

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ BETA KAYNAĞI KULLANILARAK BETA DEDEKTÖRLERİNİN
KALİBRASYONU İLE İLGİLİ PROSEDÜR OLUŞTURULMASI**

Faruk BAYKUT

**MEDİKAL FİZİK ANABİLİM DALI
SAĞLIK FİZİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**ANKARA
2020**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Faruk BAYKUT tarafından hazırlanan “ $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ Beta Kaynağı Kullanılarak Beta Dedektörlerinin Kalibrasyonu ile İlgili Prosedür Oluşturulması” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Medikal Fizik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Haluk YÜCEL

Jüri Üyeleri:



Prof. Dr. Haluk YÜCEL

Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü



Doç. Dr. Şule ERGÜN

Hacettepe Üniversitesi, Nükleer Enerji Mühendisliği



Doç. Dr. Eren ŞAHİNER

Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Niyazi MERİÇ

Enstitü Müdürü

Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik davranış ilkelerine uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bu kurallar ve davranışların gerektirdiği şekilde, başka kaynaklardan aldığım tüm materyalleri ve sonuçları alıntı yaparak, bunlara kaynak gösterdiğimi beyan ederim.

Adı Soyadı: Faruk BAYKUT

İmza:



İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	iii
ÖZET.....	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1 Radyasyondan Korunma (Kalibrasyon Laboratuvarı).....	5
2.2 Tanımlar	6
2.2.1 Eşdeğer doz, H.....	6
2.2.2 Radyoaktivite.....	7
2.2.3 Saçılan radyasyon	7
2.2.4 Soğurulan doz.....	8
2.2.5 Soğurulan doz hızı.....	8
2.2.6 Ortam eşdeğer dozu, H*(d)	8
2.2.7 Su eşdeğeri fantom	9
2.2.8 Alan ölçümleri	10
2.3 Cihazların ve Standart Laboratuvarların Sınıflandırılması.....	11
2.3.1 Cihazların sınıflandırılması.....	11
2.3.2 Birinci dereceden standart dozimetri laboratuvarı	12
2.3.3 İkinci dereceden standart dozimetri laboratuvarı.....	12
2.3.4 Uluslararası ölçüm sistemi (IMS)	12

2.3.5 İkincil standart dozimetri laboratuvarları	13
2.4 Radyasyon Kaynakları	14
2.4.1 Monokromatik radyasyon kaynakları	14
2.4.2 Polikromatik radyasyon kaynakları.....	14
2.5 Radyasyon Ölçümünde Kullanılan Dedektörlerin Özellikleri.....	14
2.5.1 Gaz odalı dedektörler	15
2.5.1.3 Sintilasyon dedektörü	19
2.6 Pasif Dedektörler.....	21
2.6.1 Termoluminesans dozimetreler	22
2.6.2 Optik uyarımlı lüminesans dozimetreler (OSL) dozimetre	23
2.6.3 Film dozimetreler	23
2.7 Elektronik dozimetreler.....	24
2.8 Kalibrasyon.....	25
2.8.1 Foton dedektörlerinin kalibrasyonu.....	25
2.8.2 Beta dedektörlerinin kalibrasyonu	25
2.8.3 Kalibrasyonun temelleri	26
2.9 Yardımcı Kalibrasyon Donanımları.....	29
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	30
3.1 Kullanılan Materyaller ve Özellikleri	30
3.1.1 Kişisel dozimetre	30
3.1.2 Kalibrasyon işleminde kullanılan dedektörler	31
3.1.3 İyon odası elektrometre	34
3.1.4 Radyoaktif kaynak.....	35
3.1.5 Kaynak tutucu	35
3.1.6 Filtre	36
3.1.7 Test Objeleri	36

3.1.8. Film dozimetre.....	37
3.2 Beta Dedektörlerinin Kalibrasyon İşlemi	37
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	40
5. SONUÇ.....	64
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ.....	70



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

⁹⁰Sr/⁹⁰Y BETA KAYNAĞI KULLANILARAK BETA DEDEKTÖRLERİNİN KALİBRASYONU İLE İLGİLİ
PROSEDÜR OLUŞTURULMASI

FARUK BAYKUT

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü

Medikal Fizik Anabilim Dalı

Sağlık Fiziği Yüksek Lisans Programı

Danışman: Prof. Dr. Haluk YÜCEL

Bu tezde, radyasyondan korunma temelinde beta ölçen dedektörlerin uygun kalibrasyonunu yapabilmek için bir ⁹⁰Sr/⁹⁰Y beta radyoaktif kaynak (Aktivitesi: 20 MBq; S/N: PTW T48010-0286) kullanılarak ışınlama kurulumunun gerçekleştirilmesi ve çeşitli tip ve tasarımlardaki dedektörlerin ikinci dereceden doğrulukla (ikincil standart) beta dozunun ölçümüne uygun bir prosedür oluşturulması amaçlanmıştır.

Bu tezde ISO 6980 serisi uluslararası standartlar referans alınarak, ışınlama ve ölçüm yöntemleri uygulanmıştır. Farklı tasarım dedektörlerinin ikincil dereceden doğrulukla beta kalibrasyonunda kullanılan yöntemin geçerli kılınması için dokuya aktarılan eşdeğer cilt/ekstremiter dozu H_p(0,07) niceliğinde ölçülmüştür. OSL tekniğine göre BeO pasif dedektörlerden yararlanılmıştır. Yapılan bu doğrulama çalışmasında, 3, 5, 7, 11, 13, 26 ve 30 cm mesafelerde, mevcut PTW ⁹⁰Sr/⁹⁰Y beta kaynaklı ışınlama geometrisinde, filtresiz ve filtreli (180 µm PET (polyterafolat); ISO 6980-1'e yaklaşık uyumlu) farklı sürelerde (azami 1 saat) ışınlamalar yapılarak doz ölçümleri yapılmıştır. Cilt veya ekstremiter dozuna karşılık gelen yüzeysel (superficial) doz eşdeğeri H_p(0,07) ölçümleri için, 30 cm mesafede ışınlama yapıldığında ve uygun bir filtre kullanıldığında, ikincil standart beta kalibrasyonunda, doz homojenliğinin %99 olarak elde edilebildiği bir prosedür oluşturulmuştur.

Tez çalışmasında oluşturulan prosedüre göre, üç farklı tipteki dedektörün (10 litre ve 450 cm³ ve hacimli iyon odaları, φ30x15mm plastik sintilatör +GM prob) beta dozu kalibrasyonu, ışınlama tarihinde 15,2 MBq PTW tipi ⁹⁰Sr/⁹⁰Y beta ışınlama sisteminde kalibre edilmiştir. Bu dedektörlerin okumalarının düzeltilmesi için sırasıyla, 10 litre iyon odası için K=40,71, 450 cm³ iyon odası için K=3,75, φ30x15mm plastik sintilatör+GM probu için K=20,33 kalibrasyon sabitleri belirlenmiştir. Tez çalışması sonucunda, ikincil standart doğrulukta beta dedektör kalibrasyonunun yapılmasında, ISO 6980-1 uluslararası standardının gereklerine uygun kalibrasyon koşulları belirlenmiştir.

2020, 70 sayfa

Anahtar Kelimeler: Beta ışınlaması, kalibrasyon laboratuvarı, dedektör kalibrasyonu, radyasyon, radyasyondan korunma, ISO 6980

ABSTRACT
Master Thesis

ESTABLISHMENT OF A PROCEDURE ON THE BETA DETECTOR CALIBRATION USING $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ SOURCE

Faruk BAYKUT

Ankara University Institute of Nuclear Sciences
Department of Medical Physics
Health Physics Master's Degree Program

Supervisor: Prof. Dr. Haluk YÜCEL

In this thesis, it is aimed to install a $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta radioactive source (Activity: 20 MBq; PTW T48010-0286) irradiation apparatus to perform the proper calibration of beta survey instruments for their various design and manufacture types, on the basis of radiation protection, and also to establish a procedure suitable for the measurement of beta dose at the secondary standard calibration degree.

In this thesis, irradiation and measurement methods are applied by referring to ISO 6980 series international standards. In order to validate the method used for the beta calibration of secondary design accuracy of different design detectors, the equivalent skin / limb dose transferred to the tissue was measured in $H_p(0,07)$. BeO passive detectors were utilized according to OSL technique. Dose measurements were performed at different distances of 3, 5, 7, 11, 13, 26 and 30 cm by the available PTW certified $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta source irradiation geometry, without filter and with filter (180 μm polyterephthalate, almost complying with ISO 6980-1) at different exposure times (up to max. 1h). For $H_p(0,07)$ skin/extremity (superficial) dose equivalent measurements, a procedure is established in which a source-detector distance fixed at 30 cm and used a proper filter during irradiations, thus yielding to achieve a dose uniformity of 99% for the secondary standard beta calibration.

According to the procedure established in this study, the beta dose calibration of three different types of detectors (10 L ion chamber, 450 cm^3 ion chamber, $\phi 30 \times 15$ mm plastic scintillator+GM) was performed by using 15.2 MBq activity $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta source at a installed irradiation system. The calibration factors used for the correction of the device readings were determined to be $K=40.71$ for 10 liters ion chamber, $K= 3.75$ for 450 cm^3 ion chamber, and $K=20.33$ for $\phi 30 \times 15$ mm plastic scintillator+GM detector, respectively. As a result of the thesis, the calibration conditions in accordance with the requirements of ISO 6980-1 international standard were determined for performing beta detector calibration at secondary standard dosimetry accuracy

2020, 70 Pages

Key Words: Beta irradiation, calibration laboratory, detector calibration, radiation, radiation protection, ISO 6980.

TEŐEKKÖR

Bu tez alıőması Ankara Öniversitesi Nökleer Bilimler Enstitüsü laboratuvar olanakları kullanarak gerçekleştirilmiştir. Bu tez konunun araőtırma problemini belirleyen, çalıőmalarımda bana araőtırma olanağı sağlayan, beni yönlendiren, destekleyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Haluk YÖCEL'e, deneylerde yardımlarını esirgemeyen Arő. Gör. İbrahim DEMİREL'e ve Ankara Öniversitesi Nökleer Bilimler Enstitüsü çalıőanlarına teőekkürlerimi sunarım.

Bu tez, kısmen TÜBİTAK 118S616 kodlu "Brakiterapi Amaçlı Praseodim-142 Kaynağın Araőtırma Reaktöründe Üretilmesi ve Yeni Geliőtirilecek Göz ve Prostat Organ Spesifik Fantomlarda Verilen Doz Dağılımının Plastik Sintilatör ve Radyokromik Film Dozimetrik Tekniklerle İncelenmesi" baőtıklı projeden desteklenmiőtir.

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Aktivite
A.Ü.	Ankara Üniversitesi
Bq	Becquerel
Ci	Curie
Gy	Gray, Soğurulan doz birimi
GM	Geiger-Mueller
H	Eşdeğer Doz
H_p(0,07)	Kişisel eşdeğer cilt/ekstremiter dozu(dokuda 0,07 mm yüzeyden derinlikte)
H_p(10)	Kişisel tüm vücut eşdeğer dozu (dokuda 10 mm derinlikte)
IAEA	International Atomic Energy Agency
ISO	International Standards Organization
K	Kalibrasyon Faktörü
LNHB	Laboratoire National Henri Becquerel
NDK	Nükleer Düzenleme Kurumu
PSDL	Birinci Dereceden Standart Dozimetre Laboratuvarı
Q	Radyasyon kalite faktörü
RFD	Radyokromik Film Dozimetre
SSDL	İkinci Dereceden Standart Dozimetre Laboratuvarı
Sv	Sievert, Eşdeğer doz birimi
TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 (a) Genişletilmiş ve (b) genişletilmiş ve hizalanmış alanların şematik gösterimi	10
Şekil 2.2 (a) Genişletilmiş, (b) genişletilmiş ve hizalanmış radyasyon alanlarındaki eşdeğer doz tanımı.....	11
Şekil 2.3 Uluslararası ölçüm sisteminin (IMS) şematik gösterimi	13
Şekil 2.4 Gaz doldurulmuş dedektörlerin farklı çalışma bölgeleri	16
Şekil 2.5 10 Litre İyon Odası	18
Şekil 2.6 Tava tipi Geiger - Müller dedektörü	19
Şekil 2.7 Sintilasyon dedektörü.....	21
Şekil 2.8 ISO fantomları (water slab phantom, Water pillar phantom ve PMMA rod phantom)	22
Şekil 2.9 Elektronik dozimetre.....	25
Şekil 2.10 Kalibrasyonun dört farklı yönteminin uygulanmasının şematik gösterimi...27	
Şekil 2.11 Beta kalibrasyon düzeneği şematik gösterimi.....	28
Şekil 3.1 Pasif yüzük dozimetre	30
Şekil 3.2 10 litre iyon odası.....	31
Şekil 3.3 MiniSmartIon 450 cm ³ ion kontaminasyon dedektörü	32
Şekil 3.4 ATOMTEX AT1123 X-ışını ve gama ışını dozimetresi	33
Şekil 3.5 Elektrometre.....	34
Şekil 3.6 Radyoaktif beta kaynağı ⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	35
Şekil 3.7 Kaynak tutucu	35
Şekil 3.8 180 µm kalınlıkta politereftalat malzemesinde filtre	36
Şekil 3.9 Kamera ve lazer hizalama tertibatı	36
Şekil 3.10 Nem ve atmosferik basınç ölçer.....	36
Şekil 3.11 Gafkromik EBT3 radyokromik film	37
Şekil 3.12 Beta kalibrasyon düzeneği	38
Şekil 4.1 Beta kalibrasyon düzeneği	40
Şekil 4.2 Beta kalibrasyon seti	41
Şekil 4.3 İki farklı iyon odasının kalibrasyon koşulları	44
Şekil 4.4 ø30x15 mm sintilatörlü ATOMTEX dedektör ile alınan ölçümler.....	44

Şekil 4.5 Yüzük BeO dozimetre ile filtresiz alınan ölçümler	45
Şekil 4.6 450 cm ³ Thermo Electron Ion Smart doz ölçer ile 10, 20, 30 cm uzaklıktan alınan ölçümlere bağlı doz hızları	47
Şekil 4.7 10 litre PTW küresel iyon odalı doz ölçer ile 10, 20, 30 cm uzaklıktan alınan ölçümlere bağlı doz hızları.....	47
Şekil 4.8 ϕ 30x15 mm plastik sintilatörlü ATOMTEX dedektör ile 10, 20, 30 cm uzaklıktan alınan ölçümlere bağlı doz hızları	48
Şekil 4.9 Yüzük dozimetre ile filtresiz alınan uzaklığa bağlı doz hızı ölçümleri	49
Şekil 4.10 450 cm ³ Thermo Electron Ion Smart doz hızı ölçer ile 3 - 7 cm aralığındaki uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları	52
Şekil 4.11 450 cm ³ Thermo Electron Ion Smart doz hızı ölçer ile 11-23 cm aralığındaki uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları	52
Şekil 4.12 450 cm ³ Thermo Electron Ion Smart doz hızı ölçer ile 7-16 cm aralığındaki uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları	53
Şekil 4.13 10 litre PTW küresel iyon odası dedektörü ile 3-7 cm aralığında uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları	53
Şekil 4.14 10 litre PTW küresel iyon odası dedektörü ile 11-23 cm aralığında uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları	54
Şekil 4.15 10 litre PTW küresel iyon odası dedektörü ile 7-16 cm aralığında uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları	54
Şekil 4.16 ϕ 30x15 mm plastik sintilatörlü ATOMTEX dedektörü ile 3-7 cm aralığındaki uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları	55
Şekil 4.17 ϕ 30x15 mm plastik sintilatörlü ATOMTEX dedektör ile 11-23 cm aralığında uzaklıklarda alınan ölçümlere bağlı doz hızları	55
Şekil 4.18 ϕ 30x15 mm plastik sintilatörlü ATOMTEX dedektör ile 7-16 cm uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları	56
Şekil 4.19 450 cm ³ Thermo Electron Ion Smart doz hızı ölçer ile 3-30 cm aralığındaki uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları	56
Şekil 4.20 10 litre PTW küresel iyon odası dedektörü ile 3-30 cm aralığında uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları	57
Şekil 4.21 ϕ 30x15 mm plastik sintilatörlü ATOMTEX dedektör ile 3-30 cm uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları	57

Şekil 4.22 11 cm mesafede, filtreli ve $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağın EBT3 filmin boyunca gri skaladaki oluşturduğu doz dağılımı	58
Şekil 4.23 11 cm mesafede, filtreli ve $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağın EBT3 filmin boyunca gri skaladaki oluşturduğu doz dağılımı (background değeri çıkarılmış durum)	59
Şekil 4.24 11 cm mesafede filtresiz $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağın EBT3 filmin boyunca gri skaladaki oluşturduğu doz dağılımı	59
Şekil 4.25 11 cm filtresiz $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağın EBT3 filmin boyunca gri skaladaki oluşturduğu doz dağılımı (background değeri çıkarılmış).....	60
Şekil 4.26 30 cm mesafede filtresiz $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağın EBT3 filmin boyunca gri skaladaki oluşturduğu doz dağılımı	60
Şekil 4.27 30 cm filtreli $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağın EBT3 filmin boyunca gri skaladaki oluşturduğu doz dağılımı (background değeri çıkarılmış).....	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 ISO 6980 standartlarındaki Beta kaynağı özellikleri	14
Çizelge 3.1 H _p (0,07) dozimetreleri için performans gerekleri.....	31
Çizelge 3.2 10 litre iyon odası radyasyon ölçüm cihazı özellikleri	32
Çizelge 3.3 450 cm ³ Mini Smart ion kontaminasyon dedektörü özellikleri.....	33
Çizelge 3.4 ATOMTEX AT1123 modeli sintilasyon radyasyon ölçüm cihazını temel özellikleri.....	34
Çizelge 3.5 ⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y Beta kaynağı özellikleri	35
Çizelge 3.6 ISO 6980-1'e uygun beta ışınlama ve kalibrasyon düzeneği için gereksinimler.....	38
Çizelge 4.1 ISO 6980-1'e uygun beta ışınlama ve kalibrasyon düzeneği için gereksinimler.....	40
Çizelge 4.2 Yüzük dozimetre ile kaynaktan 30 cm uzaklıktaki filtreli ölçüm sonuçları	42
Çizelge 4.3 Dozimetrelerle kaynaktan 30 cm uzaklıktaki ölçüm sonuçları.....	42
Çizelge 4.4 Basınç ve sıcaklık değerleri	42
Çizelge 4.5 Dedektörlerin kalibrasyon faktörü K	43
Çizelge 4.6 Referans BeO dozimetresi ile kaynaktan belirli mesafelerden alınan ölçüm sonuçları	45
Çizelge 4.7 Kalibrasyon yapılacak dedektörlerin kaynaktan belirli mesafelerde alınan ölçüm sonuçları	46
Çizelge 4.8 Referans dozimetresi ile kaynaktan belirli mesafelerden alınan ölçüm sonuçları	48
Çizelge 4.9 Dedektörler ile kaynaktan belirli mesafelerden alınan ölçüm sonuçları referans dozimetre ile karşılaştırılmış sapma yüzdeleri	49
Çizelge 4.10 450 cm ³ Mini Ionsmart, ϕ 30x15 mm plastik Sintilatörlü ATOMTEX Dedektörü ve 10 Litre PTW küresel iyon odalı doz hızı ölçer belirli Açılardaki Yönlü Doz Hızı Ölçüm Sonuçları.....	62
Çizelge 4.11 Radyoaktif beta kaynağın konumuna göre belirli açılarda ile yapılan doz ölçümlerinin dönüşüm katsayıları	63

1. GİRİŞ

Kalibrasyon; kontrol altındaki standart koşullarda, kalibre edilen cihazın gösterdiği değerin, doğruluğu kesin olan bir referans cihazın ölçtüğü değerin fonksiyonu olarak ifade edilmesidir (Anonymous 2000). Diğer bir ifadeyle kalibrasyon; cihazın tepkisi/okuma değeri ile ilgilenilen nicelik arasındaki bağıntıyı belirler.

Radyasyondan korunma koşullarının sağlanması için doğru ölçüm yapılması gerekir. Bu sebeple herhangi bir amaçla ölçüm yapan cihazın kalibrasyonunun yapılmış olması gereklidir (ANSI N323,1978).

Radyasyon ölçüm dedektörü kalibrasyonu, üç tipte yapılır. Bunlar;

- 1) Elektronik kalibrasyon (puls hızı ile sayım hızı arasındaki ilişki)
- 2) Enerji Kalibrasyonu (Dedektörün tepkisinin enerjiye bağımlılığı)
- 3) Radyolojik (Birincil) Kalibrasyon

Bu üçüncü tip kalibrasyon işleminde, cihazın amaçlanmış ölçme niceliğine göre; Işınlama hızı (Exposure Rate) veya Doz hızı (Dose rate) ölçümleri ya da Aktivite Ölçümleri için sayım verimi şeklinde sınıflandırılabilir.

Bu tez çalışmasında, radyolojik izleme/taramalardaki radyasyon korunma seviyesi- doz hızlarını ölçebilen beta cihazlarının gösterimlediği (okuması) değerin düzeltilmesi için bir kalibrasyon yöntemi geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Küçük alanlı (small area) ve geniş alan dedektörlerini kalibre etmek için uygun demet elde etmede filtreleme koşulları çok önemlidir (ISO 4037-1, 2019). Örneğin radyolojide ve radyoterapide foton ve elektron radyasyonunun enerji aralıkları ile ilgili kalibrasyon donanımları gerekmektedir. Radyolojide kullanılan foton demetlerinin üretilmesi için belirli tüp gerilimi aralıklarında üretilmesi ve uygun şekilde filtrasyonu gerekmektedir (IEC 61267, 2005). Herhangi bir cihazın kalibrasyonu yapılırken, öncelikle doğruluğu kesin olan bir cihaz (referans) ile sonrasında ise kalibre edilecek olan cihaz ile ölçüm yapılır ve elde edilen sonuçlar birbirine oranlanır. Kalibre edilecek cihazın sonucu ile referans cihazın sonucunun aynı ölçüm değerini gösterebilmesi için bu oran, kalibre

edilecek cihazın sonucu ile çarpılır. Kalibre edilecek olan cihaz artık hangi değeri gösterirse göstere, bu oran sayesinde elde edilmiş olan katsayı ile çarpıldığında gösterdiği değer referans cihazın gösterge değeri ile aynı olur.

A.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsü bünyesinde dâhil olmak üzere yapılan tezler incelendiğinde, foton dedektör kalibrasyonları üzerine tezlerin mevcut olduğu, beta dedektör kalibrasyonu üzerine ise tez çalışmasının mevcut olmadığı görülmektedir.

Yapılan bu tez çalışmasında ise, 20 MBq aktivite (ışınlama tarihindeki aktivitesi:15,2 MBq) $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kapsüllenmiş ve PTW sertifikalı radyoaktif kaynak kullanılmıştır. Tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde ayrıntısıyla açıklanacak olan kalibrasyonlar için geliştirilen prosedürde Uluslararası Standart Kuruluşunun (ISO) yayımlanmış olduğu dokümanlardaki yöntemler esas alınmıştır.

Bu tez çalışmasının kapsamı, radyasyon güvenliği sağlanarak genel amaçlı beta dozu tarama/izleme amaçlı kullanılan beta ölçer cihazlarının (beta monitoring/survey instruments) kalibrasyonu sınırlıdır. Örneğin tedavi amaçlı beta dozimetreleri tezin kapsamında dâhil değildir.

