

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**ANTİMON (CEVHERİ VE KONSANTRESİ) VE DEMİR KONSANTRESİ
KATKILI SİLİKON KAÜÇUK MALZEMELERİN DİAGNOSTİK
X-IŞINLARINI ZAYIFLATMA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özlem VURAL

Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı

Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı

MAYIS 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**ANTİMON (CEVHERİ VE KONSANTRESİ) VE DEMİR KONSANTRESİ
KATKILI SİLİKON KAÜÇUK MALZEMELERİN DİAGNOSTİK
X-IŞINLARINI ZAYIFLATMA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Özlem VURAL
(302161006)**

Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı

Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nesrin ALTINSOY
Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Bülent BÜYÜK**

MAYIS 2019

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 302161006 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Özlem VURAL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ANTİMON (CEVHERİ VE KONSANTRESİ) VE DEMİR KONSANTRESİ KATKILI SİLİKON KAUKUK MALZEMELERİN DİAGNOSTİK X-IŞINLARINI ZAYIFLATMA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Nesrin ALTINSOY**

Eş Danışman : **Dr. Öğr. Üyesi Bülent BÜYÜK**
Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Nilgün BAYDOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Zuhale ER
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ş. İpek KARAASLAN
Yeditepe Üniversitesi

Teslim Tarihi : **3 Mayıs 2019**
Savunma Tarihi : **14 Haziran 2019**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu Yüksek Lisans tez çalışması ile gerçekleştirilen çalışmalarla, radyasyon zırhlamasında sıklıkla kullanılan kurşun içeren zırhlama malzemelerine alternatif malzeme arayışına odaklanılmıştır. Kurşuna alternatif olabilecek toksik olmayan ve ekonomik malzemeler arasında antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemeler üretilmiş ve bu malzemelerin X-ışını zayıflatma özellikleri incelenmiştir. Yapılan bu çalışmanın konu ilgililerine yardımcı olacağı umulmaktadır.

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerini benden eksik etmeyen, karşılaştığım sorunlarda beni destekleyen Saygıdeğer Hocalarım Prof. Dr. Nesrin ALTINSOY ve Dr. Öğr. Üyesi Bülent BÜYÜK'e,

Deneysel çalışmalarında göstermiş oldukları desteklerden dolayı Saygıdeğer Prof. Dr. Şerife İpek KARAASLAN ve Dr. Türkay TOKLU'ya,

Maden XRF analizlerini yapan Doç. Dr. Mustafa KUMRAL ve Beril TANC'a, malzemelerin esneklik testlerini yapan, Prof. Dr. Murat Baydoğan, Araş. Gör. Doğukan ÇETİNER, Teknisyen Mızrap CANIBEYAZ, Serdarhan USTA'ya,

Deneylerde kullanılan kurşun plakaları hazırlayan Emekli Teknik Öğretmen Sayın Hüseyin Avni Önsal'a,

Değerli Hocalarım, Dr. Öğr. Üyesi Melda PATAN ALPER ve Dr. Mehmet Kemalettin TORUN'a,

Yüksek lisans hayatım boyunca en büyük destekçim olan arkadaşım Hatice DOĞRU'ya, tez çalışmamın yazım aşamasında ilgi ve desteklerinden ötürü arkadaşım Tuğba MANİCİ'ye,

Anneme, Görkem'e, eğitim hayatım boyunca en büyük destekçim olan babama,

Tez çalışmam boyunca ilgi ve desteğini esirgemeyen Ataer Caner ÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2019

Özlem VURAL
(Fizikçi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY.....	xxvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	2
1.3 Hipotez	5
2. RADYASYON VE RADYASYONDAN KORUNMA.....	7
2.1 Radyasyon Türleri	7
2.1.1 Alfa bozunumu	8
2.1.2 Beta Bozunumu	8
2.1.3 Nötronlar.....	9
2.1.4 Gama Işınları	9
2.1.5 X-ışınları.....	10
2.2 Fotonun Madde ile Etkileşmesi.....	10
2.2.1 Fotoelektrik Etki	11
2.2.2 Compton Saçılması.....	12
2.2.3 Çift Oluşumu	13
2.2.4 Toplam Foton Zayıflatma Katsayısı	14
2.3 Radyasyon Birimleri	18
2.3.1 Işınlama	18
2.3.2 Absorblanmış Doz	18
2.3.3 Kerma	19
2.3.4 Doz Eşdeğeri.....	19
2.4 Radyasyonun Biyolojik Etkileri	20
2.5 Radyasyondan Korunma	21
3. X-IŞINLARI VE TIPTA KULANIM ALANLARI	25
3.1 X-ışını tüpü.....	26
3.1.1 X-ışını türleri	27
3.1.1.1 Karakteristik X-ışınları.....	27
3.1.1.2 Bremsstrahlung X-ışınları	28
3.2 X-ışını spektrumu	28
3.2.1 Tüp Potansiyeli	29
3.2.2 Akım	29
3.2.3 Filtreleme.....	30

3.3 X-Işınlarının Tıpta Kullanımı.....	31
3.3.1 Radyografi	32
3.3.1.1 Konvansiyonel Radyografi.....	33
3.3.1.2 Dijital Radyografi.....	34
3.3.2 Bilgisayarlı Tomografi (BT).....	35
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	39
4.1 Deneyde Kullanılan Malzemeler.....	39
4.1.1 Antimon Cevheri Katkılı Silikon Kauçuk Malzemelerin Hazırlanışı.....	39
4.1.2 Antimon konsantresi katkı silikon kauçuk malzemelerin hazırlanışı.....	43
4.1.3 Demir konsantresi katkı silikon kauçuk malzemelerin hazırlanışı.....	45
4.2 Deneyde Kullanılan Cihazların Tanıtımı.....	47
4.2.1 X-ışını tüpü	47
4.3 Dedektör	47
4.4 Deney Düzenegi	49
4.4.1 TS EN 61331-1 standardı dar demet geometrisi.....	49
4.4.2 TS EN 61331-1 standardı geniş demet geometrisi	50
4.4.3 Yığılma Faktörü.....	51
4.5 Deneylerin Yapılışı.....	51
4.5.1 Dar demet geometrisi deneylerinin yapılışı	51
4.5.2 Geniş demet geometrisi deneylerinin yapılışı.....	53
4.6 Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Karakterizasyonu	55
4.6.1 Malzemelerin homojenlik testleri	55
4.6.2 Malzemelerin esneklik testleri	56
5. DENEY SONUÇLARI.....	59
5.1 Üretilen Malzemelerin Karakterizasyonu.....	59
5.1.1 Homojenlik testleri deney sonuçları	59
5.1.2 Esneklik testleri deney sonuçları	61
5.2 TS EN 61331-1 Standardına Göre Zayıflatma Oranları.....	62
5.2.1 Dar ve geniş demet geometrisine göre zayıflatma oranları	62
5.2.1.1 SA50 ve SA70 malzemelerinin dar ve geniş demet geometrisinde zayıflatma oranları.....	63
5.2.1.2 SAC50 ve SAC70 malzemelerin dar ve geniş demet geometrilerinde zayıflatma oranları.....	65
5.2.1.3 DT50 ve DT70 malzemelerinin dar ve geniş demet geometrilerinde zayıflatma oranları.....	66
5.2.1.4 Antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimlerindeki zayıflatma oranları mukayesesi	68
5.2.1.5 Antimon konsantresi katkı silikon kauçuk malzemelerin zayıflatma oranları	70
5.2.2 Yığılma faktörü hesapları	73
5.3 Lineer Zayıflatma Katsayıları.....	74
5.3.1 Antimon cevheri katkı silikon kauçuk malzemeler için farklı tüp gerilimlerinde lineer zayıflatma katsayıları	74
5.3.2 Antimon konsantresi katkı silikon kauçuk malzemeler için farklı tüp gerilimlerinde lineer zayıflatma katsayıları.....	76
5.3.3 Demir konsantresi katkı silikon kauçuk malzemeler için farklı tüp gerilimlerinde lineer zayıflatma katsayıları.....	77
5.3.4 Lineer zayıflatma katsayılarının enerjiye bağlı değişimleri	79
5.4 Kurşun Eşdeğerleri	80

6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	85
KAYNAKLAR	91
EKLER.....	95
ÖZGEÇMİŞ.....	105

KISALTMALAR

ALARA	: As Low As Reasonably Achievable
BT	: Bilgisayarlı Tomografi
HVL	: Half Value Layer
ICRP	: Uluslararası Radyasyon Korunması Komisyonu
IAEA	: Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı
LET	: Lineer Enerji Transferi
KERMA	: Kinetic Energy Released per Mass
MMD	: Maksimum Müsaade Edilebilir Doz
TAEK	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu

SEMBOLLER

D	: Absorblanmış doz
w	: Ağırlık faktörü
α	: Alfa parçacığı
Sb	: Antimon elementi
$\bar{\nu}$	: Antinötrino
Z	: Atom numarası
μ_c	: Bileşik veya karışımlar için kütle zayıflatma katsayısı
B	: Buildup (yığılma) faktörü
σ	: Compton saçılması tesir kesiti
κ	: Çift oluşumu tesir kesiti
F_N	: Dar demet geometrisi için zayıflatma oranı
H	: Doz eşdeğeri
B_e	: Elektronun bağlanma enerjisi
T	: Elektronun kinetik enerjisi
τ	: Fotoelektrik tesir kesiti
E_γ	: Gelen fotonun enerjisi
F_B	: Geniş demet geometrisi için zayıflatma oranı
He	: Helyum çekirdeği
Q	: Kalite Faktörü
K	: Kerma
μ_m	: Kütle zayıflatma katsayısı
β^-	: Negatif beta parçacığı (elektron)
ν	: Nötrino
λ	: Ortalama serbest yol
β^+	: Pozitron
K_0	: Radyasyon demetinde test objesi olmadan alınan hava kerma hızı ölçümleri
K_1	: Radyasyon demetinde test objesi varken alınan hava kerma hızı ölçümleri
K_B	: Radyasyon demetinde zayıflatma oranı 10^5 olan bir malzeme varken alınan hava kerma hızı ölçümleri
I	: Radyasyon şiddeti
μ	: Toplam foton zayıflatma katsayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Radyasyon Türleri	7
Çizelge 2.2 : Farklı radyasyon türleri için Kalite Faktörleri.....	20
Çizelge 2.3 : ICRP doz limitleri	23
Çizelge 3.1 : Doğal filtrelemeyi oluşturan X-ışını tüpü bileşenlerinin Al eşdeğer kalınlıkları	30
Çizelge 4.1 : Malzemelerin hazırlanışında kullanılan antimon cevherinin içeriği	41
Çizelge 4.2 : AK-SİL RTV2 E-20 Silikon Kauçuk özellikleri.....	41
Çizelge 4.3 : Üretilen antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemelerin kütlece oranları	42
Çizelge 4.4 : Malzemelerin hazırlanışında kullanılan antimon konsantresinin içeriği	43
Çizelge 4.5 : Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin kütlece oranları.	44
Çizelge 4.6 : Malzemelerin üretiminde kullanılan demir konsantresinin içeriği.....	45
Çizelge 4.7 : Demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin kütlece demir konsantresi ve silikon kauçuk oranları.....	46
Çizelge 4.8 : X-ışını tüpünün özellikleri.....	47
Çizelge 4.9 : RaySafe Xi R/F dedektörünün ölçüm modu	48
Çizelge 4.10 : RaySafe Xi R/F dedektörünün özellikleri	48
Çizelge 4.11 : Dar demet geometrisi için ışınlama şartları.....	52
Çizelge 4.12 : Geniş demet geometrisi için ışınlama şartları	54
Çizelge 5.1 : Antimon Cevheri Esneklik Testi Sonuçları.....	61
Çizelge 5.2 : Antimon Konsantresi Esneklik Testi Sonuçları	62
Çizelge 5.3 : Demir Konsantresi Esneklik Testi Sonuçları	62
Çizelge 5.4 : SA50 ve SA70 malzemelerin dar demet geometrisinde zayıflatma oranları	63
Çizelge 5.5 : SA50 ve SA70 malzemeler için geniş demet geometrisinde zayıflatma oranları	63
Çizelge 5.6 : SAC50 ve SAC70 malzemeleri için dar demet geometrisinde farklı tüp gerilimlerine göre zayıflatma oranları.....	65
Çizelge 5.7 : SAC50 ve SAC70 malzemeleri için geniş demet geometrisinde farklı tüp gerilimlerine göre zayıflatma oranları.....	65
Çizelge 5.8 : DT50 ve DT70 malzemeler için dar demet geometrisinde zayıflatma oranları	67
Çizelge 5.9 : DT50 ve DT70 malzemeler için geniş demet geometrisinde zayıflatma oranları	67
Çizelge 5.10 : Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemeler için dar demet geometrisinde zayıflatma oranları.....	71
Çizelge 5.11 : Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemeler için geniş	

demet geometrisinde zayıflatma oranları	72
Çizelge 5.12 : Antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemelerin yığılma faktörleri	73
Çizelge 5.13 : Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin yığılma faktörleri	73
Çizelge 5.14 : Demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin yığılma faktörleri	73
Çizelge 5.15 : Dar demet geometrisi için ışınlama şartları	74
Çizelge 5.16 : SA50 için lineer zayıflatma katsayıları	75
Çizelge 5.17 : SA70 için lineer zayıflatma katsayıları	75
Çizelge 5.18 : SAC50 için lineer zayıflatma katsayıları	76
Çizelge 5.19 : SAC70 için lineer zayıflatma katsayıları	77
Çizelge 5.20 : DT50 için lineer zayıflatma katsayıları	78
Çizelge 5.21 : DT70 için lineer zayıflatma katsayıları	79
Çizelge 5.22 : SA70 için farklı tüp gerilimlerinde 0,5 mm PbE	80
Çizelge 5.23 : SAC70 için farklı tüp gerilimlerinde 0,5 mm PbE	81
Çizelge 5.24 : DT70 için farklı tüp gerilimlerinde 0,5 mm PbE	81
Çizelge 5.25 : SA50 için farklı tüp gerilimlerinde 0,35 mm PbE	82
Çizelge 5.26 : SAC50 için farklı tüp gerilimlerinde 0,35 mm PbE	82
Çizelge 5.27 : DT50 için farklı tüp gerilimlerinde 0,35 mm PbE	82
Çizelge 5.28 : SAC70 için 0,25 mm PbE, 0,35 mm PbE ve 0,5 mm PbE değerleri..	83
Çizelge A1: Antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimleri için dar demet geometrisinde I_0 ve I doz değerleri	97
Çizelge A2: Demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimleri için dar demet geometrisinde I_0 ve I doz değerleri	97
Çizelge A3: Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimleri için dar demet geometrisinde I_0 ve I doz değerleri	98
Çizelge A4: Antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimleri için geniş demet geometrisinde doz değerleri	99
Çizelge A5: Demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimleri için geniş demet geometrisinde doz değerleri	99
Çizelge A6: Antimon konsantre katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimleri için geniş demet geometrisinde I_0 ve I doz değerleri	100
Çizelge B.1: Antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimleri ve farklı kalınlıklar için dar demet geometrisinde doz değerleri	101
Çizelge B.2 : Demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimleri ve farklı kalınlıklar için dar demet geometrisinde doz değerleri	102
Çizelge B.3 : Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimleri ve farklı kalınlıklar için dar demet geometrisinde doz değerleri	103

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Radyoaktif bozunma süreci.....	9
Şekil 2.2 : Gama ve X-ışınlarının enerji spektrumları.....	10
Şekil 2.3 : Fotoelektrik Etki.....	11
Şekil 2.4 : Foton enerjisi ve malzemenin atom numarasının Fotoelektrik etki tesir kesiti ile ilişkisi.....	12
Şekil 2.5 : Compton Saçılması	12
Şekil 2.6 : Foton enerjisi ve malzemenin atom numarasının Compton Saçılması tesir kesiti ile ilişkisi.....	13
Şekil 2.7 : Çift Oluşumu	13
Şekil 2.8 : Çift Oluşumu	14
Şekil 2.9 : Foton enerjisi ve malzemenin atom numarasının çift oluşumu tesir kesiti ile ilişkisi	14
Şekil 2.10 : Üç önemli foton etkileşmesinin malzemenin atom numarası ve gelen fotonun enerjisine göre baskın oldukları bölgeler	15
Şekil 2.11 : Kurşun için kütle zayıflatma katsayısı grafiği.....	15
Şekil 2.12 : Dar demet geometrisi	16
Şekil 2.13 : t kalınlığındaki bir malzemeden geçen radyasyon demetinin şiddeti	16
Şekil 2.14 : Geniş demet geometrisi	17
Şekil 2.15 : Radyasyondan korunmanın üç temel kuralı	23
Şekil 2.16 : Radyasyon şiddetinin mesafeyle değişimi.	24
Şekil 2.17 : Alfa, Beta, Gama, X-ışını ve Nötronların zırhlanması.....	24
Şekil 3.1 : X-ışınları kullanılarak alınan ilk radyografik görüntü	25
Şekil 3.2 : Elektromanyetik Spektrum.....	26
Şekil 3.3 : X-ışını tüpü.....	26
Şekil 3.4 : Bremsstrahlung ve karakteristik X-ışınları.....	27
Şekil 3.5 : Karakteristik X-ışınları.....	27
Şekil 3.6 : Bremsstrahlung X-ışınları.	28
Şekil 3.7 : 100 kVp tüp voltajında tungsten hedef için X-ışını spektrumu	29
Şekil 3.8 : Farklı tüp voltajlarına göre X-ışını şiddetleri	29
Şekil 3.9 : Tungsten hedef X-ışını tüpü için 100 kVp tüp geriliminde 50, 100 ve 150 mAs tüp akımındaki X-ışını spektrumları.....	30
Şekil 3.10 : 1, 2 ve 3 mm Al toplam filtrelemeye sahip tungsten hedef X-ışını tüpünde 100 kVp'de X-ışını spektrumu	31
Şekil 3.11 : Radyografi görüntüleme sisteminin bileşenleri.....	33
Şekil 3.12 : Radyografik film	33
Şekil 3.13 : Bilgisayarlı Tomografide dar demet geometrisi.....	35
Şekil 3.14 : (a) 1. Nesil BT (b) 2. Nesil BT (c) 3. Nesil BT (d) 4. Nesil BT.....	37
Şekil 4.1 : Tüvenan antimon kaya parçası.	39
Şekil 4.2 : Öğütücü içindeki antimon cevheri parçaları.	40
Şekil 4.3 : Sb madeni tozu.	40

Şekil 4.4 : Antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemeler.....	42
Şekil 4.5 : Antimon konsantresi tozu.....	43
Şekil 4.6 : Sb konsantresi katkılanmış silikon kauçuk malzemeler.....	44
Şekil 4.7 : Demir konsantresi tozu.....	45
Şekil 4.8 : Demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemeler.	46
Şekil 4.9 : Philips Digital Diagnost X-ışını tüpü.	47
Şekil 4.10 : RaySafe Xi R/F dedektör ve doz görüntüleme ünitesi.	48
Şekil 4.11 : TS EN 61331-1 standardına uygun dar ve geniş demet geometrilerinde kullanılan diyaframlar.	49
Şekil 4.12 : TS EN 61331-1 standardına göre kurulan dar demet geometrisi.	51
Şekil 4.13 : Oluşturulan dar demet geometrisinin şematik görüntüsü.	52
Şekil 4.14 : Dar demet geometrisinde test malzemelerinin konumu.	53
Şekil 4.15 : TS EN 61331-1 Standardına göre oluşturulan geniş demet geometrisi.	53
Şekil 4.16 : TS EN 61331-1 Standardına göre kurulan geniş demet geometrisinin şematik görüntüsü.	54
Şekil 4.17 : Geniş demet geometrisinde numuların konumu.	55
Şekil 4.18 : PHYWE XR 4.0 X-ışını ünitesi.....	55
Şekil 4.19 : Esneklik testleri yapılmak üzere hazırlanan numuneler.....	56
Şekil 4.20 : Shimadzu AGS-J.	56
Şekil 4.21 : Esneklik testi sırasında numunenin görünümü.	57
Şekil 5.1 : Sb cevheri katkılanmış silikon kauçuk malzemelerin radyografileri	59
Şekil 5.2 : Sb konsantresi katkılanmış silikon kauçuk malzemelerin radyografileri.	60
Şekil 5.3 : Demir konsantresi katkılanmış silikon kauçuk malzemelerin radyografileri.....	61
Şekil 5.4 : SA0, SA50 ve SA70 malzemelerin dar demet geometrisinde farklı X-ışını tüp gerilimlerine göre zayıflatma oranları.....	64
Şekil 5.5 : SA0, SA50 ve SA70 malzemelerin geniş demet geometrisinde farklı X- ışını tüp gerilimlerine göre zayıflatma oranları.	64
Şekil 5.6 : SAC0, SAC50 ve SAC70 malzemelerin dar demet geometrisinde farklı tüp gerilimlerine göre zayıflatma oranları.....	66
Şekil 5.7 : SAC0, SAC50 ve SAC70 malzemelerin geniş demet geometrisinde farklı tüp gerilimlerine göre zayıflatma oranları.....	66
Şekil 5.8 : DT0, DT50 ve DT70 malzemelerin dar demet geometrisinde farklı X-ışını tüp gerilimlerine göre zayıflatma oranları.....	67
Şekil 5.9 : DT0, DT50 ve DT70 malzemelerin geniş demet geometrisinde farklı X- ışını tüp gerilimlerine göre zayıflatma oranları.	68
Şekil 5.10 : SA50, DT50 ve SAC50 malzemeler için dar demet geometrisinde farklı tüp gerilimleri için zayıflatma oranları.....	68
Şekil 5.11 : SA50, DT50 ve SAC50 malzemeler için geniş demet geometrisinde farklı tüp gerilimleri için zayıflatma oranları.....	69
Şekil 5.12 : SA70, DT70 ve SAC70 malzemeler için dar demet geometrisinde farklı tüp gerilimleri için zayıflatma oranları.....	69
Şekil 5.13 : SA70, DT70 ve SAC70 malzemeler için geniş demet geometrisinde farklı tüp gerilimleri için zayıflatma oranları.....	69
Şekil 5.14 : Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin dar demet geometrisinde farklı X-ışını tüp gerilimleri için zayıflatma oranları	70
Şekil 5.15 : Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin geniş demet geometrisinde farklı X-ışını tüp gerilimleri için zayıflatma oranları	70
Şekil 5.16 : SA50 için bağıl sayım-malzeme kalınlığı grafiği.....	74
Şekil 5.17 : SA70 için bağıl sayım-malzeme kalınlığı grafiği.....	75

Şekil 5.18 : SAC50 için bağıl sayım-malzeme kalınlığı grafiği	76
Şekil 5.19 : SAC70 için bağıl sayım-malzeme kalınlığı grafiği	77
Şekil 5.20 : DT50 için bağıl sayım-malzeme kalınlığı grafiği	78
Şekil 5.21 : DT70 için bağıl sayım-malzeme kalınlığı grafiği	78
Şekil 5.22 : SA70, SAC70 ve DT70 malzemelerin lineer zayıflatma katsayılarının enerjiye göre değişimi	79
Şekil 5.23 : SA50, SAC50 ve DT50 malzemelerin lineer zayıflatma katsayılarının enerjiye göre değişimi	80
Şekil 5.24 : SA70, SAC70 ve DT70 için 0,5 mm PbE grafiği	81
Şekil 5.25 : SAC50, SA50 ve DT50 için 0,35 mm PbE grafiği	82
Şekil 5.26 : SAC70 için 0,25 mm PbE, 0,35 mm PbE, ve 0,5 mm PbE grafiği	83

ANTİMON (CEVHERİ VE KONSANTRESİ) VE DEMİR KONSANTRESİ KATKILI SİLİKON KAÜÇUK MALZEMELERİN DİAGNOSTİK X- IŞINLARINI ZAYIFLATMA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Bu yüksek lisans tez çalışmasında X-ışınlarından korunmada yaygın olarak kullanılan kurşun zırh malzemelerine alternatif olarak antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemeler üretilmiştir. Üretilen malzemelerin X-ışınlarını zayıflatma oranları, lineer zayıflatma katsayıları ve kurşun eşdeğer kalınlıkları TS EN 61331-1 standardına uygun olarak belirlenmiştir.

İstenmeyen Radyasyondan korunma, sağlık fiziği uygulamaları da dahil olmak üzere nükleer teknolojinin en önemli hususlarından biridir. Radyasyon uygulamalarında çalışan personelin ve halkın istenmeyen radyasyondan korunmasını sağlamak amacıyla Türkiye Atom Enerjisi Kurumu tarafından Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği yayımlanmıştır. Yönetmelikte, radyasyon çalışanlarının ve halkın maruz kalabileceği radyasyon seviyeleri belirtilmiştir. Buna göre, radyasyon uygulamalarını gerçekleştiren kurum ve kuruluşlar istenmeyen radyasyondan korunmak için gerekli tedbirleri almak zorundadır. Radyasyondan korunmada zaman, mesafe ve zırhlama malzemesi ALARA (as low as reasonably achievable) prensibine göre üç ana parametredir. Bunlardan zaman ve mesafe parametreleri uygulamanın koşullarına bağlı olarak her zaman istenildiği gibi olamamaktadır. Diğer iki parametrenin sağlanamadığı koşullarda zırhlama malzemeleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu malzemeler arasında yoğunluğunun ve atom numarasının yüksek olmasından dolayı kurşun ($Z=82$) sıkça tercih edilmektedir. Kurşundan yapılan koruyucu giysiler (kurşun önlükler, eldivenler, gözlükler gibi) sağlık personeli X-ışınlarından korumak amaçlı kullanılan ekipmanlardır. Ancak kurşun, ağır ve toksik olduğundan uygulamada bazı kısıtlamaları olmaktadır. Ayrıca Avrupa Birliği (EU), 2003 yılında bazı cihazlarda kurşun kullanımının kısıtlanmasına yönelik RoHS-1 ve 2011 yılında RoHS-2 yönetmeliklerini yayınlamıştır. Bu kısıtlamalar arasında şimdilik nükleer cihazlarla ilgili bölümler kapsam dışı bırakılmıştır. Buna sebep olarak, konu ile ilgili hazırlanan raporlarda halihazırda kurşuna alternatif olabilecek ekonomik bir malzeme bulunmadığı gösterilmektedir. Bu nedenle kurşuna alternatif ekonomik malzeme arayışıyla ilgili çalışmalar sürmektedir. Tungsten, antimon, demir, bizmut, baryum gibi elementler radyasyondan korunmada kurşuna alternatif zırhlama malzemesi olmaya adaydırlar.

Radyasyondan koruyucu malzemelerin radyasyondan koruma özellikleri, bu amaçla en yaygın kullanıma sahip olan kurşun malzeme ile belirlenmektedir. Kurşun katkılı veya alternatif malzeme katkılı radyasyondan koruyucu malzemelerin radyasyon zırhlama kapasiteleri, eşdeğer zayıflatma oranına sahip olan saf kurşun kalınlığı ile tanımlanmaktadır. Bu amaçla hazırlanan TS EN 61331-1 standardı, çeşitli

enerjilerdeki X- ve Gama ışınları karşısındaki malzemelerin kurşun eşdeğer zayıflatma özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Örneğin, 0,5 mm PbE eşdeğerine sahip olan bir malzeme TS EN 61331-1 standardına göre 0,5 mm saf kurşunun farklı X- ve Gama ışınları karşısındaki sahip olduğu zayıflatma oranlarını sağlamak durumundadır. Literatürde, kurşun içeren radyasyondan koruyucu malzemelerin bir kısmının, kurşun içermeyen radyasyondan koruyucu malzemelerin ise birçoğunun üzerinde belirtilen kurşun eşdeğeri standardını sağlamadığını ifade eden, çok sayıda yayın bulunmaktadır. Bunun nedenleri arasında, malzemelerin standarda uygunluk testlerinin yapılmadığı, yapılsa dahi standarda uygun geometrilerin kullanılmadığı, testlerde sadece bazı enerji seviyelerinin kullanıldığı sayılabilmektedir. Hal böyle iken, standarda uygun olmayan malzemelerin üretilmesi ve uygulamalarda kullanılması, çalışan personelin ve halkın istenmeyen radyasyona maruz kalmasına neden olabilecektir. Burada dikkat edilmesi gereken hususlar, üreticilerin radyasyondan koruyucu malzeme üretimini standarda uygun olarak gerçekleştirmesi ve standarda uygun malzeme üretimlerini belgelendirmeleridir. Benzer şekilde radyasyon çalışanları ve sorumlularının da radyasyondan koruyucu malzeme temin ederken üreticiden ekipmanın standarda uygun olduğuna dair belge istemesi ve hatta bunu şartname içerisinde belirtmesi gerekmektedir. Bu çalışmada üretilen malzemelerin radyasyondan koruma kapasiteleri tespit edildikten sonra standarda uygun malzeme parametreleri ortaya çıkarılmıştır.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında öncelikle, yerli olarak üretilen antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi, silikon kauçuğun içine başarıyla katılanmıştır. Silikon içerisine katılan kütlece %3-5 oranında katalizör, hem malzeme üzerinde yeterli çalışma zamanını vermekte, hemde tam kürleşmeyi sağlamaktadır. Antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi tozları ayrı ayrı silikon kauçuk içerisine katılanmıştır. Her bir malzeme grubu silikon içerisine kütlece %70 oranına kadar katkılanabilmektedir. Saf silikon malzeme ile birlikte üç grup ve toplamda 25 adet malzeme üretilmiştir. Daha sonrasında, bu malzemelerin karakteristik özelliklerinin incelenmesi için homojenlik ve esneklik testleri yapılmıştır.

Üretilen malzemelerin Homojenlik testleri Yeditepe Üniversitesi, Fizik Bölümü, Medikal Fizik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvarında bulunan X-ışını radyografi cihazından yararlanılmıştır. Malzemeler X-ışını tüpü ile floresan ekran arasına konularak radyografileri çekilmiş ve katkılanan antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresinin silikon kauçuk içinde dağılımlarındaki homojenlik incelenmiştir. Üretilen malzemelerin homojen yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir.

Esneklik testleri, İTÜ, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mekanik Metalurji Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Silikon kauçuğun içindeki antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi gibi katkı maddelerinin malzeme esnekliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan esneklik testleri sonucunda, malzemelerin katkı malzeme eklenmesine bağlı olarak esnekliklerinin azaldığı görülmüştür. Ancak buna rağmen, malzemelerin uygulamalarda rahat kullanımı sağlayabilecek esneklik değerlerini muhafaza ettiği tespit edilmiştir.

Malzemelerin üretimi tamamlandıktan sonra, Yeditepe Üniversitesi Hastanesi Radyoloji Bölümü'ndeki X ışını tüpü kullanılarak TS EN 61331-1 Standardına uygun olarak dar ve geniş demet geometrileri kurulmuştur. Yine bu standartta belirtildiği gibi malzemelerin dar ve geniş geometrilerinde X-ışını zayıflatma oranları

hesaplanmıştır. Daha sonra, dar demet geometrisinde malzemelerin 3 farklı kalınlığı için X-ışını zayıflatma doz ölçümleri alınmış, kalınlıktaki değişimin X-ışınlarını zayıflatma etkisine bakılmıştır. Bağıl sayıma karşılık çizilen kalınlık grafiklerinden hareketle malzemelerin lineer zayıflatma katsayıları (μ) bulunmuştur. Sonrasında, standartta verilen kurşun eşdeğerlerine karşılık zayıflatma oranları tablosu kullanılarak malzemelerin kurşun eşdeğerleri hesaplanmıştır.

Sonuç olarak bu yüksek lisans tezinde antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin 50-125 kV enerji aralığındaki X-ışınları için TS EN 61331-1 standardına uygun olarak kurşun eşdeğer kalınlıkları tespit edilmiş ve uygulamaya yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

.

DETERMINATION OF DIAGNOSTIC X-RAY ATTENUATION PROPERTIES OF ANTIMONY (ORE AND CONCENTRATE) AND IRON CONCENTRATE IMBEDDED SILICON RUBBER MATERIALS

SUMMARY

In this Master thesis, antimony ore, antimony concentrate and iron concentrate imbedded silicone rubber materials were produced for radiation shielding applications instead of lead. X-ray attenuation ratios, linear attenuation coefficients and lead equivalent thicknesses of produced materials were found according to TS EN 61331-1 standard.

