Çekim Deney Koşulları.....	88
Tablo 5.1. 5 Kalınlıklı Numune Seti İle Çekim Seti I Şartlarında Çekilen Radyografların Değerlendirme Sonuçları.....	91
Tablo 5.2. 5 Kalınlıklı Numune Seti İle Çekim Seti II Şartlarında Çekilen Radyografların Değerlendirme Sonuçları.....	92
Tablo 5.3. Hata Referans Parçası B İle Çekim Seti III Şartlarında Çekilen Radyografların Değerlendirme Sonuçları.....	93
Tablo 5.4. Kaynak Dikişi Parçaları İle Ekstrüzyon Kalıbı Parçasında Tesbit Edilen Hatalar.....	97
Tablo 5.5. 13 Farklı Kalınlıktaki Parçalar İçin Çekilen Radyografların Değerlendirme Sonuçları.....	99
Tablo 5.6. Potanın Radyografından Tesbit Edilen Hatalar.....	100
Tablo 5.7. X-Işını Radyografisi İle Yapılan Rijid Paralaks Metodu Uygulama Sonuçları.....	101
Tablo 5.8. X-Işını Radyografisiyle Tek Markalama Yapılarak, Tayin Edilen Radyografik Hata Derinliği Değerleri.....	104

Tablo 5.9. X-Işını Radyografisiyle Çift Markalama Yapılarak, Grafik Yardımıyla	
Tayin Edilen Radyografik Hata Derinliği Değerleri.....	106
Tablo 5.10. Çift Markalama Metodu İkinci Deney Sonuçları.....	110
Tablo 5.11. Radyografik Yoğunluk Metodu Deney Sonuçları.....	111
Tablo 5.12. Çift Film-Çift Çekim Deney Sonuçları.....	113
Tablo 5.13. Gama Radyografisi İle Yapılan Rijid Paralaks Metodu Uygulama	
Sonuçları.....	114
Tablo 5.14. Gama Radyografisiyle Tek Markalama Yapılarak, Grafik Yardımıyla	
Tayin Edilen Radyografik Hata Derinliği Değerleri.....	116
Tablo 5.15. Gama Radyografisiyle Çift Markalama Yapılarak, Grafik Yardımıyla	
Tayin Edilen Radyografik Hata Derinliği Değerleri.....	118
Tablo 5.16. 97 mm Çelik Numuneden Elde Edilen Radyografik Hata Yoğunluğu	
Değerleri.....	121
Tablo 5.17. Gama Radyografisi İle Çift Film-Çift Çekim Deney Sonuçları.....	123

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	Radyografik Çekim Tekniğinin Şematik Görünümü ve Hata Görüntüsünün Oluşumu	7
Şekil 2.2	Radyasyonun Homojen Bir Ortama Geçerken Zayıflaması	8
Şekil 2.3	Elektromanyetik Spektrum	11
Şekil 2.4	Fotoelektrik Olay	12
Şekil 2.5	Compton Saçılması	13
Şekil 2.6	Çift Oluşumu	15
Şekil 2.7	Sürekli X-Işını Spektrumu Üzerinde Karakteristik Tepeler	18
Şekil 2.8	X-Işını Tüpü	19
Şekil 2.9	Gerilim Kumandası İle X-Işını Spektrumunun Değişimi	20
Şekil 2.10	Akım Kumandası İle X-Işını Spektrumunun Değişimi	20
Şekil 2.11	Ir-192 Gama Işın Spektrumu	21
Şekil 2.12	Kararsız Çekirdek Sayısının Zmanala Değişimi	23
Şekil 2.13	Projeksiyon Tipi İzotop Kamerası	24
Şekil 2.14	Geometrik Yarıgölgenin Oluşumu	28
Şekil 2.15	Radyografik Filmin Kesiti	29
Şekil 2.16	Farklı Film Hızlarına Göre Karakteristik Eğriler	31
Şekil 2.17	Co-60 ve Ir-192 İçin Poz Çizelgesi.....	34
Şekil 2.18	X-Işını İçin Poz Çizelgesi.....	35
Şekil 3.1	Delikli Penetremetre	42
Şekil 3.2	Telli Penetremetre	42
Şekil 3.3	Basamaklı Penetremetre	43
Şekil 3.4	Çelik Dökümde Çekme Olukları	46
Şekil 3.5	Çelik Dökümde Çekmeler	46
Şekil 3.6	Sıcak Yırtılma	47
Şekil 3.7	Çelik Döküm Radyografında Çatlak	47
Şekil 3.8	Kümeleşmiş Porozite.....	49
Şekil 3.9	Çizgisel Kök Pasosu Porozitesi	49
Şekil 3.10	Tamamlanmamış veya Yetersiz Penetrasyon	49
Şekil 3.11	Pasolar Ararası Cüruf Kalıntıları	49
Şekil 3.12	Uzamış Cüruf Çizgileri	50
Şekil 3.13	Yan Cidarda Birleşme Eksikliği	50
Şekil 3.14	Yanma Oluğu	50
Şekil 3.15	Kök Alt Kesimi	50
Şekil 3.16	Yüzeyde Konkavlık (Yetersiz Dolgu)	51
Şekil 3.17 (a)	Enine Çatlak	51
Şekil 3.17 (b)	Boyuna Çatlak	51
Şekil 3.18	Nüfuziyetsizlik ve Uyumsuzluk	51
Şekil 3.19	Radyografik Paralaks Prensibi	54
Şekil 3.20	Benzer Üçgen İlişkisi	55

Şekil 3.21 Rijid Formül Paralaks Metodu	56
Şekil 3.22 Tek Markalama Metodu	59
Şekil 3.23 Çift Markalama Metodu	61
Şekil 3.24 Markalama Metodunda Görüntü Kaymasının Grafik İle Gösterilmesi	63
Şekil 4.1 Deneylerde Kullanılan Co-60 Zırhı	67
Şekil 4.2 Deneylerde Kullanılan Gama Cihazına Ait Uzaktan Kumanda Sistemi	67
Şekil 4.3 X-Işını Cihazı Kumanda Konsolu	68
Şekil 4.4 X-Işını Tüpü	68
Şekil 4.5 5 Kalınlık Uygulama İçin Numune Seti	70
Şekil 4.6 X-Işını Hata Referans Parçası A	70
Şekil 4.7 Referans Parçası A Işınlama Düzeneği	71
Şekil 4.8 X-Işını Hata Referans Parçası B	71
Şekil 4.9 Kaynak Dikişi I	73
Şekil 4.10 Kaynak Dikişi II	73
Şekil 4.11 Kaynak Dikişi III	74
Şekil 4.12 Kaynak Dikişi IV	74
Şekil 4.13 Alüminyum Profil	75
Şekil 4.14 Gama Radyografisi Test Parçalarının Toplu Halde Gösterimi.....	76
Şekil 4.15 Gama Radyografisi Test Parçası Işınlama Düzeneği	77
Şekil 4.16 X-Işını Hata Derinliği Tespiti, Test Parçası ve Işınlama Pozisyonu ...	81
Şekil 4.17 Hata Derinliği Test Parçası	82
Şekil 4.18 Yapay Delikler Açılmış Numune	83
Şekil 4.19 Çift Film-Çift Çekim Numunesi	84
Şekil 4.20 Çekim Seti 1 İçin 95 mm'lik Çelik Numune	86
Şekil 4.21 Derinlik-Yoğunluk Çalışmasına Ait Test Numunesi.....	87
Şekil 4.22 Çift Film-Çift Çekim İçin Numune	89
Şekil 5.1 Çekim Seti I'e Ait Radyograf	91
Şekil 5.2 Arkeolojik Dövme Levhanın Radyografisi	94
Şekil 5.3 Alüminyum Profil Radyografisi	94
Şekil 5.4 Kaynak Dikişi I Radyografisi	95
Şekil 5.5 Kaynak Dikişi II Radyografisi	95
Şekil 5.6 Kaynak Dikişi III Radyografisi	96
Şekil 5.7 Kaynak Dikişi IV Radyografisi	96
Şekil 5.8 Radyograf Ekstrüzyon Kalıbı	97
Şekil 5.9 Potanın Radyografisi	100
Şekil 5.10 Rijid Paralaks Metodu İle Elde Edilen Radyograf Üzerinde Hata Kaymaları	102
Şekil 5.11 Rijid Paralaks Yöntemi İle Bulunan Hata Derinliklerinin Gerçek Değeriyle Karşılaştırılması	103
Şekil 5.12 Tek Markalama Metodu İle Tayin Edilen Radyografik Hata Derinliği Değerleri	105
Şekil 5.13 Çift Markalama İle Çekilen Malzeme Radyografisi	107
Şekil 5.14 Görüntü Kayması-Malzeme Kalınlığı (Hata Derinliği) Grafiği	108
Şekil 5.15 Çift Markalama Yöntemi İle Tayin Edilen Radyografik Hata Derinliği Değerlerinin Gerçek Değerleri İle Karşılaştırılması.....	109

Şekil 5.16	Radyograf Üzerinde Hata Yoğunlukları.....	111
Şekil 5.17	Hata Yüksekliği-Radyografik Film (D.....	112
Şekil 5.18	Gerçek Derinlik-Radyografik Derinlik İlişkisi	115
Şekil 5.19	Tek Markalama İle Elde Edilen Derinliklerin, Gerçek Değerleri İle Karşılaştırılması	117
Şekil 5.20	Görüntü Kayması-Malzeme Kalınlığı (Hata Derinliği) Grafiği.....	119
Şekil 5.21	Çift Markalama Metodu İle Tayin Edilen Radyografik Derinliklerin Gerçek Değerleri İle Karşılaştırılması.....	120
Şekil 5.22	Hata Yüksekliği-Radyografik Film Yoğunluğu	122
Şekil 5.23	1. Kalınlık İçin Çift Film-Çift Çekim Radyografi	124
Şekil 5.24	2. Kalınlık İçin Çift Film-Çift Çekim Radyografi	124
Şekil 6.1	Paralaks Metodları İle Elde Edilen Sonuçların X-Işın Radyografisi İçin Grafikselleştirilmesi.....	128
Şekil 6.2	Paralaks Metodları İle Elde Edilen Sonuçların Gama Radyografisi İçin Grafikselleştirilmesi	129



SEMBOL LİSTESİ

A	: Görüntü almalar arasındaki kaynak kayması
α	: Saçılan fotonun enerji oranı
α_0	: Gelenan fotonun enerji oranı
B	: Hatanın görüntü kaymasının paralaksı
B_1	: Süreksizliğin görüntü kayması
B_2	: M_1 markasının yer değiştirme miktarı
B_3	: M_2 markasının yer değiştirme miktarı
ΔB_r	: Hata kaymasının, alt marka (M_2) kaymasından farkı
ΔB_{mal}	: Üst marka (M_1) kaymasının, alt marka (M_2) kaymasından farkı
c	: Işık hızı
e	: Elektron yükü
D	: Fotoğrafik yoğunluk
D_0	: Kaynak-malzeme uzaklığı
d	: Süreksizlik kalınlığı
d'	: Malzeme-film uzaklığı
d_m	: Malzeme film uzaklığı
d_1	: 1 noktasının radyasyon kaynağından olan mesafesi
d_2	: 2 noktasının radyasyon kaynağından olan mesafesi
E	: Foton enerjisi
E'	: Saçılan fotonun enerjisi
E_b	: Elektronun bağ enerjisi
E_e	: Elektronun kinetik enerjisi
E_0	: Soğurulan fotonun enerjisi
E'_0	: Gelen fotonun enerjisi
E_-	: Elektronun enerjisi
E_+	: Pozitronun enerjisi
F	: Kaynak boyutu
h	: Planck sabiti
H	: Görüntü düzleminden hatanın yüksekliği
H_f	: Hatanın film tarafındaki markalama elemanı üzerindeki yüksekliği
H_k	: Süreksizliğin kaynak doğrultusundaki yüksekliği
I	: Malzemeyi geçen radyasyon şiddeti
I'	: Radyasyon şiddeti
I_d	: Süreksizliğin bulunduğu bölgeden geçen radyasyon şiddeti
I_1	: 1 noktasındaki radyasyon şiddeti
I_2	: 2 noktasındaki radyasyon şiddeti
I_0	: Malzeye (test parçasına) gelen radyasyon şiddeti
K_1	: Kaynak pozisyonu 1
K_2	: Kaynak pozisyonu 2
λ	: Elektromanyetik radyasyonun dalga boyu
λ'	: Bozunum sabiti
λ_c	: Compton saçılması yapmış olan fotonun dalga boyu

λ_{min}	: Minimum dalgaboyu
λ_0	: Gelen fotonun dalgaboyu
M_1	: Kaynak tarafındaki marka
M_2	: Film tarafındaki marka
m_e	: Elektronun kütlesi
μ	: Lineer soğurma katsayısı
μ_d	: Cürufun lineer soğurma katsayısı
N	: Çekirdek sayısı
N_0	: Başlangıçtaki çekirdek sayısı
ν	: Elektromanyetik Radyasyonun frekansı
ν_0	: Gelen fotonun frekansı
P	: Radyasyon dozu
P'	: Grafiklerden ve her bir film için ayrı ayrı bulunan poz faktörü
S	: Curie olarak kaynak aktivitesi
t	: Zaman
t_1	: Işınlama süresi
t_p	: Poz süresi
T	: Kaynak-film uzaklığı
T_m	: Kaynak malzeme uzaklığı
$T_{1/2}$	: Radyoizotopun yarıömrü
θ	: Saçılma açısı
U_g	: Yarıgölge
$\mathcal{J}$	: Elektronun hızı
V	: Anod ile katod arasındaki gerilim
x	: Malzeme kalınlığı
X_f	: M_1 markasının filme uzaklığı
X_{mal}	: Kaynak tarafındaki markalama elemanı ile film tarafındaki markalama elemanı arasındaki uzaklık (malzeme kalınlığı)
x_m	: Parça kalınlığı

RADYOGRAFİK HATA TESBİTİ

ÖZET

Radyografi tekniği hacimsel bir tahribatsız muayene yöntemidir. Bu tekniğin ana kullanım amacı malzeme içindeki süreksizliklerin tespittir. Parçanın toleransları çerçevesinde kabul edilemeyecek süreksizlikler ise hata olarak nitelendirilmektedir.

Bu çalışmada, farklı hata tiplerinin radyografi ile tespit edilen görüntüleri ile imalat tekniğine göre değişen hata tipleri tanıtılmış ve deneysel olarak çekilen radyograflar üzerindeki ilgili hata görüntülerine yer verilmiştir. Bunlardan ayrı olarak, hata yerinin tespiti konusu incelenmiştir. Bazı özel numuneler kullanılarak çekilen radyografların, radyografik hassasiyetleri tayin edilmiştir. Ayrıca, genel kullanımda olan numunelerle de radyografik çekimler yapılmış ve farklı hata tipleri tespit edilmiştir.

Radyografik hata tespiti için X-ışını radyografisi ve gama ışını radyografisi ile farklı ışınlamalar yapılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. X-ışını radyografisi için endüstriyel bir X-ışını tüpü ve gama ışını radyografisi için ise Co-60 radyoizotopu gama kaynağı olarak kullanılmıştır.

Malzeme iç yapısına ilişkin olarak iki boyutlu görüntü alma tekniği olan radyografide, hatanın iki boyuttaki düzlemsel yeri kolay tespit edilebilmekte ise de, üçüncü boyuttaki yerinin tesbiti genellikle zorluklar arz etmektedir ve çoğu kez tek radyografik çekimle hata yeri üç boyutlu olarak tesbit edilememektedir. Hatanın üçüncü boyuttaki yerinin tesbiti için bu yüksek lisans tezi çalışması çerçevesinde çift film-çift çekim tekniği, paralaks metodu ve bu metodun değişik uygulamaları ile radyografik yoğunluk metodu detaylarıyla tanıtılmıştır. Her teknikle deneyler ayrı ayrı yapılmış ve elde edilen sonuçlar birbirleriyle mukayeseli olarak değerlendirilmiştir.

RADIOGRAPHIC FLAW DETECTION

SUMMARY

Radiography is a volumetric non-destructive testing method and its essential usage purpose is the defect detection at the inner part of the materials. Unacceptable defects which are determined by comparing with the tolerance limits of the object, are defined as flaw for the materials.

In this study, different types of the flaw and the special defects are defined by their images on the realistic experimental radiograph. Moreover, the determination of the flaw place in the material is investigated rationally. Some special samples are used for determination of sensitivity of the radiographs. Furthermore, some general purpose objects are also used for determination of flaw, e.g welding parts, case and plate etc.

For the flaw detection, different exposure are applied for X-ray and gamma ray radiography. For the X-ray radiography an industrial X-ray tube is used, and for the gamma radiography Co- 60 radioisotope is used as a gamma source.

For the radiography which is a technique for taking an inner image of the material, the determination of the flaw place is easy on two dimensional plane, but it is difficult to determine at the third dimension. For this purpose, taking the double film-double exposure technique, parallax technique and its versions, radiographic density technique are reviewed in detailed. With the experiments all of the techniques are applied and evaluated by comparatively each other.

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM BAKANLIĞI
DOKÜMAN İŞLERİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ**

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Çağımızda ilerleyen teknoloji ile birlikte, üretilen ürünlerin niteliğinin de bilinmesi istenmektedir. Bu amaçla, ürünün zarar görmeyecek şekilde kontrol ve denetiminin yapılması önem kazanmıştır. Bu önemin gereği olarak; malzemedeki süreksizlikleri veya hataları malzemeye zarar vermeden tespit etme prensibine dayanan “*tahribatsız muayene metotları*” geliştirilmiştir

Nükleer teknolojinin gelişimi, 1895 yılında Roentgen’in X-ışınlarını keşfiyle başlamıştır. Daha sonra yapılan çalışmalarla, 1896 da ‘*radyoaktivite*’ olarak tanımlanan, madde için yeni bir özellik keşfedilmiş ve bu özelliğe sahip izotoplara ise ‘*radyoizotop*’ adı verilmiştir (Gardner ve Ely, 1967).

Nükleer reaktörlerin çalışmaya başlamasıyla radyoizotop çeşidi artmış ve bu sayede radyoizotoplar bilimin her dalında, örneğin; tıpta, endüstride, tarımda sayısız uygulamaları ile günlük hayata girmişlerdir.

Endüstride imal edilen ürünlerin kalite kontrolü için radyoizotoplar önemli ölçüde kolaylık sağlamışlar ve değişik tekniklerin gelişimine olanak vermişlerdir. Günümüzde modern endüstriyel üretim alanında, kalite kontrolü, üreticinin ürün karakteristiklerinin kontrolünde ve öngörülen ihtiyaçlara uygunluğunun sınanmasında vazgeçilemez bir araç olmuştur. Kalite temini ise, ürünün oluşturulan ve tespit edilen esaslara, uygunluk göstermesini sağlayan önemli bir faaliyet olarak karşımıza çıkmaktadır.

Tahribatlı testler test edilen malzemeyi bozarlar. Bu testlerde genellikle parça bükülür, kırılır ve asıl işlevine mani olunur. Malzemeyi bozduklarından, genellikle de pahalıya mal olurlar ve kullanım alanı kısıtlanır. Tahribatlı testler; test edilmeyen parçaların, test edilenle aynı kalitede olması gerektiğini kabul ederler. Böyle bir kabul başlangıç üretimi için yeterli değildir.

Tahribatsız testler, malzemenin fiziksel kalitesini veya kullanımını bozmadan onun kalitesini tayin edebilir. Bu yüzden, tahribatsız testler tahribatlı testlere nazaran günümüzde tercih edilmektedir. Böylelikle bütün parçaların kalite standartlarına uygunluğundan emin olunabilmektedir. Bir başka deyişle, günümüzün ilerleyen teknolojisi ve talebin gereği olarak, üretilen ürünlerin niteliğinin bilinmesi, bu amaçla ürünün zarar görmeyecek şekilde kontrol ve denetiminin yapılması önem kazanmıştır. Tahribatsız test teknikleri, doğrudan ürün üzerine uygulanabilirler. Fazla olarak; üretim aşamasında, ürünün bir kısmı veya tamamına uygulanabilir ve de tekrarlanabilirler. Ayrıca malzemenin farklı özelliklerine yönelik hızlı ve kolay bilgi verirler (Bray ve McBride, 1992)

Tahribatsız test yöntemleri arasında sayılabilecek bir çok teknik olmakla beraber, bugün endüstriyel amaçlı kullanılan tahribatsız test yöntemleri; malzemenin yüzeyinde ve hemen yüzey altında bulunan süreksizlikleri saptayan yüzey yöntemleri (sıvı penetrant, manyetik parçacık, girdap akımları), malzemenin içindeki ve incelenen kısmın tamamına ilişkin süreksizlikleri saptayan hacimsel yöntemler (radyografi, ultrasonografi, termografi) ve malzemenin tamamını aynı anda muayene edebilen bileşik yöntemler (kaçak testi, kabarcık testi, akustik emisyon vb.) olarak sayılabilir.

Bu aşamada yukarıda sözü geçen ve temel sorunu oluşturan, süreksizlik ve hata tanımının yapılmasında yarar vardır. Süreksizlik, herhangi bir malzemenin normal yapısında, çatlak, katlanma, cüruf vb. yabancı maddeler, gözenek vb. nedenlerden ileri

gelen kesikliklerdir. Bir süreksizlik malzemenin güvenilir bir şekilde kullanımını mutlak surette etkilemeyebilir (Nicholas, 1982).

Süreksizlikleri, mikro ve makro olarak ikiye ayırmak mümkündür. Tane sınırları, kristal kafesteki boşluklar ve çarpıklıklar mikro süreksizlikler olup, tahribatsız test yöntemleri ile algılanmaları mümkün değildir. Makro süreksizlikler, malzemenin üretimi, şekillendirilmesi ve işletmede kullanımı esnasında meydana gelir ve tahribatsız yöntemlerle test edilebilirler. Bir metalde çatlak, delik vb. gibi sürekliliği bozan her olgu süreksizliktir. Süreksizlik, metalin yüzeyinde veya içinde olabilir.

Hatalar birer süreksizlik olup, standartların müsaade ettiği sınırı aştıklarında hata olarak vasıflandırılırlar ve malzemenin güvenilir bir şekilde kullanımını engellerler. Herhangi bir tahribatsız test yöntemini bilinçli bir şekilde kullanabilmek için, malzemelerde süreksizliklerin niçin bulunabileceğini ve süreksizliklerin bu şekillerini nasıl aldıklarını anlamak gerekir. Bütün metallerde süreksizlik veya hataların nedeni ve şekilleri benzerdir. Bu süreksizlik veya hatalar; cüruf (slag), gaz kabarcıkları veya gözenek (porosity), kanalcıklar, laminasyon, dövme süreksizlikleri (dövme katlanmaları, dövme çatlakları), döküm süreksizlikleri (soğuk katlanma, sıcak yırtılma, çekme boşluğu), yorulma çatlakları, taşlama çatlakları, kaynak süreksizlikleri vb. olarak bilinirler (Sharpe, 1970).

Her tahribatsız test yöntemi kendi avantajlarına ve dezavantajlarına sahiptir. Bir malzemede tüm hataları bulacak kapasitede metod yoktur. Her tahribatsız test yöntemi ve tekniği için öyle bir hata boyutu vardır ki, bu büyük bir olasılıkla bulunamaz. Bulunabilecek minimum hatanın mutlak büyüklüğünden ayrı, bir de olasılık faktörü vardır. Büyük hatalar daha büyük olasılıkla bulunur (Bryant ve McIntire, 1985).

Hacimsel hataların tespitinde en çok kullanılan tahribatsız test yöntemlerinden ikisi radyografik ve ultrasonik testlerdir. Bu iki metod farklı temel prensiplere dayanmakla beraber, malzeme iç yapısı hakkında bilgi verirler. Radyografik hata bulma, hatadan ve geri plandaki malzemedan radyasyonun soğrulma farkına dayanır.

Tahribatsız muayene yöntemleri içerisinde önde gelen ve yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan radyografi, dünyanın birçok yerinde başarıyla uygulanmaktadır. Endüstride üretimin her aşamasından montaja kadar çok geniş bir alanda kullanılan radyografi yöntemiyle madde iç yapısına ilişkin bilgi edinilebilmektedir (Mix,1987).

Radyografi hemen her tür ve boyutta malzemeye uygulanabilen hassas bir yöntemdir. Bu yöntemin kalite temini ve kalite kontrolünde kullanılan diğer tahribatsız testlere (ultrasonografi, sıvı penetrant, manyetik parçacık, girdap akımları) oranla malzeme hakkında sağladığı bilgi hayli fazla ve güveniliridir.

Hacimsel bir yöntem olan radyografi yönteminde, malzeme içerisindeki süreksizlikler veya hatalar malzemenin yapısını tahrip etmeden üretimin her aşamasında belirlenerek, yeni ürünlerin tasarımına ve yeni üretim tekniklerinin geliştirilmesine olanak sağlarlar. Bu yüzden radyografik testler kalite temin programının önemli bir kısmını oluşturur. Radyografik hata tespitinin önemi; ürünün hizmet verebilirliğinin belirlenebilmesinde kendini gösterir. Bu ise radyografinin kalite kontrol programındaki önemli yerini belirler.

Böylelikle, günümüzde giderek vazgeçilmez bir olgu olarak ortaya çıkan ve “*kalite güvence*” olarak nitelenen faaliyetler içinde, bir başka deyişle, kalite temin ve kalite kontrol programlarının bütününde, tahribatsız muayene metodlarının yeri yadsınmaz. Tahribatsız muayene metodları içinde ise, hacimsel ve güvenilir bir yöntem olan radyografinin ayrı ve önemli bir yeri vardır (Sharpe, 1982).

Radyografi ile tespit edilen hataların radyograf üzerindeki görüntüleri iki boyutludur. Üçüncü boyut olan, hatanın radyasyon demeti yönündeki boyutunu radyograf üzerindeki görüntüden doğrudan yorumlamak mümkün değildir. Hata yüksekliği olarak da tanımlanan bu boyutu belirlemek ayrı bir önem taşır.

Bu Yüksek Lisans Tez çalışmasında, nükleer bir teknik olan endüstriyel radyografi yöntemiyle hata tespiti esas alınmış ve radyografi yöntemi uygulanarak malzeme

içerisindeki çeşitli hataların belirlenmesi amaçlanmıştır. Buna ek olarak, bazı radyografi teknikleri kullanılarak, malzeme iç yapısındaki hataların yerlerinin, üç

boyutlu olarak belirlenmesine yönelik, hata derinliği tespiti hedeflenmiştir. Bir başka deyişle, bu yüksek lisans tezinin amacı, yaygın kullanımı bulunan, hacimsel bir yöntem olan radyografi ile endüstriyel uygulama çerçevesinde hata tespiti ve üçüncü boyuttaki hata derinliğinin belirlenmesi ile hata değerlendirmesinin yapılmasıdır.



BÖLÜM 2

RADYOGRAFİ

2.1. RADYOGRAFİ TEKNİĞİNİN TEMEL PRENSİPLERİ

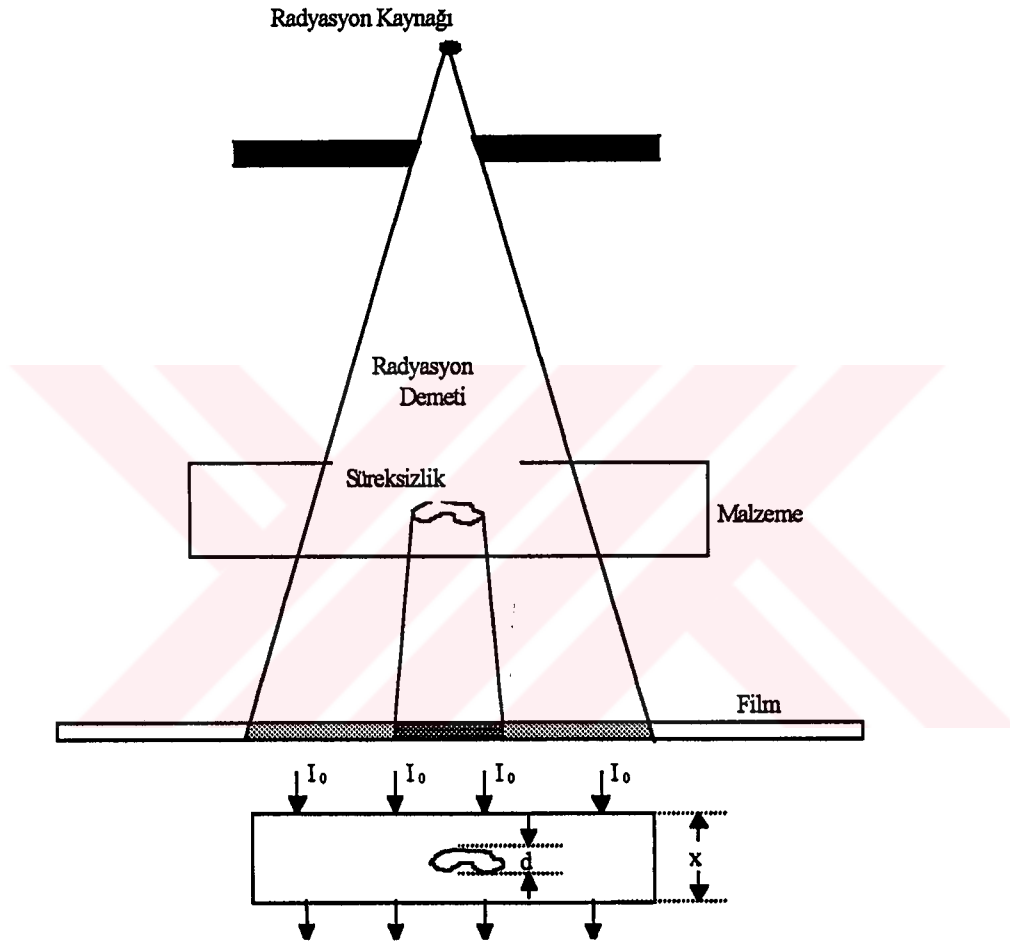
Radyografi; girici ışınlarla malzeme iç yapısına ilişkin ayrıntılı bir şekilde görüntü elde edilmesi tekniğidir. Radyografi, bir cismin sadece profilini değil aynı zamanda kalınlık farklarını, iç yapıdaki süreksizliklerini görünür hale getiren bir yöntemdir.

Radyografide elektromanyetik radyasyon olarak; X ve gama ışınları, parçacık radyasyonu olarak da nötronlar, elektronlar, betalar ve protonlar kullanılabilmektedir. Endüstrinin gereksinmelerine en iyi yanıt veren girici ışın tipi olması nedeniyle, X ve gama ışınları endüstriyel radyografide kullanılmaktadır. Bir başka deyişle, endüstriyel radyografi, X ve gama radyasyonlarının kullanıldığı radyografi teknikleridir. Kullanılan radyasyonun cinsine göre, teknik; “X-ışını radyografisi” veya “gama ışını radyografisi” adını alır.

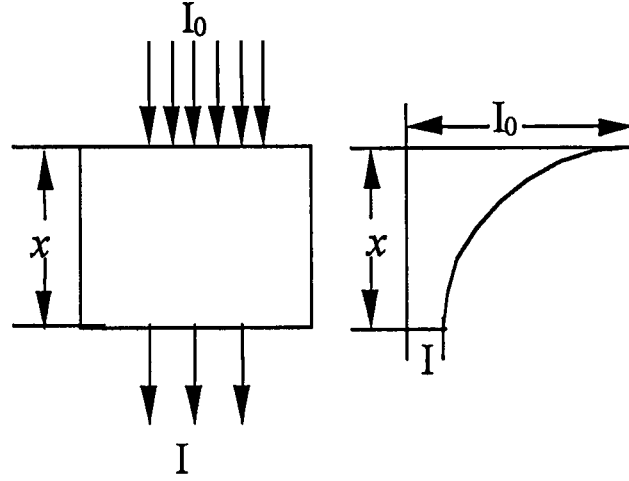
Radyografide görüntü çoğunlukla “film” adı verilen bir eleman üzerine alınır. Bu teknikte; nüfuz edici radyasyon kaynağı, malzemenin bir tarafına ve film malzemenin diğer tarafına yerleştirilir. Şekil 2.1 de radyografik çekim tekniği şematik olarak gösterilmiştir.

Eğer test parçası homojen bir yapıya sahipse, filmde (parçaya karşı gelen bölümde) homojen bir kararma meydana gelecektir. Aksine olarak parça homojen değilse veya farklı kalınlıklara sahipse, film üzerine gelen radyasyon şiddeti farklı olacağından filmdeki kararma da farklı olacaktır. Radyasyonun giriciliği öyle olmalıdır ki; makul bir ışınlama süresi içinde, tatmin edici bir radyograf oluşturmak için malzeme içerisinden yeterli radyasyon iletilmiş olsun. Böyle malzeme iç yapısına ilişkin olarak

bilgi taşıyan ve yeterli ışınlamayı almış filme “Radyograf” denir. Radyografik muayene altındaki bir malzemenin radyografik görüntüsünün oluşumu, radyasyonun malzeme tarafından azaltılması prensibine dayanır. Şekil 2.2’ de bu durum gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Radyografik Çekim Tekniğinin Şematik Görünümü
ve Hata Görüntüsünün Oluşumu



Şekil 2.2 Radyasyonun Homojen Bir Ortamı Geçerken Zayıflaması

Radyasyonun azalmasını ifade eden bağıntı;

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.1)$$

dir. Burada;

I_0 : Malzemeye (test parçasına) gelen radyasyon şiddeti,

I : Malzemeyi geçen radyasyon şiddeti,

μ : Lineer soğurma katsayısı,

x : Malzeme kalınlığını gösterir.

Eğer malzemenin toplam kalınlığı x ise ve d kalınlığında bir süreksizliğe sahipse, süreksizliğin bulunduğu bölgeden geçen radyasyon şiddeti,

$$I_d = I_0 e^{-\mu(x-d)} \quad (2.2)$$

olacaktır. Bu eşitlik, süreksizlik boşluk olduğu zaman geçerlidir. Zira boşlukta malzeme olmadığından absorpsiyon olmaz. Hava ortamının da, girici elektromanyetik radyasyonu soğurmadığı kabul edilir.