Tez konusu ile ilgili, Amerika'da NIST, Almanya'da PTB ve Fransa'da LNHB laboratuvarları hem elektronik beta dedektörlerin hem de pasif beta dozimetrelerin kalibrasyonunu "birincil standart" seviyesinde sağlamaktadır. Belirli bir alandaki en yüksek ölçüm kalitesindeki standarda birincil standart denmektedir. İkincil standart seviyede ise, Almanya'nın akredite birincil standart PTB Kuruluşu tarafından izlenebilirliği belgelendirilen PTW SSDL laboratuvarı vardır (Anonymous 2000). İkincil standart ise Değeri bir birincil standartla direkt karşılaştırılarak belirlenen ve bir sertifika ile beraber izlenebilirliği belgelenen standarttır. Ülkemizde ise TAEK SSDL laboratuvarı kurulmuşsa da laboratuvarda beta kalibrasyon hizmeti henüz başlamamıştır.

Ülkemizde iyonlaştırıcı radyasyonun olası zarar ve etkilerinden korunma için temel ilke, esas ve sorumlulukları düzenlemek ve denetlemek üzere 2/7/2018 tarihli ve 702 sayılı

Nükleer Düzenleme Kurumunun Teşkilat ve Görevleri ile Bazı Kanunlarda Değişiklik Yapılması Hakkında Kanun Hükmünde Kararname ile Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK) kurulmuştur. İyonize radyasyona ilişkin düzenleme ve denetlemeye ilişkin faaliyetler NDK tarafından yerine getirilmektedir.

Radyasyondan korunma faaliyetleriyle bağlantılı olarak ülkemizde kalibrasyona ilişkin hizmetler ise Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) tarafından yürütülmektedir. TAEK'in SSDL'in mevcut olduğu birimlerinde (Teknoloji Geliştirme Dairesi, Radyasyon ve Hızlandırıcı Teknolojileri Dairesi) korunma düzeyli ve tedavi düzeyli foton dedektör kalibrasyonları ile akredite hizmetleri sunulmasına rağmen, hâlihazırda beta dedektör kalibrasyonları için açıklanmış veya akredite edilmiş bir prosedürü henüz bulunmamaktadır. TAEK yanında 702 sayılı Nükleer Düzenleme Kurumunun Teşkilat ve Görevleri ile Bazı Kanunlarda Değişiklik Yapılması Hakkında Kanun Hükmünde Kararnamenin 13'üncü maddesiyle NDK'nın ihtiyaç duyacağı her türlü teknik desteği sağlamak üzere kurulan NÜTED Nükleer Teknik Destek Anonim Şirketi'nin hâlihazırda bu konuda herhangi bir faaliyeti olmamasına rağmen, ileride kalibrasyona ilişkin faaliyetleri kapsamına alabileceği değerlendirilmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, radyasyondan korunma temelinde beta dedektörlerinin uygun kalibrasyonunu yapmak amacıyla, ISO 6980-1 standardında belirtilen koşullar çerçevesinde $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta radyoaktif kaynak (Aktivitesi: 20 MBq; S/N: PTW T48010-0286) kullanılarak bir kurulum gerçekleştirilmesi ve çeşitli tip ve tasarımlardaki beta radyonu ölçebilen cihazların ikinci dereceden doğrulukla (ikincil standart) beta dozunun ölçümüne uygun bir prosedür oluşturmasıdır. Oluşturulan prosedürün geçerli kılınması için akredite BeO kristalli OSL tekniğine dayalı $H_p(0,07)$ doz niceliği ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca ışınlama konumundaki doz dağılım düzgünlüğünün (dose uniformity) tespit edilmesi için radyokromik film dozimetre (RFD) tekniğinden yararlanılmıştır.

Tezin giriş bölümünde; dedektör kalibrasyonu radyasyondan korunmadaki önemi açısından incelenerek, korunma amaçlı beta ölçer cihazların kalibrasyonundaki mevcut durum ve Ülkemizdeki yasal mevzuatın gereklerine göre yapılan tezden elde edilen

bilginin ilgisi değerlendirilmiştir. İkinci bölümde doz ölçümü, doz nicelikleri ve radyasyon korunmaya ilişkin kuramsal literatür bilgisi sunulmuştur. Üçüncü bölümde kullanılan donanım, materyal ve ISO 6980-1'e uygun oluşturulan yöntem açıklanmıştır. Dördüncü bölümde deneysel bulgular ele alınmış, beşinci bölümde ise elde edilen bulgular yorumlanmıştır.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Radyasyondan Korunma (Kalibrasyon Laboratuvarı)

Radyasyon uygulamaları kapsamında tüm ölçme ve kalibrasyon laboratuvarlarının kullanılabilmesi için de NDK'dan lisans alınması zorunludur. Bu çerçevede radyasyondan korunma için belirli şartların sağlanması gerekmektedir. Bunlardan bazıları aşağıda belirtilmektedir:

- Uygun özellikleri sağlayan ve eğitimlerde başarılı olmuş yeterli eğitime sahip yetkin bir Radyasyondan Korunma Sorumlusu,
- Radyasyondan Korunma Sorumlusu, radyasyon ölçümleri için gerekli cihazları bulundurarak, mevcut cihazların kalibrasyonlarını yapması veya yaptırmayı,
- Kaynağın ve kaynak içeren cihazın konumu ve durumuna göre radyasyon uyarı işaretleri,
- Kaynağın veya kaynak içeren cihazın bulunduğu odaya yetkisiz kişilerin girilmesini engelleyecek önlemler,
- Kaynağın veya kaynak içeren cihazın bulunduğu odanın zırhlı olması,
- Kaynağın veya kaynak içeren cihazın odadaki konumunun bitişik alanlara ve ışınlanma yönüne bağlı olarak yerleştirilmesi,
- Çalışma koşullarının yazılı bir şekilde kaynağın/ cihazın yakınında görülebilecek bir yerde asılı olmasını sağlanması,
- Gerekli hallerde radyasyondan korunma sorumlusunun diğer ilgili personele radyasyondan korunma konusunda eğitim vermesi,
- Kaynak veya kaynak içeren cihazın olduğu odanın bitişik alanlarının meşguliyet durumuna göre zırhlanmış olması,
- Kaynak ve radyasyon yayan cihaz ile çalışırken gerekli kişisel koruyucu donanımların kullanılması,
- Kaynak veya radyasyon yayan cihaz ile çalışılırken uygun dozimetre veya dozimetrelerin kullanılması,
- Kaynakların aktivitesine göre kapı açıldığında ışınlamayı kesecek emniyet sistemi,
- Tehlike durumunda personelin ne yapacağını belirten acil durum planı.

Bu kořulların saęlanması radyasyondan korunma ve dűzgűn çalıřma ortamı için önemli ve gereklidir.

Mevzuatla iliřkisine bakıldıęında, 24/3/2000 tarihli ve 23999 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yűrűrlűęe giren Radyasyon Gűvenlięi Yönetmelięi’ne göre radyasyon alanlarının izlenmesinde uygun radyasyon lűm cihazları ve dozimetreler kullanılacak, radyasyon alanlarının radyasyon/radyoaktivite dűzeyi lűmleri NDK tarafından belirtilen sıklık ve yöntemlere uygun olarak yapılacak ve bu lűmlerde kullanılan cihazların kalibrasyonları uygun aralıklarla ikincil standart dozimetre laboratuvarında yapılması saęlanacaktır.

2.2 Tanımlar

Tezin bu blűműnde, tezde sıklıkla kullanılmıř fiziksel niceliklerin tanımları eski ve özel birimleri arasındaki dnűřűmler řeklinde verilmiřtir. Iřınlama, doz kavramları, foton ve/veya beta radyasyonun tanımlanmasında kullanılan niceliklerin bilinmesi önemli olduęundan bazı kavramlar açıklanmıřtır.

2.2.1 Eşdeğer doz, H

Doku içerisinde bir noktadaki Q ve D değerlerinin çarpılması ile elde edilir.

$$H = Q \times D \quad (2.1)$$

Burada Q, o noktadaki radyasyon kalite faktrű, D ise soęrulan dozdur.

Birimi $J.kg^{-1}$ ’dir (ICRP 103,2007).

2.2.2 Radyoaktivite

Yüklü parçacıkların ya da elektromanyetik radyasyonun kararsız atom çekirdeklerinden (radyoaktif çekirdek) salınması olayıdır. Matematiksel olarak aşağıdaki oranla tanımlanır.

$$A = dN/dt \quad (2.2)$$

Burada dN, dt zaman aralığındaki ani nükleer dönüşümlerin sayısıdır. SI birim sisteminde aktivitenin birimi becquerel (Bq)'dir. Aktivitenin eskiden kullanılan Curie (Ci), hala birim olarak kullanılmaktadır.

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq} \quad (2.3)$$

Bir miktar radyoaktif çekirdeğin aktivitesi, azalım sabiti (λ) ile o anki (t) tanecik (çekirdek) sayısının (N) çarpımına eşittir.

$$A = \lambda \cdot N \quad (2.4)$$

Çekirdeklerin yarısının bozulması (azalması) için geçen zamana yarı ömür ($T_{1/2}$) denir. Herhangi bir zamandaki aktivitenin (A) hesaplanması aşağıdaki formül ile gerçekleştirilir.

$$A = A_0 \cdot e^{-(\ln 2/T_{1/2}) \cdot t} \quad (2.5)$$

Burada A_0 başlangıç aktivitesi, t ise azalım süresidir.

2.2.3 Saçılan radyasyon

Radyasyonun herhangi bir madde ile etkileşimi sonucunda yönünün ve enerjisinin değişimine denir.

2.2.4 Soğurulan doz

Soğurulan doz aşağıdaki oran ile tanımlanır.

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm} \quad (2.6)$$

Burada $d\bar{E}$, birim kütle miktarına (dm) iyonize radyasyon tarafından aktarılan ortalama enerjidir. Soğurulan dozun birimi J/kg 'dır. Soğurulan dozun SI birimi gray (Gy)'dir (Anonymous 2000).

2.2.5 Soğurulan doz hızı

Soğurulan doz hızı aşağıdaki oran ile tanımlanır.

$$D = \frac{dD}{dt} \quad (2.7)$$

Burada; dD , dt zaman aralığında soğurulan dozdaki artıştır. Birimi $j.kg^{-1}.s^{-1}$ 'dir. Soğurulan doz hızının SI birimi Gys^{-1} 'dir (IAEA TRS 457 2007).

2.2.6 Ortam eşdeğer dozu, $H^*(d)$

ICRU, kütlece birleşimi % 76,2 O, % 10,1 H, % 11,1 C ve % 2,6 N elementlerinden oluşan ve yoğunluğu $1 g cm^{-3}$ olan doku eşdeğeri malzemeden yapılan 30 cm çapındaki küredir (Anonymous 1985; Anonymous 2006, Anonymous 2007).

Ortam eşdeğer dozu $H^*(d)$; ICRU küresindeki $d(mm)$ derinliğinde, hizalanmış radyasyon alanına zıt yöndeki yarıçapta, genişletilmiş ve hizalanmış alana eşdeğer bir radyasyon alanından elde edilen bir noktadaki eşdeğer dozdur. Birimi $J.kg^{-1}$ 'dir. SI birim sisteminde Sievert (Sv) olarak tanımlanır.

Genişletilmiş ve hizalanmış alandaki akı ve bunun enerji dağılımları, deney noktasında olduğu gibi ilgilenilen hacim boyunca aynı değerini alır. Alan tek yönlüdür (Anonymous 2004).

Yöne bağlı doz eşdeğerinin birimi kilogram başına joule'dür ($J.kg^{-1}$). Özel adı ise Sievert'dir. Yöne bağlı doz eşdeğerini; cilt için 0,07 mm derinlik $H'(0,07, \Omega)$, göz için 3 mm derinlik $H'(3, \Omega)$ olarak ifade edilir.

Kişisel doz eşdeğerini ise, vücut üzerinde belirtilen bir noktanın altında uygun d derinliğinde yumuşak dokudaki doz eşdeğeridir (Anonymous 1993).

Kişisel doz eşdeğerinin birimi kilogram başına joule'dür ($J kg^{-1}$). Özel adı ise Sievert'dir.

Kişisel doz eşdeğerinin herhangi bir ifadesi milimetre cinsinden d derinliğinin bir özelliğini ihtiva etmelidir.

Düşük enerjili radyasyonun nüfuz ettiği cildin 0,07 mm derinliği kullanılır. Bu derinlik için kişisel doz eşdeğerini $H_p(0,07)$ ile gösterilir. Genellikle girici radyasyon (yüksek enerjili) için 10 mm derinlik benzer şekilde gösterilir (Anonymous 1996). ICRU dokusu bileşimine sahip bir fantomun d derinliğindeki doz eşdeğerini ihtiva etmesi için kişisel doz eşdeğerini tarifini göz önüne almıştır. Benzer şekilde $H_p(10)$ kişisel tüm vücut eşdeğerini dozu (dokuda 10 mm derinlikte) yaygın kullanılan fiziksel bir niceliktir. (Anonymous 1992).

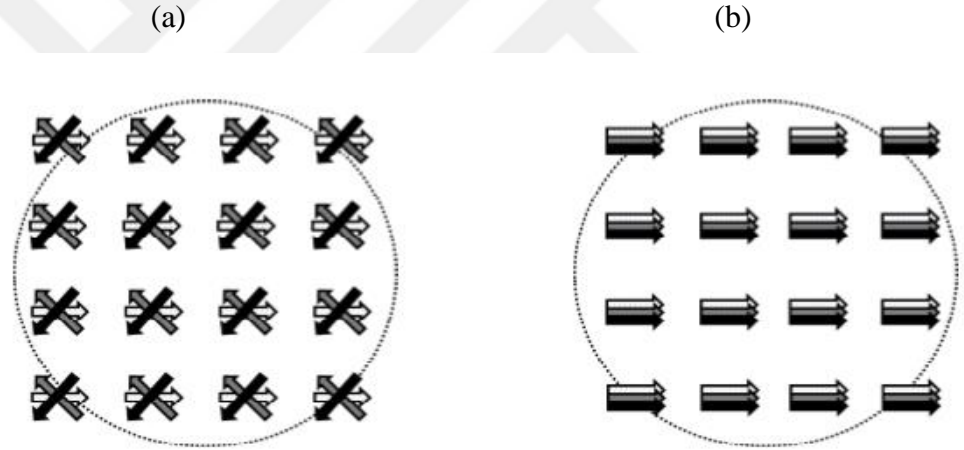
2.2.7 Su eşdeğerini fantom

Değerlendirilecek dozimetrik prosedüre göre, esas olarak sıvı haldeki suyla aynı radyasyon etkileşmelerine sahip su veya su eşdeğerini malzemedeki yapılan cisimdir. Dozimetrik kalibrasyonlarda, tüm vücudu temsil etmek için yaygın olarak ISO dilim (slab) fantomu (30 cm x 30 cm x 15 cm), kol ve bacağı temsil etmek için işi suyla dolu

ISO sütun (pillar) fantomu (Çapı: 73 mm, Uzunluk: 300 mm) ve ekstremitte/cildi temsil etmek için ise ISO PMMA çubuk (rod) fantomu kullanılır (Yücel 2018).

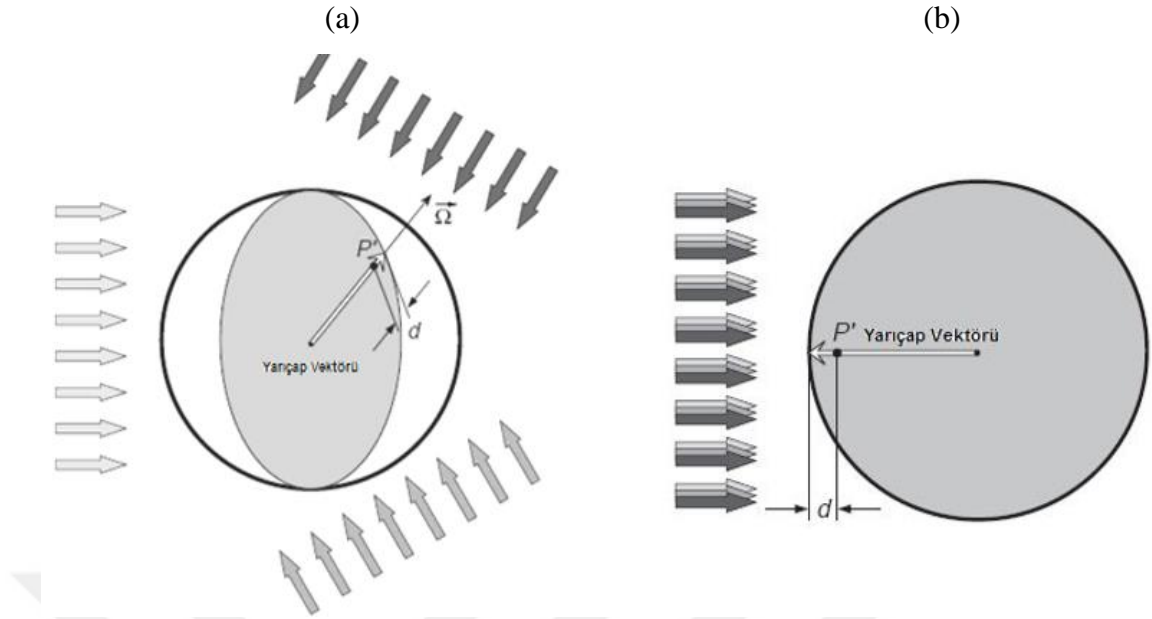
2.2.8 Alan ölçümleri

Alan ölçümleri için, gerçek radyasyon alanlarından türetilmiş belirli radyasyon alanlarının kullanılması faydalıdır. Radyasyon alanlarını karakterize etmek için “genişletilmiş” ve “hızalanmış” terimleri kullanılır. Genişletilmiş alanda; ilgilenilen tüm hacim boyunca gerçek alandaki gibi referans noktasında, akı ve bunun yönü ve enerji dağılımı aynı değerde olmalıdır. Genişletilmiş ve hizalanmış alanda ise akı ve bunun enerji dağılımı aynı genişletilmiş alandaki gibidir fakat akı tek yönlüdür. Genişletilmiş ve hizalanmış radyasyon alanları Şekil 2.1’de şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.1 (a) Genişletilmiş ve (b) genişletilmiş ve hizalanmış alanların şematik gösterimi (Anonymous 2000)

Genişleme ve hizalanma tanımına sadece niceliğin belirlenmesi için ihtiyaç duyulur ancak alan ölçüm monitörleri ile yapılmış ölçümlerle ilişkili değildir. Ortam dozu ölçmek için tasarlanmış cihazların izotropik (yönden bağımsız) cevaplar vermesi gerekir. Alan dozimetrelerinin kalibrasyonları ve model testleri genişletilmiş ve hizalanmış radyasyon alanlarını kullanarak tercih edilebilir bir hedef doğrultusunda havada yapılmalıdır.



Şekil 2.2 (a) Genişletilmiş, (b) genişletilmiş ve hizalanmış radyasyon alanlarındaki eşdeğer doz tanımı

- a) Genişletilmiş radyasyon alanında tanımlanan, ICRU küresi içindeki bir P' noktasındaki eşdeğer doz tanımını,
- b) Genişletilmiş ve hizalanmış radyasyon alanında tanımlanan ICRU küresi içindeki bir P' noktasındaki eşdeğer doz tanımını,
- ifade etmektedir.

2.3 Cihazların ve Standart Laboratuvarların Sınıflandırılması

2.3.1 Cihazların sınıflandırılması

2.3.1.1 Birincil standart

Belirli bir alandaki en yüksek ölçüm kalitesindeki standarttır. Birincil standartlar ulusal laboratuvarlarda devam ettirilir.

2.3.1.2 İkincil standart

Değeri bir birincil standartla direkt karşılaştırılarak belirlenen ve bir sertifika ile beraber izlenebilirliği belgelenen standarttır.

2.3.1.3 Üçüncül standart

Değeri bir ikincil standart ile karşılaştırılarak belirlenen standarttır.

2.3.1.4 Ulusal standart

Bir ülkede verilen nicelikteki tüm diğer standartların resmi ulusal karar tarafından onaylanarak temel değerlere sabitlenmesidir. Genel olarak bir ülke için ulusal standart aynı zamanda birincil standarttır.

2.3.2 Birinci dereceden standart dozimetri laboratuvarı

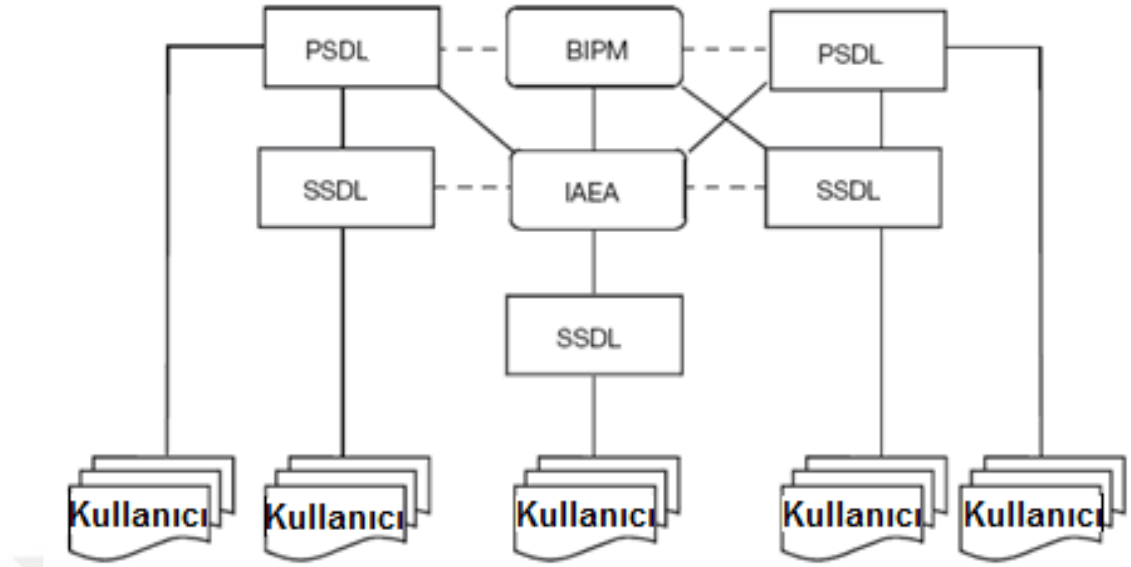
Radyasyon dozimetrisindeki birincil standartların ilerlemesi, gelişmesi ve korunması amacıyla kurulmuş ulusal standart laboratuvarıdır.

2.3.3 İkinci dereceden standart dozimetri laboratuvarı

Kalibrasyon servisi sağlamak için yetkili mercilerce atanmış, birincil standarda göre kalibre edilmiş en az bir tane ikincil standartlı donanımı olan dozimetri laboratuvarıdır.

2.3.4 Uluslararası ölçüm sistemi (IMS)

Uluslararası Ölçüm Sistemi, Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), ulusal birincil standart dozimetri laboratuvarları (PSDL), ikincil standart dozimetri laboratuvarları (SSDL) ve pek çok kullanıcı ölçümlerinden oluşmaktadır (Anonymous 2007).



