

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FOTON DEDEKTÖRLERİNİN KALİBRASYONU İÇİN BAZI NIST/ADCL
DEMET KALİTELERİNİN KARAKTERİZE EDİLMESİ VE
HAVA-KERMA KALİBRASYON SABİTİNİN BELİRLENMESİ İÇİN
BİR PROSEDÜR OLUŞTURULMASI**

Esra VARLI

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

**ANKARA
2016**

Her hakkı saklıdır

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FOTON DEDEKTÖRLERİNİN KALİBRASYONU İÇİN BAZI NIST/ADCL
DEMET KALİTELERİNİN KARAKTERİZE EDİLMESİ VE
HAVA-KERMA KALİBRASYON SABİTİNİN BELİRLENMESİ İÇİN
BİR PROSEDÜR OLUŞTURULMASI**

Esra VARLI

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

**ANKARA
2016**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Esra VARLI tarafından hazırlanan “Foton Dedektörlerinin Kalibrasyonu için Bazı NIST/ADCL Demet Kalitelerinin Karakterize Edilmesi ve Hava-Kerma Kalibrasyon Sabitinin Belirlenmesi İçin Bir Prosedür Oluşturulması” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği 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

İmza

Doç. Dr. Turan OLGAR

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü

İmza

Yrd. Doç. Dr. Gökçe Kaan ATAÇ

Ufuk Üniversitesi, Radyoloji Bölümü

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Doç. Dr. Niyazi MERİÇ

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FOTON DEDEKTÖRLERİNİN KALİBRASYONU İÇİN BAZI NIST/ADCL DEMET KALİTELERİNİN KARAKTERİZE EDİLMESİ VE HAVA-KERMA KALİBRASYON SABİTİNİN BELİRLENMESİ İÇİN BİR PROSEDÜR OLUŞTURULMASI

Esra VARLI

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü

Medikal Fizik Anabilim Dalı

Sağlık Fiziği Yüksek Lisans Programı

Danışman: Prof. Dr. Haluk YÜCEL

Tıbbi ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan x-ışın ölçüm cihazlarının kalibrasyonu, x-ışınlarını ölçen sistemlerin doğru fonksiyon yaptığının garanti edilmesi açısından oldukça önemlidir. Özellikle medikal alanda, radyoloji ve radyoterapi uygulamaları için x-ışınlarını kullanan sistemlerin kalite kontrol testlerinde bu cihazlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca radyasyondan korunma açısından, bu x-ışını ölçen sistemlerini kullanan bireylerin anlık maruz kaldıkları dozun tespitinde, bu cihazların doğru kalibre edilerek kullanılması kritik bir işlemdir. Bir radyasyon izleme cihazının kalibrasyonu, belirli bir ölçüm noktasında radyasyon alanlarının belirlenmesinde; radyasyon tipinin, şiddetinin ve dozunun doğru izlenmesini kontrol etmek için de gereklidir. Kalibrasyon işlemleri, genelde NIST veya PTB PSDL-Birincil Standart laboratuvarı tarafından izlenebilir, bir SSDL-İkincil Standart laboratuvarı (örneğin PTW, Almanya) tarafından, kavite iyon odaları için gama foton demetleri (^{137}Cs veya ^{60}Co) ve serbest-hava iyon odaları için ise x-ışın demetleri kullanılarak kalibre edilmiş referans bir cihazla karşılaştırılarak yapılır. Bu amaçla, ISO 4037-1'e uygun ISO demet kaliteleri Türkiye dahil olmak üzere genellikle Avrupa ülkelerinde ve AAPM TG-61'e uygun NIST/ADCL demet kaliteleri de Amerika ve Kanada'da kullanılmaktadır. Bu tezde, NIST/ADCL x-ışın demet kalitelerinden 40-100 kV_p gerilim aralığında konvansiyonel bir x-ışın tüpü kullanılarak elde edilmiş ve daha sonra birinci yarı değer kalınlığı (1. HVL) ve yüzde homojenlik katsayısı (%h) parametreleri ile karakterize edilmiştir. NIST H40, H60, H100 ve M100 için elde edilen deneysel veriler, standartta verilen anma değerleri ile uyum göstermiş ve bu değerler aynı zamanda SpectrumGUI ve Xcomp5r simülasyon programları ile hesaplanarak karşılaştırılmıştır. NIST M40, H30 ve daha düşük enerji demet kaliteleri ile L-demet serisinin tamamı için nominal demet karakteristikleri ise sağlanamamıştır. Bu demet kalitelerinin elde edilememesi kullanılan konvansiyonel x-ışın tüpünün yüksek doğal (inherent) filtrasyona (mm Al) sahip olması ve demet önüne yerleştirilecek yeterli incelekte filtrelerin bulunmayışından kaynaklanmıştır. Elde edilmesi istenilen bu NIST demet kaliteleri için nispeten düşük doğal filtrasyona sahip uygun bir x-ışın donanımının kullanılmasını gerektiği sonucu çıkarılmıştır. Bununla birlikte, belirli bir ışınlama konfigürasyonunda, bazı NIST demet kaliteleri ile ISO demet kalitelerinin özellikleri benzer olduğundan bu demet kaliteleri çeşitli x-ışın dedektörlerinin (örneğin, Radcal, Unfors gibi iyon odalarının) kalibrasyon faktörlerinin belirlenmesi için kullanılmıştır. Kalibrasyon ölçümleri AAPM TG-61 protokolüne uygun olarak gerçekleştirilmiştir. NIST ve eşdeğeri ISO demetleriyle belirlenen kalibrasyon faktörleri % 95-100 arasında uyumlu bulunmuştur. Ayrıca, bazı GM sayaçları ve eşdeğer doz ölçen H_p(10) dedektörleri, ISO s-Cs (0,662 MeV) kaynağı kullanılarak ve PTW kalibrasyonlu referans bir silindirik iyon odası ölçümleri ile karşılaştırılarak kalibre edilmiştir. Bu tezde elde edilen sonuçlar, SSDL çalışmalarının ana konusu olan dedektör kalibrasyonu bakımından tartışılmıştır.

2015, 107 sayfa

Anahtar Kelimeler: X-ışını tüpü, NIST/ADCL demet kalitesi, hava kerma hızı, doz, iyon odası, filtrasyon, ışınlama, kalibrasyon

ABSTRACT
Master Thesis

**CHARACTERIZATION OF SOME NIST/ADCL BEAM QUALITIES FOR
CALIBRATION OF THE PHOTON DETECTORS AND ESTABLISHMENT OF A
PROCEDURE FOR THE DETERMINATION OF AIR-KERMA
CALIBRATION COEFFICIENT**

Esra VARLI
Ankara University Institute of Nuclear Sciences
Department of Medical Physics
Health Physics Master Program
Supervisor: Prof. Dr. Haluk YÜCEL

The calibration of x-ray measuring instruments used in medical and industrial applications is a very important point to ensure their correct measurement operation of these devices. Especially these instruments used in medical field are commonly employed in the quality control tests of the x-ray devices used for radiology and radiotherapy applications. The dose results obtained from these instruments are also used for the determination of the radiation doses of which individuals do work with these devices, and thus the correct calibration of these monitoring instruments is a critical procedure. The calibration of a radiation monitoring instrument is also required to check the accurate monitoring of radiation fields in determining type of radiation, intensity and dose at a given measurement point. Calibrations are often performed by comparing the instrument to Secondary Standard (such as PTW in Germany) traceable to a primary standard such as either NIST or PTB in which include free-air chambers for x-rays and cavity ionization chambers for ^{137}Cs or ^{60}Co for gamma-rays. For this aim, ISO beam qualities in accordance with ISO 4037-1 are generally used in European Countries including Turkey and NIST/ADCL beam qualities in accordance with AAPM TG-61 are used in America and Canada. In this thesis, some of NIST/ADCL x-ray beam qualities were obtained in the range of 40–100 kV_p tube voltage by employing a conventional x-ray tube and then characterized in terms of first half-value layer (1.HVL) and the percentage homogeneity coefficient (h%). The experimental results obtained for NIST H40, H60, H100 and M100 are agreed well with their nominal values and those calculated from SpectrumGUI and Xcomp5r simulation programs. The low energy beam qualities of below NIST M40 and H30, and all L-beam series do not meet their nominal beam characteristics. This is mainly due to the existing high inherent filtration in mm Al of the presently used conventional x-ray tube and lack of the required thinnest filters to be placed in front of beam. This implies that there needs to use a proper x-ray equipment having relatively low inherent filtration to produce the desired NIST beam qualities. However, a few NIST beam qualities similar to some of ISO beam qualities at a specific irradiation configuration were then used to determine the calibration factors of a number of x-ray detectors (e.g., Radcal, Unfors ion chambers). The calibration measurements were carried out in accordance with AAPM TG-61 protocol. Under NIST and equivalent ISO beam qualities, the obtained calibration factors agree reasonably well with each other by 95-100%. Additionally, several survey meters such as G-M counters and dose equivalent H_p(10) detectors were also calibrated using ISO s-Cs(0.662 MeV) source by means of a calibrated reference ion chamber. The obtained results are discussed in view of the detector calibration taken part in the core of SSDL works.

2015, 107 pages

Keywords: X-ray tube, NIST/ADCL beam quality, air kerma rate, dose, ionization chamber, filtration, irradiation, Calibration

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca engin bilgi ve tecrübelerini, benden esirgemeyen, önüme çıkan deneysel aksiliklerde daima beni cesaretlendiren, birlikte çalışmaktan ve öğrencisi olmaktan gurur duyduğum danışman hocam Sayın Prof. Dr. Haluk YÜCEL'e,

Deneysel çalışmalarım ve yazım sürecinde verdiği desteklerinden dolayı Arş. Gör. Şölen ÇUBUKÇU'ya,

Yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen arkadaşım Sezen LİMON'a, emek ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca her zaman yanımda ve attığım her adımda arkamda olan, maddi ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan canım ailem; annem Gülseven ARAN ve babam Muzaffer ARAN'a, kardeşlerim Av. Enes ARAN ve Mustafa ARAN'a,

Beni çalışmalarım boyunca önüme çıkan aksiliklerde hiç yalnız bırakmayan ve destekleyen eşim Selami VARLI'ya, ayrıca gösterdikleri ilgi ve desteklerinden dolayı kayınvalidem Dilber VARLI'ya, kayınpederim Nuri VARLI'ya ve manevi kardeşim Hatice VARLI'ya,

En içten duygularımla, sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Esra VARLI

Ankara, 2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
KISALTMALAR DİZİNİ	x
SİMGELER DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1.GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1 Işınlama ve Doz Tanımları	4
2.1.1 Birincil Radyasyon	4
2.1.2 İkincil Radyasyon.....	4
2.1.3 Işınlama, X	4
2.1.4 Işınlama Hızı, \dot{X}	5
2.1.5 Doz ve Doz Hızı.....	5
2.1.5.1 Soğurulan Doz, D	6
2.1.5.2 Soğurulan Doz Hızı, \dot{D}	6
2.1.5.3 Eşdeğer Doz, H_T	7
2.1.5.4 Eşdeğer Doz Hızı, \dot{H}_T	8
2.1.5.5 Etkin Doz, E	8
2.1.5.6 Doz Eşdeğeri, H	8
2.1.5.7 Organ Dozu, D_T	9
2.1.6 Radyasyon Kalite Faktörü, Q	9
2.1.7 ICRU Küresi	9
2.1.8 ICRU Dokusu	9