Süreksizlik bir cüruf olduğu zaman bu cürufların da bir zayıflatması olacağından, Denklem 2.2:

$$I_d = I_0 e^{-\mu(x-d)-\mu_d d} \quad (2.3)$$

şeklini alacaktır. Burada; μ_d , cürufun lineer soğurma katsayısını ifade etmektedir.

$$\begin{aligned} \text{Eğer ;} \quad \mu_d = 0 < \mu \quad \text{ise} \quad I_d &> I \\ \mu_d > \mu \quad \text{ise} \quad I_d &< I \text{ olur.} \end{aligned}$$

Şimdi Denklem 2.3:

$$I_d = I_0 e^{-\mu[x-d(1-\mu_d/\mu)]} \quad (2.4)$$

olarak düzenlenebilir ve

$$\Delta d = d(1 - \mu_d / \mu) \quad (2.5)$$

tanımlaması yapılırsa Dk.2.4:

$$I_d = I_0 e^{-\mu(x-\Delta d)} \quad (2.6)$$

haline getirilebilir.

Denklem 2.6'dan anlaşılacağı gibi malzeme içindeki bir süreksizliğin, filmde oluşturduğu kararırma farklılığı, malzemede kalınlık değişimi olduğundaki gibidir. Malzeme içindeki bir boşluk, örneğin; gözenek, kanalcık, çatlak vb. süreksizlikler ışınların geçtiği malzeme kesitini küçülttüğünden film üzerinde koyu lekeler şeklinde görülür. Başka bir deyişle, radyografa, ana malzemedan daha az yoğun süreksizlikler koyu lekeler halinde, ana malzemedan daha yoğun süreksizlikler ise açık lekeler halinde görülür.

2.2.GİRİCİ ELEKTROMANYETİK RADYASYONLAR

Radyasyonun iki temel şekli vardır; parçacık (partikül) radyasyonu ve elektromanyetik radyasyon. Endüstriyel radyografide girici elektromanyetik radyasyon kullanılmaktadır. Girici elektromanyetik radyasyonlar olarak X ve gama ışınları kastedilmektedir. Oysa, elektromanyetik radyasyon, X ve gama ışınlarından ayrı, radyo dalgaları, kızılaltı (infrared), görünür ışık, morötesi (ultraviole) ve kozmik ışınlardan oluşur.

Elektromanyetik radyasyonu fotonlar oluşturur. Fotonlar, kütesiz, enerji paketçikleridir ve dalga tabiatı gösterirler. X ve gama ışınları elektromanyetik spektrumun sadece bir kısmını oluştururlar. Şekil 2.3 elektromanyetik spektrumunu göstermektedir.

Fotonlar küçük enerji paketçikleri olduklarından elektrik yükleri ve kütleleri yoktur, ışık hızı ile hareket ederler ve yavaşlatılamazlar. Manyetik momentleri yoktur. Enerji ile frekans arasında doğru orantı vardır ve foton enerjisi;

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.7)$$

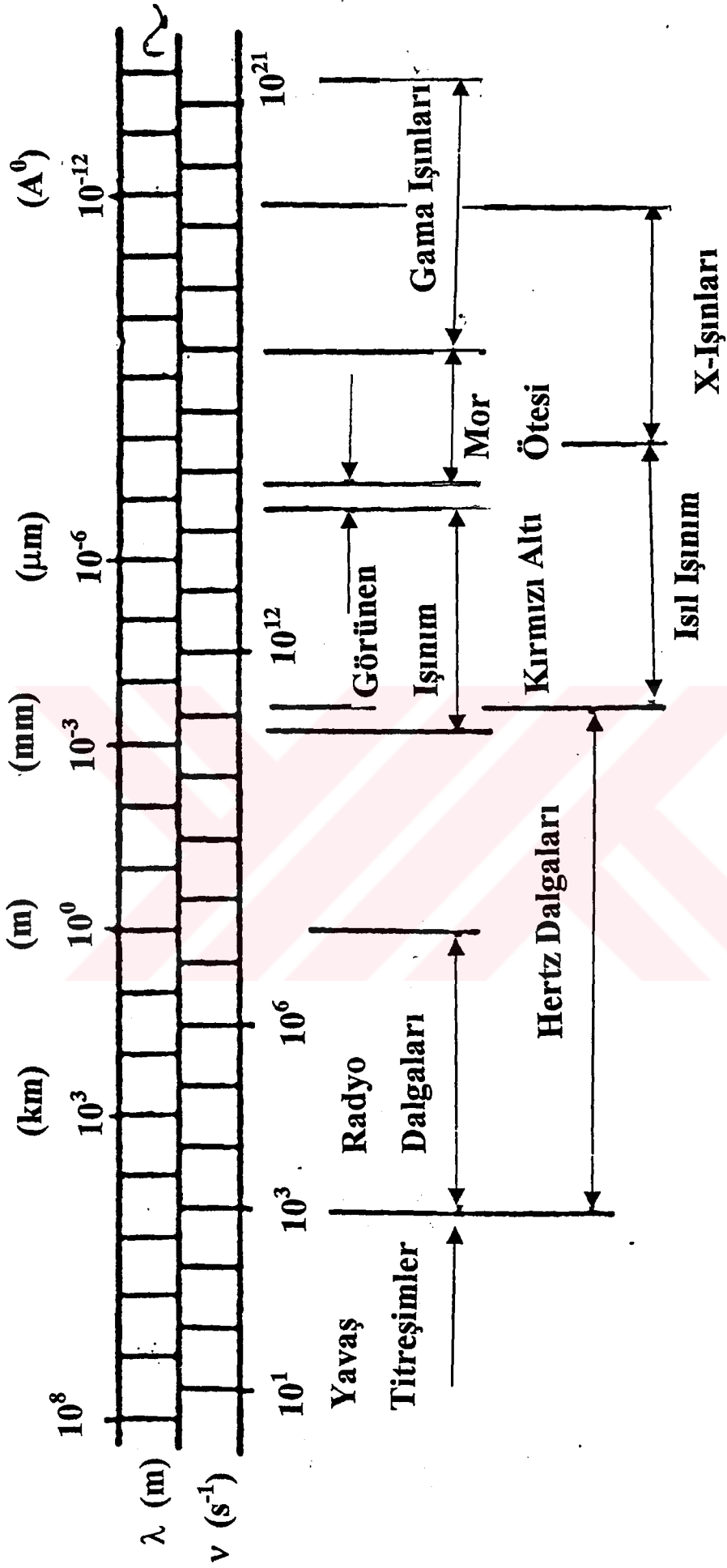
olarak ifade edilir. Burada;

E: Foton enerjisi

h : Planck sabiti

ν : Elektromanyetik radyasyonun frekansı

λ : Elektromanyetik radyasyonun dalgaboyudur.



Şekil 2.3 Elektromanyetik Spektrum (Öztürk ve Yavuz, 1995)

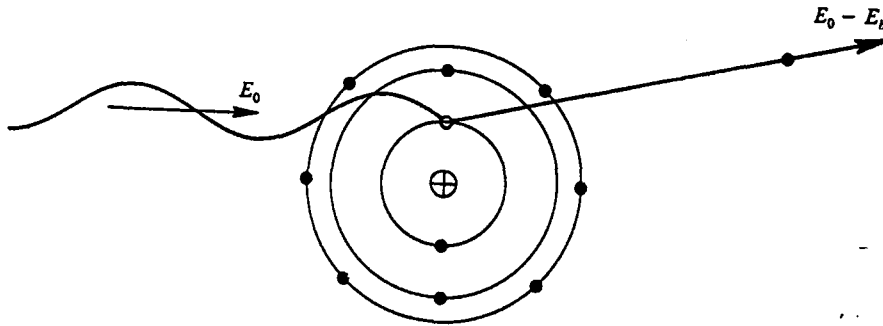
2.2.1. Girici Elektromanyetik Radyasyonların Madde İle Etkileşimi

Girici elektromanyetik radyasyonlar (X veya gama ışını) madde içinde yol alırken, saçılmalara ya da soğurulmalara maruz kalır ve radyasyon şiddetinde azalma meydana gelir. Malzemeyi geçen radyasyon orjinal radyasyon değildir ve radyografide görüntü oluşumu, girici elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşimindeki farklılıklardan kaynaklanır (Foldiak, 1986)

Foton, tek bir olayla, örneğin bir yörünge elektronu ile çarpışarak, bütün enerjisini yitirip yok olabilir veya enerjisi azalıp yolundan sapabilir. Fakat hızı değişmez. Diğer bir deyişle foton için ya ışık hızı ile gitmek veya yok olmak halleri söz konusudur. Elektromanyetik radyasyonların madde ile etkileşimleri; fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumu şeklindedir.

Fotoelektrik olay, fotonun bir elektrona çarparak yok olması ve yok olan fotonun sahip olduğu tüm enerjiyi alan elektronun, yörüngeden koparak bir iyon çiftinin oluşmasıdır. Foton yok olmuş, yerine enerjitik serbest bir elektron doğmuştur, bu elektrona “fotoelektron” denir. Fotonun enerjisi yükseldikçe fotoelektrik olay etkinliğini kaybeder.

Foton-elektron etkileşimleri düşük enerjilerde dış, yüksek enerjilerde iç yörüngelerde ağırlık kazanır. (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Fotoelektrik Olayı (Bray ve Stonley, 1989)

E_0 soğurulan fotonun enerjisi, E_b elektronun bağ enerjisi ve E_e elektronun kinetik enerjisi olmak üzere, enerjinin korunumu

$$E_0 = E_e + E_b \quad (2.8)$$

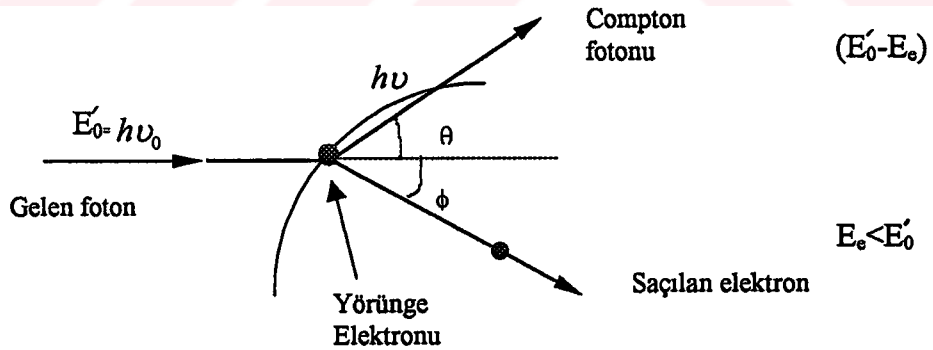
şeklindedir.

Elektronun kinetik enerjisi, m_e elektronun kütlesi ve ϑ elektronun hızı olmak üzere,

$$E_e = \frac{1}{2} m_e \vartheta^2 \quad (2.9)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Compton Saçılması; atom yörüngesine giren foton, enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır, foton daha küçük bir enerji ile ve doğrultusundan sapmış olarak yoluna devam eder. Saçılan yörünge elektronu aldığı enerji ile yörüngeden koparak bir iyon çifti oluşmasına neden olur. Şekil 2.5 (Becker, 1990).



Şekil 2.5 Compton Saçılması

yazılabilir. Burada λ_c Compton saçılması yapmış olan fotonun dalgaboyu, α_0 gelen fotonun enerji oranı, λ_0 gelen fotonun dalga boyu, α saçılan fotonun enerji oranı ve θ saçılma açısı olup;

$$\alpha_0 = h\nu_0/mc^2 \quad (2.13)$$

$$\lambda_0 = 1/\alpha_0 \quad (2.14)$$

$$\alpha = h\nu/mc^2 \quad (2.15)$$

$$\lambda_c = 1/\alpha \quad (2.16)$$

şeklinde ifade edilebilir (Halmshaw, 1995).

Gelen foton ile saçılan foton enerjisi arasında;

$$E' = \frac{0.51}{1 - \cos\theta + 0.51/E_0} \quad (2.17)$$

bağıntısı vardır.

Burada

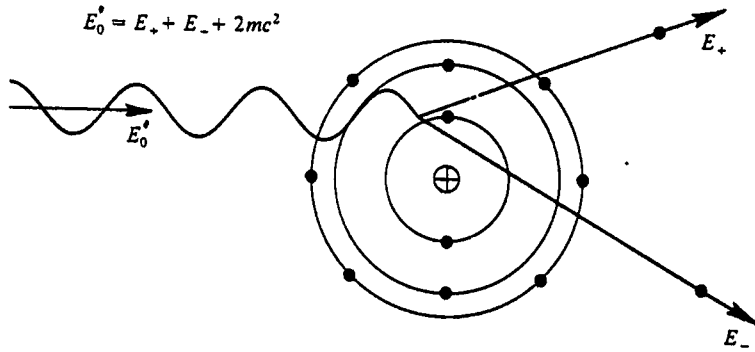
E'_0 : gelen foton enerjisi

E : saçılan foton enerjisi ve

θ : saçılan fotonun sapma açısıdır.

Çift oluşumu; yüksek enerjili bir fotonun, atom çekirdeğinin kuvvetli elektrik alanında bir elektron-pozitron çiftine dönüşmesi olayıdır. Çift oluşumunda foton kaybolur ve yerine eşit kütleli fakat zıt elektrik yüklü iki maddesel parçacık doğar (Şekil 2.6).

Bu olay yalnızca 1.02 MeV' den büyük enerjili birincil fotonlarla mümkündür. Elektronun duran kütlesi 0.51 MeV olduğundan elektron-pozitron çiftinin toplam kütlesi 1.02 MeV olur ve gelen fotonun enerjisi bu değerin üzerinde olduğunda fazla enerji elektron-pozitron çiftine kinetik enerji olarak aktarılır.



Şekil 2.6 Çift Oluşumu (Bray ve Stonley, 1989)

2.2.2. X-Işınları Ve Gama Işınları

X ve gama ışınları benzer elektromanyetik radyasyonlardır. Aralarındaki temel fark orijinleridir. X-ışınları, atom uzayından, gama ışınları ise radyoaktif elementlerin çekirdeklerinden yayınlanırlar (Bray ve Stonley, 1989).

X ve gama ışınları elektromanyetik radyasyon ailesi içinde kısa dalga boylu bölgede yer alırlar. Dalga boyu bunların enerjilerini ve dolayısıyla giriciliklerini tayin eder. Dalga boyu küçüldükçe giricilik artar. Aksine olarak ise, dalga boyu arttıkça, enerji ve giricilik azalır.

X-ışınları ve gama ışınları; genel olarak gösterdiği ortak özellikleri:

- Foton şeklinde yayınlanırlar,
- Fotoğraf filmine etki ederler,
- Bazı malzemelerde floresans ve fosforesans meydana getirirler,
- Elektrik veya manyetik alanlardan etkilenmezler,
- Doğrusal olarak hareket ederler,
- Işık hızı ile hareket ederler ($3 \cdot 10^8$ m/s),
- Canlı dokulara zarar verebilirler,
- Dalga özelliği gösterirler.

2.2.2.1. X-Işınlarnın Oluşumu

X-ışınları karakteristik ve frenleme tipi olmak üzere iki tiptirler. Karakteristik X-ışınları çizgisel, frenleme tipi X-ışınları ise geniş spektruma sahiptirler. Radyografide frenleme tipi X-ışınları kullanılır.

Frenleme Tipi (Bremsstrahlung) X-ışınları

Yüksek hızlı ve yüksek enerjili elektronlar, bir hedef eleman ile çarpıştığı zaman enerjilerinin bir miktarını veya tamamını kaybederler. Kaybedilen bu enerji (elektronun kinetik enerjisi) X-ışın fotonlarına dönüşür, bu tip X-ışını radyasyonuna frenleme tipi (Bremsstrahlung) X-ışınları denir. Minimum dalga boyları,

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV} = \frac{12395}{V} (A^\circ) \quad (2.18)$$

veya

$$\lambda_{\min} = \frac{12,4}{kV} (A^\circ) \quad (2.19)$$

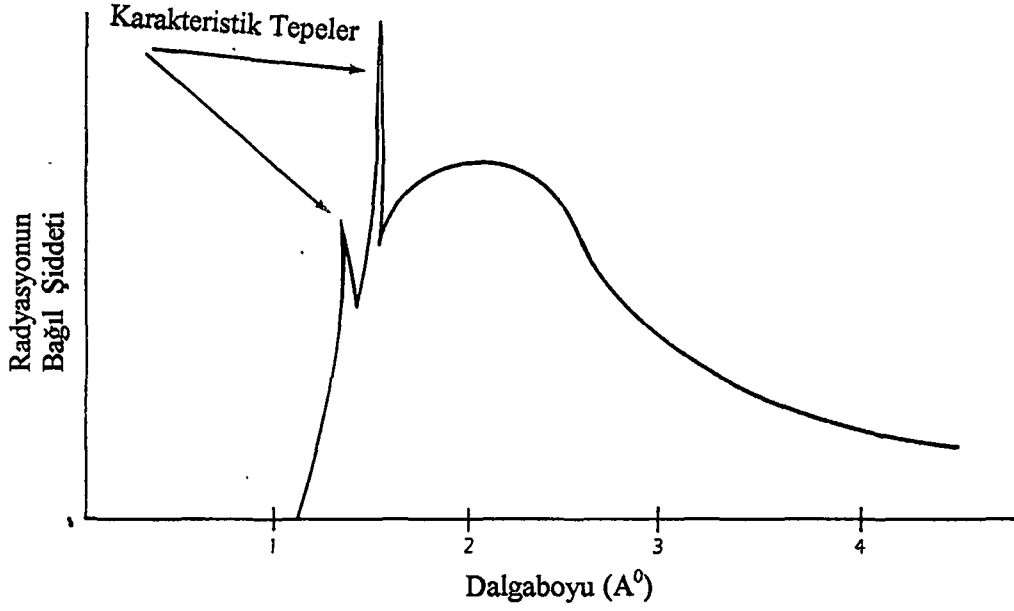
olarak ifade edilir. Burada;

V: Anod ile katod arasındaki gerilim (kV: Kilovolt)

c: Işık hızı

e: elektron yüküdür.

Yüksek hızlı elektronlardan 'az' bir kısmı bir etkileşimde tüm enerjisini vererek X-ışını üretimine neden olur. Hızlandırılmış elektronların önemli bir kısmı ise enerjilerini bir kaç etkileşimde kaybederler. Bu nedenle frenleme tipi X-ışınları geniş spektruma sahiptirler. X-ışını tüpünde elde edilen frenleme tipi X-ışınları spektrumunda, hedef elemanın karakteristik X-ışın çizgilerine de rastlanır (Şekil 2.7) (Halmshaw, 1995).



Şekil 2.7 Sürekli X-Işını Spektrumu Üzerinde Karakteristik Tepeler
(Bryant ve McIntire, 1985)

2.2.2.2. X-Işın Kaynakları

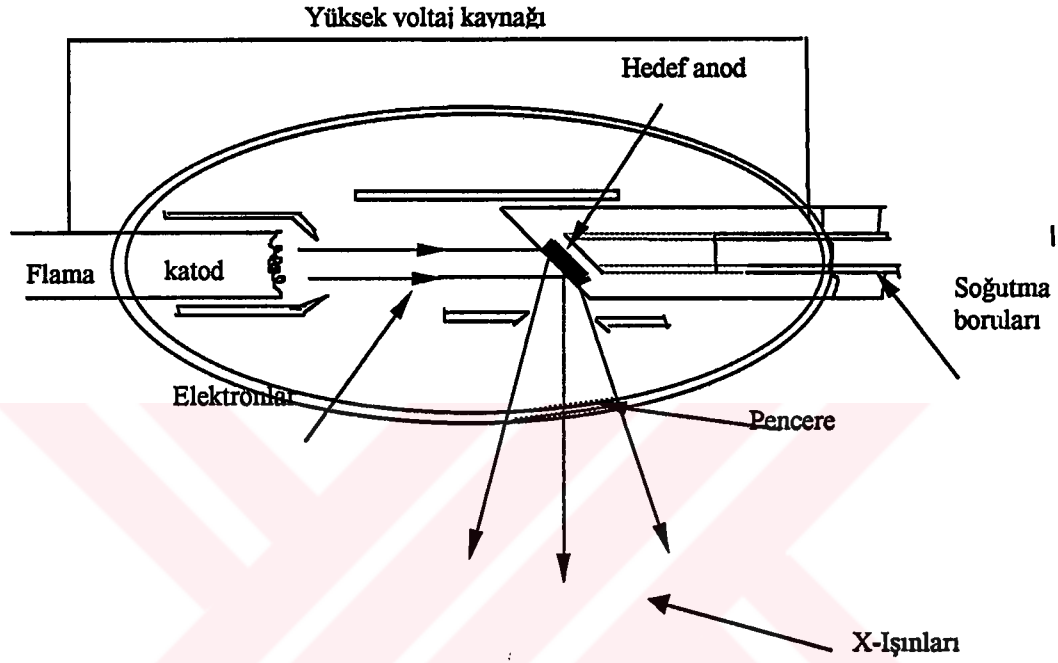
X-Işını Tüpü

Frenleme tipi X ışınlarının üretildiği X-ışını tüplerinde, elektronlar bir flaman yardımı ile üretilirler. Elektronlar gerilim uygulanarak hızlandırılır ve anoda doğru yönlendirilirler. Anoda yerleştirilen hedefe çarpan yüksek hızlı elektronların hedefte durdurulmaları sonucu X-ışınları meydana gelir.

Katotdan hedefe doğru hareket eden bombardıman elektronlarının hızı (dolayısıyla enerjisi) tüpün anoduna uygulanan voltajla artar. Bu yüzden X-ışın radyasyonunun enerjisi (ve giriciliği) tüpe uygulanan voltajla doğrudan ilişkilidir. Tüp voltajı kilovolt (kV) birimiyle ifade edilir. Bir başka deyişle, X-ışın demetinin giriciliğini artırmak için anoda uygulanan voltajı artırmak gerekir. Flamana uygulanan akım artırılarak ise flamandan neşredilen elektron miktarı artırılmış olur.

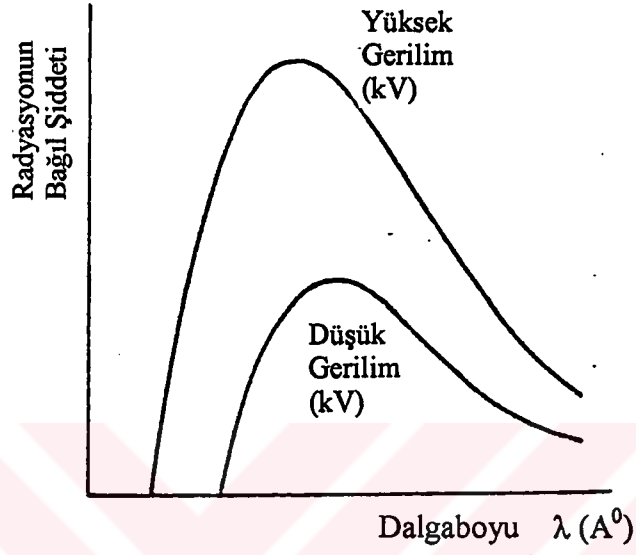
Öz olarak söylemek istersek, X-ışını tüpüne uygulanan voltaj kontrol edilerek elektronun hızı, dolayısıyla X-ışınının dalga boyu ve giriciliği kontrol edilir.

Flamandan geçen akım kontrol edilerek de elektron miktarı ve dolayısıyla üretilen X-ışını miktarı artırılır. Şekil 2.8’de X-ışın tüpünün genel yapısı görülmektedir.

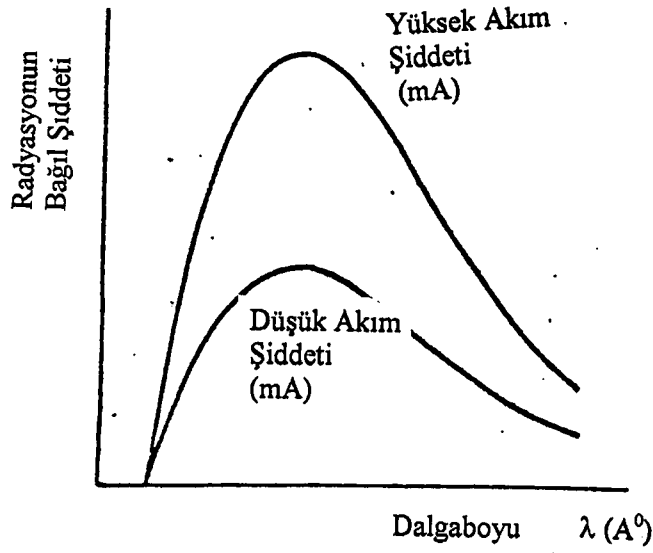


Şekil 2.8 X-ışın Tüpü (Halmshaw, 1991).

X-ışını tüplerinde gerilim ve akım değişimi ile frenleme tipi X-ışını spektrumunda meydana gelen farklılık, sırasıyla Şekil 2.9 ve Şekil 2.10’da görülmektedir.



Şekil 2.9 Gerilim Kumandası ile X-Işını Spektrumunun Değişimi



Şekil 2.10 Akım Kumandası ile X-Işını Spektrumunun Değişimi

2.2.2.3. Gama Işınları

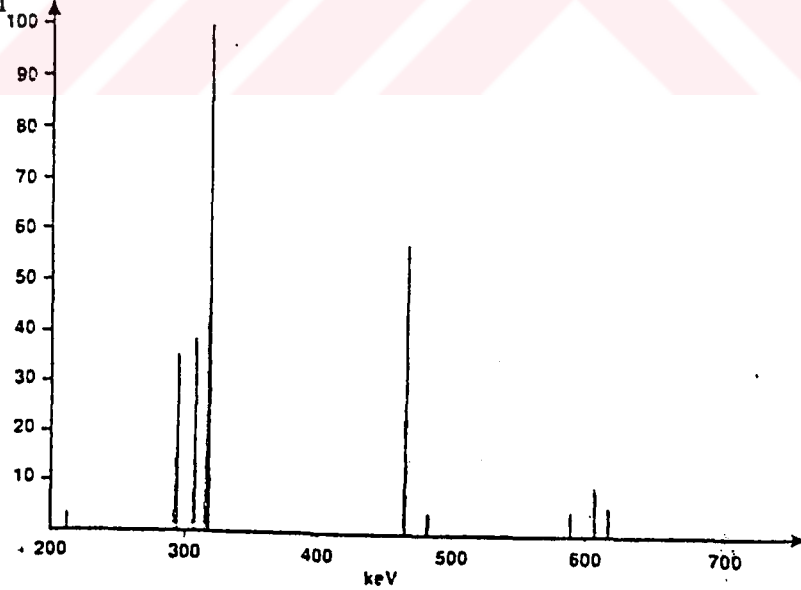
Gama ışınları, radyoaktif izotoplar tarafından yayınlanan yüksek enerjili fotonlardır ve tıpkı X-ışınları gibi girici elektromanyetik radyasyonlardır. Gama ışınları endüstriyel radyografide sıkça kullanılırlar.

Endüstriyel radyografide, önceleri doğada bulunan Radium-226 ve Radon-222 radyoizotopları kullanılmıştır. Daha sonraları nükleer reaktörlerin gelişmeye başlamasıyla yapay radyoizotoplar kullanılmaya başlanmıştır.

Radyografik uygulama açısından X-ışınları ve gama ışınları arasındaki önemli fark spektrumlarıdır. Gama ışını spektrumu belli enerjilerde ve çizgiseldir. Radyografide kullanılan frenleme tipi X-ışını spektrumu ise bir önceki alt bölümde de belirtildiği gibi geniş spektrumdur. Gama ışın enerjileri sabittir ve radyoizotop değişmedikçe değiştirilemez (Şekil 2.11).

Radyasyonun

Bağıl şiddeti



Şekil 2.11 Ir-192 Gama Işını Spektrumu (Cartz,1995)

1958 yılına kadar gama radyografisinde kullanılmış ve bazıları bugün de kullanılmakta olan radyoizotoplar ve gama ışın enerjileri tablo 2.1’de gösterilmiştir (Etherington, 1958).

Tablo 2.1. Gama radyografisinde Kullanılmış ve Endüstriyel Radyografi İçin Önemli Bazı Radyoizotoplar ve Özellikleri

	Kobalt Co-60	Radyum Ra-226	Sezyum Cs-137	İridyum Ir-192	Tulyum Tm-170
Gama Işını Enerjisi (MeV)	1.37 1.33	0.6 1.12 1.76	0.66	0.31 0.47 0.60	0.84 0.052
Yarı Ömür	5.3 Yıl	1620 Yıl	33 Yıl	75 Gün	130 Gün
Yarı Değer Kalınlığı (Kurşun) (cm)	1.27	1.27	0.76	0.51	0.13

Gama ışını kaynakları olan radyoizotopların aktivite ve enerjileri arasındaki ilişkiyi belirtmek gerekirse; aktivite, radyoizotopta bulunan atomların bir saniyedeki bozunma sayısının bir ölçüsüdür ve radyoizotopun miktarı ile değişir. Curie veya Becquerel birimleri ile ifade edilir.

Enerji, her bir ışının giricilik yeteneğinin bir ölçüsüdür ve radyoizotopun miktarına bağlı değildir. Bir radyoizotop birden fazla ancak belli enerjilerde γ fotonu atabilir. Bir ışının enerjisi, ışının dalga boyu veya frekansı ile ifade edilir ve ışının giricilik yeteneğini yansıtır (Agfa-Gevart, 1988)

Gama ışınlarının yayınlanması radyoaktif izotopların bozunumu ile olmaktadır.

Bir radyoaktif atomun genel bozunum yasası,

$$dN = -\lambda' N dt \quad (2.20)$$

ile ifade edilir. Denklem (2.20)'nin çözülmesiyle

$$N = N_0 \exp(-\lambda' t) \quad (2.21)$$

bulunur. Burada,

N: Çekirdek sayısı (N'nin Zamanla değişimi Şekil 2.12)

dN: dt diferansiyel zaman diliminde bozunan çekirdek sayısı

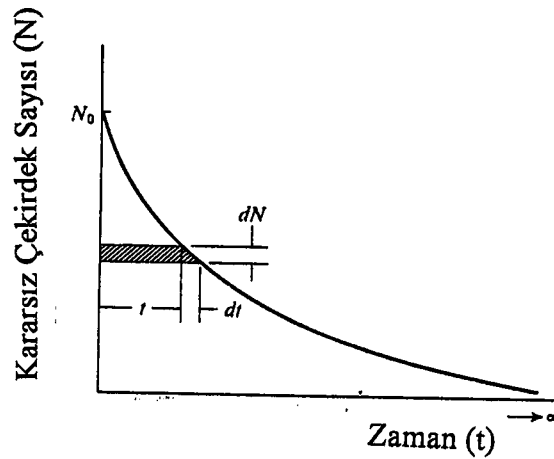
λ' : Bozunum sabitidir

$T_{1/2}$: Radyoizotopun yarı ömrünü ifade eder. Radyoizotopun yarı ömrü ise:

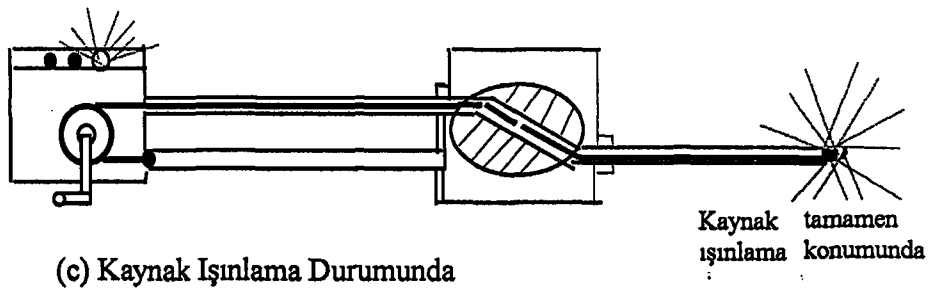
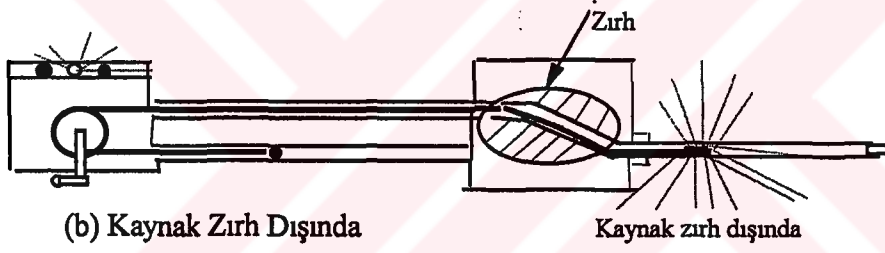
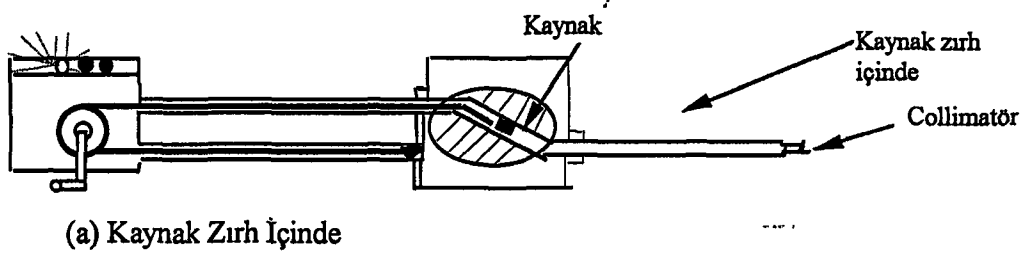
$$T_{1/2} = 0.693 / \lambda' \quad (2.22)$$

şeklinde ifade edilir.

Radyoaktif kaynaklar sürekli radyasyon yayınlırlar, bu nedenle gereksiz olan ışınlamayı önlemek için zırhlanmalıdırlar. Kaynak, zırh malzemesiyle birlikte nükleer güvenlik açısından güvenli pozisyonda bulunur. Kaynakların, zırhlanma ve kullanma şekline göre izotop kameraları geliştirilmiştir. Şekil 2.13'de projeksiyon tipi radyoizotop kamerası görülmektedir (Cartz, 1995).



Şekil 2.12 Kararsız Çekirdek Sayısının Zamanla Değişimi



Şekil 2.13 Projeksiyon Tipi İzotop Kamerası
(General Dynamics,1967)

2.3.RADYOGRAFİK GÖRÜNTÜ KALİTE FAKTÖRLERİ

Süreksizlik ve hataların radyograf üzerinde istenen hassasiyetle değerlendirilebilmesi, görüntünün belli bir kaliteye sahip olması ile mümkündür. Bir başka deyişle, radyografik görüntü kalitesi, radyografi tekniğinin hassasiyeti ile doğrudan ilgilidir.