Şekil 2.3 Uluslararası ölçüm sisteminin (IMS) şematik gösterimi (Anonymous 2007)

2.3.5 İkincil standart dozimetri laboratuvarları

Dünyada sadece yirmi ülkede Birincil standart dozimetri laboratuvarları (PSDL) bulunmaktadır. Bu laboratuvarlar tüm dünyadaki radyasyon dozimetrelerini kalibre etmek için yeterli sayıda değildir. İkincil standart dozimetri laboratuvarları (SSDL) ise PSDL sayısının yetersizliğinden dolayı PSDL'in erişim sağlayamadığı kullanıcılara kalibrasyon hizmeti sağlar. SSDL'lar cihazın kullanımına uygun şekilde kalibrasyonları yapar ve kalibrasyon belirsizliğine dair bilgileri sunar. Birçok ülkede SSDL'ler iyonize radyasyon uygulamaları yapan sağlık kuruluşları ve iyonize radyasyon ile çalışan endüstriyel kuruluşları gibi benzeri kuruluşlardaki kullanıcılara dozimetri hizmeti sağlamaktadırlar.

SSDL'ler, PSDL'de kalibre edilmiş ikincil standarda sahip olmalı, karşılaştırmalara katılmalı ve bu akreditasyon için ulusal metroloji kuruluşunda akredite olmalıdır (Anonymous 2007).

2.4 Radyasyon Kaynakları

2.4.1 Monokromatik radyasyon kaynakları

Enerji spektrumunda, tek bir enerjide enerji yüklü parçacık ya da parçacıklar salan radyasyon kaynaklarına monokromatik radyasyon kaynakları denir. Monokromatik radyasyon kaynaklarına örnek Cs-137 radyoaktif kaynağıdır.

2.4.2 Polikromatik radyasyon kaynakları

Bir radyasyon kaynağında farklı enerjilerde parçacıklar salınıyorsa bu parçacıkların oluşturduğu enerji spektrumu polikromatik enerji spektrumudur. X-ışınları polikromatiktir. Yapılan bu çalışmada $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ radyoaktif kaynağı kullanılmıştır. Aşağıdaki tabloda kaynağın yarı ömrü, maksimum enerjisi ve foton enerjisi belirtilmiştir.

Çizelge 2.1 ISO 6980 standartlarındaki Beta kaynağı özellikleri

Radyonüklid	Yarı ömür (gün)	E_{β} (max) (keV)	Foton Enerji (keV)
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	10523	2274	-

*Gümüş ($50\text{mg}/\text{cm}^2$) veya çelik pencere ile filtrelenir.

2.5 Radyasyon Ölçümünde Kullanılan Dedektörlerin Özellikleri

Radyasyon ölçümünde kullanılan dedektörler aşağıda sıralanmıştır:

1. Gaz odalı dedektörler
 - 1.1. İyon odası
 - 1.2. Orantılı sayaç
 - 1.3. Geiger-Müller dedektörü
2. Sintilasyon dedektörleri

3. Yarıiletken dedektörleri

2.5.1 Gaz odalı dedektörler

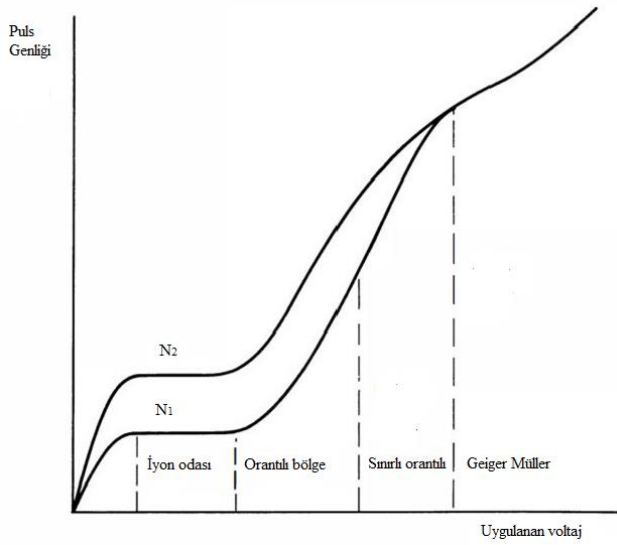
İçerisinde gaz bulunan radyasyon ölçümünde kullanılan radyasyon dedektörlerine gaz odalı dedektörler denir.

Gaz odalı dedektör çalışma prensibi, gelen radyasyonun, dedektörün içerisinde bulunan gaz atomları ile etkileşmeleri sonucu oluşan iyon çiftlerinin ölçülmesi esasına dayanır.

Dedektör elektrotları (katot ve anot) arasında uygulanan yüksek gerilimin sonucunda meydana gelen elektrik alan ile elde edilmiş iyon çiftleri elektrotlara ulaşırlar ve oluşan pulsar ile radyasyon ölçümü sağlanır. Elektrik alan, uygulanan yüksek gerilim ile doğru orantılıdır ve uygulanacak olan yüksek gerilim her dedektör tipi için farklıdır. Elektrik alanın çok küçük değerlerinde, oluşan iyon çiftleri elektrotlara ulaşacak yeterli enerjiyi kazanamazlar. Bu sebeple iyon çiftlerinin bir kısmı tekrar birleşir. Toplanan yük miktarı ise meydana gelen iyon çifti sayısından daha az olur. Eğer gerilim arttırılmaya devam edilirse, başlangıçta oluşan tüm birincil iyon çiftleri elektrotlarda toplanır. Meydana gelen tüm yüklerin toplanması nedeniyle, gerilimin arttırılmaya devam edilmesi iyon akımını etkilemez. Bu plato kısmı iyon odasının çalışma bölgesidir.

İki farklı derecedeki iyonize olayı (N_1 , N_2) incelenecek olursa, ikinci olay N_2 iyon çifti için plato başlangıcının N_1 'e göre daha yüksek bir voltaj değerinde olduğu görülür. İyon çifti sayısının artmasıyla tekrar birleşme olasılığı fazlalaşır. Gaz çoğalımı (gas multiplication) etkisi, gerilimin arttırılmasıyla başlar. Ayrıca toplanan yük miktarı ve gözlenen puls genliği büyür. Gaz çoğalımı voltajın belirli bir aralığında doğrusaldır. Toplanan yük, gelen radyasyon tarafından meydana getirilen başlangıçtaki iyon çifti sayısı ile orantılıdır. Bu bölge orantılı sayaçların çalışma bölgesidir. N_2 ve N_1 'in oranları bu bölgede hep aynıdır. Bu orantılılık gerilimin daha fazla arttırılması ile kaybolmaya başlar. N_2 eğrisi N_1 eğrisine yaklaşır. Puls genliği, yine artan gerilimle artmaya devam eder ancak, orijinal iyon sayısı ile orantılı değildir. Bu bölge sınırlı orantılı bölgedir.

Dedektör geriliminin daha da yükseltilmesiyle artan pozitif yük sayısı, elektrik alanını daha da fazla bir gaz çoğalmanın olmayacağı bir seviyeye indirir, bu sebeple yeni iyon çiftlerinin oluşmasını sağlayan neden ortadan kalkar. Yani, elektrik alan değerini artık çığ yaratamayacak daha düşük bir değere indiren uzay yükü miktarı hep aynıdır, elde edilen pulsların hepsinin genlikleri birbirine eşittir ve gelen radyasyonun hiçbir özelliğini yansıtmaz. Bu bölgeye Geiger-Müller bölgesi denir (Knoll 2000).



Şekil 2.4 Gaz doldurulmuş dedektörlerin farklı çalışma bölgeleri (Knoll 2000)

Plato bölgesinde toplam yük sayısı (Q) ve meydana gelen iyon çifti (N) arasındaki ilişki:

$$Q = N e = (\Delta E / w) e \quad (2.8)$$

e : Elementer yük ($1,6 \times 10^{-19}$ C)

ΔE : Gelen radyasyon tarafından odaya aktarılan enerji

W : Bir iyon çifti oluşması için gerekli enerji (eV/ion-çifti)

2.5.1.1 İyon odası

Radyasyon ölçüm dedektörleri genelde, gelen radyasyonun oluşturduğu iyonları ayırmak için bir elektrik alan kullanırlar. En basit tipteki dedektörlere iyon odası örnek

verilebilir. Bu dedektörler, plakalarının arasına gaz (daha yaygınca hava) doldurulmuş paralel düzlem kondansatörlerinden oluşur (Krane 1987).

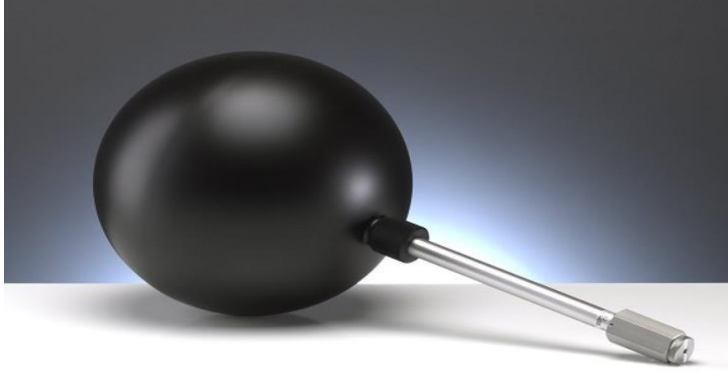
İyonizasyon yoğunluğunun artmasının istendiği durumlarda argon gibi daha yoğun gazlar kullanılmaktadır. İyon odasına gelen radyasyon, gaz atomları ile etkileşerek atomik uyarma ve iyonizasyona neden olur ve ayrıca enerjisini kaybeder. Oluşan serbest elektronlar ve pozitif iyonlar, elektrotlar arasına uygulanan alanın etkisiyle anot ve katotta iyon akımı meydana getirirler. Oda içerisindeki tüm iyonlar elektrotlara ulaştıklarında oda içerisindeki akım ile dış devreden okunan akım aynı değerdedir.

$$i = N e \quad (2.9)$$

şeklindedir. Burada e , elementer yüküdür ($1,6 \times 10^{-19}$ C).

İyon odalarının çalışma prensibi iki farklı şekilde olabilir. Bunlar akım ve puls modu şeklindedir. Akım modu prensibe göre çalışan iyon odaları ortama sürekli olarak giren radyasyonun oluşturduğu ortalama iyonizasyonu algılama üzerine tasarlanmışlardır. Bu modda, gelen radyasyonun ortalama bir şiddeti elde edilir. Bu durumda, her bir radyasyonun oluşturduğu iyonizasyon akımları çok küçük olduklarından ayrı ayrı ölçülmez. Puls modu prensibe göre çalışan iyon odalarında ise gelen her radyasyonun oluşturduğu sinyal pulsları ayrı ayrı sayılırlar (Knoll 2000).

İyon odaları gelen radyasyonun şiddetini ölçmeyi amaçladığından, mümkün olduğu kadar gelen radyasyonun enerjisinden bağımsız yapılırlar. Sonuçta gelen demetin enerjisi ne olursa olsun iyon akımı, parçacık sayısına bağlı olacaktır. Buna rağmen enerji bağımsızlığını çok geniş bir enerji skalasında yapmak mümkün değildir. İyon odaları enerjiden bağımsızlığı belirli bir enerji aralığı içindir. Ya da belli bir enerji aralığı için enerji bağımlılığını düzeltme faktörleri kullanılarak enerjiden bağımsız yapılır. İyon odaları farklı doz- doz hızı aralıklarında kullanılmak için tasarlanmışlardır. Genellikle hacmi büyük olan iyon odalarının hassasiyetleri, hacmi küçük olan iyon odalarına göre daha yüksektir. Şekil 2.5'te gösterildiği gibi Hacmi büyük olan iyon odaları ile daha düşük sınırlarda doz - doz hızı ölçümü yapılabilirken, hacmi daha dar olan iyon odaları ile daha yüksek doz - doz hızı ölçümü yapılabilir.



Şekil 2.5 10 Litre İyon Odası (<https://ptw.de>)

2.5.1.2 Geiger-Müller dedektörü

Geiger-Müller (GM) dedektörleri iyonizasyona dayanan gaz odası sistemidir. GM tüplerinde uygulanan elektrik alan değerinin yüksek olması nedeniyle, Townsend çığı çok şiddetli olur ve her çığ ortamda başka bir çığ meydana getirir. GM tüpte çığlar tek bir etkileşmenin ardından tüm tüpü sarar (tüpün tüm hacmine yayılır) ve oluşan tüm pulsların genlikleri birbirine eşit olur. Sonuçta başlangıçtaki iyon çifti sayısına bağlı değildir. Bu nedenle GM sayaçları spektroskopi amacıyla değil, radyasyonun basit dedeksiyonu için kullanılırlar (Knoll 2000).

Bir GM sayacının çıkış sinyalleri pek çok çığ işlemi sonucu birikmiş elektronları içerir ve Şekil 2.4'te gösterilen tepki eğrişinin IV. bölgesi civarındadır. Gerilimde daha fazla yükselme genellikle gerekli değildir. Elektronların birikme süresi içerisinde pozitif iyonlar çığ bölgesinden çok uzağa gidemezler. Bundan dolayı pozitif yüklü iyon bulutu anot teli çevresindedir. Bu iyon bulutu, elektrik alan şiddetini düşürür ve sonucunda çığ işlemi durur. Çevrim pozitif iyonların katoda sürüklenmeleri ve nötrale olmalarıyla tamamlanır. Bu süredeki hızlanan iyonlar, katottan elektron sökebilecek kadar yeterli enerji kazanabilirler ve çığ tekrar başlamış olur. Sürekli olabilecek artıştan korunmak için ikinci bir tür gaz tüpe eklenir, buna sönümleyici gaz denir. Sönümleyici gaz genellikle metan (CH_4) gibi poliatomik organik moleküldür; ilk konulan gaz ise argon gibi basit moleküllu bir asal gazdır. Yani tipik bir karışım %90 argon ve %10 metandır (Knoll, 2000).

Bir Geiger boşalımının hemen ardından, elektrik alan kritik değerinin altında olduğu zaman diliminde yeni bir iyonizasyon etkileşmesi oluşursa, bu etkileşmeye ait ikinci bir puls gaz çoğalımı meydana gelmediği için gözlenmeyecektir. Tüp, bu zaman boyunca ölüdür ve bu süre zarfındaki tüm etkileşmeler kaydedilmeyecektir. Bir GM tüpün ölü zamanı, ilk puls ile ikinci Geiger boşalımının başladığı zaman arasında geçen süredir.

GM dedektörlerinin düşük foton enerjilerindeki yanıtları (enerji bağımlılıkları) çok yüksektir. Bu nedenle GM dedektörlere enerji dengeleyici filtre yerleştirilmektedir. GM dedektörleri halen çevre ölçümlerinde en geniş kullanımı olan dedektördürler (Anonymous 1999).



Şekil 2.6 Tava tipi Geiger - Müller dedektörü (<https://www.flukebiomedical.com>)

2.5.1.3 Sintilasyon dedektörü

İyonize radyasyonun bazı maddelerde oluşturduğu sintilasyon ışığı ile algılanması sintilasyon dedektörünün çalışma prensibi olup, farklı radyasyonların dedeksiyonu ve spektroskopisinde en yararlı tekniklerden bir tanesidir.

Soğurdukları radyasyonun sintilasyon ışığı olarak veren kristallere sintilatör denir. İdeal bir sintilasyon maddesinin özellikleri aşağıdaki gibi olmalıdır:

- Yüklü parçacıkların kinetik enerjilerini, yüksek bir sintilasyon etkinliği ile dedekte edilebilecek ışığa çevirmelidir.
- Dönüşüm doğrusal olmalıdır. Yani, ışık verimi soğurulan enerji ile geniş bir aralıkta orantılı olmalıdır.
- Işığın etkin bir şekilde toplanması için ortam kendi salınımının dalga boyunu geçirgen olmalıdır.
- Hızlı sinyal pulslarının oluşumu için oluşan lüminesansın (aydınlanmanın) azalım zamanı kısa olmalıdır.
- Kristalin iyi bir optik kalitesi sahip olmalı ve istenilen boyutta dedektör yapılabilmelidir.
- Sintilasyon ışığının foto çoğaltıcı tüpe etkin bir şekilde aktarımı için kırılma indeksi camın kırılma indeksine yakın olmalıdır (Knoll 2000).

Sintilasyon dedektörlerinin çalışma prensipleri gelen radyasyon dedektöre girdikten sonra çok fazla atomları uyarılmış düzeylere çıkaran sayıda etkileşme yapması şeklindedir. Uyarılmış durumlar hızlı bir şekilde, görünür bölgede veya görünür bölgeye yakın ışık yayarlar. Bu ışık fotonları fotoçoğaltıcı (PM) tüpte bulunan foto katoda çarparak foton başına en çok birkaç (1-2) fotoelektron salınmasına sebep olur. Bu ikincil elektronlar PM tüpte çoğaltılır, hızlandırılır ve çıkış pulsları şekline dönüştürülür (Krane 1987). Bu pulsların işlenmesiyle radyasyon ölçümü gerçekleşmiş olur. Gelen fotonların enerjisi ile anotta elde edilen pulsun genliği orantılıdır. Bu sayede enerji ayrımı yapılır.

Sintilasyon dedektörleri inorganik ve organik sintilasyon dedektörleri olmak üzere iki çeşittir. Organiklerde plastik ve organik yapılı sıvılar, inorganik kristaller arasında ise sodyumiyodür en yaygın olanlarıdır (Şekil 2.7). İnorganiklerin avantajı ışık verimi ve doğrusallığı, dezavantajları cevap zamanlarının nispeten yavaşlığıdır. Organik sintilatörler inorganiklere göre daha az ışık veriminde ama çok hızlı cevap süresine sahiptir. Organikler beta spektroskopisi ve hızlı nötron dedeksiyonunun da daha çok tercih edilirken, bileşik maddelerin yüksek atom numaraları ve yoğunlukları inorganikleri gama spektroskopisi için en uygun yapar (Knoll 2000).



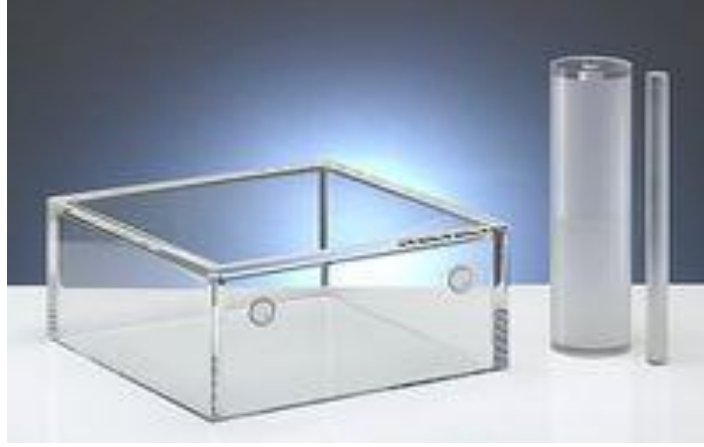
Şekil 2.7 Sintilasyon dedektörü

2.6 Pasif Dedektörler

Pasif dedektörler, dışarıdan bir güç kaynağı ile beslenmeyen ancak üzerine gelen iyonlaştırıcı radyasyon nedeniyle doğrudan veya dolaylı şekilde tepkisi ortaya çıkarılabilen dedektör tipleridir. Örneğin elektrometre (kalem dozimetre), iyonlaştırıcı radyasyon nedeniyle oluşan elektriksel yükün iki yaprağını açması veya kişisel dozimetre olarak da yaygın olarak kullanılan belirli LiF, BeO gibi kristallerin soğurduğu enerjinin dış bir etkiyle (ısı veya ışık) lüminesans ışınması olarak açığa çıkarılarak görünür bölgedeki ışığa duyarlı bir fotoçoğaltıcı (PMT) ile şiddetinin ölçülmesi esasına dayanır.

Optik Uyarımlı Lüminesans dozimetreler, Termolüminesans dozimetreler kişisel dozimetrelerde en yaygın olarak kullanılan dozimetrelerdir. Kişilerin üzerlerinde taşıdıkları ve üzerlerinde taşıdıkları süre boyunca anlık ya da toplam süredeki dozu ölçen dedektörlere kişisel dozimetreler olarak bilinir. Medikal dozimetride gün ışığına duyarsız ve herhangi bir film banyo gerektirmeyen ve özellikle Linaclarda elektron veya foton dozunun ölçülmesi için kullanılan film dozimetreler (örneğin; EBT3 Gafkromik) pasif dedektör/dozimetre olarak bilinir.

Bu tez çalışmasında, OSL dozimetreler $H_p(0,07)$ doz eşdeğerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır.



Şekil 2.8 ISO fantomları (water slab phantom, Water pillar phantom ve PMMA rod phantom)

Parmağa takılan ekstremite dozimetrelerinin kalibrasyonu için Şekil 2.8’de görülen fantomlarda PMMA malzemenen yapılmış ve boyutu (çapı:19 mm ve boyu: 300 mm) olan silindir çubuk (rod) fantomun kullanılması tavsiye edilir (ISO 4037-3, 2019).

2.6.1 Termolüminesans dozimetreler

Termolüminesans (TL), bir yalıtıkana veya yarı iletkene ısıtma işlemi uygulandığında, daha önce ışınlanması sonucu soğurduğu enerji ile orantılı olarak ışık yayması olayıdır. Termolüminesans dozimetrelere LiF:Mg,Ti örnek olarak verilebilir.

İyi bir termolüminesans dozimetrede aşağıdaki özelliklerde olmalıdır.

- Doku eşdeğeri,
- Basit ışınma eğrisine sahip,
- Yeniden kullanım için basit tavlama prosedürüne sahip
- Tekrar edilebilir,
- Doz hızından bağımsız,
- Boyutları küçük ve kullanım uygunluğu yüksek,
- Gün ışığına karşı duyarsız olmalıdır. Ayrıca TL sönüme uğramadan oda sıcaklığında birkaç hafta depolanabilmelidir.

2.6.2 Optik uyarımlı lüminesans dozimetreler (OSL) dozimetre

Radyasyonla uyarılan malzemenin yapı içerisinde tuzaklarda tutulan elektronlarının, dışarıdan LED altında tutulması sonucunda ortaya çıkan ışığın (luminesansın) fotoçoğaltıcı tüpler sayesinde dedekte edilmesi prensibine dayanır.

Avantajları

- Noktasal doz ölçümleri için küçük boyutta yapılabilirler,
- Ekonomiktir,
- Kalibrasyon ve taşımaya bağlı olarak kısa sürede ve kolayca doğru sonuç okurlar,
- Doku eşdeğeri iyidir,
- Geniş doz aralıkları ölçülebilir,
- Tekrar kullanılabilir,
- Beta fotonların algılamasında iyi sonuç verir,
- Yazılım aracılığıyla doz seviyelerinin bilgisayar ortamında kolay kaydına izin vermektedir.
- Sonuç elde etmek için herhangi bir kimyasal veya karanlık oda gibi işlemlere ihtiyaç bulunmamaktadır,
- Sıcaklık, nem gibi çevresel koşullara dayanıklıdır,
- Sağlamdır, kolayca hasar görmez,
- Kullanıcıda herhangi bir vücut bölgesinde kullanıma uygundur
(<http://radkor.com/sayfalar/39/osl-dozimetre-hakkinda>, 2019).