2.1.9 Ortam Doz Eşdeğeri, $H^*(10)$	10
2.1.10 Yöne Bağlı Doz Eşdeğeri, $H(d,\Omega)$	10
2.1.11 Kişisel Doz Eşdeğeri, $H_P(d)$	10
2.1.12 Kerma, K	11
2.1.13 Kerma Hızı, \dot{K}	12
2.2 X-ışın ve Gama Radyasyon Kaynakları.....	13
2.2.1 Monokromatik(Tek enerjili) Radyasyon Kaynakları	13
2.2.1.1 Sızdırmaz Kapalı ^{137}Cs Radyoaktif Kaynağı.....	13
2.2.2 Polikromatik(Çok enerjili) Radyasyon Kaynakları.....	14
2.2.2.1 X-Işınları	14
2.2.2.1.1 Bremsstrahlung Radyasyonu	15
2.2.2.1.2 Karakteristik X-Işınları.....	16
2.3 Kolimatör	18
2.4 Foton Demetlerinin Karakterize Edilmesi için Fiziksel Tanımlamalar	18
2.4.1 Demet Kalitesi.....	19
2.4.2 Birinci Yarı Değer Kalınlığı, $1.HVL$	19
2.4.3 İkinci Yarı Değer Kalınlığı, $2.HVL$	19
2.4.4 Homojenlik Katsayısı, h	20
2.4.5 Dörtte Bir(Çeyrek) Yarı Değer Kalınlığı, QVL	20
2.4.6 Ortalama(Etkin) Foton Enerjisi, \bar{E}	20
2.4.7 Spektral Ayırma Gücü, R_E	21
2.4.8 Doğal Filtrasyon	21
2.4.9 Radyasyon Şiddetini Zayıflatıcı Materyal	21
2.4.10 Saçılan Radyasyon	21
2.5 Radyasyon Ölçüm Cihazlarının Kalibrasyonu	21
2.5.1 Referans Ölçüm Cihazları.....	22
2.5.2 Referans Standart Kaynak.....	22
2.5.3 Birincil Standart.....	23

2.5.4 İkincil Standart	23
2.5.5 Üçüncül Standart	23
2.5.6 Ulusal Standart.....	24
2.5.7 Ölçüm Cihazları	24
2.5.8 Radyasyon Ölçüm Cihazlarının Kalibrasyonu	24
2.5.9 Kalibrasyon Faktörü, N	25
2.5.10 Cihaz Tepkisi, R	25
2.5.11 Doz Dönüşüm Katsayısı.....	27
2.5.12 Ölçüm Cihazı için Referans Noktası	28
2.5.13 Referans Şartlar	29
2.5.14 Standart Deney Şartları.....	30
2.5.15 Kalibrasyon Şartları	30
2.6 Standart Laboratuvarların Sınıflandırılması.....	30
2.6.1 Uluslararası Ölçüm Sistemi(IMS)	31
2.6.2 Birincil Dereceden Standart Dozimetre Laboratuvarı(PSDL).....	31
2.6.3 İkincil Dereceden Standart Dozimetre Laboratuvarı(SSDL).....	32
2.7 Doz Hızı Ölçerler ve Dozimetreler için Kullanımdaki Nicelikleri ve Fantomlar..	
.....	32
2.7.1 Alan Ölçümleri	34
2.7.1.1 Ortam Eşdeğer Dozu, $H^*(d)$	35
2.7.1.2 Yönlü Eşdeğer Doz, $H'(d,\Omega)$	37
2.7.2 Kişisel Ölçümler	37
2.7.2.1 Kişisel Eşdeğer Doz, $H_P(d)$	37
2.8 Kalibrasyon için Gereklilikler	38
2.8.1 Kalibrasyon Faktörünün ve Referans Dedektör Yanıtının Belirlenmesi	38
2.8.2 Uygulanan Kalibrasyon Prosedürü	41
2.9 Radyasyon Alanları ve Karakteristikleri.....	42
2.9.1 Kalibrasyon için kullanılacak X-ışın sisteminin gereksinimleri	43

2.9.2 Kalibrasyon Amaçlı Radyonüklit Gama Radyasyon Kaynağı	45
2.10 Foton Dedektörlerinin Kalibrasyonu için Protokoller	47
2.10.1 Foton Dedektörlerinin Kalibrasyonu için Kullanılan Referans NIST X-ışın Demet Kaliteleri	47
2.10.1.1 AAPM TG-61'de Belirlenmiş Olan X-ışın Demet Kalitesi Özellikleri.....	47
2.10.1.2 AAPM TG-61' de HVL Belirlenmesi	49
2.10.2 ISO X-ışın Demet Kaliteleri.....	50
2.10.2.1 ISO Dar Spektrumlu Serilerin Özellikleri.....	51
2.11 ISO Dar Spektrumlu X-ışın Demet Serileri için Belirlenmiş Doz Dönüşüm Katsayıları.....	52
2.12 ISO 4037-1'de Belirlenmiş Olan Referans s- ¹³⁷ Cs Kaynak Çıkışındaki Foton Radyasyonları için Belirlenmiş Olan Doz Dönüşüm Katsayıları	53
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	55
3.1 Tez Kapsamında Kullanılan Sistemler	55
3.1.1 Konvansiyonel X-ışın Sistemi	55
3.1.2 ISO s-Cs(0,662) Kaynaklı Işınlama Sistemi.....	56
3.2 Kalibrasyon İşleminde Kullanılan Referans Dedektörler	56
3.2.1 İyon Odaları.....	56
3.3 İyon Odası Elektrometresi	59
3.4 X-ışın Spektrum Programları.....	59
3.5 Test Objeleri	60
3.6 Tez Kapsamında Kalibrasyonu Gerçekleştirilen Dedektörler	60
3.7 X-ışın Sisteminde X-ışın Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi	61
3.7.1 Doğal Filtrasyonun Belirlenmesi	62
3.7.2 AAPM TG-61 Protokolünde Belirtilen NIST Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi.....	62
3.7.2.1 Birinci Yarı Değer Kalınlığı, İkinci Yarı Değer Kalınlığı ve Homojenlik Katsayısının Hesaplanması	63
3.7.3 ISO 4037-1 Protokolünde Belirlenmiş Olan Bazı Dar Spektrumlu(N) X-ışın Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi	64

3.7.3.1 Birinci Yarı Değer, İkinci Yarı Değer Kalınlıklarının ve Homojenlik Katsayısının Hesaplanması	65
3.8 Elde Edilen NIST X-Işın Demet Kalitelerinin ve ISO X-Işın Demet Kalitelerinin Karşılaştırılması	66
3.9 X-Işın Sisteminde Elde Edilen NIST ve ISO Demet Kaliteleriyle Foton Dedektörlerinin Kalibrasyon İşlemi.....	66
3.10 ¹³⁷Cs Işınlama Sisteminde Foton Dedektörlerinin Kalibrasyon İşlemi.....	67
3.11 Kalibrasyonlar için Diğer Etkenler	68
3.11.1 Ortamdaki Doğal Fon(Background) Radyasyonu	68
3.11.2 Ölçülen Okumaların Sayısı	68
3.12 Referans Cihazlar.....	68
3.12.1 Referans Cihazlar için Gereksinimler.....	68
3.12.2 Referans Ölçüm Cihazı için Düzeltmeler	69
3.12.2.1 Basınç	69
3.12.2.2 Sıcaklık.....	69
4. BULGULAR	70
4.1 Doğal Filtrasyonun Belirlenmesi	70
4.2 X-Işın Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi.....	70
4.2.1 AAPM TG-61’de Belirtilmiş Olan NIST X-Işın Demet Kaliteleri	70
4.2.2 ISO 4037-1’ de Belirtilmiş Olan ISO X-Işın Demet Kaliteleri.....	73
4.2.3 AAPM TG-61 Protokolünde Belirtilmiş Olan NIST X-ışın Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi	75
4.2.3.1 AAPM TG-61 Protokolünde Belirtilmiş Olan M100 NIST X-Işın Demet Kalitesinin Elde Edilmesi	75
4.2.3.2 AAPM TG-61 Protokolünde Belirtilmiş Olan H40 NIST X-ışın Demet Kalitesinin Elde Edilmesi	77
4.2.3.3 AAPM TG-61 Protokolünde Belirtilmiş Olan H60 NIST X-ışın Demet Kalitesinin Elde Edilmesi	79
4.2.3.4 AAPM TG-61 Protokolünde Belirtilmiş Olan H100 NIST X-ışın Demet Kalitesinin Elde Edilmesi	81
4.2.4 ISO 4037-1’de Belirtilmiş Olan ISO X-ışın Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi	83

4.2.4.1 ISO 4037-1’de Belirtilmiş Olan N60 ISO X-ışın Demet Kalitesinin Elde Edilmesi	84
4.2.4.2 ISO 4037-1’de Belirtilmiş Olan N100 ISO X-ışın Demet Kalitesinin Elde Edilmesi.....	86
4.3 Elde edilmiş olan NIST X-ışın demet kalitelerinin ve ISO X-ışın demet kalitelerinin Karşılaştırılması	88
4.4 X-ışın Sisteminde Elde Edilen NIST ve ISO Demet Kaliteleriyle Foton Dedektörlerinin Kalibrasyon İşlemi.....	89
4.5 ¹³⁷Cs Işınlama Sisteminde Foton Dedektörlerinin Kalibrasyon İşlemi.....	93
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	97
KAYNAKLAR	102
ÖZGEÇMİŞ.....	104

KISALTMALAR DİZİNİ

AAPM	American Association Physicist in Medicine
ADCL	Acrcdited Dosimetry Calibration Laboratories
BIMP	Brueau International des Poids et Mesures
EN	European Norms
HVL	Yarı Değer Kalınlığı
IEC	Internatioanal Electrotechnical Commitee
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units
IMS	International Measurement System
ISO	International Standards Organization
NCRP	National Council on Radiation Protection and Measurements
NRCC	National Research Council of Canada
NIST	National Institute for Standards and Technology
PMMA	Polimetil Metakrilat
POM	Poliasetal
PSDL	Birinci Dereceden Standart Dozimetre Laboratuvarı
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
QVL	Çeyrek Yarı Değer Kalınlığı
SSDL	İkinci Dereceden Standart Dozimetre Laboratuvarı
TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu

SİMGELER DİZİNİ

h	Homojenlik Katsayısı
R	Röntgen, Işınlama birimi
Gy	Gray, Soğurulan doz birimi
Sv	Sievert , Eşdeğer doz birimi
mAs	Miliamper saniye
kV _p	Kilovolt Tepe Değeri
C	Coulomb, Elektrik yük birimi
S	Radyoaktif Kaynak
N	Kalibrasyon Faktörü
H	Eşdeğer Doz

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	^{137}Cs radyoaktif kaynağının bozunma şeması	13
Şekil 2.2	X-ışın tüpü şematik gösterimi	14
Şekil 2.3	Karakteristik X-ışını ve Bremsstrahlung radyasyonunun fiziksel oluşum süreci.....	15
Şekil 2.4	Bremsstrahlung radyasyonunun sürekliliğini ve karakteristik X-ışınlarının piklerini gösteren Tungsten(W) elementinin X-ışın tüpü spektrumu örneği	17
Şekil 2.5	Uluslararası ölçüm sisteminin(IMS) şematik gösterimi	31
Şekil 2.6	Referans radyasyon alanlarında kullanılan ölçülebilir ve türetilmiş nicelikler	34
Şekil 2.7	(a) Genişletilmiş ve (b) genişletilmiş ve hizalanmış alanların şematik gösterimi	35
Şekil 2.8	(a) Genişletilmiş, (b) genişletilmiş ve hizalanmış radyasyon alanlarındaki eşdeğer doz tanımı	36
Şekil 2.9	Kalibrasyonun dört farklı yönteminin uygulanmasının şematik gösterimi	39
Şekil 2.10	X-ışın sistemi kullanılarak yapılan kalibrasyonda kullanılan sistemin şematik gösterimi	43
Şekil 2.11	X-ışınlarının filtrasyonunda kullanılan materyal örnekleri	44
Şekil 2.12	Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'nde bulunan ^{137}Cs radyoaktif kaynağı ışınlama sisteminde kullanılan kolimatör	46
Şekil 2.13	AAPM TG-61 protokolünde belirtilen NIST X-ışın demet kalitelerinin elde edildiği düzenek	48
Şekil 3.1	PTW marka, 30 cm^3 hassas hacimli silindirik iyon odası.....	57
Şekil 3.2	PTW marka, $27,9\text{ cm}^3$ hassas hacimli küresel iyon odası	58
Şekil 3.3	Elektrometre.....	59
Şekil 3.4	Test objeleri örneği	60
Şekil 3.5	Doğal filtrasyonun belirlenmesi, NIST ve ISO x-ışın demet kalitelerinin elde edilmesi için kurulan düzenek şeması.....	62
Şekil 3.6	Dedektör kalibrasyon yöntemi.....	67
Şekil 3.7	^{137}Cs ışınlama sistemi	67