Protection of unwanted radiation is one of the most important parameters for nuclear technology including nuclear medicine applications. Due to protect the radiation workers and the public from radiation, Radiation Safety Regulation is published by Turkish Atomic Energy Agency. According to the regulation, the dose limits for the public and the radiation workers are determined. In addition, in this regulation, it is pointed out that the institutions which performs radiation applications have to take precautions. Time, distance and shielding materials are the three main parameters for radiation protection according to ALARA (as low as reasonably achievable) principle. Those of which time and distance parameters are not always suitable for every radiation application circumstances. Shielding materials are commonly used in nuclear applications because of the other two parameters cannot be available for all cases. Lead is the most commonly used element for radiation protection due to its high atomic number ($Z=82$) and high density. Usually flexible aprons, gloves, caps are used as shielding materials for X-ray protection. However, in practice, some lead apron or garment protective materials are relatively heavy and toxic and in the process of restriction. For example, European Union (EU) released some directives in 2003 (RoHs-1) and 2011 (RoHs-2) which restrict the uses of lead in some devices. However, restriction of lead in nuclear devices exempted in the directives, because there is no economic alternative material which could be used instead of lead. Therefore, some studies take place in the literature, which are resulted in possible alternative materials to lead. Tungsten, antimony, iron (and steel), bismuth, barium materials are candidate materials for radiation protection instead of lead.

For this reason, radiation protection properties of the radiation shielding materials are determined and these properties are compared to lead. The capacity of radiation protection of alternative substance or lead imbedded materials is designated with the pure lead thickness, which has equivalent radiation attenuation ratio. For this purpose, TS EN 61331-1 standard is used to determine lead equivalent thicknesses for X and Gamma rays for different energies. For example, a material, which has 0.5 mm PbE, has to provide the radiation attenuation ratio of 0.5 mm pure lead for X and gamma rays according to TS EN 61331-1 standard. In literature, there are some studies, which have found that some of the lead containing shielding materials and

most of the lead-free shielding materials does not provide the standard lead equivalent attenuation ratio. Some of the reasons for not providing the standard lead equivalent are not doing the radiation attenuation tests according to the standard (not doing the experimental setup according to the standard) and even if the tests are done according to the standard, not all the energies are tested. Therefore, producing materials that are not suitable with the standard and using these materials in radiation applications causes public and radiation personnel to take unnecessary radiation dose. For this reason, radiation shielding manufacturers have to produce these materials according to the standard and get certificate for them. Similarly, when radiation workers purchase these radiation shielding materials, they should ask for certificated radiation shielding materials. In this study, radiation protection capacities of the produced materials are determined and material parameters are exhibited for TS EN 61331-1 standard suitability.

In this Master thesis, firstly, locally produced antimony ore, antimony concentrate and iron concentrate are successfully imbedded to silicon rubber and 25 materials in total were produced. 3-5 wt. % catalyzers when it is mixed with silicon rubber it gives enough time to produce the material before it is completely solid. Antimony ore, antimony concentrate and iron concentrate are separately imbedded to the silicon rubber. To produce the materials, antimony ore, antimony concentrate and iron concentrate (separately), silicon rubber and 3-5 wt. % catalyzers are mixed together and kept in the moulds until they become solid materials. It is determined that 70 wt. % of each substance can be successfully imbedded into the silicon rubber. By using the silicon rubber, 3 kinds and 25 materials in total were produced. To examine characteristic properties of the produced materials homogeneity and elasticity tests were performed.

The homogeneity tests of produced materials were done in Medical Physics Laboratory, Physics Department, Yeditepe University. For the homogeneity tests, X-ray tube was used in Medical Physics Laboratory. Produced materials were placed between the X-ray tube and fluorescent screen and radiographs of the materials were taken. The distribution of antimony ore, antimony concentrate and iron concentrate in silicon rubber was investigated. It is determined that produced materials have homogen structure.

Elasticity tests of the produced materials were conducted in Mechanical Metallurgy Laboratory, Metallurgical and Materials Engineering Department in ITU. Effect in elasticity of imbedded antimony ore, antimony concentrate and iron concentrate in silicon rubber was investigated. The results of the elasticity tests show that the more substance is imbedded into the produced material, the less elastic the material gets. Nevertheless, it is seen that even 70 wt. % substance imbedded materials are elastic enough to be used as radiation shielding garments in nuclear applications.

After producing the materials, narrow and broad beam geometry experimental setups were established according to TS EN 61331-1 standard. X-ray attenuation ratios of the produced materials were found. In narrow beam geometry, for three different material thicknesses, dose measurement was obtained and effect of different material thicknesses on X-ray attenuation ratios were investigated. Using the relative count-thickness graphs linear attenuation coefficients of the materials were obtained for different tube voltages. Afterwards, lead equivalent thicknesses of the produced materials were calculated by using the lead equivalent thicknesses-attenuation ratio table on the TS EN 61331-1 standard.

Consequently, in this Master thesis, lead equivalent thicknesses of antimony ore, antimony concentrate and iron concentrate imbedded silicon rubber materials were retained for 50-125 kVp energy range according to TS EN 61331-1 standard and the study is intended for application.

1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

İnsanlar, yaşamları boyunca doğal ve yapay radyasyona maruz kalmaktadırlar. Doğal radyasyona ek olarak, nükleer bilimlerin gelişmesiyle yapay radyasyon da gündelik hayata dahil olmuştur. Nükleer teknoloji, yirminci yüzyıl boyunca hızla gelişerek kendine yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Günümüzde endüstride ve tıpta radyasyon uygulamaları yaygın olarak kullanılmaktadır.

Özellikle tıp alanında tanı ve teşhis amacıyla radyasyon uygulamaları sıklıkla kullanılmaktadır. Bununla birlikte kontrolsüz ve denetimsiz radyasyonun insan sağlığı için olumsuz etkileri söz konusu olabilmektedir. Radyasyonun artan kullanım alanları istenmeyen ve gereksiz radyasyondan korunma ihtiyacı doğurmuştur. Radyasyondan korunma, sağlık fiziki uygulamaları da dahil olmak üzere nükleer teknoloji için en önemli husustur. Radyasyondan korunmanın temel ilkesi olan ALARA (as low as reasonably achievable) prensibinin üç ana parametresi zaman, mesafe ve zırh malzemeleridir. Bunlardan zaman ve mesafe parametreleri çoğu zaman uygulamalarda istenilen seviyede sağlanamamaktadır. Bu iki parametrenin sağlanamadığı durumlarda üçüncü parametre olan zırhlama malzemeleri sıklıkla kullanılmaktadır.

Atom numarası ($Z=82$) ve yoğunluğunun yüksek olmasından dolayı zırhlama malzemesi olarak en çok kurşun tercih edilmektedir. Kurşundan yapılan koruyucu malzemeler (kurşun önlükler, eldivenler, gözlükler vb.) endüstri ve tıpta radyasyon uygulamalarında çalışan personellerin radyasyondan korunmasında kullanılmaktadır. Ancak kurşunun toksik olması uygulamalarda bazı kısıtlamaları gündeme getirmektedir. Avrupa Birliği (EU), 2003 yılında bazı cihazlarda kurşun kullanımının kısıtlanmasına yönelik RoHS-1 ve 2011 yılında da devamı olan RoHS-2 yönetmeliklerini yayınlamıştır. Ancak nükleer ekipman ve cihazlar bu kısıtlamalarda kapsam dışında kalmaktadır. Bunun nedeni, bazı raporlarda da belirtildiği gibi, nükleer teknolojide kullanılabilecek kurşuna alternatif ve ekonomik bir malzemenin

olmamasıdır. Bu nedenle, kurşuna alternatif olabilecek malzemelerin arayışı ile ilgili çalışmalar sürmektedir. Tungsten, antimon, demir, bizmut, baryum gibi elementler radyasyondan korunmada kurşuna alternatif zırhlama malzemesi olmaya adaydırlar.

Kurşuna alternatif olabilecek malzemelerle çalışmalar yapılırken, kurşun eşdeğerlerinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Kurşun eşdeğeri, radyasyondan korunmada kullanılabilecek alternatif malzemelerin, belirli bir enerjide ve kurşun kalınlığındaki zayıflatma oranını sağlayan eşdeğer alternatif malzeme kalınlığının belirlenmesi anlamına gelmektedir. Ancak kurşun eşdeğer kalınlıkları hesaplanırken dikkatli olunması gerekmektedir. Bir malzemenin tek bir enerji için kurşun eşdeğerinin hesaplanması, bu malzemenin tüm enerjiler için aynı kurşun eşdeğerinde olduğu anlamına gelmemektedir. Bu durum kurşun eşdeğer kalınlıkları hesaplanmasının belli bir standarda uygun olarak yapılması ihtiyacını doğurmuştur. Bu kapsamda 2002, 2004 ve 2014'te Avrupa Birliği standardı ile uyumlu TS EN 61331-1 Türk Standardı yayınlanmıştır. Bu standartta kurşuna alternatif malzemelerin belli enerjilere göre kurşun eşdeğeri zayıflatma oranları verilmiştir. Bu kurşun eşdeğer zayıflatma oranları kullanılarak farklı enerjiler için alternatif malzemelerin kurşun eşdeğerleri hesaplanabilmektedir.

Bu yüksek lisans tezinde X-ışınlarından korunmada kurşuna alternatif olabilecek antimon cehveri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemeler üretilmiştir. Üretilen malzemelerin karakteristik özelliklerinin incelenmesi için homojenlik ve esneklik testleri yapılmıştır. TS EN 61331-1 Standardına uygun olarak kurulan dar ve geniş demet geometrilerinde X-ışını zayıflatma oranları bulunmuştur. Sonrasında farklı kalınlıklar için bağım sayım değerlerinden hareketle lineer zayıflatma katsayıları hesaplanmıştır. Standartta verilen kurşun eşdeğerlerine karşılık zayıflatma oranları tablosu kullanılarak malzemelerin kurşun eşdeğerleri hesaplanmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Literatürde kurşuna alternatif olabilecek radyasyondan koruyucu malzemelerin üretilmesi ve özelliklerinin incelenmesine yönelik son dönemde çok sayıda makale yayımlanmıştır. Çalışmalar genellikle tungsten, antimon, baryum, bizmut, çinko, demir (çelik) içeren malzemeler üzerinde yoğunlaşmaktadır.

McCaffrey vd., (2007) yapılan çalışmada atom numarası 37 ile 88 arasında değişen, kadmiyum, kalay, antimon, baryum, tungsten, bizmut gibi elementlerin doğal silikon içine katkılanmasıyla üretilen alternatif malzemelerin 10 ile 100 keV enerji aralıklarında lineer zayıflatma katsayıları belirlenmiştir. Silikon içine katkılanan elementin atom numarası arttıkça radyasyon zayıflatma özelliğinin arttığı görülmüştür. 100 ile 120 kV arasındaki tüp gerilimlerinde tungsten katkılı silikon malzemelerin kurşun içeren malzemeler kadar efektif olduğu görülmüştür.

Noor Azman vd., (2013) yapılan çalışmada mikro ve nano parçacık boyutunda üretilen Tungsten trioksit-epoksi malzemelerin 10-40 keV enerji aralığında X-ışını zayıflatma özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, malzemenin parçacık boyutunun radyasyonun enerjisine bağlı olduğunu göstermiştir. 10-20 keV enerji aralığında nano parçacık boyutunda üretilen malzemelerin X-ışını geçirgenliği daha az olurken, 20-40 keV gibi daha yüksek enerjilerde nano ve mikro parçacık boyutunda üretilen malzemelerde X-ışını geçirgenliği benzerdir. Aynı zamanda aynı parçacık boyutundaki malzemeler kullanılarak kalınlık artırıldığında 25-35 kV tüp gerilimlerinde parçacık boyutu etkisi gözlenirken 35-100 kV tüp gerilimlerinde ihmal edilebilir olarak bulunmuştur.

Yücel vd., (2016) yaptıkları çalışmada antimon, kalay, tungsten ve baryum içeren elastomer malzemelerin dar demet ve geniş demet radyasyonunda ve belirli enerjilerde radyasyon zayıflatma oranlarını incelemişlerdir. Malzeme üreticilerinin belirtmiş olduğu kurşun eşdeğeri ile deneysel elde edilen kurşun eşdeğeri kalınlıklarını karşılaştırmışlardır. Yapılan incelemede bazı üreticilerin belirttiği kurşun eşdeğeri bilgisinin deneyler ile elde edilen sonuçtan daha yüksek olduğu ve bu nedenle aslında belirtilen radyasyondan korunmanın tam sağlanamadığı ifade edilmiştir.

Hong vd., (2018) yaptıkları çalışmada kendi ürettikleri mikro ve nano parçacık boyutunda tungsten malzemelerinin radyasyon zayıflatma özellikleri ve malzemenin parçacık boyutunun X-ışını zayıflatma oranlarına etkisi incelenmiştir. Yapılan incelemede malzemelerin X-ışını geçirgenlikleri bulunmuş ve nano parçacık boyutundaki tungsten malzemelerin düşük tüp voltajlarında mikro parçacık boyutundaki malzemelerden daha efektif olduğu sonucuna varılmıştır.

Büyük, (2018) yapılan çalışmada demir madeni katkılı silikon kauçuk malzemeler

Üretilmiş, Co-60 gama kaynağı kullanılarak test edilmiştir ve zırhlama performansı incelenmiştir. Bulunan sonuçlara göre silikon içine %60 oranında katkılanmış demir madeninin 0,5 mm PbE kurşun eşdeğer kalınlığı 2,06 mm olarak bulunmuştur.

Büyük, (2014) yapılan çalışmada paslanmaz elik ve bor çeliği malzemelerin Cs-137 ve Co-60 kaynakları için gama zayıflatma özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, kurşunla ve diğer alternatif malzemelerle karşılaştırılmıştır. Radyasyon zırhlamasında kurşun yerine kullanılabilecek elik malzemeler RoHs yönetmeliğine göre değerlendirilmiştir. Bulunan sonuçlara göre, Cs-137 gama kaynağı için paslanmaz çeliğin lineer zayıflatma katsayısı bor çeliğinden daha yüksek olmakla birlikte aynı genellemenin Co-60 gama kaynağı için yapılmasının mümkün olmadığı grlmştir. Aynı zamanda paslanmaz ve bor çeliğinin beton ve alüminyum alaşımlarından daha yüksek gama zayıflatma kapasitesi olduğu belirlenmiştir.

Shik vd. (2018), yaptıkları çalışmada kurşun, bizmut ve tungsten içeren PVC kompozit malzemeler üretilip bu malzemelerin teşhis amaçlı kullanılan X-ışını tp gerilimlerinde (40-100 kVp) zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Nano ve mikro paracak boyutundaki bizmut ve tungsten içeren PVC kompozit malzemelerin kütle zayıflatma katsayıları bulunmuştur. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlara göre en iyi kütle zayıflatma katsayısına bizmut ve kurşun içeren malzemelerin sahip olduğu ve nano boyutunda paracak içeren kompozitlerin mikro boyutundakilere göre zayıflatma özelliklerinin daha iyi olduğu ortaya çıkmıştır.

Kim vd. (2012), yaptıkları çalışmada baryum sülfat, turmalin ve tungstenin silikon kauçuğa katkılanmasıyla oluşturulmuş malzemelerin radyasyon zırhlama özellikleri incelenmiştir. 1,6 mm tungsten, baryum sülfat ve silikon karışımından üretilen malzemenin zırhlama özelliğinin 0,3 mm kurşuna eşdeğer olduğu grlmştir.

Ni vd. (2016), yaptıkları çalışmada radyoaktif gaz ve su taşıyan boruların zırhlanmasında kullanılmak üzere poliüretan (köpük) tabanlı kurşun içeren uzaktan pskrtebilen ve çabuk donabilen spray zırhlama malzemesi geliştirmişlerdir. Bu malzemenin karakteristik özellikleri ve gama radyasyonu zırhlama özellikleri incelenmiştir. %60 kurşun içeren kompozit malzeme düşük ve orta enerji seviyelerinde mkemmek zırhlama sağladığı tespit edilmiştir.

Gong vd. (2018), yapılan çalışmada bor karbür, kurşun oksit ve benzofenon katkılanmış silikon kauçuk malzemelerin nötron ve gama zırhlama özellikleri

incelenmiştir. Cs-137 ve Co-60 gama kaynaklarıyla yapılan çalışmada artan kalınlıkla birlikte malzemelerin gama geçirgenliğinde azalış ve zırhlama özelliklerinde artış görülmüştür. Bu nötron ve gama zırhlama malzemelerinin, esneklik, termal kararlılık, radyasyon zırhlaması ve geniş kullanım alanları olduğu sonucuna varılmıştır.

Güngör vd (2018), yapılan çalışmada EPDM (sentetik elastik madde) kauçuk içine katkılanmış bizmut trioksit malzemelerin mekanik ve termal özellikleri incelenmiş ve gama ile X-ışını zayıflatma oranları bulunmuştur. Bizmut trioksitin EPDM kauçuk içindeki katkı oranlarının radyasyon zayıflatmasındaki etkisi incelenmiştir. Zayıflatma oranlarının, farklı EPDM kompozit malzemeler ve farklı kalınlıklar için %68,6 ile %94 oranında değiştiği görülmüştür.

Poltabtim vd. (2019), bu çalışmada demir dioksit, demir trioksit, tungsten trioksit ve bizmut trioksit katkılanmış EPDM kauçuk malzemelerin donma karakteristikleri fiziksel ve mekanik özellikleri ve gama ışını zırhlama özellikleri incelenmiştir. Malzemelerin lineer zayıflatma katsayıları incelendiğinde en yüksek değere bizmut trioksidin sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca metal oksit içeriği arttıkça malzemelerin HVL (half value layer) değerlerinde azalma gözlenmiştir.

Singh vd. (2017), yaptıkları çalışmada bizmut trioksit ve baryum sülfat katkılanmış PVC (polivinil klorür) malzemelerin X-ışını zayıflatma özellikleri incelenmiştir. Geliştirilen kurşunsuz önlüklerin sağlık merkezlerinde sağlık personellerini ve hastaların radyasyon dozu almasına gerek olmayan vücut kısımlarının korunmasında kullanılabileceği belirlenmiştir.

Chang vd. (2015), yaptıkları çalışmada tungsten-epoksi kompozit malzemelerin gama radyasyonu zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Kompozit malzemenin zırhlama kapasitesini artırmak için tungsten katkı maddesinin olabildiğince fazla eklenmesi sonucuna varılmıştır. Ancak %85 tungsten katkılı malzemelerde malzemeye şekil vermenin zorlaştığı görülmüştür.

1.3 Hipotez

Antimon cehveri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemeler, X-ışınlarının zırhlamasında kurşuna alternatif olabilecek malzemelerdir.

2. RADYASYON VE RADYASYONDAN KORUNMA

Radyasyon, dalga veya parçacık tabiatına uygun olarak bir ortama enerji aktarılmasıdır (Knoll, 2002). İnsanlar, doğada var olan radyasyonların (kozmetik ve karasal) yanı sıra gelişen teknolojiye paralel olarak artan yapay radyasyon kaynakları nedeniyle de radyasyona maruz kalmaktadırlar.

2.1 Radyasyon Türleri

Temelde radyasyon ortamda taşınma şekline göre partiküler radyasyon ve elektromanyetik radyasyon olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Çizelge 2.1) Elektromanyetik radyasyon, durgun kütlesi sıfır olan, ışık hızıyla hareket eden fotonlar olarak tanımlanmaktadır (Tsoulfanidis, 1995).

Çizelge 2.1 : Radyasyon Türleri (Tsoulfanidis, 1995).

Radyasyon	
<u>Partiküler Radyasyon</u>	<u>Elektromanyetik Radyasyon</u>
Alfa	Gama Işınları
Beta	X-ışınları
Nötron	Morötesi (UV)
Proton	Kızılötesi
Hızlandırılmış elektron	Mikrodalgalar
Ağır çekirdekler	Radar Dalgaları

Radyasyon, madde ile etkileşme şekline bağlı olarak, iyonlaştırıcı radyasyon ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak sınıflandırılır. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar madde ile etkileşime girdiğinde yüklü parçacık (iyon) oluşumu gözlenmez. Dalgaboyu 10 nm'den büyük olan dalgalar (radyo dalgaları, mikrodalgalar, görünür ışık ve mor ötesi ışınlar) iyonlaştırıcı olmayan radyasyonlardır. Etkileşime girdiği maddede iyonlar oluşturan radyasyon tipine iyonlaştırıcı radyasyon denir. Alfa parçacıkları, beta parçacıkları, X-ışınları, gama ışınları ve nötronlar iyonlaştırıcı radyasyon grubunda yer alırlar (Tsoulfanidis, 1995). Alfa, beta, elektron ve pozitron gibi yüklü parçacıklar doğrudan iyonlaştırıcı

radyasyonlardır. X-ışınları, gama ışınları ve nötronlar yüksüz oldukları için dolaylı olarak iyonizasyona yol açan radyasyonlardır. İyonlaşma olayı, canlı dokularda ve DNA’da bulunan genler dahil herhangi bir maddede meydana gelebilmektedir. Bu durumda iyonlaştırıcı radyasyon canlılar için tehlike arz etmektedir (Taşkın, 2006). Bu bölümde iyonlaştırıcı radyasyonlara kısaca değinilecektir.

2.1.1 Alfa bozunumu

Alfa bozunumu, kararsız atomun iki proton ve iki nötrondan oluşan bir helyum çekirdeği (${}^4_2He$) yani alfa parçacığı yayınlamasıyla gerçekleşir (Knoll, 2002). Alfa parçacıkları genelde uranyum, radyum ve polonyum gibi ağır radyoaktif maddelerin bozunumu ile ortaya çıkmaktadır. Alfa parçacıklarının oluşum denklemi;

$${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X + {}^4_2He \quad (2.1)$$

şeklinde verilmektedir.

Alfalar ağır parçacıklardır ve çok kısa bir menzile sahiptirler (Turner, 2007). Bu nedenle cildin üst tabakasını (ölü deri) geçemezler ve dış radyasyon tehlikesi oluşturmazlar. Ancak solunmaları, yutulmaları veya açık bir yaradan vücuda girmeleri halinde iç ışınlama tehlikesi oluşturmaktadırlar. Ayrıca, iç ışınlama durumunda alfa bozunumu sonrasında Radyum gibi radyoaktif elementlerin bozunması sonucu gama yayını da olabilmektedir.

2.1.2 Beta Bozunumu

Beta bozunumunda, kararsız atom bir elektron veya bir pozitron yayınlayarak yeni bir elemente dönüşmektedir. Elektron veya pozitrona ek olarak durgun kütlesi sıfır olan antinötrino yayınlanmaktadır (Knoll, 2002). β^- ve β^+ olmak üzere iki çeşit beta parçacığı bulunmaktadır. β^- bozunumu denklemi;

$${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}X + \beta^- + \bar{\nu} \quad (2.2)$$

şeklinde verilmektedir. Burada; β^- , negatif beta parçacığı (elektron) ve $\bar{\nu}$, antinötrindir.

β^+ bozunumu denklemi;

$${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}X + \beta^+ + \nu \quad (2.3)$$

şeklinde verilmektedir. Burada; β^+ , pozitron ve ν , nötrindir.

Beta parçacıkları deriyi geçmek için yeterli enerjiye sahip olduklarından iç ışınlama tehlikesi yanında dış ışınlama tehlikesi de oluşturmaktadırlar. ^{60}Co gibi beta yayan radyoaktif elementlerin çoğu gama ışınları da yayarlar. Yüksek enerjili beta yayıcılar (MeV mertebesinde enerjiye sahip olanlar) zırh malzemelerinden Bremsstrahlung yayılmasına neden olmaktadır (Turner, 2007).

2.1.3 Nötronlar

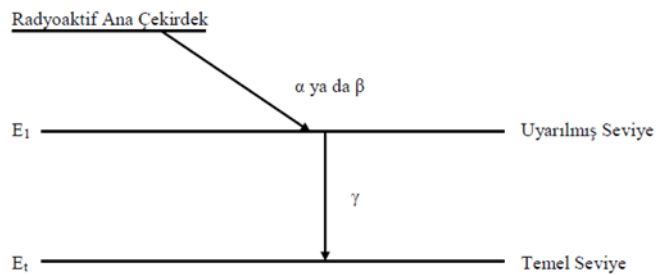
Nötronlar; kendiliğinden fisyon, (α, n) reaksiyonları, fotonötron kaynakları, hızlı yüklü parçacıkların oluşturduğu reaksiyonlar gibi yollarla oluşan nötr parçacıklardır (Knoll, 2002).

Nötronlar, yüksüz parçacıklar olduklarından malzeme içinde hiçbir etkileşme yapmadan santimetrelerce yol alabilmektedirler. Nötronlar bir malzeme ile etkileşime geçtiğinde bu etkileşim çekirdekle olmaktadır. Bu etkileşimin sonunda nötron tamamen soğurularak bir veya birden çok ikincil radyasyona dönüşebilmekte veya nötronun yönü veya enerjisi önemli ölçüde değişebilmektedir (Knoll, 2002).

2.1.4 Gama Işınları

Kararsız atomlar kararlı atoma geçmeleri sırasında ilk olarak parçacık (α ve β parçacığı) yayınımları yaparlar. Bu parçacık yayınımlarından sonra çekirdek halen fazla enerjiye sahipse gama ışını vererek uyarılmış durumdan daha düşük enerji düzeyine geçer (Şekil 2.1). Gama ışınlarının spektrumu kesiklidir ve spektrum gama ışıması yapan her radyoaktif element için karakteristiktir.

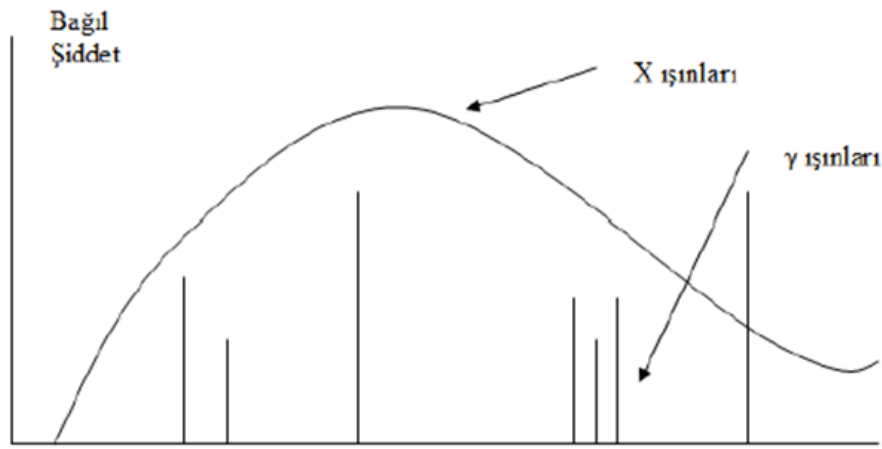
Gama ışınları alfa ve beta parçacıkları ile kıyaslandığında maddeye nüfus etme kabiliyetleri yüksekken iyonlaşmaya sebep olma yetileri çok daha azdır. Birkaç santimlik kurşunla bile sadece belli bir kısmı durdurulabilir. Gama ışınları yüksüzdür, elektrik ve manyetik alanda sapma göstermezler (Özyurt, 2015).



Şekil 2.1 : Radyoaktif bozunma süreci (Özyurt, 2015).

2.1.5 X-ışınları

X-ışınları da gama ışınları gibi elektromanyetik radyasyon ailesindendir. X-ışınları gama ışınları ile kısa dalga boyu ve giriciliklerinin fazla olması gibi benzer özelliklere sahiptirler. X-ışınları ve gama ışınlarının oluşum süreçleri birbirinden farklıdır. X-ışınları atomların elektron uzayında yayınlanırken gama ışınları çekirdekten yayınlanırlar. X-ışınları sonsuz sayıda dalga boyuna sahip olabildikleri için sürekli enerji spektrumuna sahipken gama ışınları belli dalga boylarına sahip olup enerji grafikleri çizgiseldir. Şekil 2.2’te X-ışınları ve gama ışınlarının enerji spektrumları gösterilmiştir (Özyurt, 2015).



Şekil 2.2 : Gama ve X-ışınlarının enerji spektrumları (Baltacıoğlu, 1995).

X-ışınlarının oluşumu ve diğer özellikleri Bölüm 3’de detaylı olarak verilmektedir.

2.2 Fotonun Madde ile Etkileşmesi

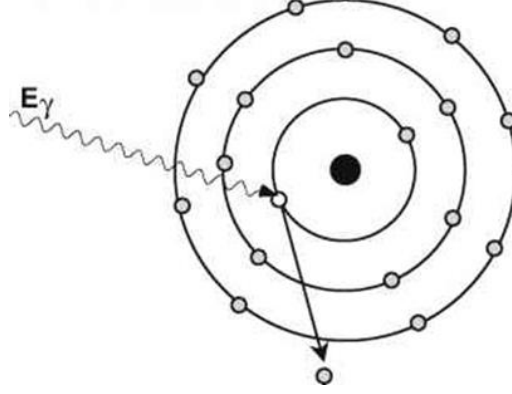
Fotonların madde ile etkileşmesi temelde 3 şekilde gerçekleşir. Bunlar:

1. Fotoelektrik Etki
2. Compton saçılması
3. Çift Oluşumu’dur.

Fotonlar, bu etkileşmelerin yanı sıra, Rayleigh saçılması, Bragg saçılması, fotobozunum ve nükleer rezonans saçılması da yaparlar. Ancak, bu etkileşmelerde foton azalma ve enerji depolanması önemsenmeyecek kadar küçüktür ve genelde ihmal edilebilir (Martin, 2013).

2.2.1 Fotoelektrik Etki

Fotoelektrik etki, gelen bir fotonla atoma bağlı bir elektron arasında bir etkileşmedir. Bu etkileşme sonucunda foton, enerjisini atomun elektronuna aktararak yok olur ve bu elektronu serbest bırakır (Şekil 2.3). Bu elektron, fotoelektron olarak adlandırılır.



Şekil 2.3 : Fotoelektrik Etki (Url-1).

Elektronun kinetik enerjisi T;

$$T = E_{\gamma} - B_e \quad (2.4)$$

Burada; E_{γ} , gelen fotonun enerjisi ve B_e , elektronun bağlanma enerjisidir.

Bu etkileşmenin ortaya çıkma olasılığı fotoelektrik tesir kesiti veya fotoelektrik etkileşme katsayısı olarak adlandırılır ve bu katsayı gelen fotonun enerjisi, fotonun etkileştiği atomun atom numarası ve atom ağırlığı gibi parametrelere bağlıdır. Fotonun fotoelektrik etkileşme yapma olasılığı Denklem 2.5’de verilmektedir (Tsoulfanidis, 2007).

$$\tau(m^{-1}) = aN \frac{Z^n}{E_{\gamma}^m} [1 - O(Z)] \quad (2.5)$$

Burada;

τ : Birim uzaklıkta bir fotonun fotoelektrik etki yapma olasılığı (fotoelektrik etki tesir kesiti),

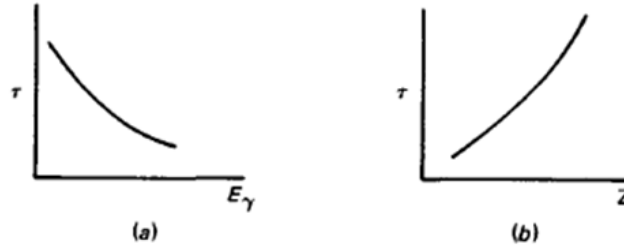
Z : Fotonun etkileştiği elementin atom numarası,

N : Atom yoğunluğu,

a : Z ve E_{γ} ’den bağımsız bir sabit,

m, n : E_{γ} ’a bağlı sabitlerdir.

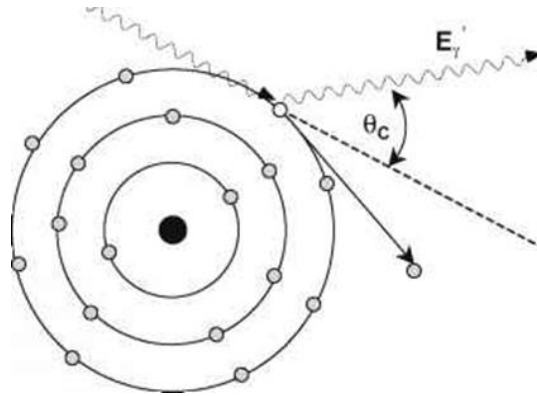
Fotoelektrik etki, yüksek atom numaralı malzemelerde ve düşük enerjilerde öne çıkar. Örneğin; atom numarası $Z=82$ olan Kurşun'da, atom numarası $Z=13$ olan Alüminyum'a göre fotoelektrik olay gerçekleşme ihtimali daha yüksektir. Bununla birlikte, aynı malzeme için, enerjisi 10 keV olan bir fotonun 500 keV olan bir fotona göre fotoelektrik etkileşme yapma olasılığı daha yüksektir. Foton enerjisi ve malzemenin atom numarasının Fotoelektrik etki tesir kesiti ile ilişkisi Şekil 2.4 de verilmektedir.