‘Radyografik hassasiyet’ terimi, radyografteki detayları, örneğin bir metaldeki hataları gösterebilme yeteneğini belirtmek için kullanılır. Detay niteliğindeki süreksizlikler tesbit edilebiliyorsa radyografik görüntünün yüksek (veya iyi) hassasiyette olduğu söylenir.

Radyografik görüntü kalitesinde iki temel faktör söz konusudur. Bunlar; kontrast ve tanımdır. Film üzerindeki görüntü detayı ile geri plan arasındaki kararma yoğunluğu farkına ‘görüntü kontrastı’ denir.

Fotografik yoğunluk, filmin kararma derecesini ifade edern, sayısal bir kavramdır. Filmin ışık geçirgenliği ile ölçülür ve

$$D=\log \frac{I_0}{I} \quad (2.23)$$

ifadesi ile verilir.

Burada, I_0/I oranı büyüdükçe film yoğunluğu artmaktadır. Endüstriyel radyografide kabul edilen kararma yoğunluğu 2-3,5 arasındadır. Bu yoğunluk değerinde, süreksizliklerin hassasiyetle algılanabilmesi mümkündür.

Kontrast, film kontrastı ve obje kontrastı olarak ikiye ayrılabilir. Film kontrastı, film yoğunluğu ile doz arasındaki ilişkiyi veren, filmin karakteristik eğrisinin herhangi bir noktadaki teğetinin eğimidir. Film kontrastı, filmin karakteristik eğrisine, uygulanan radyasyon dozuna ve banyo işlemine bağlı olarak değişebilir ve görüntü kalitesini önemli ölçüde etkileyen bir faktördür.

Obje kontrastı ise, bir malzemenin belli iki bölgesinden geçen radyasyon şiddetlerinin birbirine oranı uzantısında film üzerinde meydana gelen kararma yoğunluğu farkıdır. Objeye kontrastı, malzeme yoğunluğuna, kalınlık farkına ve uygulanan radyasyon

enerjisine bağıllık gösterir. Radyasyon enerjisi azalırken artar, kalınlık değişimi ve malzeme yoğunluğu azaldıkça da azalır.

Genel olarak kontrast artarsa görüntü daha kolay algılanabilir ve malzemedeki detay görünür hale gelir (Kanamori ve Matsumoto, 1985).

Detayın keskin kenarları olduğu kabul edilirse, film üzerindeki görüntü her zaman gerçekteki kadar keskin olmayabilir. Bu görüntünün tanımlılığıdır (unsharpness). Bir başka deyişle film üzerinde farklı kararım yoğunluğuna sahip iki bölge arasındaki sınırın keskinliği ve netliğini ifade eder. Görünürlük sınırında bir görüntünün fark edilmesi hem kontrasta hem de tanıma bağlıdır.

Görüntü kalitesini belirleyen kontrast ve tanımlılık; beş farklı radyografik çekim parametresiyle değişir. Bir başka deyişle, çekilen radyografin hassasiyeti beş çekim parametresiyle yakından ilgilidir. Bu çekim parametreleri; geometri faktörü, kaynak faktörü, film faktörü, ekran faktörü ve poz süresidir (DeeMeester ve Aerts, 1982).

2.3.1. Geometri Faktörü

2.3.1.1. Işınlama Geometrisi

Radyografik görüntü oluşturulması ve film üzerindeki görüntünün keskinliği, radyasyon kaynağının alanına, malzeme ve kaynağın filme olan görelî uzaklıklarına bağlıdır. Kayıt yapılan film düzleminde radyasyonun şiddeti, kaynak-film uzaklığının karesi ile ters orantılı olarak değişir. Bu değişim, radyasyon kaynağından d_1 mesafedeki radyasyon ışınlama şiddeti I_1 , radyasyon kaynağından d_2 mesafedeki radyasyon ışınlama şiddeti I_2 olmak üzere;

$$I_1/I_2 = d_2^2/d_1^2 \quad (2.24)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bir başka deyişle, radyasyon şiddeti ‘Ters Kare Kanunu’ na uyar. Dolayısıyla d_2 mesafesinde, d_1 mesafesindeki aynı miktarda radyasyon dozu alabilmesi için Dk.2.24’den hareketle ışınlama süresinin artması gerekir.

2.3.1.2. Yarıgölge

Gerçekte nokta şeklinde ideal bir radyasyon kaynağı olmadığından radyografik görüntü bir yarıgölgeye sahip olacaktır. Bu nedenle malzeme görüntüsü keskin olmayacak, görüntü ve çevresinde fotografik yoğunluğun tedricen değiştiği yarıgölge denilen bir bölge meydana gelecektir. Yarıgölge olgusunu ikiye ayırmak mümkündür. Bunlar; film yarıgölgesi ve geometrik yarıgölgedir.

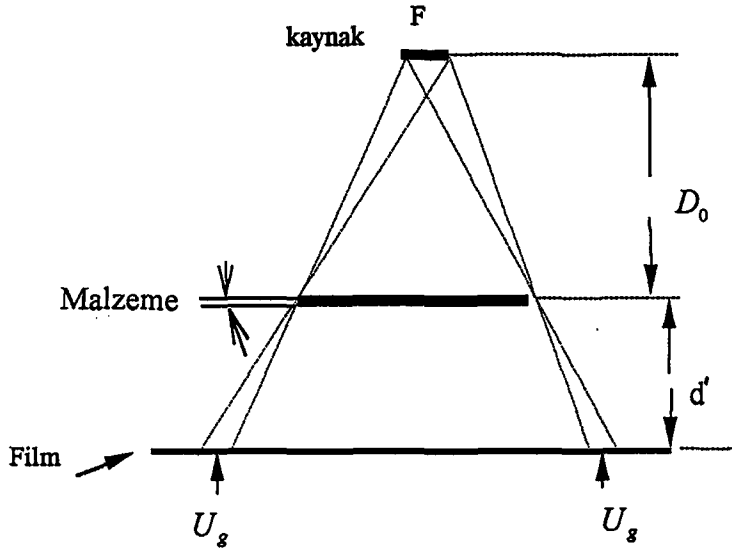
Film Yarıgölgesi, kaçınılmaz yarıgölge olarak da ifade edilir. Radyasyon, filmin duyarlı tabakasına (emülsiyon) nüfuz ettiğinde yolları üzerindeki bazı elektronları yerlerinden koparır ve kopan elektronlar emülsiyon tabakasındaki gümüş bromür

tanelerini etkilerler. Etkilenme gümüş bromür tanelerinin büyüklüğü mertebesinde olacaktır. Bir başka deyişle, filmin taneselliği çerçevesinde bileşke kararına meydana gelecektir. Bu durum görüntü keskinliğinin azalmasına neden olur ve malzemedeki kılcal süreksizliklerin algılanmasını zorlaştırır. Kaçınılmaz yarıgölge; film taneselliğine, ekran cinsi ve taneselliğine, film-ekran arasındaki temas ve radyasyon enerjisine bağlıdır.

Geometrik Yarıgölge: Işınlama geometrisinden kaynaklanan yarıgölgeye, geometrik yarıgölge adı verilir.

- Geometrik yarıgölge;
- Radyasyon kaynağının boyutu küçültülerek,
- Kaynak-film uzaklığı mümkün olduğu kadar büyük tutularak,
- Malzeme filmin üzerine yerleştirilerek,
- Radyasyonun filme dik gelmesi sağlanarak ve
- Malzeme filme paralel hale getirilerek

minimize edilebilir. Şekil 2.14 geometrik yarıgölgenin oluşumunu göstermektedir.



Şekil 2.14 Geometrik Yarıgölgenin Oluşumu

Geometrik yarı gölge

$$\frac{U_g}{F} = \frac{d'}{D_0} \quad (2.25)$$

veya

$$U_g = F \cdot \left(\frac{d'}{D_0} \right) \quad (2.26)$$

olarak ifade edilebilir.

Burada; U_g : Yarıgölge,

D_0 : Kaynak-malzeme uzaklığı,

F : Kaynak boyutu,

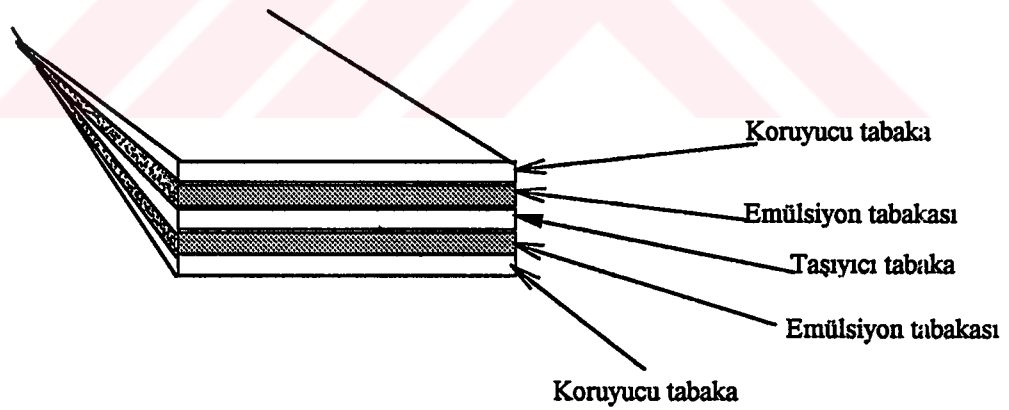
d' : Malzeme-film uzaklığıdır.

2.3.2. Kaynak Faktörü

Endüstriyel radyografide yaygın olarak kullanılan X ve gama ışın kaynakları kaynak faktörü daha önce de sözü edilen konuları içerir. Bunlar, kaynağın boyutu, kaynağın enerjisi, kaynağın şiddetidir. Bu üç büyüklük, radyografik görüntü kalitesini etkileyen kaynak faktörleridir. Başka bir deyişle, kaynak için, kalite ve kantite faktörleri önemlidir.

2.3.3. Film Faktörü

Radyasyon ölçümlerinde kullanılan bir çok radyasyon deteksiyon yöntemi (film, floresans ekranlar, iyonizasyon odaları ve foto iletkenler) olmasına karşın endüstriyel radyografide esas itibarıyla deteksiyon için film kullanılır. Bir başka deyişle, radyografik görüntü film üzerine alınır ve buna “Radyograf” denir. Şekil 2.15 radyografik bir filmin hangi tabakalardan oluştuğunu şematik olarak göstermektedir.



Şekil 2.15 Radyografik Filmin Kesiti

Radyografik filmler simetrik bir yapıya sahiptirler. İçte polyester veya selüloz triasetat malzemedan yapılmış taşıyıcı tabaka ki; bu tabaka saydam, su geçirmez ve asitten, bazdan, ısıdan etkilenmeyen bir tabakadır. Bu tabakanın her iki yüzüne yapışık

0.025 mm kalınlığında, radyasyona duyarlı, gümüş bromür içeren emülsiyon tabakası (duyarlı tabaka) yer almaktadır (Kodak, 1980).

Filmin emülsiyon tabakasındaki gümüş bromür taneciklerinin büyüklüğü ve miktarı filmin özelliklerini belirleyen başlıca faktördür. Gümüş bromür taneciklerinin büyük olması, filmin daha hızlı, küçük olması ise daha yavaş kararmasını sağlar. Bir başka deyişle, gümüş bromür tanelerinin boyutu büyüdükçe filmin hızı artar. Gümüş bromür tanelerinin boyutuna göre filmler sınıflandırılabilir.

1. İnce taneli, yavaş filmler,
2. Orta taneli, orta hızlı filmler,
3. İri taneli, hızlı filmlerdir.

Hızlı filmler iri taneli bir yapıya sahip olduklarından tane yapıları çıplak gözle bile görülebilir. İnce taneli filmlerin tane yapısı ancak güçlü bir büyüteç yardımıyla görülebilir.

İri taneli filmlerle çekilen radyografıta detaylar kaçırılabilir. Bir başka deyişle, süreksizlikler algılanmayabilir. Endüstriyel uygulamada hassas çekimler yavaş, rutin çekimler orta hızlı filmlerle yapılır. Film cinsi radyografik kaliteyi etkileyen önemli bir faktördür.

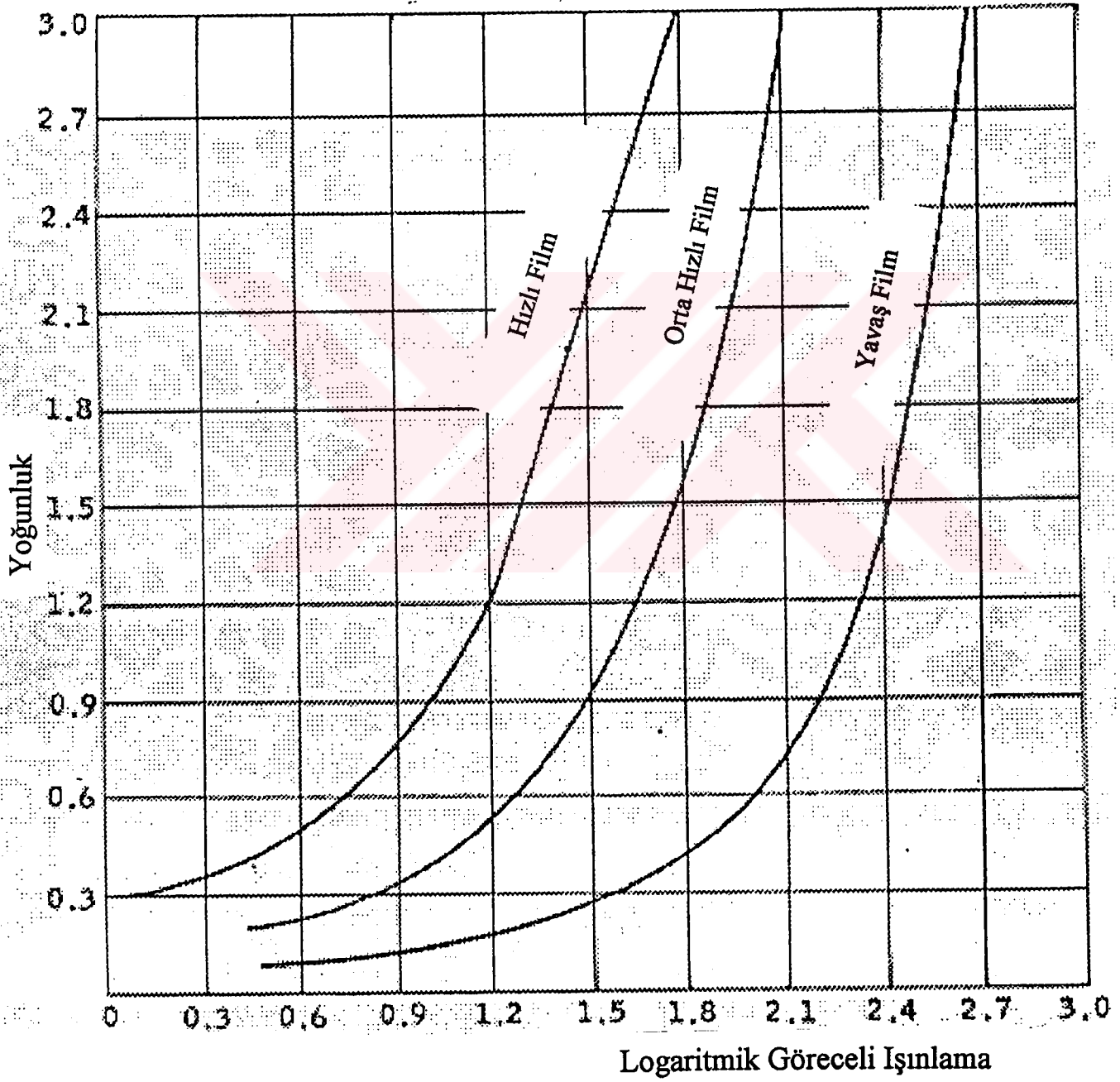
Filmin maruz kaldığı radyasyon dozu:

$$P=I \cdot t_1 \quad (2.27)$$

ile ifade edilebilir. Burada, t_1 ışınlama süresi ve P radyasyon dozudur.

Filmin üzerine düşen radyasyon dozu ile filmin bundan etkilenme miktarı arasındaki ilişkiyi karakteristik eğri denilen ve her filmin kendine özgü olan bir eğri gösterir. Karakteristik eğriler yardımıyla film hızı ve uygun çalışma bölgesi hakkında bilgi edinilebilir. Karakteristik eğrinin herhangi bir noktasından çizilen teğetin eğimine film

kontrastı (gradiyenti) denir. Şekil 2.16'da eşitli filmlere ait karakteristik eğriler gösterilmiştir.



Şekil 2.16 Farklı Film Hızlarına Göre Karakteristik Eğriler (General Dynamics,1967)

2.3.4. Ekran Faktörü

Radyografik filmler bir ekran çifti ile sandviç yapılmış halde kullanılırlar. Bir başka deyişle, ekranlar, filmin altına ve üstüne konan ince levhalardır. Malzeme ile film arasında yer alan ekran “ön ekran”, filmin arkasına konan ekran “arka ekran” olarak adlandırılır.

Ön ekran kullanmanın amacı, film üzerine gelen radyasyonun etkisini artırmaktır. Gerçekte film üzerine gelen radyasyonun ancak %1 kadarı filme etki eder. Geri kalan kısmı filmi etkilemeden geçer. Ön ekran kullanıldığı takdirde, ekrana gelen radyasyon ekran atomlarından elektron koparır (fotoelektron), bu elektronlar da filme etki eder. Bu ikinci etki daha büyüktür, bu elektronlar sayesinde radyasyonun film üzerindeki etkisi 2-3 kat artar. Bu nedenle ön ekranlara “kuvvetlendirici ekran” adı da verilir.

Endüstriyel radyografide ön ekran olarak metal ekranlar kullanılır. Yaygın olarak kullanılan metal ekranlar, kurşun, yüksek enerjilerde ise çelik veya bakırdır.

Zeminden veya başka yerlerden saçılarak film üzerine gelen radyasyonu önlemesi bakımından arka ekranlar kullanılır. Arka ekranlar ön ekranlara göre biraz daha kalın olmalıdır. Yaygın olarak kullanılmakta olan kurşun ekranlar, %94 kurşun, %6 antimon karışımından yapılmış bir alaşımdır.

2.3.5. Poz Süresi Faktörü

Poz süresi, radyografik görüntü kalitesi açısından kaliteli bir radyograf elde etmek için, daha önce tanımlanan dört faktörün göz önüne alınmasıyla hesap edilen ışınlama süresidir. Filmin radyasyona maruz kalması gereken süreyi ifade eder.

Poz süresi tayini için, çoğunlukla ışınlama çizelgeleri veya grafikleri kullanılır. Bu çizelge ve grafikler film üreticileri tarafından, ürettikleri filmler için, deneysel olarak bulunur ve yayınlanırlar.

Işınlama çizelgeleri ve grafikleri, radyograf üzerinde istenen film yoğunluğunu elde etmek için malzeme cinsi ve kalınlığı ile ışınlama verileri arasındaki ilişkiye bir çözüm getirmek için geliştirilmiştir. Endüstriyel radyografide kullanılan ışınlama çizelgeleri ve grafikleri ile poz süresini hesaplamak mümkün ve pratiktir. Şekil-2.17 ve Şekil-2.18’de sırası ile, Ir-192, Co-60 ve X-ışını poz çizelgesi ve Tablo 2.2’de ise Co-60’a ait poz süresi tablosu görülmektedir.

Poz süresi çizelge veya grafikleri, malzeme-kaynak arasındaki uzaklığa göre ve kaynak enerjisi ile şiddeti için geliştirilmişlerdir.

Poz süresi(t_p) için,

$$t_p = P' \frac{T^2}{S} \quad (2.28)$$

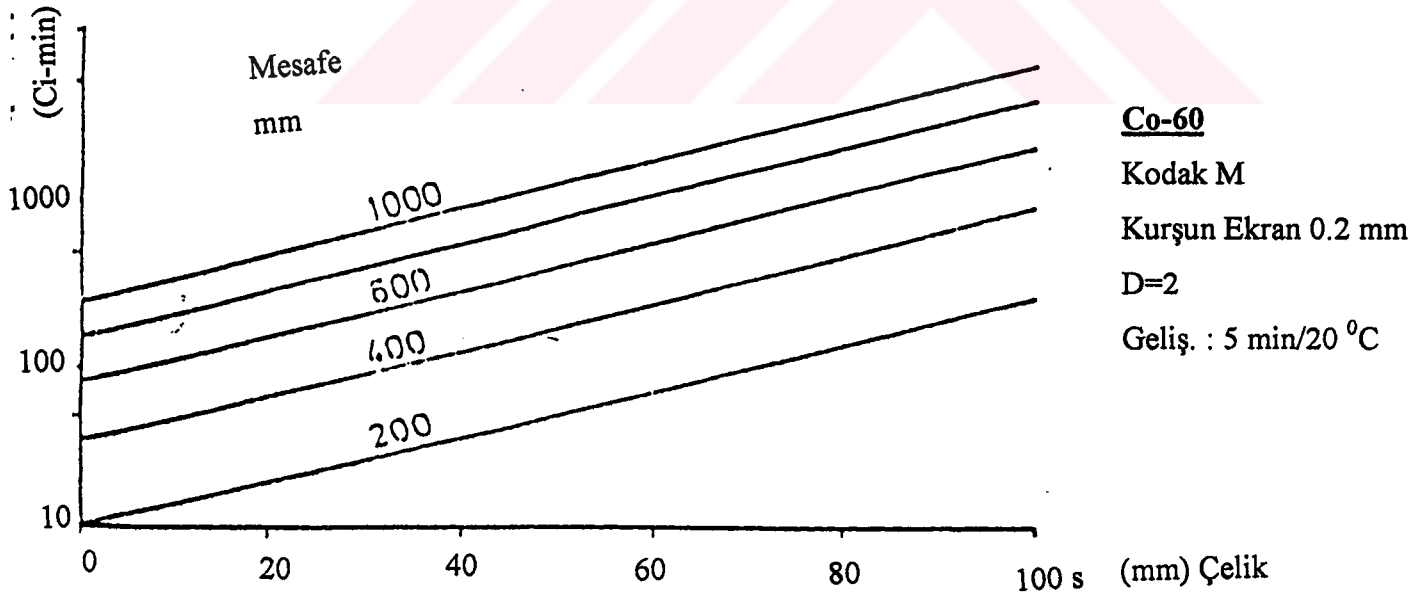
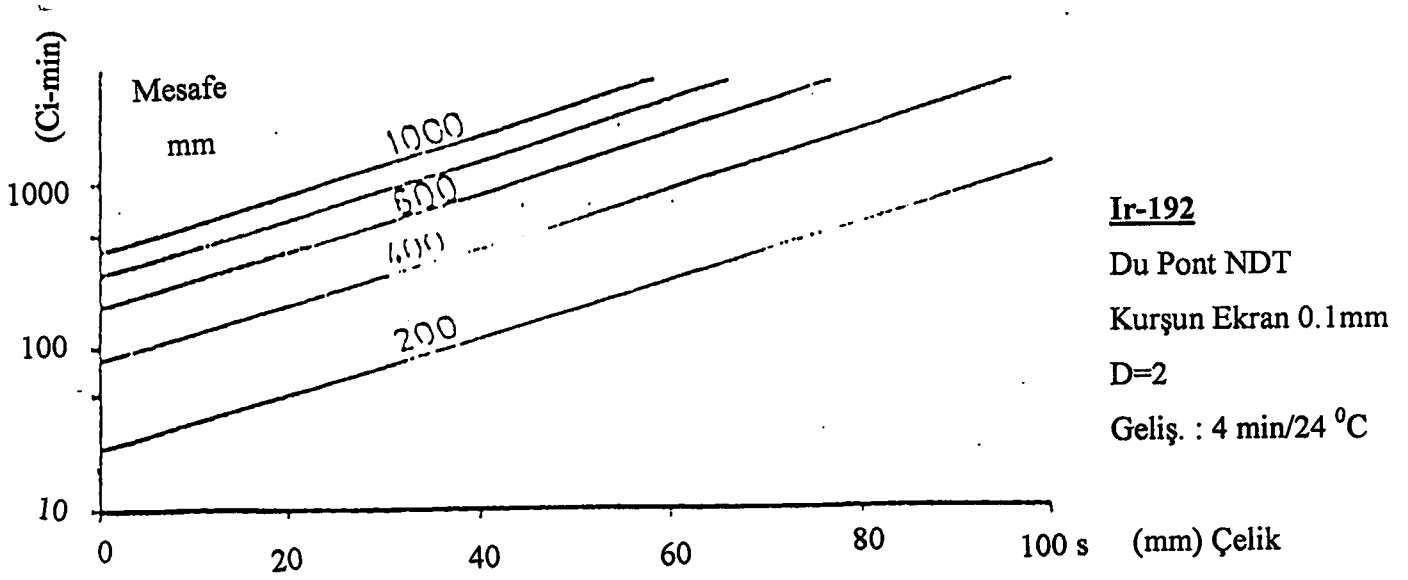
kullanılabilir. Burada:

T: Kaynak-film uzaklığı (cm),

S: Curie olarak kaynak şiddeti (aktivite),

P': Grafiklerden her bir film için ayrı bulunan poz faktörü,

t_p : Poz süresi (dk).



Şekil 2.17 Co-60 ve Ir-192 İçin Poz Çizelgesi



35

Tablo 2.2. Co-60 İçin Poz süresi Tablosu

RADYOAKTİF KAYNAK : KOBALT 60
 AKTİVİTE : 30.0 CURIE
 MALZEME : ÇELİK
 FILM TİPİ : STRUCTURIX D7
 FILM YOĞUNLUĞU : 2

Malzeme Kalınlığı (mm)	Kaynak Film Uzaklığı (cm)	Isınlama Süresi (dak)	Malzeme Kalınlığı (mm)	Kaynak Film Uzaklığı (cm)	Isınlama Süresi (dak)
40.0	75.	5.2	51.0	75.	6.9
41.0	75.	5.3	52.0	75.	7.1
42.0	75.	5.5	53.0	75.	7.3
43.0	75.	5.6	54.0	75.	7.5
44.0	75.	5.8	55.0	75.	7.7
45.0	75.	5.9	56.0	75.	7.9
46.0	75.	6.1	57.0	75.	8.1
47.0	75.	6.2	58.0	75.	8.3
48.0	75.	6.4	59.0	75.	8.6
49.0	75.	6.6	60.0	75.	8.8
50.0	75.	6.8	61.0	75.	9.0
62.0	75.	9.3	90.0	90.	29.0
63.0	75.	9.6	91.0	91.	30.6
64.0	75.	9.8	92.0	92.	32.3
65.0	75.	10.1	93.0	93.	34.1
66.0	75.	10.4	94.0	94.	35.9
67.0	75.	10.7	95.0	95.	37.9
68.0	75.	11.0	96.0	96.	39.9
69.0	75.	11.4	97.0	97.	42.0
70.0	75.	11.7	98.0	98.	44.2
71.0	75.	12.1	99.0	99.	46.6
72.0	75.	12.4	100.0	100.	49.0
73.0	75.	12.8	101.0	101.	47.6
74.0	75.	13.2	102.0	102.	50.0
75.0	75.	13.6	103.0	103.	52.6
76.0	76.	14.4	104.0	104.	55.3
77.0	77.	15.2	105.0	105.	58.2
78.0	78.	16.1	106.0	106.	61.2
79.0	79.	17.0	107.0	107.	64.3
80.0	80.	18.0	108.0	108.	67.6
81.0	81.	18.7	109.0	109.	71.1
82.0	82.	18.7	110.0	110.	74.8
83.0	83.	19.8	111.0	111.	78.6
84.0	84.	20.9	112.0	112.	82.6
85.0	85.	22.1	113.0	113.	86.8
86.0	86.	23.3	114.0	114.	91.3
87.0	87.	24.6	115.0	115.	95.9
88.0	88.	26.0	116.0	116.	100.8
89.0	89.	27.5	117.0	117.	105.9

Poz çizelgelerinde belirtilenler dışında, kaynak-film uzaklığına bağlı olarak değişik koşullarda ışınlama yapılması halinde düzeltme yapılması gerekir. Mesafeye göre düzeltme için;

$$\text{Uygulanacak poz süresi} = \text{Çizelgedeki poz süresi} \cdot \left(\frac{\text{Uygulanaca mesafe}}{\text{Çizelgedeki mesafe}} \right)^2 \quad (2.29)$$



BÖLÜM 3

RADYOGRAFİK HATA

3.1.RADYOGRAFİK HATA TESBİTİ

Bir malzemenin normal fiziksel yapısındaki herhangi bir farklılık süreksizlik olarak tanımlanır. Malzeme yapısında meydana gelen çatlak, delik, katlanma, inklüzyon vb. gibi sürekliliği bozan her olgu süreksizlik belirtisi olarak karşımıza çıkar. Süreksizlik malzeme yüzeyinde veya malzeme içinde olabilir. Süreksizlikler malzemenin güvenilir bir şekilde kullanımını her zaman etkilemeyebilir.

Süreksizlikleri mikro ve makro olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Tane sınırları, kristal kafesteki boşluklar ve çarpıklıklar, mikro süreksizlikler olup, tahribatsız yöntemlerle algılanmaları mümkün değildir. Makro süreksizlikler ise, malzemenin üretimi, şekillendirilmesi ve işletmede kullanımı sırasında meydana gelen ve tahribatsız yöntemlerle test edilebilen süreksizliklerdir.

Hatalar ise birer süreksizlik olup, standartların müsaade ettiği sınırı aştıklarında hata olarak nitelendirilirler. Standartları aşan süreksizlikler (hatalar) malzemenin güvenilir bir şekilde kullanımını engellerler. Diğer bir deyişle her hata bir süreksizlik olmakla birlikte, her süreksizlik bir hata olmayabilir.

Herhangi bir tahribatsız test metodunu bilinçli bir şekilde kullanabilmek için, malzemede süreksizliklerin niçin bulunabileceğini anlamak gerekir. Bir başka deyişle, süreksizlik tipi ve nedeni, söz konusu süreksizliğin deteksiyonu için önemlidir (Halmshaw, 1991).

Bir radyograf incelenip, kalitesinden emin olunduktan sonra, süreksizliklerin yerlerinin belirlenmesi, boyutlandırılması ve rapor edilmesi gerekir. Tüm radyografi

ile ilgili işler, standartlar, yasalar ve şartnamelerden geliştirilen yazılı prosedürlere uygun olarak yapılmalıdır. Standartlar, yasal yönler taşımayan, üretici ve tüketici tarafından gönüllü olarak ortaya konan, anlaşmaya varılmış kurallara zümresidir.

Görüntünün analizi sırasında, üzerinde süreksizlikler belirlenmeli veya farklı süreksizlikler, örneğin; çatlaklar, soğuk katlanmalar, gaz delikleri gibi hataları ayırt edilebilmelidir. Keskin noktaları olan süreksizlikler, yerel gerilme yoğunluklarına neden olduklarından, bir süreksizliğin sonlanma noktalarının keskinliği önemli bir konudur. Standartlar genellikle, çatlaklar gibi keskin noktalı hataları kabul edilemez olarak belirtir. Yoğunlukla keskin noktalı süreksizliklerin gerçek boyutlarının tahmin edilmesi zordur, zira hata daraldıkça radyografik kontrast azalır.

Malzeme mukavemeti, süreksizlik boyutundan etkilenir. Başka bir deyişle, her eleman belirli bir yükü taşımak üzere, bir güvenlik katsayısı ile tasarlanır. Elemanın kalınlığının veya alanının, meydana gelen bir hata sonucunda azalması, güvenlik katsayısını azaltır veya parçayı zayıflatır. Güvenlik katsayıları ile tasarım yapıldığından kimi kez bazı süreksizliklere izin verilebilir. Bu bakımdan, tesbit edilen hatanın toleransa göre mertebesinin belirlenmesi gerekir. Burada süreksizlik boyutu, geometrisi göz önüne alınması gereken hususlardır.

Tasarımlanan elemanlar çalışma şartlarında değişken kuvvetlere maruz kalabilirler ve genellikle bu kuvvetlerin dağılımı eşit değildir. Bu nedenle belirli bölgeler çokça gerilmeye maruz kalabilir. Bazı süreksizlikler radyografya görüldüklerinde kabul edilebilir görünebilirler, ancak ileri işlem görmeleri sonucunda açılarak büyüyebilirler, bu nedenle bu tip hatalar tesbit edildiğinde parçanın reddedilmesi gerekir. Ancak kimi kez de, çeşit ve boyut olarak reddedilecek bazı süreksizlikler parçada uygulanan işleme ile tamamen ortadan kalkabilir ve parça kullanılabilir hale gelebilir. Bu nedenle parçanın kabul veya reddini etkileyebilecek tüm işlemlerin bilinmesi ve değerlendirmenin bu şartlara göre yapılması gerekir.

Kırılma mekaniği analizi gibi teknikler, yeni üretilmiş veya kullanılmakta olan elemanlar için hangi boyutta ve tipte süreksizliklere izin verilebileceğini hesaplamalar ile, belirlemeye imkan sağlarlar. Kırılma mekaniği, malzeme özelliklerini, gerilmeleri, çalışma ortamını ve süreksizlik tipini, boyutunu ve konumunu dikkate alır.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM
DOKÜMANİSYON MERKEZİ

Ulusal veya uluslararası kuruluşlarca, radyografi uygulayıcılarına yararlı olan standartlar, döküm veya kaynakların referans radyograflarını içeren, ilgili dökümanlar olarak hazırlanmaktadır. Bunlar, farklı önem seviyelerindeki süreksizliklerin radyografik örneklerini gösterirler. Referans radyograflar, çeşitli kodlar ve standartlar tarafından, kabul edilebilir ve reddedilmesi gereken süreksizlik seviyelerini belirtmek için referans olarak kabul edilirler.

Bir başka deyişle, referans radyograflar, eğitime ve yorumlamaya yardımcı olan önemli araçlardır.

3.2. GÖRÜNTÜ KALİTE TESPİT YÖNTEMLERİ VE GÖRÜNTÜ KALİTE GÖSTERGELERİ

Radyografik görüntü kalitesinin tespiti için çeşitli düzenekler geliştirilmiştir. Radyografik çekim yapılırken bu düzeneklerden en az biri de çekimde kullanılır. Böylelikle hata tespit duyarlılığı hakkında fikir sahibi olunabilir. Hata tesbit duyarlılığı için,

$$\text{Hata Tesbit Duyarlılığı} = \frac{\text{Tesbit edilebilen en küçük hata boyutu}}{\text{Malzeme Kalınlığı}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

kullanılır.