Şekil 4.1	60 kV _p gerilimde filtre kalınlığına göre doz değişimi.....	70
Şekil 4.2	NIST X-ışın demet kalitelerinin elde edildiği düzenek	75
Şekil 4.3	M100 demet kalitesi için filtre kalınlığına göre doz değişimi.....	76
Şekil 4.4	M-100, 100 kV _p demet kalitesi için SpectrumGUI programından elde edilen spektrum.....	76
Şekil 4.5	M-100, 100 kV _p demet kalitesi için Xcomp5r programından elde edilen spektrum.....	77
Şekil 4.6	H40 demet kalitesi için filtre kalınlığına göre doz değişimi.....	78
Şekil 4.7	H40, 40 kV _p demet kalitesi için SpectrumGUI programından elde edilen spektrum.....	78
Şekil 4.8	H40, 40 kV _p demet kalitesi için Xcomp5r programından elde edilen spektrum.....	79
Şekil 4.9	H60 demet kalitesi için filtre kalınlığına göre doz değişimi.....	80
Şekil 4.10	H60, 60 kV _p demet kalitesi için SpectrumGUI programından elde edilen spektrum.....	80
Şekil 4.11	H60, 60 kV _p demet kalitesi için Xcomp5r programından elde edilen spektrum.....	81
Şekil 4.12	H100 demet kalitesi için filtre kalınlığına göre doz değişimi.....	82
Şekil 4.13	H100, 100 kV _p demet kalitesi için SpectrumGUI programından elde edilen spektrum.....	82
Şekil 4.14	H100, 100 kV _p demet kalitesi için Xcomp5r programından elde edilen spektrum.....	83
Şekil 4.15	ISO demet kalitelerinin elde edildiği düzenek.....	84
Şekil 4.16	N60 demet kalitesi için filtre kalınlığına göre doz değişimi	84
Şekil 4.17	N60, 60 kV _p demet kalitesi için SpectrumGUI programından elde edilen spektrum.....	85
Şekil 4.18	N60, 60 kV _p demet kalitesi için Xcomp5r programından elde edilen spektrum.....	85
Şekil 4.19	N100 demet kalitesi için filtre kalınlığına göre doz değişimi.....	86
Şekil 4.20	N100, 100 kV _p demet kalitesi için SpectrumGUI programından elde edilen spektrum.....	87
Şekil 4.21	N100, 100 kV _p demet kalitesi için Xcomp5r programından elde edilen spektrum.....	87

Şekil 4.22	^{137}Cs kaynağı ile yapılan kalibrasyon işleminde referans dedektör konumunun şematik gösterimi.....	93
Şekil 4.23	^{137}Cs kaynağı ile yapılan kalibrasyon işleminde Geiger-Mueller dedektörü konumunun şematik gösterimi.....	93
Şekil 4.24	^{137}Cs kaynağı ile yapılan kalibrasyon işleminde $\text{H}_p(10)$ dedektörü konumunun şematik gösterimi.....	94
Şekil 4.25	Referans dedektör(silindirik iyon odası TM-23361) ve $\text{H}_p(10)$ dedektör doz karşılaştırmaları.....	95
Şekil 4.26	Referans dedektör(silindirik iyon odası TM-23361) ve Geiger Mueller dedektör doz karşılaştırmaları.....	95

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	Foton akısından hava kermaya ve sonra doz eşdeğerine dönüşüm	28
Çizelge 2.2	Referans Şartlar	29
Çizelge 2.3	Alan ve kişisel ölçümlerde kullanılan operasyonel doz nicelikler	33
Çizelge 2.4	X-ışınlarının filtrasyonunda kullanılan materyallerin özellikleri	44
Çizelge 2.5	60 kV'da 1.HVL ile doğal filtrasyon arasındaki ilişki	45
Çizelge 2.6	Dar spektrumlu ISO X-ışın demet kalitelerinin özellikleri	51
Çizelge 2.7	Dar spektrumlu ISO X-ışın demet kalitelerinin farklı nicelikleri için belirlenmiş dönüşüm katsayıları.....	52
Çizelge 2.9	ISO tarafından belirlenmiş olan referans s- ¹³⁷ Cs(0,662 MeV) kaynak çıkışlı foton radyasyonu için doz dönüşüm katsayıları	53
Çizelge 2.10	S-Cs kaynağının genişletilmiş ve hizalı verilen alanlar radyasyon kaliteleri ve kolime edilmiş ışın demetleri ICRU küresi için K_a hava kermasından, $H^*(10)$ ortam doz eş değerine $h^*_k(10;S)$ dönüşüm katsayısı	53
Çizelge 3.1	X-ışın sistemi özellikleri.....	55
Çizelge 3.2	¹³⁷ Cs kaynak içeren ışınlama sisteminin özellikleri	56
Çizelge 3.3	PTW, TM 23361 silindirik iyon odası özellikleri	57
Çizelge 3.4	PTW, TM 32005 küresel iyon odası özellikleri	58
Çizelge 3.5	Kalibrasyonu gerçekleştirilen dedektörlerin özellikleri	61
Çizelge 4.1	NIST X-ışın demet kaliteleri	71
Çizelge 4.2	ISO X-ışın demet kaliteleri.....	73
Çizelge 4.3	M100 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar	76
Çizelge 4.4	M100 demet kalitesi için ölçülen ve Spectrum GUI, Xcom5r programlarından elde edilen 1. HVL değerleri.....	77
Çizelge 4.5	H40 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar	78
Çizelge 4.6	H40 demet kalitesi için ölçülen ve SpectrumGUI, Xcomp5r programlarından elde edilen 1. HVL değerleri.....	79
Çizelge 4.7	H60 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar	80
Çizelge 4.8	H60 demet kalitesi için ölçülen ve SpectrumGUI, Xcomp5r programlarından elde edilen 1. HVL değerleri	81

Çizelge 4.9	H100 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar	82
Çizelge 4.10	H100 demet kalitesi için ölçülen ve SpectrumGUI, Xcomp5r programlarından elde edilen 1. HVL değerleri.....	83
Çizelge 4.11	N60 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar	85
Çizelge 4.12	N60 demet kalitesi için ölçülen ve SpectrumGUI, Xcomp5r programlarından elde edilen 1. HVL değerleri.....	86
Çizelge 4.13	N100 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar	87
Çizelge 4.14	N100 demet kalitesi için ölçülen ve SpectrumGUI, Xcomp5r programlarından elde edilen 1. HVL değerleri.....	88
Çizelge 4.15	NIST ve ISO x-ışın demet kalitelerinin karşılaştırılması	88
Çizelge 4.16	M100 için referans dedektör ve kalibrasyonu yapılacak olan dedektörlerle alınan ölçümler	89
Çizelge 4.17	NIST M100 demet kalitesi kullanılarak gerçekleştirilen iyon odaları için belirlenen kalibrasyon faktörleri.....	89
Çizelge 4.18	NIST H60 ve ISO N60* demet kalitesi kullanılarak gerçekleştirilen iyon odaları için belirlenen kalibrasyon faktörleri	90
Çizelge 4.19	NIST H60 ve ISO N60 demet kaliteleri ile elde edilen kalibrasyon faktörlerinin karşılaştırılması.....	90
Çizelge 4.20	NIST H100 demet kalitesi kullanılarak gerçekleştirilen iyon odaları için belirlenen kalibrasyon faktörleri.....	90
Çizelge 4.21	ISO N100 demet kalitesi kullanılarak gerçekleştirilen iyon odaları için belirlenen kalibrasyon faktörleri.....	91
Çizelge 4.22	NIST H100 ve ISO N100 demet kaliteleri ile elde edilen kalibrasyon faktörlerinin karşılaştırılması.....	91
Çizelge 4.23	6 cm ³ iyon odası (Radcal 10x6-6, S/N = 03-0458) için farklı demetlerde elde edilen kalibrasyon faktörleri	91
Çizelge 4.24	60 cm ³ iyon odası (Radcal 10x6-60 S/N = 07-03618) için farklı demetlerde elde edilen kalibrasyon faktörleri	92
Çizelge 4.25	63,18 mm ³ iyon odası (Unfors 543 S/N = 6433) için farklı demetlerde elde edilen kalibrasyon faktörleri.....	92
Çizelge 4.26	¹³⁷ Cs kaynağı kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon işlemi sonuçları..	94
Çizelge 4.27	Belirsizlik bütçesi.....	96

1.GİRİŞ

Medikal ve endüstriyel radyasyon uygulamalarının gerçekleştirilmesinde, yasal olarak belirlenmiş doz veya ışınlama(exposure) limit değerlerinin altında kalacak şekilde bireylerin iyonlaştırıcı radyasyona karşı korunmasını garanti etmek için radyasyon alanının türünün, şiddetinin ve alınan dozun ölçülmesinde kullanılan radyasyon ölçüm cihazlarının kalibrasyonu çok önemlidir. Radyasyon ölçüm cihazlarının kalibrasyonu, cihazın doğru bir şekilde çalıştığını ve dolayısıyla radyasyon izleme amacını karşılamaya uygun olduğunun garanti edilmesi için yapılır. Radyasyon ölçüm cihazının kalibrasyonu, cihazın gösterge değerinin aralığında gerçekleştirilir ve kontrol altındaki standart koşullar altında “ölçülen değer”, cihazın toplam ölçüm doğruluğunun optimize edilmesi için kullanılır.

Medikal alanda, x- ve gama ışınları, özellikle radyoloji ve radyoterapide teşhis ve tedavi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla, ışınlama süreçlerinde ölçülen dozun belirlenmesi için kullanılan radyasyon ölçüm cihazlarının kalibrasyonunda hangi protokole uygun demet kalitelerinin(enerjileri) kullanıldığı ise çok önemlidir. Çünkü bazı dedektörlerin doz tepkisi enerjiye bağlı değişkenlik gösterebilir. Genelde iyon odaları gibi radyasyon doz ölçüm cihazları ve tarama amaçlı kullanılan Geiger-Mueller (GM) gazlı sayaçlar, NaI sintilasyon veya plastik sintilatör esaslı doz hızı ölçer sayaçlar, normalde fabrika çıkışı her üreticinin kendi ulusal sistemine uygun olan demet kalitelerinde seçilen protokole göre kalibre edilerek satışa sunulmaktadır. Kullanıcı ise bu ölçüm cihazlarını piyasa koşullarında teknik özelliklerine göre fayda-maliyet unsurlarına göre seçip kullanmaktadır. Bu amaçla yaygınca Avrupa’da ve Ülkemizde TS ISO 4037-1 standardına uygun ISO demet kaliteleri ve TS EN IEC 61267 standardında belirtilen IEC demet kaliteleri kullanılmaktadır. Ancak Amerika ve Kanada gibi ülkelerde ise, NIST/ADCL x-ışın demet kaliteleri kullanılmaktadır.