2.6.3 Film dozimetreler

Kişisel dozimetride kullanılan en eski sistemlerden biri de film dozimetreleridir. Medikal dozimetride gün ışığına duyarız ve herhangi bir film banyo gerektirmeyen ve özellikle Linac'da elektron veya foton dozunun ölçülmesi için kullanılan film dozimetreler (örneğin; EBT3 radyokromik) pasif dedektör/dozimetre olarak bilinir. Bu dozimetrelerin içerisinde radyografik film bulunur. Bu filmde meydana gelen kararma sayesinde kişinin maruz kaldığı doz hesaplanır.

2.6.3.1 Film dozimetre kullanmanın avantajları

- Dayanıklı olmaları,
- Küçük olmaları,
- Hafif olmaları,
- Aynı zamanda birden fazla tipteki radyasyonları kaydedebilmeleri,
- Geniş bir ölçü sahasındaki toplam ışınlamaların ölçümünü temin edebilmeleridir.

2.6.3.2 Film dozimetre kullanmanın dezavantajları

- Enerjiye fazla miktarda bağımlı olmaları (belli bir enerji aralığında),
- Filmlerin banyo problemlerinin olması,
- Termoluminesans ve OSL dozimetrelere göre ölçümdeki hassasiyetlerinin düşük olmasıdır.

Bu tez çalışmasında EBT3 model radyokromik film kullanan film dozimetre tekniğinden iki boyutlu doz ölçüm bilgisi elde edilerek, ışınlamanın homojenliği tespit edilmiştir.

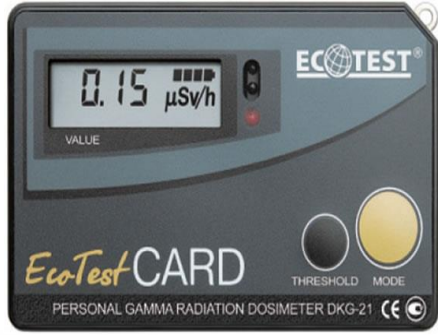
2.7 Elektronik dozimetreler

Hâlihazırda kullanılan elektronik dozimetreler kullanıcının üzerinde taşıyabileceği farklı doz niceliğini ($H_P(0.07)$, $H_P(10)$ gibi) ölçebilecek şekilde dizayn edilmişlerdir. Avantajları diğer dozimetrelere göre erken doz okunabilirliğidir. Fakat elektronik dozimetreler güç kaynağına ihtiyaç duyarlar. Bu da elektronik dozimetreleri diğer dozimetrelere göre dezavantajlı kılar. Elektronik dozimetreler, tek başına veya kişisel dozimetre kontrol otomatik sisteminin içinde kullanılabilir (bkz. Şekil 2.9).

Elektronik dozimetrelerin;

- Geçici olmayan bellekte gerçek zamanlı referans ile doz birikimi geçmişini depolama,

- Kızılötesi girişi (infrared port) üzerinden bilgisayara doz birikimi geçmiş transferi,
- Tüm birikmiş veri okunana kadar dozimetri modu sayesinde güç kilitleme, özellikleri bulunmaktadır (<http://radkor.com/sayfalar/85/elektronik-dozimetre>, 2019).



Şekil 2.9 Elektronik dozimetre (RADKOR, 2019)

2.8 Kalibrasyon

2.8.1 Foton dedektörlerinin kalibrasyonu

Referans dedektörlerin ve referans radyasyon alanlarının (foton) kalibrasyonlarında hava kerma niceliği kullanılırken, radyasyondan korunma ölçüm cihazlarının kalibrasyonunda eşdeğer doz niceliği kullanılmalıdır ve kalibrasyonları buna göre yapılmalıdır. Alan dozimetreleri, doz hızı ölçüm cihazları ise ortam eşdeğer doz niceliğinde ($H^*(d)$) ya da yönlü eşdeğer doz niceliğinde ($H'(d, \Omega)$) kalibre edilmelidir. Kişisel dozimetrelerin ya da doz hızı ölçüm aletlerinin kalibrasyonlarında fantom kullanılması gerekir. ISO water pillar fantom (Sütun fantomu), ISO water slab fantom (Gövde fantomu), veya ISO PMMA rod fantomları (Çubuk fantomu) kalibrasyonda kullanılır ve kalibrasyonda ICRU dokusuna göre farklılık gösteren geri saçılma düzeltmesi için herhangi bir düzeltme faktörü kullanılmadan gerçekleştirilir.

2.8.2 Beta dedektörlerinin kalibrasyonu

Beta ölçen dedektörlerin kalibrasyonu X ışını ve gama kalibrasyonuna göre daha zordur. Bunun nedeni ise beta parçacıkları yüklü parçacık olduğundan daha fazla saçılmaya uğramalarıdır. X ve gama ışınlarında olduğu gibi düzgün (uniform) radyasyon alanlarını

beta kalibrasyonu yaparken üretmek güçtür ve beta dozunun ölçümleri göreceli olarak zorluklar içermektedir.

X ve gama ışınlarından farklı olarak air kerma değil yönlü eşdeğer doz ölçümü beta kalibrasyonunda önemlidir. Yönlü eşdeğer doz, $H'(d, \Omega)$ ICRU küresindeki $d(\text{mm})$ derinliğinde, spesifik bir yöndeki yarıçapta Ω , genişletilmiş radyasyon alanına denk bir radyasyon alanında, bir noktadaki eşdeğer dozdur. Düşük giricilikteki radyasyon için $0,07 \text{ mm}$ 'lik derinlik cilt için yönlü eşdeğer doz $H'(0.07, \alpha)$ şeklinde ifade edilirler. Cilt dozu ölçülmesi nedeniyle ve beta radyasyonunun gama ve x ışınlarına göre giricilik özelliği az olduğu beta kalibrasyonu yapabilmek önem arz etmektedir.

2.8.3 Kalibrasyonun temelleri

Radyasyon ölçüm cihazlarının kalibrasyonunda dikkate alınması gereken radyolojik karakteristikler aşağıda verilmiştir (ANSI N323, 1999).

- Aralık (range), duyarlık (sensitivity), doğrusallık (linearity), dedeksiyon sınırı (detection limit) ve aşırı yüklenme durumlarına karşı tepki (response to overload conditions)
- Doğruluk ve yeniden elde edilebilirlik (accuracy and reproducibility)
- Enerji bağımlılığı (energy dependence)
- Açısal bağımlılık (angular dependence)
- Ölçülmesi amaçlanan radyasyonlardan başka diğer iyonlaştırıcı radyasyonlara karşı tepki (response to ionizing radiations other than those intended to be measured)
- Sıcaklık ve basınca bağımlılık (temperature and pressure dependence)

2.8.3.1 Kalibrasyon ve testler

Kontrol altındaki standart koşullarda kalibrasyon, kalibre edilen cihazın gösterdiği değer, doğruluğu kesin olan referans cihazın ölçtüğü değer, bir fonksiyonu olarak ifade edilmesidir. (Anonymous 2000).

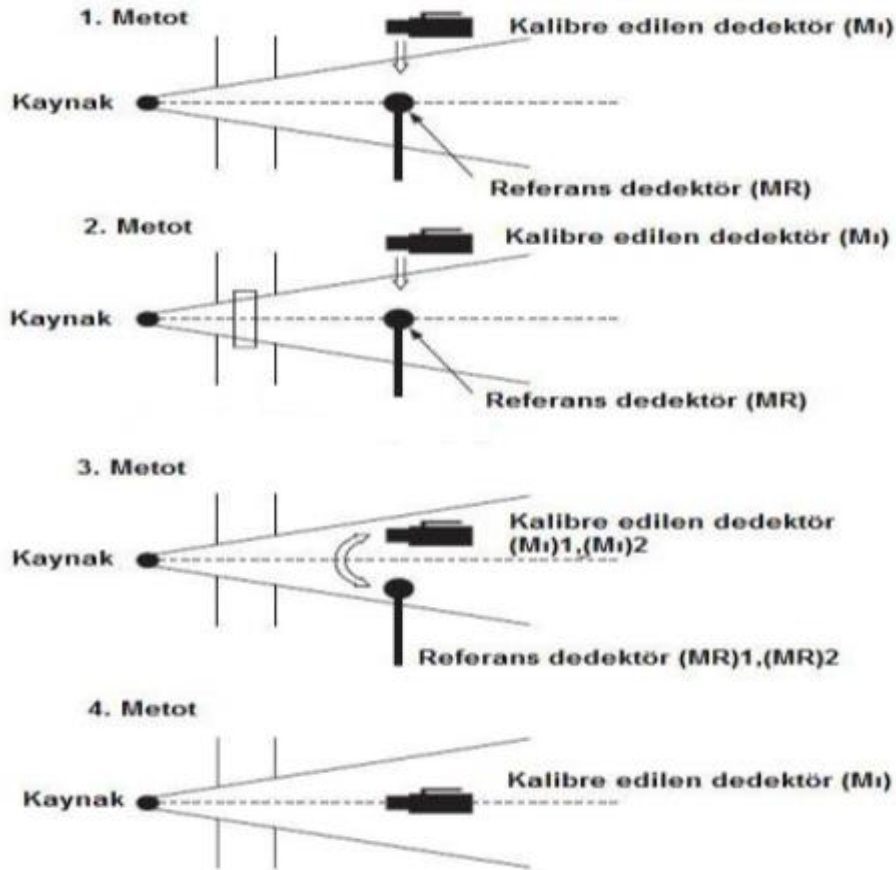
Kalibrasyonun amaçları;

- Kontrol altındaki standart koşullarda, kalibre edilen cihazda ölçülen değerin, ölçülmesi gereken değerin bir fonksiyonu olmasını sağlamak.
- Kalibre edilen cihazın doğru çalıştığına ve ölçüm yapabilmek için uygun olduğuna emin olmaktır.

Testler bir cihazın doğru olarak çalışıp çalışmadığını, limit değerinin üzerindeki çevresel ve elektriksel koşullardaki gösterge değerindeki dalgalanmaların belirlenmesini sağlamak için uygulanan ölçümlerdir.

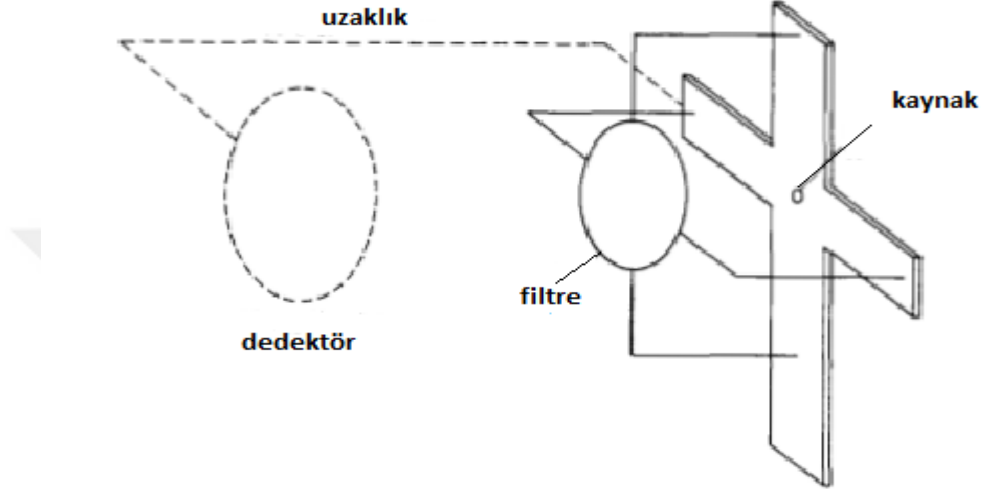
2.8.3.2 Referans bir dedektör kullanarak kalibrasyon faktörünün belirlenmesi

Aşağıdaki şekilde kullanılabilecek olan dört farklı kalibrasyon metodu gösterilmiştir:



Şekil 2.10 Kalibrasyonun dört farklı yönteminin uygulanmasının şematik gösterimi (Anonymous 2000)

1., 2. ve 3. metotlarda kalibrasyon faktörü referans ölçü aleti aracılığıyla belirlenir. 4. metotta ise temel radyasyon nicelikleri ile karakterize edilmiş ve önceden bilinen radyasyon alanları kullanılır. Burada referans ölçü aletine gerek yoktur. Bizim deneylerimizde 1. metot uygulanarak, aşağıdaki sistem uygulanmıştır.



Şekil 2.11 Beta kalibrasyon düzeneği şematik gösterimi (Owen, 1972)

Kalibre edilecek beta dedektörün kalibrasyon faktörü aşağıdaki formülden bulunacaktır:

Kalibrasyon faktörü K

$$K = \frac{\dot{H}'(0.07)k_t}{(\overline{M}_1 - \overline{M}_0)k_{pr}k_Tk_d} \quad (2.10)$$

k_t =Kaynağının bozunuma uğramasından kaynaklanan düzeltme sayısı. $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ yarı ömür 10523 gündür.

k_{pr} =referans hava basıncına göre sapmayı düzeltme sayısı

k_T =referans sıcaklığa göre sapmayı düzeltme sayısı

k_d = Cihazın kaynak uzaklığının gerçekte olması gereken uzaklıktan sapmasının düzeltme sayısı

\overline{M}_1 =dedektör ile ölçülen doz hızı değeri

M_0 =background değeri

$$k_t = \exp\left(-\frac{(t-t_0)}{t_{1/2}} \ln 2\right) \quad (2.11)$$

t=Deneyin yapıldığı tarih

t_0 =Kaynağın kalibrasyon sertifikasındaki zamanı

$t_{1/2}$ =Kaynağın yarı ömrü

Deneyde t_0 =Kaynağın kalibrasyon sertifikasındaki zamanı olarak alınmıştır. RADKOR firmasından pasif dozimetre olan referans dedektörlerimizin sonucunu alınan zamandır. Yani referans dozimetre ile alınan ölçümler, kalibre edilecek dedektörlerle alınan ölçümlerle aynı zaman dilimindedir.

2.8.3.3 Ortam (Background) radyasyonu

Ölçüm yapılan cihazın background okumaları ortamda herhangi bir referans radyoaktif kaynak yokken kaydedilmeli ve gerekliyse düzeltilmelidir. Bu tez çalışmasında, ortam doğal fon ölçümleri yapılmıştır. RFD için EBT3 kontrol filmleri, ışınlama odasında belirli süreler karanlıkta bekletilmiştir

2.9 Yardımcı Kalibrasyon Donanımları

Aşağıdakilerle sınırlı olmamak kaydıyla kurulan ışınlama sisteminden ayrı olarak bir beta kalibrasyon laboratuvarı tarafından ihtiyaç duyulabilecek ilgili donanımların listesi:

- Termometre
- Nemölçer
- Kalibrasyon mesafelerinin ölçümü için cetveller/ lazer mesafe ölçer,
- Kontrol edilebilir kamera

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Kullanılan Materyaller ve Özellikleri

3.1.1 Kişisel dozimetre



Şekil 3.1 Pasif yüzük dozimetre (RADKOR, 2019)

Referans dozimetre olarak yüzük dozimetrede BeO kristali kullanılmıştır. Aşağıda belirtilen özellikleri sebebiyle yüzük dozimetre, tezin amacı bakımından uygun bir dozimetre olarak değerlendirilmiştir (RADKOR, 2019):

- Etkin atom numarası sayesinde, neredeyse dokuyla yaklaşık eşdeğerdir.
- Boyutları küçüktür.
- Diğer pasif dozimetre materyallerine göre mekanik dayanıklılığı yüksektir.
- Sıcaklık, nem gibi çevresel koşullara karşı dayanıklıdır ve kolayca hasar görmez,
- Kullanıcıda herhangi bir vücut bölgesinde kullanıma uygundur,
- Doz bilgisi silinir ve tekrar kullanılabilir,
- Beta parçacıklarının algılamasında iyi sonuç verir (bkz Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 $H_p(0,07)$ dozimetreleri için performans gerekleri (EN 62387, 2016)

Karakteristik	Etkileyen niceliğin temel karakteristiği veya ölçme aralığı*	Beyan edilen doz ölçüm aralığındaki bağıl sapma için performans şartı
Ortalama beta radyasyonu enerjisi nedeniyle bağıl tepkisi	Ekstremiteler için dozimetreleri için 0,8 MeV ortalama enerji ve 0° ila 60° açı aralığında	$0,06 \text{ MeV} \leq E_{\text{beta}} < 0,2 \text{ MeV}$ enerji aralığı için bağıl sapma: $r_{\text{min}} = 0,67$ ila $r_{\text{max}} = 2,00$; $0,2 \text{ MeV} \leq E_{\text{beta}} < 0,7 \text{ MeV}$ enerji aralığı için bağıl sapma: $r_{\text{min}} = 0,69$ ila $r_{\text{max}} = 1,82$ ve Ortalama beta enerjisi $E_{\text{beta}} \geq 0,7 \text{ MeV}$ için $r_{\text{min}} = 0,71$ ila $r_{\text{max}} = 1,67$

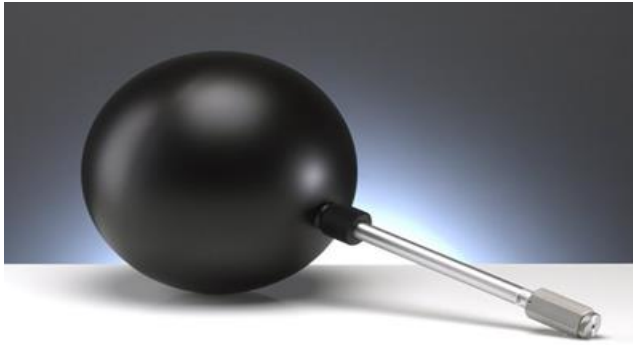
* Burada dozu etkileyen nicelik, ortalama beta enerjisi ve dedektörün ışınlanma açısı

3.1.2 Kalibrasyon işleminde kullanılan dedektörler

3.1.2.1 İyon odaları

En basit tipteki dedektörlere iyon odası örnek verilebilir. Bu dedektörler, plakalarının arasına gaz (daha yaygınca hava) doldurulmuş paralel düzlem kondansatörlerinden oluşur (Krane 1987).

PTW, TM 32003, 10 litre



Şekil 3.2 10 litre iyon odası

Çizelge 3.2 10 litre iyon odası radyasyon ölçüm cihazı özellikleri

Dedektör	PTW,10 litre Küresel iyon odası
Tipi	TM32003
Hacmi	10000 cc
Doz aralığı (Efektif)	min. 2,2 µGy/h – max 27 Gy/h
İyon geçiş zamanı (ion transit time)	0,16-0,22 s
Duyarlılık (sensitivity)	3,3nC/mR

3.1.2.2 İyon odası yüzey kontaminasyon dedektörü



Şekil 3.3 MiniSmartIon 450 cm³ ion kontaminasyon dedektörü (Thermo Electron Corp.,2019)

Çizelge 3.3 450 cm³ Mini Smart ion kontaminasyon dedektörü özellikleri (<https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/LSG/Specification-Sheets/D10516~.pdf>, 2019)

Dedektör	Mini SmartIon
	iyon odası
Hacim	450 cm ³
Doz aralığı (Efektif)	Min.1 µSv /h- Max. 50 Sv/h
H'(0.07) beta radyasyonuna cevap katsayısı (beta response) ⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y Emax 2.27 MeV	1,01
Isınma süresi	60 s
Çalışma ortam sıcaklığı	-10 °C ila 50 °C aralığı

3.1.2.3 ATOMTEX 1123 Model sintilatör esaslı dedektör

X ve gama ışınlarının yanı sıra, maksimum spektrum enerjisi 500 keV'den fazla olan yüksek enerjili beta radyasyonu yayınlayan kaynakların ölçülmesine uygun bir dedektördür. Bu cihaz, sürekli yayılan (beta spektrumu veya bremsstrahlung) ve kısa süreli yayılan (x ve gama ışınları gibi) radyasyonların verdiği dozu ölçmeye uygun olduğu gibi, bu tezde kullanılan ATOMTEX AT1123 modeli cihaz, 10 ns'den başlayan sürekli, puls tipi radyasyonun ortalama doz hızını da ölçmeye uygun bir cihazdır (Atomtex 1123, 2019). Cihazın 30 mm çapında ve 15 mm kalınlığında plastik sintilatörü ana bileşenidir.



Şekil 3.4 ATOMTEX AT1123 X-ışını ve gama ışını dozimetresi (Atomtex1123, 2019)

Çizelge 3.4 ATOMTEX AT1123 modeli sintilasyon radyasyon ölçüm cihazını temel özellikleri

Dedektör	Doz hızı aralığı	Doz hızı raliğı
	Min.	Max.
Sürekli, kısa dönemli radyasyon	50 nSv/h	10 Sv/h.
Puls radyasyon	0,1 μ Sv/h	10 Sv/h
Enerji aralığı	15 keV	10 MeV

3.1.3 İyon odası elektrometre

PTW, Unidos Webline İyon Odası Elektrometresi, çok küçük akımları ölçmek için tasarlanan hassas cihazlardır. Bu tezde, PTW (Freiburg), ikincil standart dozimetre laboratuvarı (SSDL) tarafından kalibre edilen PTW UNIDOS Webline elektrometre kullanılmıştır. Elektrometrenin bazı temel özellikleri aşağıda verilmiştir (<https://www.ptwdosimetry.com>):

- Isınma ve doz sıfırlama,
- Doz hızı ve toplam doz gösterimleme,
- Eş zamanlı doz ve doz hızı ölçümü,
- Uzaktan erişim işlevselliği,
- Veri kayıt özelliği,
- Geniş görüntüleme açıları ile aktif, yapılandırılabilir TFT ekran,
- Navigasyon düğmesi ve yardım sistemi ile kolay ve hızlı menü işlemi.



Şekil 3.5 Elektrometre

3.1.4 Radyoaktif kaynak

20 MBq aktiviteli PTW T48010-0286 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta kaynağı (mevcut aktivite: 15,2 MBq) bu tez çalışmasında kullanılan radyoaktif kaynaktır. Özellikleri çizelge 3.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ Beta kaynağı özellikleri (ISO 6980-1)

Radyonüklid	Yarı ömür (gün)	E_{β} (max) (keV)	Foton Enerji (keV)
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	10523	2274	-



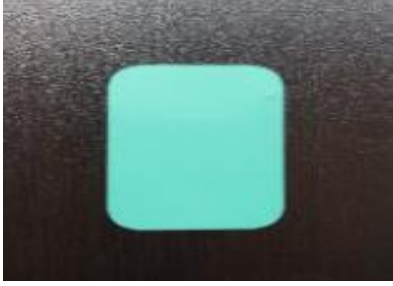
Şekil 3.6 Radyoaktif beta kaynağı $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

3.1.5 Kaynak tutucu



Şekil 3.7 Kaynak tutucu

3.1.6 Filtre



Şekil 3.8 180 μ m kalınlıkta politereftalat malzemesinde filtre

3.1.7 Test Objeleri

Kamera, sıcaklık, basınç ve nemölçer, lazer tezdaki deneyde kullanılan yardımcı ekipmanlardır.



Şekil 3.9 Kamera ve lazer hizalama tertibatı



Şekil 3.10 Nem ve atmosferik basınç ölçer

3.1.8. Film dozimetre

Bu tez çalışmasında EBT3 model radyokromik film kullanan film dozimetre tekniğinden iki boyutlu doz ölçüm bilgisi elde edilerek, ışınlamanın homojenliği tespit edilmiştir. Radyokromik EBT ve EBT2 model filmlerin en gelişmiş hali EBT3 model filmidir. Bu tez çalışmasında EBT3 Radyokromik pasif dedektör/dozimetre olarak kullanılarak iki boyutlu doz ölçümü yapılabilmektedir. Filmin soğurduğu doz ölçüm aralığı 0,01 Gy ile 40 Gy arasındadır. Güneş ışığından az etkilenir ve film ortam sıcaklığı 70°C kadar çalışabilmektedir (Gafchromic, 2019).