Hata tespit duyarlılığı, hatanın boyutuna, şekline, yerine, hatanın radyasyonu soğurma katsayısına, filmin hızına ve elde edilen görüntünün yoğunluğuna bağlı olduğu için gerçek değerinin tespit edilmesi kolay değildir. Ancak radyografik duyarlılığın tespiti mümkündür. Radyografik hata, duyarlılığı ve buna bağlı olarak görüntü kalitesinin belirlenmesi amacı ile geliştirilen ve yaygın olarak kullanılan düzeneklerden biri penetremetreler (Görüntü Kalite Göstergeleri –GKG) ve diğeri ise modülasyon transfer fonksiyonudur. Endüstriyel radyografide yaygın olarak kullanılan pratik düzenekler penetremetre adı verilen düzeneklerdir (Halmshaw, 1971).

3.2.1. Penetremetreler (Görüntü Kalite Göstergeleri)

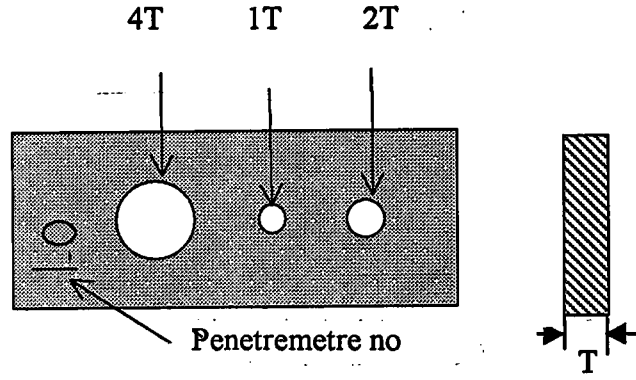
Radyografi tekniğinin yeterli olup olmadığını kontrol etmek için, standart bir test parçası genelde her radyografa eklenir. Bu standart test parçasına Amerika’da “penetremetre”, Avrupa’da ise “Görüntü Kalite Göstergesi” (IQI-Image Quality Indicator) adı verilir. Penetremetre veya görüntü kalite göstergesi radyografisi çekilen numune ile aynı veya benzer malzemedendir yapılmış, basit bir geometrik düzendir. Penetremetreler bazı küçük yapılar (delikler, teller, vb.) içerir ve boyutları test parçasının kalınlığı ile bir tür sayısal bağıntıya sahiptir. Radyografideki penetremetre görüntüsü, radyografik incelemenin uygun koşullar altında yapıldığının kesin bir kanıtıdır.

Endüstriyel radyografide yaygın olarak kullanılan bir çok penetremetre tipi vardır. Bunlar; delikli, telli, basamaklı penetremetreler olarak adlandırılırlar. İdeal olarak, penetremetre, numune ile aynı malzemedendir yapılmalıdır.

Pratikte hemen her uygulamada, penetremetre malzemenin kaynak tarafındaki yüzeyine en az avantajlı geometrik pozisyona yerleştirilir. Penetremetre malzemeye mümkün olduğunca yakın olmalıdır.

3.2.1.1. Delikli Penetremetre

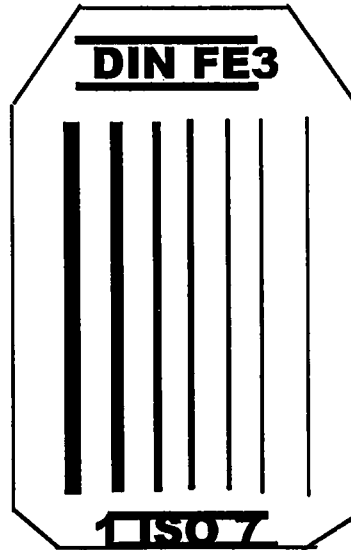
Delikli penetremetre, genelde küçük ve dikdörtgen bir madeni parçadır. İçinde bir kaç tane (genelde üç tane) delik bulunur. Deliklerin çapı penetremetrelerin kalınlığı ile bağıntılıdır. Amerikan Test ve Malzeme Cemiyeti’nin (ASTM) Standart penetremetresinde çapları T, 2T ve 4T olan üç tane delik bulunur. Burada T, penetremetre kalınlığıdır ve penetremetreyi tanıma işaretinin (penetremetre no) yüzde ikisidir. Şekil 3.1’ de delikli penetremetre görülmektedir.



Şekil 3.1 Delikli Penetremetre

3.2.1.2. Telli Penetremetre

Almanya’da DIN 54109 normu ile telli penetremler standartlandırılmıştır. Bu penetremler plastik bir kılıf içinde birbirine paralel ve farklı çaplarda bir çok telden meydana gelmiştir. En kalın tel 3.2 mm den başlar ve çap geometrik olarak azalarak 0.1mm ye kadar iner. Şekil 3.2’de telli penetremetre, Tablo 3.1’de ise tel kalınlıklarına ait bilgiler görölmektedir.



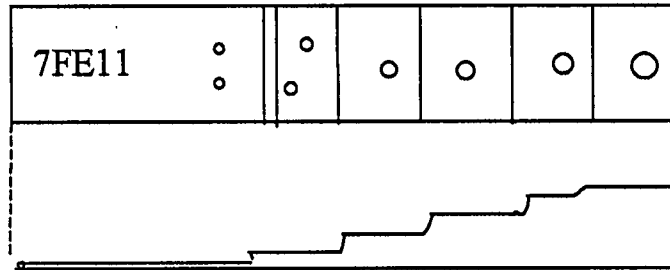
Şekil 3. 2 DIN(Alman) Telli Penetremetre (DIN 54109)

Tablo 3.1. Telli Penetremetrelerde Tel Kalınlıkları.

Görüntü Kalite No	Tel Çapı (mm)
1	3.20
2	2.50
3	2.00
4	1.60
5	1.25
6	1.00
7	0.80
8	0.50
10	0.40
11	0.32
12	0.25
13	0.20
14	0.16
15	0.125
16	0.100

3.2.1.3. Basamaklı Penetremetre

Çeşitli kalınlıktaki basamaklardan oluşan penetremetrelerdir. Basamaklarda, basamak düzlemine dik ve basamak kalınlığına eşit çapta bir veya iki delik bulunur.



Şekil 3.3. Basamaklı Penetremetre

3.3.RADYOGRAFİK HATA TIPLERİ

Orjinlerine göre metal hataları iki sınıfa ayırmak mümkündür. Bunlar; üretimden ileri gelen hatalar ve işletmeden ileri gelen hatalardır.

3.3.1.Üretim Hataları

Üretimden ileri gelen hatalar, külçe veya kütük gibi yarı mamül ürünlerde rastlanan birincil (Primer) hatalar ve özgül (spesifik) üretim işleminden kaynaklanan (kaynak, dövme, dökme, çekme vb.) işlem hataları olarak ayrılabilir.

3.3.1.1.Birincil Hatalar

Çelik içeren metallerde bulunan süreksizliklerin bazıları, demir filizi ergitilirken demirden hafif olan bazı safsızlıkların ergimiş demirin üstünde toplanıp ergimiş metal ile birleşerek oluşturdukları süreksizliklerdir. Bu süreksizliklere cüruf adı verilir. Ham demir sertleşirken cüruf kalıntıları da sertleşerek metal içinde siyah mermere benzeyen küçük tepecikler meydana getirir. Demirdeki bu cüruf kalıntıları metalik olmayan kalıntılar adını alır.

Ham demir saflaştırılır ve çeşitli işlemlerden sonra çelik elde edilir. Ergimiş çelikten kütük ve bunlardan da daha küçük parçalar (takoz veya kalın levha) elde edilir. Sertleşmiş kütükte bulunan metalik olmayan kalıntılar, düzensiz bir görünümde dir. Ayrıca kütükte kabarcık görünümünde hapsedilmiş gazlar da vardır. Bu gaz kabarcıklarına gözenek (porosity) adı verilir.

Ergimiş metal genişir, sonra soğuyup katılaşmaya başlarken büzülür, bu olay kütüğün merkezinde bir boşluk meydana getirir, bu boşluklar çoğu kez çatlak olarak nitelenir.

Kalın bir levhadan ince uzun bir levha elde edilirken levha bünyesindeki metalik olmayan kalıntılar bütün yönlerde özellikle çekme yönünde yayılır, düzleşir. Düzleşen bu kalıntılara laminasyon denir.

3.3.1.2.Özgöl Hatalar

Özgöl (Spesifik) hatalar malzeme için önem arzederler ve standartlarda referans radyograf olarak verilmişlerdir. Bu bakımdan radyografik değerlendirme açısından ayrı bir önem taşırlar.

Dövme hataları; dövülen metalin gerekli sıcaklığa kadar ısıtılmamasından ileri gelir. Yeterince ısıtılmayan kısım iyi akamaz ve kırılabilir. Bu hatalar yüzey altında olabildikleri gibi, yüzeyde de olabilirler. Bunlara dövme patlakları veya dövme çatlakları adı verilir.

Döküm hataları; biçim, ebat ve görünüş açılarından farklı olabilirler. Dökümlerde görülen çeşitli süreksizlikler aşağıda sıralanmıştır.

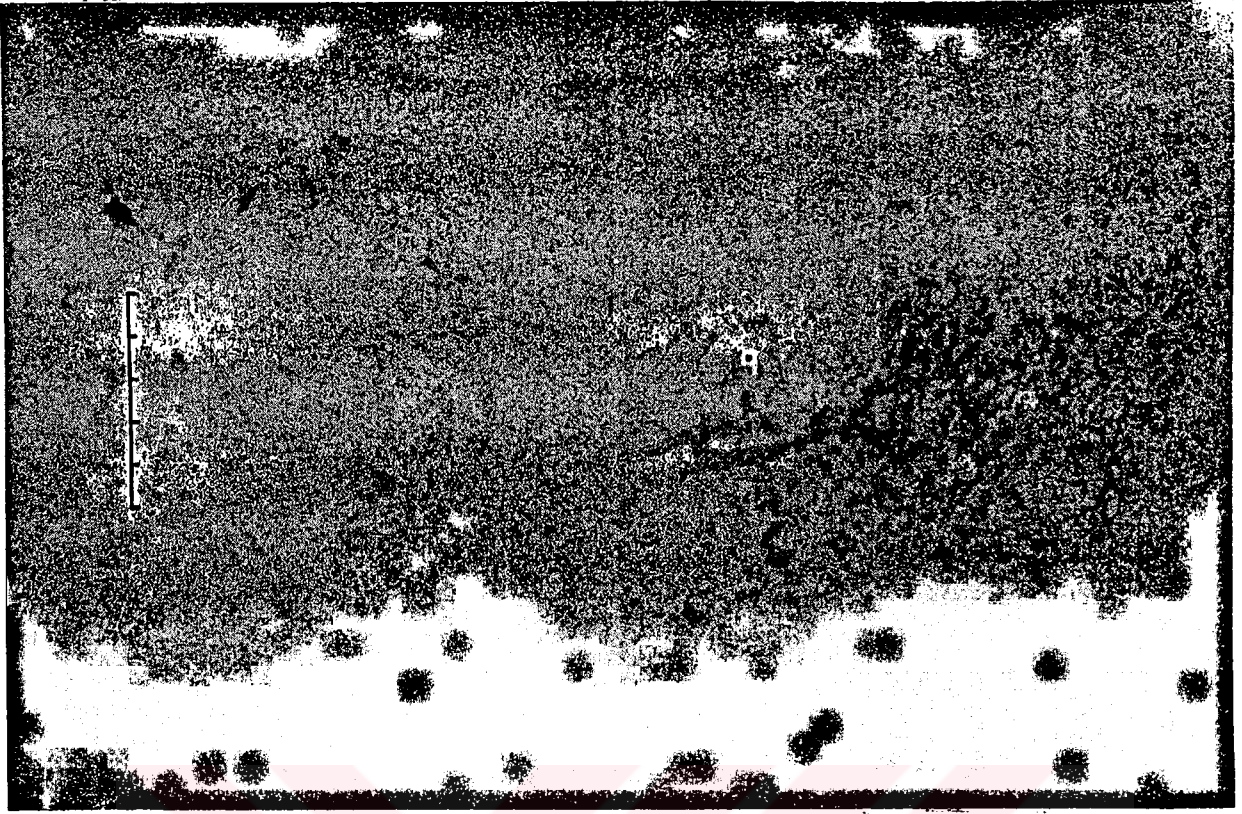
Gözenek ve gaz boşlukları; genelde erimiş metal kalıbın içine dökülürken oluşan ve sertleşme sırasında orada mahsur kalan gazdan ötürü meydana gelir. Başka bir deyişle gözeneklilik, kendi başlarına saptanabilen ve radyografıta belirgin, küre şeklinde görülen gaz boşluklarıdır. En ciddi gaz boşluklarına gaz delikleri veya darbe delikleri adı verilir. Genel gözenekliliğe kıyasla daha ciddi bir aksaklık sayılır.

Mikro-gözeneklilik; Gözenek için mikro gözenekler ayrı bir önem taşır, sadece belirli yerlerde görülen çok ince gaz ağıdır.

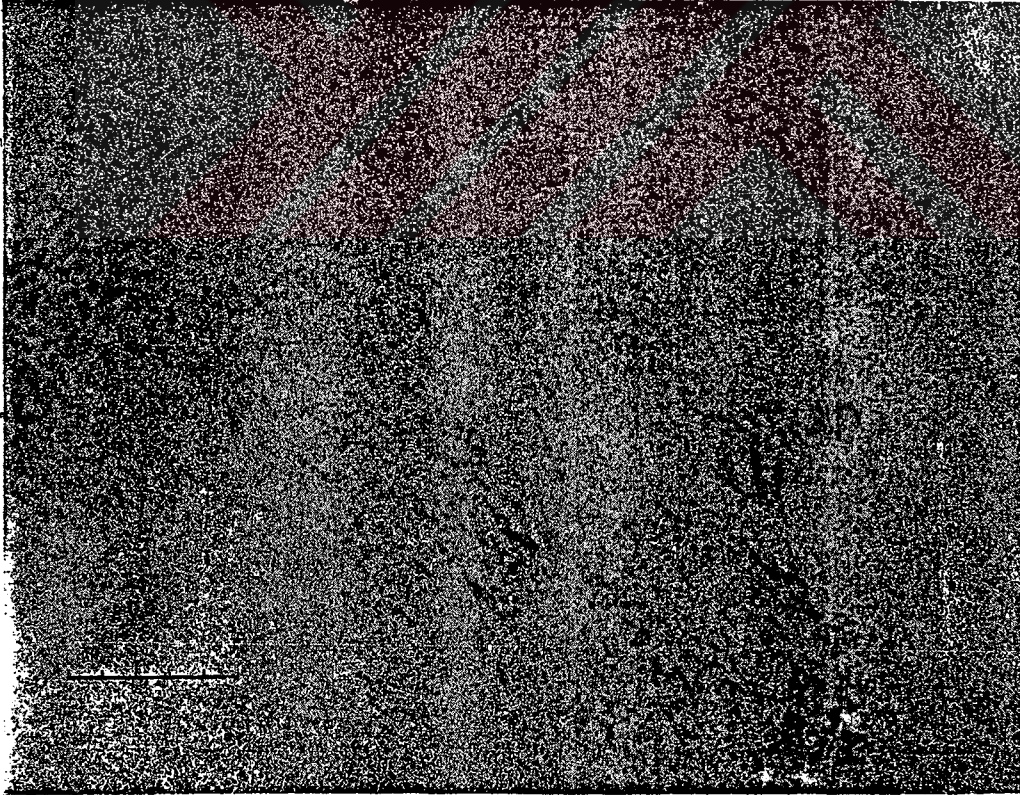
Çekme; döküm metali soğuyup katılaşırken yerel olarak kısaldığı zaman oluşur. Bazı ciddi durumlarda oyuk bir alan oluşabilir ve ince, dal gibi belirtiler ortaya çıkabilir. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de çekmeye ilişkin bir radyograf görülmektedir.

SıcakYırtık; bir dizi belirgin çatlaklar veya deliklerdir, dökümün soğuması sırasında güçlü ısıl gerilmelerden ötürü oluşur. ve Şekil 3.6’da sıcak yırtılmaya ilişkin radyograf yer almaktadır.

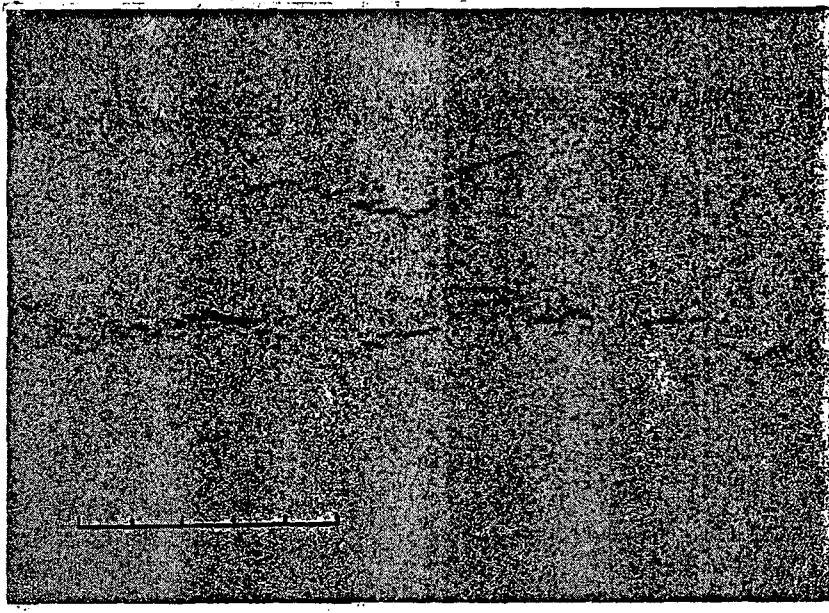
Çatlaklar; genelde sıcak damlalara kıyasla daha kolay saptanırlar. Şekil 3.7’de çatlağa ilişkin radyograf görülmektedir.



Şekil 3.4 Çelik Dökümde Çekme Olukları



Şekil 3.5 Çelik Dökümde Çekmeler



Şekil 3.6 Sıcak Yırtılma



Şekil 3.7 Çelik Döküm Radyografında Çatlak

Kaynak Hataları

Gözeneklilik; bunlar, kaynak metali katılaştıkça içinde gazın mahsur kalmasından ötürü meydana gelen boşluklardır. Gözeneklilik genelde küre biçimindedir, fakat uzunlamasına da olabilir. Genel olarak gözeneklilik sadece çok miktarda bulunması, keskin kuyrukluluk içermesi veya kısa bir mesafede çok miktarda birikmesi halinde önemli bir süreksizlik olarak kabul edilir.

Cüruf; bunlar disk şeklinde belirtilerdir, maden harici malzemelerin kaynak metalinde, genelde kaynak geçişleri arasında ya da kaynak geçişi ile malzeme arasında mahsur kalmasından ötürü meydana gelir.

Yoğun parçalar; bunlar, kaynak metalinin yoğunluğundan daha fazla yoğunlukta bir metalin oluşturduğu parçalardır. En çok görülen yoğun parçalar, tungsten elektrotlarının kırılmasından ve kaynak metalinin içinde mahsur kalmasından ileri gelen *tungsten parçalarıdır*.

Yetersiz nüfuziyet; kök bölgesinde bulunan ergimemiş alanlardır. Bunun nedeni kök geçişi birikirken ısınmanın yeterli olmamasıdır. Bu durum gözenek/cüruf tipi süreksizlikten daha ciddidir, çünkü gerilmeleri daha çok artırır.

Ergimeme; birbirini izleyen kaynak geçişleri arasında veya bir kaynak geçişi ile alt malzemenin yan duvarı arasında yapışma olmayan bir alandır. Genelde yanlış kaynak tekniği uygulanmasından ileri gelir.

Yetersiz dolgu; kaynak yapılan eklemin tümüyle dolmaması halidir.

Oluk; kaynağın ve alt malzemenin birleştiği yerde (ergime alanı) çöküntü şeklinde görülen olgudur.

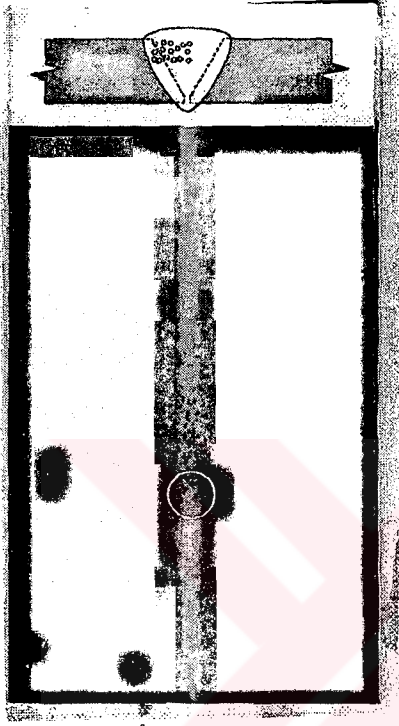
Üstüste binme; ergimemiş kaynak metalinin ergime bölgesi dışına taşmasıdır

Aşırı nüfuziyet; dışbükeylik adı da verilir, aşırı ısınmanın bir sonucu olarak oluşur.

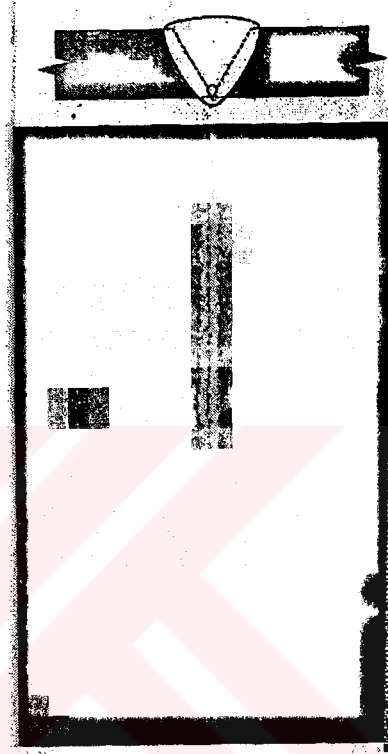
Çatlaklar; yerel bir bölgede bulunan gerilmeler, kaynak metalinin gerilme dayanıklılığını aştığı zaman meydana gelen kaynak metali kırılmalarına veya delinmelerine verilen isimdir. Soğuk çatlaklar, sıcak çatlaklar, uzunlamasına

çatlaklar, enlemesine çatlaklar, uç çatlaklar, kök çatlaklar, krater çatlaklar vb. olarak sınıflandırılabilir.

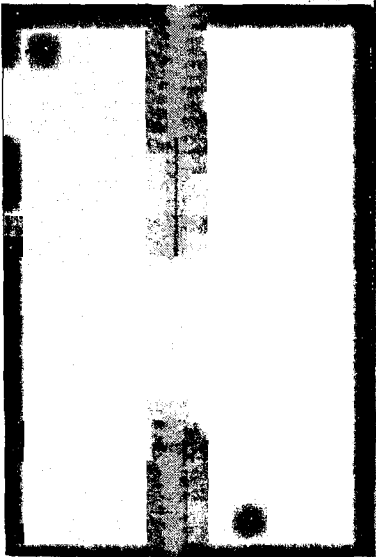
Yukarıda anlatılan kaynak hatalarına ilişkin örnekler Şekil 3.8- Şekil 3.18'de görülmektedir (Dupont, 1987).



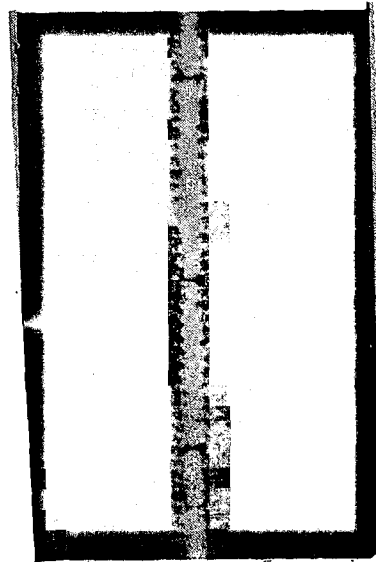
Şekil 3.8 Kümeleşmiş Porozite



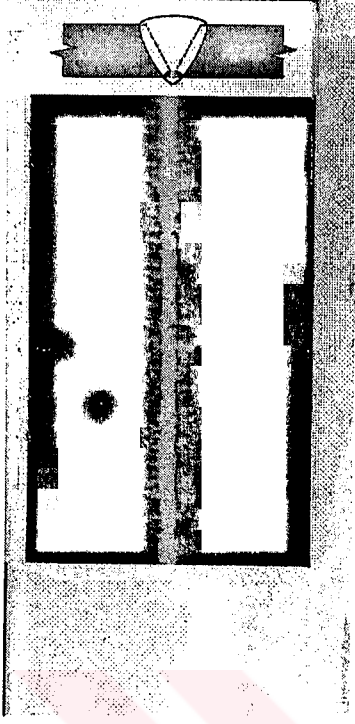
Şekil 3.9 Çizgisel Kök Pasosu Porazitesi



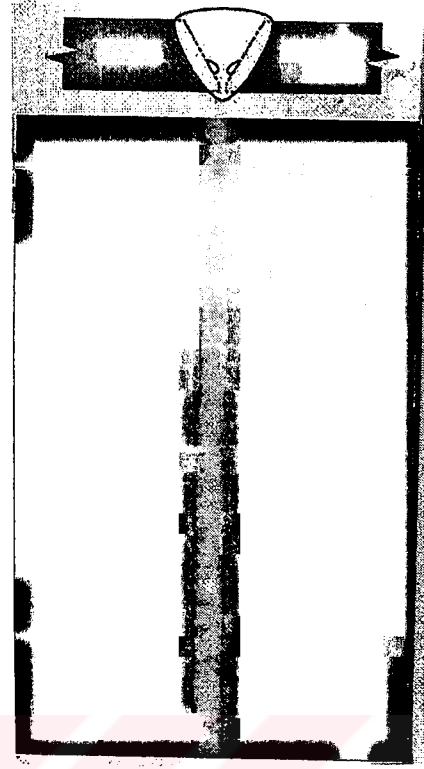
Şekil 3.10 Tamamlanmamış veya
Yetersiz Penetrasyon



Şekil 3.11 Pasolar Arası Cüruf Kalıntıları



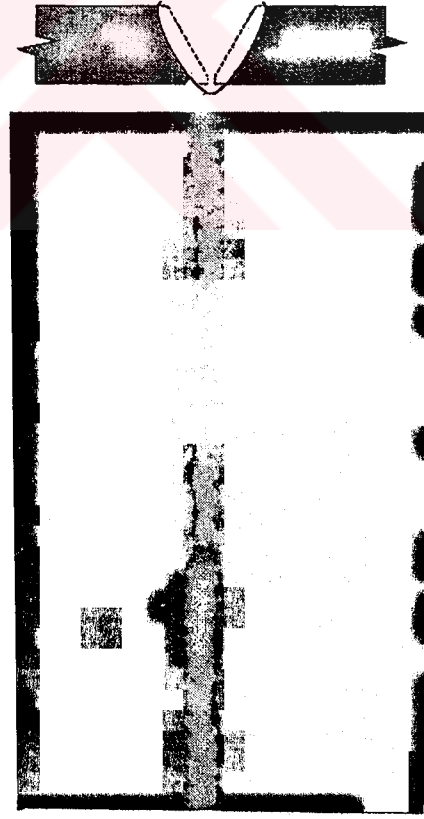
Şekil 3.12 Uzunlaşmış Cüruf Çizgileri



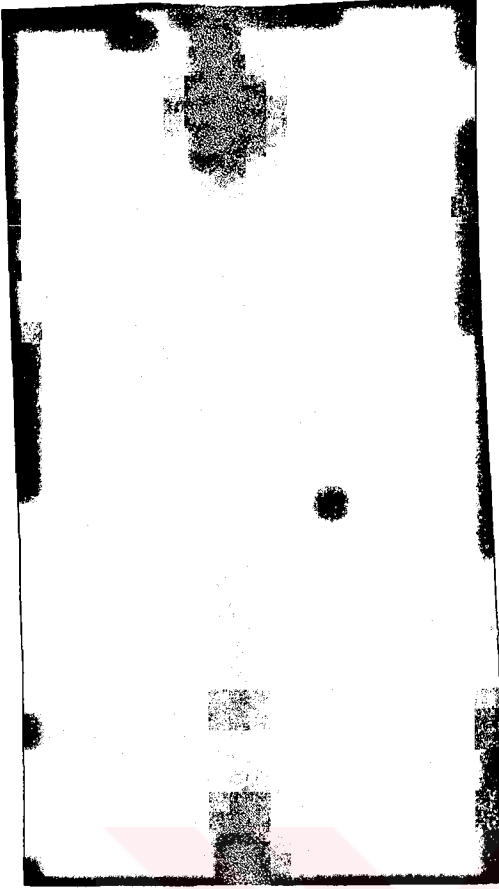
Şekil 3.13 Yan cidarda Birleşme Eksikliği



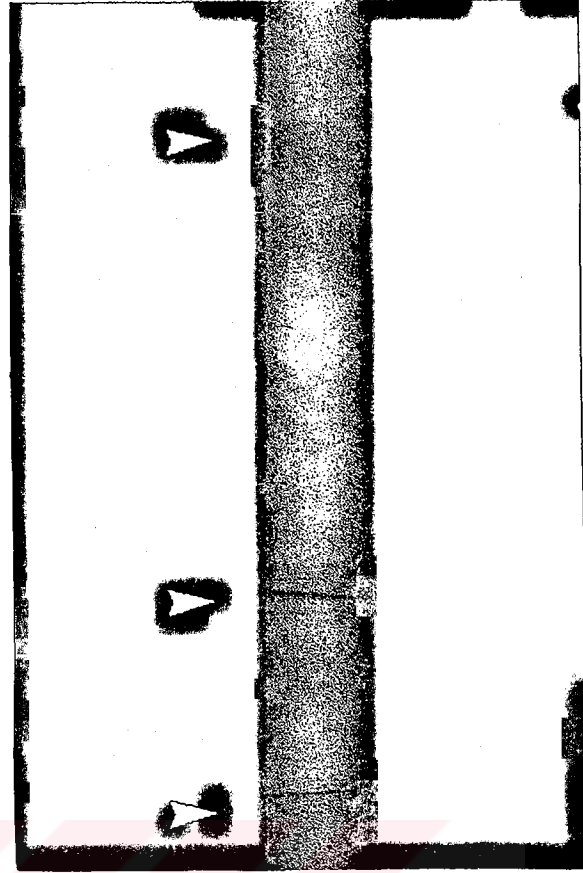
Şekil 3.14 Yanma Oluğu



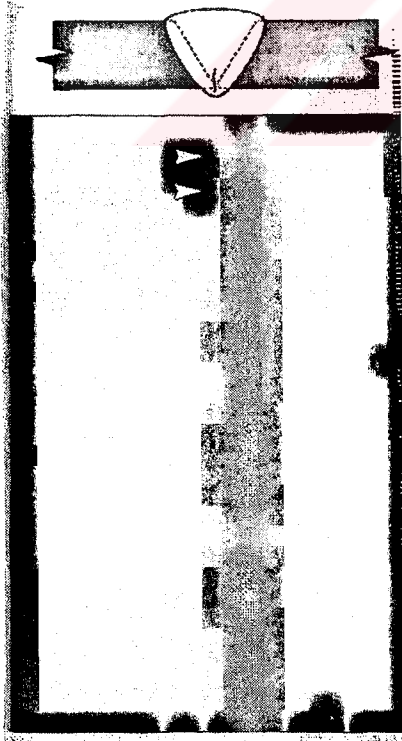
Şekil 3.15 Kök Altı Kesimi



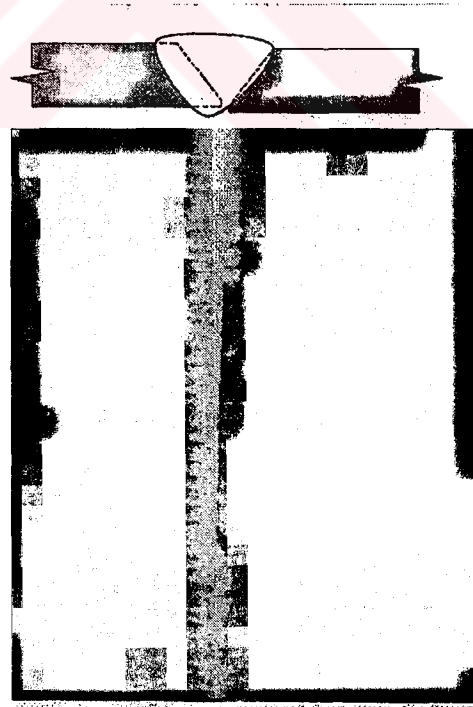
Şekil 3.16 Yüzeyde Konkavlık
(Yetersiz Dolgu)



Şekil 3.17 (a) Enine Çatlak



Şekil 3.17 (b) Boyuna Çatlak



Şekil 3.18 Nüfuziyetsizlik ve Uyumsuzluk

3.3.2. İşletme Hataları

Yorulma çatlakları, aşırı yükleme, gevrek kırılma ve korozyon malzemenin kullanım koşullarından kaynaklanan hatalardır. Özel olarak kabul standartları bildirmemiş ise, döküm ve kaynak işleri için aşağıdaki kurallar uygulanabilir:

Çatlaklar ve sıcak yırtılmalar kabul edilmezler,

Süngersilik kabul edilmez,

Soğuk katlanma kabul edilmez,

Ergimemiş soğuk bölgeler, vb. kabul edilmez

Tüm Avrupa Topluluğu ülkelerinde uygulanan CEN standardı EN-25817:1992 (ISO-5817:1992) üç tane kalite düzeyi belirtmektedir. D: orta, C: fazla, B:çok fazla.

Krater çatlakları dışındaki çatlaklara izin verilmez, krater çatlaklarına ise sadece D düzeyinde izin verilebilir. Füzyon ve nüfuz olmaması hatalarına izin verilmez, gözenekliliğe D düzeyinde %4'e kadar izin verilebilir, B düzeyinde ise %1'e kadar izin verilebilmektedir.