Bu tez kapsamında, ISO ve NIST/ADCL olarak adlandırılan ve uluslararası düzeyde benimsenmiş x-ışın demet kaliteleri tungsten (W) anotlu x-ışın tüplerinden üretilerek kullanılacaktır. Bilindiği gibi foton dışında, beta ve nötron radyasyonları için uygun radyonüklit kaynaklarından üretilen demet kaliteleri de kullanılmaktadır. Ancak bu

radasyon türleri tez kapsamı dışındadır. Bu tezde, tungsten anotlu bir x-ışın sisteminden üretilen ve NIST protokolüne uygun sadece düşük(L), orta(M) ve yüksek(H) derecede filtrelenmiş demet kaliteleri 40-100 kV_p gerilim aralığında NIST/ADCL demet kalitelerinin karakterize edilmesi amaçlanmıştır. X- ve gama ışınlarını ölçen cihazların kalibrasyonu ve ışınlanması fiziksel nicelik hava kerma biriminde yapılmaktadır. Bu bağlamda, ikincil standart laboratuvar PTW(Freiburg, Almanya)-izlenebilir standart bir iyon odasına (ve buna bağlı elektrometresine) göre farklı bir x-ışın dedektörünün kalibrasyonunun yapılmasında her bir demet kalitesi için hava-kerma sabiti belirlenecektir. Oluşturulacak prosedürde, kalibrasyon faktörünün belirlenmesi süreci açıklanacaktır. Hava ortamında yapılan ölçümler fiziksel bir nicelik olan hava kerma(μGy veya mGy biriminde) ve dokuyu temsilen fantom üzerinde yapılan ölçümler ise doz eşdeğeri(μSv veya mSv biriminde) olarak değerlendirilecektir.

Dedektör ve dozimetre kalibrasyon servisi sağlamak için yetkili kurumlar tarafından atanmış ve birincil standarda göre kalibre edilmiş en az bir tane ikincil standartta uygun yeterli donanımı olan dozimetre laboratuvarı gereklidir. Türkiye’de TAEK-SANAEM’in SSDL kurma projesi devam etmektedir ve yakın gelecekte bu hizmetin Türkiye’de SSDL seviyesinde sunulacağı beklenmektedir. Ancak halihazırda SSDL amacına yönelik laboratuvar eğitimi düzeyinde, sadece foton radyasyonu için Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü ISO s-Cs(0,662 MeV) referans kaynak ve radyometrik benç; kalibrasyon ve ışınlama hizmeti sunmaktadır.

Bu bağlamda, bu tez çalışmasında, NIST x-ışın demet kalitelerinin bazıları mevcut x-ışın sistemleri ile elde edilmiştir. Bununla birlikte donanım teknik yetersizliği nedeniyle, bazı NIST x-ışın demet kaliteleri ise elde edilememiştir. Ancak elde edilen demet kalitelerinin karakterizasyonu için yapılan ölçümler AAPM TG-61 protokolünde verilen öneriler esas alınarak ortaya konulmuş ve analizleri yapılmıştır. Tez çalışmasında, radyolojik uygulamalar için tüp gerilimleri 40-150 kV_p ışınlama aralığında tungsten anotlu bir x-ışın sistemi kullanılmıştır. Dedektör kalibrasyonu için çift kaynaklı(47 mCi ve 8,58 Ci aktiviteli iki adet ¹³⁷Cs sızdırmaz kapalı radyoaktif kaynağa sahip) ve mobil radyometrik bençten oluşan bir ışınlama sistemi kullanılmıştır. X-ışın sisteminde AAPM TG-61 protokolündeki NIST demet kalitelerinden M100,

H40, H60, H100 x-ışın demetleri ve ISO 4037-1 protokolünde belirtilen N60, N100 x-ışın demet serileri elde edilmiştir. Elde edilen foton demet kalitelerinin belirli karakteristik özellikleri(ortalama enerji, HVL değerleri vb.) aynı zamanda Xcomp5r ve SpectrumGUI x-ışın spektrum programları ile simüle edilerek karşılaştırılmıştır. Protokollere uygun elde edilen bu NIST ve ISO x-ışın demet kaliteleriyle x-ışın sisteminde farklı hacimlerde dedektörlerin (iyon odası) kalibrasyonu için uygun bir kalibrasyon metodolojisi oluşturulmuştur. Ayrıca ISO 4037-1’de verilen s-Cs(0,662 MeV) demet kalitesi kullanılarak hem iyon odaları ile $H_p(10)$ ve GM doz hızı ölçen gama sayaçları kalibre edilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

Radyasyon doz ölçümü ile ilgili yapılan çalışmalarda bazı temel niceliklerin ve kavramların bilinmesi açısından tezin bu bölümünde radyolojik uygulamalarda kullanılan x-ışın demetleri ve dedektör kalibrasyonu için sıklıkla kullanılan bazı temel kavramlar açıklanmıştır.

2.1 Işınlama ve Doz Tanımları

2.1.1 Birincil Radyasyon

Birincil radyasyon; x-ışın tüp penceresinden ya da kaynak koruyucu kılıfının kolime edici düzeneğinden geçen radyasyondur(Anonymous 1968).

2.1.2 İkincil Radyasyon

İkincil radyasyon; doğrudan radyasyona maruz kalan maddelerden saçılarak yayınlanan radyasyondur.

2.1.3 Işınlama, X

Işınlama; x- veya gama ışınlarının hava ortamını iyonlaştırma kapasitesinin bir ölçüsüdür. Işınlama(exposure), standart sıcaklık ve basınçtaki kuru havada x- veya gama ışınları tarafından üretilen elektronların yolları boyunca tamamı durdurulduğunda, oluşan iyonların(artı veya eksi yüklü) tek işaretli yüklerinin(dQ) birim hava kütesine(dm) oranı olarak tanımlanır.

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (2.1)$$

Işınlamanın SI birim sistemindeki birimi $C \cdot kg^{-1}$ 'dir. Işınlamanın eski birimi *Roentgen* (R) olarak tanımlanır. $1 R \cong 2,58.10^{-4} C/kg$ 'dir(Anonymous 2001).

Ancak Roentgen(R) biriminin iki temel sınırlaması vardır. Birincisi, sadece elektromanyetik radyasyon karakteristiğine sahip iyonlaştırıcı radyasyonlar(x-ışını, gama ışını, Bremsstrahlung gibi) için tanımlıdır. Fakat yüklü parçacıklar ve nötron radyasyonu için geçerli değildir. İkincisi, ışınlama birimi olarak 1 Roentgen değeri sadece hava ortamı için tanımlıdır. Diğer su, doku vb. ortamlar için ise tanımlı değildir. Bu nedenle, radyasyon korunmasında diğer tüm radyasyon türlerini de kapsayan ve havanın dışında farklı tip herhangi bir malzemeye uygulanabilen ‘soğurulmuş doz’ tanımı tercih edilir. Örneğin havadaki ışınlamadan(X) havadaki soğurulan doza(D) geçiş(Exposure-to-dose-to air) için aşağıdaki basit dönüşüm geçerlidir:

$$D(Gy)=0,876\times 10^{-2}\cdot X(Roentgen) \quad (2.2)$$

Havadaki ışınlama ve doz arasındaki bu dönüşüm için, basitçe $1 R=8,76 mGy$ örnek olarak verilebilir.

2.1.4 Işınlama Hızı, \dot{X}

Işınlama hızı, birim zamanda meydana gelen ışınlama miktarıdır.

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} \quad (2.3)$$

Bu eşitlikte dX ; dt zaman aralığındaki ışınlamadaki değişimdir. Işınlama hızı birimi $C/(kg\cdot s)$ ve eski birimi R/h 'dir(Anonymous 2011).

2.1.5 Doz ve Doz Hızı

Doz, bir hedefin belirli kütlesine radyasyonla aktarılan enerjinin ölçüsüdür(Anonymous 2011). Doz terimi, soğurulan doz, etkin doz veya eşdeğer doz gibi mevcut niceliklerden herhangi birisi için kısaca “doz” terimi olarak adlandırılır. Doz hızı ise, birim zamanda belirli bir maddeye aktarılan dozdur.

2.1.5.1 Soğurulan Doz, D

Herhangi bir malzemeye iyonlaştırıcı radyasyonla aktarılan enerjinin bir ölçüsüdür. Soğurulan doz aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm} \quad (2.4)$$

Burada;

$d\bar{E}$: İyonlaştırıcı radyasyon tarafından aktarılan ortalama enerji,

dm : Malzemenin birim kütlesidir.

Soğurulan doz birimi $J \cdot kg^{-1}$ 'dir. Özel adı ise *Gray*'dir (Anonymous 2007).

2.1.5.2 Soğurulan Doz Hızı, \dot{D}

Soğurulan doz hızı, aşağıdaki şekilde dt zaman aralığında soğurulan dozdaki değişim (dD) olarak tanımlanır.

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} = \frac{d\bar{E}}{dm dt} \quad (2.5)$$

Soğurulan doz hızının birimi $J \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$ 'dir. SI birim sisteminde $Gy \cdot s^{-1}$ 'dir.

Hava ortamının dışındaki diğer ortamlar için doz hızı,

$$\dot{D}_{a,i} = \varphi \mu_{a,i} E \quad (2.6)$$

dir (Tsoulfanidis and Landsberger 2000).

Burada;

φ : Parçacık akısı (parçacık/cm²),

$\mu_{a,i}$ (m²/kg) : İlgilenilen i-nci ortam için belirli bir enerjide kütle soğurma katsayısı ve

E (J/parçacık) : parçacık enerjisidir. Parçacık enerjisi *MeV* biriminde verilirse,

$1 \text{ MeV} = 1,6 \times 10^{-13} \text{ J}$ ile dönüştürülür.

Hava ortamında yapılan soğurulan doz veya ışınlama ölçümüyle aşağıdaki gibi ilişkilendirilebilir.

$$\dot{D}_{a,i} = \frac{\mu_{a,i}}{\mu_{a,hava}} \cdot \dot{D}_{a,hava} = \frac{\mu_{a,i}}{\mu_{a,hava}} \cdot (0,876) \cdot \dot{X} \quad (2.7)$$

Burada;

$\mu_{a,hava}$ (cm²/g) : belirli bir enerjideki radyasyon için hava ortamında kütle soğurma katsayısıdır.

2.1.5.3 Eşdeğer Doz, H_T

Eşdeğer doz niceliği aşağıdaki gibi tanımlanır(Anonymous 2013)

$$H_T = W_R \cdot D_{T,R} \quad (2.8)$$

Burada;

$D_{T,R}$: Belirli bir radyasyon türünün(R) bir doku veya organa verdiği ortalama soğurulmuş doz,

W_R : Belirli bir radyasyon türü(R) için ağırlık faktörüdür.

Söz konusu radyasyon alanı farklı W_R değerlerine (örneğin x/γ ışını ve nötron alanı karışımı) sahip farklı radyasyon tiplerinden meydana gelirse, eşdeğer doz tüm radyasyon alanları dikkate alınarak;

$H_{T,R} = \sum_R W_R \cdot D_{T,R}$ şeklinde hesaplanır.

Eşdeğer doz birimi $J \cdot kg^{-1}$ ve özel adı *Sievert(Sv)*'dir.

2.1.5.4 Eşdeğer Doz Hızı, \dot{H}_T

Eşdeğer doz hızı(\dot{H}), dt zaman aralığında eşdeğer dozdaki(H) değişim olarak tanımlanır.

$$\dot{H}_T = \frac{dH_T}{dt} \quad (2.9)$$

Birimi: $J \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$

Eşdeğer doz hızının özel birimi *Sievert* (Sv) $\cdot s^{-1}$ 'dir(Anonymous 2000).

2.1.5.5 Etkin Doz, E

Doku veya organa(T) özgü uygun bir doku ağırlık faktörü(W_T) ile bu doku ve organa ait eşdeğer dozun çarpılmasıyla elde edilen dozların toplamıdır. Etkin doz, aşağıdaki ifadeyle verilir:

$$E = \sum W_T H_T \quad (2.10)$$

Burada etkin doz, H_T 'nin her bir T dokusu/organı için uygun doku ağırlık faktörüyle çarpılıp dokular veya organlardaki eşdeğer dozların toplanmasıyla elde edilir.