Şekil 3.11 Gafkromik EBT3 radyokromik film

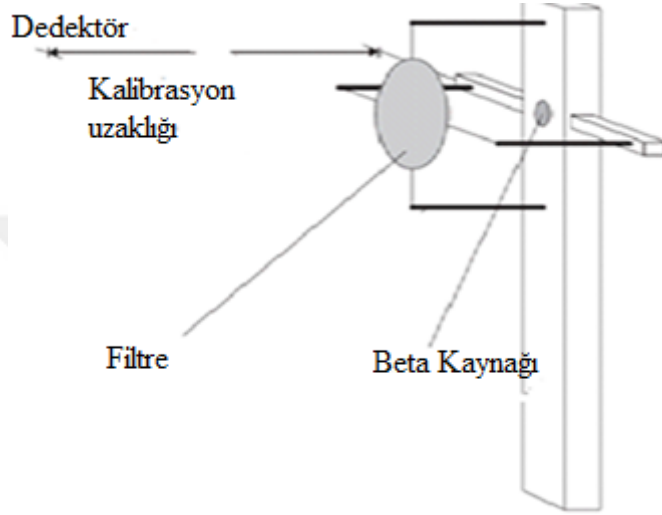
EBT3 filmlerin aktif katman kalınlığı 28µm ve 125µm kalınlığında polyester alt ve aynı kalınlıkta polyester üst katmandan oluşmaktadır. Kendinde gelişen, doku eşdeğerine sahip ve görünür ışıktan etkilenmeyen filmlerdir. Radyografik filmlere göre enerji bağımlılığı daha azdır. Suya dayanıklı ve yüksek çözünürlüğe sahiptirler.

3.2 Beta Dedektörlerinin Kalibrasyon İşlemi

Yöntem aktivitesi bilinen $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta kaynağı ile ISO 6980-1 standardına uygun ışınlama kalibrasyon sistemi kurulup, kalibrasyon prosedürlerinin belirlenmesidir. Çizelge 3.6'da ISO 6980-1 uygun kapsüle edilen $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağı öngörülen mesafelerde yerleştirilerek ve uygun filtre kullanılarak bir sistem kurulumunu göstermektedir.

Çizelge 3.6 ISO 6980-1'e uygun beta ışınlama ve kalibrasyon düzeneği için gereksinimler

Radyonüklid	$E_{max}(keV)$	Kalibrasyon uzaklığı(cm)	Kaynak-filtre uzaklığı(cm)
$^{90}Sr/^{90}Y$	2274	30	10



Şekil 3.12 Beta kalibrasyon düzeneği

Şekil 3.12'deki deney düzeneği kurulduktan sonra kalibrasyon işleminin gerçekleştirileceği mesafeye öncelikle referans dedektör yerleştirilmiş ve bir dizi ölçüm alınmıştır.

Referans dozimetre olarak RADKOR Personel Dozimetre Ölçüm ve Değerlendirme Laboratuvarından temin edilen beta kalibrasyonları bulunan pasif yüzük dozimetreler kullanılmıştır.

Referans dedektör olarak kullanılan pasif yüzük dozimetrelerle ile ISO 6980-1'e uygun 30 cm kaynaktan uzaklığa getirilmiş ve ölçümler alınmıştır. Belli sayıda alınan ölçümlerden sonra referans dedektör deney düzeneğinden kaldırılmış ve kalibre edilecek olan dedektör tam olarak referans dedektörün bulunduğu noktaya yerleştirilmiştir. Kalibre edilecek olan dedektör ile de ışınlama şartları değiştirilmeden

bir dizi ölçüm alınarak; elde edilen bütün veriler, aşağıdaki formül kullanılarak kalibre edilecek olan dedektörün kalibrasyon faktörünün hesaplanması planlanmıştır.

Kalibrasyon faktörü K

$$K = \frac{\dot{H}'(0.07)k_t}{(\overline{M}_1 - \overline{M}_0)k_{pr}k_Tk_d} \quad (3.1)$$

k_t =Kaynağının bozunuma uğramasından kaynaklanan düzeltme sayısı ve burada bu düzeltme sayısı. $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Yr}$ yarı ömür 10523 günden hesaplanır.

k_{pr} =referans hava basıncına göre sapmayı düzeltme sayısı

k_T =referans sıcaklığa göre sapmayı düzeltme sayısı

k_d = Cihazın kaynak uzaklığının gerçekte olması gereken uzaklıktan sapmasının düzeltme sayısı

M_1 =dedektör ile ölçülen doz hızı değeri

M_0 =background değeri

$$k_t = \exp\left(-\frac{(t-t_0)}{t_{1/2}} \ln 2\right) \quad (3.2)$$

t =Deneyin yapıldığı tarih

t_0 =Kaynağın kalibrasyon sertifikasındaki zamanı

$t_{1/2}$ =Kaynağın yarıömrü

Kalibrasyon faktörü hesaplandıktan sonra, referans doza göre belirli uzaklıklarda detektörlerle ölçümler alınarak yüzdelik sapmaları irdelenmiştir.

Kaynağın hangi alana ışınlama yaptığını belirleyebilmek için gafkromatik filmler kullanılmıştır. Bu filmlere 11 ve 30 cm olmak üzere filtrelili ve filtresiz ölçüm değerleri alınmıştır.

Yönlü eşdeğer doz hesaplamasında dedektörün kaynaktan belli uzaklıklarda belli açılarda ölçüm değerleri alınarak bulunan değerlerin sapma değerleri hesaplanmıştır.

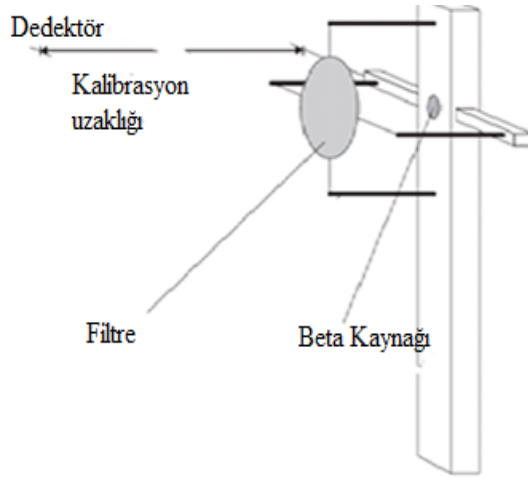
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Şekil 4.1’de belirtilen deney düzeneği kurularak kalibrasyon işleminin gerçekleştirileceği mesafeye öncelikle referans dedektör yerleştirilmiş ve bir dizi ölçüm alınmıştır.

Çizelge 4.1 ISO 6980-1’e uygun beta ışınlama ve kalibrasyon düzeneği için gereksinimler

Radyonüklid	E _{max} (keV)	Kalibrasyon uzaklığı(cm)	Kaynak-filtre uzaklığı(cm)
⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Yr	2274	30	10

* Kaynak boyutu da dikkate alınarak, kaynak filtre mesafesi ISO 6980-1’e göre 10 cm’de sabitlenmiştir.



Şekil 4.1 Beta kalibrasyon düzeneği



Şekil 4.2 Beta kalibrasyon seti

Referans dozimetre olarak RADKOR Personel Dozimetre Ölçüm ve Değerlendirme Laboratuvarından temin edilen beta kalibrasyonları bulunan pasif yüzük BeO dozimetreler kullanılmıştır.

Referans dedektör olarak kullanılan pasif BeO dozimetreler ISO 6980-1'e uygun 30 cm kaynaktan uzaklığa yerleştirilmiş ve ölçümler alınmıştır. Belli sayıda alınan ölçümlerden sonra referans dedektör deney düzeneğinden kaldırılmış ve kalibre edilecek olan dedektör tam olarak referans dedektörün bulunduğu noktaya yerleştirilmiştir. Kalibre edilecek olan dedektör ile de ışınlama şartları değiştirilmeden bir dizi ölçüm alınmıştır.

Elde edilen bütün veriler, aşağıdaki formül kullanılarak kalibre edilecek olan dedektörün kalibrasyon faktörü, K, Eşitlik (3.1)'den hesaplanmıştır.

Ölçüm sonuçlarımızdan background (doğal radyasyon) değeri çıkarılmış olup çizelgelerde bu değerler kullanılmıştır.

Çizelge 4.2 Yüzük dozimetre ile kaynaktan 30 cm uzaklıktaki filtreli ölçüm sonuçları

Dozimetre	Filtre (var/yok)	Radyasyona		Doz H _p (0,07) (mSv)
		maruz kaldığı süre (dk)	Kaynaktan uzaklığı (cm)	
Yüzük BeO	Filtre var	60	30	4,47

Çizelge 4.3 Dozimetrelerle kaynaktan 30 cm uzaklıktaki ölçüm sonuçları

Dozimetre	Filtre (Var /yok)	Doz hızı (µSv/h)
φ30x15 mm Plastik sintilatör	Filtre var	220
10 litre küresel iyon odası	Filtre var	101
450 cm ³ iyon odası	Filtre var	1190

Çizelge 4.4 Basınç ve sıcaklık değerleri

	Basınç (kPa)	Sıcaklık (K)	Uzaklık
Referans	101,3	293,15	Aynı uzaklık değeri
Deneysel	101,7	294	Aynı uzaklık değeri

Kalibrasyon faktörü K, kişisel cilt dozu olarak H_p(0,07, α), Eşitlik (3.1)'den hesaplanmıştır. Burada sırasıyla düzeltme faktörleri belirlenerek uygulanmıştır.

$$kt = \exp(-0/10984 * \ln 2) = 1 \quad (4.1)$$

Referans dedektör ile kalibrasyon yapılacak dedektörlerin ölçümü yaklaşık aynı zamanda yapıldığı için katsayı 1'e eşittir.

k_{pr} =referans hava basıncına göre sapmasının düzeltme sayısı

$$P_o/P=101,3 \text{ kPa}/101,7 \text{ kPa}=0,996 \quad (4.2)$$

k_T =referans sıcaklığa göre sapmayı düzeltme sayısı

$$T/T_0=294 \text{ K}^0/293,15 \text{ K}^0=1,004 \quad (4.3)$$

k_d = Cihazın kaynak uzaklığının gerçekte olması gereken uzaklıktan sapmasının düzeltme sayısı kaynaktan uzaklıkta hassas olarak ölçüm alındığı için kaynak uzaklığının olması gereken uzaklıkla aynı uzaklığa yerleştirilmiştir. Bu nedenle k_d değeri 1'dir.

M_1 =dedektör ile ölçülen doz hızı değeri

M_0 =background değeri=0,20 $\mu\text{Sv/h}$

$$K = \frac{h'(0.07)k_t}{(\overline{M}_1 - \overline{M}_0)k_{pr}k_Tk_d} \quad (4.4)$$

Çizelge 4.5 Dedektörlerin kalibrasyon faktörü K

Dedektör	Kalibrasyon faktörü, K
450 cm ³ iyon odalı doz ölçer	3,75
10 litre küresel iyon odalı doz ölçer	40,71
φ 30x15 mm sintilatör doz ölçer	20,33

a) 450 cm³ Thermo electron SmartIon iyon odası ile alınan ölçümler

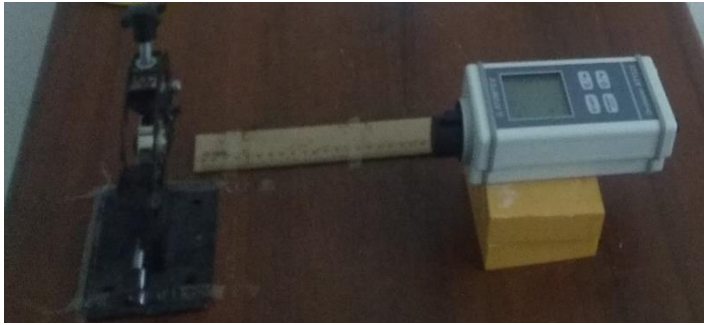


b) 10 litre PTW iyon odası ile alınan ölçümler



Şekil 4.3 İki farklı iyon odasının kalibrasyon koşulları

Referans dedektör, ⁹⁰Sr/⁹⁰Y kaynaktan 10, 20 ve 30 cm uzaklıklara getirilerek ölçümler alınmıştır. Her bir dedektör için hesaplanan kalibrasyon faktörlerinin bütün uzaklıklarda aynı sonucu verip vermediğine bakılmıştır.

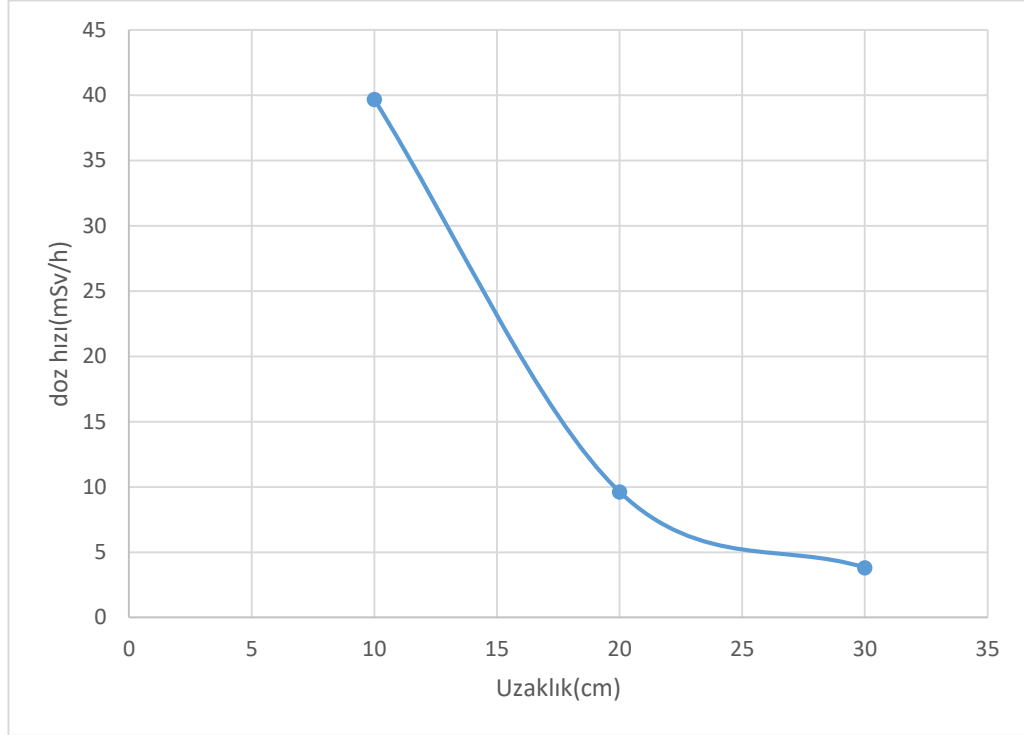


Şekil 4.4 $\phi 30 \times 15$ mm sintilatörlü ATOMTEX dedektör ile alınan ölçümler

Çizelge 4.6 Referans BeO dozimetresi ile kaynaktan belirli mesafelerden alınan ölçüm sonuçları

Dozimetre	Radyasyona		Doz H _p (0,07) (mSv)
	maruz kaldığı süre (dk)	Kaynaktan uzaklığı (cm)	
Yüzük (referans dozimetre)	60	10	39,69
Yüzük (referans dozimetre)	60	20	9,62
Yüzük (referans dozimetre)	60	30	3,81

dk:dakika, mSv:milisievert

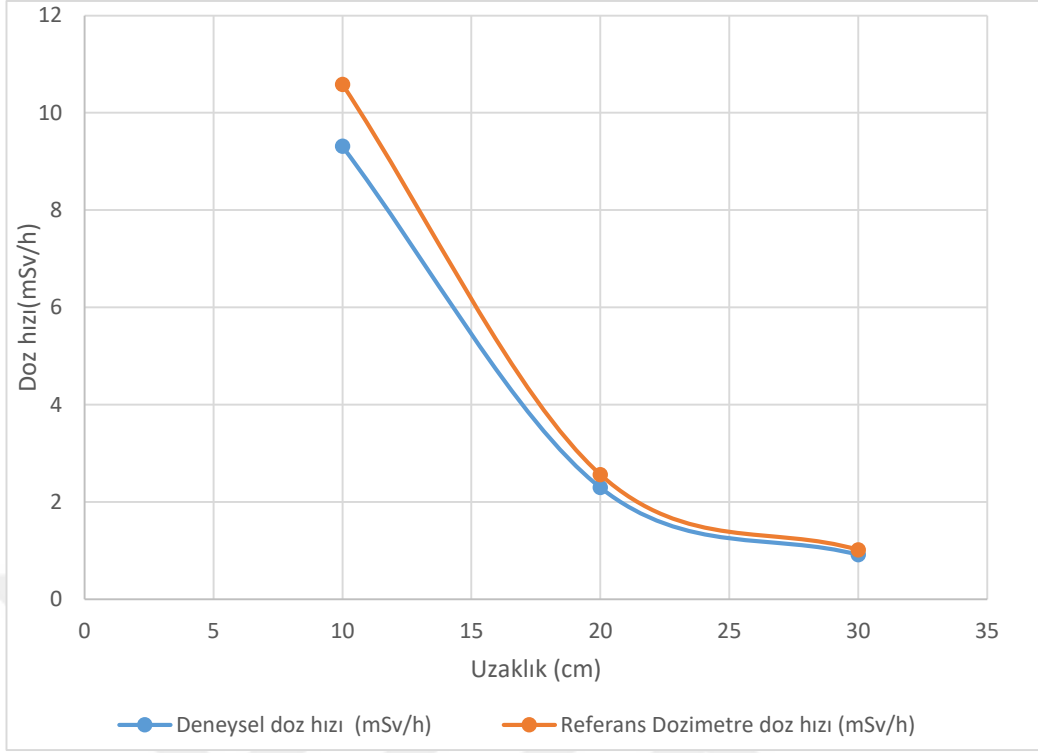


Şekil 4.5 Yüzük BeO dozimetre ile filtresiz alınan ölçümler

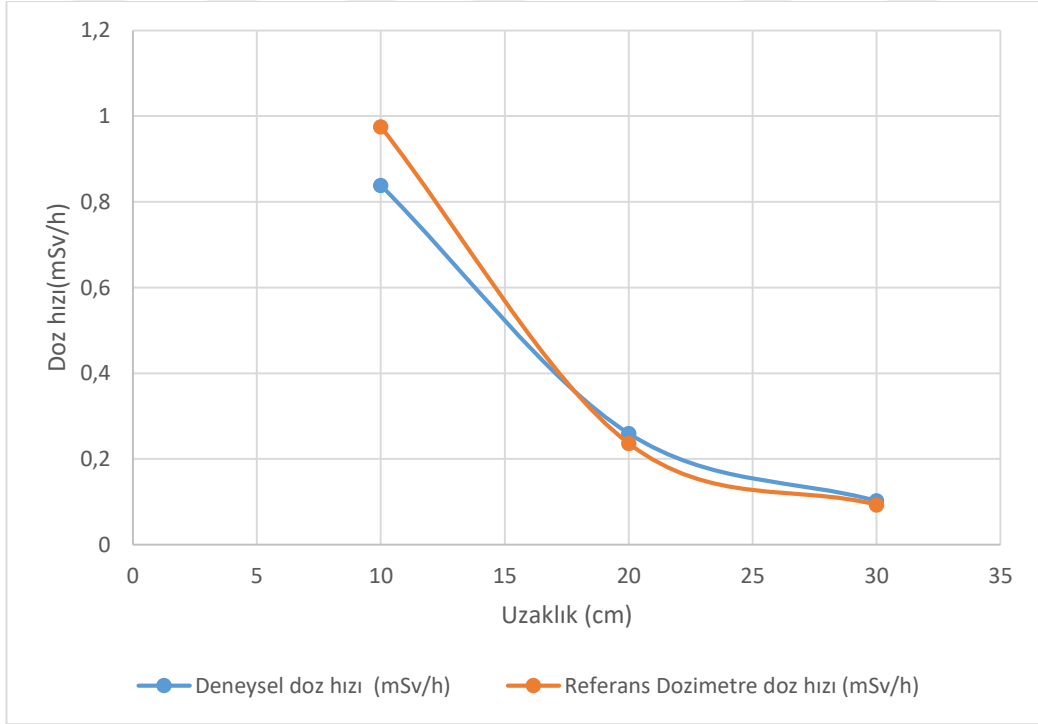
Dedektörlerle alınan ölçümler kalibrasyon faktörü ile çarpılıp, bulunan değerler referans dozimetrenin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Aradaki fark yüzdelik sapma olarak bakılmıştır.