3.4. RADYOGRAFİK HATA DERİNLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Radyografik hata derinliğinin belirlenmesinin önemi, ürünün hizmet verebilirliğinin belirlenebilmesi için gereklidir.

Radyografi ile tesbit edilen hataların çoğu üç boyutlu olup, hatanın önemi hakkında karara varabilmek için her üç boyutunun ve türünün belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Genel olarak radyografi ile bir hatanın türü belirlenebilir, film düzlemine paralel olan etkin uzunluğu ve genişliği ölçülebilir. Ancak, hatanın derinliği (yüksekliği) olarak da tanımlanan radyasyon demeti yönündeki uzantısını radyograftan doğrudan yorumlamak zordur.

Araştırılan bir yüzeyin altındaki hatanın derinliğinin belirlenebilmesi için iki temel metod mevcuttur. Bu metodlardan biri radyografi diğeri ise ultrasonografidir.

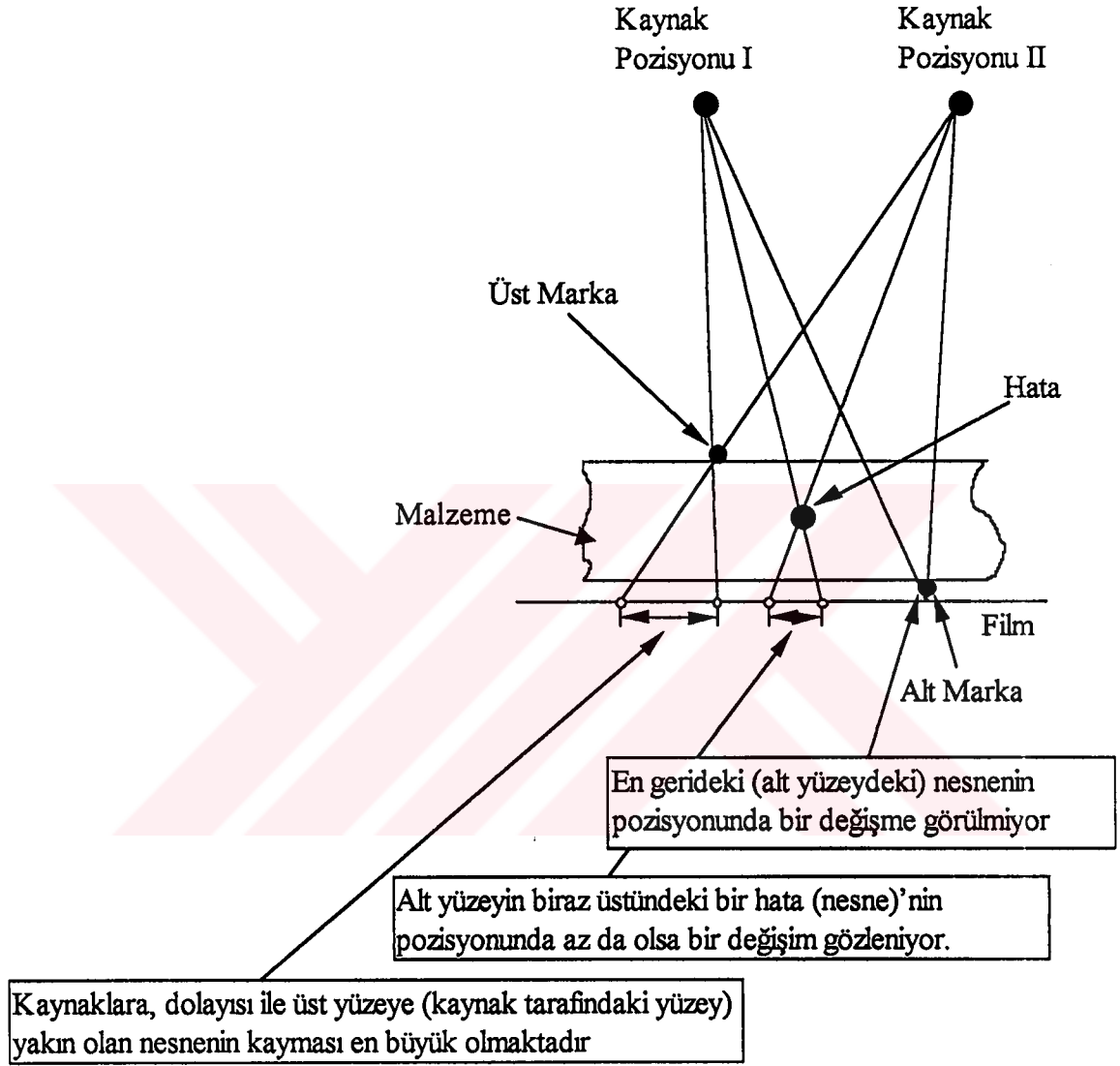
Bu çalışmada, malzeme içerisindeki hata derinliğinin belirlenmesi için radyografik paralaks, hata yoğunluğunun ölçümü ve çift film-çift çekim teknikleri kullanılmıştır.

Radyografik paralaks metodlarına ek olarak, radyografi ile derinlik belirlenmesi tekniği, bilgisayar destekli tomografi, ve stereoradyografi gibi uzmanlaşmış uygulamalarla da yapılmaktadır. Ancak, bu teknikler endüstride henüz kullanılmamakta, bazı ayırık uygulamalar olarak rastlanmaktadır.

3.4.1. Paralaks (Çift Işınlama) Metodu

Halen endüstride kullanılan radyografik araştırma metodları, çoğunlukla paralaks metodlarına dayanmaktadır. Bu metodlar, radyasyon kaynağının iki farklı konumunda yapılan iki ayrı ışınlamayla, hata görüntüsündeki kaymadan, hatanın derinliğinin hesaplanması prensibine dayanmaktadır (Halmshaw, 1995).

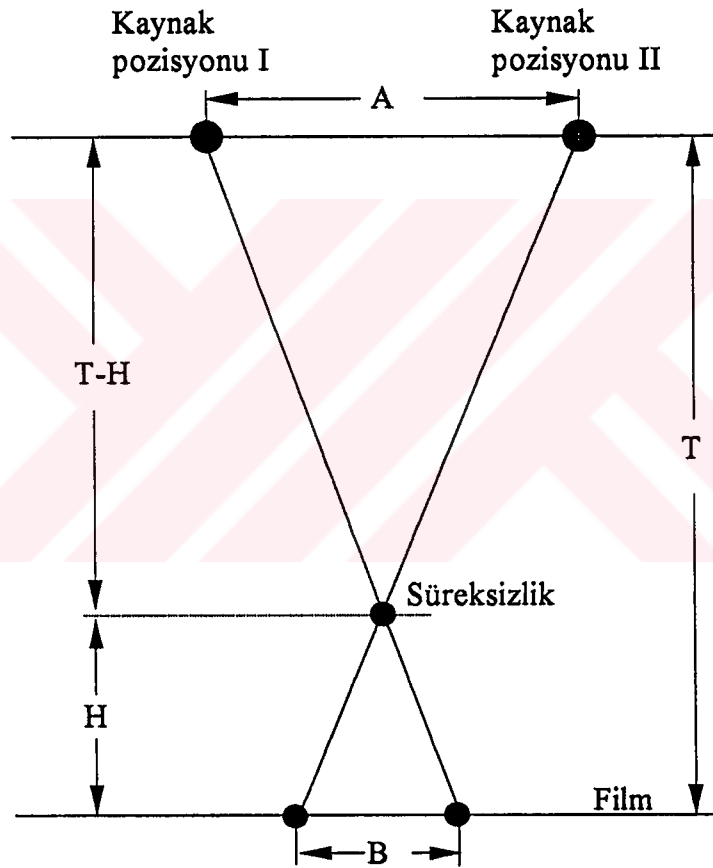
Şekil 3.19’da görülen radyografik paralaks prensibinde, filme yakın olan bir nesne konum değiştirmiyormuş gibi, filminden uzakta olan bir nesne ise bir miktar kaymış görünmektedir. Görüntünün sağa ya da sola kayma miktarları nesnenin radyasyon kaynağına olan uzaklığı ile doğru orantılıdır (Kodak, 1980).



Şekil 3.19 Radyografik Paralaks Prensibi (Bryant ve McIntire, 1985).

3.4.1.1 Benzer Üçgen Bağıntısı

Benzer üçgen bağıntısı, radyografik paralaks metodlarında kullanılan hesaplamaların temelini oluşturur. Şekil 3.20'den de görüldüğü gibi, H yüksekliğinin $T-H$ yüksekliğine bölümü B tabanının A tabanına bölümüne eşittir. Tüm radyografik paralaks metodları bu temel bağıntıyı korur (Bryant ve McIntire, 1985).



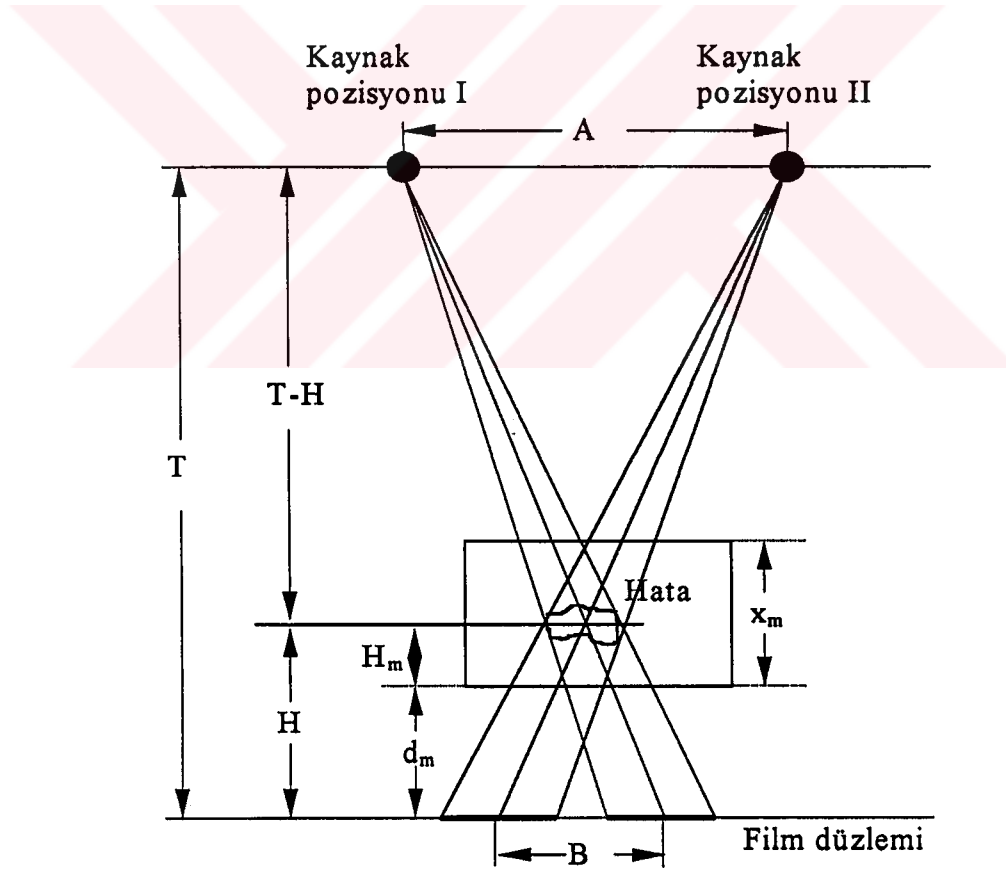
Şekil 3.20 Benzer Üçgen İlişkisi

Radyografik paralaks metodları, benzer üçgen bağıntısının üç değişik şeklini kullanırlar. Bu üç metod: rijid formül, tek işaretçi yaklaşık formülü ve çift işaretçi yaklaşık formülüdür.

Benzer üçgen bağıntılarında kullanılan veriler görüntünün film düzlemindeki yer değiştirmesinden elde edilir. Malzemenin film üzerindeki yüksekliğini hesaplamakta bazı zorluklarla karşılaşılabilir. Belirli oryantasyon ve hata geometrileri de ölçüm hatalarına neden olabilir.

3.4.1.2. Rijid Paralaks Metodu

Şekil 3.21’de rijid paralaks metodu gösterilmiştir



Şekil 3.21 Rijid Formül Paralaks Metodu (Rumyantsev)

Rijid formül paralaks metodunda:

$$\frac{H}{T-H} = \frac{B}{A} \quad (3.2)$$

$$H = \frac{BT}{A+B} \quad (3.3)$$

ve

$$H_m = H - d_m \quad (3.4)$$

tanımı yapılırsa,

$$H_m = \frac{BT}{A+B} - d_m \quad (3.5)$$

elde edilir. Burada:

B: Hatanın görüntü kaymasının paralaksı,

A: Görüntü almalar arasındaki kaynak kayması,

T: Kaynak-film arasındaki mesafe,

H: Görüntü düzleminde hatanın uzaklığı,

d_m : Malzeme-film uzaklığı,

x_m : Malzeme kalınlığı,

H_m : Hata derinliğidir.

Eşitlik 3.5’de ilk üç parametreyi ölçerek veya bilerek, dördüncü parametreyi de benzer üçgen bağıntısını kullanarak hesaplayabiliriz.

Rijid paralaks metodunda markalamaya gerek yoktur. Bununla beraber, malzeme kalınlığı, kaynak-film uzaklığı ve kaynak kayması hasas olarak bilinmelidir. Bu ölçümlerin bilinmesine ek olarak, hatanın (süreksizliğin) görüntüsü, bir çift görüntü olarak alınmış olmalıdır.

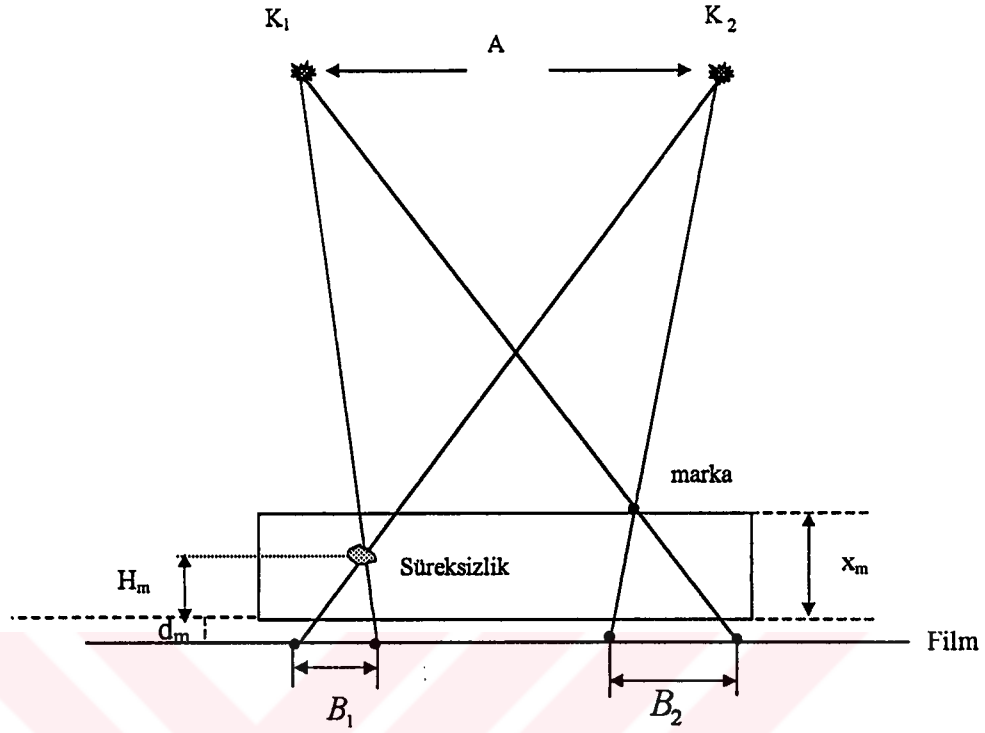
Bu yöntem sıkça ve yaygın olarak kullanılan bir metoddur. Metodun uygulamasında şu aşamalar söz konusudur;

- 1 Gerekli olan ışınlama süresi hesaplanır,
- 2 Hesaplanan ışınlama süresinin yarısında ilk radyografik çekim düzeninde ışınlama yapılır,
- 3 Radyasyon kaynağı film düzlemine paralel olarak hareket ettirilir,
- 4 Işınlama süresinin ikinci yarısı için, ikinci çekim düzeninde ışınlama yapılır.

Katı paralaks (rijid paralaks) metodunu kullanırken kaynak-film mesafesi ile malzeme-film mesafesi oranlarını oldukça yüksek tutmak önemlidir.

3.4.1.3. Tek Markalama Metodu

Malzeme kalınlığı ve hata derinliği, kaynak-film uzaklığına göre küçük olduğu zaman, H ve B arasındaki bağıntı doğrusala yaklaşır ve hatanın film düzlemi üzerindeki yüksekliği yaklaşık olarak paralaksına orantılı olur. Şekil 3.22’de gösterildiği gibi, bir malzemenin kaynak tarafına yapay bir hata, başka bir deyişle markalama elemanı yerleştirilir. Hatanın derinliği, hatanın radyografik görüntüsünün, markalama elemanı ile karşılaştırılarak tahmin edilebilir veya hesaplanabilir. Örneğin, eğer markalama elemanının kayması hata kaymasının iki katı ise, bu hatanın yaklaşık olarak malzemenin ortasında olduğunu belirtir. Bu paralaks metodunun uygulanmasında; rijid metotta bilinmesine ihtiyaç duyulan ayrıntılı kaynak-film uzaklığı ve kaynak kayması ölçümlerini gereksiz kılar.



Şekil 3.22 Tek Markalama Metodu

3.4.1.4. Çift Markalama Metodu

Film malzeme ile temas halinde yerleştirilemediği zaman veya hatanın görüntüsü bir çift-görüntü alınmış radyografıta hazır olmadığı zaman, çift markalama metodu kullanılabilir.

Eğer her iki markalama elemanı da ince ise, kalınlıkları ihmal edilebilir ve test malzemesinin alt ve üstünü temsil ettikleri kabul edilebilir. Hatanınki ile beraber her markalama elemanının da paralaksını veya görüntü kaymasını ölçerek ve aşağıdaki lineer interpolasyonları kullanarak test edilen malzemenin iki yüzeyi arasındaki hatanın göreceli konumu elde edilebilir. Şekil 3.23’de B_1 , süreksizliğin, B_2 , kaynak tarafındaki markalama elemanının ve B_3 , film tarafındaki markalama elemanının görüntü kaymaları olmak üzere; hata kaymasının film tarafındaki markanın

kaymasından farkı, ΔB_f ve kaynak tarafındaki marka kaymasının film tarafındaki marka kaymasından farkı ΔB_{mal} olmak üzere;

$$B_1 - B_3 \cong \Delta B_f \quad (3.6)$$

$$B_2 - B_3 \cong \Delta B_{mal} \quad (3.7)$$

olarak tanımlanır. Bu durumda,

$$\frac{H_f}{X_{mal}} = \frac{B_1 - B_3}{B_2 - B_3} \quad (3.8)$$

veya,

$$\frac{H_f}{X_{mal}} \cong \frac{\Delta B_f}{\Delta B_{mal}} \quad (3.9)$$

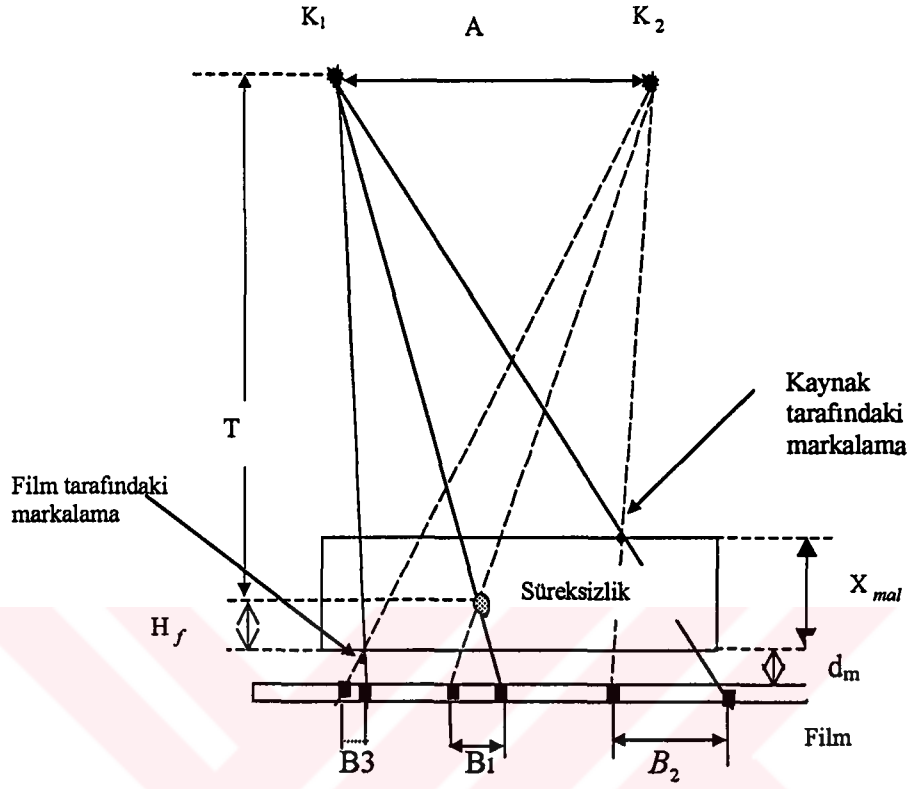
ve

$$H_f \cong X_{mal} \times \frac{\Delta B_f}{\Delta B_{mal}} \quad (3.10)$$

Elde edilir. Burada;

H_f : Hatanın, film tarafındaki markalama elemanı üzerindeki yüksekliği,

X_{mal} : Kaynak tarafındaki markalama elemanı ile, film tarafındaki markalama elemanı arasındaki uzaklıktır. (malzeme kalınlığıdır).



Şekil 3.23 Çift Markalama Metodu

Böylelikle, çift markalama metodu ile hatanın, filmden veya yüzeyden uzaklığı hesaplanabilir.

Çift markalama metodundan yararlanarak, hata derinliği grafik yardımıyla da bulunabilir. (Şekil 3.24 b)

B_2 : M_1 markasının yer değiştirme miktarı,

B_3 : M_2 markasının yer değiştirme miktarı,

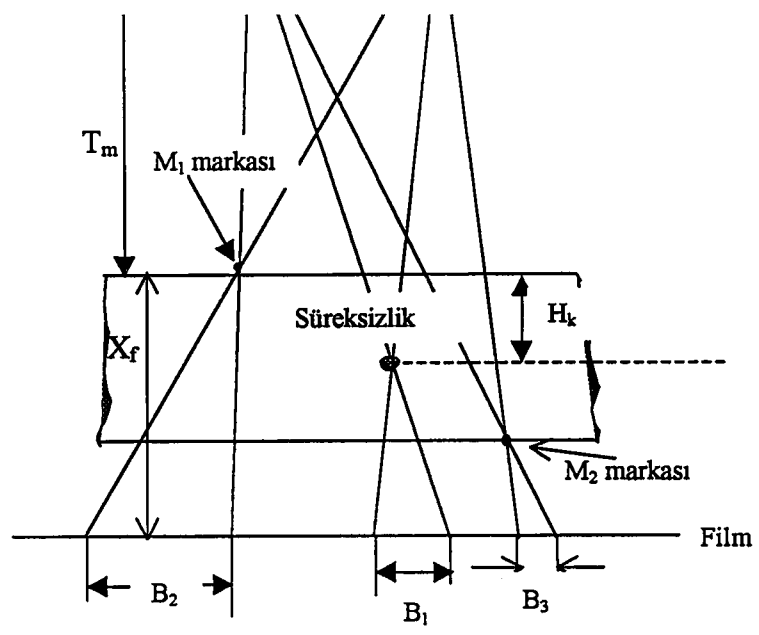
B_1 : Süreksizlik görüntüsünün yer değiştirme miktarıdır.

Plaka şeklindeki kurşun markalar Şekil 3.24. a'da ki gibi malzemenin sırasıyla (M_1 , M_2) üst ve altına yerleştirilir. Malzeme ve film sabit tutularak radyasyon kaynağı önce 1 ve sonra da 2 pozisyonundan olmak üzere iki ışınlama yapılır. Radyasyon kaynağının yerinin değişmesi sonucunda film tarafındaki (M_2) kurşun markanın görüntüsünün konumunun değişimi çok az belki de fark edilemeyecek derecede küçük olacaktır. Buna karşılık süreksizliğin ve kaynak tarafındaki M_1 yeri büyük ölçüde değişecektir.

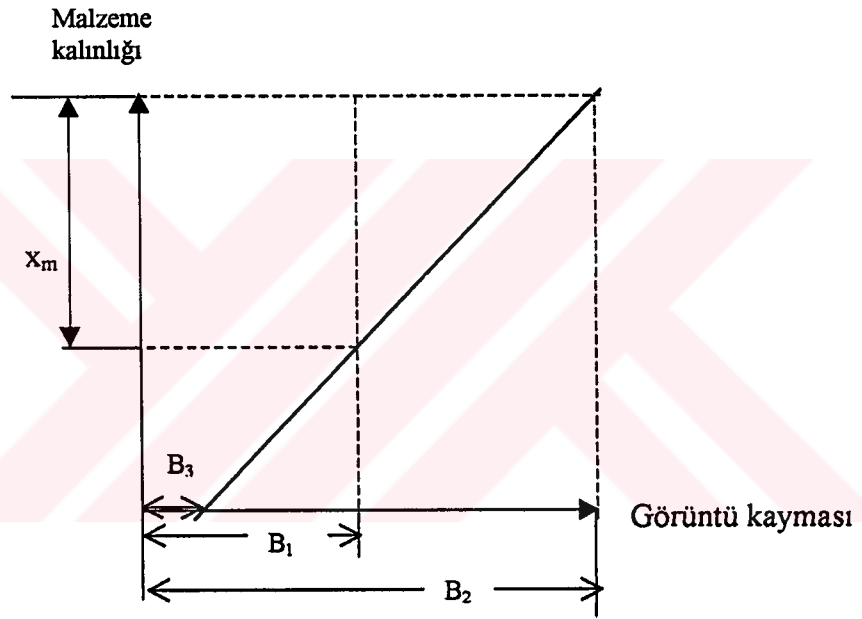
Genellikle süreksizliğin malzemenin hangi yüzüne yakın olduğunu bilmek zordur. Bu gibi durumlarda, süreksizlik ve M_1 'in görüntü yerlerinin değişimleri film üzerinde ölçülür. Süreksizlik görüntüsünün yer değişimi M_1 'inkinin yarısından küçük ise süreksizlik film düzlemine daha yakındır, eğer büyük ise süreksizlik M_1 düzlemine daha yakındır.

Bu hesaplama yönteminde özellikle M_2 markasının görüntüsünün değişmediği kabul edilmiştir. Bu her zaman mümkün olmayabilir. Kaset veya film tutucusu, malzemenin alt yüzeyine temas etmediği veya ışınlama noktaları arasındaki mesafenin çok büyük olması durumlarında, görüntü yeri değişebilir. Böyle durumlarda grafikte çözüm daha uygundur. (Şekil 3.24 b) Görüntü kaymaları film düzleminden olan uzaklıklarla orantılıdır. Bu doğrusal grafik, görüntü kaymasına karşılık malzemenin alt yüzeyinden olan uzaklık (malzeme kalınlığı) arasında çizilebilir.

Kalınlığı belli olan bir malzemenin alt ve üst yüzeyini temsil eden M_2 ve M_1 markalarının görüntülerinin yer değiştirmesi film üzerinde ölçülerek yatay eksene, malzeme kalınlığı da dikey eksene yerleştirilir. Bu yöntemde kaynak-film arasındaki uzaklığı bilmek gerekli değildir. (Halmshaw, 1991; Bryant ve McIntire, 1985).



a)



b)

Şekil 3.24 Markalama Metodunda Görüntü Kaymasının Grafik İle Gösterilmesi

3.4.2. Radyografik Yoğunluk Metodu İle Hata Derinliğinin Belirlenmesi

Malzeme içindeki hata kalınlığının tayini de önemli bir hususu oluşturur. Bir başka deyişle, hatanın malzeme içindeki derinliği kadar, hata kalınlığının da bilinmesi istenir.

Hataların malzemenin kalınlığı doğrultusundaki boyutları ile radyograf üzerindeki yoğunlukları arasında bir ilişki vardır. Hata kalınlığı arttıkça radyografteki hata görüntüsünün yoğunluğu da artmaktadır. Hata kalınlığı-yoğunluk ilişkisi, hata kalınlığının tayininde bir diğer yol olarak yararlanılabilmektedir. Ancak burada hayli hassas bir yoğunluk ölçümü yapılabilmesi bir zorunluluktur.

3.4.3. Çift Film-Çift Çekim Metodu

Çift Film-Çift Çekim Yöntemi, radyografik hata tayini için nispeten kolay, fakat az ekonomik olan yöntemdir. Bu methodda malzemenin iki radyografi çekilir. Birinci çekimde hata içeren malzemenin, x, y, z (en, boy, yükseklik) koordinatlarından önce örneğin, z yüksekliği: kaynak-film doğrultusunda olacak şekilde yerleştirilmesi halinde radyografi alınır. Bu durumda, radyograf üzerinde x-y düzlemli görüntü elde edilir.

Farklı bir film kullanılarak yapılan ikinci çekimde ise, malzemenin diğer bir pozisyonda radyografi çekilir. Bu durumda da radyograf üzerinde y-z veya x-z düzlemi görüntüsü alınmış olur. Malzemeye ait iki farklı radyografik değerlendirme yapılarak, hatanın x, y ve z koordinatlarındaki yeri tayin edilebilir.

Bu yöntemin malzemenin bir boyutunun diğer boyutuna göre çok büyük olması halinde uygulaması zordur. Bir başka deyişle, hatalar için uygun değildir. Zira, hem pratik olarak ikinci radyografik çekim zordur ve hem de çoğu kez bu boyut endüstriyel radyografi çekim kalınlığını aşar. Bu nedenle bu yöntem, malzeme boyutlarının nispeten biri birine uygun olduğu haller için daha uygundur.

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu yüksek lisans tez çalışmasında endüstriyel radyografi tekniği kullanılarak, malzeme içindeki süreksizliklerin, yerlerinin ve boyutlarının minimum hata ile belirlenebilmesi amacıyla, bir dizi radyografik çekim yapılmıştır.

Bu çekimlerde, farklı numuneler kullanılmıştır. Farklı kalınlıklardaki numuneleri ikiye ayırabiliriz. Birinci grup numuneler, yapay olarak hata meydana getirilen numuneler olup, amaca uygun olarak tasarlanmışlardır. İkinci grup numuneler ise farklı özellikleri nedeniyle seçilmiş, çoğu farklı hata içeren numunelerdir. Radyografik çekim sonucunda hatalar öncelikle radyograf üzerinde iki boyutlu olarak tespit edilmiştir. Buna ek olarak, radyografik paralaks, radyografik yoğunluk ve çift film-çift çekim radyografi teknikleri kullanılarak hata derinliklerinin belirlenmesi yoluna gidilmiştir. Başka bir ifade ile, hataların yerlerinin üç boyutlu olarak değerlendirilmesi yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar esas itibariyle İstanbul Teknik Üniversitesi, Nükleer Enerji Enstitüsü, Nükleer Uygulamalar Anabilim Dalı radyografi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi, Nükleer Uygulamalar Bölümü'nden de yararlanılmıştır.

Malzemedeki hacimsel hataların endüstriyel radyografi yöntemi ile belirlenmesi amaçlandığından, esas itibariyle İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü, Nükleer Uygulamalar Anabilim Dalı radyografi laboratuvarında bulunan, X-ışını ve gama (Co-60) radyasyon kaynakları kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

4.1.DENEY KOŞULLARI

Radyografik çekimler, farklı malzemelerle ve aynı malzemenin farklı kalınlıkları kullanılarak yapılmıştır. Malzeme kalınlığına uygun olarak X-ışını kaynağı veya gama radyasyon kaynağı kullanılmıştır.

Gama cihazı olarak, uzaktan kumanda ile çalışan projeksiyon tipi bir cihaz kullanılmıştır. Bu sistemin zırh ve projeksiyon düzeneği sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

Gama kaynağı olarak kullanılan Co-60 radyoizotopunun enerjileri Tablo 2.1’de verilmiş olup, kaynağın deneyler sırasındaki aktivitesi 9,6 Ci olarak belirlenmiş ve bu aktivite değeri ile çalışılmıştır.

X-ışın cihazı olarak, Balteau marka 300 kV ve 5 mA çalışma kapasiteli, endüstriyel X-ışını cihazı ile çalışılmıştır. Bu X-ışın cihazının kumanda konsolu ve X-ışını tüpü sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de görülmektedir.

Deneylerde iyi görüntü kalitesine ulaşabilmek için, en avantajlı geometri yakalanmaya çalışılmış, görüntü kalitesini etkileyecek faktörler göz önüne alınarak, bunların standartlara uygunluğuna dikkat edilmiştir.

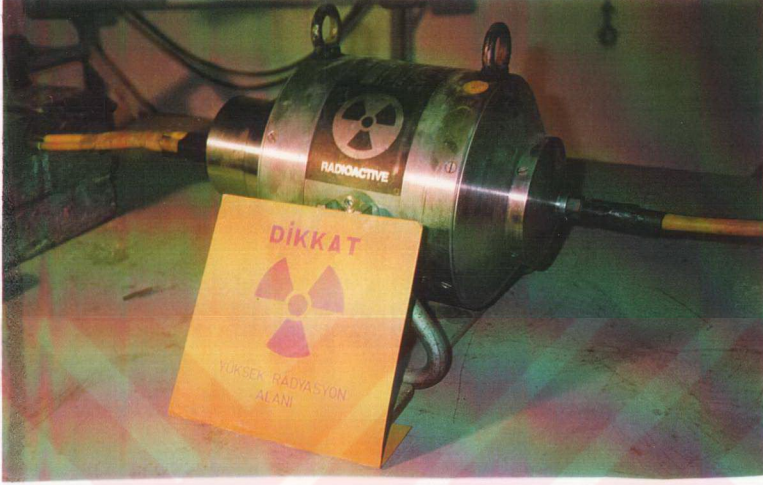
Bu standartlardan biri olan kaynak-film mesafesi malzeme kalınlığının sekiz katı olarak alınmış ve kullanılmıştır.