Etkin doz birimi $J \cdot kg^{-1}$ ve özel adı *Sievert*(Sv)'dir(Anonymous 2007).

2.1.5.6 Doz Eşdeğeri, H

Doz eşdeğeri(dose equivalent) doku içerisinde herhangi bir noktada soğurulan doz(D) ile bu noktadaki kalite faktörünün(Q) çarpımıdır.

$$H = Q \cdot D \quad (2.11)$$

Doz eşdeğerinin birimi $J \cdot kg^{-1}$ ve özel adı *Sievert*'dir(Anonymous 2007).

2.1.5.7 Organ Dozu, D_T

İnsan vücudunun belirli bir dokusu veya organına(T) verilen ortalama soğurulan dozdur ve aşağıdaki gibi tanımlanır(Anonymous 2007):

$$D_T = \frac{1}{m_T} \int_{m_T} D \cdot dm = \frac{\epsilon_T}{m_T} \quad (2.12)$$

Burada;

m_T : Doku veya organın kütlesi

D : dm kütle elemanındaki soğurulan doz ve

ϵ_T : Aktarılan toplam enerjidir.

2.1.6 Radyasyon Kalite Faktörü, Q

Radyasyonun bağıl biyolojik etkinliğini yansıtmak amacıyla “soğurulan dozun” çarpıldığı bir sayıdır. Çarpımın sonucu doz eşdeğeri(dose equivalent)’dir.

2.1.7 ICRU Küresi

Kütlece birleşimi % 76,2 O, % 10,1 H, % 11,1 C ve % 2,6 N elementlerinden oluşan ve yoğunluğu $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ olan doku eşdeğeri malzemedir yapılan 30 cm çapındaki küredir(Anonymous 2007).

2.1.8 ICRU Dokusu

Kütlece birleşimi % 76,2 O, % 10,1 H, % 11,1 C ve % 2,6 N elementlerinden oluşan ve yoğunluğu $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ olan doku eşdeğeri malzemedir(Anonymous 1985; Anonymous 2006).

2.1.9 Ortam Doz Eşdeğeri, H^* (10)

Hizalanmış radyasyon alanının doğrultusunun zıt yönüne, *ICRU* küresinin yarıçapı üzerinde *10 mm* derinliğinde bir noktada karşılık gelen genişletilmiş ve hizalanmış alan tarafından oluşturulan, doz eşdeğeri.

Ortam doz eşdeğerinin birimi kilogram başına *Joule*'dür ($J \cdot kg^{-1}$). Özel adı ise *Sievert*'dir.

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

2.1.10 Yöne Bağlı Doz Eşdeğeri, $H(d, \Omega)$

ICRU küresinde belirli bir doğrultuda yarıçap üzerinde bir $d(mm)$ derinliğinde, genişletilmiş alana karşılık gelen bir radyasyon alanı içindeki doz eşdeğeri (Anonymous 1993).

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

2.1.11 Kişisel Doz Eşdeğeri, $H_p(d)$

Kişisel doz eşdeğeri, vücut üzerinde belirtilen bir noktanın altında uygun d derinliğinde yumuşak dokudaki doz eşdeğeri (Anonymous 1993). Belirlenen nokta genellikle bireyin dozimetresini taktığı vücut giysisi üzeri konum olarak alınır.

Kişisel doz eşdeğerinin birimi kilogram başına *joule*'dür ($J \cdot kg^{-1}$). 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 $0,07 \text{ mm}$ derinliği kullanılır. Bu derinlik için kişisel doz eşdeğeri $H_p(0,07)$ 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 eşdeğeri tarifini göz önüne almıştır(Anonymous 1992). Böylece kişisel doz ölçerlerin kalibrasyonu için $H_p(d)$, ICRU dokusu bileşiminde olan fantomun d derinliğindeki doz eşdeğeridir.

2.1.12 Kerma, K

Birim kütlede, indirekt(dolaylı) iyonlaştırıcı parçacıkların serbest bıraktığı tüm yüklü parçacıkların başlangıç kinetik enerjileri toplamı dE_{tr} ile; maddenin kütlesi dm ile gösterilirse, dE_{tr} 'nin dm 'ye oranı *kerma*(K)'dır. Birimi $J \cdot kg^{-1}$ 'dir. Kerma değerinin SI birimi *Gray*'dir(Anonymous 2001).

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (2.13)$$

Bu tanımlamada, foton ışınlamaları için doz kermaya eşit varsayılır. Çünkü 300 keV enerjinin altındaki fotonlar için ikincil oluşan yüklü parçacıklar nedeniyle ışımayla olan kayıplar, sadece %0,1'den daha azdır(Ma vd. 2001). Kerma, x-ışını ve γ -ışınları gibi iyonlaştırıcı radyasyonun aktardığı enerjiyle radyasyon alanını ilişkilendirmek için ve radyasyon ölçüm cihazlarının kalibrasyonunda sıkça kullanılan bir kavramdır. Kerma tanımlanırken, gelen radyasyonun taşıdığı enerji ve malzeme içinde gerçekleşen etkileşmeler sonrasında oluşan ürün parçacıklar(Compton elektronları, fotoelektronlar gibi) kazanılan enerji etkileşim noktasında soğurulan kinetik enerji tanıma dahil edilir. Etkileşme bölgesinde soğurulmayan enerji ise (Compton etkileşmesinde saçılan foton, karakteristik fluoresans ışınması, yok olma fotonları gibi) tanıma dahil değildir(Anonymous 2007).

Hava ortamındaki monoenerjitik foton demeti için hava kerması,

$$\text{Kerma} = K_a^{\text{hava}} = \varphi \cdot E \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{\text{hava}} \quad (2.14)$$

Burada;

φ : Parçacık akısı,

ρ : Yoğunluk(g/cm^3) ve

E : Foton enerjisidir.

Kütle enerji transfer katsayısı ve kütle enerji soğurma katsayısı arasında aşağıdaki bağıntı vardır:

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} \cdot (1 - \bar{g}) \quad (2.15)$$

Burada,

$(\mu_{tr}/\rho)_{\text{hava}}$: Hava için kütle enerji transfer katsayısı(cm^2/g),

$(\mu_{en}/\rho)_{\text{hava}}$: Hava için kütle enerji soğurma katsayısıdır. Ortamın atom numarası ve foton enerjisi 1 MeV'den düşük olması durumlarında kütle enerji transfer katsayısına eşit alınır(Podgorsak 2005). Diğer bir ifadeyle düşük ve orta enerjili x-ışınları için yukarıdaki eşitlikte $\bar{g} = 0$ alınabilir ve kütle enerji soğurma katsayısı kullanılır(Ma vd. 2001).

2.1.13 Kerma Hızı, \dot{K}

Kerma hızı; ilgilenilen ortamdaki kerma, K değerinin birim zamandaki değişimidir.

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt} \quad (2.16)$$

Bu eşitlikte dK , dt zaman aralığında kermadaki değişimdir. Birimi $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 'dir. Kerma hızının SI birim sistemindeki birimi $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ 'dir(Anonymous 2007).

2.2 X-ışın ve Gama Radyasyon Kaynakları

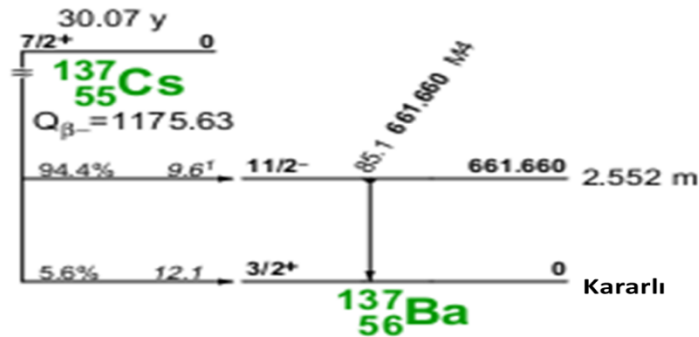
Sızdırmaz kapalı kaynak(sealed radioactive sources), bir kapsül veya bununla birlikte sıkıca yapışık bir tutucu malzemeyle birleştirilerek sızdırmazlığı sağlanan radyoaktif malzemedir(Anonymous 2012). Kalibrasyon ve ışınlama amaçlı olarak kullanılan tek enerjili (örneğin ^{137}Cs) veya çok enerjili (örneğin ^{60}Co , ^{192}Ir) sızdırmaz kapalı kaynaklar, radyoterapi, brakiterapi ve dedektör kalibrasyonu gibi ışınlama amaçları için sıkça kullanılırlar.

2.2.1 Monokromatik(Tek enerjili) Radyasyon Kaynakları

Enerji spektrumunda, tek enerjilerde(monoenerjitik veya monokromatik) parçacık yada parçacıklar yayınlayan radyasyon kaynaklarına tek enerjili radyasyon kaynakları denir. Monokromatik radyasyon kaynakları için ^{54}Mn (834 keV), ^{137}Cs (662 keV) gama yayınlayıcı radyoizotoplar örnek verilebilir.

2.2.1.1 Sızdırmaz Kapalı ^{137}Cs Radyoaktif Kaynağı

Bu tezde kullanılan sızdırmaz şekilde kapalı ^{137}Cs radyoaktif kaynak, dedektör kalibrasyonu amacıyla kullanılmıştır. ^{137}Cs radyoaktif kaynağının yarı ömrü 30,07 yıldır. Bozunma şeması aşağıdaki gibidir. Kaynaktan yayınlanan x-ışınlarının ($K_{\alpha}=31,8-32,6\text{ keV}$, $K_{\beta}=36,3-37,2\text{ keV}$) çelik kapsülü ve zırhı nedeniyle doza katkısı yoktur.



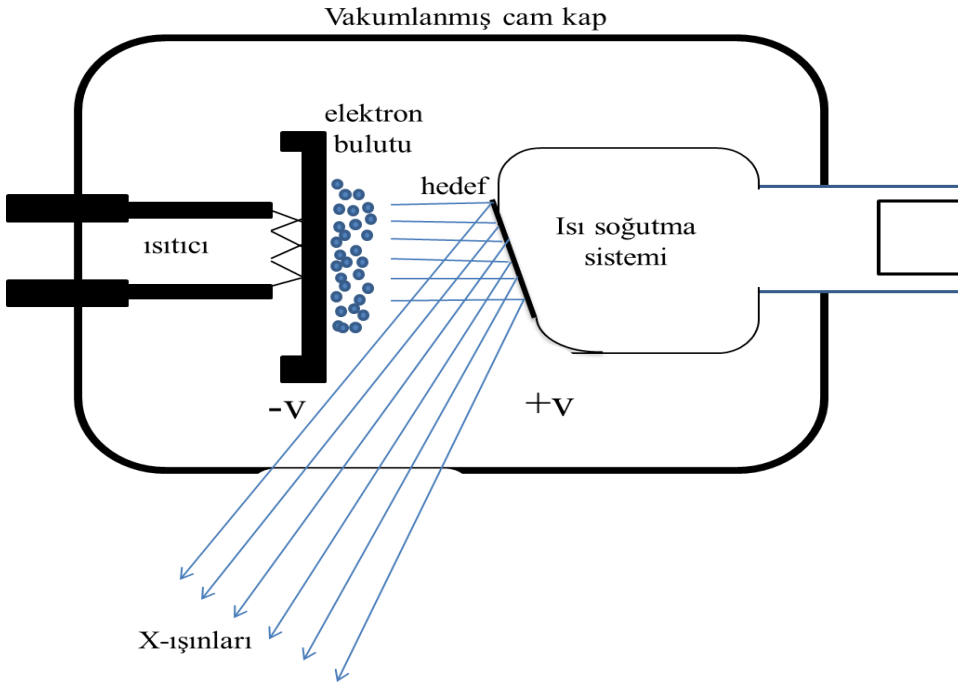
Şekil 2.1 ^{137}Cs radyoaktif kaynağının bozunma şeması(Firestone ve Shirley 1996)

2.2.2 Polikromatik (Çok enerjili) Radyasyon Kaynakları

Bir radyasyon kaynağında farklı enerjilerde parçacıklar salınıyorsa bu parçacıkların oluşturduğu enerji spektrumu polikromatik enerji spektrumdur. X-ışınları polikromatiktir. Ayrıca polikromatik gama radyasyon kaynakları için ^{60}Co (1,173 MeV ve 1,332 MeV), ^{192}Ir (61,4-73,3 keV x-ışınları ve 201 keV, 206 keV, 283 keV, 329 keV, 374 keV, 420keV, 484keV, 489 keV ve 704 keV gama ışınları) radyoizotoplar örnek verilebilir(Firestone ve Shirley 1996; URL: <http://www.nndc.bnl.gov/chart/>, 2015).