Şekil 2.4 : Foton enerjisi (a) ve malzemenin atom numarasının (Z) Fotoelektrik etki tesir kesiti ile ilişkisi (Knoll, 2002).

2.2.2 Compton Saçılması

Compton saçılmasında gelen foton, enerjisinin bir kısmını atomun bir elektronuna aktarır ve yönünü değiştirerek yoluna devam eder (Şekil 2.5). Fotoelektrik etkideki gibi foton yok olmaz. Fotonun enerjisi atomun elektronuna aktardığı enerji miktarı kadar azalır.



Şekil 2.5 : Compton Saçılması (Url-1).

Compton saçılmasının gerçekleşme ihtimali Compton saçılma katsayısı veya Compton tesir kesiti olarak adlandırılır ve Denklem 2.6'dan bulunabilir (Tsoulfanidis, 2007).

$$\sigma(m^{-1}) = NZf(E_\gamma) \quad (2.6)$$

Burada,

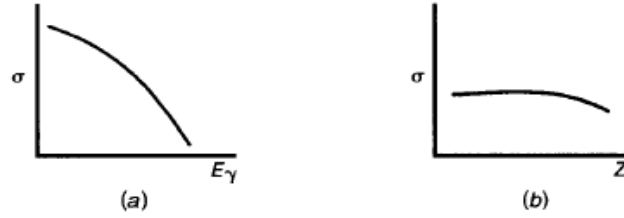
σ : Birim uzaklıkta Compton saçılması olma ihtimali (Compton saçılması tesir kesiti),

N : Atom yoğunluğu,

Z : Fotonun etkileştiği elementin atom numarası,

$f(E_\gamma)$: E enerjili fotonların yayınlanma olasılığıdır.

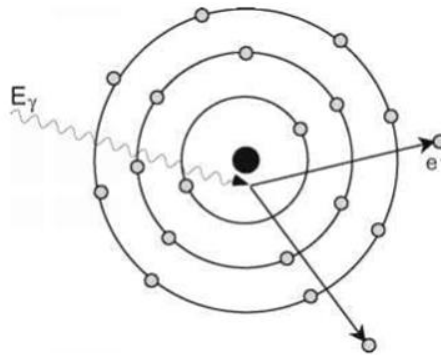
Compton saçılmasının gerçekleşme ihtimali etkileşilen materyalin atom numarasından neredeyse tamamen bağımsızdır. Foton enerjisi arttıkça da bu ihtimal azalır. Şekil 2.6 da foton enerjisi ve malzemenin atom numarasının Compton Saçılması tesir kesiti ile ilişkisi görülmektedir.



Şekil 2.6 : Foton enerjisi (a) ve malzemenin atom numarasının (Z) Compton Saçılması tesir kesiti ile ilişkisi (Knoll, 2002).

2.2.3 Çift Oluşumu

Çift oluşumu, bir foton ile bir atomun çekirdeği arasında gerçekleşir. Bu etkileşme sonrasında foton yok olur ve bir elektron-pozitron çifti oluşur (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 : Çift Oluşumu (Url-1).

Çift oluşumunun gerçekleşme olasılığı, Çift oluşumu katsayısı (κ) veya tesir kesiti olarak adlandırılır.

$$\kappa(m^{-1}) = NZ^2 f(E_\gamma, Z) \quad (2.7)$$

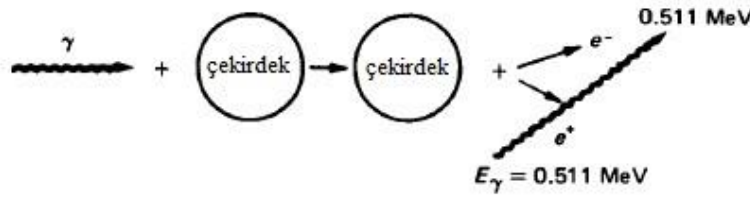
Burada,

κ : Birim uzaklıkta Çift Oluşumu olma ihtimali (Çift Oluşumu tesir kesiti),

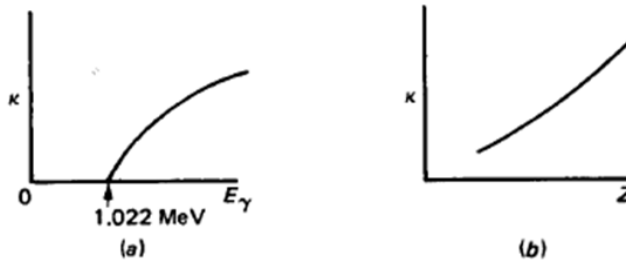
Z : Fotonun etkileştiği elementin atom numarası,

N : Etkileşilen malzemenin atom yoğunluğudur.

Bu etkileşmeyi yalnızca 1,022 MeV üzerinde enerjiye sahip fotonlar gerçekleştirebilir (Şekil 2.8). Fotonun enerjisi ve etkileşilen malzemenin atom numarası arttıkça çift oluşumu gerçekleşme ihtimali artar (Şekil 2.9).



Şekil 2.8 : Çift Oluşumu (Knoll, 2002).



Şekil 2.9 : Foton enerjisi (a) ve malzemenin atom numarasının (Z) çift oluşumu tesir kesiti ile ilişkisi (Knoll, 2002).

2.2.4 Toplam Foton Zayıflatma Katsayısı

Foton bir malzemenin içinden geçerken yukarıdaki etkileşimlerden üçünü de yapabilir. Etkileşimlerin toplam olasılığı, toplam lineer zayıflatma katsayısı olarak adlandırılır ve üç etkileşim olasılığının toplamına eşittir.

$$\mu(cm^{-1}) = \tau + \sigma + \kappa \quad (2.8)$$

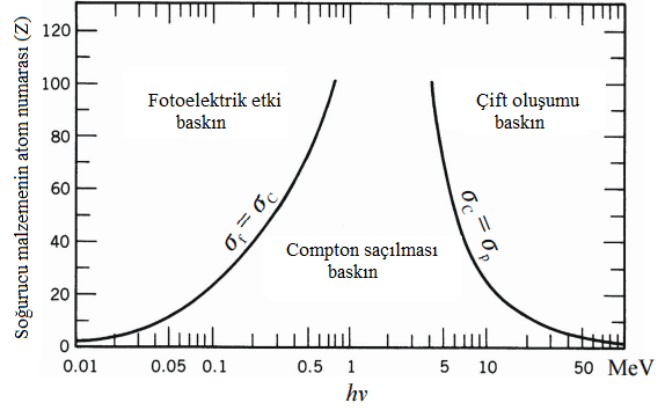
Burada; μ : toplam foton zayıflatma katsayısı,

τ : Fotoelektrik Etki tesir kesiti,

σ : Compton saçılması tesir kesiti,

κ : Çift Oluşumu tesir kesitidir.

Üç önemli foton etkileşmesinin, malzemenin atom numarası ve gelen fotonun enerjisine göre baskın oldukları bölgeler Şekil 2.10'da görülmektedir.

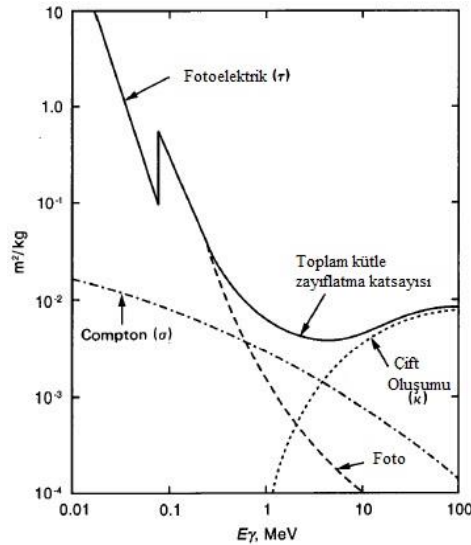


Şekil 2.10 : Üç önemli foton etkileşmesinin malzemenin atom numarası (Z) ve gelen fotonun enerjisine (E_γ) göre baskın oldukları bölgeler (Knoll, 2002).

Foton zayıflatma katsayısı, m^2/kg (veya cm^2/g) birimleriyle verilirse kütle zayıflatma katsayısı (μ_m) olarak adlandırılır. Lineer ve kütle zayıflatma katsayısı arasındaki ilişki Denklem 2.9'da verilmektedir.

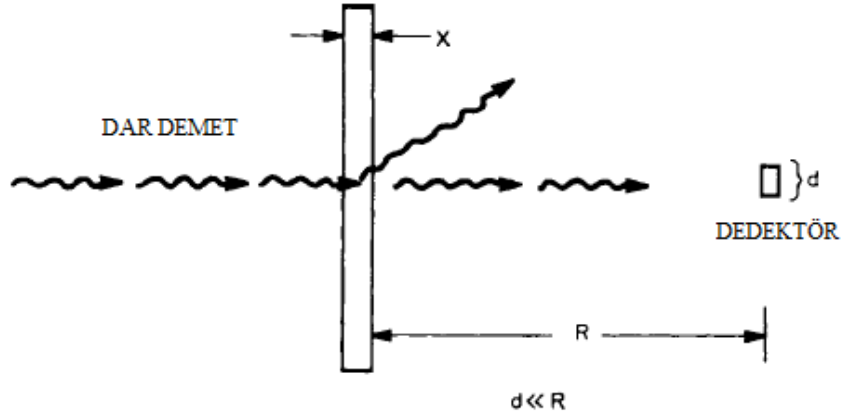
$$\mu_m(m^2/kg) = \frac{\mu(m^{-1})}{\rho(kg/m^3)} \quad (2.9)$$

Şekil 2.11 kurşun için farklı etkileşmelerin kütle zayıflatma katsayılarını ve toplam kütle zayıflatma katsayısını foton enerjisinin fonksiyonu olarak göstermektedir. Toplam kütle zayıflatma katsayısı; enerji arttıkça, fotoelektrik tesir kesiti azaldıkça ve çift oluşumu tesir kesiti arttıkça minimum değere yaklaşır. Kurşun için, kütle zayıflatma katsayısı 3.5 MeV'de minimumdur.



Şekil 2.11 : Kurşun için kütle zayıflatma katsayısı grafiği (Knoll, 2002).

Dar demet geometrisi veya iyi geometri, yalnızca malzemedan geçen birincil radyasyonun dedektör tarafından algılanması, saçılan ikincil radyasyonun dedektöre ulaşmasının önlenmesi için tasarlanmış bir deneysel düzendir. Bu geometri, kolime edilerek paralel demet haline getirilmiş bir monoenerjik radyasyon demetinin t kalınlığında bir malzemedan geçtikten sonra kolime edilmiş bir dedektör tarafından algılanması esasına dayanmaktadır (Turner, 2007). Şekil 2.12’de dar demet geometrisi gösterilmiştir.



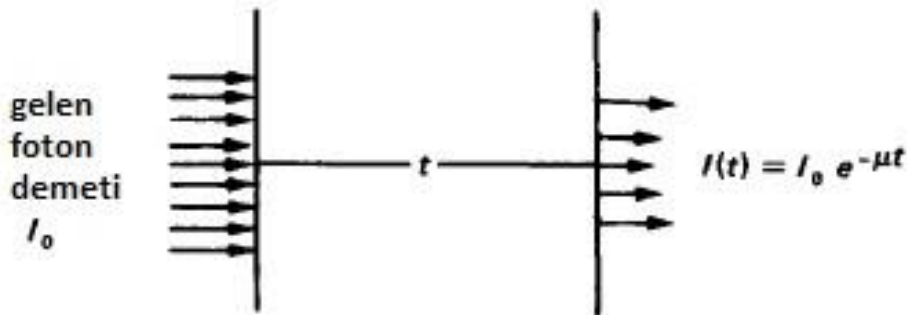
Şekil 2.12 : Dar demet geometrisi (Turner, 2007).

t kalınlığında bir hedefe çarpan $I(0)$ şiddetindeki tek enerjili paralel bir demet, hedefi $I(t)$ şiddetinde terk ediyorsa, radyasyonun madde içinde zayıflaması,

$$I(t) = I(0)e^{-\mu t} \quad (2.10)$$

eşitliği ile verilir. Şekil 2.13, dar demet geometrisinde, t kalınlığındaki bir hedefe çarpan foton demetinin zayıflamasını göstermektedir.

Burada, μ lineer zayıflatma katsayısını temsil etmektedir.



Şekil 2.13 : t kalınlığındaki bir malzemedan geçen radyasyon demetinin şiddeti (Knoll, 2002).

Gelen fotonun şiddetini yarıya indiren malzeme kalınlığına yarı değer kalınlık (HVL) denir ve birimi uzunluk birimi (mm veya cm) cinsinden verilir. Yarı değer kalınlık, lineer zayıflatma katsayısı kullanılarak Denklem (2.11) ile hesaplanır.

$$HVL = \frac{0,693}{\mu} \quad (2.11)$$

Bir foton demetinin t kalınlığındaki bir hedefi etkileşmeden geçme olasılığı

$$\frac{\text{geçen foton sayısı}}{\text{gelen foton sayısı}} = e^{-\mu t} \quad (2.12)$$

şeklinde verilir.

Bu olasılıktan yola çıkarak, iki etkileşme arasındaki ortalama mesafe ortalama serbest yol (λ) olarak adlandırılır ve Denklem (2.13) ile hesaplanır.

$$\lambda = \frac{\int_0^{\infty} x e^{-\mu x} dx}{\int_0^{\infty} e^{-\mu x} dx} = \frac{1}{\mu} \quad (2.13)$$

Bir bileşik ya da karışım için toplam kütle zayıflatma katsayısı (μ_m), $(dE/dx)_c$ ile hesaplanır ve Denklem (2.14) ile bulunur.

$$\mu_c (m^2/kg) = \sum_i w_i \mu_i (m^2/kg) \quad (2.14)$$

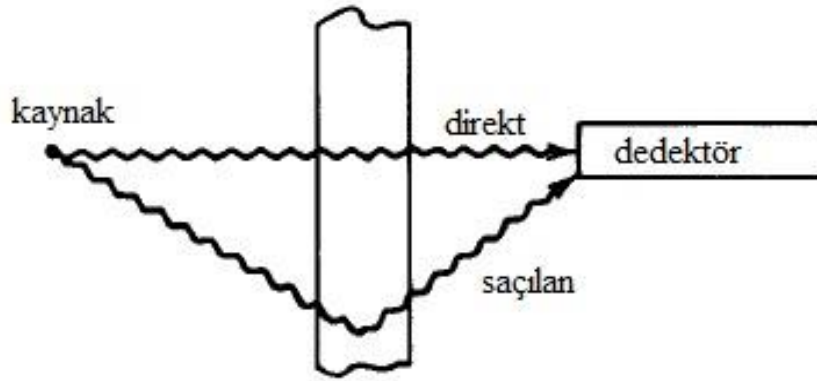
Burada,

μ_c : bir bileşik veya karışım için toplam kütle zayıflatma katsayısı,

w_i : bileşiğin i. elementi için ağırlık faktörü,

μ_i : i. elementin toplam kütle zayıflatma katsayısıdır.

Dar demet geometrisinin yanı sıra uygulamada, radyasyon kaynağının ve dedektörün kolime edilmediği, geniş demet geometrisi de kullanılmaktadır (Şekil 2.14).



Şekil 2.14 : Geniş demet geometrisi (Knoll, 2002).

Geniş demet geometrisinde dedektör, direkt olarak radyasyon kaynağından gelen birincil radyasyonların yanında saçılan ikincil radyasyonları da dedekte etmektedir. Birçok dedektör birincil ve ikincil radyasyonu birbirinden ayıramadığından, ölçülen sinyal dar demet geometrisine göre daha yüksek olmaktadır. Dedektörün algıladığı ikincil radyasyonlardan dolayı geniş demet geometrisi için Denklem 2.10 kullanılamamaktadır. Bu durumda Denklem 2.10'a ikincil radyasyondan gelen etkiler dolayısıyla yığılma faktörü (B) eklenmiştir (Knoll, 2002). Geniş demet geometrisinde t kalınlığında bir hedefe çarpan $I(0)$ şiddetindeki tek enerjili paralel bir demet, hedefi $I(t)$ şiddetinde terk ediyorsa, radyasyonun madde içinde zayıflaması,

$$I(t) = BI(0)e^{-\mu t} \quad (2.15)$$

şeklinde bulunur.

2.3 Radyasyon Birimleri

Tüm radyasyon türlerinin madde ile etkileşimi, iyonizasyon ve uyarılma yolu ile enerji transferi vasıtasıyla gerçekleşmektedir. Radyasyonun miktarını belirlemek, radyasyon dozimetrisi ve radyasyondan korunma bakımından önem arz etmektedir. Radyasyonun madde ile etkileşiminin nicel ölçüsü birimlerle ifade edilmektedir. Aşağıdaki bölümlerde, radyasyon birimleri tanıtılmıştır (Stabin, 2007).

2.3.1 Işınlama

Işınlama, gama ve X-ışınının havada oluşturduğu iyonizasyon miktarı olarak tanımlanmaktadır. Birimi Röntgen (R)'dir. Röntgen ilk olarak 1928'deki Radyoloji Konferansı'nda 0.00293 g havada (standart sıcaklık ve basınçta 1 cm^3 hava kütlesi için) + veya - yüklü 1 elektrostatik yük üreten gama veya X-ışını miktarı olarak tanımlanmıştır. Günümüzde Röntgen SI ölçü sistemine göre yeniden tanımlanmıştır. Buna göre 1 kg havada 2.58×10^{-4} Coulomb'luk elektrik yükü oluşturabilecek X-ışını veya gama ışını miktarına 1 R denmektedir (Turner, 2007). Işınlama yalnızca elektromanyetik radyasyon için ve hava ortamı için tanımlanmış bir birimdir.

2.3.2 Absorblanmış Doz

Farklı radyasyon türleri ve farklı malzemeler (özellikle doku) için "Absorblanmış doz" tanımlanmaktadır. Absorblanmış doz (D), herhangi bir hedefte herhangi bir

iyonize radyasyon nedeniyle birim küttele (m) soğurulan enerji (E) olarak tanımlanır ve Denklem 2.15 ile bulunur (Tsoulfanidis, 1995).

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \quad (2.15)$$

Absorblanmış dozun yeni birimi J/kg yani gray (Gy) eski birimi erg/g yani rad'dır. Gy ve rad birimleri arasındaki dönüşüm:

$$1 \text{ Gy} = \frac{1 \text{ J}}{\text{kg}} = \frac{10^7 \text{ erg}}{10^3 \text{ erg}} = 10^4 \frac{\text{erg}}{\text{g}} = 100 \text{ rad}$$

şeklinde verilmektedir.

2.3.3 Kerma

Absorblanmış dozla yakından ilişkili olan Kerma (**K**inetic **E**nergy **R**elaxed per **M**ass), radyasyonun etkileştiği maddede ortaya çıkan kinetik enerji olarak tanımlanmaktadır (Stabin, 2007). Kerma;

$$K = \frac{dE_{Tr}}{dm} \quad (2.16)$$

denklemleriyle verilmektedir. dE_{Tr} , dm kütlesinde yüksüz parçacıklar tarafından ortaya çıkarılan tüm yüklü iyonize parçacıkların kinetik enerjilerinin toplamı olmaktadır. Kerma, absorblanan doz ile aynı birime (Gy) sahiptir. Ancak absorblanan dozdan farklı olarak soğurulan enerjiyi değil, radyasyonun etkileştiği maddede açığa çıkan kinetik enerjinin ölçüsünü ifade etmektedir. Absorblanmış doz ve Kerma, Bremsstrahlung radyasyonundan kaynaklanan kayıplar göz ardı edildiğinde, yüklü parçacıkların denge durumunda birbirlerine eşittir (Stabin, 2007).

2.3.4 Doz Eşdeğeri

Farklı radyasyon tipleri farklı seviyede biyolojik hasar oluşturmaktadır. Örneğin, alfa parçacıkları gibi Lineer Enerji Transferi (LET) yüksek olan radyasyonlar, düşük olanlara göre daha fazla biyolojik hasar meydana getirmektedir. Doz eşdeğeri (H), absorblanmış doz (D) ve kalite faktörü (Q) kullanılarak Denklem 2.17'den bulunabilmektedir.

$$H = D \times Q \quad (2.17)$$

Doz eşdeğerini tayin etmede kullanılan kalite faktörü, radyasyon türüne ve enerjisine göre belirlenmektedir. Pratik amaçlar için Çizelge 2.2 de gösterilen kalite faktörleri

kullanılmaktadır (Tsoulfanidis, 1995). Doz eşdeğeri yeni birimi Sievert (Sv), eski birimi rem'dir ve $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ dir.

Çizelge 2.2 : Farklı radyasyon türleri için Kalite Faktörleri (Tsoulfanidis, 1995).

Radyasyon Tipi	Q	Radyasyon Tipi	Q
Gama Işınları	1	Nötronlar	
X-Işınları	1	Termal Nötronlar	2
Beta Parçacıkları	1	0.005 MeV	2
		0.02 MeV	5
Elektronlar	1	0.10 MeV	7.5
Pozitronlar	1	0.50 MeV	11
Protonlar	10	1 MeV	11
Alfa Parçacıkları ($E < 10 \text{ MeV}$)	20	5 MeV	8
Geritepki çekirdeği ($A > 4$)	20	10 MeV	6.5

2.4 Radyasyonun Biyolojik Etkileri

Radyasyonun biyolojik etkilerinin doğrudan ve dolaylı etkilerden oluştuğu varsayılmaktadır. Doğrudan etkiler moleküldeki iyonizasyon sonucu DNA da meydana gelen kopmalar nedeniyle olmaktadır. Dolaylı etkiler ise radyasyon nedeniyle oluşan oksil (O) ve hidroksil (OH) radikalleri yoluyla olmaktadır. 10^{-3} saniyede biyolojik sistemde yüklü parçacıklar tarafından serbest radikaller oluşturulur. Aynı zamanda bazı biyokimyasal süreçler 1 saniye içinde olur. Birkaç dakika içinde hücre bölünmeleri gerçekleşir (Turner, 2007).

Radyasyon etkileri; radyasyon türüne, radyasyonun dozuna ve gözlemlenen alana göre değişiklik göstermektedir. Bazı etkiler hemen gözlenirken diğer bir takım etkilerin ortaya çıkması zaman almaktadır. Biyolojik etkiler stokastik ve deterministik (nonstokastik) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Stokastik etkiler istatistiksel olarak gerçekleşmektedir. Kanseri, stokastik etkiye bir örnektir. Örneğin, büyük bir popülasyon radyasyon gibi bir kanserojene maruz kaldığında toplumun hangi bireylerinin kanser olacağı, hangilerinin olmayacağı bilinmemektedir. Deterministik etkilerde ise, alınan radyasyon dozu ile etkiler arasında bir ilişki gözlenmektedir. Genellikle etkilerin gözlenmediği bir eşik doz değeri vardır ve doz arttıkça etkiler de artmaktadır. Derideki kızarıklıklar deterministik etkilere bir örnektir (Turner, 2007).

2.5 Radyasyondan Korunma

İnsanların radyasyondan etkilenmesinin biyolojik zararları olduğu bilindiği için maruz kalınacak dozun olabildiğince düşük tutulması ve bunun için gerekli her türlü tedbirin alınması gerekmektedir. Radyasyondan korunma, nükleer tıp uygulamaları da dahil olmak üzere nükleer teknolojiye en önemli konulardan biridir.

Radyasyonun bilimde, endüstride ve tıpta kullanılmaya başlanmasıyla birlikte 1920’lerde Avrupa ve Amerika’da Ulusal Radyasyon Komiteleri kurulmaya başlanmıştır. 1928’de Uluslararası X-ışınları ve radyumdan korunma komisyonu kurulmuştur. Bu komisyon 2. Dünya Savaşı’nda faaliyetlerine ara vermiş, ancak savaşın bitimiyle tekrar açılmıştır. Günümüzde Uluslararası Radyasyon Korunması Komisyonu (ICRP) adı ile faaliyetlerine devam etmektedir. ICRP’nin 1928’den bu yana önerdiği “maksimum müsaade edilebilir” radyasyon dozları radyasyon korunmasından sorumlu olan bütün uluslararası kuruluşlar tarafından kabul görmektedir. Maksimum müsaade edilebilir dozlar ihtiyaca göre düzenlenmekte ve diğer üyelere tavsiye olarak sunulmaktadır.

X-ışınlarının ve radyoaktivitenin keşfinden sonra göz hastalıkları, saç dökülmesi, deride yanma ve tümörler gibi insan sağlığına olan zararlı etkilerinin ortaya çıkmaya başlamasıyla 1925’te X-ışınları ve Radyum Korunması Komisyonu “Tolerans Dozu” kavramını ortaya atmıştır. Tolerans Dozu, bir radyasyon çalışanının sürekli veya tekrarlayan aralıklarla kanda değişiklik, deride ve üreme organlarında bir bozulma olmadan alabileceği doz miktarı olarak tanımlanmıştır.

Nükleer silahların icadı, nükleer enerjinin tıp, endüstri ve diğer bilimlerde kullanılmaya başlanması ile birlikte insan sağlığına yönelik risklerin artması yeni tanımlamaların yapılması ihtiyacını doğurmuştur.

1958’de ICRP, “maksimum müsaade edilebilir doz” (MMD) kavramına yeni bir tanımlama getirmiştir. Yeni tanıma göre maksimum müsaade edilebilir doz, bedensel veya genetik tehlikesi olma olasılığı ihmal edilebilecek kadar küçük olan uzun bir zaman süresince birikmiş dozdur.

1965 yılında ICRP daha önce belirlenmiş MMD sınırlarının mümkün olduğunca altında kalınması gerektiğini belirtmiştir. Bunun nedeni, üreme hücrelerinin düşük seviyeli radyasyonla ışınlanması ile düzelmeyen genetik bozukluklar oluşabileceği yolundaki kanıtlarının artmış olmasıdır. ICRP’nin 1965 raporları hala geçerlidir.

ICRP'nin 1965 yılında yayınladığı radyasyon doz limitleri (MMD), planlanmış ışınlama koşullarında radyasyon çalışanları ve halk olmak üzere iki grup için önerilmiş olan limitlerdir. Bu limitler tıbbi ışınlamaları ve doğal radyasyondan maruz kalınan dozları kapsamamaktadır. Halk için yıllık efektif doz limitleri, bir yıl içinde maruz kalınan dış ve iç ışınlama olarak belirtilmiştir (IAEA, 2018).

ICRP 1965 tavsiyelerinde yıllık dozun 50 mSv'i (5 rem) geçmemesi şartıyla arka arkaya 13 hafta boyunca alınmış birikmiş dozun 30 mSv'e (3 rem) kadar izin verilebileceğini belirtmiştir. Toplam doz, radyasyon çalışanın yaşı N olmak üzere Denklem 2.18 den hesaplanmaktadır.

$$\text{Toplam doz} = 5(N-18) \quad (2.18)$$

Denklem 2.18'deki 18 sayısı, 18 yaşından küçüklerin radyasyonla çalışmasına izin verilmediği anlamına gelmektedir. ICRP, toplam doz miktarının Denklem 2.18 de verilen miktarı geçmemek şartıyla bazı yıllar 50 mSv'i (5 rem) geçebileceği şeklindeki bir uygulamayı serbest bırakmıştır.

1980 yılında toplanan Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA), Dünya İşçi Teşkilatı (ILO), Dünya Sağlık Teşkilatı (WHO), Nükleer Enerji Ajansı (NEA) tarafından üye ülkelerin ve bağlı organizasyonların da önerileri dikkate alınarak 1965 hükümlerine güncellemeler yapılmıştır.

1990'da yayınlanan ICRP-60 tavsiyeleri daha önce yayınlanan tavsiye kararlarına önemli ölçüde değişiklikler yapılarak oluşturulmuştur. Radyasyon çalışanlarının 1 yılda alabilecekleri doz miktarı 50 mSv ile sınırlanmış olup, 5 yıllık süre içinde alınabilecek toplam dozun 100 mSv'in üzerine çıkamayacağı kuralı getirilmiştir. Radyasyon ile çalışan personelin önceki yıllara ait doz kayıtlarının tutulmadığı durumlarda radyasyon dozu hesaplarında önceki yıllarda her bir yıl için 50 mSv doz alındığı kabul edilir. Halk için alınabilecek doz miktarı, 1 mSv/yıl olarak sınırlandırılmıştır.

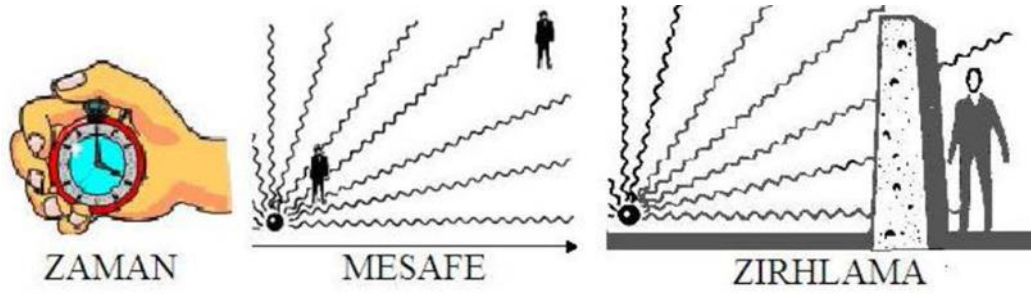
2007 yılında yayınlanan ICRP tavsiyelerine göre 1990 yılı tavsiyeleri güncelliğini korumaktadır. Fakat Avrupa'da (EUROATOM'a göre) yıllık doz limitleri en fazla 20 mSv olarak belirlenmiştir. 16-18 yaş arası stajyer öğrencilerin alabilecekleri maksimum doz miktarı 6 mSv/yıl olarak belirlenmiştir.

ICRP tarafından belirlenen, radyasyon çalışanları ve halk için doz limitleri Çizelge 2.3 de verilmiştir.

Çizelge 2.3 : ICRP doz limitleri (ICRP, 2007).

Limit Tipi	Radyasyon Çalışanları	Halk
Efektif Doz	Yılda 20 mSv (5 yılın ortalaması)	Yılda 1 mSv
Yıllık Eşdeğer Doz		
Göz	150 mSv	15 mSv
Deri	500 mSv	50 mSv
Eller ve Ayaklar	500 mSv	-

Yukarıda belirtilen doz limitlerinin varlığına rağmen, zorunlu olmayan durumlar dışında fazla ışınlamalardan kaçınılması gerektiği belirtilmiştir. ALARA olarak bilinen bu prensibin titizlikle uygulanması gerektiğinin altı çizilmiştir. ALARA (as low as reasonably achievable) prensibi, radyasyon çalışanlarının radyasyon kaynağıyla çalışırken mümkün olduğunca az doz alması ilkesi olarak bilinmektedir. İyonlaştırıcı radyasyondan korunmada ALARA prensibine dayanan 3 temel kural uygulanır. Bunlar; zaman, mesafe ve zırhlama (Şekil 2.15).



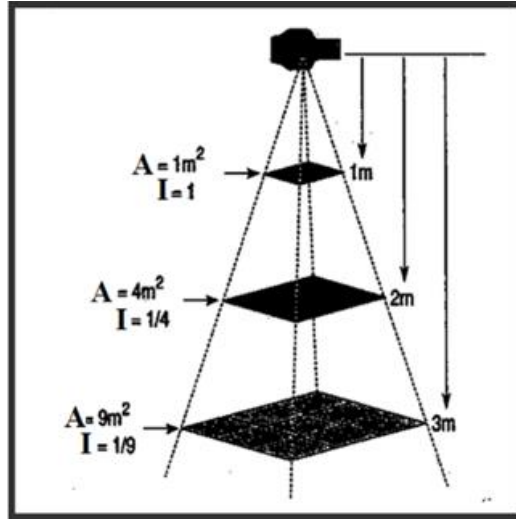
Şekil 2.15 : Radyasyondan korunmanın üç temel kuralı (TAEK, 2010).

Radyasyonla yapılan işlemlerde alınan doz; doz hızı ile zamanın çarpımıdır. Zaman ne kadar artarsa alınan doz da buna bağlı olarak artacaktır. Bu nedenle, radyasyon alanında ne kadar az süre kalınırsa o kadar az doz alınacağı açıktır. Radyasyon kullanılarak yapılan uygulamalarda çalışma süresinin iyi planlanması ve mümkün olduğunca kısa sürede çalışmanın tamamlanması önemlidir.