Deneylerde film olarak, Kodak Industrex AA ve Agfa D7 filmleri kullanılmıştır. Bu filmler orta hızlı olup endüstriyel radyografide kullanılmaktadırlar.

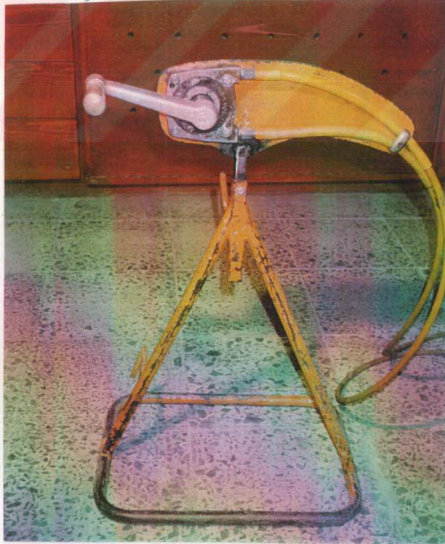
Ekran olarak, filmin ön ve arkasında 0,125 mm kalınlığında kurşun ekranlar kullanılmıştır. Kurşun ekranların arasındaki film, kasetler içine yerleştirilerek çekimler yapılmıştır.

Poz süresi; X-ışın kaynağı için Bölüm 2’de verilen poz süresi çizelgelerinden, Co-60 gama kaynağı için ise, radyoaktif kaynaklar için poz süresi tablolarından yararlanarak hesaplanmıştır. Deneyler bu poz süreleri ile gerçekleştirilmiştir.

Çekimler sırasında, çevre saçılmaların önlenmesi amacı ile, malzeme altına ve çevresine 2 mm kalınlığında kurşun levhalar serilmiştir.



Şekil 4.1 Deneylerde Kullanılan Co-60 Zırhı



Şekil 4.2 Deneylerde Kullanılan Gama Cihazına Ait Uzaktan Kumanda Sistemi



Şekil 4.3 X-Işını Cihazı Kumanda Konsolu



Şekil 4.4 X-Işını Tüpü.

4.2.X-IŞINI RADYOGRAFİSİ İLE HATA TESBİT ÇALIŞMALARI

4.2.1.Özel Numuneler Kullanılarak Yapılan Hata Tesbit Çalışmaları

X-ışını ile hata tespiti için özel olarak hazırlanmış olan deney parçaları kullanılmıştır. Bu deney parçaları 80 mm çapında silindirik bloklardan oluşan ve farklı çalışmalar içinde referans olarak başarı ile kullanılmış 5 kalınlıklı bir numune setidir. 5 kalınlıklı numune setinde, numune kalınlıkları ise 8 mm den 48 mm ye kadar değişmekte olup, 8, 18, 28, 38, 48 mm kalınlıklara sahiptirler **Bulubay ve Tuğrul (1998), Çetin (1992), Akıncı (1996)**. Şekil 4.5’de 5 kalınlıklı numune seti bir arada görülmektedir. Beşinci kalınlık şekilde görülen kalınlıkların kombinasyonu ile elde edilmiştir. Her numune için radyografik çekimler yapılmıştır. Farklı kalınlıklı parçalar üzerinde yapılan ilk uygulama, aynı kV, mA ve kaynak-film mesafelerinde, fakat kalınlıklarına uygun poz sürelerinde radyograf almak olmuştur. Bu parçalar üzerinde yapılan ikinci uygulamada ise, kV, mA ve kaynak-film mesafesi aynı kalmak üzere, her parça için standart poz süresinde (her kalınlık için aynı poz süresinde) çekimler yapılmıştır.

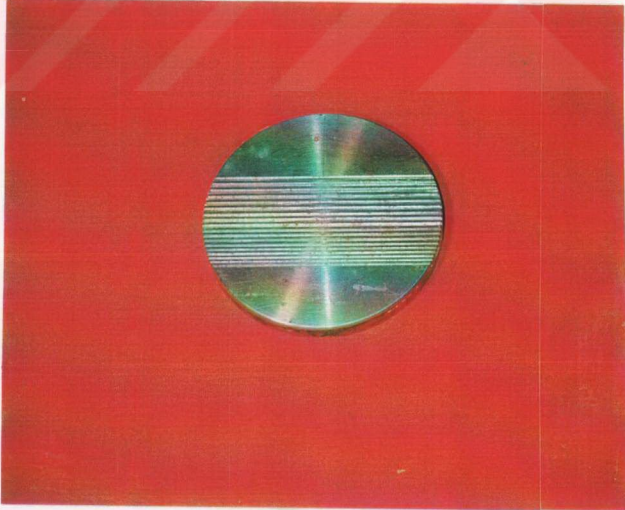
Amaç hata tespiti olduğu için, yukarıda sözü geçen test düzeneğinde kullanılan numune seti özel olarak hazırlanmıştır. En küçük kalınlıklı parça olan 8 mm kalınlığında 80 mm çapındaki blok, hata referans parçası A olarak düzenlenmiştir. Bu parça üzerinde özel olarak çentikler açılmıştır. Parça üzerindeki çentikler 0,7-1,2 mm arasında, 0,1 mm aralıklı olarak ve 0,1 mm farklı kalınlık farkı ile yan yana açılmıştır. Bir başka deyişle, 0,7-1,2 mm arasında değişen 6 farklı kalınlık, çift hata kanalı olacak şekilde düzenlenmiştir. Çentiklerin derinliği de aynıdır. Bu parça ve test düzeneği Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de görülmektedir.

X-ışını ile hata tespiti amacıyla hazırlanan bir diğer çelik numune ise, 20 mm kalınlığında, 80 mm çapında, tanıtılan 5’li numune seti ile aynı malzemeden, bu yüksek lisans tezi için özel olarak imal ettirilmiş bir parçadır. Hata Referans Parçası B olarak nitelenen bu parçanın, üzerinde özel olarak açtırılmış çapları 0,5-3 mm arasında değişen ve her birinin derinliği yarıçapları kadar olan altı tane silindir kesiti şeklindeki yarıktan oluşan bir düzendir. Bu düzener tek başına ve ana test parçaları

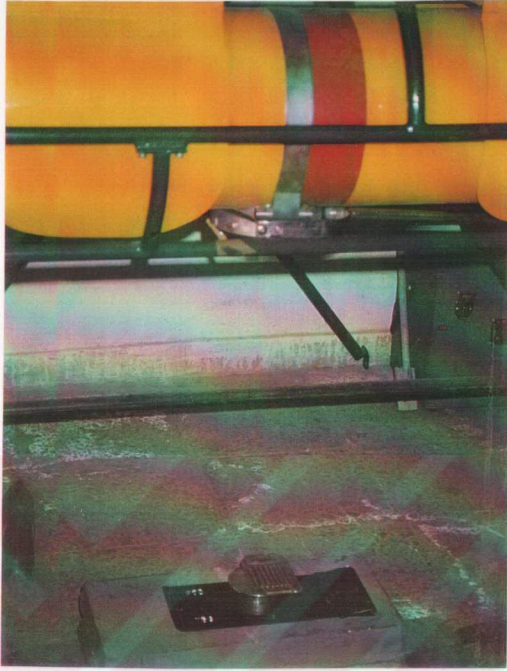
ile birlikte kullanılmıştır. şekil 4.8'de Hata Referans Parçası B görülmektedir. Referans Parçası A ve Referans Parçası B'ye ait deney koşulları Tablo 4.1'de verilmiştir.



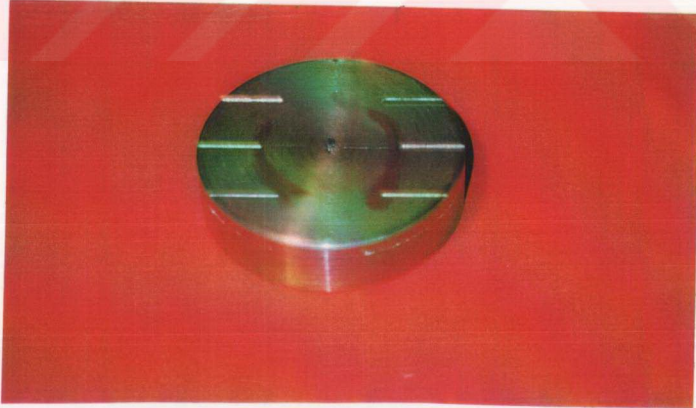
şekil 4.5 5 Kalınlıklı Uygulama İçin Numune Seti



şekil 4.6 X-Işını Hata Referans Parçası A



Şekil 4.7 Referans Parçası A Işınlama Düzenegİ



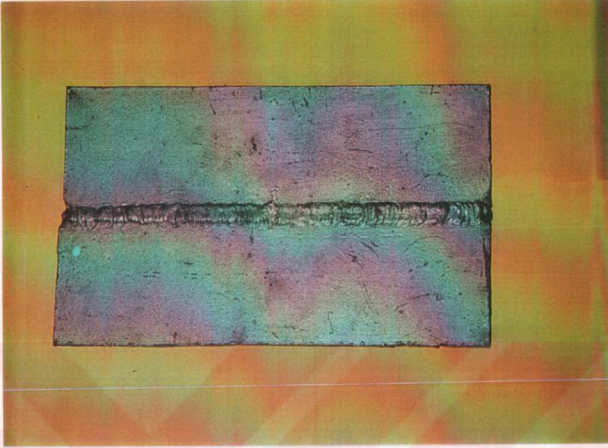
Şekil 4.8 X-Işını Hata Referans Parçası B

Tablo 4.1. X-Işını Radyografi Çekimi Deney Koşulları

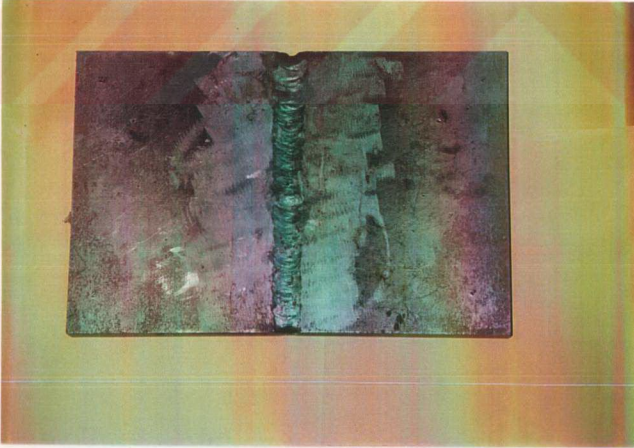
Çekim	Radyografi Tipi	Malzeme Kalınlığı (mm)	Uygulanan Gerilim (kV)	Uygulanan Akım (mA)	T (mm)	Ön ve Arka Ekran (mm)	Film	Poz Süresi (dk)
(5 Kalınlıklı Numune Seti için) Çekim Seti I	X-Işını	8 18 28 38 48	200	3	700	0,125	Kodak Indus. AA	1 3 16 28 33
(5 Kalınlıklı Numune Seti için) Çekim Seti II	X-Işını	8 18 28 38 48	200	3	700	0,125	Kodak Indus. AA	16
Çekim Seti III	X-Işını	20	200	3	700	0,125	Kodak Indus. AA	4

4.2.2. X-Işını İle Genel Hata Tesbit Çalışmaları

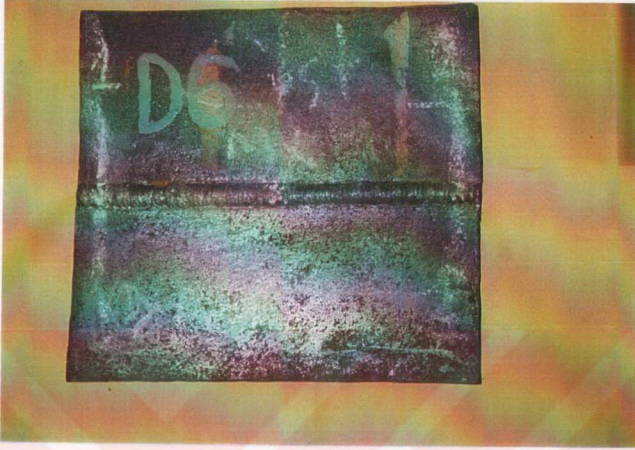
X-ışını radyografisi ile genel hata tesbiti için, çevreden temin edilen dört adet kaynak dikişli parça bir ekstrüzyon (çekme) kalıbı, bir arkeolojik dövme levha ve bir alüminyum profil üzerinde radyografik çekimler yapılmıştır. Bu deney parçalarına ilişkin yapılan çalışmaların sonucunda içerdikleri hatalar belirlenmiştir. Dört adet kaynak dikişli parçalar, Kaynak Dikişi I, Kaynak Dikişi II, Kaynak Dikişi III ve Kaynak Dikişi VI olarak adlandırılmıştır. Bu parçalara ait resimler Şekil 4.9-Şekil 4.12’de, deney koşulları ise Tablo 4.2’de görülmektedir. Ekstrüzyon kalıbı, arkeolojik dövme levha ve farklı yoğunlukta madde içeren alüminyum profil için deney koşulları ise Tablo 4.3’de verilmiştir. Şekil 4.13’de ise alüminyum profile ait resim görülmektedir.



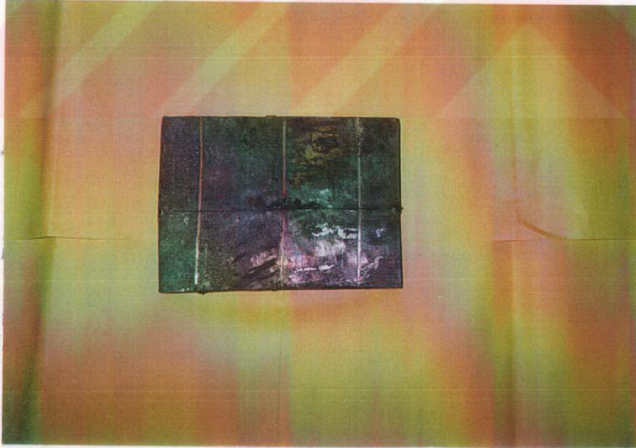
Şekil 4.9 Kaynak Dikişi I



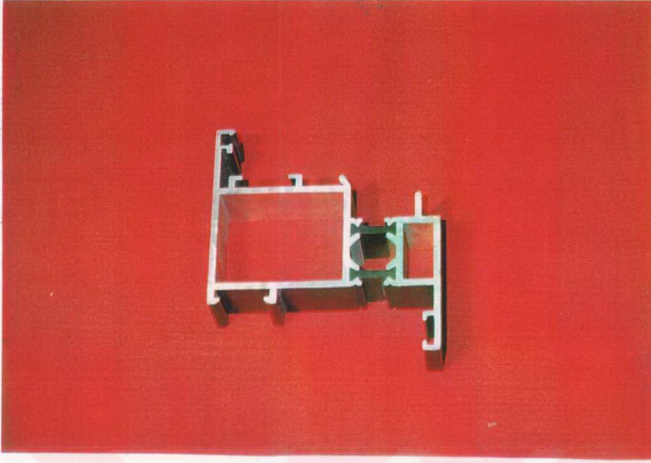
Şekil 4.10 Kaynak Dikişi II



Şekil 4.11 Kaynak Dikişi III



Şekil 4.12 Kaynak Dikişi IV



Şekil 4.13 Alüminyum Profil

Tablo 4.2. X-Işını Radyografisi ile Genel Malzeme Çekim Koşulları

Kaynak Parçası	Radyografi Tipi	Malzeme Kalınlığı (mm)	Gerilim (kV)	Akım (mA)	T (mm)	Ön ve Arka Ekran (mm)	Film	Poz Süresi (dk)
Kaynak Dikişi I	X-Işını	12	175	3	665	0.125 Pb	Kodak AA	4.76
Kaynak Dikişi II	X-Işını	9	150	3	665	0.125 Pb	Kodak AA	5
Kaynak Dikişi III	X-Işını	17	175	3	665	0.125 Pb	Kodak AA	7.4
Kaynak Dikişi VI	X-Işını	10	150	3	665	0.125 Pb	Kodak AA	5

Tablo 4.3. Ekstrüzyon Kalıbı, Arkeolojik Dövme Levha ve Alüminyum Profile Ait Deney Koşulları

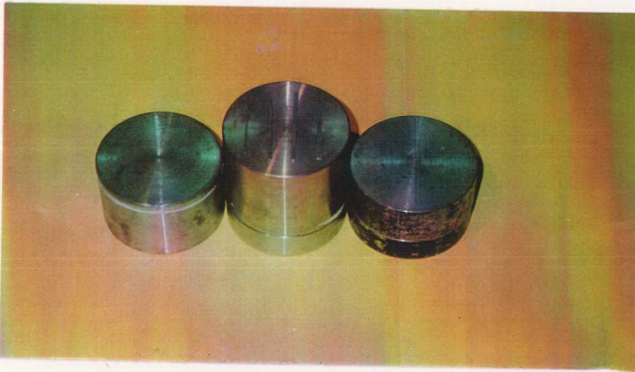
Malzeme Tipi	Malzeme Kalınlığı (mm)	Gerilim (kV)	Akım (mA)	T (mm)	Ön ve Arka Ekran (mm)	Film	Poz Süresi (dk)
Ekstrüzyon Kalıbı	25	100	3	700	0.125 Pb	Agfa D7	2.5
Arkeolojik Dövme Levha	8	100	3	700	0.125	Agfa D7	1.5
Alüminyum Profil	10	100	3	700	0.125	Agfa D7	0.5

4.3. GAMA RADYOGRAFİSİ İLE HATA TESBİTİ

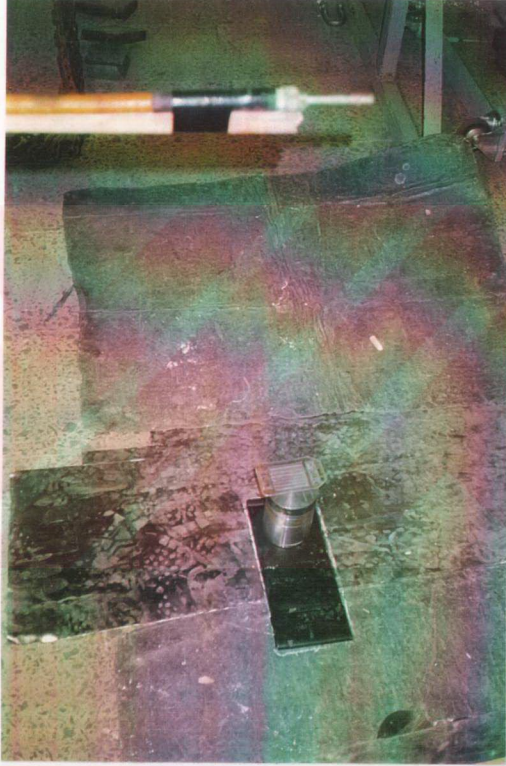
4.3.1. Özel Numuneler Kullanılarak Yapılan Hata Tesbit Çalışmaları

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, gama radyografisi ile hata tespiti için, özel olarak hazırlanmış silindirik çelik deney düzeneğinden yararlanılmıştır. Kullanılan deney düzeneği parçalarının malzemesi sıcak iş çeliğidir. Ancak bu parçalar üzerinde, test malzemesinden daha yoğun olan kurşundan yapay hatalar meydana getirilmiş ve bu yapay hatalar ana test malzemesi ile birlikte kullanılmıştır. Silindirik test parçaları 80 mm çapında ve 40 mm den başlayıp 160 mm ye kadar çıkan kalınlıklarda olup, yapay kurşun hatalar ise, 0,8 mm kalınlığında ve 1-2,5 mm arasında değişen genişliklerde dört tane dikdörtgen parçadan oluşmaktadır. Kurşun eleman genişlikleri sırasıyla 1, 1,5, 2, 2,5 mm dir. Bu parçalar, test malzemesinin değişen kalınlıklarında test parçası ile birlikte kullanılmıştır.

Gama radyografisi çekimleri tanıtılan deney düzeneği ile yapılmıştır. Şekil 4.14’de gama radyografisi için kullanılan test parçaları ve üzerinde yapay hatalar görülmektedir. Deney düzeneği ise Şekil 4.15’de verilmiştir. Bu deney düzeneğine ait deney koşulları ise Tablo 4.4’de görülmektedir.



Şekil 4.14 Gama Radyografisi Test Parçalarının Toplu Halde Gösterimi



Şekil 4.15 Gama Radyografi Test Parçası Işınlama Düzeneği

Tablo 4.4. Gama Radyografisi Çekim Koşulları

Kullanılan Radyasyon Tipi	Malzeme Kalınlığı (mm)	Kaynak Enerjisi (MeV)	Kaynak Aktivitesi (Ci)	T (mm)	Film	Ön ve Arka Ekranlar (mm)	Poz Süresi (dk)
Gama Işını	40	1.17 1.33	9.6	800	Kodak Indus. AA	0.125 Pb	19
	50						24
	60						32
	70						42
	80						56
	90						72
	100						98
	110						150
	120						255
	130						402
	140						646
	150						1061
	160						

4.3.2.Gama Radyografisi İle Genel Hata Tesbit Çalışmaları

Gama radyografisi ile, özel hazırlanmış numuneler dışında, çevreden elde edilen malzemelerle de çalışılmıştır. Bu malzemeler üzerinde yapılan radyografik çalışmalarla malzeme bünyesindeki süreksizlikler belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla elde edilen bir pota üzerinde çalışılmış, potanın gama radyografisi çekilerek, bünyesindeki hatalar tespit edilmeye çalışılmıştır.

Potanın radyografik muayenesine ait deney koşulları Tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.5. Gama Radyografisi İle İncelenen Potaya Ait Deney Koşulları

Kullanılan Radyografi Tipi	Malzeme Kalınlığı (mm)	Kaynak Enerjisi (MeV)	Kaynak Aktivitesi (Ci)	T (mm)	Ön ve Arka Ekran (mm)	Film	Poz Süresi (dk)
Gama Radyografisi	40	1.17 1.33	9.6	800	0,125	AGFA D7	19

4.4.HATA DERİNLİĞİ TESBİT ÇALIŞMALARI VE DENEY DÜZENEKLERİ

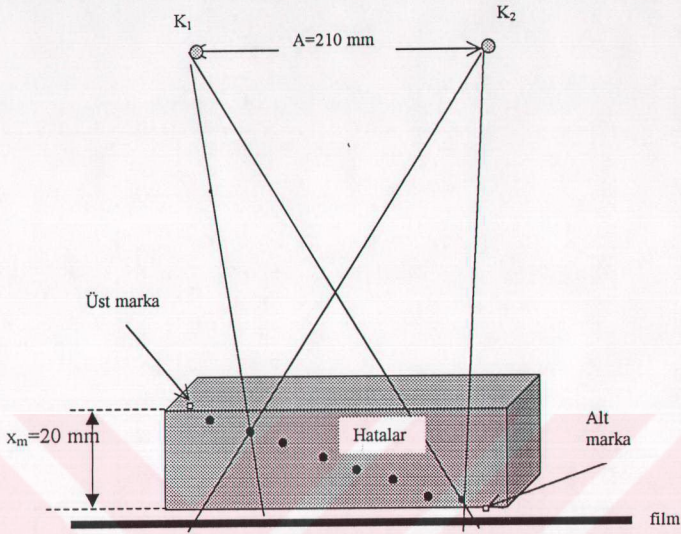
Malzemelerdeki hataların üç boyutlu olarak değerlendirilebilmesi amacı ile, hem X-ışını hem de gama radyografisi ile çalışılmıştır. Bu çalışmalarda 30 mm kalınlıklara kadar X-ışını, 40 mm ve üzeri için gama radyografisi tercih edilmiştir.

4.4.1. X-ışını Radyografisi İle Hata Derinliği Tespit Çalışmaları

X-ışını radyografisi ile hata derinliği çalışması için dört farklı numune ve dört farklı deney seti oluşturulmuştur. Bu tespitler, endüstriyel radyografinin, paralaks, çift film-çift çekim ve yoğunluk-derinlik tekniklerini kullanarak yapılmıştır.

4.4.1.1.Paralaks Metodu Uygulaması

İlk olarak hazırlanan deney numunesi 20 mm kalınlığında ve 310 mm boyunda bir çelik bloktur. Bu bloğun üzerinde 4 mm den 18 mm ye 4'er mm aralıklı farklı çaplarda 8 delik açılmıştır. Daha sonra bu parçanın, B1.3'de anlatılan Paralaks Yöntemi (çift ışınlama) ile tek bir film üzerine, iki ayrı görüntüsü alınmıştır. Şekil 4.16'da bu parçanın şekli ve ışınlama tekniği tasvir edilmiştir.



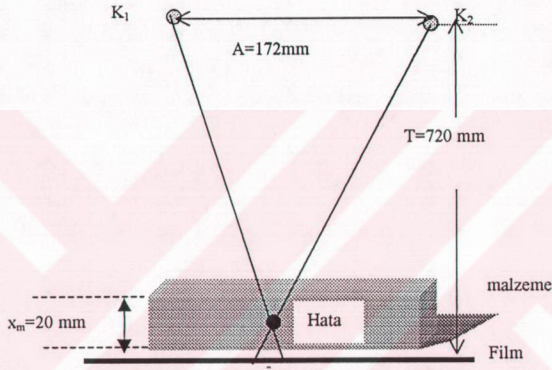
Şekil 4.16 X-Işını Hata Derinliği Tespiti, Test Parçası ve Işınlama Pozisyonu

Buradan da yine Bölüm 3’de anlatılan rijid formül paralaks metodu kullanılarak hata derinlikleri hesaplanmıştır. Rijid formül paralaks metodundan ayrı olarak, hata derinliği tespitinde, Bölüm 3’de anlatılan tek markalama yöntemi ve çift markalama yöntemi çerçevesinde grafiksel yöntemi kullanarak hata derinliği tespiti yapılmış ve bulunan her iki değer karşılaştırılmıştır. Yapılan bu çalışmaya ilişkin deney koşulları Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6. Hata Derinliği Tespiti İçin Çekim Koşulları

Radyografi Tipi	Malzeme Kalınlığı (mm)	Uygulanan Gerilim (kV)	Uygulanan Akım (mA)	T (mm)	Kaynak Yerdeğişimi (mm)	Film	Ön, Arka Ekran (mm)	Poz Süresi $t_{1/2}$ (dk)
X-Işını	20	220	3	720	210	Akfa D7	0.125 Pb	4

X-ışını radyografisi için bir diğer derinlik tespiti deneyi daha yapılmıştır. Bu deney için; 20 mm kalınlığında çelik numune kullanılmıştır. Bu numune üzerine 2 mm çapında 8.5 mm derinliğinde bir delik açılmıştır. Bu deney parçası ve ışınlama tekniği Şekil 4.17'deki gibidir. Deney koşulları ise Tablo 4.7'de görülmektedir.



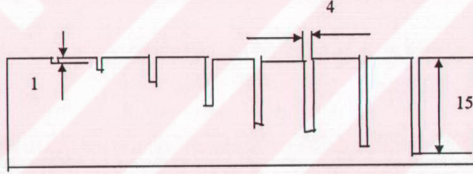
Şekil 4.17 Hata Derinliği Test Parçası

Tablo 4.7. Şekil4.16'daki Işınlamaya İlişkin Deney Koşulları

Rad. Tipi	Malzeme Kalınlığı (mm)	Uygulanan Gerilim (kV)	Uygulanan Akım (mA)	T (mm)	Kaynak Yerdeğişimi (mm)	Film	Ön, Arka Ekran (mm)	Pcz Süresi $t_{1.2}$ (dk)
X-ışını	20	220	3	720	172	Agfa D7	0.125 Pb	4

4.4.1.2. Radyografik Yoğunluk Metodu Uygulaması

X-ışını radyografisi ile son olarak, radyografik yoğunluk tekniği ile hata derinliği tespiti yapılmıştır. Bu amaçla 25 mm kalınlığında çelik bir numune bu yüksek lisans tezi çalışması için özel olarak hazırlanmıştır. Şekil 4.18’de gösterildiği gibi bu numuneye, hata yüksekliklerini simüle etmek amacıyla, derinlikleri 1-15 mm arasında değişen 4 mm genişliğinde çentikler açılmıştır. Bl.3’de anlatıldığı gibi hata yoğunluğu-hata yüksekliği ilişkisinden yola çıkılarak hata yükseklikleri bulunmuştur. Çalışmaya ilişkin deney koşulları Tablo 4.8’de verilmiştir. Bu deney çalışması Çekmece Nük. Araştırma ve Eğitim Merkezi Endüstriyel Radyografi Bölümü laboratuvarında yapılmıştır.



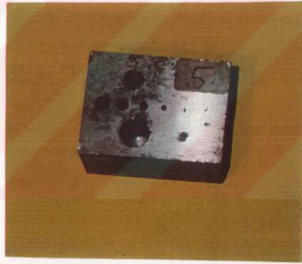
Şekil 4.18 Yapay Delikler Açılmış Numune

Tablo 4.8. Deney Koşulları

Rad. Tipi	Malzeme Kalınlığı (mm)	Uygulanan Gerilim (kV)	Uygulanan Akım (mA)	T (mm)	Film	Ön,Arka Ekran (mm)	Poz Süresi (dk)
X-ışını	25	240	5	720	Agfa D7	0.125 Pb	2.5

4.4.1.3. Çift Film-Çift Çekim Metodu İle Hata Derinliği Tesbiti

X-ışını radyografisi kullanılarak, çift film-çift çekim metodu ile hata derinliğinin belirlenebilmesi için, özel olarak hazırlanmış malzeme üzerinde, değişik çaplarda ve her birinin derinliği aynı olmak koşuluyla delikler açılmıştır. Daha sonra gama ışını radyografisi ile, parçanın 90° açılı ile iki ayrı radyografi, iki ayrı film üzerine çekilmiştir. Film Üzerindeki hata görüntülerinden yola çıkılarak hatanın boyutları belirlenmeye çalışılmıştır. Bu parçanın fotoğrafı Şekil 4.19 ve deney koşulları ise Tablo 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.19 Çift Film-Çift Çekim Numunesi

Tablo 4.9. 90°'lik Açılı İle İki Ayrı Radyografik Çekim(Çift Film-Çift Çekim Tekniği)

Kullanılan Radyasyon Tipi	Malzeme Kalınlığı (mm)	Gerilim (kV)	Akım (mA)	T (mm)	Ön, Arka Ekran (mm)	Film	Poz Süresi (dk)
X-ışını	27	225	3	700	0.125 Pb	Kodak AA	7
X-ışını	38	225	3	700	0.125 Pb	Kodak AA	12

4.4.2.Gama Radyografisi İle Hata Derinliği Tesbiti

Gama radyografisi ile hata derinliği tespiti de X-ışını ile hata derinliği tespiti deneylerinde olduğu gibi üç farklı metod kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu metodlar Bölüm 3'de ayrıntısı verilen, paralaks, radyografik yoğunluk ve çift film-çift çekim metodlarıdır.

4.4.2.1.Paralaks Metodu Uygulamaları

Gama radyografisi ile hata derinliği tespiti için, 95, 40 ve 50 mm kalınlıklarında çelik numune deney seti kullanılmıştır. Bunlardan 40 ve 50 mm kalınlığındaki silindirik deney seti Şekil 4.14'de görülen deney parçaları olup, diğerleri daha önce tanıtılan deney parçalarının kombinasyonu ile elde edilmişlerdir. Deney düzeneği ise, gama radyografisi ile hata derinliği tespiti için yapılan çekimlere ilişkin, deney düzeneği ile aynıdır (Şekil 4.15'de görülmektedir).

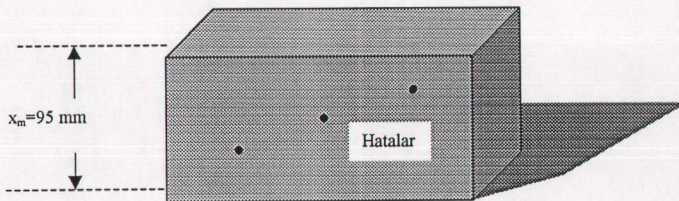
Bu setlerle yapılan çekimlerle, hata derinliğinin, hem rijid (katı) formül paralaks yöntemi hem de tek ve çift markalama yapılarak grafik yardımıyla bulunması ve karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu amaca uygun olarak gama radyografi çekimleri, markasız, tek veya çift marka kullanılarak yapılmıştır. Yapay kurşun hatalar ise test parçasının, 10, 20, 30, 40 mm kalınlıklarına yerleştirilmiştir.

50 mm lik deney setinde ise, bu parçanın 10, 20, 30, 40, 50 mm derinliklerinde tek tek radyografik paralaks tekniğine göre ışınlama yapılmıştır. Ayrıca çift markalama yapılarak grafiksel yöntemle karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu çekimlere ait deney koşulları Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10. 40, 50 ve 95 mm Kalınlığındaki Çekim Setleri İçin Deney Koşulları

Çekim	Radyog. Cinsi	Mal. Kal. (mm)	Kaynak Enerjisi (MeV)	Kaynak Aktivite (Ci)	T (mm)	Kaynak Yerdeğişimi (mm)	Poz Süresi $t_{1/2}$ (dk)	Film	Ön, Arka Ekranlar (mm)	Markalama
Çekim Seti 1	Gama Işını	95	1.17 1.33	9.6	800	145	45	Agfa D7	0.125 Pb	yok
Çekim Seti 2	Gama Işını	40	1.17 1.33	9.6	800	160	12	Kodak Ind. AA	0.125 Pb	Var (Tek)
Çekim Seti 3	Gama Işını	50	1.17 1.33	9.6	800	160	15	Kodak Ind. AA	0.125 Pb	Var (Çift)

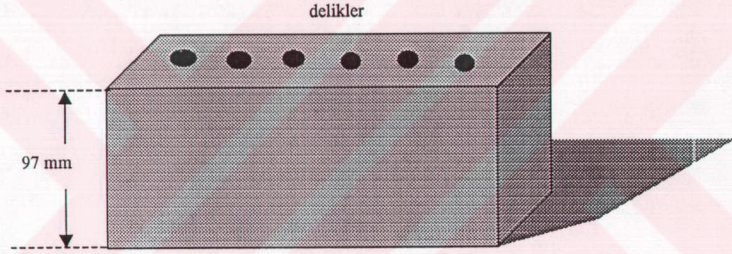
Çekim seti 1 için 95 mm kalınlığında çelik bir numune hazırlanmış ve bu numune üzerinde 25, 50, 70 mm derinliklerinde, 2 mm çapında üç yapay delik açılmıştır. Deney koşulları yine Tablo 4.10, çekim seti 1’de verildiğı gibidir. Bu parçanın görüntüsü Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20 Çekim Seti 1 İçin 95 mm’lik Çelik Numune

4.4.2.2. Radyografik Yoğunluk Metodu Uygulamaları

Derinlik-yoğunluk tekniğine ilişkin olarak Şekil 4.21’de görülen, 97 mm. lik çelik numunenin gama radyografisi alınmıştır. Numune üzerine açılmış farklı derinliklerde 6 delik ayrı ayrı odaklanarak radyografileri alınmıştır. Sonuç olarak da yoğunluklar mikro densitometre ile ölçülmüş ve derinlik-yoğunluk grafiği çıkarılmıştır. Deney koşulları ise Tablo 4.11’de verilmiştir (Bu deney Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi Nükleer Uygulamalar Laboratuvarında yapılmıştır).