2.2.2.1 X-Işınları

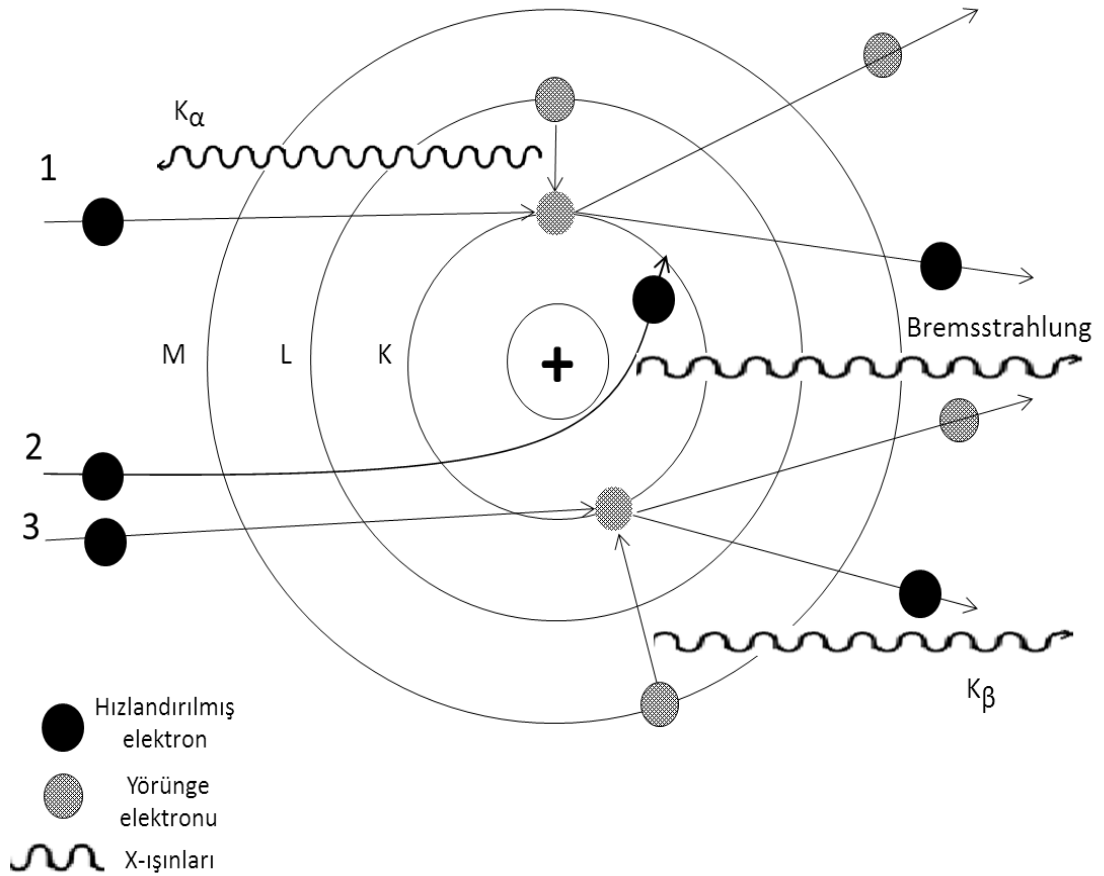
X-ışınları yüksek enerjili fotonlardır ve dokuya önemli ölçüde zarar verebilir. Bu yüzden kontrollü laboratuvar ortamlarında üretilir ve kullanılırlar. X-ışınlarının üretimi yüksek atom numaralı bir hedefin(örneğin tungsten ya da molibdenyum) yüksek hızlı elektronlar tarafından bombardıman edilmesiyle üretilebilecek basit bir süreçtir.(Şekil 2.2) Bu süreç x-ışınlarının iki tip üretimiyle sonuçlanır: Bremsstrahlung ve karakteristik x-ışınları.



Şekil 2.2 X-ışın tüpü şematik gösterimi

2.2.2.1.1 Bremsstrahlung Radyasyonu

X-ışınlarının bu oluşumunda, yüksek enerjili elektronlar hedef madde içinde hızlıca yavaşlatılır ve buradan Bremsstrahlung radyasyonu yayınlanır(Şekil 2.3). Yayınlanan X-ışın fotonları sürekli spektruma sahiptir(Şekil 2.4) çünkü bu süreçte kuantumlu enerji yer almaz. Bremsstrahlung radyasyonu genellikle cisimlerin(örneğin medikal diagnostikte vücut içi organların ve diğer) görüntülerini elde etmek için kullanılan x-ışınıdır.

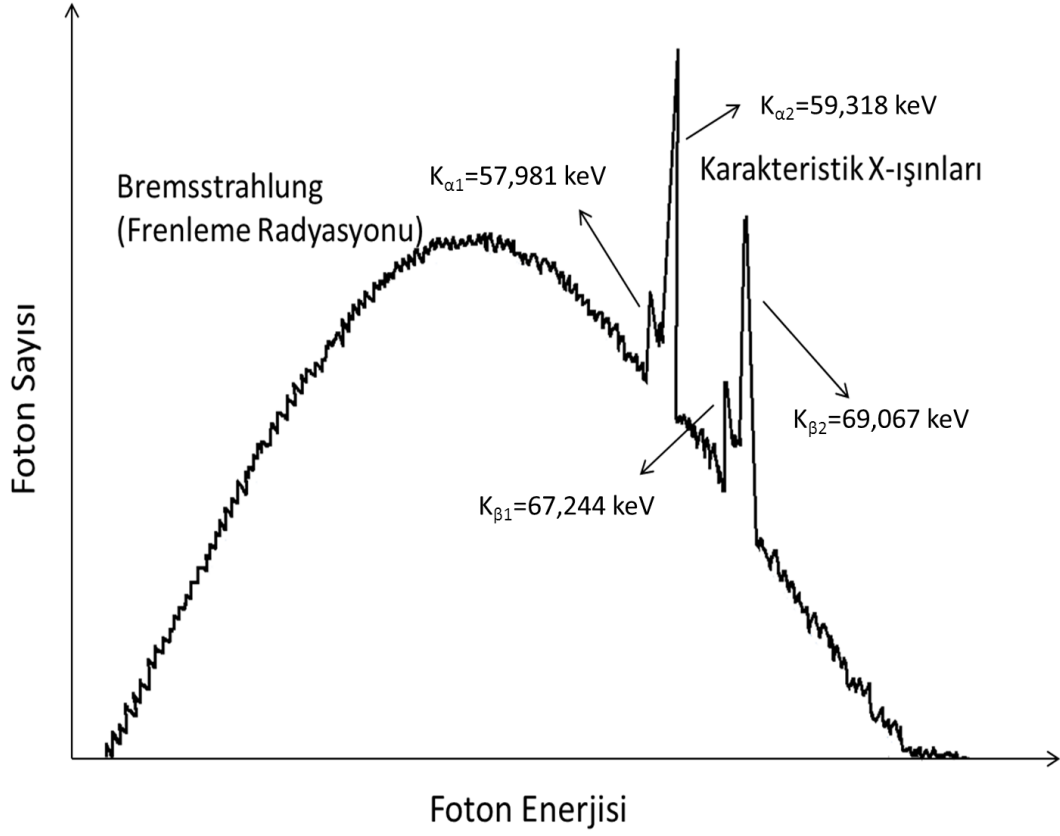


Şekil 2.3 Karakteristik X-ışını ve Bremsstrahlung radyasyonunun fiziksel oluşum süreci

Şekil 2.3’de görüldüğü gibi 2 konumunda çekirdeğe merkezi olarak gelen yüklü parçacık hemen tüm enerjisini; ”Bremsstrahlung” olarak aktarır. 3 konumunda, çekirdeğe yakın ancak dış yörüngede gelen yüklü parçacık bağlı bir elektronu yerinden sökerken, K_{β} karakteristik X-ışını çıkar. Halbuki 1 konumunda gelen yüklü parçacık atomun K- yörüngesinden elektron sökerek karakteristik K_{α} ışınlarının yayınlanmasına yol açar. Böylelikle sonuçta yüklü parçacıkların yüksek atom numarasına (z) sahip hedef atomlara çarptırılmasıyla hem karakteristik x-ışınlarının (K_{α} , K_{β} ,...) hem de sürekli bir Bremsstrahlung spektrumuna sahip, E_{max} ’dan sıfıra kadar değişen polienerjetik bir spektrum x-ışın tüp çıkışıından elde edilir.

2.2.2.1.2 Karakteristik X-Işınları

Yeterli enerjiye sahip elektronlar hedef atoma çarptığında, hedef atomun iç atomik yörüngelerinden elektron koparılır ve hedef atomu kararsız hale getirirler. Atomun kararlı haline geri dönmesi için; üst enerji seviyelerindeki elektronlar, yörüngelerinden kopan elektronların boşluklarını hızlıca doldururlar. Bu elektronların enerjileri yeni yörüngede kalmak için gereken enerjiden daha fazladır, bu fazla enerji buradan x-ışın fotonları olarak yayınlanır(Şekil 2.3). Atomik enerji seviyeleri arasındaki enerji farkı, her atoma özgü karakteristik olarak farklı olduğundan, yayınlanan x-ışınları kuantumları da karakteristik enerjilere sahip olurlar(Şekil 2.4). Karakteristik x-ışınlarının enerjisi, hedefe çarptırılan elektron demetinin enerjisine ya da gelen elektron demet şiddetine bağlı değildir çünkü yayınlanan fotonlar daima atomik enerji seviyelerinin farkına karşılık gelen farklı kuantize enerji miktarlarına sahiptirler. Farklı elementler farklı atomik enerji seviyelerine sahip olduğu için, karakteristik x-ışın fotonlarının yayınlanan enerjisi uygun bir şekilde kesin olarak tahmin edilebilir.