Radyasyon şiddeti uzaklığın karesi ile ters orantılı (ters kare kuralı) olarak azalmaktadır (Şekil 2.16). Örneğin; kaynakla olan mesafe iki katına çıkarılırsa maruz kalınacak radyasyon miktarı dört kat azalacaktır. Yüklü parçacıkların havada kat ettikleri mesafe kısadır, malzeme içerisinde fazla yol alamadan durdurulurlar. Gama ve X-ışınları ile yapılan çalışmalarda, radyasyon kaynağına olan uzaklığın önemi alfa ve beta kaynaklarına göre daha fazladır.

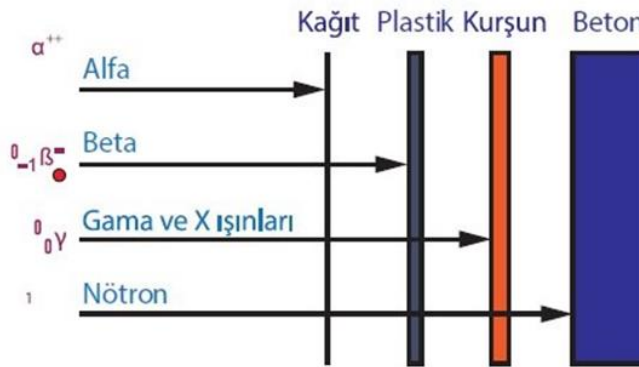
Radyasyon kaynağı ile bu kaynaktan etkilenme olasılığı olan kişiler arasına kurşun, tuğla, beton, duvar gibi malzeme konulmasına zırhlama, kullanılan malzemeye de

zırhlama malzemesi denilmektedir. Zırhlama, alınan radyasyon dozunu en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Radyasyonun türüne ve şiddetine göre farklı koruyucu malzemeler zırh olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.16 : Radyasyon şiddetinin mesafeyle değişimi.

Alfa kaynakları menzilleri kısa olduğundan kağıt gibi ince malzemelerle durdurulabilirken gama gibi yüksek enerjili radyasyon kaynaklarını zırhlarken kurşun ve beton gibi malzemeler kullanılmaktadır (Şekil 2.17). Zırhlama malzemelerinin yoğunluğu ne kadar fazla ise X ve gama ışınlarını zırhlama özelliği o kadar artmaktadır.



Şekil 2.17 : Alfa, Beta, Gama, X-ışını ve Nötronların zırhlanması (Url-2).

3. X-IŞINLARI VE TIPTA KULANIM ALANLARI

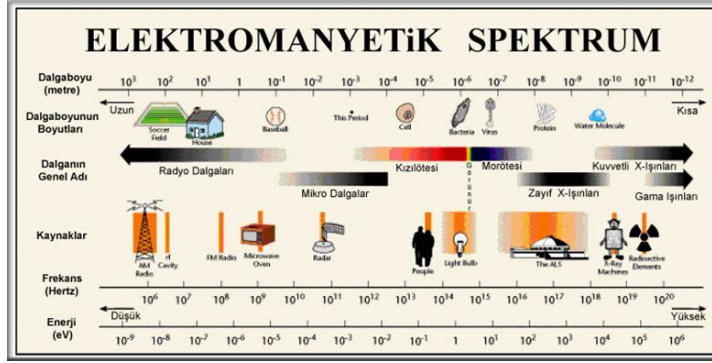
Modern fizikte iyonizan radyasyonun tarihçesi 8 Kasım 1895’de Wuerzburg Almanya’da Roentgen’in X-ışınlarını keşfiyle başlamıştır. Roentgen’in, televizyon tüpüne benzer içi boşaltılmış yüksek vakumlu Crooks tüpü’nde elektronların bir elektrottan diğerine geçişini inceleyerek bazı deneyler yaptığı bilinmekteydi. Crooks tüpünü karanlık bir odada çalıştırdığında ekranda ışıma olduğunu fark eden Roentgen, daha önce bilinmeyen bir ışın türü keşfettiğini fark etmiş ve bu yeni ışına X-ışını adını vermiştir. Daha sonraki çalışmalarında Roentgen, X-ışınlarının kağıt ve tahta gibi hafif malzemelere nüfuz etmeleri, Alüminyum ve kalay folyo gibi malzemelerin bu ışınları daha fazla tutması ve farklı miktarlarda kurşun barındıran eşit kalınlıklardaki camlarda farklı miktarda absorblanmaları gibi temel özelliklerini incelemiştir. X-ışınları kullanılarak alınan ilk radyografik görüntü, 1896’da Wilhelm Roentgen tarafından oluşturulan, eşi Anna Bertha’nın elinin görüntüsüdür (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : X-ışınları kullanılarak alınan ilk radyografik görüntü (Hendee, 2002).

Roentgen katot ışınlarının aksine X-ışınlarının manyetik alan tarafından saptırılmadığını, fotoğraf filmlerini etkilediğini ve yüklü bir elektroskopun yükünü kaybetmesine neden olduğunu keşfetmiştir. Bu çalışmaları sonunda Roentgen, iyonizan radyasyonun ilk örneğini keşfetmiştir (Hendee, 2002).

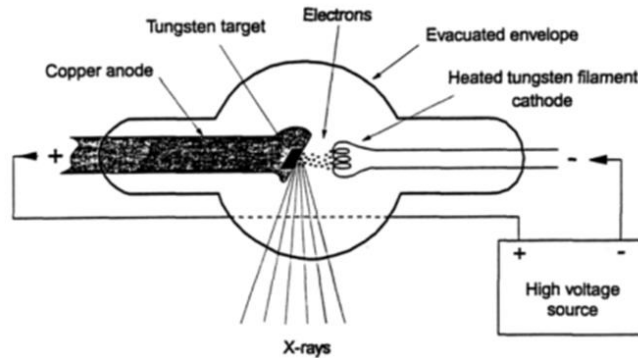
X-ışınları, yüksek enerjili elektronların bir madde ile etkileşmesi ve kinetik enerjilerini elektromanyetik radyasyona dönüştürmeleri ile ortaya çıkmaktadır (Bushberg, 2002). X-ışınları elektromanyetik spektrumda morötesi ışınlarla gama ışınlarının arasında kalan yüksek enerjili fotonlardır. Şekil 3.2 elektromanyetik spektrumunu göstermektedir.



Şekil 3.2 : Elektromanyetik Spektrum (Seyrek, 2007).

3.1 X-ışını tüpü

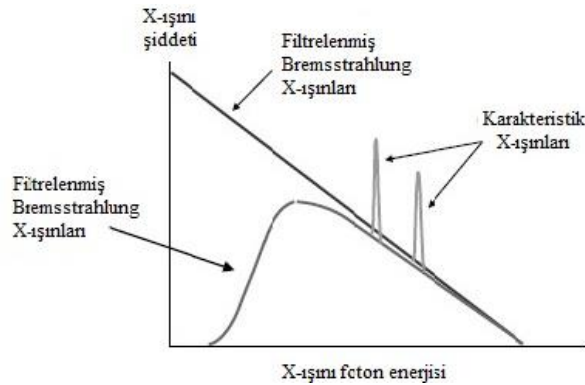
X-ışınları, yüksek enerjili elektronların madde ile etkileşmesiyle üretilir. Bu etkileşme, içinde pozitif elektrot (anot) ve negatif elektrot (katot) bulunan vakumlu cam tüpte gerçekleşir (Şekil 3.3). Katotta bulunan Tungsten filaman vakum ortamı içinde yaklaşık 2000°C 'ye kadar ısıtıldığında malzemeden elektron kopar. Verilen yüksek voltaj sayesinde kopartılan elektronlar hızlandırılıp anotdaki hedefe çarptırılır. Tungsten, 74 atom numarasına ve 3482°C ergime ısısına sahip oldukça sert bir element olduğu için hem hedef malzemesi hem de filaman olarak kullanımı yaygındır. Genellikle hedefe çarpan elektron demetine dik bir şekilde X-ışını üretimi olur. Yayınlanan X-ışını fotonu Bremsstrahlung radyasyonu olarak adlandırılır (Bushberg, 2002).



Şekil 3.3 : X-ışını tüpü (Bushberg, 2002).

3.1.1 X-ışını türleri

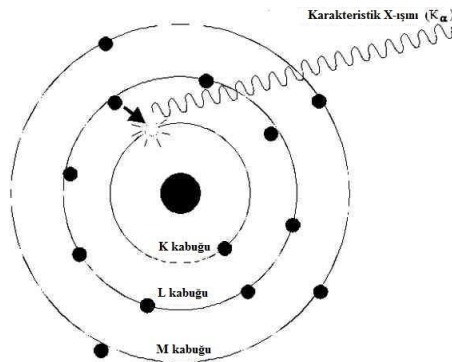
X-ışını tüpünde üretilen ışınlar Bremsstrahlung ve karakteristik X-ışını olmak üzere iki çeşit radyasyon barındırmaktadır. Bremsstrahlung radyasyonu şiddeti sürekli bir dağılımla karakterize edilmektedir ve bu dağılım bombardıman yapılan elektronların enerjileri arttıkça daha yüksek frekanslara kaymaktadır. Karakteristik X-ışınları ise Şekil 3.4’de gösterildiği gibi belli foton enerjilerinde pikler üretmektedirler (Iniewski, 2009).



Şekil 3.4 : Bremsstrahlung ve karakteristik X-ışınları (Iniewski, 2009).

3.1.1.1 Karakteristik X-ışınları

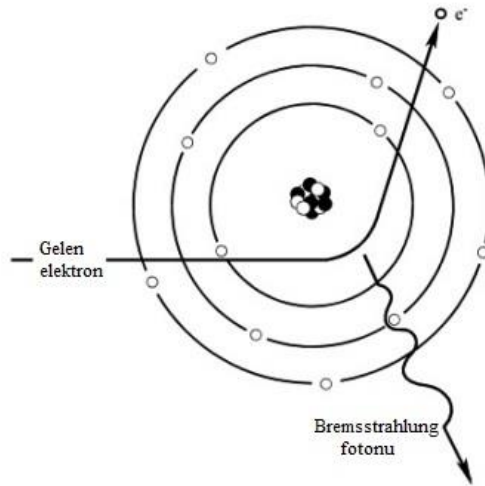
Eğer atomda dış bir etkiden dolayı kısa süreli bir uyarılma olursa, doğal eğilim elektronların kendini tekrar düzenlemesi ve temel enerji seviyesine geçmesi yönündedir. Bu temel seviyeye geçiş sonrasında uyarılmış seviye ile temel seviye arasındaki bir enerji farkı kadar X-ışını yayılması olur. Bu iki seviye arasındaki fark her atom için farklı olduğundan yayılan X-ışını karakteristik X-ışını olarak adlandırılır. Örneğin; atomun K kabuğunda geçici olarak bir boşluk oluşursa, bu boşluk diğer kabuklardan birindeki bir elektron tarafından doldurulduğunda karakteristik bir K X-ışını yayılımı olur (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 : Karakteristik X-ışınları.

3.1.1.2 Bremsstrahlung X-ışınları

Hızlı elektronlar madde ile etkileştiklerinde, enerjilerinin bir kısmı Bremsstrahlung radyasyonuna dönüşür (Şekil 3.6). Elektron enerjisinin Bremsstrahlung'a dönüşen kısmı artan elektron enerjisiyle artar ve yüksek atom numaralı malzemeler için en yüksek seviyededir. Bu süreç X-ışını tüpünün çalışma prensibidir.



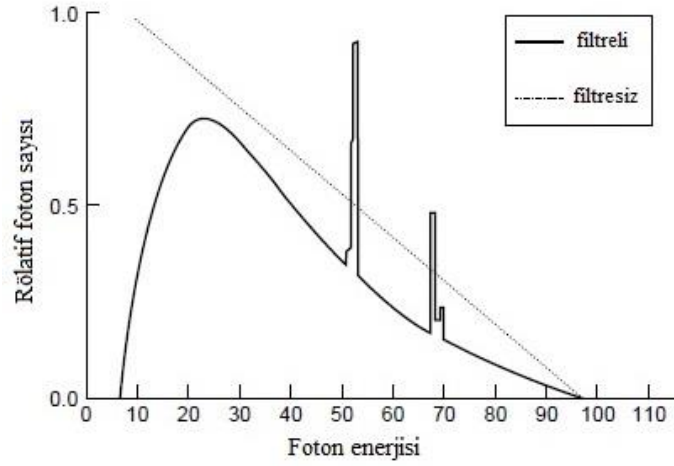
Şekil 3.6 : Bremsstrahlung X-ışınları.

3.2 X-ışını spektrumu

X-ışını tüpünden çıkan X-ışını demetinin enerji dağılımı 4 faktöre bağlıdır:

- Hedefe çarpan elektronların enerjisi tek olsa da Bremsstrahlung X-ışınları farklı enerjilerde geniş bir spektrum oluşturmaktadırlar.
- Açığa çıkan X-ışını demetinin enerjisi, hedefe çarpan elektronların enerjisinden bağımsız olmaktadır.
- Hedefe çarpan elektronların enerjisi X-ışını tüp voltajına bağlı olarak değişmektedir.
- X-ışınları, X-ışını tüpünün hedef malzemesinde farklı derinliklerde üretilmektedirler. Bu X-ışınları, hedef malzemenin farklı kalınlıklarından geçerek bir veya birden fazla etkileşme yoluyla enerji kaybedebilmektedirler.

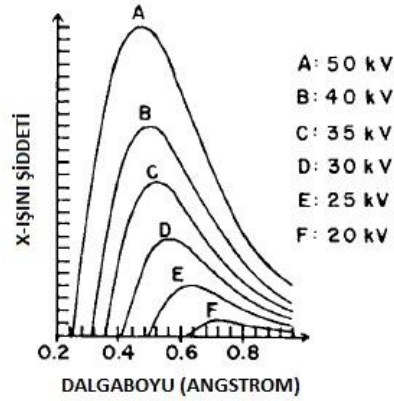
Filtreleme, hedef malzeme, tüp voltajı ve akımı, ışınlama süresi gibi parametreler X-ışını demetinin enerji aralığını ve şiddetini değiştirmektedir. Şekil 3.7 tipik bir X-ışını tüpünde üretilen foton enerjilerinin dağılımını göstermektedir. Spektrumun altında kalan alan toplam X-ışınını belirtmektedir (Hendee, 2002).



Şekil 3.7 : 100 kVp tüp voltajında tungsten hedef için X-ışını spektrumu (Hendee, 2002).

3.2.1 Tüp Potansiyeli

X-ışını tüpünün hedef malzemesine çarpan elektronların enerjisinin artması X-ışını spektrumunda daha yüksek enerjili bir üst limit oluşturmaktadır. Ayrıca elektron enerjisinin artmasıyla Bremsstrahlung oluşma verimi arttığından, artan tüp voltajı spektrumun yüksekliğinin artmasına yol açmaktadır. Şekil 3.8 sabit bir tüp akımında farklı tüp voltajları için X-ışını spektrumundaki değişimi göstermektedir (Hendee, 2002).

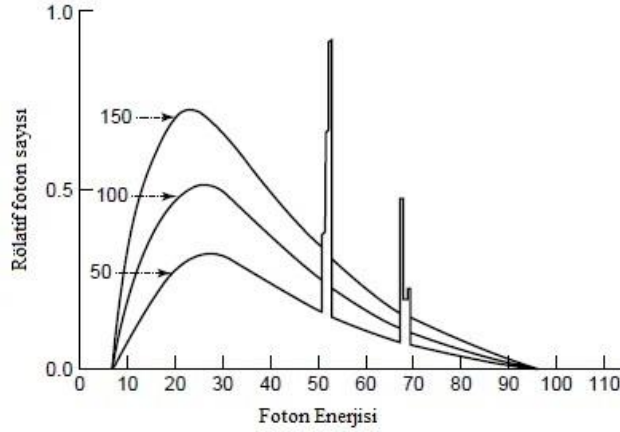


Şekil 3.8 : Farklı tüp voltajlarına göre X-ışını şiddetleri (Hendee, 2002).

3.2.2 Akım

Miliamper (mA) cinsinden tüp akımı ve saniye cinsinden ışınlama süresi (mAs) hedef malzemeye çarpan toplam elektron sayısını temsil etmektedir. Diğer faktörlerin eşit olduğu bir durumda, X-ışını tüpünün hedef malzemesine çarpan elektron sayısı ve ışınlama süresi, üretilen X-ışını sayısını doğrudan etkilemektedir.

Hedef malzemeye daha fazla elektron çarpması durumunda daha fazla X-ışını üretimi olmaktadır. Aynı X-ışını tüpünün farklı mAs değerlerinde çalıştırılması ile elde edilen spektrumlar Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 : Tungsten hedef X-ışını tüpü için 100 kVp tüp geriliminde 50, 100 ve 150 mAs tüp akımındaki X-ışını spektrumları (Hendee, 2002).

Şekil 3.9 da görüldüğü gibi, mAs değişimi sonucunda spektrumun şekli, özellikle karakteristik piklerin pozisyonları ve enerjilerinin alt ve üst limitleri değişmez. mAs değerlerinin artırılmasıyla spektrumun yüksekliği ve eğrinin altında kalan alan artmaktadır. Bu durum yüksek mAs değerlerinde daha fazla sayıda X-ışını üretilmesi anlamına gelmektedir (Hendee, 2002).

3.2.3 Filtreleme

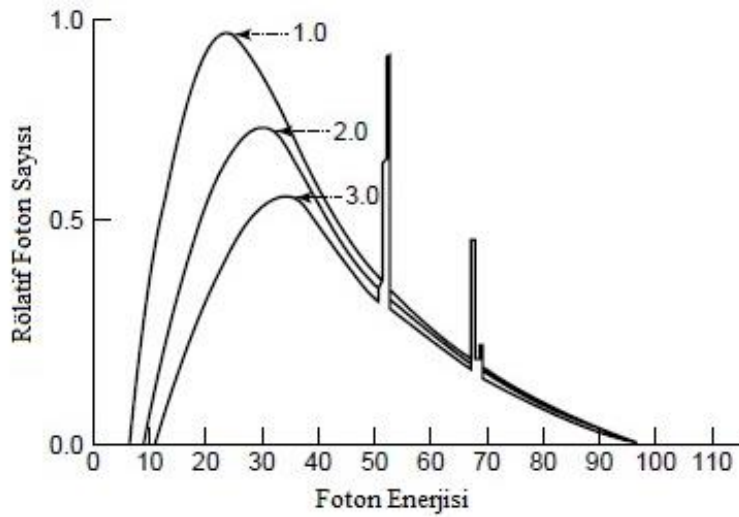
Bir X-ışını demeti, tüpten çıkarken, tüp çıkışındaki cam zarf, tüpü çevreleyen yağ ve tüp haznesinin çıkış penceresi gibi birkaç materyalden geçerek zayıflamaktadır. Bu zayıflatıcı materyaller X-ışını tüpünün doğal filtrasyonu olarak adlandırılmaktadır. Herbir bileşenden gelen doğal filtrasyonun Al eşdeğerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Tipik bir X-ışını tüpünün doğal filtrasyonu yaklaşık olarak 1 mm Al olmaktadır (Hendee, 2002).

Çizelge 3.1 : Doğal filtrelemeyi oluşturan X-ışını tüpü bileşenlerinin Al eşdeğer kalınlıkları.

X-ışını tüpü bileşeni	Kalınlık (mm)	Al Eşdeğer Kalınlık (mm)
Cam Zarf	1.4	0.78
Yalıtıcı yağ	2.36	0.07
Plastik Pencere	1.02	0.05

Bir malzemede X-ışınlarının fotoelektrik etki oluşturma olasılığı, E gelen fotonun enerjisi olmak üzere $1/E^3$ ile verilmektedir (Hendee, 2002). Bu nedenle düşük enerjili X-ışınları, yüksek enerjilere göre daha fazla zayıflamaktadırlar. X-ışınları malzemeden geçtikten sonra, demetteki toplam foton sayısı azalmasına rağmen foton başına daha yüksek bir ortalama enerjiye sahip olmaktadır. Bu X-ışını demeti daha sert olarak adlandırılmaktadır. Doğal filtreleme, X-ışını demetini sertleştirmektedir. Demetin daha da sertleşmesini sağlamak için ek filtreler de eklenebilmektedir. Ek filtreleme görüntü kalitesine etkisi olmayan ancak radyasyon dozunu artıran düşük enerjili X-ışınlarının filtrelenmesi bakımından önemlidir. X-ışını tüpünün doğal filtrelemesi ve dışardan eklenen filtrelemenin toplamı, toplam filtreleme olarak ifade edilmektedir (Hendee, 2002).

Şekil 3.10 değişik kalınlıklarda Al filtrelerin Tungsten hedef X-ışını tüpüne eklenmesi ile oluşan spektrumları göstermektedir. Şekilde üç spektrum için kVp ve mAs değerleri aynıdır. Al filtrenin, demetteki toplam foton sayısını azaltmak ancak fotonların ortalama enerjisini artırmak gibi bir etkisi vardır. Filtre kalınlığını artırmak, spektrumun yüksekliğini azaltırken spektrum pikini daha yüksek enerjilere kaydırmaktadır (Hendee, 2002).



Şekil 3.10 : 1, 2 ve 3 mm Al toplam filtrelemeye sahip tungsten hedef X-ışını tüpünde 100 kVp'de X-ışını spektrumu (Hendee, 2002).

3.3 X-ışınlarının Tıpta Kullanımı

Tıpta görüntüleme, erken ve doğru teşhisin hasta tedavisi stratejisini önemli ölçüde etkilemesi ve tedavi sonucunu geliştirmesi bakımından modern tıp uygulamalarının önemli bir parçası haline gelmiştir (Iniewski, 2009).

Gerekli görüntüleme bilgisini elde etmek için, incelenen bölgenin karakteristiğine bağlı olarak farklı yöntemler kullanılmaktadır. X-ışını ile görüntüleme ve Bilgisayarlı Tomografi elektromanyetik radyasyonun zayıflamasına, ultrasonla görüntüleme ses dalgalarının yayılması ve iletimine, Manyetik Rezonansla Görüntüleme (MRI) vücut sıvısının içeriğini göstermesi yöntemlerine dayanmaktadır. Genellikle, özel kontrast ajanların kullanılmadığı zamanlarda bu yöntemler vücut fonksiyonlarının incelenmesinden ziyade vücut anatomisinin incelenmesinde kullanılmaktadır (Iniewski, 2009).

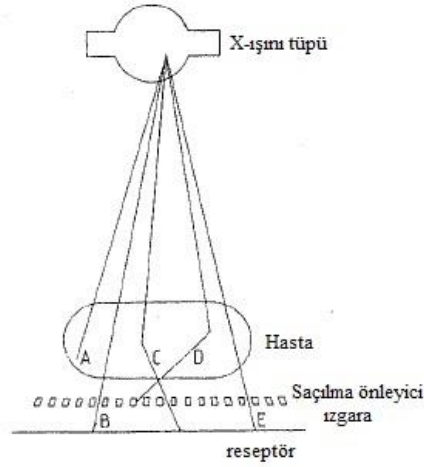
Bununla birlikte, Nükleer Tıp görüntüleme teknikleri, moleküler karakteristikleri ve hassaslıkları sebebiyle, vücut fonksiyonlarının 3 boyutlu olarak izlenmesi ve radyoaktif izotoplarla işaretlenmiş izleyiciler yardımıyla in vivo bilgisi vermesi bakımından önemli rol oynamaktadır. Bu bakımdan, Nükleer Tıp uygulamaları hastalıklı hücre ve dokuların yerinin belirlenmesi ve hastalık sürecinin takip edilmesi, bunun yardımıyla tedavi planlaması yapılması için kullanılmaktadır (Iniewski, 2009).

X-ışınlarının tıpta kullanımı tanı ve tedavi amaçlarıyla olmaktadır. Tıptaki uygulamaların %95 gibi büyük bir bölümü tanı amaçlıdır. Röntgen'in X-ışınlarını keşfi ve ilk sonuçların yayınlanmasının ardından, kemiklerdeki kırıkların teşhis edilmesi amacıyla X-ışınları kullanılmaya başlanmıştır. Bunu takip eden bir yılın sonunda X-ışını cihazları üretimi ve satışı başlamıştır. Günümüzde, radyografi ve radyografinin 3 boyutlu uzantısı olan Bilgisayarlı Tomografi sıklıkla kullanılmaktadır (Iniewski, 2009).

3.3.1 Radyografi

Radyografik görüntü, X-ışını fotonlarının hastadan geçtikten sonraki dağılımının foton dedektörü tarafından kaydedilmesi ile elde edilir. Şekil 3.11'de radyografi görüntüleme sisteminin bileşenleri gösterilmektedir. B ve E etkileşmeden hastadan geçen fotonları, C ve D saçılan fotonları, D saçılma önleyici grid tarafından durdurulan fotonu, A ise absorblanan fotonu temsil etmektedir. Bu fotonlar etkileşmeden hastadan geçen birincil fotonlar ya da hasta vücudunda zayıfladıktan sonra dedekte edilen ikincil fotonlar olabilmektedir. Burada önemli ve gerekli bilgiyi taşıyan birincil fotonlardır. Bu fotonlar geçtiği tüm dokulardaki X-ışını zayıflatma özelliklerini verdiği için önem arz etmektedir. Oluşan görüntü, X-ışını demeti

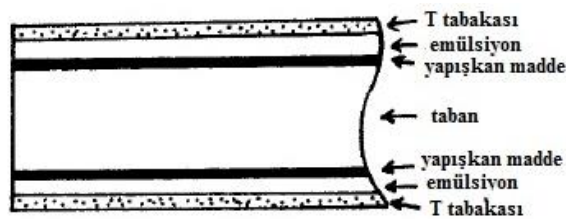
yolundaki dokuların zayıflatma özelliklerini veren 3 boyutlu dağılımın 2 boyutlu izdüşümüdür (Webb, 1988).



Şekil 3.11 : Radyografi görüntüleme sisteminin bileşenleri (Webb, 1988).

3.3.1.1 Konvansiyonel Radyografi

Radyografi, bir X-ışını demeti tarafından filme taşınan bilginin kaydedilmesi ve kullanılması anlamına gelmektedir (Hendee, 2002). X-ışını filmlerinin yaklaşık 0.2 mm kalınlığındaki saydam film tabanının tek tarafı (single-emulsion film) ya da her iki tarafı emülsiyon (double-emulsion film) ile kaplanmıştır. Taban genellikle selüloz asetat yada polyester reçinedir. Tek tarafı emülsiyonlu film radyasyona daha az duyarlıdır ve genellikle mamografi gibi görüntüde detay gerektiğinde kullanılmaktadır. Emülsiyon, jelatin bir matrisin içinde askıda bulunan gümüş tanecikleriyle bileşik oluşturmaktadır ve görünür ışık, morötesi ve iyonizan radyasyona duyarlı T tabakası denilen koruyucu bir tabakayla kaplanmıştır. Şiddetlendirici ekranlı filmler, en çok ekran tarafından yayılan ışığın dalgaboyuna duyarlıdır. Şiddetlendirici ekranı bulunmayan filmler, direkt olarak X-ışınına maruz kalması için tasarlanmıştır ve görünür ışığa daha az duyarlıdır. Tanısal radyolojide kullanılan neredeyse bütün filmlerde şiddetlendirici ekran kullanılmaktadır. Şekil 3.12’de radyolojik bir film gösterilmiştir (Hendee, 2002).



Şekil 3.12 : Radyografik film (Hendee, 2002).

Film iyonizan radyasyona veya görünür ışığa maruz kaldığında, X-ışını filmi emülsiyonundaki gümüş bromür tanecikleri bu ışınlardan etkilenmektedir. Gelen radyasyondan enerji soğurulması sonucu filmde elektron kopmaktadır. Bu elektronlar gümüş bromür taneciklerinin kristal kafesindeki hassaslık merkezi adı verilen kısımlar tarafından yakalanmaktadır. Yakalanan elektronlar kafesteki hareketli gümüş iyonlarını (Ag^+) nötralize etmektedirler. Bu yüzden, küçük miktarda metalik gümüş, emülsiyondaki gümüş bromür taneciklerinin yüzeyinde birirmektedir. Bu değişiklikler görünür olmamakla birlikte, X-ışınına maruz bırakılan filmde biriken metalik gümüş, X-ışını tarafından filme iletilen bilginin bir yansıması olmaktadır. Bu bilgi, radyografik emülsiyonda yakalanan ve depolanan gizli görüntü olmaktadır.

Radyografik film, solüsyon yardımıyla banyo edildiğinde hassaslık merkezlerine daha fazla gümüş dolmaktadır. Bu nedenle, radyasyon tarafından oluşturulan gizli görüntü film temelinde birikmiş metalik gümüş için katalizör görevi görmektedir. Filmin radyasyon tarafından etkilenmeyen kısımlarında gümüş birikmesi olmamaktadır ve bu kısımlar solüsyonun içindeki sodyum tiyosülfat veya amonyum tiyosülfat tarafından kaldırılmaktadır. Solüsyon aynı zamanda emülsiyonu sertleştirmek için Potasyum Alum, filmdeki fazlalık geliştiriciyi nötralize etmesi için Asetik Asit barındırmaktadır. Filmin işlem görmüş kısımlarındaki siyahlık derecesi, bölgede birikmiş serbest gümüş miktarı ve bunun sonucu olarak bölgede soğurulmuş X-ışını sayısına bağlı olmaktadır (Hendee, 2002).

3.3.1.2 Dijital Radyografi

Analog görüntüleri dijital formata çevirmek ya da radyografik görüntüleri dijital olarak elde etmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Birden fazla bölgenin aynı anda görüntülenmesinin gerektiği durumlar bu dijital görüntüleme tekniklerinin geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Sodyum iyodür gibi floresan kristalleri içeren dedektörler, fotodiyotlar ve çeşitli yarıiletken dedektörler gibi elektrik sinyali üretebilen cihazlar kullanılarak görüntü dijital hale getirilebilmektedir.

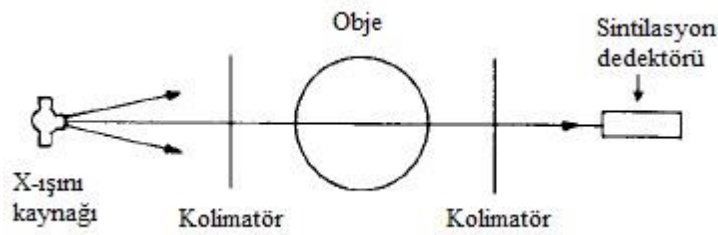
Dijital görüntülemeye diğer bir yaklaşım, görüntü alımının özel olarak dijitalize edilmek için tasarlanmış sürekli bir ortamda yapılmasıdır. Bilgisayarlı radyografi olarak da adlandırılan depolanmış fosfor teknolojisinde görüntü, ışıldayan fosforlu kristal içeren bir yüzeyde elde edilmektedir. BaFBr gibi malzemeler X-ışını

tarafından yapılan ışınlamalarda enerjiyi depolayabilme özelliğine sahiptirler. Işıma yapma özelliğine sahip olan fosfor uygun dalga boyunda güçlü bir ışık kaynağına maruz kaldığında, fotoçoğaltıcı tüp yardımıyla dedekte edilebilir görünür ışık düzeyinde bir enerji yaymaktadır. Bu nedenle, fosfor depolanmış yüzey X-ışınına maruz kaldıktan bir süre sonra okunabilecek gizli bir görüntü kaydetmektedir. Görüntünün okunması, ışıldayan bölgenin iyi çözünürlüklü ve küçük kalmasını sağlamak için Helyum-Neon lazer ışınları gibi iyi kolime edilmiş güçlü bir ışık kaynağıyla yapılabilir. Fotoçoğaltıcı tüpten gelen elektrik sinyalleri analog-dijital dönüştürücüler tarafından dijitalize edilmektedir. Görüntü dijital forma getirildikten sonra yüksek çözünürlüklü bir monitörde görüntülenebilir veya film olarak basılabilir.

Son olarak, radyografik filmler konvansiyonel olarak elde edildikten sonra da dijital hale dönüştürülebilir. Tipik bir film dijitalize eden bir sistemde, lazer ışını filmi taramaktadır. Film üzerindeki farklı optik yoğunlukları iletilen ışığı modüle etmektedir. Filmin arkasındaki bir ışık dedektörü iletilen lazer ışığını analog-dijital dönüştürücü tarafından elektrik sinyaline dönüştürür (Hendee, 2002).