Şekil 4.21 Derinlik-Yoğunluk Çalışmasına Ait Test Numunesi

Tablo 4.11 Derinlik-Yoğunluk Çalışmasına Ait Deney Koşulları

Radyografi Tipi	Malzeme Kalınlığı (mm)	Kaynak Enerjisi (MeV)	Kaynak Aktivitesi (Ci)	T (mm)	Film	Ön ve Arka Ekran (mm)	Poz Süresi (dk)
Gama Işını	97	1.17 1.33	43	700	Agfa D7	0.125 Pb	18

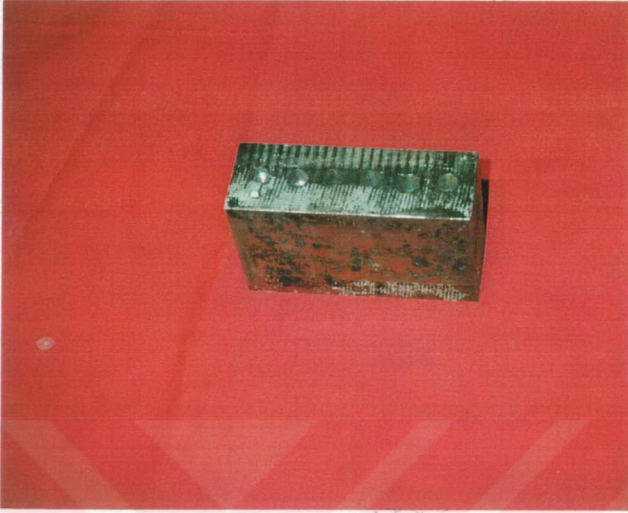
4.4.2.3. Çift Film-Çift Çekim Metodu Uygulamaları

Hataların üç boyutlu olarak değerlendirilmesine ilişkin, çift film-çift çekim tekniği de yapılan çalışmalar arasında yer almaktadır. Bu işlem için üzerinde 6 mm çapında ve 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 mm derinliğinde delikler bulunan bir parçadan oluşan deney seti kullanılmıştır. Numune çelik olup dikdörtgenler prizması biçimindedir.

Çekim, iki ayrı film üzerine, numunenin 90° çevrilmesi suretiyle iki görüntüsünün alınması şeklindedir. Böylece iki radyograf üzerindeki görüntülerden hatanın her üç boyutu da belirlenebilmiştir. Bu malzemeye ilişkin resim, Şekil 4.22’de görülmektedir. Deney koşulları Tablo 4.12’de verilmiştir.

Tablo 4.12. Çift Film- Çift Çekim Deney Koşulları

Radyografi Tipi	Mal. Kal. (mm)	Kaynak Enerjisi (MeV)	Kaynak Aktivitesi (Ci)	T (mm)	Film	Ön, Arka Ekran (mm)	Poz Süresi (dk)
Gama Işını	62	1.17 1.33	9.6	800	Kodak Ind.AA	0.125 Pb	35
Gama Işını	32	1.17 1.33	9.6	800	Kodak Ind.AA	0.125	15



Şekil 4.22 Çift Film-Çift Çekim İçin Numune

BÖLÜM 5

DENEY SONUÇLARI

5.1. X-IŞINI RADYOGRAFİSİ İLE HATA TESBİTİ ÇALIŞMALARININ SONUÇLARI

5.1.1. X-Işını Radyografisi İle Özel Numuneler Kullanarak Yapılan Hata Tesbit Çalışmalarının Sonuçları

X-ışını ile ilk hata tespit çalışması, Şekil 4.5'de görülen 5 farklı kalınlıklı numune seti ile yapılmıştır. Bu numune seti kullanılarak Tablo 4.1'de verilen iki farklı çekim seti için radyografik çekimler yapılmıştır.

5 farklı kalınlıklı numune setinin 1. çekim setinde tüm parçalar için kalite ve kantite faktörleri, bir başka deyişle X-ışını cihazının gerilim ve akım değerleri sabit tutularak her parçaya uygun poz süresi tayin edilerek çekimler yapılmış ve radyograflar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.1'de verilmektedir. Bu çekimlere ait radyograf Şekil 5.1'de görülmektedir.

Tablo 5.1. 5 Kalınlıklı Numune Seti İle Çekim Seti I Şartlarında Çekilen Radyografların Değerlendirme Sonuçları

Malzeme Kalınlığı (mm)	En İnce Tel Çapı (mm)	En Küçük Hata Boyutu (mm)	Hassasiyet (%)
8	0.100	0.7	1.25
18	0.25	0.7	1.39
28	0.40	0.7	1.42
38	0.32	0.7	0.84
48	0.45	0.7	0.94



Şekil 5.1 Çekim Seti I'e Ait Radyograf

X-ışını hata tespiti için ikinci olarak, yine aynı 5 kalınlıklı numune seti ile Tablo 4.1'de Çekim Seti 2'de görüldüğü üzere, tüm parçalar için aynı radyografik çekim parametreleri ile çalışılmıştır. Böylece, numune setindeki her parça için "iyi" olarak nitelenecek radyograf elde edilemeyecektir. Bir başka deyişle, "iyi olmayan çekimin" hata tespitini etkileme mertebesi tayin edilmeye çalışılmıştır. Bu şekilde çekilen radyograflarla elde edilen sonuçlar Tablo 5.2'de verilmektedir.

Tablo 5.2. 5 Kalınlıklı Numune Seti İle Çekim Seti II Şartlarında Çekilen Radyografların Değerlendirme Sonuçları

Malzeme Kalınlığı (mm)	Görülebilir En İnce Tel Çapı (mm)	Görülebilir En Küçük Hata Boyutu (mm)	Hassasiyet (%)
8	Yok	Yok	Yok
18	0.45	0.7	2.5
28	0.25	0.7	0.89
38	0.5	0.7	1.3
48	Yok	Yok	Yok

Özel numune kullanılarak yapılan hata tespit çalışmaları içinde bir diğeri, Şekil 4.8'de görülen hata referans parçası B ile gerçekleştirilmiştir. Bu parçayla, Tablo 4.1'de Çekim Seti 3'de verilen ve parça kalınlığına uygun olarak belirlenen radyografik çekim parametreleri ile çalışılmıştır. Bu şekilde çekilen radyografla elde edilen sonuç Tablo 5.3'de verilmektedir.

Tablo 5.3. Hata Referans Parçası B ile Çekim Seti 3 Şartlarında Çekilen Radyografin Değerlendirme Sonuçları

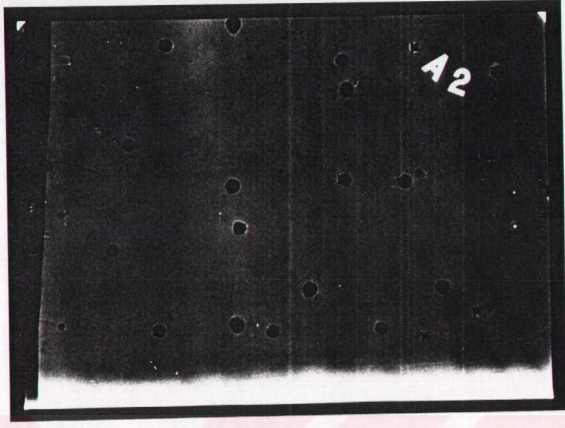
Malzeme Kalınlığı (mm)	Görülebilir En İnce Tel Çapı (mm)	Görülebilir En Küçük Hata Boyutu (mm)	Hassasiyet (%)
20	0.25	0.5	1.25

5.1.2. X-ışını Radyografisi İle Genel Hata Tesbit Çalışmalarının Sonuçları

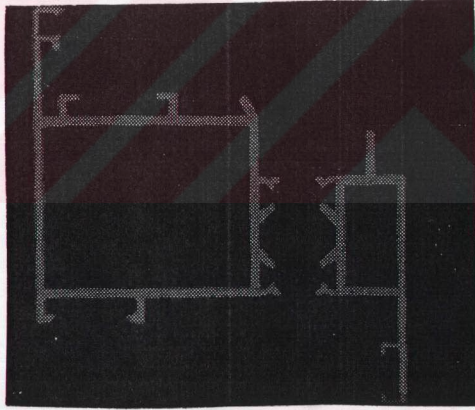
X-ışını radyografisi ile özel numune kullanılarak yapılan çalışmalar dışında, çevreden temin edilen Bölüm 4.2.1 içinde tanıtılan üç adet kaynak dikişli parça ile bir ekstrüzyon kalıbı, bir arkeolojik dövme levha ve bir alüminyum profil parçası ile radyografik çekimler yapılmıştır. Elde edilen radyograflar Şekil 5.2 - Şekil 5.8'de görülmektedir.

Dövme parçaya ilişkin Şekil 5.2'deki radyograftan Bölüm 3'de bahsedilen dövme izi hatalar net olarak görülmektedir. Alüminyum profil parçasının Şekil 5.3'de görülen radyografından ise profilin alüminyum dışında sahip olduğu polimer esaslı izolasyon elemanı farklı kararma yoğunluğu ile net olarak fark edilmektedir. Böylece bu iki farklı parçayla yapılan çalışmada radyografi tekniği ile, dövme ile incelen veya yoğunlaşan bölgelerin tespiti ile farklı malzeme içeren bölgelerin kolaylıkla tespit edildiğine ilişkin örnek verilmiş olmaktadır. Bir başka deyişle, malzeme yoğunlaşması veya farklılığı, hata gibi değişik radyografik yoğunluklarda, radyograf üzerinde görüntü vermektedir.

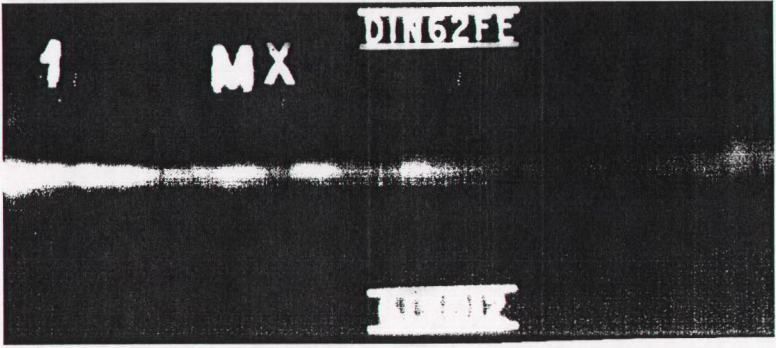
Kaynak dikişli parçaları ve ekstrüzyon kalıp parçalarında Şekil 5.4-Şekil 5.8'den tespit edilen hatalar Bölüm 3'de verilen referans radyograflar göz önüne alınarak değerlendirilmiş ve tespit edilen hatalar Tablo 5.4'de belirtilmiştir.



Şekil 5.2 Arkeolojik Döyme Levhanın Radyografi



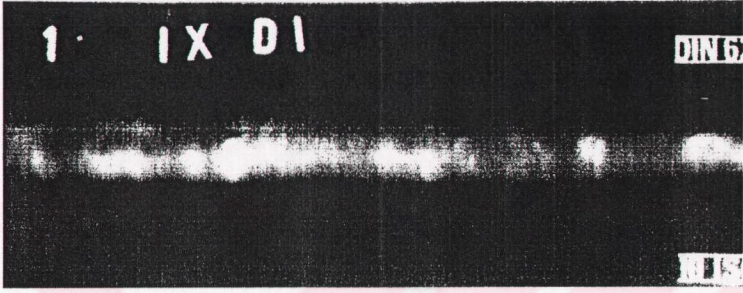
Şekil 5.3 Alüminyum Profil Radyografi



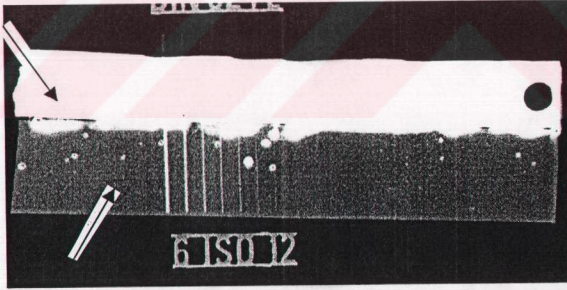
Şekil 5.4 Radyograf Kaynak Dikişi I



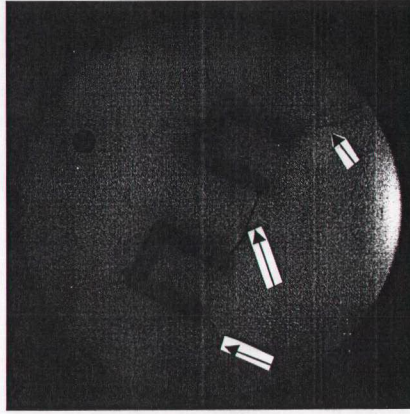
Şekil 5.5 Radyograf Kaynak Dikişi II



Şekil 5.6 Radyograf Kaynak Dikişi III



Şekil 5.7 Radyograf Kaynak Dikişi VI



Şekil 5.8 Radyograf Ekstrüzyon Kalıp

Tablo 5.4. Kaynak Dikişi Parçaları İle Ekstrüzyon kalıbı Parçasında Tespit Edilen

Hatalar

Çalışılan Parça	Hassasiyet (%)	Hata Tipi ve ASTM E390 ve ASTM E446'ya Göre Değerlendirme
Kaynak Dikişi I	1.78	2, 3, 4 mm boyutlarında yanma oluğu.
Kaynak Dikişi II	2	Muhtelif yerlerde 180 mm boyunda alt kesim ve gözenek.
Kaynak Dikişi III	1.2	Yapılan değerlendirme sonucu kaynakta herhangi bir süreksizliğe rastlanmamıştır.
Kaynak Dikişi VI	1.45	Çatlak, birleşme eksikliği.
Ekstrüzyon Kalıbı	1.6	Üç ayrı bölgede ciddi çatlaklar.

5.2. GAMA IŞINI RADYOGRAFİSİ İLE HATA TESBİTİ ÇALIŞMALARININ SONUÇLARI

5.2.1. Gama-Işını Radyografisi İle Özel Numuneler Kullanarak Yapılan Hata Tesbit Çalışmalarının Sonuçları

Gama ışını ile hata tespit çalışması, Şekil 4.14'de toplu olarak görülen numune seti ile yapılmıştır. Bu numune seti ile Tablo 4.4'de verilen farklı 13 kalınlık için belirlenmiş olan çekim koşullarında radyografik çekimler yapılmıştır.

Poz süreleri parça kalınlığına göre tayin edilmiş, bu uygun poz süreleri ile çekimler yapılmış ve radyografları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.5'de verilmektedir.

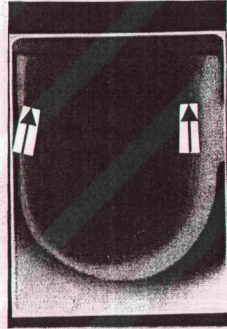
Tablo 5.5. 13 Farklı Kalınlıktaki Parçalar İçin Çekilen Radyografların Değerlendirme Sonuçları

Malzeme Kalınlığı (mm)	Hata Yeri (mm)	Görülen En İnce Tel Çapı (mm)	Görülen En Küçük Hata Boyutu (mm)	Hassasiyet (%)
40	40	0.25	0.8	0.62
50	50	0.25	0.8	0.5
60	60	0.8	0.8	1.33
70	70	1	0.8	1.42
80	80	1	0.8	1.25
90	90	1.6	0.8	1.77
100	100	2.5	0.8	2.5
110	110	2.5	0.8	2.27
120	120	3.2	0.8	2.66
130	130	3.2	0.8	2.46
140	140	3.2	0.8	2.28
150	150	3.2	yok	2.13
160	160	3.2	yok	2

5.2.2. Gama-Işını İle Genel Hata Tesbit Çalışmalarının Sonuçları

Gama radyografisi ile özel numune kullanılarak yapılan çalışmalar dışında, çevreden temin edilen Bölüm 4.3.2 içinde tanıtilan bir potanın radyografik çekimleri yapılmıştır. Elde edilen radyograf Şekil 5.9'da görülmektedir.

Potanın Şekil 5.9'dan tespit edilen hataları Bölüm 3 'de verilen referans radyograflar göz önüne alınarak değerlendirilmiş ve tespit edilen hatalar Tablo 5.6'da belirtilmiştir



Şekil 5.9 Potanın Radyografı

Tablo 5.6. Potanın Radyografından Tespit Edilen Hatalar

Hata Yeri	Hassasiyet (%)	Hata Tipi ve ASTM E186'ya Göre Değerlendirme
Pota Gövdesi	1.6	Porozite, Kategori A, Seviye2-3 Çekim, Kategori C, Seviye1-2

5.3 HATA DERİNLİĞİ TESBİTİ ÇALIŞMALARININ SONUÇLARI

Hata derinliği tespitine ilişkin olarak hem X ve hem de gama radyografi tekniği ile Bölüm 4.4 içinde tanıtıldığı gibi; paralaks, radyografik yoğunluk ve çift film-çift çekim yöntemleri uygulanmıştır. Sonuçlar aşağıda ayrı ayrı tanıtılmaktadır.

5.3.1. X-Işını Radyografisi İle Hata Derinliği Tesbit Çalışmalarının Sonuçları

X-ışını radyografisi ile üç farklı hata derinliği yöntemiyle radyografik çalışmalar yapılmış olup, sonuçlar alınmıştır.

5.3.1.1. X-Işını Radyografisi İle Paralaks Metodu Kullanılarak Yapılan Hata

Tespiti Uygulamalarının Sonuçları

Paralaks metodu kendi içinde üç farklı şekilde Bölüm 4.4.1 içinde tanıtıldığı gibi uygulanmıştır.

Rijid Paralaks Metodu Uygulamalarının Sonuçları

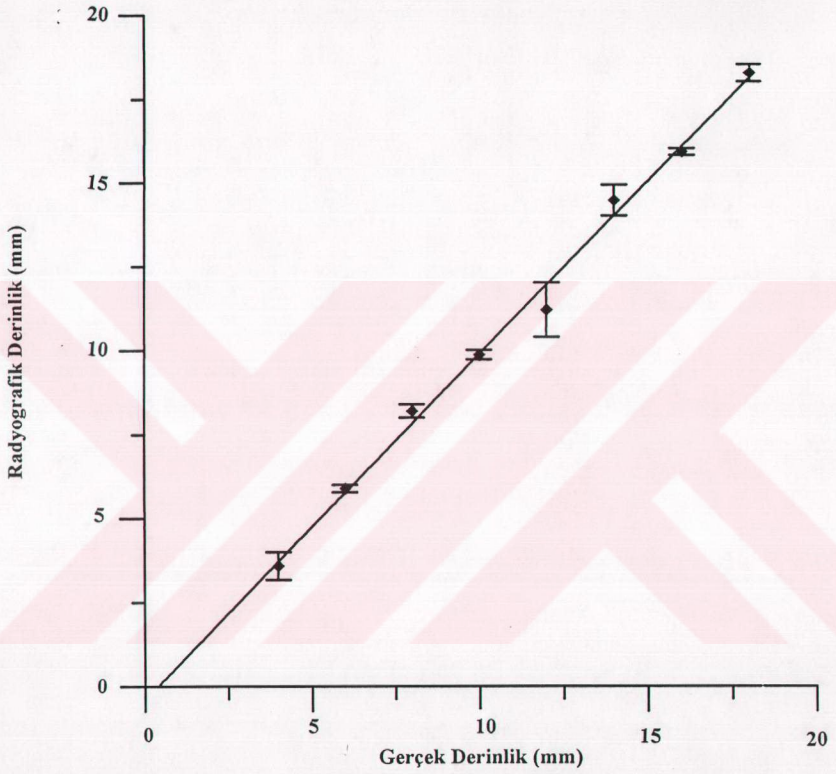
Rijid paralaks metodu Şekil 4.16'daki gibi uygulama yapılmış olup, bu çekime ait radyograf Şekil 5.10'da görülmektedir. Alınan sonuçlar Şekil 5.11'de grafik olarak, Tablo 5.7'de sayısal değer olarak görülmektedir

Tablo 5.7. X- Işını Radyografisi ile Yapılan Rijid Paralaks Metodu Uygulama Sonuçları

Gerçek Derinlik (mm)	Radyografik Derinlik (mm)	Mutlak Hata (mm)	Mutlak %Hata
4	3.80	0.2	5.0
6	5.89	0.11	1.8
8	8.2	0.2	2.5
10	9.859	0.141	1.41
12	11.596	0.404	3.36
14	14.46	0.46	3.28
16	15.896	0.105	0.66
18	18.256	0.256	1.42



Şekil 5.10 Rijid Paralaks Metodu İle Elde Edilen Radyograf Üzerinde Hata Kaymaları



Şekil 5.11 Rijid Paralaks Yöntemi ile Bulunan hata Derinliklerinin Gerçek Değerleri İle Karşılaştırılması

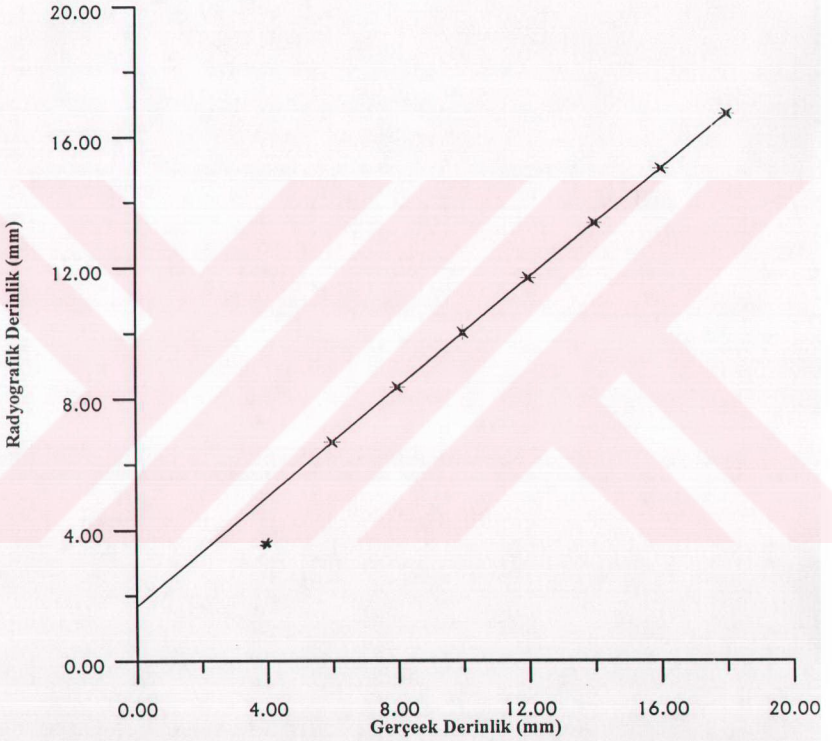
Tek Markalama Paralaks Metodu Uygulamaları Sonuçları

X-ışını radyografisi ile, Şekil 4.16'da sadece üst marka kullanılarak uygulama yapılmıştır. Burada markanın yeri önemlidir. Parçanın arka yüzeyine, bir başka deyişle, film ile parça arasına konursa tek markalamayla hata derinliği tayini zorlaşır. Bu nedenle burada, en uygun sonucu alabileceğimiz çekim pozisyonu olan markanın parça üstüne yerleştirilmesi benimsenmiştir. Tek markalama ile yapılan uygulama sonuçları Tablo 5.8'de görülmektedir. Karşılaştırmalı grafiği ise Şekil 5.12'de görülmektedir.

Tablo 5.8. X-ışını Radyografisiyle Tek Markalama Yapılarak,

Tayin Edilen Radyografik Hata Derinliği Değerleri

Marka Kayması (mm)	Hata Kayması (mm)	Radyografik Derinlik (mm)	Gerçek Derinlik (mm)	Mutlak Hata (mm)	Mutlak %Hata	Markalama
6	1	3.333	4	0.666	16.5	Tek
6	2	6.666	6	0.666	11.1	
6	2.5	8.333	8	0.333	4.16	
6	3	10	10	0	0	
6	3.5	11.666	12	0.333	2.75	
6	4	13.333	14	0.666	4.76	
6	4.5	15	16	1	6.25	
6	5	16.666	18	1.333	7.4	



Şekil 5.12 Tek Markalama Metodu İle Elde Edilen Radyografik Hata Derinliği Değerleri

Çift Markalama Paralaks Metodu Uygulamaları Sonuçları

X-ışını radyografisi ile, Şekil 4.16'daki parça ile üst ve alt marka kullanılarak uygulama yapılmıştır. Bir başka deyişle, parçanın üstüne bir marka ve film-parça arasına da ikinci bir marka yerleştirilmiş ve böylece radyografik çekim uygulanmıştır.

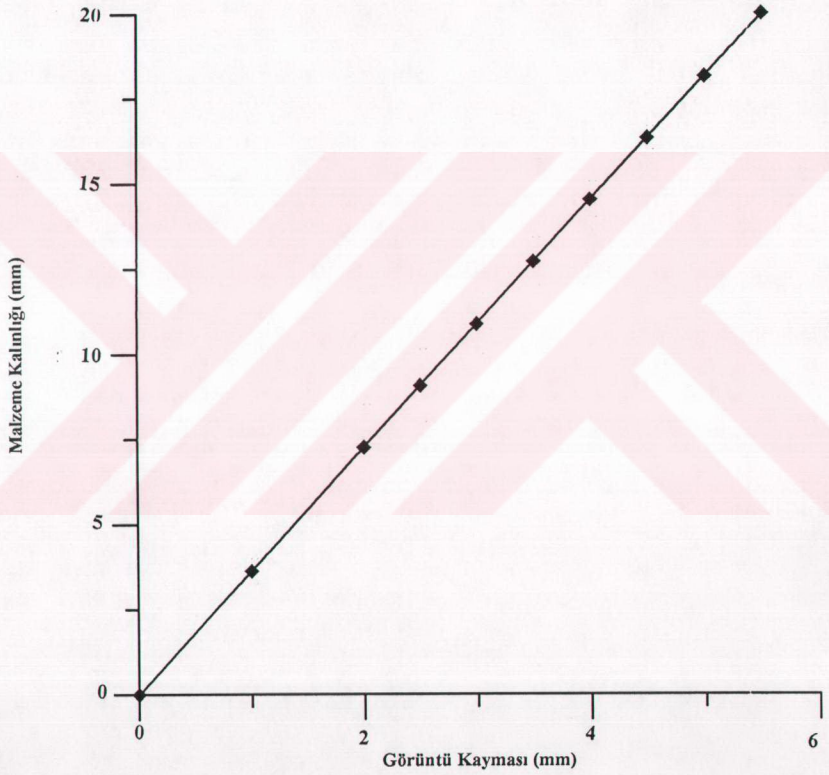
Çift markalama ile yapılan uygulama ile elde edilen radyograf Şekil 5.13'de verilmiştir. Şekil 5.13'deki radyograftan hareketle tayin edilen hata derinlikleri ise grafik olarak Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'de, sayısal değer olarak ise Tablo 5.9'da görülmektedir.

Tablo 5.9. X-ışını Radyografiyle Çift Markalama Yapılarak, Grafik Yardımıyla Tayin Edilen Radyografik Hata Derinliği Değerleri

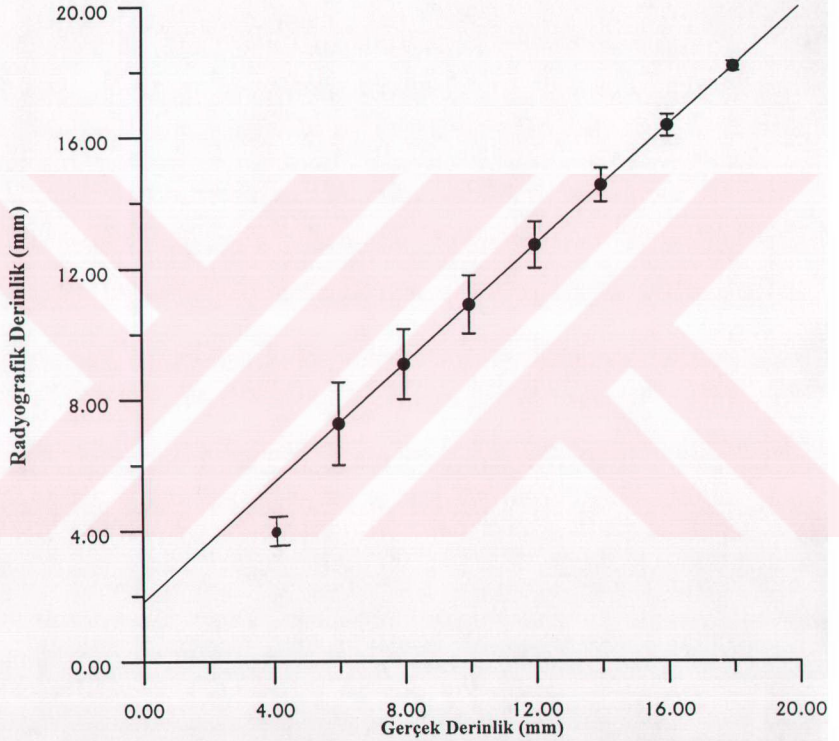
Görüntü Kayması (mm)	Radyografik Derinlik (mm)	Gerçek Derinlik (mm)	Mutlak Hata (mm)	Mutlak %Hata	Markalama (Çift)
0	0	0	0	0	Alt Marka
1	3.63	4	0.37	9.25	
2	7	6	1.	16.6	
2.5	9.075	8	1.075	13.43	
3	10.89	10	0.89	8.9	
3.5	12.705	12	0.705	5.875	
4	14.52	14	0.52	3.71	
4.5	16.335	16	0.335	2.09	
5	18.15	18	0.15	0.83	
6	20	20	0		Üst Marka



Şekil 5.13 Çift Markalama İle Çekilen Malzeme Radyografı



Şekil 5.14 Görüntü Kayması-Malzeme Kalınlığı (Hata Derinliği) Grafiği



Şekil 5.15 Çift Markalama Metodu İle Elde Edilen Radyografik Hata Derinliği Değerlerinin Gerçek Değerleri İle Karşılaştırılması

X-ışını ile hata derinliğine ilişkin olarak tek hatalı bir parça ile de hata derinliği tayini uygulanması sınanmıştır. Uygulama Şekil 4.17'de görüldüğü gibi yapılmıştır. Tayin edilen hata derinliği sonucu Tablo 5.10'da görülmektedir.

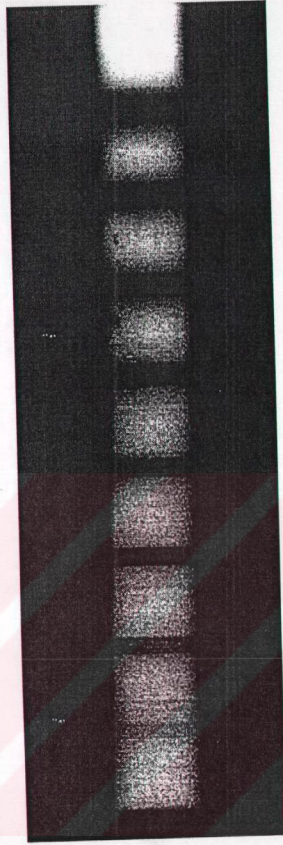
Tablo 5.10. Çift Markalama Metodu İkinci Deney Sonuçları

Gerçek Derinlik (mm)	Radyografik Derinlik (mm)	Mutlak Hata	Mutlak %Hata
8.5	8.7	0.2	2.5

5.3.1.2 X-İşını Radyografisi İle Radyografik Yoğunluk Metodu Kullanılarak

Yapılan Hata Tesbiti Uygulamalarının Sonuçları

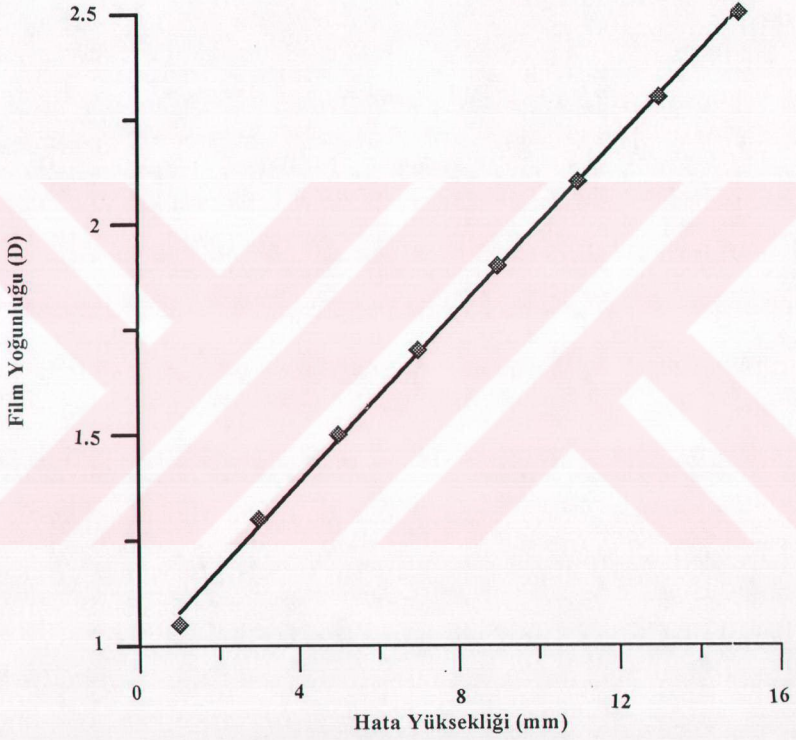
X- Işını radyografisi ile hata derinliği tespitine ilişkin olarak uygulanan ikinci metod radyografik yoğunluk metodudur. Bu metod ile çalışma için Şekil 4.18'deki parça ve Tablo 4.8'deki çekim koşulları ile çalışılmış ve elde edilen radyograf Şekil 5.16'da görülmektedir. Şekil 5.18'deki radyografdan mikrodensitometre yardımı ile yapılan ölçümlerden hareketle elde edilen sonuçlar grafik olarak Şekil 5.17'de, sayısal değer olarak Tablo 5.11'de görülmektedir.