Şekil 2.4 Bremsstrahlung radyasyonunun sürekliliğini ve karakteristik X-ışınlarının piklerini gösteren Tungsten(W) elementinin X-ışın tüpü spektrumu örneği

Bu çalışmada, kullanılan x-ışın tüpünde Tungsten(W) hedef kullanıldığından sürekli x-ışını spektrumu üzerine binmiş pikler olarak Şekil 2.4’de görünen karakteristik ışınlar sırasıyla $WK_{\alpha 1}=57,981 \text{ keV}(\%27,4)$, $WK_{\alpha 2}=59,318 \text{ keV}(\%47)$ ve $WK_{\beta 1}=67,244 \text{ keV}(\%10,3)$, $WK_{\beta 2}=69,067 \text{ keV}(\%3,58)$ enerjilerde belirtilen şiddetlerde gözlenir(Firestone ve Shirley 1996). Daha önce açıklandığı gibi K_{α} karakteristik x-ışınlarının foton yayınlama şiddetleri, K_{β} ’lere göre daha yüksektir. Bu karakteristik enerjiler, x-ışın demetinin ortalama enerjisini değiştirir. Bu nedenle, özellikle hasta uygulamalarında uygun filtreler yardımıyla, demetin giriciliği diğer bir ifadeyle ortalama enerjisi değiştirilebilir. Bu durumda spektrum üzerindeki karakteristik x-ışınlarının konumları aynı kalmak üzere, spektrum sağa(sertleşme) veya sola(yumuşama) işlemi bu filtreler(*Al, Cu, Sn, Pb...*) yardımıyla başarılıdır. X-ışın tüpü spektrumu genel olarak bir karakteristik x-ışın pikinden daha fazla sayıda karakteristik x-ışınlarına sahiptir. Çünkü atomun iç elektronik tabakalarda oluşan boşlukları takip

eden birçok elektronik geçişler vardır. Örneğin elektron en iç K tabakasından koparılmışsa, boşluk temel olarak dış tabakalardaki elektronların herhangi biri tarafından doldurulur. Ancak elektron bu boşluğu doldurmak için L tabakasından gelirse, bir foton $E_\gamma = E_L - E_K$ kadarlık bir enerji ile yayınlanır. En çok sayıda yayınlandığı fotonlar spektrumda baskın bir pik olarak gözlenir. K_β piki M tabakasının elektronlarının K tabakasına geçişiyle yayınlanan $E_\gamma = E_M - E_K$ enerjili fotonun sonucudur.

X-ışını tüpündeki hedefle(anot) elektronların çıkış yeri(katot) mesafesi çok kısa(genellikle 1-3 cm) tutulur. Katot ve anot arasında uygulanan yüksek elektriksel potansiyel, yüksek hızlara ulaşması için elektronları hızlandırır. Bu elektronlar tarafından maksimum kinetik enerji(keV), iki elektrotun arasında uygulanan elektrik potansiyeline(Volt) eşittir. Örneğin bir x-ışın tüpü 30 kV'luk bir potansiyelde çalışıyorsa, elektronların kinetik enerjisi 30 keV'a kadar çıkabilir.

2.3 Kolimatör

Işınlanan radyasyon alanının şeklini ve boyutunu belirleyen kurşun gibi x-ışını durdurucu malzemelerden yapılan alettir. Kolimatör, x-ışın demetinin cisim veya hedef organ üzerine istenilen katı açıda bir demet şeklinde düşürülmesinde bir diyafram görevi yapar. Her x-ışın sisteminde x-ışın demet açıklığını ayarlamak için önceden belirlenen görünür ışık alanıyla/fosforla belirlenen hedef yüzeyine düşürülecek demet kurşun gibi kolimatörler kullanılarak ayarlanır.

2.4 Foton Demetlerinin Karakterize Edilmesi için Fiziksel Tanımlar

Bu tezde radyolojide 40-300 keV enerji aralığındaki foton demet kalitelerinin karakterize edilmesinin yanısıra, dedektör kalibrasyonunda s-Cs(0,662 MeV) foton kaynağı demet kalitesinin(monoenerjetik) elde edilmelerine yönelik yöntem açıklanacaktır.

2.4.1 Demet Kalitesi

Filtrelenmiş X-ışın radyasyonunun kalitesi, aşağıdaki parametreler ile tanımlanır;

- Spektrumun ortalama enerjisi, \bar{E} , (genelde *keV* olarak ifade edilir)
- Spektral ayırma gücü, R_E , ($\% R_E=100 \cdot \Delta E/E$)
- *HVL* (genelde mm Al veya mm Cu tabaka kalınlığı olarak ifade edilir),
- Homojenlik katsayısı, ($\%h$)

Uygulamada, elde edilen radyasyonun kalitesi esas olarak;

- X-ışın tüpüne uygulanan yüksek gerilime,
- Doğal(inherent) filtrasyonun kalınlığına ve eklenen ilave filtrelerin cinsine ve kalınlığına,
- Hedef(anot) malzemenin özelliklerine, bağlıdır(Anonymous 1996).

2.4.2 Birinci Yarı Değer Kalınlığı, *1.HVL*

Hava kerma ya da hava kerma hızını, herhangi bir soğurucu materyal kullanmadan ölçülen değerinin yarısına azaltan belirli bir malzeme kalınlığıdır. Düşük enerjili x-ışınları için “*mm Al*” ve orta enerjili x-ışınları için “*mm Cu*” cinsinden verilir(Ma vd. 2001).

2.4.3 İkinci Yarı Değer Kalınlığı, *2.HVL*

Hava kerma ya da hava kerma hızı değerini, herhangi bir soğurucu malzeme kullanılmadan ölçülen değer dördte birine azaltan belirli malzeme kalınlığıyla(*QVL*), başlangıçtaki hava kerma ya da hava kerma hızı değerini yarıya düşüren soğurucu kalınlığının(*1.HVL*) farkıdır(Anonymous 2005).

$$2.HVL=d_{1/4}-d_{1/2} \quad (2.17)$$

2.4.4 Homojenlik Katsayısı, h

Birinci yarı değer kalınlığının ikinci yarı değer kalınlığına oranıdır ve birimsizdir(Ma vd. 2001).

NIST demet kalitelerinde homojenlik katsayısı $\% h$ olarak ifade edilir.

$$\%h = \frac{1.HVL}{2.HVL} \times 100 \quad (2.18)$$

2.4.5 Dörtte Bir(Çeyrek) Yarı Değer Kalınlığı, QVL

Hava kerma ya da hava kerma hızını, herhangi bir malzeme kullanmadan ölçülen değerinin dörtte birine düşüren belirli malzeme kalınlığıdır(Anonymous 2001).

2.4.6 Ortalama(Etkin) Foton Enerjisi, \bar{E}

Etkin enerji, spektrumdaki fotonların enerjilerinin ağırlıklı ortalamasıdır. \bar{E} 'nin birimi keV'dir. Aşağıda belirtildiği şekilde foton akısı ve enerjisine uygun olarak hesaplanır.

$$\bar{E} = \frac{\int_0^{E_{max}} \Phi_E E dE}{\int_0^{E_{max}} \Phi_E dE} \quad (2.19)$$

Burada Φ_E (foton sayısı/mm²keV), E ile $E+dE$ arasındaki enerjilerde, E (keV) enerjili birincil fotonlarının $\Phi(E)$ (foton sayısı/mm²) akısının türevidir ve

$$\Phi_E = \frac{d\Phi(E)}{dE}$$

olarak tarif edilir. Bu tarif, “ortalama enerji”yi ifade eder(Anonymous 1996).

2.4.7 Spektral Ayırma Gücü, R_E

Spektral ayırma gücü bir x-ışın spektrumu için aşağıdaki gibi yüzde olarak ifade edilir.

$$R_E = \frac{\Delta E}{E} \times 100 \quad (2.20)$$

Burada ΔE artışı, spektrumun yarı maksimum ordinata karşılık gelen genişliğidir.

Spektrumda fluoresans radyasyonunun mevcut olduğu durumda, ölçülmüş spektrum genişliği, sadece sürekliliğe dayanır. Bu tarif, ayırma gücünü ifade eder(Anonymous 1996).

2.4.8 Doğal Filtrasyon

X-ışını tüpünün kendi yapısından kaynaklanan filtrelemesidir(Anonymous 1996).

2.4.9 Radyasyon Şiddetini Zayıflatıcı Materyal

Dedektöre ulaşan x- ya da gama ışın demetinin önüne yerleştirilmiş ve foton demet şiddetinin azalmasını sağlayan(attenuator) soğurucu materyaldir. Genellikle atom numarası yüksek *Fe*, *Pb* gibi elementlerden yapılır.

2.4.10 Saçılan Radyasyon

Herhangi bir malzemenin içinden geçerken etkileşim sonucunda yönü ve enerjisi değişen radyasyondur(Anonymous 1968).

2.5 Radyasyon Ölçüm Cihazlarının Kalibrasyonu

Bu bölümde cihaz kalibrasyonu için IAEA Safety Report Series No:16 ve ISO 4037-3 standartlarında yer alan yöntemler kullanılmıştır.

2.5.1 Referans Ölçüm Cihazları

Referans cihazlar, uygun standartlara uyan doğruluğu kabul edilmiş referans laboratuvarında(örneğin PTB, NIST) ya da ulusal birincil sınıf laboratuvar tarafından birincil standartlar kullanılarak kalibre edilmiş “ikincil standartlar” olmalıdır. Alternatif olarak, ikincil standartlar ulusal standartlar değilse, bu ikincil standartlar Paris’teki BIMP tarafından kalibre edilmiş olabilir.

Ancak referans cihaz, ikincil standartlar olmadığı durumda; bu ikincil standartlara göre kalibre eden üçüncül standartlar ya da diğer ikincil standartlara göre kalibre edilmiş olmalıdır(Anonymous 2000).

2.5.2 Referans Standart Kaynak

Referans standart bir kaynak, uygun standartlara uyan doğruluğu kabul edilmiş referans laboratuvarlarda ya da ulusal birincil sınıf laboratuvar tarafından birincil standartlar kullanılarak kalibre edilmiş “*ikincil standart bir kaynak*” olmalıdır. Alternatif olarak, ikincil standart kaynak, eğer ulusal bir standart kaynak değilse, bu ikincil standart kaynak BIMP tarafından kalibre edilmiş olabilir. Ancak referans kaynak, ikincil standartlar olmadığı durumda; bu ikincil standartlara göre kalibre edilen üçüncül standartlar ya da diğer ikincil standartlara göre kalibre edilmiş olmalıdır(Anonymous 2000).

Referans kaynak, gama foton dozu/doz hızı ölçer cihazların kalibrasyonu için kullanılan kalibrasyon sisteminin(ışınlayıcı kaynak, radyometrik benç, güvenlik kilitleyiciler(interlocks), yazılım, uzaktan kumandalı sistem, elektrometreler, monitör, filtreler, hizalayıcılar vb.) temel bileşenidir. Foton radyasyonu için referans kaynak olarak $s^{-137}\text{Cs}$ (0,662 MeV) ve $s^{-60}\text{Co}$ (ort. 1,25 MeV) kullanılır. Bu kaynaklar, kurulacak konfigürasyona göre kolimasyonsuz kaynak veya panoramik kaynak olarak kullanılabilir (www.uf.eu 2015). Beta radyasyonu kalibrasyon sisteminde ISO 6980’e uygun $\text{H}_p(0,07)$ dedektör kalibrasyonu için üç farklı saf beta yayınlı referans kaynak (^{147}Pm , ^{85}Kr veya $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Yr}$) kullanılır. Nötron kalibrasyon sisteminde ise ISO 8529 standardının tavsiyesine uygun $15\text{m} \times 15\text{m} \times 15\text{m}$ bir ışınlama odasında, nötron

saçılmasını azaltacak şekilde mühendislik tekniğine uygun zırhlanmış $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ veya ^{252}Cf referans kaynak olarak kullanılır.

Bu çalışmada Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'nde 2009 yılında kurulumu gerçekleştirilen Hopewell Designs, Inc., G10 Gamma Beam Irradiator, referans tarihi: 14.05.2009 itibariyle 47 mCi ve 8,58 Ci aktiviteli iki adet ^{137}Cs referans kaynak ışınlayıcı olarak kullanılmıştır.

2.5.3 Birincil Standart

Belirli bir alandaki en yüksek ölçüm bilgisi niteliklerine sahip standarttır. Birincil standartlar metrolojinin amaçları için araştırma gerçekleştirmek ve birincil standartları laboratuvarların kabul görmüş uluslararası karşılaştırma çalışmalarına katılmak, koordine etmek için ulusal laboratuvarlarda(örneğin BIMP) sürdürülür(Anonymous 2000).