3.3.2 Bilgisayarlı Tomografi (BT)

Bilgisayarlı Tomografi, Şekil 3.13’de görüldüğü gibi, dar bir X-ışını demetinin hastadan geçerek zayıflaması ve eş zamanlı olarak bir radyasyon dedektörü tarafından algılanması prensibine dayanmaktadır (Hendee, 2002).



Şekil 3.13 : Bilgisayarlı Tomografide dar demet geometrisi (Hendee, 2002).

Dar demet monoenerjik ise, radyasyonun zayıflaması

$$I = I(0)e^{-\mu x} \quad (3.1)$$

denklemleriyle verilmektedir. Burada, $I(0)$ gelen radyasyon şiddetini, $I(x)$ hastadan çıkan radyasyon şiddetini, μ doku ve organların lineer zayıflatma katsayısını ve x doku ve organların kalınlığını belirtmektedir. Farklı doku ve organların farklı lineer

zayıflatma katsayısına sahip olması nedeniyle, bu doku ve organlardan geçen X-ışını demetinin zayıflaması,

$$I = I(0)e^{-\sum_{i=1}^n \mu_i x}, \quad (3.2)$$

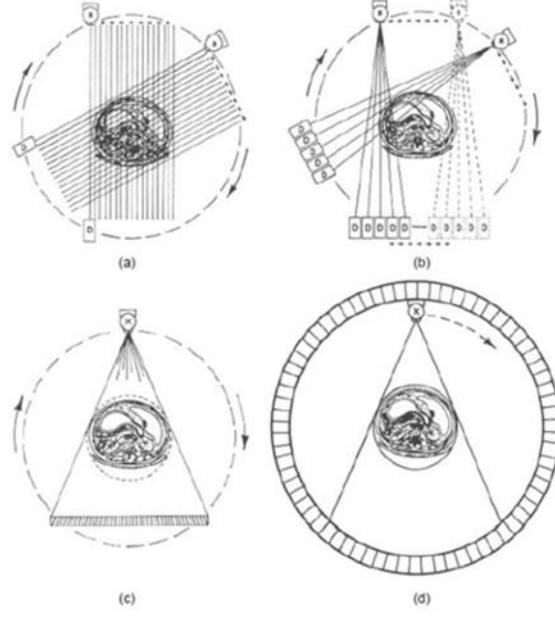
denklemleriyle verilmektedir. Burada n , X-ışını demetinin geçtiği farklı doku veya organ sayısıdır. Denklemlerde birçok μ_i bilinmeyen olduğu için, tek bir açıdan alınan ölçümlerle her bir doku için lineer zayıflatma katsayısını hesaplamak mümkün olmamaktadır. Ancak aynı düzlemde X-ışını tüpünün ve dedektörün farklı oryantasyonlarıyla alınan ölçümlerle bu μ_i katsayıları ayrılabilir. Herbir μ katsayısına farklı bir gri tonu atanarak, farklı X-ışını lineer zayıflatma katsayısı olan yapıların görüntülenmesi sağlanabilmektedir (Hendee, 2002).

BT'nin ilk tasarımlarında (1. Nesil BT), düz bir şekilde kolime edilmiş X-ışını demeti hastanın bir tarafında ve NaI dedektörü diğer tarafında olacak şekilde yerleştirilerek ve 40 cm uzunluğunda doğrusal taramalar yapılarak 160 adet X-ışını zayıflatma ölçümü alınmaktaydı (Şekil 3.14 (a)). Daha sonra, X-ışını tüpü ve dedektörün birbirine göre pozisyonu değiştirilmeden sistem 1 derece döndürülerek başka bir 160 ölçüm daha alınmaktaydı. Bu süreç 180 derece açı taranana kadar devam etmekteydi. Toplamda $160 \times 180 = 28.800$ X-ışını zayıflatma ölçümü toplanmaktaydı. Daha sonra bu ölçümler görüntünün yeniden yapılandırılması için matematiksel yeniden yapılandırma programları olan bilgisayara gönderilmekteydi ve görüntü oluşumu bu şekilde sağlanmaktaydı. Bu tasarım durgun objelerde düzgün görüntü vermesine rağmen, veri toplanması için geçen süre uzun olmaktaydı (Hendee, 2002).

BT'nin sonraki tasarımlarında, düz bir demet yerine koni şeklinde bir X-ışını demeti kullanılmaya başlanmıştır ve bu yaklaşım aynı anda birçok ölçümün alınmasını sağlamıştır (Şekil 3.14 (b)). Farklı açılarda ayarlanmış koni şeklindeki X-ışını demetleri (örneğin 30 derece veya 10 derece genişliğindeki demetler) tarama süresini 20-60 saniye aralığına düşürmekte ve aynı zamanda hareketten kaynaklanan etkileri azaltarak görüntü kalitesini artırmaktadır. Koni şeklindeki X-ışını demetine ve birden fazla radyasyon dedektörüne sahip BT, 2. Nesil BT olarak adlandırılmaktadır (Hendee, 2002).

3. ve 4. Nesil BT'de, X-ışını tüpü ve dedektör düzlemsel hareket yerine dairesel hareket yapmaktadır. 3. Nesil BT, X-ışını tüpü ile eş zamanlı olarak dönen düzlemsel

dedektörler dizisinden oluşurken (Şekil 3.14 (c)), 4. Nesil BT, sistemin çevresine sıralanmış sabit durumda bulunan 700 veya daha fazla dedektörden oluşmaktadır (Şekil 3.14 d). Bu tarayıcılarla, veri toplama zamanı 1 saniyeye kadar kısaltılabilmektedir (Hendee, 2002).



Şekil 3.14 : (a) 1. Nesil BT (b) 2. Nesil BT (c) 3. Nesil BT (d) 4. Nesil BT

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu yüksek lisans tez çalışmasında antimon (Sb) cevheri katkılı silikon kauçuk, antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin X-ışını zayıflatma özellikleri incelenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan malzemeler, deney ekipmanları ve deney düzenekleri alt bölümlerde tanıtılmaktadır.

4.1 Deneyde Kullanılan Malzemeler

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, X-ışını zayıflatma özelliklerinin belirlenmesi için antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemeler üretilmiştir. Malzemelerin hazırlanma aşaması aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

4.1.1 Antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemelerin hazırlanışı

Tüvenan antimon kaya parçaları Kütahya bölgesindeki maden ocağından temin edilmiştir. Tüvenan antimon kaya parçalarına ait bir örnek Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Tüvenan antimon kaya parçası.

Kaya parçaları, İTÜ Enerji Enstitüsü, Malzeme Üretim ve Hazırlama Laboratuvarı’nda küçük parçalara ayrılmıştır ve öğütücüde toz haline gelene kadar öğütülmüştür. Kayaları öğütme işleminde kullanılan öğütücü Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Öğütücü içindeki antimon cevheri parçaları.

Öğütücüde toz hale gelen antimon cevheri, 500 μm 'lik elekler kullanılarak ortalama parçacık boyutu 500 μm 'nin altında olacak şekilde elenmiştir. Şekil 4.3'de malzemelerin üretiminde kullanılan antimon cevheri tozu görülmektedir.



Şekil 4.3 : Sb madeni tozu.

Malzemelerin üretiminde kullanılan antimon cevherinin XRF analizi (X-ışını floresans analizi), İTÜ Maden Fakültesi Jeokimya Araştırmaları Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

Antimon cevherinin antimon yüzdesi ve içerisindeki safsızlıklar Çizelge 4.1'de verilmiştir. XRF analizi için iki örnek hazırlanmıştır ve iki analiz sonucunun ortalaması alınarak ortalama antimon oksit (Sb_2O_3) yüzdesi %6,95 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.1 : Malzemelerin hazırlanışında kullanılan antimon cevherinin içeriği.

1. Örnek		2. Örnek	
Na ₂ O	0.02	Na ₂ O	0.03
MgO	0.15	MgO	0.16
Al ₂ O ₃	0.39	Al ₂ O ₃	0.39
Si O ₂	1.63	Si O ₂	1.44
P ₂ O ₅	0.01	P ₂ O ₅	0.01
K ₂ O	0.05	K ₂ O	0.06
CaO	51.20	CaO	51.14
MnO	0.06	MnO	0.05
Fe ₂ O ₃	0.11	Fe ₂ O ₃	0.12
SO ₃	0.09	SO ₃	0.10
TiO ₂	-	TiO ₂	0.02
Sn	-	Sn	0.11
Sb ₂ O ₃	7.04	Sb ₂ O ₃	6.86
Ortalama Sb ₂ O ₃		%6.95	

Malzemelerin üretiminde esneklik özelliğine sahip olan silikon kauçuk sıvısı (katalizör ile birlikte) kullanılmıştır. Aydın Kompozit Şirketi'nden temin edilen AK-SİL RTV2 E-20 silikon kauçuk ve katalizör kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Kullanılan silikon kauçuk malzemenin özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : AK-SİL RTV2 E-20 Silikon Kauçuk özellikleri (Url-2).

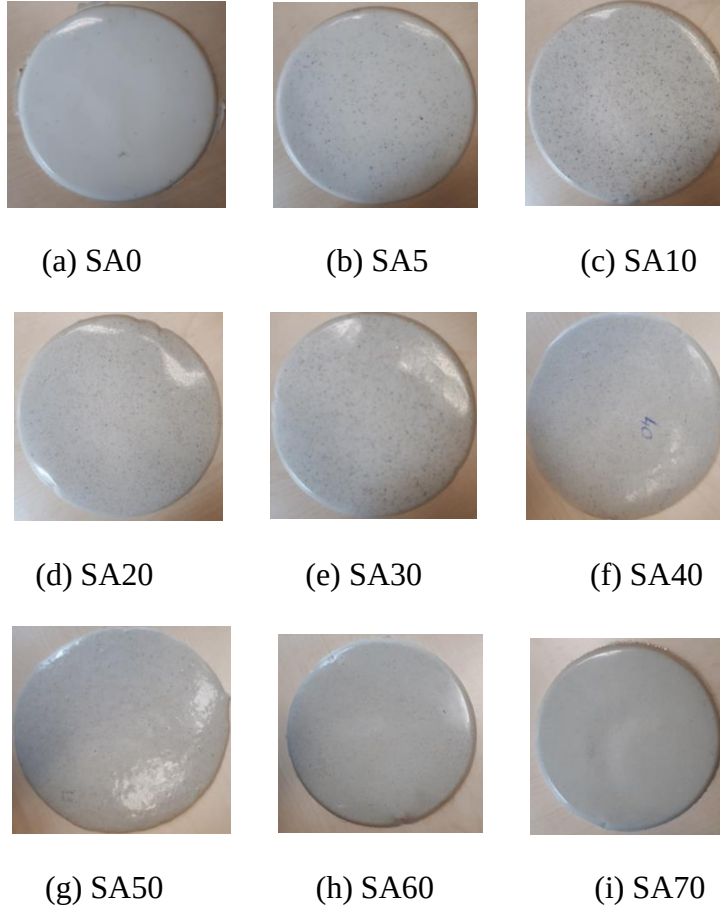
RTV2 E-20	
Model	E-20
Uzama (%)	555
Renk	White
Karıştırma Oranı (wt. %)	2.5 (100:2.5)
Uygulama süresi (Pot Life) (dk)	30-45
Donma süresi (saat)	6-8
Sertlik (A0) (SHORE)	20
Çekme Dayanımı (kgf / cm ²)	2.95
Yırtılma Dayanımı (kgf / cm)	27
Viskozite (Cps)	13500
Daralma oranı (%)	> 0.3%

Malzemelerin üretilmesi için 16,5 cm çapında ve 2,8'den 4,5 mm'e kadar kalınlıkları olan plastik kalıplar kullanılmıştır. Disk şeklindeki kalıplar yardımıyla kütlece %0 antimon cevheri oranından başlayarak %70'e kadar, toplamda 9 adet antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzeme üretilmiştir. Üretilen malzemeler, içeriğindeki kütlece antimon yüzdesine göre isimlendirilmiştir. Örneğin; içeriğinde kütlece %5 antimon cevheri, %95 silikon kauçuk barındıran malzeme SA5 olarak adlandırılmıştır. Üretilen malzemelerin kütlece yüzde oranları Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Üretilen antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemelerin kütlece oranları.

Malzeme Adı	Antimon Cevheri (kütlece %)	Silikon Kauçuk (kütlece %)
SA0	0	100
SA5	5	95
SA10	10	90
SA20	20	80
SA30	30	70
SA40	40	60
SA50	50	50
SA60	60	40
SA70	70	30

Silikon kauçuk sıvısı, kütlece %5 oranında katalizör ve Sb cevheri tozu bir kaba yerleştirilerek 60 saniye boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra, karışım kalıplara dökülmüştür. Tamamen donması ve homojen bir malzeme oluşması için, kalıplar 2-6 saat boyunca laboratuvarında bekletilmiştir. Donma gerçekleştikten sonra malzemeler, dikkatli bir şekilde kalıplardan çıkartılmıştır. Üretilen antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemelerin genel görünümü Şekil 4.4’te verilmiştir.



Şekil 4.4 : Antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemeler.

4.1.2 Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin hazırlanışı

Deneylerde kullanılan antimon konsantresi tozu Eti Bakır A.Ş. maden firmasından temin edilmiştir. Malzemelerin üretildiği antimon konsantresi tozu Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : Antimon konsantresi tozu.

Temin edilen antimon konsantre tozu 500 μm 'lik elekler kullanılarak ortalama parçacık boyutu 500 μm 'nin altında olacak şekilde elenmiştir. Antimon konsantre tozunun temin edilen Eti Bakır A.Ş.'den alınan içeriği Çizelge 4.4'de verilmiştir (Url-3).

Çizelge 4.4 : Malzemelerin hazırlanışında kullanılan antimon konsantresinin içeriği.

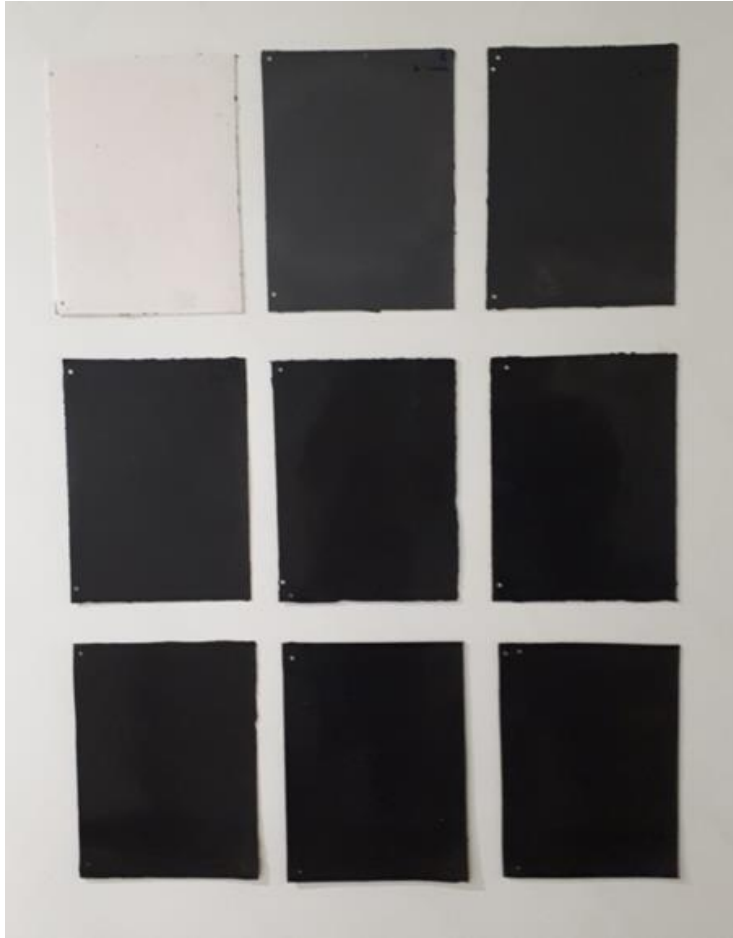
Safsızlıklar (kütlece %)	
S	28
Fe	1
SiO ₂	0.95
Pb	0.15
Al	0.1
As	0.075
Sn	0.125
Sb	69.00

Aydın Kompozit Şirketi'nden temin edilen AK-SIL RTV2 E-20 silikon kauçuk ve katalizör kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Malzemelerin üretiminde 20x30 cm^2 yüzey alanı ve 0,1 cm kalınlığı olan kalıplar kullanılmıştır. Kütlece %0 antimon konsantresi tozu oranından başlayarak %70'e kadar, toplamda 9 adet Sb konsantresi katkılanmış silikon kauçuk malzeme üretilmiştir. Üretilen malzemeler içeriğindeki kütlece antimon yüzdesine göre isimlendirilmiştir. Örneğin; içeriğinde kütlece %5 antimon konsantresi, %95 silikon kauçuk barındıran malzeme SAC5 olarak adlandırılmıştır. Üretilen antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin kütlece yüzde oranları Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin kütlece oranları.

Malzeme Adı	Antimon Konsantresi (kütlece %)	Silikon Kauçuk (kütlece %)
SAC0	0	100
SAC5	5	95
SAC10	10	90
SAC20	20	80
SAC30	30	70
SAC40	40	60
SAC50	50	50
SAC60	60	40
SAC70	70	30

Silikon kauçuk, kütlece %3-5 oranında katalizör ve antimon konsantresi tozu bir kaba yerleştirilerek 60 saniye boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra, karışım kalıplara dökülmüştür. Tamamen donması ve homojen bir malzeme oluşması için, kalıplar 2-6 saat boyunca laboratuvarda bekletilmiştir. Donma gerçekleştikten sonra malzemeler, dikkatli bir şekilde kalıplardan çıkartılmıştır. Üretilen antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin genel görünümü Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6 : Sb konsantresi katkılanmış silikon kauçuk malzemeler.

4.1.3 Demir konsantresi katkı silikon kauçuk malzemelerin hazırlanışı

Demir konsantresi EuroAsia A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Malzemelerin üretildiği demir konsantresi Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Demir tozu konsantresi tozunun içeriği Çizelge 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.7 : Demir konsantresi tozu.

Çizelge 4.6 : Malzemelerin üretiminde kullanılan demir konsantresinin içeriği (Büyük, 2018).

Safsızlıklar (kütlece %)			
SiO ₂	5.77	As	<0.01
Mn	1.02	Cs	0.01
Al ₂ O ₃	0.90	Ni	<0.01
CaO	0.20	Zn	0.02
MgO	0.79	Pb	0.03
Na ₂ O	0.26	Cu	<0.01
K ₂ O	0.01	Sn	<0.01
TiO ₂	0.01	Mo	<0.01
P	0.02	V	<0.01
S	0.53		
Toplam Fe yüzdesi	62.73		

Demir konsantresi, 1 mm’lik elekler kullanılarak ortalama parçacık boyutu 1 mm’nin altında olacak şekilde elenmiştir. Aydın Kompozit Şirketi’nden temin edilen AK-SIL RTV2 E-20 silikon kauçuk ve katalizör kullanılarak numuneler hazırlanmıştır.

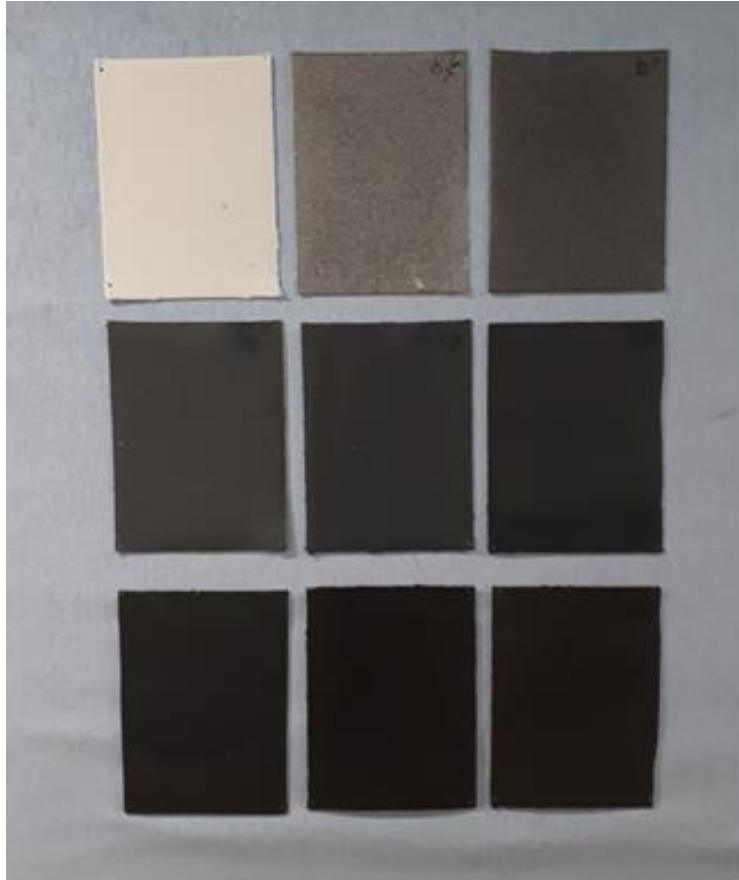
Malzemeleri üretmek için 20x30 cm² yüzey alanı ve 0,1 cm kalınlığı olan kalıplar kullanılmıştır. Kütlece %0 demir konsantresi oranından başlayarak %70’e kadar, toplamda 9 adet demir konsantresi katkı silikon kauçuk malzeme üretilmiştir. Üretilen malzemeler içeriğindeki kütlece yüzde demir konsantresi oranına göre isimlendirilmiştir. Örneğin; içeriğinde kütlece %5 demir konsantresi, %95 silikon

kauçuk barındıran malzeme DT5 olarak adlandırılmıştır. Üretilen demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin kütlece yüzde oranları Çizelge 4.7’te verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin kütlece demir konsantresi ve silikon kauçuk oranları.

Malzeme Adı	Demir Konsantresi (kütlece %)	Silikon Kauçuk (kütlece %)
DT0	0	100
DT5	5	95
DT10	10	90
DT20	20	80
DT30	30	70
DT40	40	60
DT50	50	50
DT60	60	40
DT70	70	30

Tamamen donması ve homojen bir malzeme oluşması için, kalıplar 2-6 saat boyunca laboratuvarında bekletilmiştir. Donma gerçekleştikten sonra malzemeler, dikkatli bir şekilde kalıplardan çıkartılmıştır. Üretilen demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin genel görünümü Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8 : Demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemeler.

4.2 Deneyde Kullanılan Cihazların Tanıtımı

Bu yüksek lisans tez çalışmasında deneysel çalışmalarda kullanılan cihazlar aşağıdaki bölümlerde tanıtılmaktadır.

4.2.1 X-ışını tüpü

Deneylerde, Yeditepe Üniversitesi Hastanesi, Radyoloji bölümündeki Philips Digital Diagnost X-ışını tüpü kullanılmıştır. Philips Digital Diagnost X-ışını tüpünün görünümü Şekil 4.9’da ve tüpün özellikleri Çizelge 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.9 : Philips Digital Diagnost X-ışını tüpü.

Çizelge 4.8 : X-ışını tüpünün özellikleri.

Philips Digital Diagnost X-ışını tüpü	
Maksimum Tüp Voltajı	150 kV
Maksimum Tüp Akımı (80 kV’da)	800 mA
Işınlama Süresi	1 ms - 4s
mAs Üretimi	0.4 mAs - 850 mAs
Doğal Filtrasyon	2.5 mm Al

4.3 Dedektör

Deneylerde RaySafe Xi R/F dedektörü kullanılmıştır. RaySafe Xi R/F dedektörü, X-ışını ile görüntüleme uygulamalarında radyasyon dozunun ölçümünde kullanılan bir katıhal dedektördür. Dedektör ve doz görüntüleme ünitesinin genel görünümü Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.10 : RaySafe Xi R/F dedektör ve doz görüntüleme ünitesi.

RaySafe Xi R/F dedektör, R/F yüksek ve R/F düşük olmak üzere iki sensöre sahiptir. R/F yüksek X-ışını tüpü ve dedektör arasında bir fantom bulunmadan alınmış olan yüksek doz hızlarını ölçmek için, R/F düşük ise düşük doz hızlarını dedekte etmek için dizayn edilmiştir. Dedektörün ölçüm modu Çizelge 4.9’da, özellikleri Çizelge 4.10’de verilmiştir.

Çizelge 4.9 : RaySafe Xi R/F dedektörünün ölçüm modu.

Parametre	Ölçüm Birimi
kVp	kVp (uygun sinyal seviyelerindeki R/F yüksek sensörü için) veya kV
Doz	Gy (Hava Kerma) veya R (ışınlama)
Doz Hızı	s, dk, h başına Gy veya R
Zaman	ms, s
HVL	mm Al
Toplam Filtrasyon	mm Al

Çizelge 4.10 : RaySafe Xi R/F dedektörünün özellikleri.

Doz (R/F düşük)	
Aralık	10 nGy-9999 Gy (1 µR-9999 R)
Tetiklenme Seviyesi	200 nGy/s (1.4 mR/dk)
Belirsizlik	%5 (40-150 kVp, HVL:1.5-14 mm Al) ya da ± 10 nGy (1 µR)
Doz (R/F yüksek)	
Aralık	10 µGy-9999 Gy (1 mR-9999 R)
Tetiklenme Seviyesi	100 µGy/s (0.7 R/dk)
Belirsizlik	%5 (40-150 kVp, HVL:1.5-14 mm Al) ya da ± 10 µGy (1 mR)

4.4 Deney Düzeneği

Bu Yüksek Lisans tez çalışmasında deneyler TS EN 61331-1 standardındaki dar demet ve geniş demet geometrisine uyumlu olarak gerçekleştirilmiştir. Standartta verilen geometriyi sağlamak için diyafram olarak kullanılmak üzere sırasıyla 1, 2, 3 ve 10 cm açıklığı olan 4 adet ve radyasyonun şiddetini 10^5 'te birine indiren 1 adet 20x20 cm ebatlarında, 4 mm kalınlığında kurşun plakalar hazırlanmıştır. 1 ve 2 cm açıklığa sahip plakalar dar demet geometrisi oluşturulurken, 3 ve 10 cm açıklığa sahip plakalar geniş demet geometrisi oluşturulurken kullanılmıştır. Şekil 4.11 hazırlanan plakaları göstermektedir. Standartta uygun dar ve geniş demet geometrisinin özellikleri aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.



Şekil 4.11 : TS EN 61331-1 standardına uygun dar ve geniş demet geometrilerinde kullanılan diyaframlar.

4.4.1 TS EN 61331-1 standardı dar demet geometrisi

Koruyucu bir malzeme için dar demet geometrisi zayıflatma oranı (F_N), TS EN 61331-1 Standardına uygun dar demet geometrisine göre yapılan ölçümlerle hesaplanmaktadır. Dar demet geometrisine uygun olarak hazırlanan deney düzeneği, koruyucu malzemenin X-ışını zayıflatmasında birincil fotonları ölçmek için tasarlanmıştır. Bu geometride, Compton saçılması gibi ikincil fotonların radyasyon

dedektörüne ulaşma olasılığı minimize edilmektedir (TS EN, 2014).

TS EN 61311-1 Standardına göre dar demet geometrisi sağlandıktan sonra, zayıflatma oranı F_N ;

$$F_N = \frac{K_0 - K_B}{K_1 - K_B} \quad (4.1)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Burada,

F_N : Dar demet koşulu için zayıflatma oranı

K_0 : Radyasyon demetinde test objesi olmadan alınan Hava Kerma ölçümleri

K_1 : Radyasyon demetinde test objesi varken alınan Hava Kerma ölçümleri

K_B : Radyasyon demetinde zayıflatma oranı 10^5 olan bir malzeme varken alınan Hava Kerma ölçümlerini ifade etmektedir.

4.4.2 TS EN 61331-1 standardı geniş demet geometrisi

Koruyucu bir malzeme için geniş demet geometrisi zayıflatma oranı (F_B), TS EN 61331-1 Standardına uygun geniş demet geometrisine göre yapılan ölçümlerle hesaplanmaktadır. Geniş demet geometrisine uygun olarak hazırlanan deney düzeneği, koruyucu malzemenin X-ışını zayıflatmasında koruyucu malzemedan saçılan ikincil fotonların da dahil edilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Compton saçılması gibi ikincil fotonların ortaya çıkma olasılığı bu düzeneikle maksimize edilmektedir (TS EN, 2014).

TS EN 61311-1 Standardına göre geniş demet geometrisi sağlandıktan sonra, geniş demet geometrisi için F_B zayıflatma oranı;

$$F_B = \frac{K_0 - K_B}{K_1 - K_B} \quad (4.2)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada;

F_B : Geniş demet koşulu için zayıflatma oranı

K_0 : Radyasyon demetinde test objesi olmadan alınan Hava Kerma ölçümleri

K_1 : Radyasyon demetinde test objesi varken alınan Hava Kerma ölçümleri

K_B : Radyasyon demetinde zayıflatma oranı 10^5 olan bir malzeme varken alınan Hava Kerma ölçümlerini ifade etmektedir.

4.4.3 Yığılma Faktörü

Yığılma faktörü B , TS EN 61331-1 standardına göre dar demet geometrisi için zayıflatma oranı (F_N) ile geniş demet geometrisi için zayıflatma oranı (F_B) kullanılarak Denklem (4.3) ile hesaplanmaktadır.

$$B = \frac{F_N}{F_B} \quad (4.3)$$

4.5 Deneylerin Yapılışı

Bu Yüksek Lisans tez çalışmasında, üretilen antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir tozu katkılı silikon kauçuk malzemelerin X-ışını zayıflatma oranlarını belirlemek için TS EN 61331-1 standardına uygun dar ve geniş demet geometrileri hazırlanmıştır. Dar demet ve geniş demet geometrisiyle deneylerin yapılışı aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

4.5.1 Dar demet geometrisi deneylerinin yapılışı

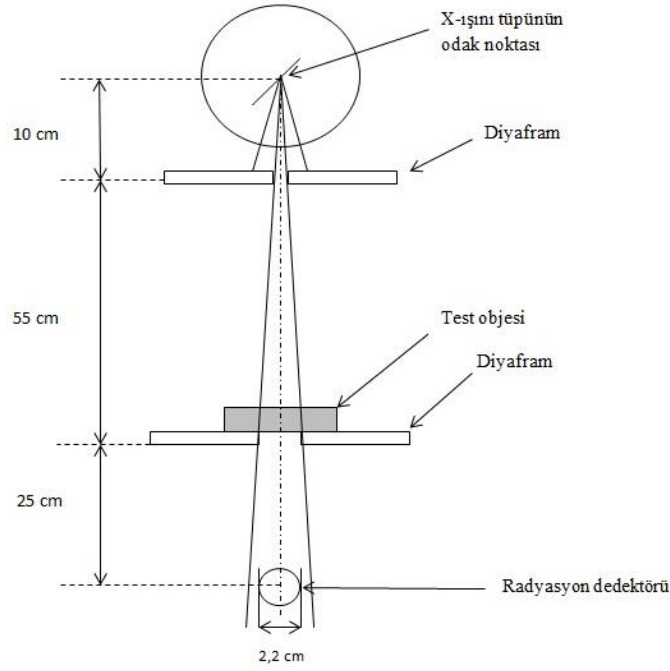
TS EN 61331-1 standardına göre oluşturulan dar demet geometrisi Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12 : TS EN 61331-1 standardına göre kurulan dar demet geometrisi.

Geometri oluşturulurken TS EN 61331-1 standardına göre dar demet geometrisi koşulunu sağlaması için, dedektörün referans noktasından test objesine olan

uzaklığın dedektör çapının (2.2 cm) 10 katından fazla olmasına dikkat edilmiştir. 1 cm çapında açıklığa sahip diyafram X-ışını tüpünün ağzına yapıştırılmıştır ve tüpün odak noktasından 10 cm uzaklıktadır. 2 cm çapında açıklığa sahip diyafram ise dedektörle arasında 25 cm mesafe olacak şekilde yerleştirilmiştir. Tüpün odak noktası ile dedektör arası mesafe 90 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. Oluşturulan dar demet geometrisinin şematik görüntüsü Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13 : Oluşturulan dar demet geometrisinin şematik görüntüsü.