Şekil 5.16 Radyograf Üzerinde Hata Yoğunlukları

Tablo 5.11. Radyografik Yoğunluk Metodu Deney Sonuçları

Hata Derinliği (mm)	Radyografik Hata Yoğunluğu (D)
1	1.03
3	1.31
5	1.52
7	1.71
9	1.89
11	2.11
13	2.33
15	2.51



Şekil 5.17 Hata Yüksekliği-Radyografik Film Yoğunluğu (D)

5.3.1.3. X-Işını Radyografisi İle Çift Film-Çift Çekim Metodu Kullanılarak Yapılan Hata Tespiti Uygulamalarının Sonuçları

X-Işını radyografisi ile son hata derinlik tesbiti uygulaması çift film-çift çekim yöntemidir. Bunun için Bölüm 4.4.1.3'de Şekil 4.19'da tanıtılan üzerinde delikler olan çelik parça ile çalışılmıştır. Parçanın farklı kalınlıkları için iki çekim yapılmış ve elde edilen sonuçları Tablo 5.12'de bir araya toplanmıştır.

Tablo 5.12. Çift Film- Çift Çekim Deney Sonuçları

Delik No	Çapı (mm)	Derinliği (mm)	Daire Merkezinin x-y Koordinatı (mm)	Daire Merkezinin Z Koordinatı (mm)
1	1	25	0.5	23
2	2	25	1.2	24
3	3	25	1.5	24.5
4	4	25	2.	25
5	5	25	3	22
6	7	25	4	25
7	10	25	5.5	24.5

5.3.2. Gama Radyografisi İle Hata Derinliği Tespit Çalışmalarının

Sonuçları

Gama radyografisi ile üç farklı hata derinliği yöntemiyle radyografik çalışmalar yapılmış olup, sonuçlar alınmıştır.

5.3.2.1. Gama Radyografisi İle Paralaks Metodu Kullanılarak Yapılan Hata Tespiti Uygulamalarının Sonuçları

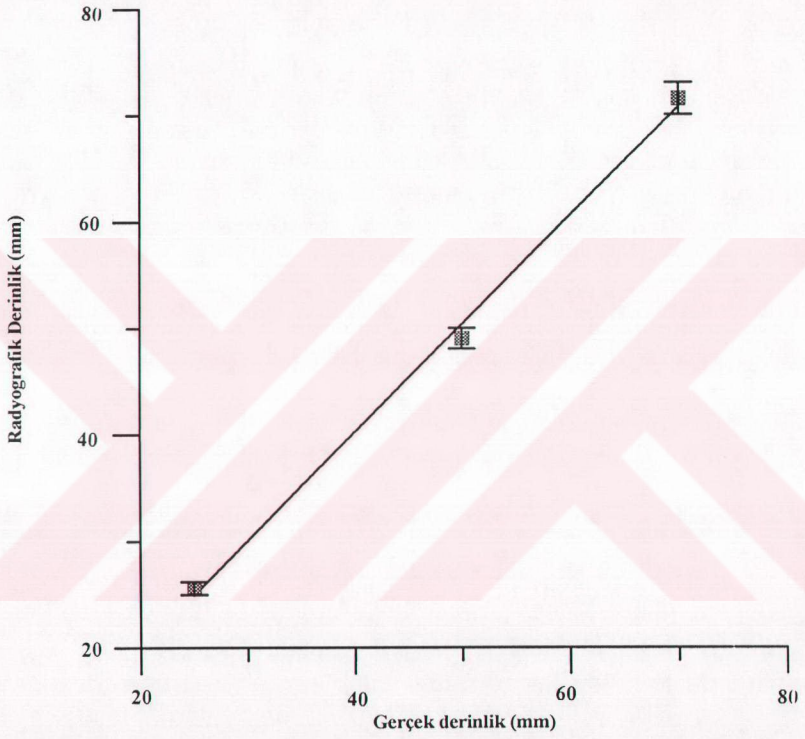
Paralaks yöntemi kendi içinde üç farklı şekilde Bölüm 4.4.2 içinde tanıtıldığı gibi uygulanmıştır.

Rijid Paralaks Metodu Uygulamalarının Sonuçları

Rijid paralaks metodu Şekil 4.20'deki parçayla Tablo 4.10'da verilen Çekim Seti 1 uygulaması ile radyografik çekim yapılmış olup, alınan sonuçlar Şekil 5.18'de grafik olarak, Tablo 5.13'de sayısal değer olarak görülmektedir.

Tablo 5.13. Gama Radyografisi ile Yapılan Rijid Paralaks Metodu Uygulama Sonuçları

Gerçek Derinlik (mm)	Radyografik Derinlik (mm)	Mutlak Hata (mm)	Mutlak %Hata
25	25.6	0.6	2.4
50	49	1	2
70	71.52	1.52	2.17



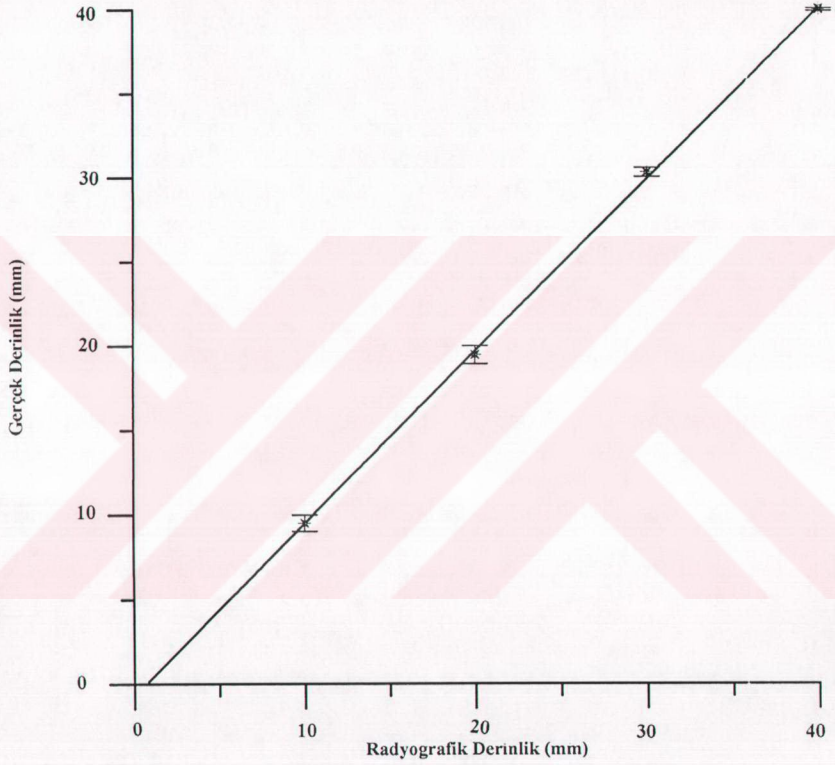
Şekil 5.18 Gerçek Derinlik-Radyografik Derinlik İlişkisi

Tek Markalama Paralaks Yöntemi Uygulamaları Sonuçları

Gama radyografisi ile, Şekil 4.14'deki parçaya sadece üst marka kullanılarak uygulama yapılmıştır. Burada, en uygun sonucu alabileceğimiz çekim pozisyonu olan markanın parça üstüne yerleştirilmesi benimsenmiştir. Tek markalama ile yapılan Tablo 4.10'daki Çekim Seti 2 ile uygulama yapılmış olup, elde edilen sonuçlar Şekil 5.19'da grafik ve Tablo 5.14'de sayısal değer olarak görülmektedir.

Tablo 5.14. Gama Radyografiyle Tek Markalama Yapılarak, Grafik Yardımıyla Tayin Edilen Radyografik Hata Derinliği Değerleri

Marka Kayması (mm)	Hata Kayması (mm)	Radyografik Derinlik (mm)	Gerçek Derinlik (mm)	Mutlak Hata (mm)	Mutlak %Hata	Marka (Tek)
9.25	2.2	9.51	10	0.49	4.9	Üst
9.25	4.5	19.459	20	0.541	2.7	
9.25	7	30.27	30	0.027	0.9	
9.25	9	39.92	40	0.08	0.2	
9.25	9.25	40	40	0	0	



Şekil 5.19 Tek Markalama İle Elde Edilen Derinliklerin Gerçek Değerleri İle Karşılaştırılması

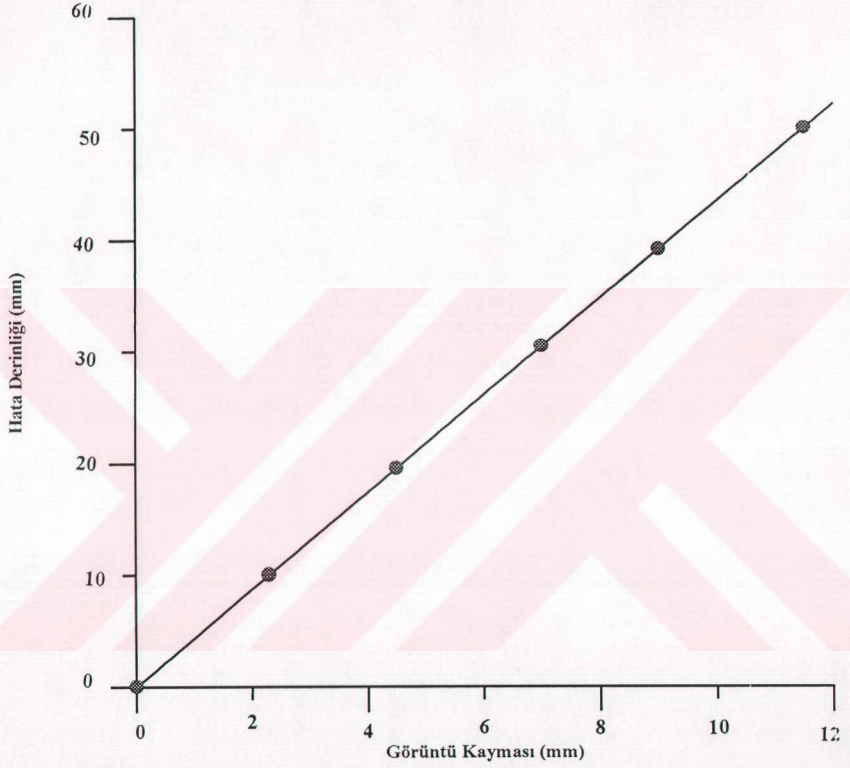
Çift Markalama Paralaks Metodu Uygulamaları Sonuçları

Gama radyografisi ile, Şekil 4.14'deki parça ile üst ve alt marka kullanılarak çekim yapılmıştır. Radyografik çekim şartı olarak, Tablo 4.10'da Çekim Seti 3 şartlarında uygulama yapılmıştır.

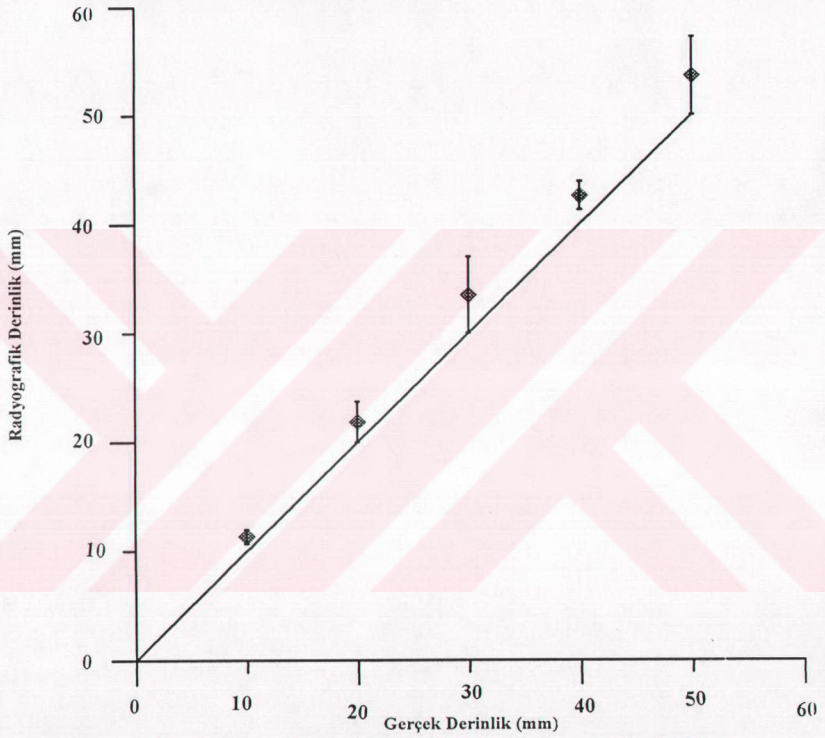
Çift markalama ile yapılan uygulama ile elde edilen görüntü kayması-hata derinliği sonuçları Şekil 5.20'deki grafikte, Şekil 5.21'de ise bu hata derinliği değerlerinin, gerçek değerleri ile karşılaştırılması verilmiştir. Bu deneye ait sonuçlar sayısal değerler olarak ise Tablo 5.15'de görülmektedir.

Tablo 5.15. Gama Radyografiyle Çift Markalama Yapılarak, Grafik Yardımıyla
Tayin Edilen Radyografik Hata Derinliği Değerleri

Hata Kayması (mm)	Radyografik Derinlik (mm)	Gerçek Derinlik (mm)	Mutlak Hata (mm)	Mutlak %Hata	Marka(Çift)
2.3	10	10	0	0	Alt Marka
4.5	19.56	20	0.44	2.2	
7	30.43	30	0.43	1.43	
9	39.13	40	0.87	2.17	
11.50	49.6	50	0.4	0.8	
11.7	50	50	0	0	Üst Marka



Şekil 5.20 Görüntü Kayması-Malzeme Kalınlığı (Hata Derinliği) Grafiği



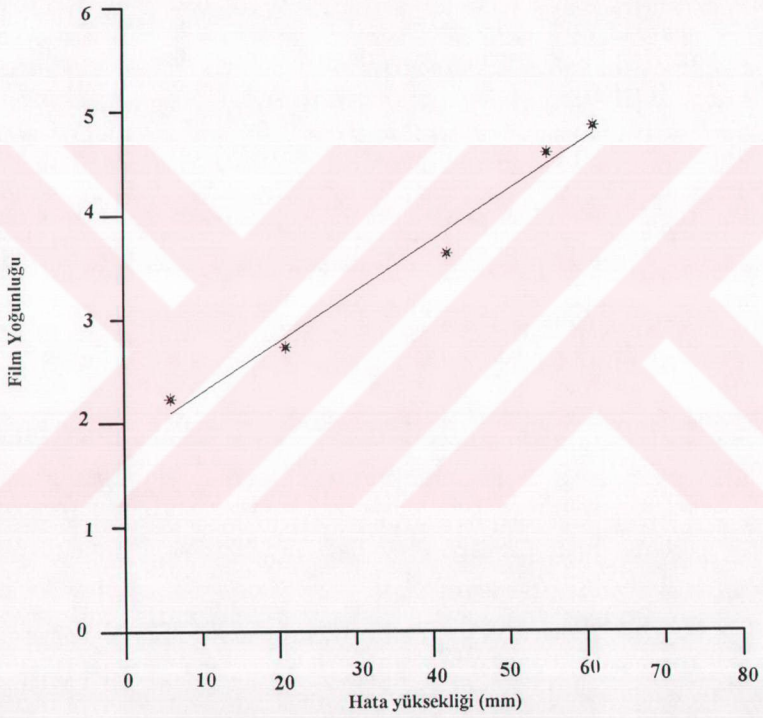
Şekil 5.21 Çift Markalama Yöntemi İle Tayin Edilen Radyografik Derinliklerin Gerçek Değerleri İle Karşılaştırılması

5.3.2.2. Gama Radyografisi İle Radyografik Yoğunluk Metodu Kullanılarak Yapılan Hata Tesbiti Uygulamalarının Sonuçları

Gama radyografisi ile hata derinliği tesbitine ilişkin olarak uygulanan ikinci metod radyografik yoğunluk metodudur. Bu metod ile çalışma esnasında Şekil 4.21'deki parça için Tablo 4.11'deki çekim koşulları ile çalışılmış ve elde edilen radyografıdan mikrodensitometre yardımı ile yapılan ölçümlerden hareketle sonuçlar, grafik olarak Şekil 5.22'de, sayısal değer olarak Tablo 5.16'da sunulmuştur.

Tablo 5.16. 97 mm Çelik Numuneden Elde Edilen Radyografik Hata Yoğunluğu Değerleri

Hata Derinliği (mm)	Radyografik Hata Yoğunluğu (D)
6	2.23
21	2.73
42	3.63
55	4.59
61	4.85



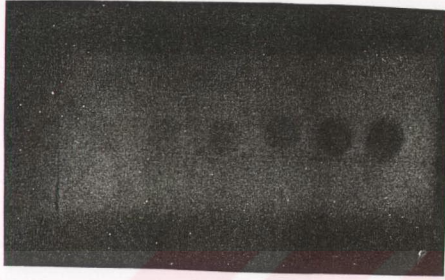
Şekil 5.22 Hata Yüksekliği-Radyografik Film Yoğunluğu

5.3.2.3. Gama Radyografisi İle Çift Film-Çift Çekim Metodu Kullanılarak Yapılan Hata Tesbiti Uygulamalarının Sonuçları

Gama radyografisi ile son hata derinlik tesbit uygulaması çift film-çift çekim yöntemidir. Bunun için Şekil 4.22'de tanıtılan üzerinde delikler olan çelik parça ile çalışılmıştır. Parçanın iki farklı boyutundan yapılan çekime ilişkin radyograflar Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'de görülmektedir. Parçanın iki farklı çekimine ilişkin elde edilen sonuçlar Tablo 5.17'de bir araya toplanmıştır.

Tablo 5.17. Gama Radyografisi İle Çift Film-Çift Çekim Deney Sonuçları

Delik No	Çapı (mm)	Derinliği (mm)	Daire Merkezinin x-y Koordinatı (mm)	Daire Merkezinin Z Koordinatı (mm)
0	6	5	3.1	4.5
1	6	10	3	9
2	6	20	3.2	19
3	6	30	3	28
4	6	40	3	38
5	6	50	3	47



Şekil 5.23 1. Kalınlık İçin Çift-Film Çift Çekim
Radyografi



Şekil 5.24 2. Kalınlık İçin Çift Film-Çift Çekim
Radyografi

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu Yüksek Lisans Tez çalışmasında endüstriyel radyografi ile, radyografik olarak, özel numuneler ve genel numunelerle çalışılarak hata tesbiti yapılmış ve radyografide önemli bir sorun olan hata derinliği tayini farklı yöntemlerle gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Böylelikle hacimsel bir tahribatsız muayene yöntemi olan radyografi ile detay yakalama ve bu detayın hata yorumlaması ile beraber parça içindeki yerinin tesbiti yapılabilmektedir.

Endüstriyel radyografi olarak nitelenen X-ışını ve gama radyografisi teknikleri ile ayrı ayrı çalışılmıştır. X-ışını radyografisi ile çekim limitleri içine giren 5 farklı kalınlıkla iki farklı çekim koşulunda yapılan radyografik çalışma sonucunda kalınlıklara uygun olarak tayin edilen poz süresi ile çalışıldığında Tablo 5.1'den görüldüğü üzere, hassasiyetin % 2'nin altında olduğu radyografik sonuçlar elde edilebilmiştir. Bir başka deyişle, radyograflar hata tesbiti açısından kabul edilebilir niteliklerdedir.

Aynı deney seti ile farklı kalınlıklar için sabit çekim koşulları ile radyografik çekim yapıldığında, her kalınlık için uygun çekim koşulları sağlanmamış olması nedeniyle hassasiyet ya % 2'nin üzerine çıkmış ya da hassasiyetten bahsedilemeyecek koşullar oluşmuştur. Bir başka deyişle, penetremetre seçilemez duruma dahi gelinmiştir (Tablo 5.2).

Bu durum da göstermektedir ki; X-ışını radyografi çekim sınırları içinde olmakla beraber uygun çekim parametreleriyle çalışılmadığı durumlarda, hata tesbiti ya çok kabalaşabilmekte veya mümkün olmamaktadır. Oysa, uygun çekim parametreleriyle çalışıldığında iyi (% 1,25) hassasiyetle sonuç alınabildiği de görülmüştür (Tablo 5.3).

Gama radyografisi ile tekniğin çekim limitleri içine giren 13 farklı kalınlıkla kalınlıklara uygun çekim koşullarında yapılan radyografik çalışma sonucunda Tablo 5.5'den görüldüğü üzere, hassasiyetin, 100 mm'ye kadar "iyi" olarak nitelendirilebilecek şekilde % 2'nin altında olduğu radyografik sonuçlar elde edilebilmiştir. Ancak, 100 mm ve bunun üzerindeki kalınlıklarda, söz konusu kalınlıklara ilişkin, uygun olarak nitelenebilecek radyografik çekim koşullarında çalışılmış olmasına karşın hassasiyet % 2'nin üzerine çıkmıştır. Bu durum Co-60 radyografisinde karşılaşılan bir durum olup, kalınlıkların hayli yükselmesi halinde kaçınılmaz yarı gölge nedeniyle ortaya çıkan bir durumdur.

Endüstriyel radyografi ile özel numunelerle çalışılmasının dışında çevreden bulunan genel numunelerle de çalışılmıştır. Bu genel numunelerle çekilen radyografların hepsinin hassasiyeti % 2'nin altında olup, kabul edilebilir nitelikte radyograflardır.

X-ışını radyografisi ile genel numune olarak nitelenen dört kaynak dikişinde farklı tip kaynak hataları net olarak tesbit edilebilmiştir. Diğer iki genel numuneden biri olan dövülmüş bir parçanın radyografından dövme izleri net biçimde belirlenebilmiş ve ekstrüzyon kalıbı radyografından da önemli bir hata olan çatlak net şekilde tesbit edilmiştir.

Keza, gama radyografisi ile genel numune parçası olarak bir potanın radyografi çekilmiş ve kabul edilebilir bir çekim olan bu radyograftan da hata tespiti yapılabilmektedir. Böylelikle, genel numune parçalar için hem X-ışını radyografisi ile ve hem de gama radyografisi ile uygun çekim hassasiyeti elde edildiğinde hata ve başarısızlıkların açık bir şekilde tayin edilebildiği gösterilmiş olmaktadır.

Cisimlerin iki boyutlu olarak iç yapılarına ilişkin görüntülerinin alındığı radyografi tekniğinde önemli bir sorun, tesbit edilen hatanın üçüncü boyuttaki yeridir. Bir başka deyişle, radyografide önemli ve bilinmek istenen bir husus hata derinliği tayinidir.

Hata derinliği tayini için, bu yüksek lisans tezinde farklı metodlarla çalışılmıştır. İlk olarak çalışılan metod paralaks metodudur. Paralaks metodunun da kendi içinde üç değişik alt tekniği ile çalışılmıştır.

Rijid paralakas yöntemi ile elde edilen sonuçlar X-ışını radyografisi için en fazla % 5 hata ile, gama radyografisi için uygun ve kabul edilebilir sonuçlar elde edilmiştir. Tek markalama yönteminde marka parçanın üzerine konduğunda uygun sonuçların alındığı görülmektedir. Keza çift markalama tekniğinde de önemli olan üst marka olmaktadır.

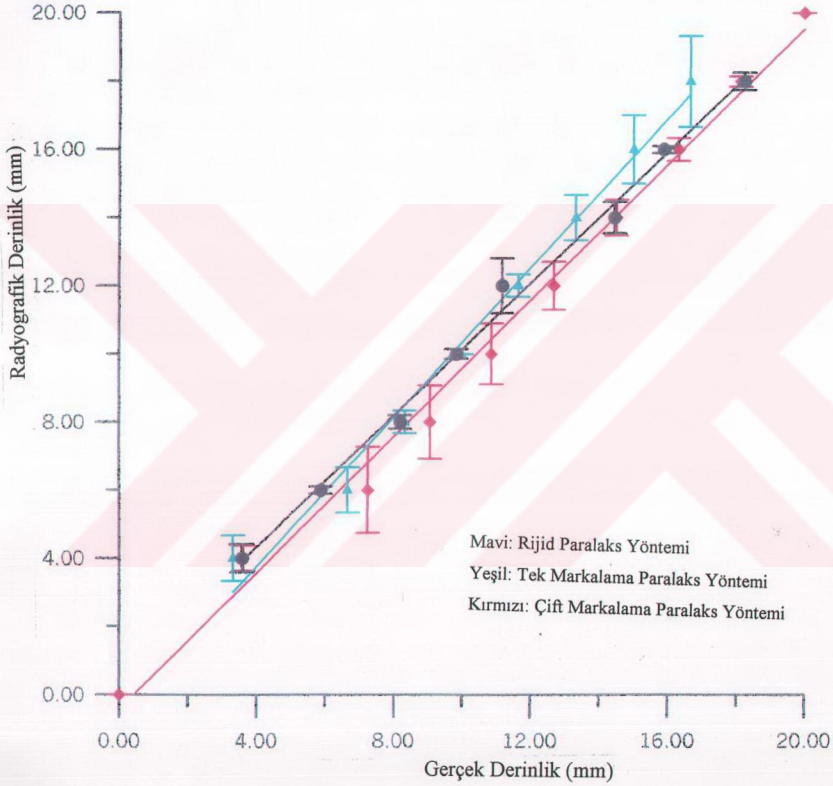
Paralaks yöntemi için, hatanın parça içindeki yeri de önemlidir. Filme yakın hataların görüntü kaymaları az olmakta veya görüntüler üst üste binmektedir. Bu durum fazladan işlem yapılmasını gerektirir. Parça içinde filme yakın olan hataların paralaks yöntemi ile derinliğinin tayini, görüntüdeki kaymanın az olması nedeniyle nispeten zor olmaktadır ve en büyük deneysel hata burada yapılmaktadır. Bununla beraber hem X ve hem de gama radyografisi için paralaks yöntemi ile elde edilen sonuçları tatminkardır.

Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de sırasıyla X-ışını ve gama radyografisi için paralaks yöntemlerinin mukayesesi görülmektedir. Görülmektedir ki; hem X ve hem de gama radyografisi için paralaks yöntemi ile elde edilen sonuçları tatminkar ve kabul edilebilirdir.

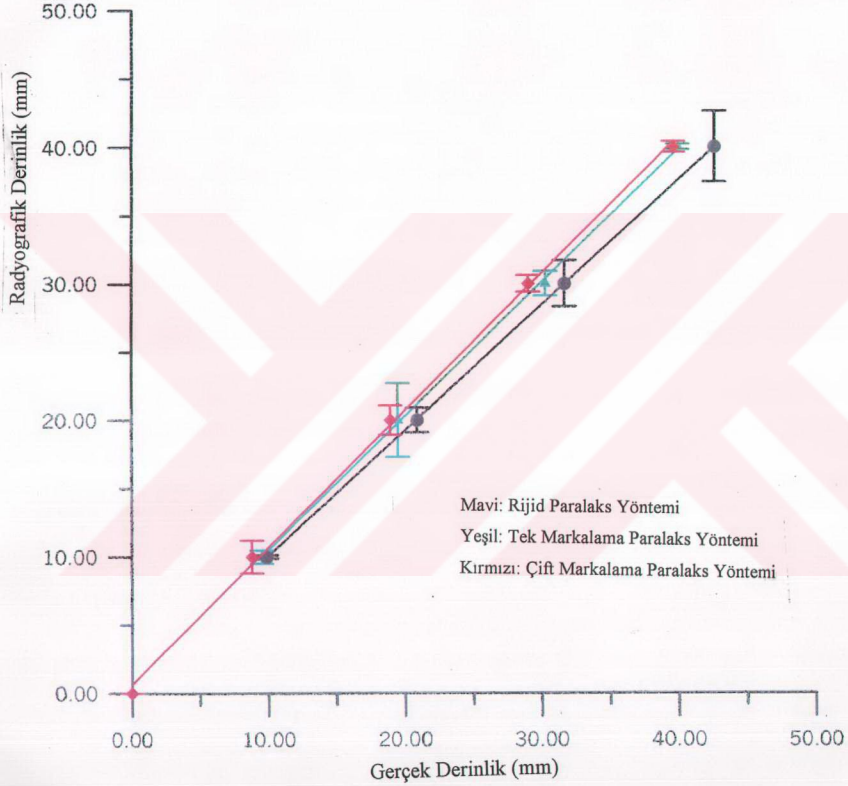
Radyografik yoğunluk ile hata derinliği tayini için yapılan çalışmalarda da hem X-ışını ile ve hem de gama ışını için hayli gerçeğe uygun sonuçlar elde edilebilmiştir. Bir başka deyişle, uygun çekim şartlarıyla çalışılmış ve uygun hassasiyette bir mikrodensitometre varsa radyografik yoğunluk tekniği ile hata derinliği tayini paralaks yöntemlerinden de ileri şekilde yapılabilir.

Çift film-çift çekim metodu ile X-ışını ve gama radyografisi ile hata derinliği tayini algılama ve yorumlama açısından rahat bir şekilde yapılmakta olup, yarı-gölge dışında sorunu bulunmamaktadır.

Böylelikle, hata derinliği yöntemlerinin her üçü ile de uygun ve kabul edilebilir sonuçlara ulaşılabilir. En ekonomik yöntem paralaks yöntemi olup, aynı toplam poz süresinde sonuca ulaşılabilir. Radyografik yoğunluk metodunda mikrodensitometre gibi ilave ve hassas bir cihaza ihtiyaç vardır. Çift film-çift çekim metodunda ise iki film ve iki poz süresi harcanmış olmaktadır.



Şekil 6.1 Paralaks Metodları İle Elde Edilen Sonuçların X-Işını Radyografisi İçin
Grafiksel Karşılaştırması



Şekil 6.2 Paralaks Metodları İle Elde edilen Sonuçları Gama Radyografisi İçin Grafiksel Karşılaştırması

Burada, her üç hata derinliği tayin tekniği ile de çalışılabileceği gösterilmiştir. Fazla olarak her üçü ile de tatminkar ve uygun sonuçlar alınabildiği kanıtlanmıştır.

z olarak belirtilmek istenirse bu Yüksek Lisans Tez alışması ile endüstriyel radyografinin başlıca amacı olan hataların rasyonel olarak tespiti incelenmiş ve çoğu kez gerçekleştirilmek istenen hata derinliği tayini farklı yöntemlerle yapılmış ve mukayeseli olarak irdelenmeye çalışılmıştır.

KAYNAKLAR

- Agfa-Gevaert, (1988), *Industrial Radiography*, Belgium.
- Akıncı, Ş., (1996), *Endüstriyel Radyografide Farklı Zemin Ortamlarının Saçılma Etkisinin Görüntü Kalitesine Etkisi*, İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- Bray,D.E., McBride,D., (1992), "*Nondestructive Testing Techniques*", John Wiley & Sons, New York.
- Bryant,L.E., McIntire, M., (1985), "*Nondestructive Testing Handbook*", Vol. 3, *Radiography and Radiation Testing*, American Society For Nondestructive Testing (ASNT), 2ND Edition, USA.
- Bray, D.E., Stonley, R.K., (1989), "*Nondestructive Evaluation*", A Tool for Design, Manufacturing, and Service.
- Bulubay, Ü., Tuğrul, A.B., (1998), Quantitative Evaluation of Intensifying Screen Materials in Co-60 Radiography For Steel Parts, *NDT&e International*, Vol. 31, No. 3, pp:193-199.
- Cartz.L., (1995), "*Nondestructive Testing*", Marquette University College of Engineering Milwaukee WI USA
- Çetin, F., (1992), *Radyografik Performans ve Görüntü Rezolüsyonu Tayini*, İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- DeeMeester, P. Aerts, W., (1982), *Analysis of Radiographic Image Recording Systems, Research techniques in NDT*, Vol. V.
- Dupont, (1987), "*NDT Systems*", *Radyographe's Weld Interpretation Reference*.
- Etherington, H., (1958), *Nuclear Engineering Handbook*, New York.
- Foldiak, G., (1986), *Industrial Application of Radioisotopes*, Elsevier, Amsterdam.
- Gardner, R.P., Ely, R.L.,(1967), *Radioisotope Measurement Applications in Engineering*, Reinhold Publ.Corp., New York.

- Halmshaw, R.** , (1971), *Industrial Radiology Techniques*, The Wykeham Publications, London.
- Halmshaw, R.**, (1991), *Nondestructive Testing*, Edward Arnold, London.
- Halmshaw, R.** , (1995), *Industrial Radiology Theory and Practice*, 2nd edition, Chapman & Hall, London.
- Kanamori H., Matsumoto, M.**, (1985), "Application of Information Spectra For The Evaluation of Radiographic Image Quality and System Performance", *Physics in Medicine and Biology*, Vol.30. No:10, pp: 1087-1092.
- Kodak** (1980), "*Radiography in Modern Industry*", (1980) 4th edition, Eastman Kodak Company, Rochester.
- Mix, P.E.**, (1987), "*Introduction to Nondestructive Testing*", John Wiley & Sons, New York.
- Nicholas, R.W.**, (1982), *Advances in Non-Destructive Examination For Structural Integrity*, Applied Science Publishers, London.
- Öztürk, A., Yavuz, H.**, (1995), "*Uygulamalarla Isı Geçişi*", Tanıtım ve Işınım, Çağlayan Kitapevi, Beyoğlu-İstanbul.
- Rumyantsev, S.**, "*Industrial Radiology*", *The Use of Radioactive Isotopes in Flaw Detection*. Moscow.
- Sharpe, R.**, (1970), *Research Techniques in Non-destructive Testing*, Academic Press.
- Sharpe, R.**, (1982), *Research Techniques in Non-destructive Testing*, Academic Press.

ÖZGEÇMİŞ

1971 Yılında Arpaçay'da doğdu. Orta öğrenimini takiben İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümüne girdi ve 1994'de "Astronom" ünvanı ile mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Nükleer Enerji Enstitüsü'nde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. İngilizce ve Fransızca bilmektedir.