Çizelge 4.7 Kalibrasyon yapılacak dedektörlerin kaynaktan belirli mesafelerde alınan ölçüm sonuçları

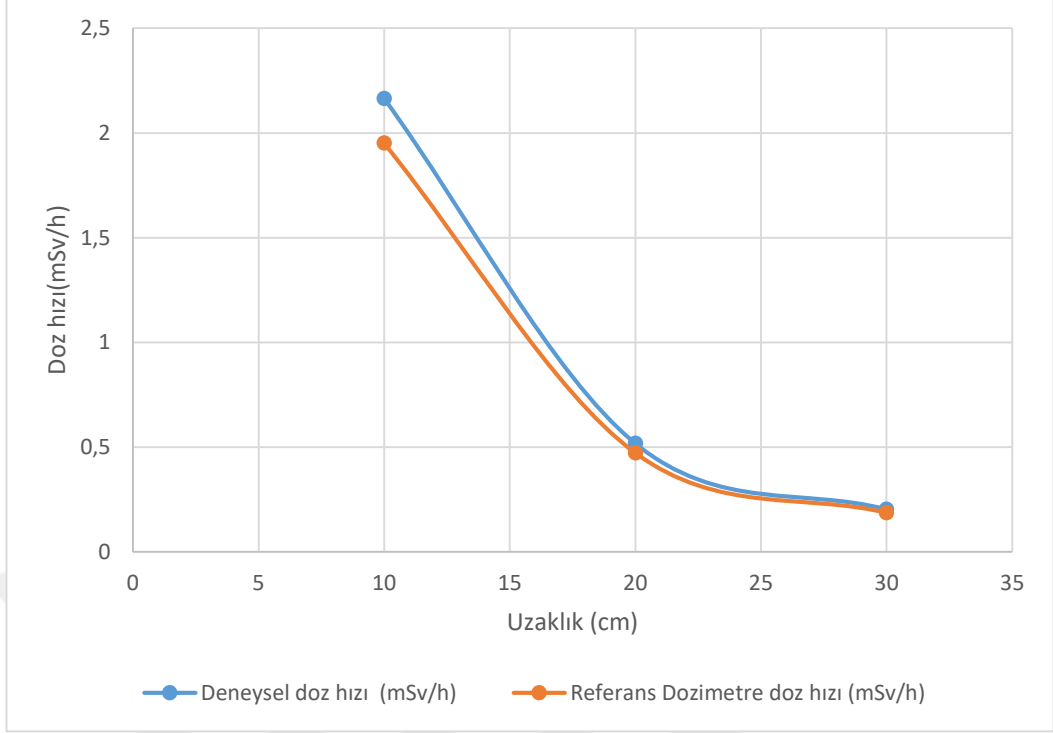
Dozimetre	Uzaklık(cm)	Deneysel doz hızı (mSv/h)	Referans Dozimetre doz hızı (mSv/h)	% Sapma
450 cm ³ Thermo Electron Ion Smart	10	9,31	10,584	12
450 cm ³ Thermo Electron Ion Smart	20	2,30	2,565	9,9
450 cm ³ Thermo Electron Ion Smart	30	0,9184	1,016	9,6
10 litre PTW küresel iyon odası	10	0,8385	0,975	14
10 litre PTW küresel iyon odası	20	0,2596	0,236	10
10 litre PTW küresel iyon odası	30	0,1021	0,093	9,8
φ30x15 mm plastik sintilatörlü ATOMTEX	10	2,1647	1,952	10,9
φ30x15 mm plastik sintilatörlü ATOMTEX	20	0,5184	0,473	9,6
φ30x15 mm plastik sintilatörlü ATOMTEX	30	0,204	0,187	9,5



Şekil 4.6 450 cm³ Thermo Electron Ion Smart doz ölçer ile 10, 20, 30 cm uzaklıktan alınan ölçümlere bağlı doz hızları



Şekil 4.7 10 litre PTW küresel iyon odalı doz ölçer ile 10, 20, 30 cm uzaklıktan alınan ölçümlere bağlı doz hızları



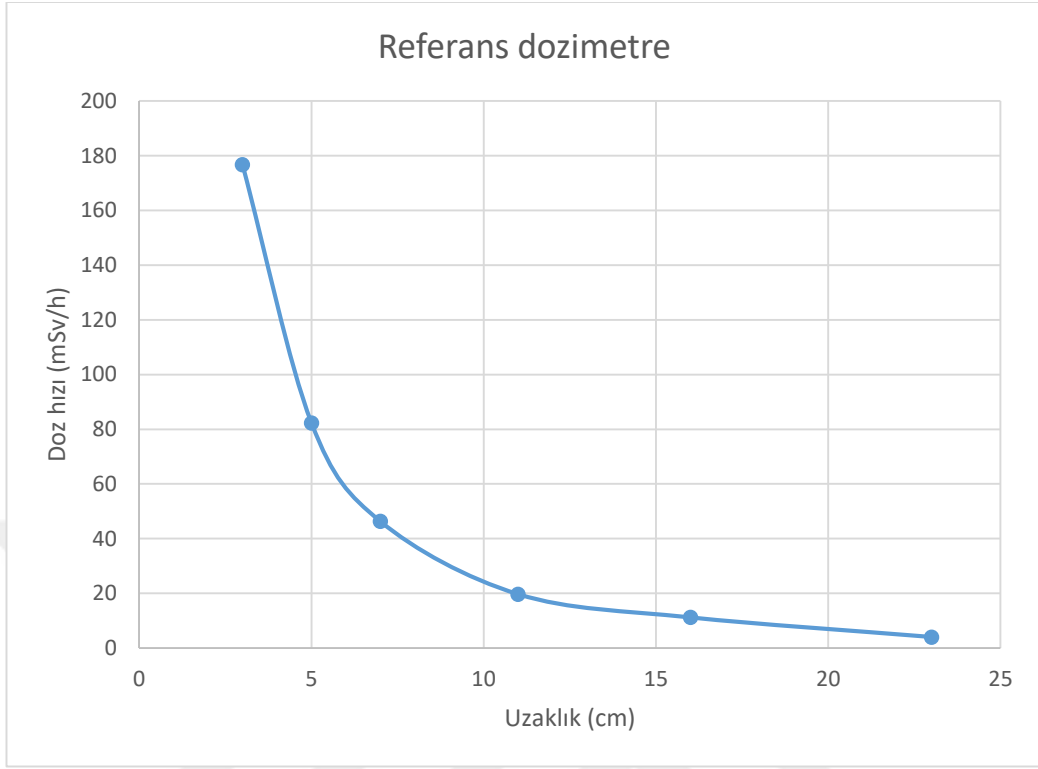
Şekil 4.8 $\phi 30 \times 15$ mm plastik sintilatörlü ATOMTEX dedektör ile 10, 20, 30 cm uzaklıktan alınan ölçümlere bağlı doz hızları

Referans dozimetre ile alınan 10, 20, 30 cm uzaklıklardan sonra ara değerler olan 3, 5, 7, 11, 16, 23 cm uzaklıklardan da ölçümler alınmıştır. Bu ara değerlerde ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.8 Referans dozimetresi ile kaynaktan belirli mesafelerden alınan ölçüm sonuçları

Dozimetre	Radyasyona maruz kaldığı süre (dk)	Kaynaktan uzaklığı(cm)	Beta cilt dozu $H_p(0,07)$ (mSv)
Yüzük(referans dozimetre)	60	3	176,72
Yüzük(referans dozimetre)	60	5	82,34
Yüzük(referans dozimetre)	60	7	46,32
Yüzük(referans dozimetre)	60	11	19,7
Yüzük(referans dozimetre)	60	16	11,2
Yüzük(referans dozimetre)	60	23	4,04

dk.=dakika (minute), mSv: milisievert



Şekil 4.9 Yüzük dozimetre ile filtresiz alınan uzaklığa bağlı doz hızı ölçümleri

Kalibrasyonu yapılacak dozimetreler sapma yüzdeleri ne kadar olduğu görülebilmesi için referans dozimetreye alınan ölçümler her biri için ayrıca tekrarlanmıştır.

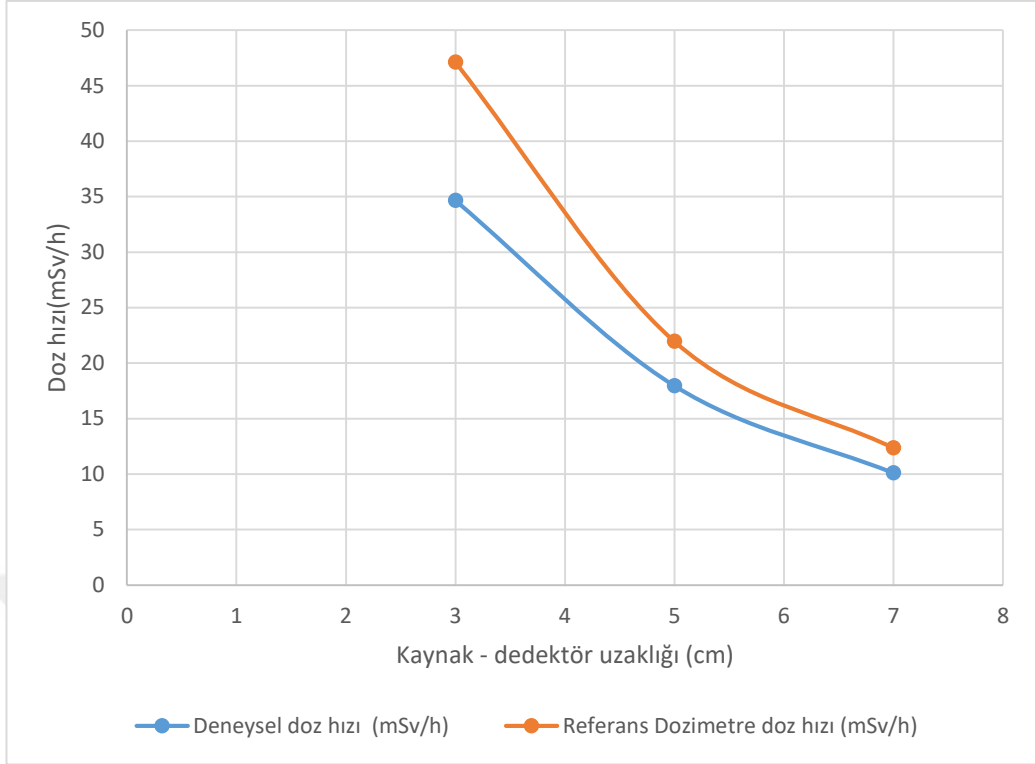
Çizelge 4.9 Dedektörler ile kaynaktan belirli mesafelerden alınan ölçüm sonuçları referans dozimetre ile karşılaştırılmış sapma yüzdeleri

Dozimetre	Kaynak - dedektör uzaklığı (cm)	Deneysel doz hızı (Kalibre edilen dedektör) (mSv/h)	Referans Dozimetre doz hızı (mSv/h)	% Sapma
450 cm ³ Thermo				
Electron Ion	3	34,66	47,12	26,44
Smart				

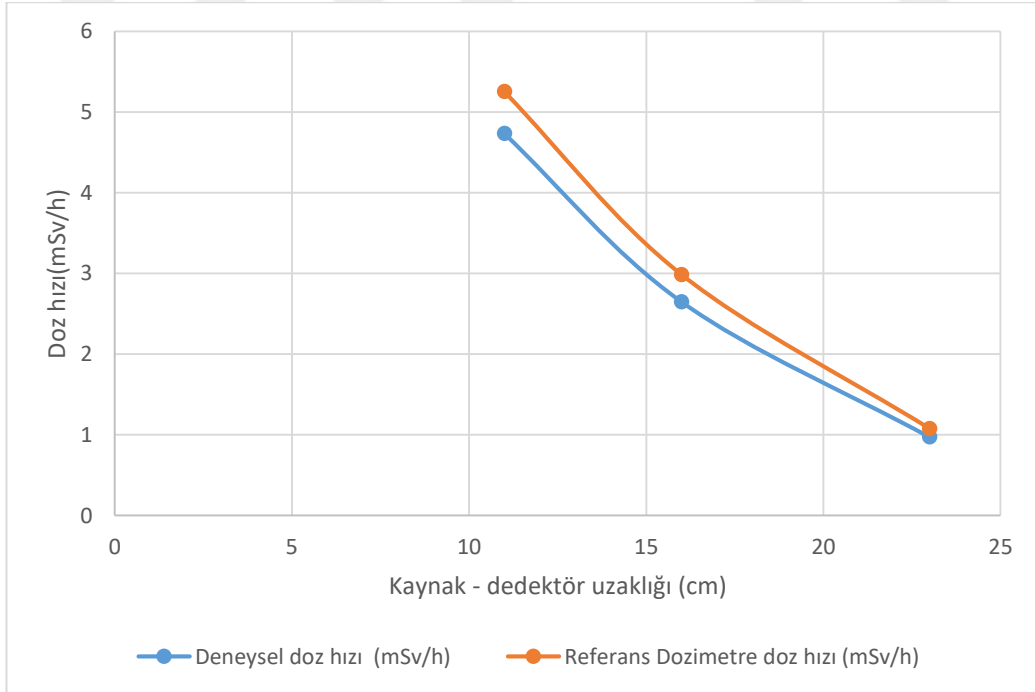
450 cm ³ Thermo				
Electron Ion	5	17,96	21,9573	18,16
Smart				
450 cm ³ Thermo				
Electron Ion	7	10,1	12,352	17,7
Smart				
450 cm ³ Thermo				
Electron Ion	11	4,735	5,253	9,8
Smart				
450 cm ³ Thermo				
Electron Ion	16	2,65	2,986	9,8
Smart				
450 cm ³ Thermo				
Electron Ion	23	0,9738	1,0773	9,6
Smart				
10 litre PTW				
küresel iyon odası	3	3,22	4,3409	25,7
10 litre PTW				
küresel iyon odası	5	2,41	2,0221	19,73
10 litre PTW				
küresel iyon odası	7	1,38	1,1378	18,05
10 litre PTW				
küresel iyon odası	11	0,418	0,48391	10
10 litre PTW				
küresel iyon odası	16	0,3071	0,279301	9,98
10 litre PTW				
küresel iyon odası	23	0,03377	0,0992	9,95
φ30x15 mm				
plastik sintilatörlü	3	10,74	8,69	23,61
ATOMTEX				

φ30x15 mm				
plastik sintilatörlü	5	4,72	4,05	16,58
ATOMTEX				
φ30x15 mm				
plastik sintilatörlü	7	2,65	2,2784	16,39
ATOMTEX				
φ30x15 mm				
plastik sintilatörlü	11	1,06	0,9690	9,91
ATOMTEX				
φ30x15 mm				
plastik sintilatörlü	16	0,605	0,5509	9,93
ATOMTEX				
φ30x15 mm				
plastik sintilatörlü	23	0,216	0,19872	8,9
ATOMTEX				

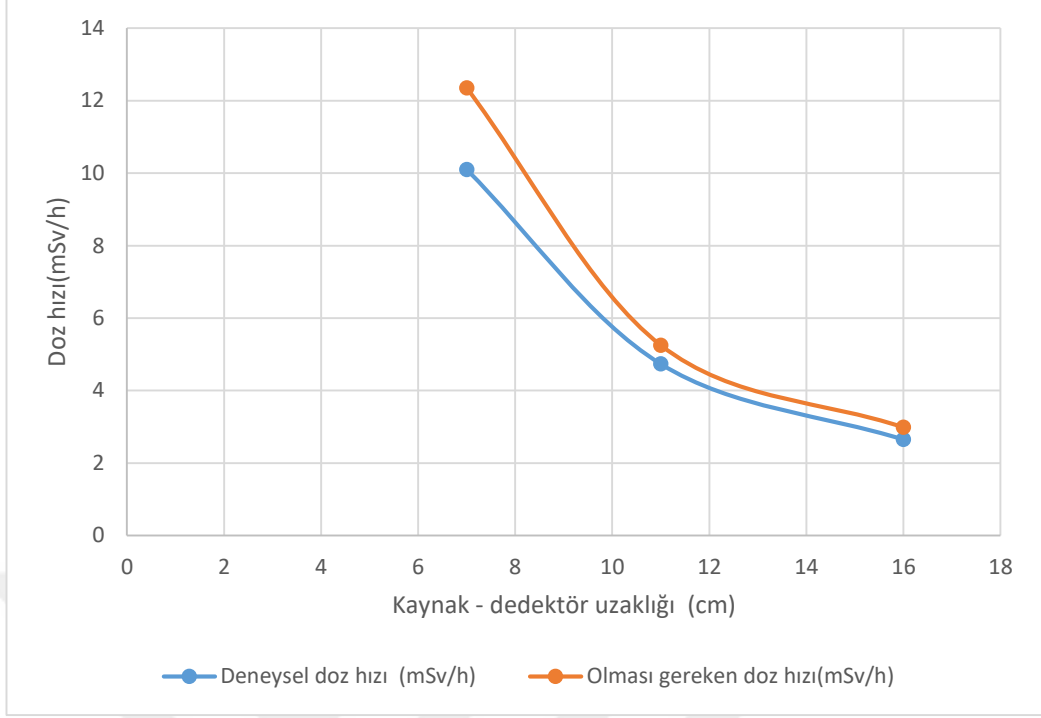
Şekil 4.10 ile Şekil 4.21’de her bir dedektör için ayrı ayrı belirli bir kaynak- dedektör mesafesine kadar alınan doz hızlarının referans dedektör ölçüm değerleriyle kıyaslaması yapılmıştır.



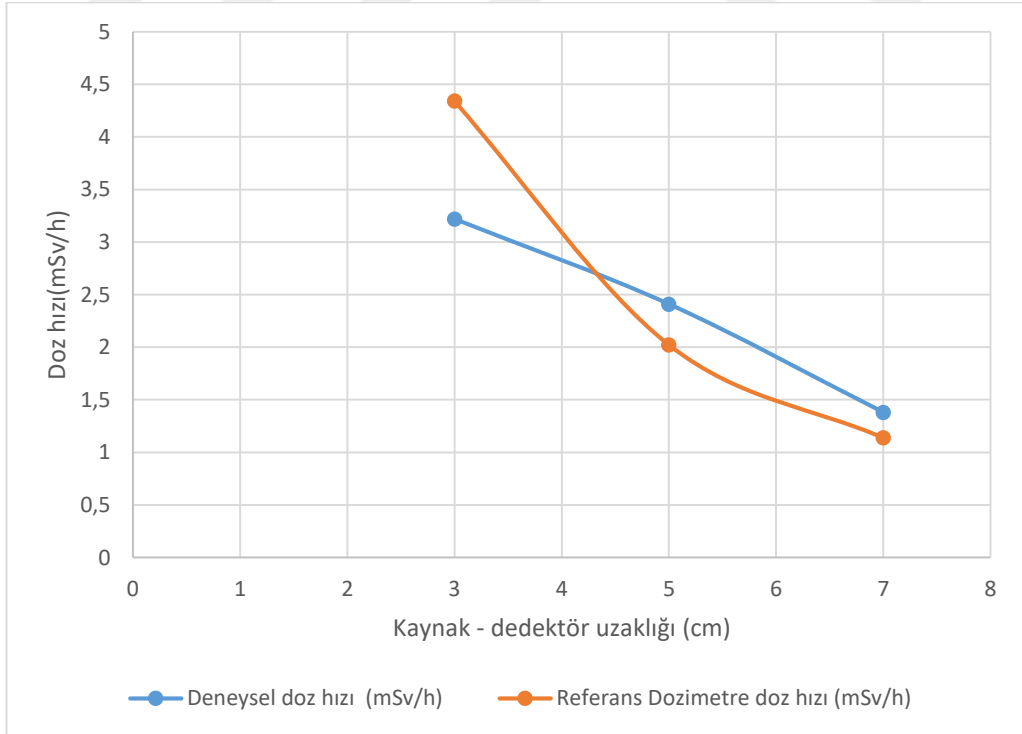
Şekil 4.10 450 cm³ Thermo Electron Ion Smart doz hızı ölçer ile 3 - 7 cm aralığındaki uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları



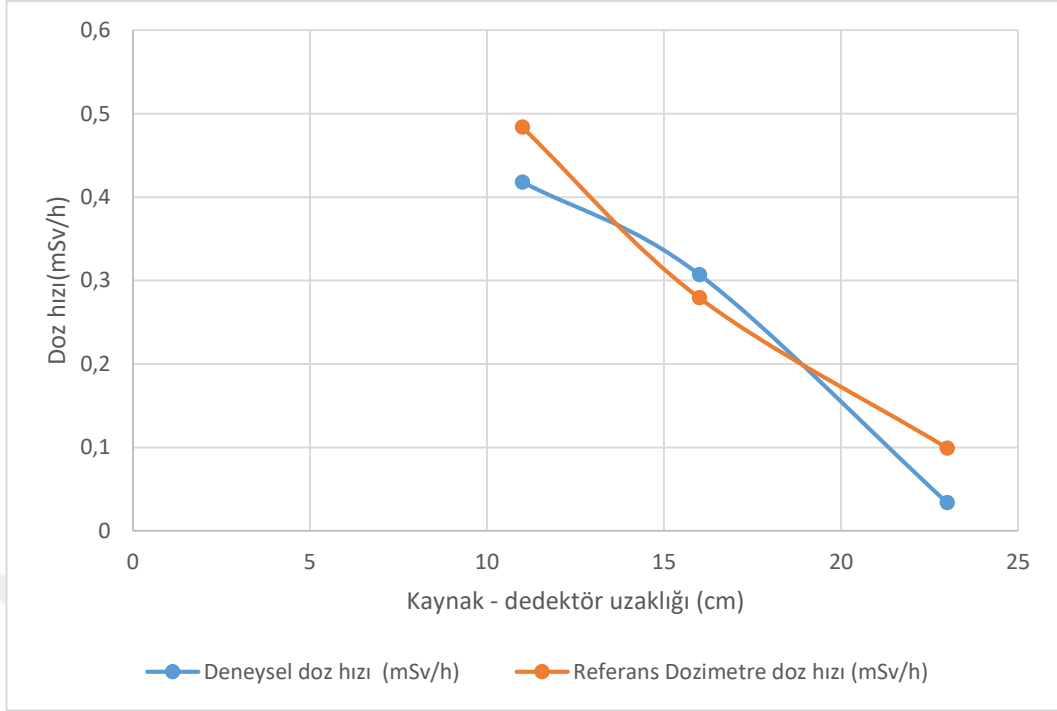
Şekil 4.11 450 cm³ Thermo Electron Ion Smart doz hızı ölçer ile 11-23 cm aralığındaki uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları



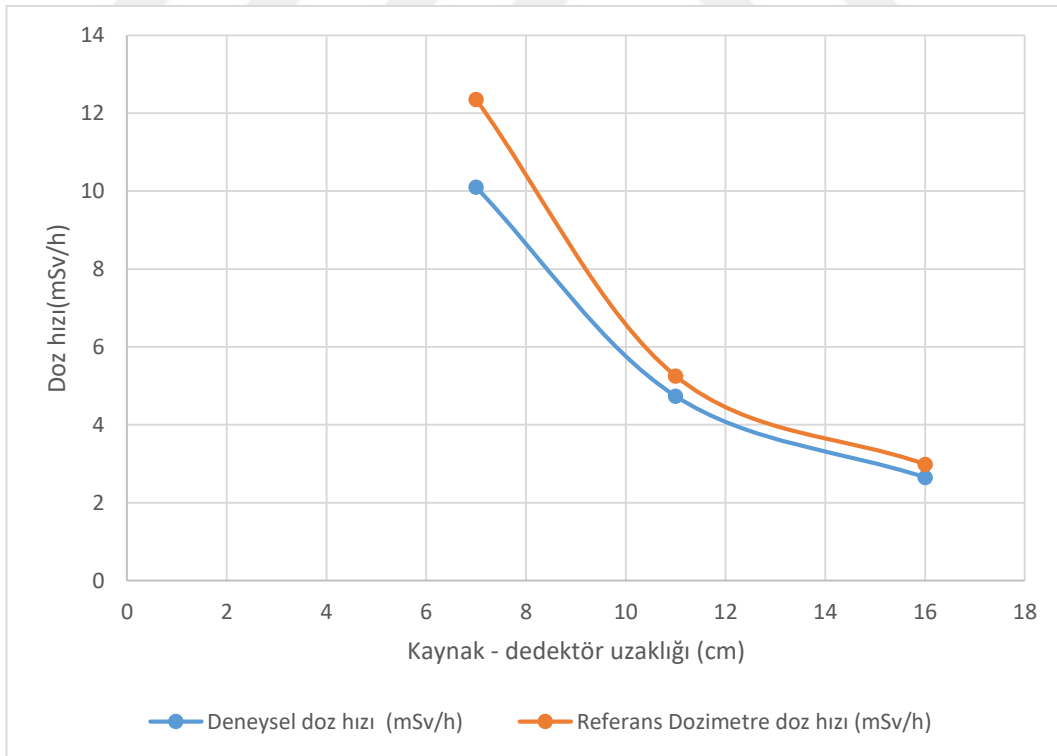
Şekil 4.12 450 cm³ Thermo Electron Ion Smart doz hızı ölçer ile 7-16 cm aralığındaki uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları



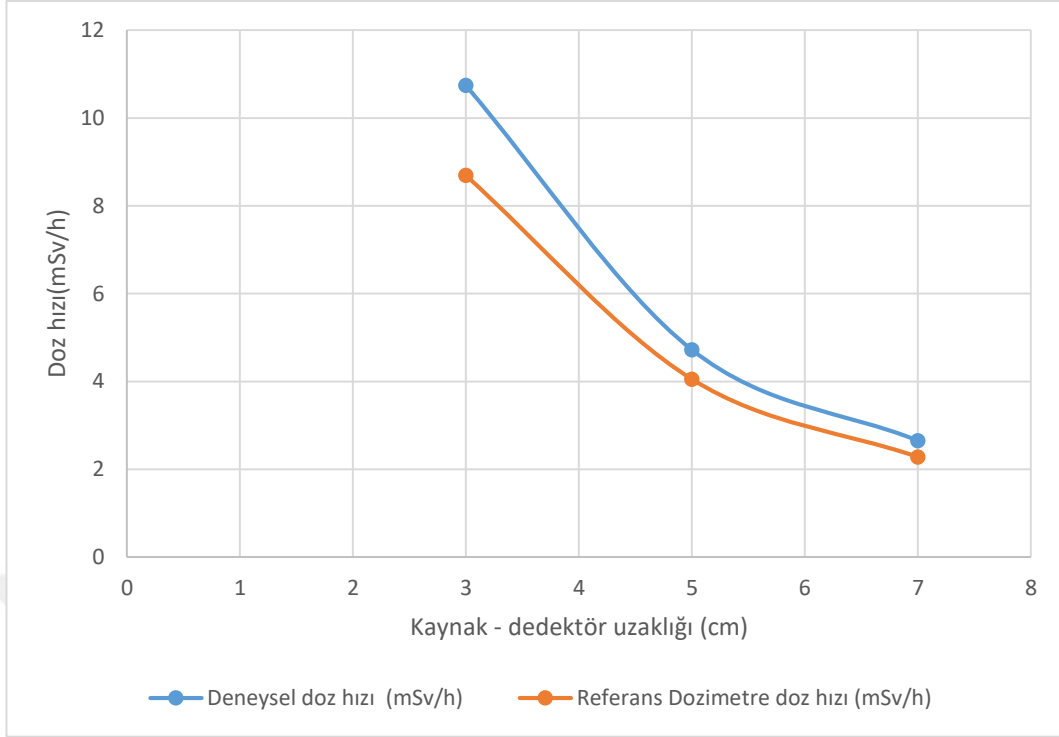
Şekil 4.13 10 litre PTW küresel iyon odası dedektörü ile 3-7 cm aralığında uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları



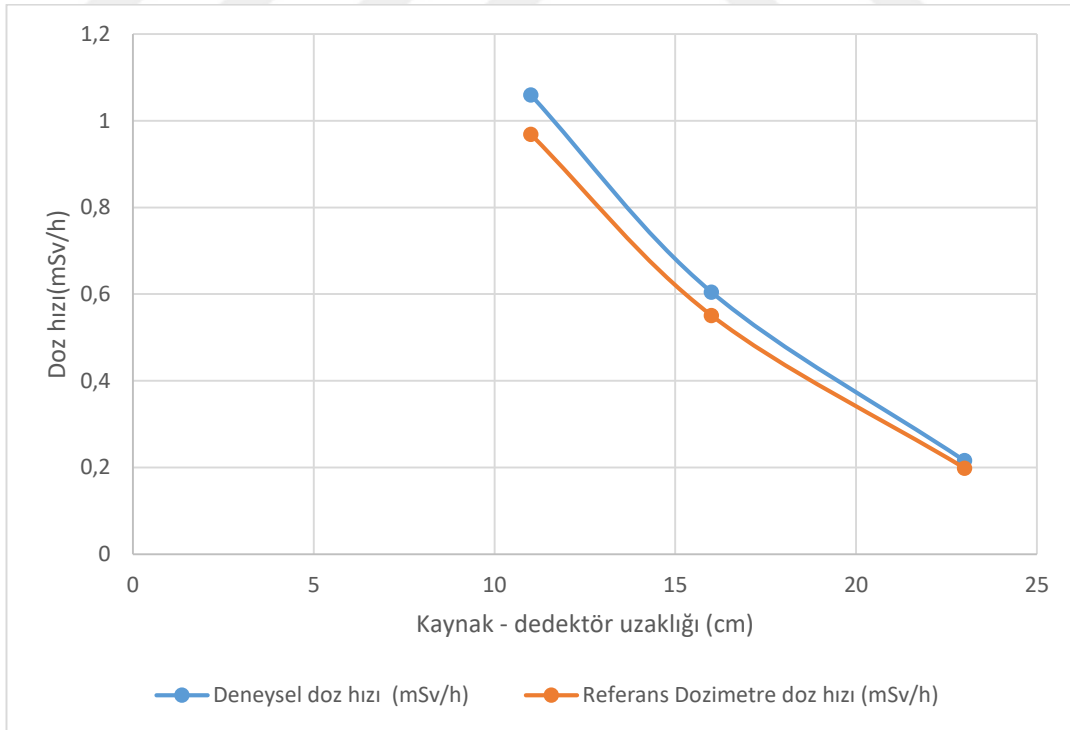
Şekil 4.14 10 litre PTW küresel iyon odası dedektörü ile 11-23 cm aralığında uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları



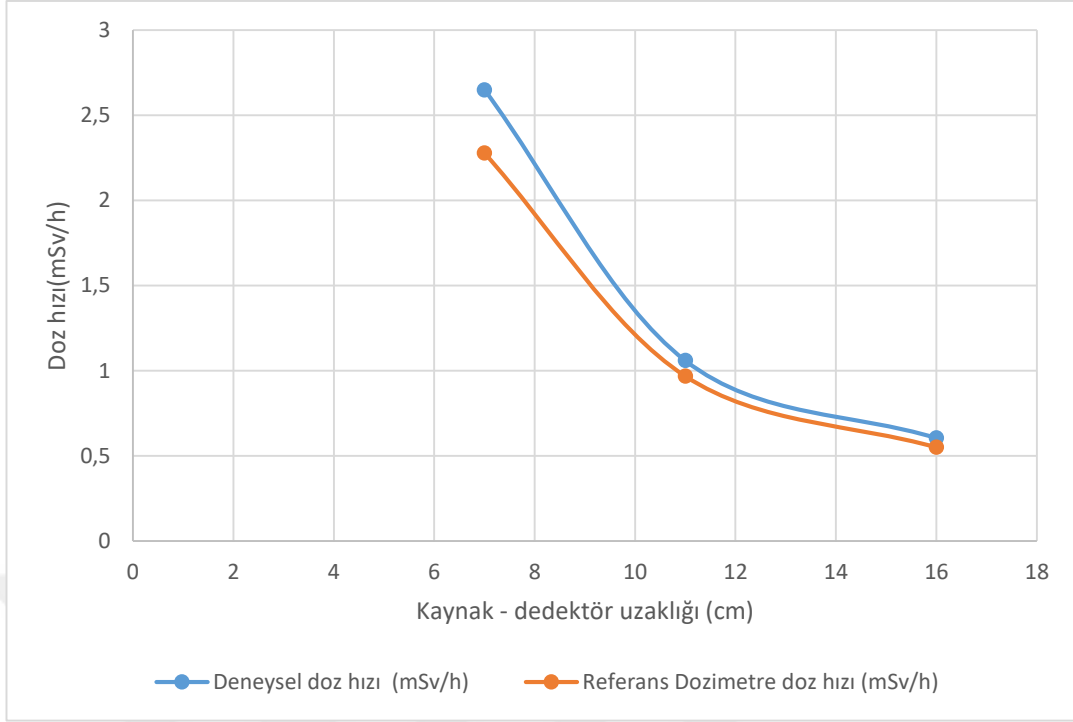
Şekil 4.15 10 litre PTW küresel iyon odası dedektörü ile 7-16 cm aralığında uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları



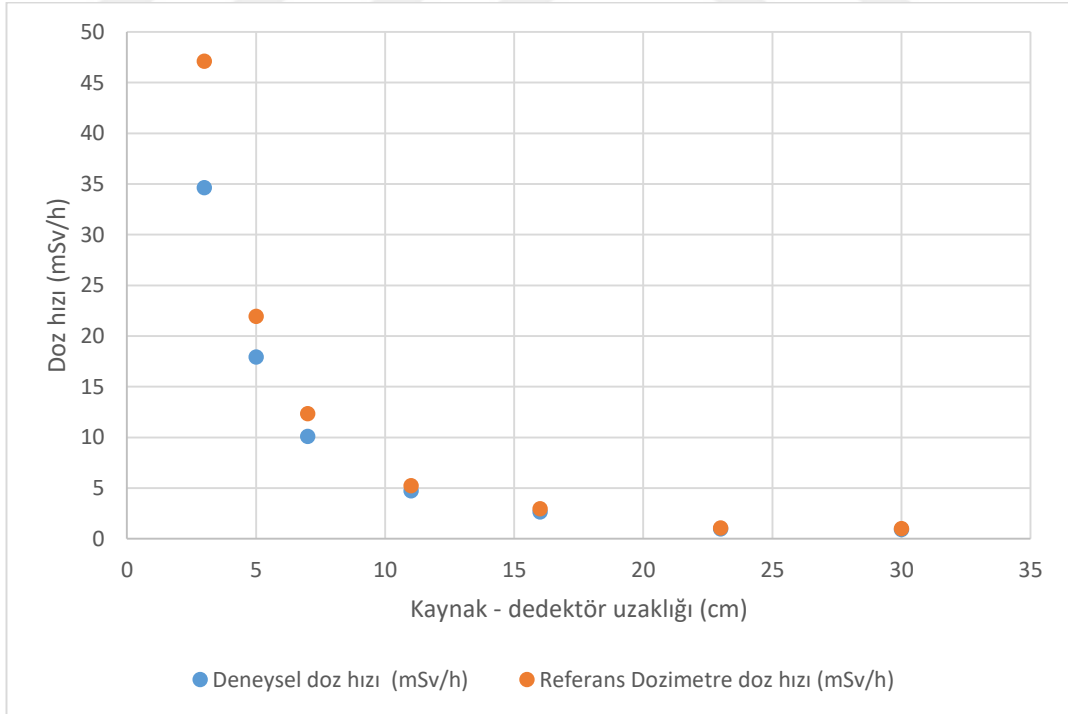
Şekil 4.16 $\phi 30 \times 15$ mm plastik sintilatörlü ATOMTEX dedektörü ile 3-7 cm aralığındaki uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları



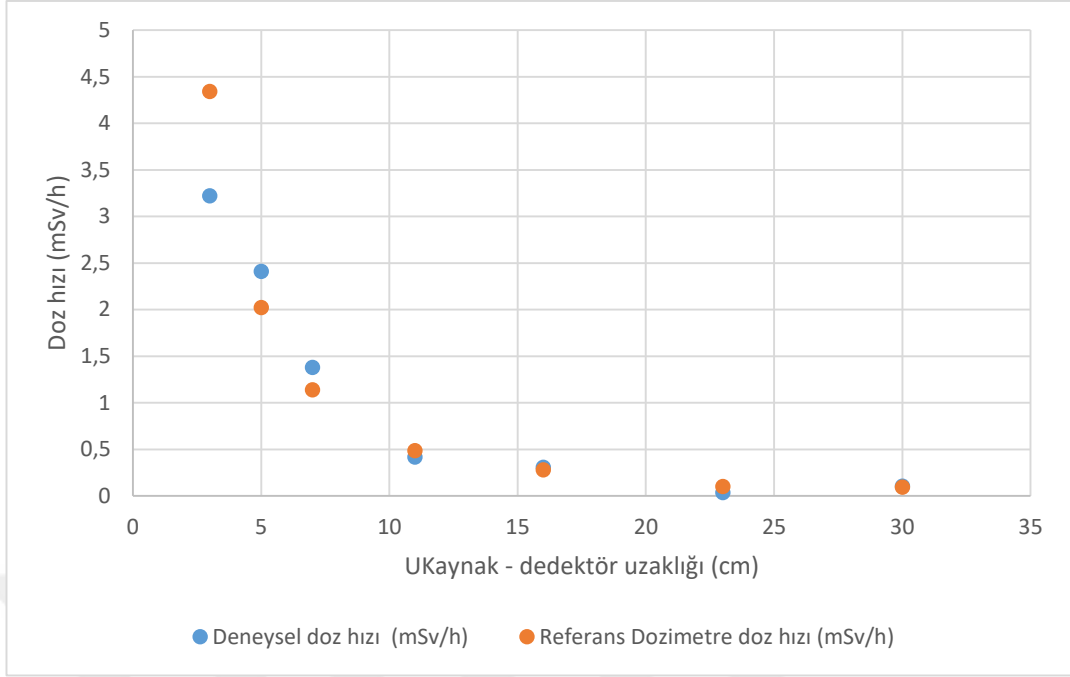
Şekil 4.17 $\phi 30 \times 15$ mm plastik sintilatörlü ATOMTEX dedektör ile 11-23 cm aralığında uzaklıklarda alınan ölçümlere bağlı doz hızları



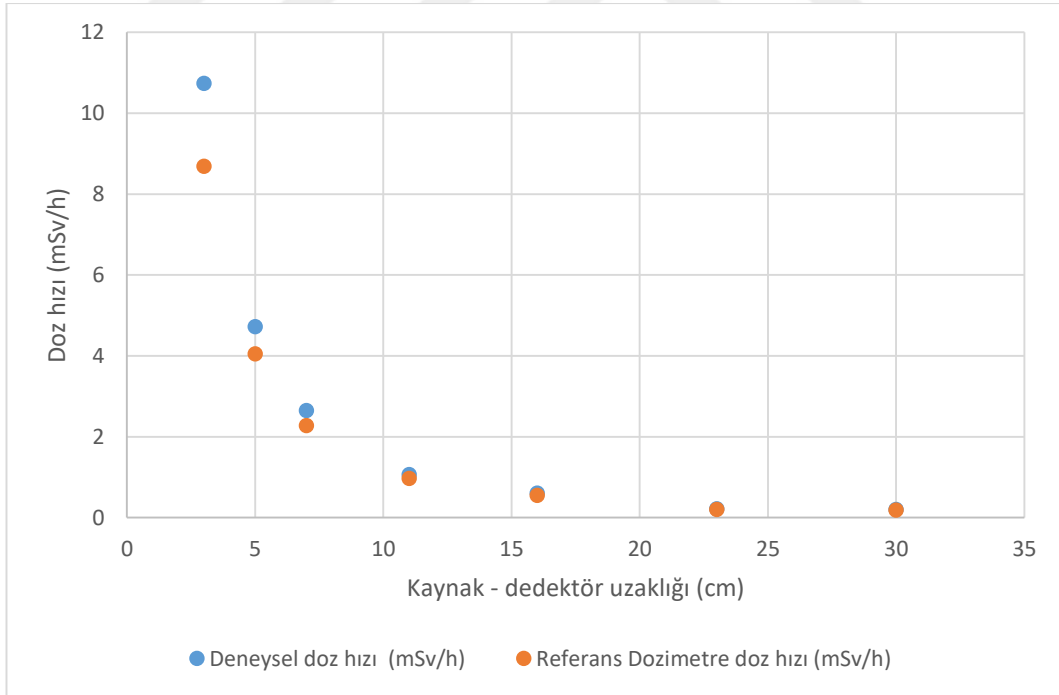
Şekil 4.18 $\phi 30 \times 15$ mm plastik sintilatörlü ATOMTEX dedektör ile 7-16 cm uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları



Şekil 4.19 450 cm^3 Thermo Electron Ion Smart doz hızı ölçer ile 3-30 cm aralığındaki uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları



Şekil 4.20 10 litre PTW küresel iyon odası dedektörü ile 3-30 cm aralığında uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları

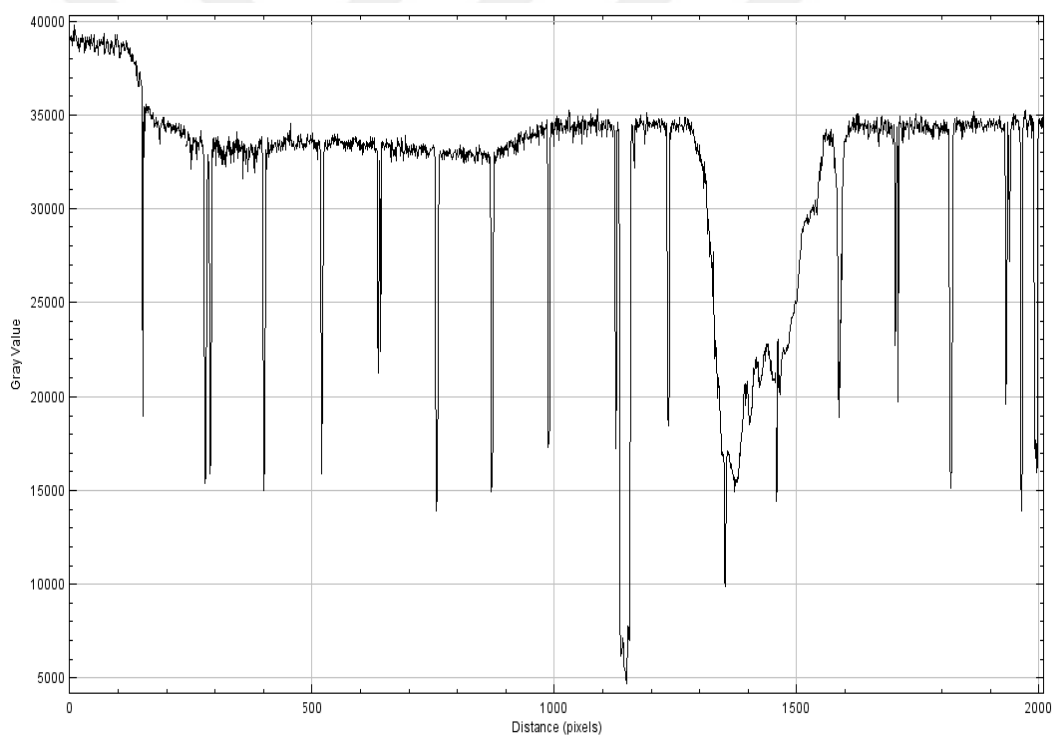


Şekil 4.21 $\phi 30 \times 15$ mm plastik sintilatörlü ATOMTEX dedektör ile 3-30 cm uzaklıklardan alınan ölçümlere bağlı doz hızları

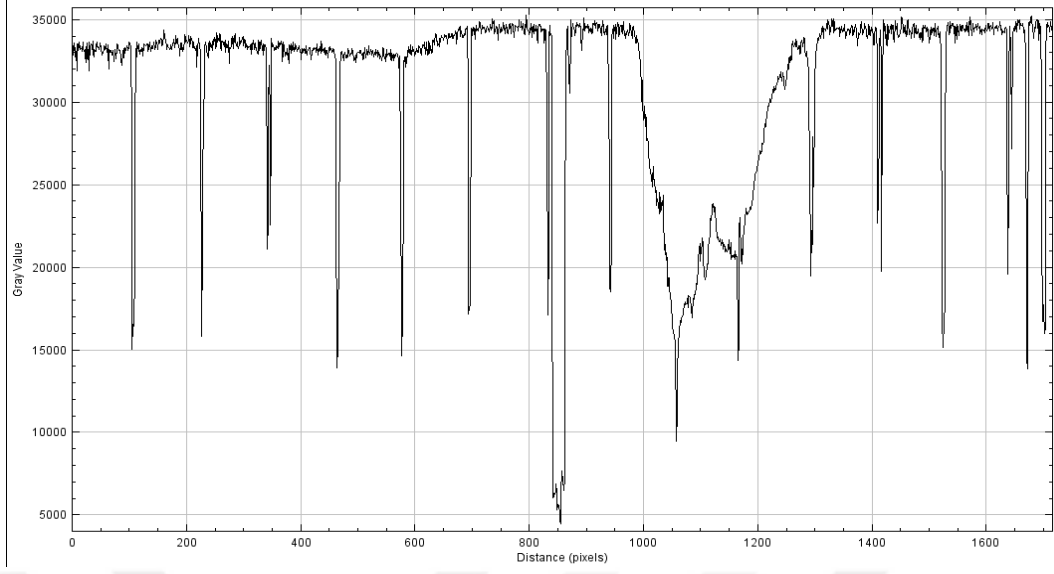
Doz Homojenliği Belirleme:

Kaynağın hangi alana ışınlama yaptığını tespit etmek ve doz homojenliğini değerlendirmek için ticari gafkromik marka EBT3 model filmler kullanılarak ışınlamalar yapılmıştır. Bu filmlere 11 ve 30 cm uzaklıktan olmak üzere filtreli (politerafat) ve filtresiz ölçüm değerleri alınmıştır.

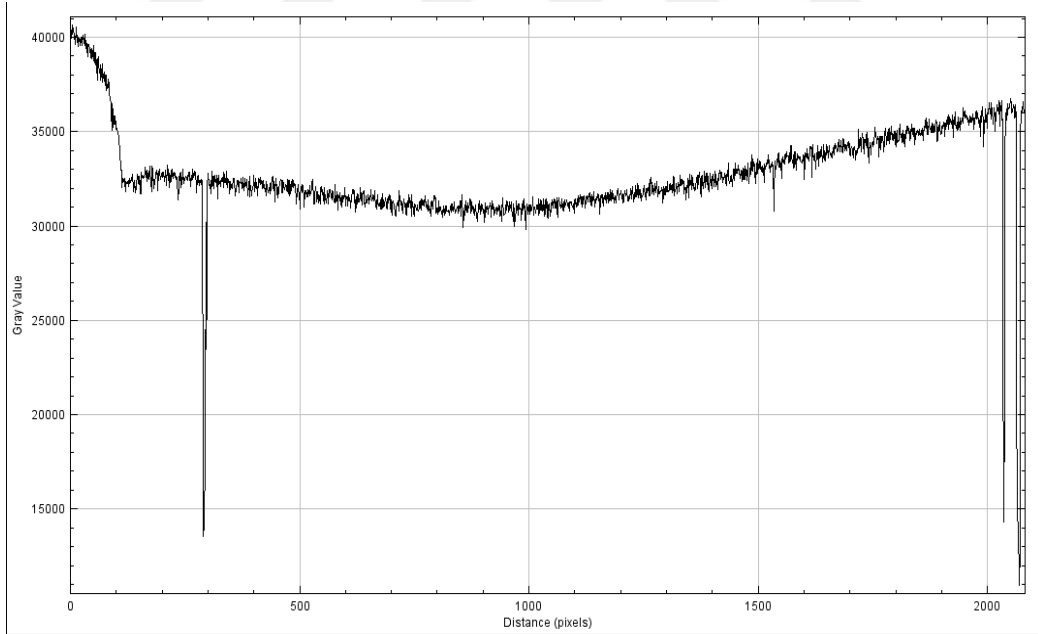
Bu ölçümler sayesinde kaynağın dedektöre verdiğin dozun dağılıp dağılmadığı (dose uniformity) belirlenmiştir. Film okuyucundan alınan görüntülerde gri skalada optik yoğunluğun değişimine göre (dozlanan bölgelerde kararma artmakta) çeşitli EBT3 filmlerin, filtreli ve filtresiz 11 cm, 30 cm uzaklıklardan ışınlanmış ve görüntüleri standart Image J programı kullanılarak analiz edilmiştir.