Dar demet geometrisi oluşturulduktan sonra dedektöre yakın olan diyaframın üzerinde malzeme olmadan farklı ışınlama şartları için doz ölçümleri alınmıştır. Bu ışınlama şartları Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.11 : Dar demet geometrisi için ışınlama şartları

kVp	mAs	ms
50	80	123
60	63	96,9
70	50	76,9
81	32	51,8
90	25	45
102	20	40,8
125	12,5	31,2
141	10	28,2

Bu ölçümler alındıktan sonra numuneler dedektöre yakın olan diyaframa yerleştirilerek aynı ışınlama şartlarıyla doz ölçümleri alınmıştır. Dar demet

geometrisinde, üretilen esnek malzemelerin X-ışını zayıflatmasının ölçüldüğü düzenek Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



Şekil 4.14 : Dar demet geometrisinde test malzemelerinin konumu.

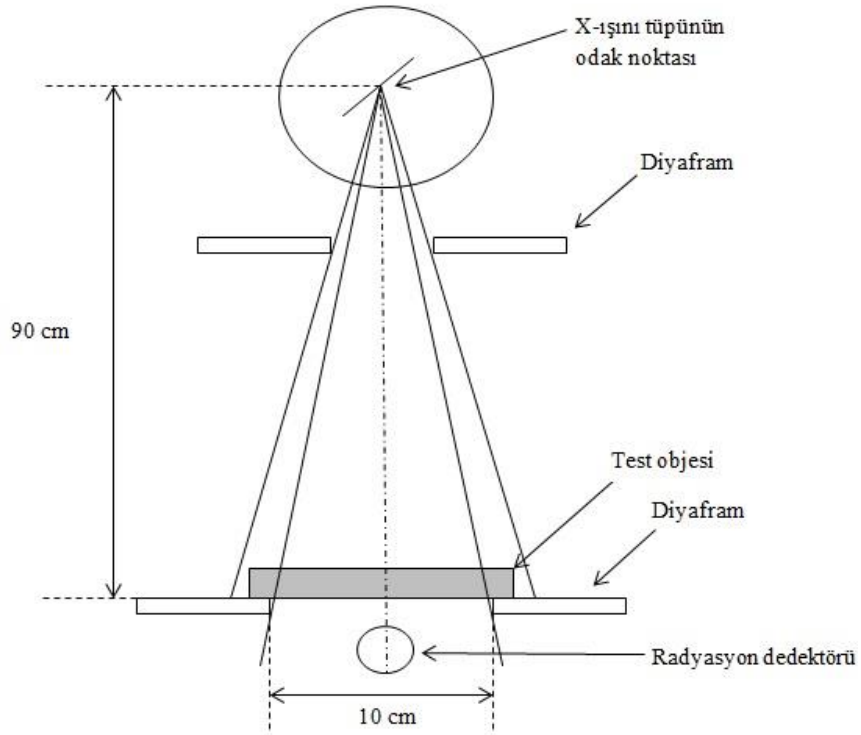
4.5.2 Geniş demet geometrisi deneylerinin yapılışı

TS EN 61331-1 Standardına göre deneysel çalışmalarda kullanılan geniş demet geometrisi Şekil 4.15'te verilmiştir. Geometri oluşturulurken TS EN 61331-1 Standardına göre geniş demet geometrisinin sağlanması için 10 cm açıklığa sahip olan bir diyafram dedektörün hemen üzerine yerleştirilmiştir. Tüpün odak noktası ile dedektör arasındaki mesafe 90 cm'dir. 3 cm çapında açıklığa sahip olan diyafram ise X-ışını tüpünün ağzına yapıştırılmıştır ve tüpün odak noktasından 10 cm uzaklıktadır.



Şekil 4.15 : TS EN 61331-1 Standardına göre oluşturulan geniş demet geometrisi.

Oluşturulan geniş demet geometrisinin şematik görüntüsü Şekil 4.16’da gösterilmiştir.



Şekil 4.16 : TS EN 61331-1 Standardına göre kurulan geniş demet geometrisinin şematik görüntüsü.

Geniş demet geometrisi oluşturulduktan sonra dedektöre yakın konumlandırılmış olan diyaframın üzerinde malzeme olmadan farklı ışınlama şartları için doz ölçümleri alınmıştır. Bu ışınlama şartları Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12 : Geniş demet geometrisi için ışınlama şartları.

kVp	mAs	ms
50	50	76,9
60	40	61,5
70	32	49,2
81	20	32,4
90	16	28,8
102	12,5	25,5
125	8	20
141	6,3	17,7

Bu ölçümler alındıktan sonra numuneler dedektöre yakın konumlandırılmış diyaframa yerleştirilerek aynı ışınlama şartlarıyla doz ölçümleri alınmıştır. Üretilen esnek malzemelerin geniş demet geometrisinde X-ışınlarını zayıflatma ölçümleri için hazırlanan düzenek Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.17 : Geniş demet geometrisinde numelerin konumu.

4.6 Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Karakterizasyonu

Deneylerde kullanılan malzemelerde antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresinin silikon kauçuk malzemelerin içindeki dağılımını (homojenliğini) incelemek için homojenlik testleri, malzemelerin esneklik özelliklerini incelemek için çekme testleri yapılmıştır.

4.6.1 Malzemelerin homojenlik testleri

Antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin homojenliğini incelemek üzere malzemelerin X-ışını radyografisi çekilmiştir. X-ışını radyografileri, Yeditepe Üniversitesi Medikal Fizik Laboratuvarı'nda bulunan PHYWE XR 4.0 X-ray ünitesi kullanılarak çekilmiştir. Radyografi uygulamalarında kullanılan X-ışını ünitesi Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18 : PHYWE XR 4.0 X-ışını ünitesi.

Radyografileri çekerken kullanılan parametreler; anod voltajı 35 kV ve anod akımı 1 mA olup bu X-ışını cihazı için maksimum tüp parametreleridir. Çekilen radyografiler kullanılarak malzemelerin üretim kalitesi ortaya çıkarılarak numunelerin homojenlikleri incelenmiştir. Malzemelerin üretim koşulları radyografi sonuçlarına göre optimize edilmiştir.

4.6.2 Malzemelerin esneklik testleri

Malzemelerin esneklik testleri İTÜ, Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mekanik Metalurji Laboratuvarında yapılmıştır. Üretilen antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir tozu konsantresi numuneler, esneklik testlerinin yapılabilmesi için kalıplar yardımıyla Şekil 4.19’da görülen forma getirilmiştir. Herbir malzeme için esneklik testi yapılmak üzere 3 şablon çıkartılmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır.



Şekil 4.19 : Esneklik testleri yapılmak üzere hazırlanan numuneler.

Numuneler esneklik testi için uygun şekle getirildikten sonra, SHIMADZU AGS-J adlı cihaz kullanılarak esneklik testleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan cihaz Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20 : Shimadzu AGS-J.

Kelebek şeklindeki malzemeler iki ucundan, Şekil 4.21’de görülen kalın bölgelerin tamamı cihazın çene kısımlarına sıkıştırılacak şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra numuneler, üst çene 50 mm/dk hızla hareket edecek şekilde çekilmiştir. Başlangıçta 40 mm olarak ölçülen orta kısımların numune kopmadan hemen önceki boyları ölçülerek numunelerin uzama miktarları belirlenmiştir. Şekil 4.21’de esneklik testi sırasında cihazın çeneleri arasına sıkıştırılan numune görülebilmektedir.



Şekil 4.21 : Esneklik testi sırasında numunenin görünümü.

TRAPEZUM2 programı kullanılarak, numunelerin uzama miktarının yanında, kopma anındaki yük ve malzemenin taşıyabileceği stres bulunmuştur. Malzemenin taşıyabileceği stres, uygulanan yükün malzemenin yüzey alanına bölünmesiyle bulunmaktadır.

5. DENEY SONUÇLARI

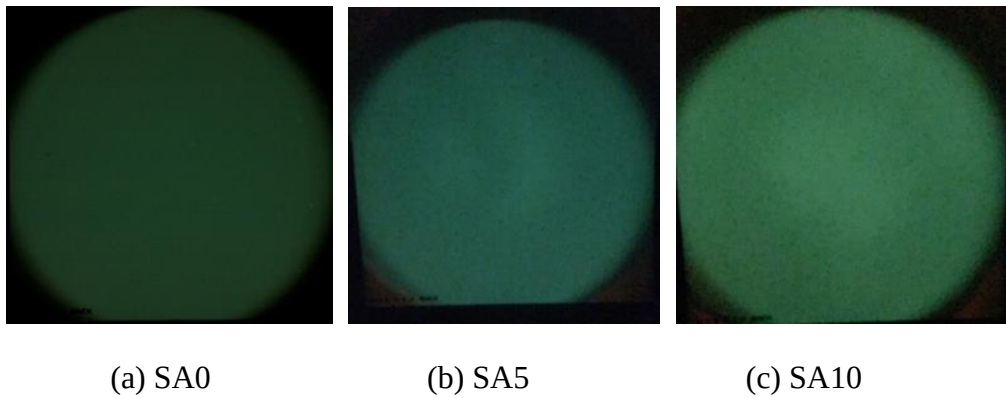
Bu yüksek lisans tezinde, koruyucu malzeme olarak üretilen antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin X-ışını zayıflatma oranlarının bulunmasına ilişkin TS EN 61311-1 Standardına uygun olarak dar ve geniş demet geometrisinde deneyler yapılmıştır. Öncelikle malzemelerin karakterizasyonuna ilişkin olarak homojenlik ve esneklik testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylere ilişkin deney sonuçları aşağıdaki bölümlerde verilmektedir.

5.1 Üretilen Malzemelerin Karakterizasyonu

Üretilen malzemelerde antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresinin silikon kauçuk içinde dağılımının belirlenmesi için yapılan homojenlik testlerinin ve malzemelerin esneklik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan esneklik testlerinin sonuçları aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

5.1.1 Homojenlik testleri deney sonuçları

Antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin homojenliğini incelemek üzere X-ışını radyografi testi uygulanmıştır. SA, SAC ve DT malzemeleri için elde edilen radyografi sonuçları sırasıyla Şekil 5.1, Şekil 5.2, ve Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.1 : Sb cevheri katkılanmış silikon kauçuk malzemelerin radyografileri



(d) SA20

(e) SA30

(f) SA40

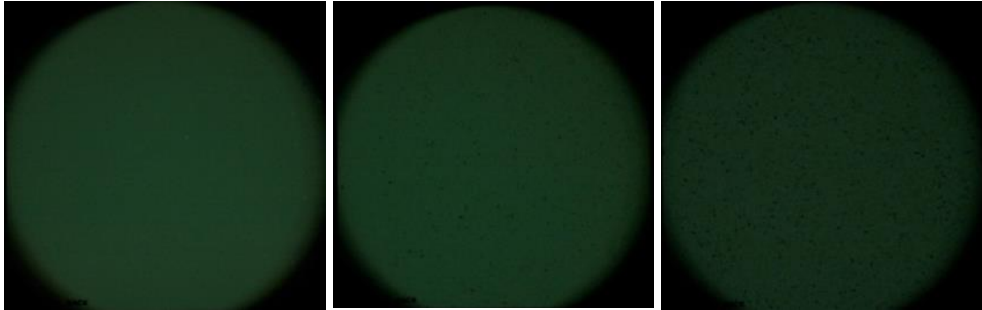


(g) SA50

(h) SA60

(i) SA70

Şekil 5.1 (devam) : Sb cevheri katkılanmış silikon kauçuk malzemelerin radyografileri.



(a) SAC0

(b) SAC5

(c) SAC10

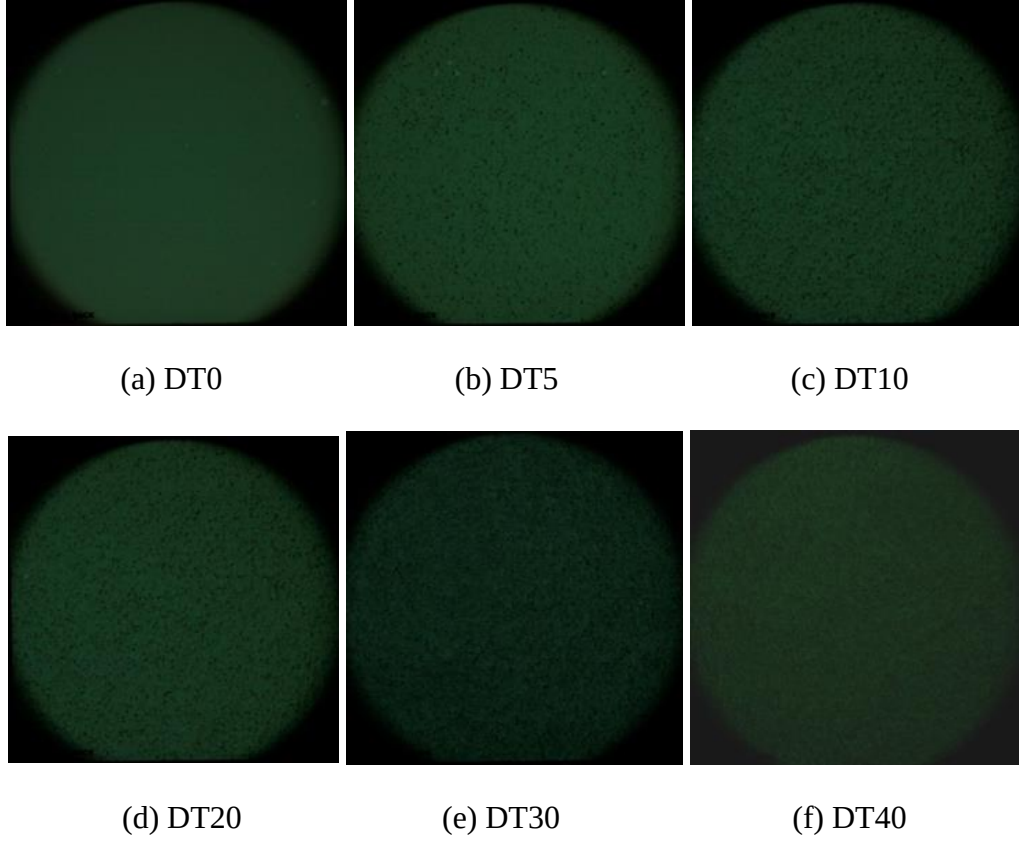


(d) SAC20

(e) SAC30

(f) SAC40

Şekil 5.2 : Sb konsantresi katkılanmış silikon kauçuk malzemelerin radyografileri.



Şekil 5.3 : Demir konsantresi katkılanmış silikon kauçuk malzemelerin radyografileri.

5.1.2 Esneklik testleri deney sonuçları

Üretilen antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin esneklik testleri sonuçları bu bölümde verilmiştir. Çizelge 5.1 antimon cevheri, Çizelge 5.2 antimon konsantresi, Çizelge 5.3 demir konsantresi esneklik testi sonuçlarını göstermektedir. Çizelgelerde % uzama miktarının yanında, malzemenin kopma anındaki yük ve malzemelerin taşıyabileceği stres de verilmektedir.

Çizelge 5.1 : Antimon Cevheri Esneklik Testi Sonuçları.

Numune İsmi	Maksimum Yük (N)	Stres (MPa)	Uzama Miktarı	% Uzama
SA5	22,6	1,16	86,3	115,75
SA10	13,88	1,07	85,6	114,00
SA20	18,1	0,79	74,3	85,75
SA30	18,02	0,87	81,6	104,00
SA40	17,2	0,77	74,5	86,25
SA50	17,11	0,64	77,5	93,75
SA60	18,7	0,55	61,6	54,00
SA70	29,07	0,71	52,1	30,25

Çizelge 5.2 : Antimon Konsantresi Esneklik Testi Sonuçları.

Numune İsmi	Maksimum Yük (N)	Stres (MPa)	Uzama Miktarı	% Uzama
SAC5	13,7	1,14	107,25	168,13
SAC10	13,3	1,1	97,5	143,75
SAC20	13,7	1,14	90,65	126,63
SAC30	16,91	0,86	97	142,50
SAC40	13,4	0,95	81,63	104,08
SAC50	12,85	0,88	85,6	114,00
SAC60	15,22	0,97	70,03	75,08
SAC70	15,45	0,8	58,3	45,75

Çizelge 5.3 : Demir Konsantresi Esneklik Testi Sonuçları.

Numune İsmi	Maksimum Yük (N)	Stres (MPa)	Uzama Miktarı (mm)	% Uzama
DT5	10,9	1,13	101,3	153,25
DT10	10,8	1,28	102,6	156,50
DT20	10,7	0,88	101	152,50
DT30	9,22	0,73	84	110,00
DT40	8,91	0,67	89,6	124,00
DT50	9,68	0,64	85,2	113,00
DT60	9,3	0,67	78	95,00
DT70	8,15	0,47	61,3	53,25

5.2 TS EN 61331-1 Standardına Göre Zayıflatma Oranları

Üretilen antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin dar demet ve geniş demet geometrisindeki zayıflatma oranları (F_N ve F_B) aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

5.2.1 Dar ve geniş demet geometrisine göre zayıflatma oranları

Bu bölümde numunelerden %50 ve %70 katkı oranına sahip antimon cevheri, demir konsantresi ve antimon konsantresi katkılı malzemelerin zayıflatma oranlarının ortaya çıkarılması fikri benimsenmiştir. Öncelikle bu malzemelerin incelenme nedeni, %50 katkı oranına sahip malzemelerde silikon ve katkı maddesinin eşit oranda yer alması, %70 oranda katkı içerenlerin ise esnekliği sağlayan en yüksek orana sahip olmasıdır.

Antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin, TS EN 61331-1 standardına uygun olarak oluşturulan dar ve geniş demet geometrilerinde, X-ışını zayıflatma özellikleri incelenirken öncelikle X-ışını tüpü ile radyasyon dedektörü arasında herhangi bir malzeme olmadan doz ölçümleri

(I_0) alınmıştır. Daha sonra her bir malzeme X-ışını tüpü ile dedektör arasına konularak 50, 60, 70, 81, 90, 102, 125 ve 141 kV tüp gerilimlerinde doz ölçümleri alınmıştır. I_0 ve her bir malzemeden geçen radyasyon dozu değerleri Ek A'da verilmiştir. Her bir malzemeden geçen radyasyon dozları deneysel olarak bulunduğundan sonra Denklem 4.1 ve Denklem 4.2 kullanılarak dar ve geniş demet geometrisi için zayıflatma oranları hesaplanmıştır.

5.2.1.1 SA50 ve SA70 malzemelerinin dar ve geniş demet geometrisinde zayıflatma oranları

%50 ve %70 antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemelerin, dar demet ve geniş demet geometrileri için zayıflatma oranları Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'de verilmiştir.

Çizelge 5.4 : SA50 ve SA70 malzemelerin dar demet geometrisinde zayıflatma oranları.

Işınlama Şartları			Dar Demet Zayıflatma Oranları (F_N)		
kVp	mAs	ms	SA0	SA50	SA70
50	80	123	1,312	4,218	12,294
60	63	96,9	1,268	3,498	8,758
70	50	76,9	1,186	3,047	6,655
81	32	51,8	1,215	2,707	5,339
90	25	45	1,197	2,513	4,591
102	20	40,8	1,175	2,286	3,907
125	12,5	31,2	1,154	2,034	3,178
141	10	28,2	1,143	1,918	2,870

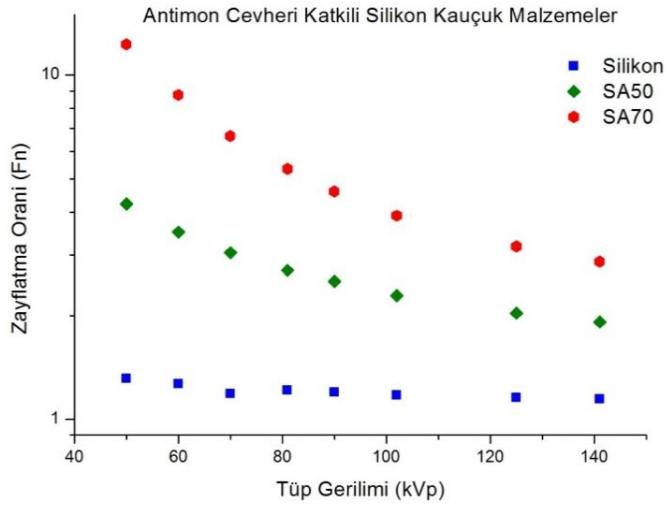
Çizelge 5.5 : SA50 ve SA70 malzemeler için geniş demet geometrisinde zayıflatma oranları.

Işınlama Şartları			Geniş Demet Zayıflatma Oranları (F_B)		
kVp	mAs	ms	SA0	SA50	SA70
50	50	76,9	1,268	3,842	9,451
60	40	61,5	1,229	3,182	6,731
70	32	49,2	1,236	2,759	5,264
81	20	32,4	1,181	2,491	4,302
90	16	28,8	1,156	2,260	3,726

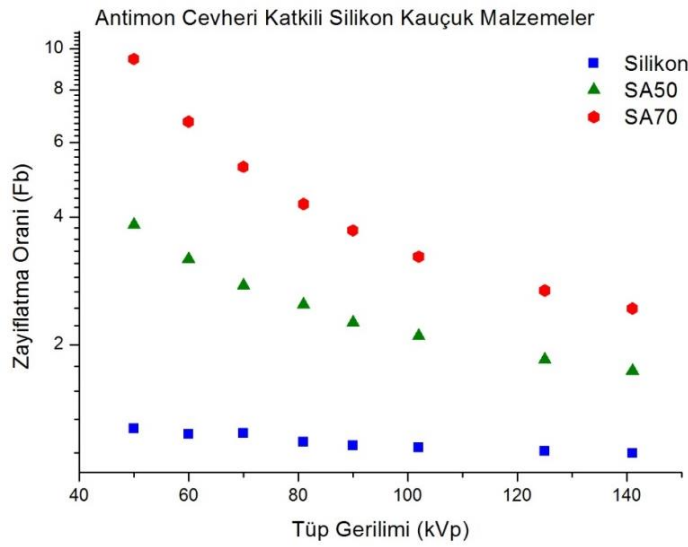
Çizelge 5.5 (devam) : SA50 ve SA70 malzemeler için geniş demet geometrisinde zayıflatma oranları.

Işınlama Şartları			Geniş Demet Zayıflatma Oranları (F_B)		
kVp	mAs	ms	SA0	SA50	SA70
102	12,5	25,5	1,143	2,097	3,230
125	8	20	1,121	1,847	2,687
141	6,3	17,7	1,108	1,737	2,438

Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'ten hareketle çizdirilen grafikler Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4 : SA0, SA50 ve SA70 malzemelerin dar demet geometrisinde farklı X-ışını tüp gerilimlerine göre zayıflatma oranları.



Şekil 5.5 : SA0, SA50 ve SA70 malzemelerin geniş demet geometrisinde farklı X-ışını tüp gerilimlerine göre zayıflatma oranları.

5.2.1.2 SAC50 ve SAC70 malzemelerin dar ve geniş demet geometrilerinde zayıflatma oranları

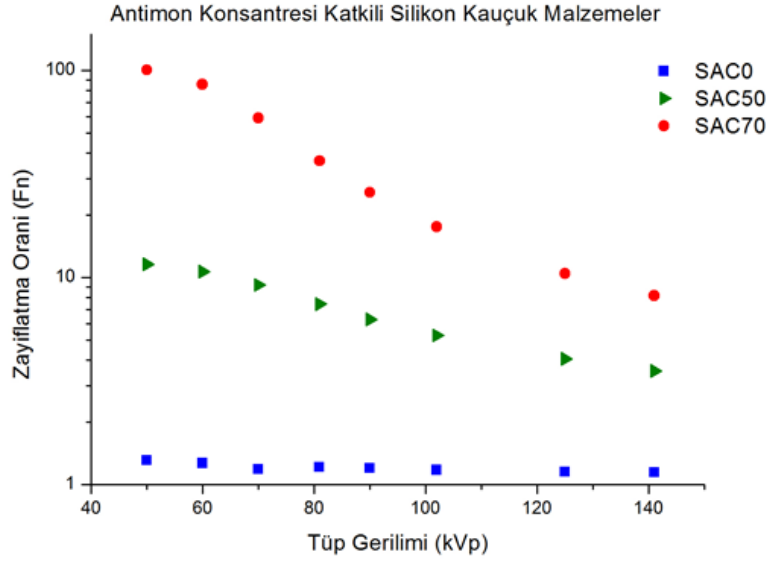
%50 ve %70 antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin, dar ve geniş demet geometrileri için, F_N ve F_B zayıflatma oranları sırasıyla Çizelge 5.6 ve Çizelge 5.7’de verilmiştir. Çizelge 5.6 ve Çizelge 5.7’den hareketle çizdirilen grafikler Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.6 : SAC50 ve SAC70 malzemeleri için dar demet geometrisinde farklı tüp gerilimlerine göre zayıflatma oranları.

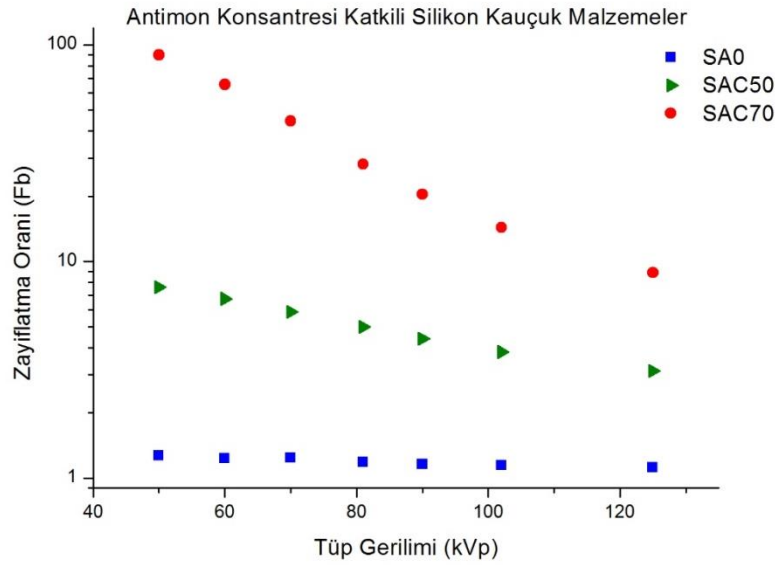
Işınlama Şartları			Dar Demet Zayıflatma Oranları (F_N)		
kVp	mAs	ms	SAC0	SAC50	SAC70
50	80	123	1,312	11,604	100,646
60	63	96,9	1,268	10,708	85,638
70	50	76,9	1,186	9,209	59,012
81	32	51,8	1,215	7,449	36,611
90	25	45	1,197	6,288	25,793
102	20	40,8	1,175	5,250	17,619
125	12,5	31,2	1,154	4,053	10,455
141	10	28,2	1,143	3,545	8,170

Çizelge 5.7 : SAC50 ve SAC70 malzemeleri için geniş demet geometrisinde farklı tüp gerilimlerine göre zayıflatma oranları.

Işınlama Şartları			Geniş Demet Zayıflatma Oranları (F_B)		
kVp	mAs	ms	SAC0	SAC50	SAC70
50	50	76,9	1,268	7,619	89,845
60	40	61,5	1,229	6,728	65,543
70	32	49,2	1,236	5,841	44,493
81	20	32,4	1,181	4,983	28,099
90	16	28,8	1,156	4,395	20,430
102	12,5	25,5	1,143	3,822	14,337
125	8	20	1,121	3,116	8,874
141	6,3	17,7	1,108	2,804	7,034



Şekil 5.6 : SAC0, SAC50 ve SAC70 malzemelerin dar demet geometrisinde farklı tüp gerilimlerine göre zayıflatma oranları.



Şekil 5.7 : SAC0, SAC50 ve SAC70 malzemelerin geniş demet geometrisinde farklı tüp gerilimlerine göre zayıflatma oranları

5.2.1.3 DT50 ve DT70 malzemelerinin dar ve geniş demet geometrilerinde zayıflatma oranları

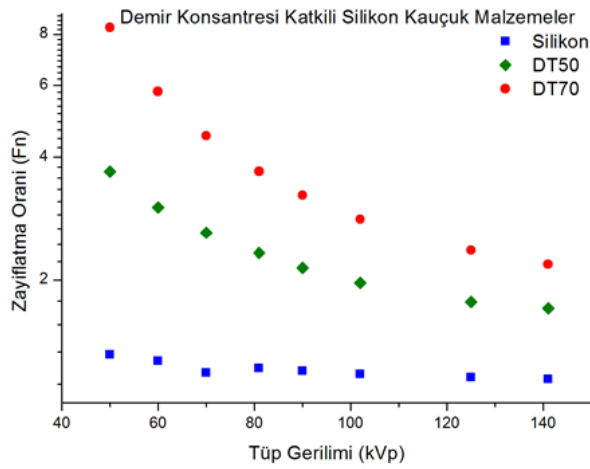
%50 ve %70 demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin, dar ve geniş demet geometrileri için, F_N ve F_B zayıflatma oranları sırasıyla Çizelge 5.8 ve Çizelge 5.9’da verilmiştir. Çizelge 5.8 ve Çizelge 5.9’dan hareketle çizdirilen grafikler Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 5.8 : DT50 ve DT70 için dar demet geometrisinde zayıflatma oranları.

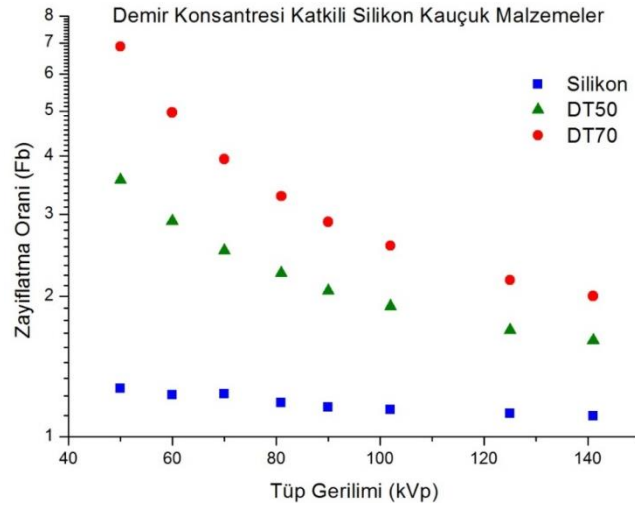
Işınlama Şartları			Dar Demet Zayıflatma Oranları (F_N)		
kVp	mAs	ms	DT0	DT50	DT70
50	80	123	1,312	3,688	8,317
60	63	96,9	1,268	3,012	5,799
70	50	76,9	1,186	2,611	4,515
81	32	51,8	1,215	2,330	3,691
90	25	45	1,197	2,141	3,226
102	20	40,8	1,175	1,968	2,816
125	12,5	31,2	1,154	1,767	2,366
141	10	28,2	1,143	1,704	2,185

Çizelge 5.9 : DT50 ve DT70 için geniş demet geometrisinde zayıflatma oranları.

Işınlama Şartları			Geniş Demet Zayıflatma Oranları (F_B)		
kVp	mAs	ms	DT0	DT50	DT70
50	50	76,9	1,268	3,554	6,875
60	40	61,5	1,229	2,902	4,965
70	32	49,2	1,236	2,508	3,943
81	20	32,4	1,181	2,245	3,283
90	16	28,8	1,156	2,056	2,889
102	12,5	25,5	1,143	1,905	2,569
125	8	20	1,121	1,692	2,170
141	6,3	17,7	1,108	1,607	2,003



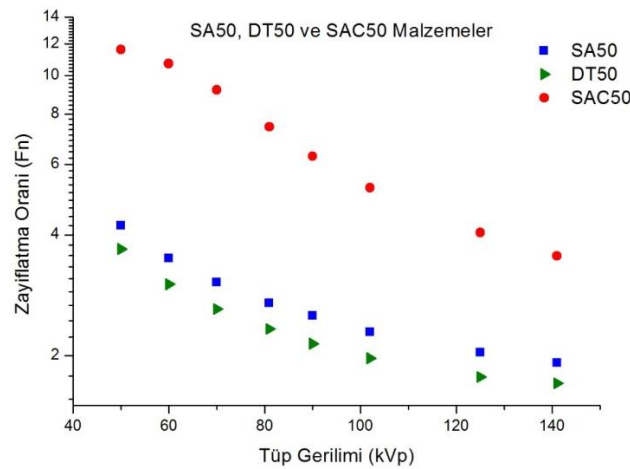
Şekil 5.8 : DT0, DT50 ve DT70 malzemelerin dar demet geometrisinde farklı X-ışını tüp gerilimlerine göre zayıflatma oranları.



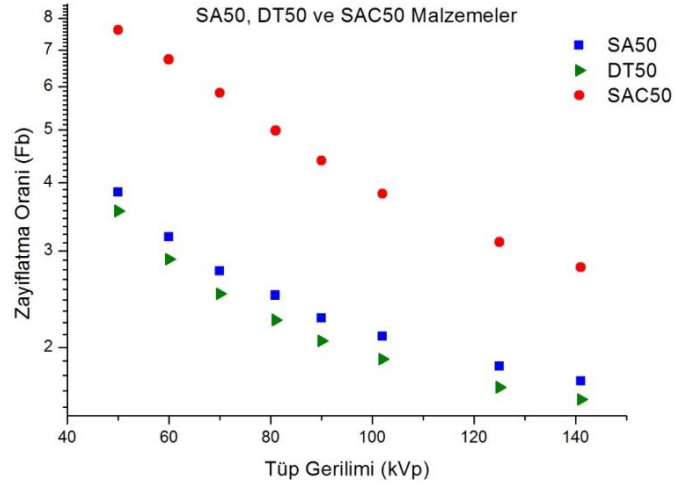
Şekil 5.9 : DT0, DT50 ve DT70 malzemelerin geniş demet geometrisinde farklı X-ışını tüp gerilimlerine göre zayıflatma oranları.

5.2.1.4 Antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimlerindeki zayıflatma oranları mukayesesi

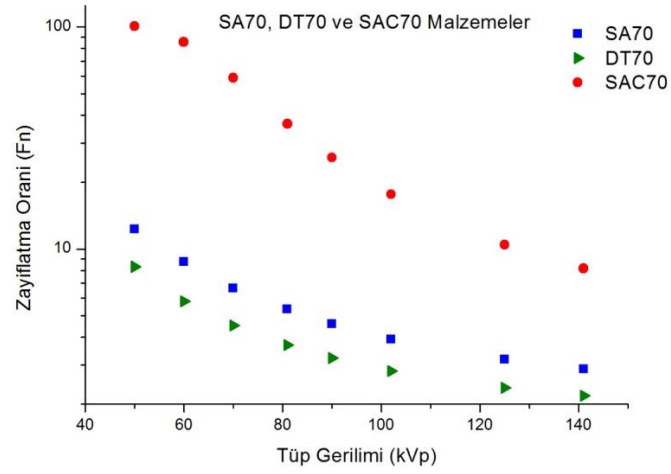
%50 ve %70 antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin dar ve geniş demet geometrilerinde farklı tüp gerilimlerinde mukayeselerinin yapılabilmesi için grafikler çizdirilmiştir. Şekil 5.10 dar demet geometrisi, Şekil 5.11 geniş demet geometrisinde %50 katkı maddesi içeren silikon kauçuk malzemeler için farklı tüp gerilimlerindeki zayıflatma oranları grafiklerini göstermektedir. Şekil 5.12 dar demet geometrisi, Şekil 5.13 geniş demet geometrisinde %70 katkı maddesi içeren silikon kauçuk malzemeler için farklı tüp gerilimlerindeki zayıflatma oranları grafiklerini göstermektedir.



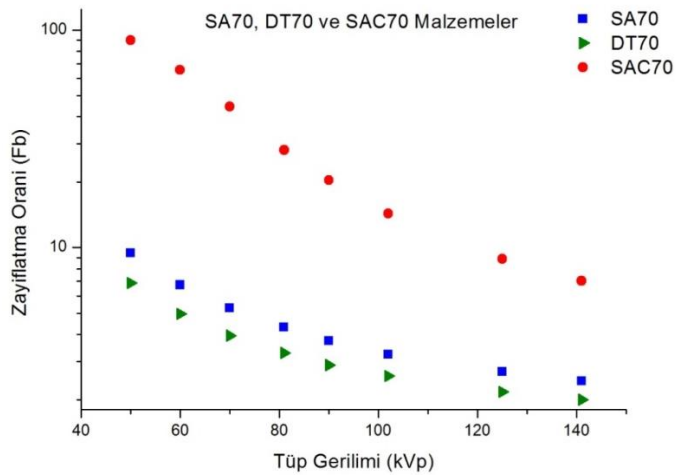
Şekil 5.10 : SA50, DT50 ve SAC50 malzemeler için dar demet geometrisinde farklı tüp gerilimleri için zayıflatma oranları.



Şekil 5.11 : SA50, DT50 ve SAC50 malzemeler için geniş demet geometrisinde farklı tüp gerilimleri için zayıflatma oranları.



Şekil 5.12 : SA70, DT70 ve SAC70 malzemeler için dar demet geometrisinde farklı tüp gerilimleri için zayıflatma oranları.

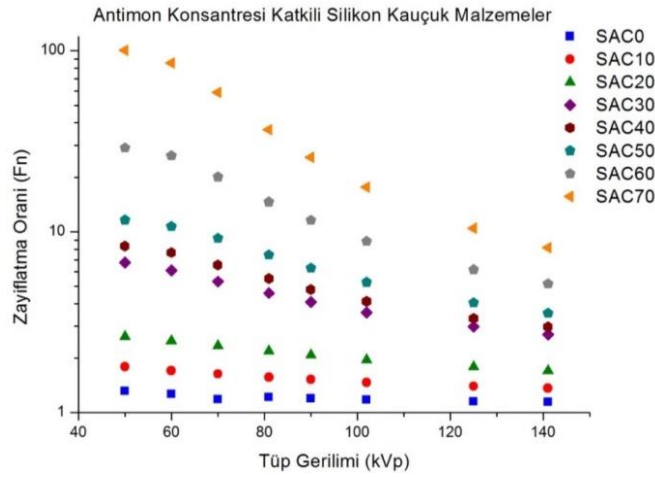


Şekil 5.13 : SA70, DT70 ve SAC70 malzemeler için geniş demet geometrisinde farklı tüp gerilimleri için zayıflatma oranları.

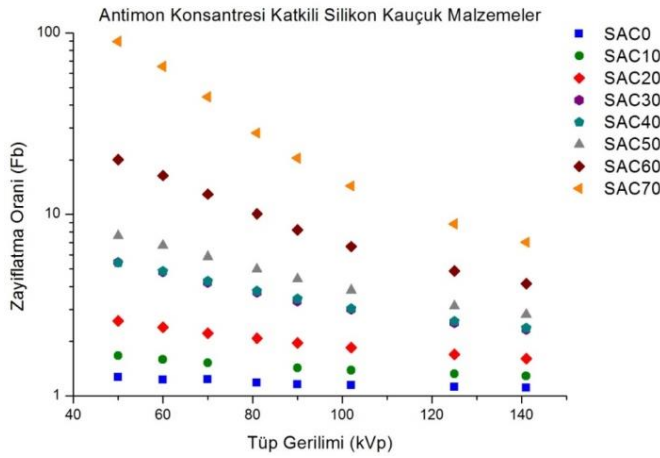
Çalışılan malzemeler arasında en yüksek zayıflatma oranına sahip malzemelerin antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemeler olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemeleri ayrıntılı olarak incelemek üzere SAC10, SAC20, SAC30, SAC40, SAC50, SAC60, SAC70 için zayıflatma oranları belirlenmiştir.

5.2.1.5 Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin zayıflatma oranları

Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin, dar ve geniş demet geometrileri için F_N ve F_B zayıflatma oranları sırasıyla Çizelge 5.10 ve Çizelge 5.11’de verilmiştir. Çizelge 5.10 ve Çizelge 5.11’den hareketle çizdirilen grafikler Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’te gösterilmiştir.



Şekil 5.14 : Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin dar demet geometrisinde farklı X-ışını tüp gerilimleri için zayıflatma oranları.



Şekil 5.15 : Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin geniş demet geometrisinde farklı X-ışını tüp gerilimleri için zayıflatma oranları.

Çizelge 5.10 : Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemeler için dar demet geometrisinde zayıflatma oranları.

Işınlama Şartları			Dar demet Zayıflatma Oranları (F_N)							
kVp	mAs	ms	SAC0	SAC10	SAC20	SAC30	SAC40	SAC50	SAC60	SAC70
50	80	123	1,312	1,792	2,634	6,771	8,337	11,604	29,063	100,646
60	63	96,9	1,268	1,705	2,494	6,101	7,670	10,708	26,324	85,638
70	50	76,9	1,186	1,636	2,341	5,302	6,552	9,209	20,053	59,012
81	32	51,8	1,215	1,569	2,188	4,577	5,505	7,449	14,587	36,611
90	25	45	1,197	1,526	2,079	4,086	4,796	6,288	11,589	25,793
102	20	40,8	1,175	1,468	1,952	3,573	4,121	5,250	8,870	17,619
125	12,5	31,2	1,154	1,399	1,790	2,981	3,323	4,053	6,172	10,455
141	10	28,2	1,143	1,363	1,702	2,703	2,982	3,545	5,151	8,170

Çizelge 5.11 : Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemeler için geniş demet geometrisinde zayıflatma oranları.

Işınlama Şartları			Geniş Demet Zayıflatma Oranları (F_B)							
kVp	mAs	ms	SAC0	SAC10	SAC20	SAC30	SAC40	SAC50	SAC60	SAC70
50	50	76,9	1,268	1,665	2,584	5,447	5,407	7,619	20,016	89,845
60	40	61,5	1,229	1,589	2,389	4,805	4,857	6,728	16,364	65,543
70	32	49,2	1,236	1,523	2,216	4,197	4,287	5,841	12,933	44,493
81	20	32,4	1,181	0,147	2,078	3,723	3,786	4,983	10,076	28,099
90	16	28,8	1,156	1,426	1,958	3,321	3,419	4,395	8,220	20,430
102	12,5	25,5	1,143	1,384	1,847	3,001	3,031	3,822	6,645	14,337
125	8	20	1,121	1,321	1,695	2,530	2,579	3,116	4,879	8,874
141	6,3	17,7	1,108	1,289	1,608	2,316	2,362	2,804	4,157	7,034

5.2.2 Yığılma faktörü hesapları

Denklem 4.3'e göre hesaplanan yığılma faktörleri her bir malzeme için aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir. Çizelge 5.12 antimon cevheri, Çizelge 5.13 antimon konsantresi ve Çizelge 5.14 demir konsantresi için yığılma faktörlerini göstermektedir.

Çizelge 5.12 : Antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemelerin yığılma faktörleri.

Enerji kVp	Yığılma Faktörü, B		
	SA0	SA50	SA70
50	1,035	1,098	1,301
60	1,031	1,099	1,301
70	1,031	1,105	1,264
81	1,028	1,087	1,241
90	1,035	1,112	1,232
102	1,027	1,090	1,209
125	1,029	1,102	1,183
141	1,031	1,104	1,177

Çizelge 5.13 : Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin yığılma faktörleri.

Enerji kVp	Yığılma Faktörü, B							
	SAC0	SAC10	SAC20	SAC30	SAC40	SAC50	SAC60	SAC70
50	1,035	1,076	1,019	1,243	1,542	1,523	1,452	1,120
60	1,031	1,073	1,044	1,269	1,579	1,592	1,609	1,307
70	1,031	1,074	1,067	1,263	1,528	1,577	1,551	1,326
81	1,028	1,067	1,053	1,229	1,454	1,495	1,448	1,303
90	1,035	1,069	1,062	1,230	1,403	1,431	1,410	1,262
102	1,027	1,061	1,057	1,190	1,359	1,374	1,335	1,229
125	1,029	1,059	1,056	1,178	1,289	1,301	1,265	1,178
141	1,031	1,058	1,061	1,167	1,263	1,264	1,239	1,161

Çizelge 5.14 : Demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin yığılma faktörleri.

Enerji kVp	Yığılma Faktörü, B		
	DT0	DT50	DT70
50	1,035	1,038	1,209
60	1,031	1,038	1,168
70	1,031	1,041	1,145
81	1,028	1,038	1,124
90	1,035	1,041	1,117
102	1,027	1,033	1,096
125	1,029	1,044	1,090
141	1,031	1,060	1,091

5.3 Lineer Zayıflatma Katsayıları

Antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin, lineer zayıflatma katsayıları hesaplanırken öncelikle TS EN 61331-1 standardına uygun olarak oluşturulan dar demet geometrisinde, X-ışını tüpü ile radyasyon dedektörü arasında herhangi bir malzeme olmadan farklı tüp gerilimlerinde (Çizelge 5.15) doz ölçümleri (I_0) alınmıştır.

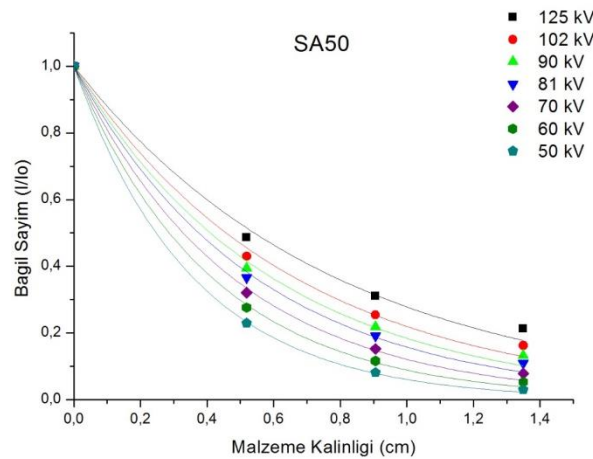
Çizelge 5.15 : Dar demet geometrisi için ışınlama şartları.

kVp	mAs
50	250
60	200
70	125
81	80
90	63
102	50
125	40

Daha sonra her bir malzeme için sırasıyla 3 farklı kalınlıkta malzeme X-ışını tüpü ile dedektör arasına konularak aynı tüp gerilimlerinde doz ölçümleri alınmıştır (I). Her bir malzeme kalınlığı için hesaplanan I/I_0 (bağıl sayım) değerlerinin kalınlıkla değişimi eksponansiyel olarak çizilerek lineer zayıflatma katsayıları (μ) bulunmuştur. Grafikler OriginPro8 bilgisayar programı ile çizilmiştir.

5.3.1 Antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemeler için farklı tüp gerilimlerinde lineer zayıflatma katsayıları

SA50 için çizilen farklı tüp gerilimlerine ait I/I_0 (bağıl sayım) değerlerinin malzeme kalınlığına bağlı değişimi Şekil 5.16’da verilmiştir.



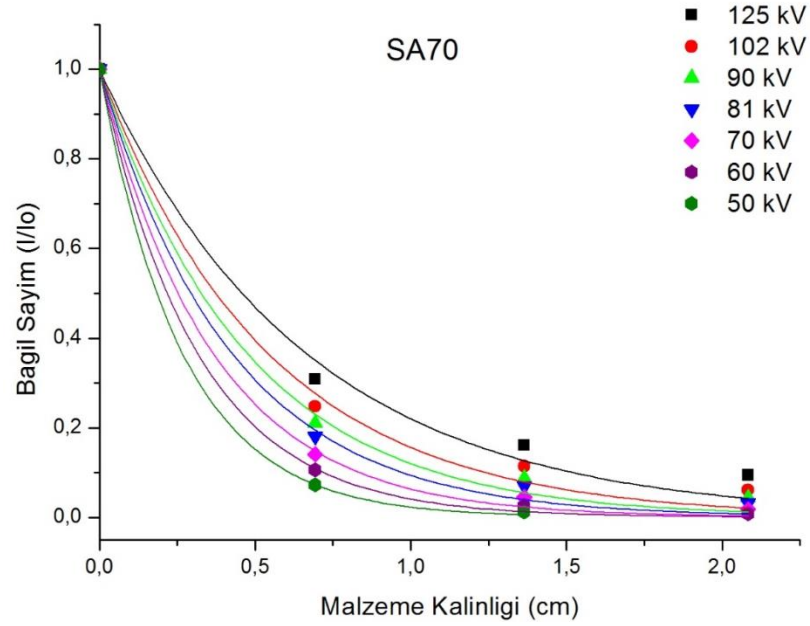
Şekil 5.16 : SA50 için bağıl sayım-malzeme kalınlığı grafiği.

Çizilen grafiklerden SA50 için bulunan lineer zayıflatma katsayıları Çizelge 5.16’da verilmiştir.

Çizelge 5.16 : SA50 için lineer zayıflatma katsayıları.

kVp	μ (cm^{-1})	Standart Sapma
50	2,806	0,036
60	2,421	0,055
70	2,112	0,062
81	1,848	0,065
90	1,692	0,066
102	1,516	0,065
125	1,279	0,058

SA70 için çizilen farklı tüp gerilimlerine ait I/I_0 (bağıl sayım) değerlerinin malzeme kalınlığına bağlı değişimi Şekil 5.17’de verilmiştir.



Şekil 5.17 : SA70 için bağıl sayım-malzeme kalınlığı grafiği.

Çizilen grafiklerden SA70 için bulunan lineer zayıflatma katsayıları Çizelge 5.17’de verilmiştir.

Çizelge 5.17 : SA70 için lineer zayıflatma katsayıları.

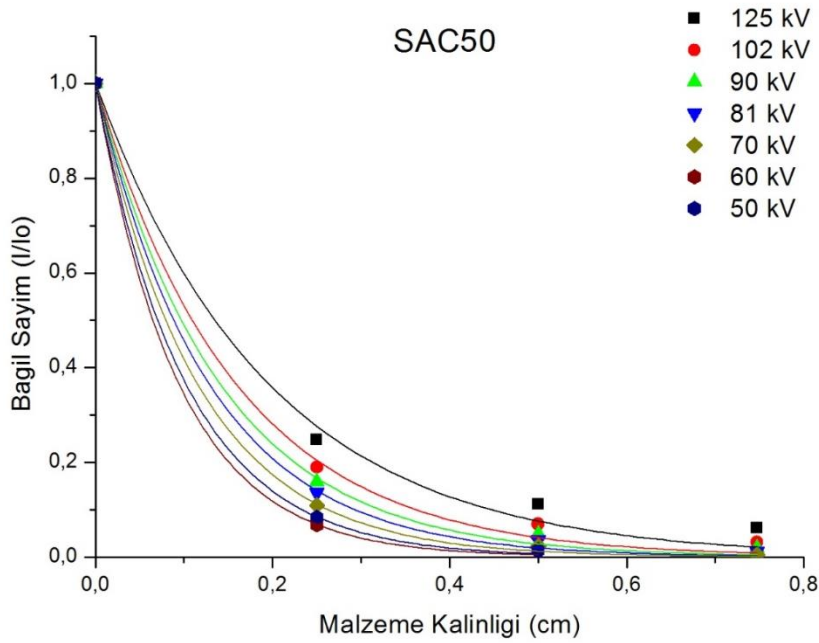
kVp	μ (cm^{-1})	Standart Sapma
50	3,764	0,084
60	3,190	0,117
70	2,752	0,147
81	2,363	0,160

Çizelge 5.17 (devam) : SA70 için lineer zayıflatma katsayıları.

kVp	μ (cm^{-1})	Standart Sapma
90	2,118	0,161
102	1,855	0,157
125	1,513	0,139

5.3.2 Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemeler için farklı tüp gerilimlerinde lineer zayıflatma katsayıları

SAC50 için çizilen farklı tüp gerilimlerine ait I/I_0 (bağıl sayım) değerlerinin malzeme kalınlığına bağlı değişimi Şekil 5.18’de verilmiştir.



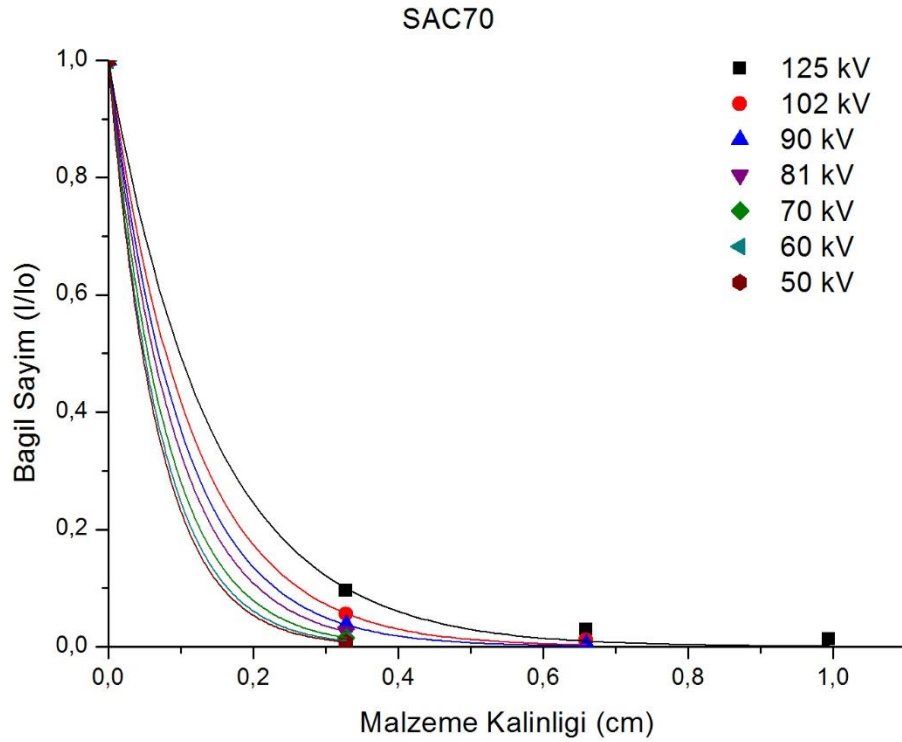
Şekil 5.18 : SAC50 için bağıl sayım-malzeme kalınlığı grafiği.

Çizilen grafiklerden SAC50 için bulunan lineer zayıflatma katsayıları Çizelge 5.18’de verilmiştir.

Çizelge 5.18 : SAC50 için lineer zayıflatma katsayıları.

kVp	μ (cm^{-1})	Standart Sapma
50	9,847	0,214
60	10,672	0,466
70	8,748	0,237
81	7,848	0,304
90	7,157	0,353
102	6,348	0,407
125	5,143	0,433

SAC70 için çizilen farklı tüp gerilimlerine ait I/I_0 (bağıl sayım) değerlerinin malzeme kalınlığına bağlı değişimi Şekil 5.19’da verilmiştir.



Şekil 5.19 : SAC70 için bağıl sayım-malzeme kalınlığı grafiği.

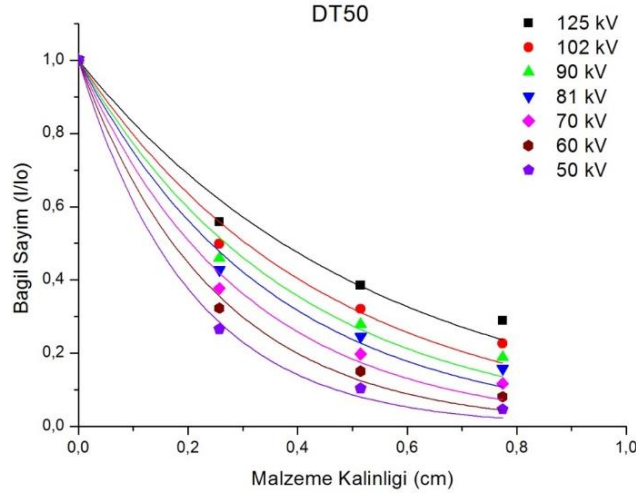
Çizilen grafiklerden SAC70 için bulunan lineer zayıflatma katsayıları Çizelge 5.19’da verilmiştir.

Çizelge 5.19 : SAC70 için lineer zayıflatma katsayıları.

kVp	μ (cm^{-1})	Standart Sapma
50	14,629	1,283
60	13,961	1,031
70	12,675	-
81	11,090	4,019
90	9,969	0,216
102	8,734	0,299
125	7,022	0,399

5.3.3 Demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemeler için farklı tüp gerilimlerinde lineer zayıflatma katsayıları

DT50 için çizilen farklı tüp gerilimlerine ait I/I_0 (bağıl sayım) değerlerinin malzeme kalınlığına bağlı değişimi Şekil 5.20’de verilmiştir.



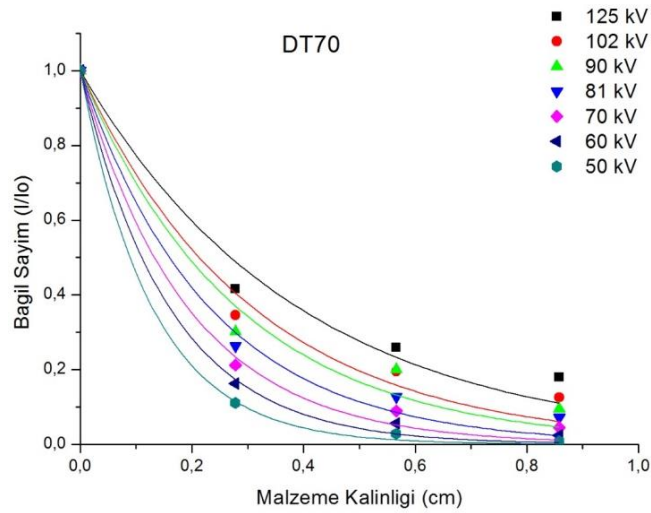
Şekil 5.20 : DT50 için bağıl sayım-malzeme kalınlığı grafiği.

Çizilen grafiklerden DT50 için bulunan lineer zayıflatma katsayıları Çizelge 5.20’de verilmiştir.

Çizelge 5.20 : DT50 için lineer zayıflatma katsayıları.

kVp	μ (cm^{-1})	Standart Sapma
50	4,890	0,259
60	4,027	0,271
70	3,382	0,249
81	2,873	0,224
90	2,578	0,207
102	2,265	0,184
125	1,861	0,149

DT70 için çizilen farklı tüp gerilimlerine ait I/I_0 (bağıl sayım) değerlerinin malzeme kalınlığına bağlı değişimi Şekil 5.21’de verilmiştir.



Şekil 5.21 : DT70 için bağıl sayım-malzeme kalınlığı grafiği.

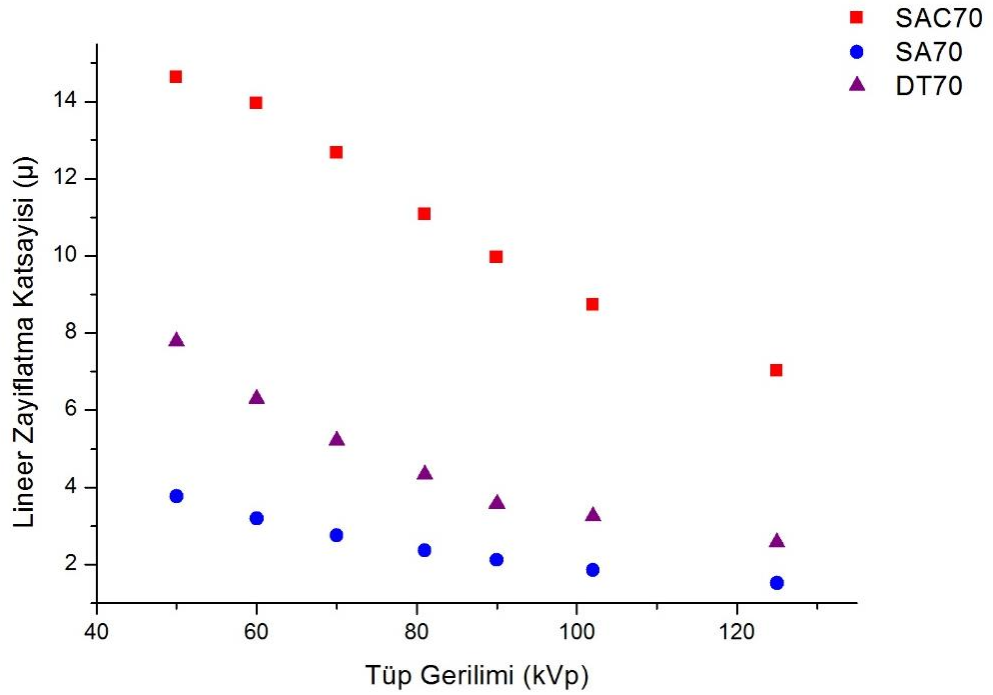
Çizilen grafiklerden DT70 için bulunan lineer zayıflatma katsayıları Çizelge 5.21’de verilmiştir.

Çizelge 5.21 : DT70 için lineer zayıflatma katsayıları.

kVp	μ (cm^{-1})	Standart Sapma
50	7,782	0,283
60	6,289	0,412
70	5,217	0,441
81	4,338	0,429
90	3,573	0,469
102	3,249	0,357
125	2,571	0,283

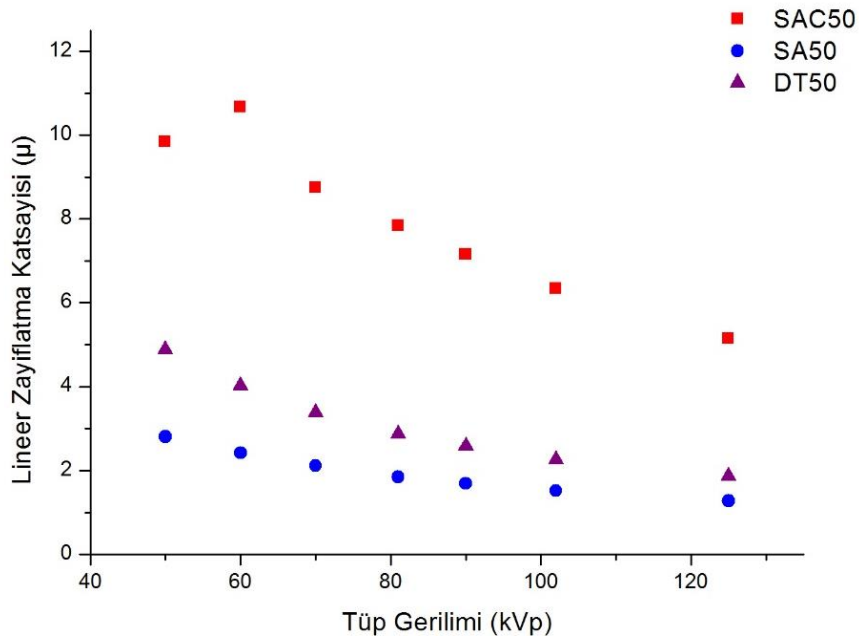
5.3.4 Lineer zayıflatma katsayılarının enerjiye bağlı değişimleri

Şekil 5.22 SA70, SAC70 ve DT70 malzemelerinin lineer zayıflatma katsayılarının tüp gerilimine bağlı değişimini göstermektedir.



Şekil 5.22 : SA70, SAC70 ve DT70 malzemelerin lineer zayıflatma katsayılarının enerjiye göre değişimi.

Şekil 5.23 SA50, SAC50 ve DT50 malzemelerinin lineer zayıflatma katsayılarının tüp gerilimine bağlı değişimini göstermektedir.



Şekil 5.23 : SA50, SAC50 ve DT50 malzemelerin lineer zayıflatma katsayılarının enerjiye göre değişimi.

5.4 Kurşun Eşdeğerleri

Antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin, farklı tüp gerilimleri için bulunan lineer zayıflatma katsayılarından hareketle Denklem 2.10 kullanılarak kurşun eşdeğerleri hesaplanmıştır. Her malzeme için kurşun eşdeğerleri hesaplanırken TS EN 61331-1 standardında verilen farklı gerilimlere karşılık her kurşun eşdeğeri için zayıflatma oranlarının bulunduğu tablodan yararlanılmıştır. SA70, SAC70 ve DT70 için 0,5 mm PbE, SA50, SAC50 ve DT50 için 0,35 mm PbE hesaplanmıştır. Çizelge 5.22 SA70 için, Çizelge 5.23 SAC70 için, Çizelge 5.24 DT70 için farklı tüp gerilimlerinde 0,5 mm kurşun eşdeğerlerini göstermektedir.