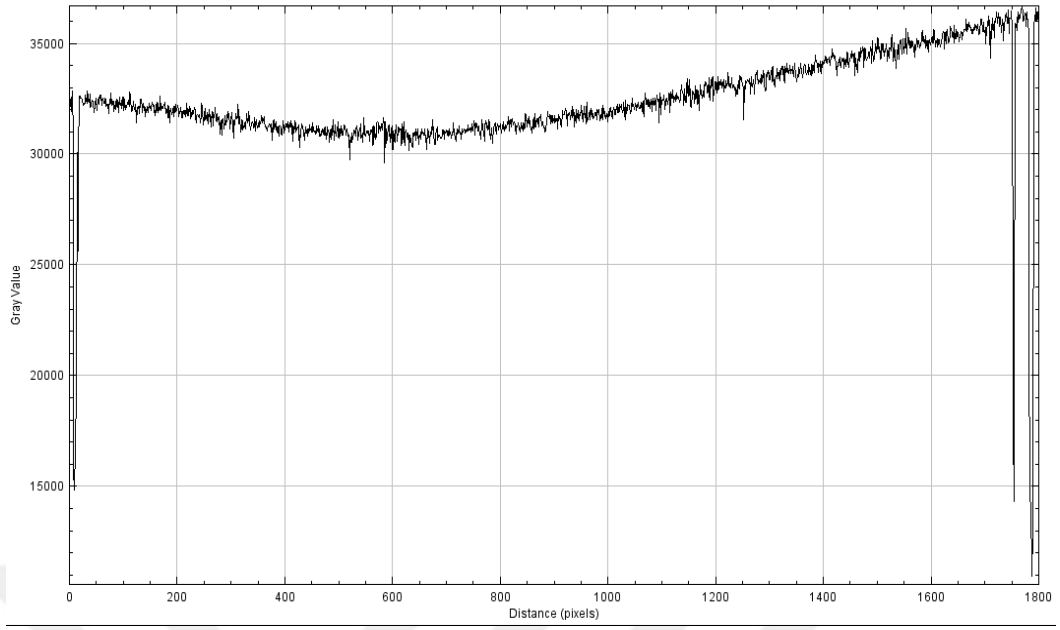
Şekil 4.22 11 cm mesafede, filtreli ve $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağın EBT3 filmin boyunca gri skaladaki oluşturduğu doz dağılımı



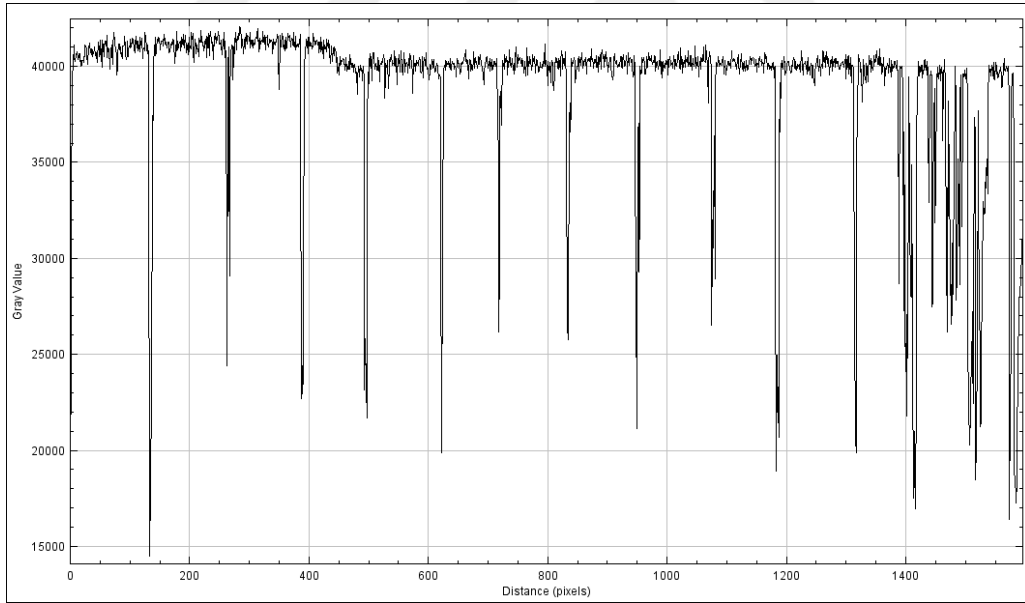
Şekil 4.23 11 cm mesafede, filtreli ve $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağın EBT3 filmin boyunca gri skaladaki oluşturduğu doz dağılımı (background değeri çıkarılmış durum)



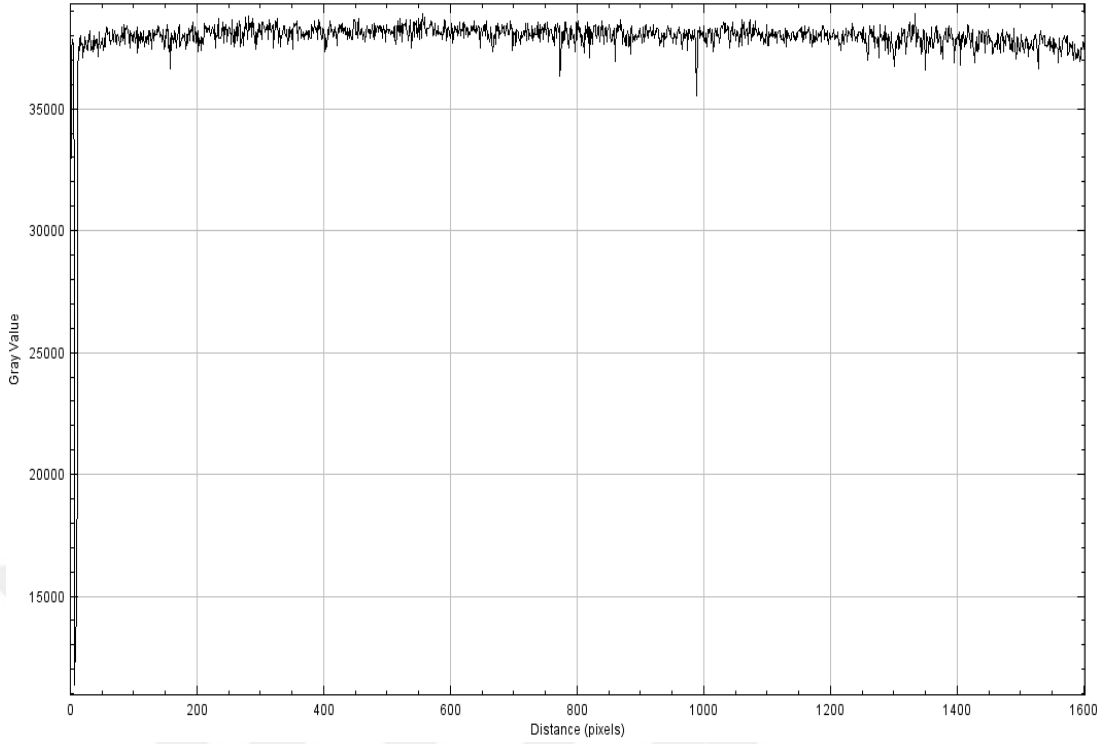
Şekil 4.24 11 cm mesafede filtresiz $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağın EBT3 filmin boyunca gri skaladaki oluşturduğu doz dağılımı



Şekil 4.25 11 cm filtresiz $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağın EBT3 filmin boyunca gri skaladaki oluşturduğu doz dağılımı (background değeri çıkarılmış)



Şekil 4.26 30 cm mesafede filtresiz $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağın EBT3 filmin boyunca gri skaladaki oluşturduğu doz dağılımı



Şekil 4.27 30 cm filtrelili $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağın EBT3 filmin boyunca gri skaladaki oluşturduğu doz dağılımı (background değeri çıkarılmış)

Şekil 4.27’de polyteraflat filtrelili ve 30 cm kaynak-dedektör mesafesinde doğal fon etkisi çıkarılarak yapılan EBT3 film görüntüsü, doz dağılımında %99 homojenliğin sağlandığını göstermektedir. ISO standartlarına göre 30 cm kaynak-dedektör uzaklığı tavsiye edildiği için bu şart yerine gelmiştir. 30 cm mesafede $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynak homojenliğinin en iyi değeri vermesinden dolayı, yönlü eşdeğer doz hesaplamasında dedektörün kaynaktan 30 cm sabit uzaklıktaki, farklı açılarda ölçüm değerleri alınarak bulunan değerlerin bağıl sapma (r) değerleri incelenmiştir.

$$r = \frac{\text{Ölçülen } (H_p(0,07) \text{ doz})}{\text{Referans } (H_p(0,07) \text{ doz})} \quad (4.5)$$

Çizelge 4.10 450 cm³ Mini IonSmart, φ30x15 mm plastik Sintilatörlü ATOMTEX Dedektörü ve 10 Litre PTW küresel iyon odalı doz hızı ölçer belirli Açılardaki Yönlü Doz Hızı Ölçüm Sonuçları

Dedektör	Ölçülen Doz hızı (μSv/h) (Bağıl sapma, r)*				
	Açı	30 ⁰	45 ⁰	60 ⁰	0 ⁰
450 cm³ Thermo Electron					
hacimli IonSmart doz hızı ölçer		1126 (0,94)	1062 (0,89)	1043 (0,88)	1190
φ30x15 mm plastik Sintilatör ATOMTEX		209 (0,95)	197 (0,90)	193 (0,88)	220
10 Litre PTW küresel iyon odalı doz hızı ölçer		95 (0,94)	91 (0,90)	89 (0,88)	101

*Bağıl sapma değerleri(r), 0⁰ açıda ölçülen değerlere göre hesaplanmış ve parantez içinde verilmiştir.

*Çizelge 4.10'de verilen doz ölçüm sonuçları, 180 μm politerafat filtre kullanılarak kaynak-dedektör mesafesi: 30 cm'de elde edilmiştir.

EN 62387'ye göre H_P(0,07) ölçen beta dozimetrelerin E_{βmax}=0,8 MeV (⁹⁰Sr/ ⁹⁰Y) ve 0⁰ ila 60⁰ arasındaki bağıl sapması için performans gereksinimi r_{min} = 0,71 ila r_{max}=1,67 olduğuna göre bu doz ölçer cihazlar için bu şart sağlanmıştır.

Farklı üç dedektör ile elde edilen Doz ölçüm sonuçları, 30 cm uzaklıkta filtreli olarak 0⁰ referans açıdaki deneysel ölçümlere göre, 30⁰ ila 60⁰ yönlü ölçümlerin %13'ü geçmeyen bağıl sapma göstermiştir. Ayrıca yönlü doz ölçümleri açısından, aşağıdaki Çizelge 4.11'de belirtilen akredite ikincil standart doğruluktaki dozimetre laboratuvarının referans dozimetre doz sonuçları ile yakın uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.11 Radyoaktif beta kaynağın konumuna göre belirli açılarda ile yapılan doz ölçümlerinin dönüşüm katsayıları (Ambrosi, 2007)

α	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 30 cm filtreli
0°	1,00
30°	1,06
45°	1,12
60°	1,14

5. SONUÇ

Yapılan tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmalar, testler ve kalibrasyon prosedürüne ilişkin sonuçlar önceki bölümde ayrıntısıyla açıklanmıştır.

Bu tez çalışmasında; A.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsünün ışınlama ve kalibrasyon laboratuvarı olarak kullanılan, nem ve sıcaklık kontrollü 90 cm beton duvar kalınlığı olan özel bir yapıda (kümbet olarak da adlandırılan), bir masa benç üzerinde kurşun zırhı içinde bulunan kaynak, kontrollü bir şekilde açılarak ölçülü bir cetvelle ışınlama mesafeleri belirlenerek, sırasıyla 10 litre iyon odası, 450 cm³ iyon odası ve $\phi 30 \times 15$ mm plastik sintilatör+GM detektörlerle farklı mesafeler verilen beta doz belirlenmiştir. Her defasında, gerekli radyasyondan korunma önlemleri alınarak çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen kalibrasyon yönteminin doğrulaması için akredite laboratuvar hizmet sunan RADKOR-Personel Dozimetre Sistemleri Laboratuvarından sağlanan yüzük dozimetrelere (BeO kristalli) OSL doz ölçüm tekniği uygulanarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre beta kaynağı olarak, mevcut aktivitesi 15,2 MBq ⁹⁰Sr/⁹⁰Y kaynağında farklı sürelerde ışınlanan doz bilgileri bağımsız olarak bu laboratuvar tarafından ölçülerek, uygulanan yöntemin validasyonu yapılmıştır. Dedektör ışınlamalarındaki doz homojenliğinin düzgünlüğü ise, RFD tekniğinde uygun ebatlarda EBT3 radyokromik filmler ışınlanarak ve daha sonra bunların görüntülerinin Image J programında değerlendirilmesi ile tespit edilmiştir

Sonuç olarak ISO protokolünde tanımlanmış olan beta kalibrasyon sistemi kurulup mevcut aktivitesi 15,2 MBq ⁹⁰Sr/⁹⁰Y kaynağı kullanılarak pasif dozimetre yardımıyla farklı dedektörlerle yapılan doz hızı ölçümlerinin sonuçları belirtilmiştir. Bu testte elde edilen sonuçlar değişik mesafelerde alınmış ve tutarlılığa bakılmıştır. Ayrıca ISO protokollerinin anlatımı ve bu protokole göre kurulmuş beta kalibrasyon seti sayesinde beta dedektörlerinin kalibrasyonunun nasıl yapılabileceği ile ilgili bir prosedür oluşturulmuştur.

Bu testte elde edilen sonuçlar değişik mesafelerde alınmış olup sapma değerleri, kaynağa yakın mesafelerde %10'dan fazla çıkmıştır. Bunun temel nedeni betaların

saçılma özellikleridir. Bunun yanı sıra çok yakın mesafede detektöre özgü diğer duyarlık ve enerji bağımlılığı karakteristikler olduğu değerlendirilmektedir. Tüm dedektörlerde olduğu gibi beta dedektörlerde de yöne bağlı dozlarda değişme olacağından 0° referans açısı dışında 30°, 45°, 60° açılarda da doz ölçümleri ($H_p(0,07, \alpha)$) yapılmış ve referans açıdaki doza göre kıyaslanmıştır. Bağlı sapmalar %10-12 civarında hesaplanmıştır. Beta dozimetreleri için EN 62387 standartlarına göre bağlı sapma aralığı $r_{min}=0,71$ ila $r_{max}=1,67$ 'dir.

Protokol uzaklığında (30 cm) tutarlılık göstermiş ve değerler kabul sınırlarının içerisinde kalmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda radyasyondan korunma koşullarına uyarak beta ışınlama sistemi ile yapılan dedektör kalibrasyonlarının ISO standartlarına uygun yapıldığı zaman doğru ölçüm yaptığı görülmüştür.

Beta kalibrasyonun birincil seviyede yapılabilmesi için temel iki nokta önemlidir. Birincisi, havada sabit mesafelerde suya göre soğurulan doz hızını 1 $\mu\text{G}/\text{s}$ 'den birkaç mGy/s 'e aralıkta verebilen kapsüllenmiş $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{204}Tl , ^{85}Kr ve ^{147}Pm kaynakları mevcut olmalıdır. ISO 6980-1:2006 standardında belirtilen 0,07 mm referans derinlikte, kişisel cilt doz niceliğine, $H_p(0,07)$ karşılık gelen soğurulmuş doz (suya göre) ölçebilme şartları sağlanmalıdır. İkinci önemli nokta ise suya göre soğurulan doz cinsinden beta parçacığını (radyasyonu) cihazların kalibrasyonunu "birincil standart seviye doğrulukta" yapabilmek için ince pencereci, paralel plakalı iyon odalarının (flat ionization chamber for beta radiation) bir "referans" dedektör kullanımının uygun olabileceği belirtilmektedir. Beta radyasyon kalitesi yukarıda belirtilenlere ilave olarak ^{14}C , $^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$ kaynakları da kullanılmakta ve beta doz hızı aralığının 0,2 mGy/h ila 500 mGy/h ve beta dozunun 2 μGy ila 10 Gy aralığında uygulanabildiği belirtilmektedir. (NIST, 2019; PTB, 2019)

Diğer dedektörlerin kalibrasyonlu olması gerektiği gibi çeşitli uygulamalarda kullanılan beta dedektörlerinin kalibrasyonu da uygun bir prosedüre göre yapılmalı ve radyasyon güvenliği bağlamında, bu tür kalibrasyonu yapan laboratuvarların Nükleer Düzenleme Kurumundan (NDK) lisans alması gerekmektedir.

Ayrıca Radyasyon güvenliğinin sağlanması için dedektörle doğru ölçüm yapılması gerekir. Ölçümün doğruluğu için radyasyon ölçümünde kullanılan cihazların kalibrasyonun yapılmış olması zorunludur.

Bu bağlamda, yapılan bu tez çalışmasında literatürdeki beta dedektör kalibrasyonu ile ilgili çalışmalar özümmlenerek elde edilen bilgi ve uygulamada kazanılan deneyim gelecekte daha detaylı yapılacak hizmetlerin gereklerinin ortaya konulmasında ve izlenmesinde temel bir doküman olacaktır. Ayrıca bu tez çalışmasında, Türkiye’de ilk defa A.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsünde beta dedektör kalibrasyonu için mevcut $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta kontrol kaynağından yararlanılarak bir ışınlama ve ölçüm düzeneği kurulmuştur. Belirli şartlarda ışınlama yapıldığında %99 doz homojenliği başarılmıştır. Böylece asgari ISO standartlarının gereklerini karşılayan bir prosedür oluşturulmuş ve yöntem validasyonu için akredite doz ölçümü yapan bir laboratuvardan, BeO kristali kullanan OSL doz ölçüm tekniğinden yararlanılmıştır. Bu tezde, oluşturulan prosedür çerçevesinde, ileride daha yüksek aktiviteli beta kaynaklar veya ortalama beta enerjisi farklı kaynaklar kullanılarak, cilt/ekstremiteler dozunu ölçen çeşitli elektronik ve pasif dozimetrelerin kalibrasyonunun yapılabilmesi için farklı araştırmalar yapılabilir. Bu amaçla, pratik olması bakımından kaynak ışınlama sistemi bilgisayar kontrollü hale getirilebilir ve beta radyasyonu ölçümü için “referans” dedektör olarak bu defa uygun hacimde bir düz-paralel plakalı iyon odası (flat ionization chamber) kullanımıyla mevcut alt yapı daha elverişli ve etkin hale getirilebilir.

KAYNAKLAR

- Ambrosi, P. 2007. The PTB Beta Secondary Standard BSS 2 for radiation protection. Journal of Instrumentation, 12 p., Braunschweig, Germany.
- Anonymous. 1993. Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry. ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements); ICRU REPORT 51.
- Anonymous. 1996. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy, Part 1: Radiation characteristics and production methods. ISO (International Organization for Standardization); ISO 4037-1.
- Anonymous. 1999. Technical recommendations on measurements of external environmental gamma radiation doses. European Commission; Radiation Protection 106.
- Anonymous. 2000. Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments. IAEA (International Atomic Energy Agency); Safety Reports Series No. 16.
- Anonymous. 2006. Nuclear Energy Reference Beta Particle Radiation, Part 1. Methods of production ISO (International Organization for Standardization); 6980-1.
- Anonymous. 2007. Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice. IAEA; Technical Reports Series No.457.
- Anonymous. 2007. Terminology used in nuclear safety and radiation protection. IAEA; Safety Glossary.
- Anonymous. 2016. Reference Sources-- Calibration of surface Contamination monitors, Alpha-Beta-And Photon Emitters ISO 8769.
- ANSI N323,1978. American National Standard-Radiation Protection Instrumentation Test and Calibration, published by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 345 East 47th Street, New York, NY 10017.
- ATOMTEX 1123, 2019. Atomtex Sintilasyon Dedektörü Teknik Özellikleri, https://atomtex.com/sites/default/files/datasheets/at11211123_0.pdf.
- Bor D. 2009. Doğan Bor Ders Notları. Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü.
- FLUKE, 2019. <https://www.flukebiomedical.com> Erişim tarihi: 01.12.2019.
- GAFCHROMIC, 2019. Technical specifications of EBT3 films. Web Sitesi: http://www.gafchromic.com/documents/EBT3_Specifications.pdf Erişim tarihi: 08.12.2019.

- IEC 61267, 2005. Medical diagnostic X-ray equipment Radiation conditions for use in the determination of characteristics, pp. 46, CENELEC, ICS 11.040.50.
- ISO 4037-1, 2019: Radiological protection - X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 1: Radiation characteristics and production methods, 47 sayfa, ISO/TC 85/SC 2 Radiological protection, 2019-01.
- Knoll, F.G. 2000. Radiation Detection and Measurement Third Edition. Wiley, pp. 131-275, New York.
- Krane K.S. 1987. Introductory Nuclear Physics, Wiley, 845 p., United Kingdom.
- Massillon K., SouTung, ChiuTsao, Ivan D. Munoz, Maria F. Chan. Energy Dependence of the New Gafchromic EBT3 Film: Dose Response Curves for 50 kV, 6 and 15 MV X-Ray Beams. International Journal of Medical Physics, Clinical Engineering and Radiation Oncology, 2012.
- Mini IonSmart, 2019. Thermo Electron Corporation Technical Specifications, Manual Web sitesi. <https://stratecservices.nl/wp-content/uploads/2015/01/Smart-Ion-2120.pdf>, Erişim Tarihi: 07.12.2019.
- Mini Smart İon Series, 2019. Thermo Fisher Scientific Corporation, Manuel Web sitesi. <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/LSG/Specification-Sheets/D10516~.pdf>, Erişim Tarihi 15.12.2019.
- NIST, 2019. Calibration of Beta-Particle Sources and Instruments for Radiation Protection, Web sitesi. <https://www.nist.gov/programs-projects/calibration-beta-particle-sources-and-instruments-radiation-protection>, Erişim tarihi: 07.12.2019.
- Owen B. 1972. The Beta Calibration of Radiation Survey Instruments at Protection Levels, Physics in Medicine & Biology, Volume 17, 175 p.
- Pruitt J.S., Soares C.G., Ehrlich M. 1988. NBS Measurement Services: Calibration of Beta-Particle Radiation Instrumentation and Sources.
- PTB, 2019. Calibration of ionization chambers and of area and individual dosimeters using photon and beta radiation, Web sitesi. <https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt6/fb-63/information/detectors.html>, Erişim tarihi: 07.12.2019.
- RADKOR, 2019. Web sitesi. <http://radkor.com>, Erişim tarihi: 12.07.2019.
- RADTECH, 2019. Web sitesi. <http://radtech.com.tr/project/rdt01/>, Erişim tarihi: 27.10.2019.

TS EN 62387, 2016. Radyasyondan korunma cihazları - Kişi, alışma alanı ve çevrenin, foton ve beta radyasyonuna karşı izlenmesi amacıyla kullanılan tümleşik pasif dozimetre sistemleri (Radiation protection instrumentation - Passive integrating dosimetry systems for individual, workplace and environmental monitoring of photon and beta radiation (IEC 62387: 2012, modified)).

Yücel, H. 2018. Radyasyondan Korunma Fiziği ve Zırlama Ders Notları.

Yücel, H., 2019. 101516 kodlu “Radyasyon Dedeksiyonu ve lm Yöntemleri” Dersi, Web: <http://acikarsiv.ankara.edu.tr/browse/32912/> Erişim Tarihi: 07.12.2019.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Faruk BAYKUT
Doğum Yeri : Ankara
Doğum Tarihi : 03.09.1985
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce, Almanca

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Çankaya Anadolu Lisesi (1999-2003)
Lisans : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği
Bölümü, (Eylül 2004-Ocak 2010)
Anadolu Üniversitesi İşletme Fakültesi (2012-2019)
Yüksek Lisans: Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Medikal Fizik
Anabilim Dalı (2017-2020)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Yedek Subay (2010-2011)
İş Güvenliği Uzmanı (2013-2015)
Patent Mühendisi (2015)
Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Mühendis Ağustos 2015-Mayıs 2019
Nükleer Düzenleme Kurumu, Mühendis Mayıs 2019- devam ediyor.