Çizelge 5.22 : SA70 için farklı tüp gerilimlerinde 0,5 mm PbE.

kVp	0,5 mm PbE (mm)
50	22,665
60	20,418
70	19,161
81	18,695
90	18,116
102	19,223
125	21,806

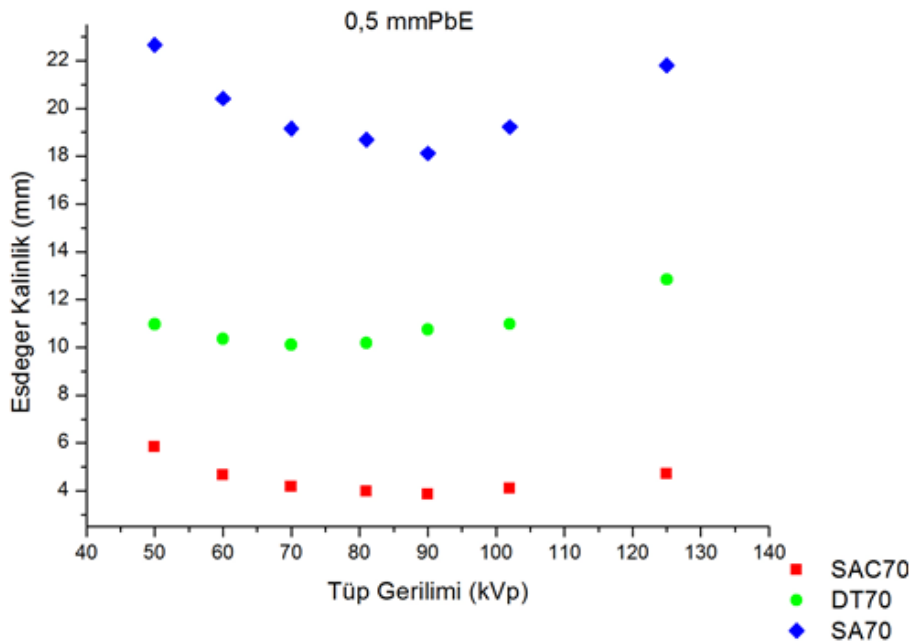
Çizelge 5.23 : SAC70 için farklı tüp gerilimlerinde 0,5 mm PbE.

kVp	0,5 mm PbE (mm)
50	5,837
60	4,666
70	4,162
81	3,983
90	3,849
102	4,084
125	4,699

Çizelge 5.24 : DT70 için farklı tüp gerilimlerinde 0,5 mm PbE.

kVp	0,5 mm PbE (mm)
50	10,965
60	10,358
70	10,109
81	10,184
90	10,739
102	10,978
125	12,834

Çizelge 5.22, Çizelge 5.23 ve Çizelge 5.24 kullanılarak çizilen 0,5 mm PbE grafiği Şekil 5.24'te verilmiştir.



Şekil 5.24 : SA70, SAC70 ve DT70 için 0,5 mm PbE grafiği.

Çizelge 5.25 SA50 için, Çizelge 5.26 SAC50 için ve Çizelge 5.27 DT50 için farklı tüp gerilimlerinde 0,35 mm kurşun eşdeğerlerini göstermektedir.

Çizelge 5.25 : SA50 için farklı tüp gerilimlerinde 0,35 mm PbE.

kVp	0,35 mm PbE (mm)
50	23,723
60	21,427
70	20,206
81	19,510
90	18,619
102	19,223
125	20,745

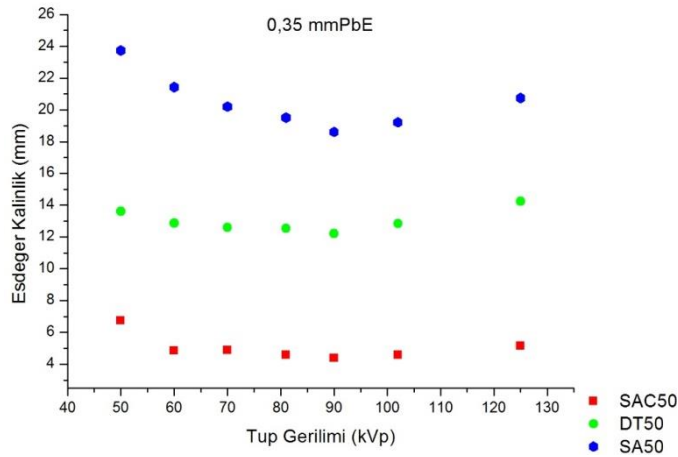
Çizelge 5.26 : SAC50 için farklı tüp gerilimlerinde 0,35 mm PbE.

kVp	0,35 mm PbE (mm)
50	6,760
60	4,861
70	4,876
81	4,594
90	4,399
102	4,587
125	5,158

Çizelge 5.27 : DT50 için farklı tüp gerilimlerinde 0,35 mm PbE.

kVp	0,35 mm PbE (mm)
50	13,611
60	12,881
70	12,610
81	12,548
90	12,212
102	12,857
125	14,252

Çizelge 5.25, Çizelge 5.26 ve Çizelge 5.27 kullanılarak çizilen 0,35 mm PbE grafiği Şekil 5.25'te verilmiştir.



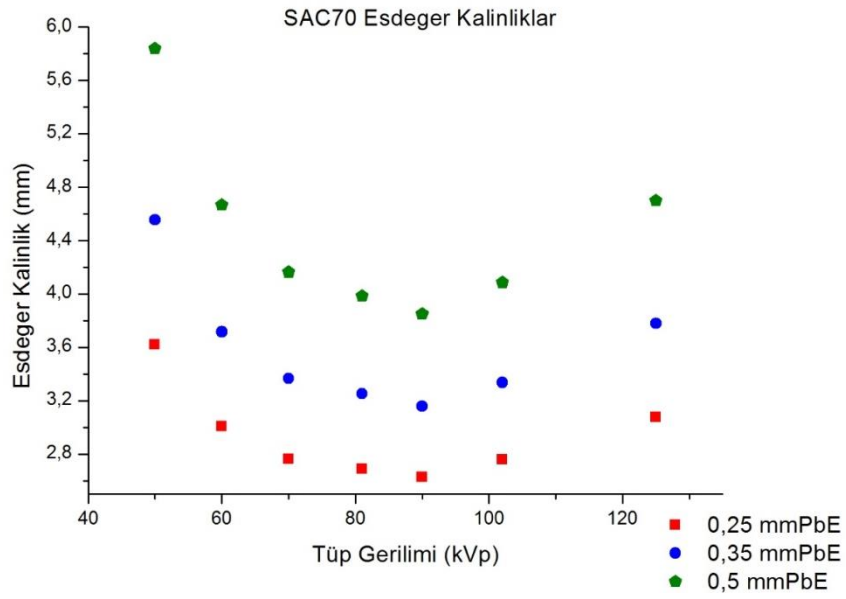
Şekil 5.25 : SAC50, SA50 ve DT50 i.in 0,35 mm PbE grafiği.

Ayrıca SAC70 için 0,25 mm PbE, 0,35 mm PbE ve 0,5 mm PbE değerleri de hesaplanmıştır. Çizelge 5.28, bu değerleri göstermektedir.

Çizelge 5.28 : SAC70 için 0,25 mm PbE, 0,35 mm PbE ve 0,5 mm PbE değerleri.

kVp	0,25 mm PbE (mm)	0,35 mm PbE (mm)	0,5 mm PbE (mm)
50	3,617	4,553	5,837
60	3,004	3,716	4,666
70	2,762	3,367	4,162
81	2,688	3,251	3,983
90	2,626	3,158	3,849
102	2,756	3,334	4,084
125	3,076	3,778	4,699

Çizelge 5.28’de verilen eşdeğer kalınlıkların tüp gerilimine bağlı değişimini gösteren grafik Şekil 5.26’da verilmiştir.



Şekil 5.26 : SAC70 için 0,25 mm PbE, 0,35 mm PbE, ve 0,5 mm PbE grafiği.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, sağlık personelinin X-ışınlarından korunmasında kullanılan kurşun malzemelere alternatif olabilecek antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkı esnek malzemeler üretilmiştir. Üretilen malzemelerin özelliklerinin incelenmesi amacıyla homojenlik ve esneklik testleri yapılmıştır. Sonrasında TS EN 61331-1 standardından yararlanılarak üretilen antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkı silikon kauçuk malzemelerin dar ve geniş demet geometrilerinde X-ışınlarını zayıflatma oranları (I_0/I) bulunmuştur. Daha sonra bağıl sayımlara (I/I_0) karşılık kalınlık grafiklerinden hareketle malzemelerin lineer zayıflatma katsayıları ortaya çıkarılmıştır. Ek olarak, TS EN 61331-1 standardı kullanılarak malzemelerin 0,35 mm PbE ve 0,5 mm PbE kurşun eşdeğer-kalınlıkları hesaplanmıştır.

X-ışını zayıflatma özelliklerinin incelenmesi amacıyla silikon kauçuk içine toz halindeki antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılanmış üç grup malzeme üretilmiştir. Malzemeler üretilirken katkı maddeleri %5, %10, %20, %30, %40, %50, %60, %70 oranlarında katkılanmıştır. Kaya parçaları halinde temin edilen antimon cevheri, küçük parçalara bölünmüş, öğütülmüş, ortalama 0,5 µm parçacık boyutunda olacak şekilde elenmiş ve silikon kauçuk içine farklı oranlarda katkılanmıştır. Diğer taraftan, farklı bir maden firmasından temin edilen antimon konsantresi ve parçacık boyutu ortalama 1 mm olan demir konsantresi de silikon kauçuk içine katkılanmıştır. Malzemelerin üretilmesi sonucunda antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresinin silikon kauçuk içine %70 oranına kadar başarıyla katkılanabildiği ve kalıplar içerisinde katılaşmanın sağlandığı görülmüştür. Ayrıca malzemeler kalıp içerisinde rahatlıkla şekillerini kaybetmeden çıkarılabilmüş ve el ile yapılan ilk testlerde esneklik özelliğine sahip oldukları tespit edilmiştir.

Üretilen malzemelerin homojenlik testlerinin yapılabilmesi için maksimum tüp parametreleri 35 kVp ve 1 mA olan PHYWE X-ışını ünitesi kullanılmıştır. Malzemeler X-ışını tüpü ile floresan ekran arasına konularak antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresinin silikon kauçuk içinde dağılımlarındaki

homojenlik incelenmiştir. Bu incelemelerin sonucunda antimon cevherinin, antimon konsantresinin ve demir konsantresinin silikon kauçuk içinde homojen bir dağılım yapacak şekilde başarıyla katkılanabildiği görülmüştür. Antimon cevheri için SA5'ten SA70'e kadar görüntüler alınabilirken, antimon konsantresi için SAC5'ten SAC40'a kadar, demir konsantresi için DT5'ten DT40'a kadar radyografik görüntü oluşturulabilmiştir (Şekil 5.1 - Şekil 5.3). Bunun nedeni, X-ışını tüpünün maksimum tüp voltajının oluşturduğu X-ışını enerjisinin yüksek oranda konsantre katkılanmış malzemeleri görüntülemeye yeterli olmamasıdır.

Üretilen malzemelerin esneklik testlerinin yapılabilmesi için her bir malzemedan esneklik testi cihazına uygun 3'er kalıp çıkartılmış ve yapılan 3 testin ortalaması alınmıştır. Yapılan testler sonunda, beklenildiği gibi silikon kauçuk içindeki antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi arttıkça malzemelerin esnekliklerinin azaldığı görülmüştür (Çizelge 5.1 - Çizelge 5.3). Çalışılan malzemeler içinde en düşük malzeme esnekliği %30 olarak SA70 için belirlenmiştir. Ancak %70 katkı maddesi içeren silikon kauçuk malzemelerde dahi uygulamalarda kullanılabilir esnekliğin bulunduğu sonucuna varılmıştır.

Antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemeler için dar ve geniş demet geometrilerinde zayıflatma oranları(I_0/I) hesaplanmıştır. Öncelikle %50 ve %70 katkı oranlarındaki malzemeler incelenmiş ve zayıflatma oranları bulunmuştur (Şekil 5.4 - Şekil 5.13). Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin zayıflatma oranları en yüksek olduğundan bu malzeme grubunu daha ayrıntılı incelemek amacıyla SAC50 ve SAC70 malzemelerine ilave olarak SAC10, SAC20, SAC30, SAC40, SAC50, SAC60, SAC70 malzemeleri için de zayıflatma oranları tespit edilmiştir (Şekil 5.14 - Şekil 5.15). Antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemelerde, uygulanan tüp voltajı ve antimon cevheri katkı oranına göre farklılıklar göstermekle birlikte zayıflatma oranları, dar demet geometrisi için 1,918- 12,294 ve geniş demet geometrisi için 1,737-9,451 olarak tespit edilmiştir (Çizelge 5.4 -Çizelge 5.5). Uygulanan tüp voltajı arttıkça zayıflatma oranının azaldığı görülmüştür. Diğer taraftan antimon cevheri katkı oranı arttıkça malzemelerin zayıflatma oranları artmaktadır. Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerde, uygulanan tüp voltajı ve Antimon konsantresi katkı oranına göre farklılıklar göstermekle birlikte zayıflatma oranları, dar demet geometrisi için 3,545-100,646 ve geniş demet geometrisi için 2,804-89,845 olarak bulunmuştur

(Çizelge 5.6 - Çizelge 5.7). Zayıflatma oranlarının uygulanan tüp voltajı arttıkça azaldığı ancak antimon konsantresi katkı oranı arttıkça arttığı görülmüştür. Demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerde, uygulanan tüp voltajı ve demir konsantresi katkı oranına göre farklılık göstermekle birlikte zayıflatma oranları, dar demet geometrisi için 1,704-8,317 ve geniş demet geometrisi için 1,607-6,875 olarak ölçülmüştür (Çizelge 5.8 -Çizelge 5.9). Zayıflatma oranlarının uygulanan tüp voltajı arttıkça azaldığı ancak demir konsantresi katkı oranı arttıkça arttığı görülmüştür.

Antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin, dar demet geometrisindeki zayıflatma oranlarının geniş demet geometrisindeki zayıflatma oranlarına bölünmesiyle yığılma faktörleri hesaplanmıştır. Bu faktörler antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemelerde 1.087-1.301, antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerde 1.019-1.609, demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerde 1.033-1.209 arasındadır (Çizelge 5.12 - Çizelge 5.14). Üretilen malzemelerdeki katkı maddesi arttıkça, yığılma faktörünün arttığı görülmektedir. Bu artış, malzemelerdeki katkı maddelerinin artmasına bağlı olarak saçılmaların da artması ile açıklanabilir.

Antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp voltajlarındaki lineer zayıflatma katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplama, dar demet geometrisi sonuçlarından hareketle, malzemelerin kalınlık-bağıl sayım grafiklerinin Beer Lambert formülüne eğilimlerinin ortaya çıkarılması ile gerçekleştirilmiştir. Antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerde tüp voltajı arttıkça lineer zayıflatma katsayısı azalmaktadır (Şekil 5.22 – Şekil 5.23). Diğer taraftan silikon kauçuk içerisine yapılan katkı maddesinin oranının artması malzemelerin lineer zayıflatma katsayılarını artırmaktadır. Ayrıca Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin lineer zayıflatma katsayıları, aynı oran ve tüp voltajındaki Antimon cevheri ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin lineer zayıflatma katsayılarından daha yüksektir. Antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemelerin lineer zayıflatma katsayıları ise aynı oran ve tüp voltajındaki demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin lineer zayıflatma katsayılarından daha düşüktür. Bir başka deyişle, üretilen malzemeler içerisinde, antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin radyasyon zırhlama kapasitesi en yüksek iken, antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemelerin radyasyon zırhlama kapasitesi en düşüktür.

Antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin TS EN 61311-1 standardına göre kurşun eşdeğer kalınlıkları hesaplanmıştır. Malzemelerin 0.35 mm PbE ve 0.5 mm PbE kalınlıkları ortaya çıkarılmıştır.

En yüksek katkı oranına sahip malzemelerin (SA70, SAC70 ve DT70) 0.5 mm PbE kalınlıkları elde edilmiştir. SA70 malzemenin 0.5 mm PbE kalınlıkları 18.116-22.665 mm (Çizelge 5.22), DT70 malzemenin 0.5 mm PbE kalınlıkları 10.109-12.834 mm arasında olduğu hesaplanmıştır (Çizelge 5.24). SAC70 malzemenin 0.5 mm PbE kalınlıkları 3.848-5.837 mm arasında olup diğer malzemelere göre en düşük eşdeğer kalınlıklara sahip malzemelerdir (Çizelge 5.23). SAC70 malzemenin 50 kV'daki 5.837 eşdeğer kalınlığı ihmal edildiğinde 60-125 kV tüp voltajı aralığında en yüksek eşdeğer kalınlık 4.699 mm'dir. Bunun anlamı, SAC70 malzemesi kullanılarak üretilen bir radyasyondan koruyucu malzemenin TS 61331-1 standartlarına uygun şekilde 60-125 kV tüp voltajında 0.5 mm PbE'ye eş koruma sağlayabileceğidir. Benzer şekilde SA70 malzemesi için 0.5 mm PbE kalınlık değeri 22.665 mm ve DT70 için ise 12.834 mm'dir. Ayrıca SAC70 için 0,25 mm PbE ve 0,35 mm PbE kalınlıkları sırasıyla 3,617 ve 4,553 mm olarak hesaplanmıştır (Çizelge 5.28). Üretilen malzemeler içerisinde SAC70 için elde edilen kalınlık değeri, radyasyondan korunma uygulamalarında kullanılabilecek seviyede olup özellikle esnek giyim malzemelerinde kurşuna alternatif olabilecek bir malzemedir. SA70 ve DT70 malzemesi ise daha çok duvar, panel ve perde uygulamalarında kullanılabilir malzemeler arasında olup giyim malzemelerinde, kalınlık değerlerinin yüksek olması nedeniyle, kullanılabilirliği sınırlıdır.

Antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin TS EN 61331-1 standardına göre hesaplanan kurşun eşdeğer kalınlıkları farklı enerji seviyelerinde farklı değerler içermektedir. Buradan hareketle kurşun içermeyen bir malzemenin kurşun eşdeğerinin enerjiye bağlı olarak değişim gösterdiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla bir malzemenin TS EN 61331-1 standardına uygun kurşun eşdeğeri ifade edilirken o malzemenin tüm enerjilerde en az belirtilen kurşun eşdeğer zayıflatma oranını sağlaması gerekmektedir. Örneğin, bir malzeme TS EN 61331-1 standardına göre 0.5 mm PbE eşdeğerini sağladığını ifade ediyorsa 50-150 kV arasındaki tüm enerjilerde standarttaki zayıflatma oranını sağlamalıdır. Aksi takdirde sadece bir veya bir kaç enerjiye göre TS EN 61331-1

standardına uygun olması malzemenin tümüyle standarda uygun olduğunu göstermemektedir. Bu sebeple üreticilerin standarda uygun malzeme üretimi hususunda dikkatli olmaları gerekmektedir. Aynı şekilde kullanıcıların da ekipman temin ederken bu hususlara dikkat etmesi gerekmektedir. Kullanıcıların firmalardan akredite olmuş onaylı kurumlardan alınmış standarda uygunluk belgelerini istemeleri radyasyon güvenliği için önem arz eden bir husustur.

Sonuç olarak, bu çalışmada antimon cevheri, antimon konsantresi ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin 50-125 kVp enerji aralıklarında TS EN 61331-1 standardına uygun kurşun eşdeğer kalınlıkları tespit edilmiş ve uygulamaya yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Baltacıoğlu, N.** (1995). *Gama geçirgenliği ile yoğunluk tayini*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Bushberg, J. T., Seibert, J. A., Leidholdt, E. M., Boone, J. M.,** (2002). *The essential physics of medical imaging*. CA.: Lippincott Williams & Wilkins.
- Büyük, B.** (2015). Gamma attenuation behavior of some stainless and boron steels. *Acta Physica Polonica A* Vol.127.
- Büyük, B.** (2018). Preparation and characterization of iron ore imbedded silicon rubber materials for radiation protection. *Nuclear Science and Techniques Dergisi* (2018) 29:135.
- Chang, L., Zhang, Y., Liu, Y., Fang, J., Luan, W., Yang, X., Zhang, W.** (2015). Preparation and characterization of tungsten/epoxy composites for gamma-ray radiation shielding. *Nuclear instruments and methods in physics research B* 356-357, 88-93
- Gong, P., Ni, M., Chai, H., Chen, F., Tang, X.** (2018). Preparation and characteristics of a flexible neutron and gamma ray shielding and radiation-resistand material reinforced by benzophenone. *Nuclear engineering and technology* 50, 470-477.
- Güngör, A., Akbay, İ. K., Yaşar, D., Özdemir, T.** (2018). Flexible X/Gamma ray shielding composite material of EPDM rubber with bismuth trioxide: Mechanical, thermal investigations and attenuation tests. *Progress in nuclear energy* 106, 262-269.
- Hendee, W. R. & , Ritenour, E. R.,** (2002). *Medical Imaging Physics*. CA.: Wiley-Liss.
- Hong, W. J., Kim, D. H., Kim, W. S., Choi, S. H., Lee, G., Seo, H., Kim, S., Lee, Y.** (2018) Effectiveness evaluation of self-produced micro- and nanosized tungsten materials for radiation shielding with diagnostic X-ray imaging system. *Optik-International Journal for light and electron optics* 172 (2018) 760-765.
- Iniewski, K.,** (2009). *Medical Imaging: Principles, Detector and Electronics*. CA.: Wiley.
- Kim, S. C., Dong, K. R., Chung, W. K.** (2012). Medical radiation shielding effect by composition of barium compounds. *Annals of nuclear energy* 47, 1-5.
- Knoll, G. F.,** (2000). *Radiation Detection and Measurement*, University of Michigan.
- Martin, J.E.,** (2013). *Physics for Radiation Protection*, CA.: Wiley-VCH.

- McCaffrey, J. P., Shen, H., Downton, B., Mainegra-Hing, E.** (2007). Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments. Retrieved 8 August, 2018, from <http://www.standartimaging.com>.
- Ni, M., Tang, X., Chai, H., Zhang, Y., Chen, T., Chen, D.** (2016). Preparation and properties of the fast-curing gamma-ray shielding materials based on polyurethane. *Nuclear engineering and technology* 48, 1396-1403.
- Noor Azman, N. Z., Siddiqui, S. A., Low, I. M.** (2013). Characterisation of micro-sized and nano-sized tungsten oxide-epoxy composites for radiation shielding of diagnostic X-rays. *Materials Science and Engineering C* 33, 4952–4957.
- Özyurt, O.,** (2015). *Türkiye’de üretilen granitlerin gama ve nötronları zayıflatma özelliklerinin incelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Poltabtim, W., Wimolmala, E., Saenboonruang, K.** (2018). Properties of lead-free gamma-ray shielding materials from metal oxide/EPDM rubber composites. *Radiation physics and chemistry* 153, 1-9.
- Seyrek, E.** (2007). Radyoizotopların Üretimi ve Radyoterapide Kullanılması, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Shik, N. A., Gholamzadeh, L.** (2018). X-ray shielding performance of the EPVC composite with micro- or nanoparticles of WO_3 , PbO or Bi_2O_3 . *Applied radiation and isotopes* 139, 61-65.
- Singh, A. K., Singh, R. K., Sharma B., Tyagi, A. K.** (2017). Characterization and biocompatibility studies of lead free X-ray shielding polymer composite for healthcare application. *Radiation physics and chemistry* 138, 9-15.
- Stabin, M.G.,** (2007). *Radiation Protection and Dosimetry: An Introduction to Health Physics*. CA.: Springer.
- Taşkın, H.,** (2006). *İnsan sağlığı ve çevre kirliliği açısından Kırklareli ilinin fon radyasyonunun belirlenmesi ve haritalandırılması*. (Yüksek lisans tezi). Marmara Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- TS EN 61331-1.** (2014). Tıpta teşhis amacıyla kullanılan X-ışınına karşı koruyucu cihazlar-Malzemelerin zayıflatma özelliklerinin belirlenmesi.
- Tsoufanidis, N.,** (1995). *Measurement and Detection of Radiation*, University of Missouri-Rolla.
- Turner J. E.,** (2007). *Atoms, Radiation and Radiation Protection*. CA.: Wiley-VCH.
- Webb, S.** (1988). *The Physics of Medical Imaging*. CA.: Taylor & Francis.
- Vural, O., Altinsoy, N., Buyuk, B.** (2018). Preparation and Characterisation of Antimony Ore Imbedded Silicone Rubber Materials for Radiation Protection. 3. *International Rating Academy Congress on Applied Sciences*, (pp.83-91). Lviv/Ukraine. 6-7 Eylül 2018.
- Vural, O., Altinsoy, N., Buyuk, B.** (2018). Production of Antimony Concentrate Imbedded Silicone Rubber Materials for X-ray Protection. *Science & Research Congress*, (pp.247-253) KKTC. 4-6 Eylül 2018.

Yücel, H., Güllüoğlu, E., Çubukçu Ş., Üncü A. Ü. (2016) Measurement of the attenuation properties of the protective materials used as a thyroid guard and apron for personnel protection against diagnostic medical X-rays. *Journal of Physical Science Vol.27(1)*, 111-128, 2016.

Url-1 <<https://www.europeanmedical.info/emission-tomography/interaction-of-photons-with-matter.html>> erişim tarihi 31.03.2019

Url-2 <<https://www.rtv2.com/urun/rtv2-kalip-silikonu-e20>> erişim tarihi 30.04.2019

Url-3 <<http://etibakir.com.tr/urunler/antimuan-konsantresi/>> erişim tarihi 02.05.2019

EKLER

EK A: Dar ve geniş demet geometrisinde doz değerleri

EK B: Dar demet geometrisinde farklı kalınlıklar için doz değerleri

EK A

Çizelge A1: Antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimleri için dar demet geometrisinde I_0 ve I doz değerleri.

Işınlama Şartları			I_0 (μGy)	I (μGy)		
kVp	mAs	ms		Silikon	SA50	SA70
50	80	123	1715	1307	406,6	139,5
60	63	96,9	2087	1646	596,7	238,3
70	50	76,9	2282	1044	748,9	342,9
81	32	51,8	1962	1615	724,7	367,5
90	25	45	1904	1591	757,6	414,7
102	20	40,8	1931	1644	844,6	494,3
125	12,5	31,2	1748	1515	859,2	550,1
141	10	28,2	1719	1504	896,3	598,9

Çizelge A2: Demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimleri için dar demet geometrisinde I_0 ve I doz değerleri.

Işınlama Şartları			I_0 (μGy)	I (μGy)		
kVp	mAs	ms		Silikon	DT50	DT70
50	80	123	1715	1307	465	206,2
60	63	96,9	2087	1646	693	359,9
70	50	76,9	2282	1044	874	505,4
81	32	51,8	1962	1615	842	531,5
90	25	45	1904	1591	889	590,2
102	20	40,8	1931	1644	981	685,7
125	12,5	31,2	1748	1515	989	738,8
141	10	28,2	1719	1504	1009	786,6

Çizelge A3: Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimleri için dar demet geometrisinde I_0 ve I doz değerleri.

Işınlama Şartları			I_0 (μ Gy)	I (μ Gy)						
kVp	mAs	ms		SAC10	SAC20	SAC30	SAC40	SAC50	SAC60	SAC70
50	80	123	1715	957	651,1	253,3	205,7	147,8	59,01	17,04
60	63	96,9	2087	1224	836,9	342,1	272,1	194,9	79,28	24,37
70	50	76,9	2282	1395	974,9	430,4	348,3	247,8	113,8	38,67
81	32	51,8	1962	1250	896,7	428,7	356,4	263,4	134,5	53,59
90	25	45	1904	1248	915,8	466	397	302,8	164,3	73,82
102	20	40,8	1931	1315	989,3	540,5	468,6	367,8	217,7	109,6
125	12,5	31,2	1748	1249	976,5	586,4	526	431,3	283,2	167,2
141	10	28,2	1719	1261	101	636	576,4	484,9	333,7	210,4

Çizelge A4: Antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimleri için geniş demet geometrisinde doz değerleri.

kVp	Işınlama Şartları		I_0 (μ Gy)	I (μ Gy)		
	mAs	ms		Silikon	SA50	SA70
50	80	123	1274	1005	331,6	134,8
60	63	96,9	1575	1281	494,9	234
70	50	76,9	1733	1128	628,2	329,2
81	32	51,8	1460	1236	586,1	339,4
90	25	45	1445	1250	639,5	387,8
102	20	40,8	1438	1258	685,6	445,2
125	12,5	31,2	1332	1188	721,3	495,8
141	10	28,2	1290	1164	742,7	529,2

Çizelge A5: Demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimleri için geniş demet geometrisinde doz değerleri.

kVp	Işınlama Şartları		I_0 (μ Gy)	I (μ Gy)			
	mAs	ms		Silikon	DT30	DT50	DT70
50	80	123	1274	1005	586,8	358,5	185,3
60	63	96,9	1575	1281	813,9	542,8	317,2
70	50	76,9	1733	1128	976,4	690,9	439,5
81	32	51,8	1460	1236	873,5	650,4	444,7
90	25	45	1445	1250	911,8	702,1	500,2
102	20	40,8	1438	1258	949,4	754,8	559,7
125	12,5	31,2	1332	1188	944	787,1	613,9
141	10	28,2	1290	1164	946,6	802,8	643,9

Çizelge A6: Antimon konsantre katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimleri için geniş demet geometrisinde I_0 ve I doz değerleri.

Işınlama Şartları			I_0 (μ Gy)	I (μ Gy)						
kVp	mAs	ms		SAC10	SAC20	SAC30	SAC40	SAC50	SAC60	SAC70
50	80	123	1274	765	493,1	233,9	235,6	167,2	63,65	14,18
60	63	96,9	1575	991	659,4	327,8	324,3	234,1	96,25	24,03
70	50	76,9	1733	1138	782,2	412,9	404,2	296,7	134	38,95
81	32	51,8	1460	993	702,5	392,2	385,6	293	144,9	51,96
90	25	45	1445	1013	738,1	435,1	422,6	328,8	175,8	70,73
102	20	40,8	1438	1039	778,7	479,1	474,4	376,2	216,4	100,3
125	12,5	31,2	1332	1008	785,7	526,5	516,5	427,5	273	150,1
141	10	28,2	1290	1001	802,3	557	546,1	460	310,3	183,4

EK B

Çizelge B.1: Antimon cevheri katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimleri ve farklı kalınlıklar için dar demet geometrisinde doz değerleri.

Işınlama Şartları kVp mAs		I_0 (μ Gy)	I (μ Gy)					
			SA70			SA50		
			1. kalınlık	2. kalınlık	3. kalınlık	1. kalınlık	2. kalınlık	3. kalınlık
50	250	6716	498,8	80,07	-	1540	548,9	203,2
60	200	8226	876,6	217,9	71,72	2271	958,5	435,2
70	125	7069	998	319,9	126,9	2270	1077	555,7
81	80	6057	1093	417,7	191	2214	1156	659,1
90	63	5912	1244	521,2	259,2	2331	1291	777,9
102	50	5967	1479	684	366,6	2566	1516	970,4
125	40	6888	2122	1106	649,7	3347	2141	1467

Çizelge B.2 : Demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimleri ve farklı kalınlıklar için dar demet geometrisinde doz değerleri.

Işınlama Şartları kVp mAs		I_0 (μ Gy)	I (μ Gy)					
			DT70			DT50		
			1. kalınlık	2. kalınlık	3. kalınlık	1. kalınlık	2. kalınlık	3. kalınlık
50	250	6716	746,2	192,6	60,8	1783	698,5	313,1
60	200	8226	1341	466,9	204	2660	1243	667,6
70	125	7069	1502	633,1	321,7	2665	1398	830
81	80	6057	1594	770,4	439,4	2586	1486	957,7
90	63	5912	1783	1186	565,2	2717	1650	1113
102	50	5967	2064	1166	751,6	2917	1915	1351
125	40	6888	2868	1782	1237	3841	2656	1986

Çizelge B.3 : Antimon konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin farklı tüp gerilimleri ve farklı kalınlıklar için dar demet geometrisinde doz değerleri.

Işınlama Şartları kVp mAs		I_0 (μ Gy)	I (μ Gy)					
			SAC70			SAC50		
			1. kalınlık	2. kalınlık	3. kalınlık	1. kalınlık	2. kalınlık	3. kalınlık
50	250	6716	55,36	-	-	565,3	92,11	-
60	200	8226	84,4	-	-	557,8	133,6	-
70	125	7069	110,6	-	-	775,3	164,1	41,95
81	80	6057	159,4	-	-	820,4	217,8	72,18
90	63	5912	223	30,75	-	938,5	291	112,9
102	50	5967	334,8	66,19	-	1134	417,4	190,5
125	40	6888	659,6	201,5	86,66	1706	768,9	422,3

ÖZGEÇMİŞ

VESİKALIK
FOTO

Ad Soyad : Özlem VURAL

E-posta : ozlmvr@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2018 – Halen, Yeditepe Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Araştırma Görevlisi.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Vural, O., Altinsoy, N., Buyuk, B., 2018. Preparation and Characterisation of Antimony Ore Imbedded Silicone Rubber Materials for Radiation Protection. 3. *International Rating Academy Congress on Applied Sciences*, September 6-7, 2018 Lviv, Ukraine.
- Vural, O., Altinsoy, N., Buyuk, B., 2018. Production of Antimony Concentrate Imbedded Silicone Rubber Materials for X-ray Protection. *Science & Research Congress*, September 4-6, 2018 KKTC.