2.5.4 İkincil Standart

Standart değeri, bir birincil standart ile doğrudan karşılaştırma ile belirlenip ve bunun izlenebilirliğini belgeleyen bir sertifikanın eşlik ettiği standarttır. İkincil standartlar, söz konusu ülkede ilgili büyüklüğün diğer bütün standartlarını resmi ulusal bir kararla temel değerleri sabitlemek için amaçlayan IAEA SSDL tarafından sürdürülür(Örneğin, Almanya'nın akredite birincil standart PTB Kuruluşu tarafından izlenebilirliği belgelendirilen ikincil standart PTW SSDL)(Anonymous 2000).

2.5.5 Üçüncül Standart

Değeri bir ikincil standart ile karşılaştırmalar yapılarak belirlenmiş olan standarttır(Anonymous 2000).

2.5.6 Ulusal Standart

Bir ülkede verilen nicelikleri tüm diğer standartların resmi ulusal karar tarafından onaylanarak temel değerlere sabitlenmesidir. Genel olarak bir ülke için ulusal standart aynı zamanda birincil standarttır(Anonymous 2000).

2.5.7 Ölçüm Cihazları

Tek başına ya da başka donanımlarla birleştirilerek ölçüm yapmak için tasarlanan cihazlardır. Ölçüm cihazları dozimetreler, doz hız ya da doz eşdeğeri hızı ölçerler ve monitörler, yüzey kontaminasyon ölçerleri ve monitörleri vb.dir(Anonymous 2000).

2.5.8 Radyasyon Ölçüm Cihazlarının Kalibrasyonu

Radyasyon ölçümü yapmak üzere tasarlanmış cihazın kalibrasyonu, kontrol altındaki, standart koşullarda, kalibre edilen cihazın gösterdiği değer, doğruluğu kesin olan referans bir cihazın ölçtüğü değerin bir fonksiyonu olarak ifade edilmesidir(Anonymous 2000).

Temel olarak radyasyon ölçüm cihazlarının kalibrasyonu:

- Cihazın doğru bir şekilde çalıştığını ve dolayısıyla izleme amacını sağlamak için uygun olacağına emin olmak,
- Kontrol altındaki standart koşullar altında, ölçüm aletinin ölçülen okuma değerinin(ölçülmesi istenilen miktar) bir fonksiyonu olarak elde etmek,
(Bu işlem, aletin gösterge değerinin aralığında yapılmalıdır.)
- Cihazın kalibrasyonunu ayarlamak, cihazın genel ölçüm doğruluğunun optimize edilmesi için yapılmaktadır.

2.5.9 Kalibrasyon Faktörü, N

Ölçüm için tasarımılanmış(ölçülmüş, referans) cihazın kalibrasyon faktörü, N_K , cihaz tarafından gösterilen bir niceliğin, H , değeri(örneğin K -hava kerma değeri) ve M ise sıcaklık, basınç, elektrometre vb. faktörler için düzeltilmiş (eğer gerekliyse) okuma değerine bölünmesiyle elde edilen ve üzerinde uzlaşılan (conventional true value) doğru değer olarak tanımlanır.

$$N_K = \frac{H}{M} \quad (2.21)$$

Kalibrasyon faktörü, normal olarak sadece bir referans radyasyon için sınırlanmış ve bir cihazın ölçüm aralığının tamamına uygulanabilir yegane bir faktör olmayabilir, yani ölçülecek niceliğin büyüklüğü ile değişebilir, bu durumda cihazın doğrusal olmayan (non-linear) bir tepkiye sahip olduğu görülebilir. Kalibrasyon faktörü N_K , ölçümlerde gösterilen değerlerle benzer birimlerde olduğu zaman boyutsuzdur.

Kalibrasyon faktörünün tersi, referans koşullar altındaki cihazın tepkisine(yanıtına) eşittir. Kalibrasyon faktörü sadece referans koşullarla ilgilidir. Buna karşılık olan tepki(response) ise ölçüm esnasında hakim olan koşullara uygulanabilir olmalıdır.

Kalibrasyon faktörü, sistem geometrisi, radyasyon kalitesi, iyon odasının elektrotlarına uygulanan gerilim ve ortam koşullarının birbiriyle ilişkisinin bilgisini birlikte veren laboratuvar standartlarıyla hesaplanır(Dellow 2008).

2.5.10 Cihaz Tepkisi, R

Ölçüm yapan cihazın tepkisi(R), cihazın M okumasının, ölçülen niceliğin konvansiyonel (uzlaşılan) gerçek değerine oranıdır. Cihaz tepkisinin tipi belirlenmelidir. Örneğin ölçülecek nicelik olarak 'akı tepkisi(Φ)':

$$R_\Phi = M / \Phi \quad (2.22)$$

Ölçülecek nicelik, radyasyon ölçüm cihazının ‘eşdeğer doz tepkisi’ şeklinde okunuyorsa:

$$R_H = M / H \quad (2.23)$$

dir.

Tepkinin değeri, R (eşdeğer doz ya da akı niceliği bakımından), genellikle gelen radyasyonun yön ve enerji dağılımı ile değişebilir. Bu yüzden cihaz tepkisi, gelen tek enerjili radyasyonun E enerjisinin ve gelen tek yönlü radyasyonun Ω yönünün fonksiyonu olarak $R(E, \Omega)$ ifade edilir.

$R(E, \Omega)$ tepkisinde, $R(E)$ ve $R(\Omega)$ sırasıyla, tepkinin “enerjiye bağlılığını” ve “açıya bağlılığını” tanımlar. $R(\Omega)$ için Ω , genellikle cihazın referans yönüyle tek yönlü dış alanın eksenindeki α açısıyla ifade edilebilir. Örneğin, bir dozimetrenin $\alpha=0^\circ, \pm 60^\circ$ ve $\pm 120^\circ$ açılarında tepkisi belirli bir demet kalitesinde (E) farklı olur.

Doz ölçer cihazın, üzerine gelen değişik enerjilerdeki ve açılardaki bir radyasyon kombinasyonu oluşturan alan tarafından ışınlanırsa, çok elemanlı bazı dedektörlerin bazı değerlendirme algoritmalarını ilâve edilmesi gerekebilir. Örneğin, H_1 ve H_2 doz eşdeğerlerine bunun gibi iki katkı varsa, karşılık gelen iki okumanın toplamı, yalnız başına H_1+H_2 ışınlamasının sebep olduğu okumadan farklı olabilir, yani $M_{H_1} + M_{H_2} \neq M_{H_1+H_2}$. Böyle durumlarda daha önce açıklandığı gibi $R(E, \Omega)$ fonksiyonu, bütün radyasyon alanlarındaki doz ölçerin özelliklerini belirtmek için yeterli değildir.

2.5.11 Doz Dönüşüm Katsayısı

Foton radyasyonu için hava kermayı doz eşdeğerine dönüştürme katsayısı ve nötron radyasyonu için ise termal, epitermal ve hızlı nötron akı değerlerini ayrı ayrı doz eşdeğerine dönüştürme katsayısı olarak uygulanır. Bu durumda en az iki tip dönüşüm katsayısı yaygın olarak kullanılmaktadır:

- a) Kermayı doz eşdeğerine dönüştürme katsayısı(h_k); doz eşdeğerinin(H), radyasyon alanındaki bir noktadaki hava kermaya(K_a) oranıdır:

$$h_k = H/K_a \quad (2.24)$$

- b) Nötron akısını doz eşdeğerine dönüştürme katsayısı(h_ϕ); doz eşdeğerinin(H), radyasyon alanındaki bir noktadaki akıya(ϕ) oranıdır:

$$h_\phi = H/\phi \quad (2.25)$$

Bu dönüşüm katsayılarının herhangi bir durumu, örneğin, ortam, yön veya kişisel doz eşdeğeri gibi doz eşdeğeri tipi ifadesini gerektirir. Doz dönüşüm katsayısı, gelen radyasyonun enerjisine, tipine ve yönüne ($H_p(10)$, $H_p(0,07)$ ve $H'(0,07)$ için) bağlıdır. Bu yüzden dönüşüm katsayısının, çeşitli geliş açılarında tek enerjili fotonların E enerjisinin fonksiyonunu içermesi uygundur. Bu temel veri takımı sıklıkla dönüşüm fonksiyonu olarak isimlendirilir.

Foton akısından, önce hava kermaya ve ardından doz eşdeğerine dönüştürmek için aşağıdaki eşitlikler kullanılabilir.

Çizelge 2.1 Foton akısından hava kermaya ve sonra doz eşdeğerine dönüşüm(Behrens 2011)

Dönüşüm	Eşitlikler	Semboller ve Veriler
Akı-Hava Kerma	(1) $(K_a)_E = \Phi_E \cdot E \cdot (\mu_{en}/\rho)_{E,hava}$ (2) $K_a = \sum_{i=1}^N (K_a)_{E_i}$	K_a : Hava Kerma $(K_a)_E$: E foton enerjisindeki spektral hava kerma Φ_E : Spektral foton akısı $(\mu_{en}/\rho)_{E,hava}$: Enerji soğurma katsayısı N: Enerji kanallarının sayısı
Hava kerma-Doz eşdeğeri (d derinliğinde)	(1) $(H_p(d))_E = (K_a)_E \cdot (h_{PK}(d))_E$ (2) $H_p(d) = \sum_{i=1}^N (H_p(d))_{E_i}$	$H_p(d)$: Su gibi bir malzemenin d derinliğindeki kişisel doz eşdeğeri. Su fantom içinde d için en az 2 cm derinlik seçilir(Ma vd. 2001) $H_p(d)_E$: d derinliğindeki spektral kişisel doz eşdeğeri $h_{PK}(d)_E$: d derinliğinde hava kermadan doz eşdeğerine dönüşüm katsayısı

2.5.12 Ölçüm Cihazı için Referans Noktası

Ölçüm cihazı için referans noktası, deney(test) noktasındaki cihazın konumlanması için kullanılan noktadır(Anonymous 2000).

2.5.13 Referans Şartlar

Herhangi bir düzeltme yapmaksızın kalibrasyon faktörünün geçerli olduğu nicelikler grubunu temsil eden şartlardır. Ölçülecek niceliğin değeri, kalibre edilecek cihazın özellikleriyle uyumlu olarak serbestçe seçilebilir(Anonymous 1996). Bir doz ölçerin kalibrasyonunda referans şartlar ve standart deney şartları Çizelge 2.2'deki gibi belirlenebilir.

Çizelge 2.2 Referans Şartlar(Anonymous 2012)

Ölçülen Nicelik, Etkiyen Nicelik	Referans Şartlar	Standart Deney Şartları
Referans doz eşdeğeri, H(uzlaşılabilir gerçek değer) H _p (10) ve H*(10) için	3 mSv	1 mSv-10 mSv
Foton radyasyonu enerjisi H _p (10) ve H*(10) için	s-Cs(0,662 MeV) ISO 4037'e uygun referans kaynak	s-Cs(0,662 MeV) ISO 4037'e uygun referans kaynak
Radyasyon geliş açısı	Cihaz imalatçısı tarafından verilen yön (örneğin $\alpha=0^\circ, 60^\circ, \dots$)	Referans yön $\pm 2^\circ$
Ortam sıcaklığı, T	20° C	15° C - 25° C
Bağıl nem, RH(%)	% 65	% 50 - % 75
Atmosferik basınç, P	101,33 kPa	86,0 kPa - 106,6 kPa
Güç kaynağı gerilimi	Anma güç kaynağı gerilimi(220 V veya 110 V)	Anma güç kaynağı gerilimi $\pm \% 1$
Alternatif akım frekansı	Anma frekansı(50 Hz, 60 Hz)	Anma frekansı $\pm \% 1$
Alternatif akım dalga biçimi	Sinüsoidal	Toplam harmonik bozulma% 5'den az olan sinüsoidal
Dış kaynak elektromanyetik(e.m) alan	İhmal edilebilir	Girişime neden olan en küçük değerden daha az

Çizelge 2.2 “Referans Şartlar(Anonymous 2012)”devamı

Ölçülen Nicelik, Etkiyen Nicelik	Referans Şartlar	Standart Deney Şartları
Dış kaynak elektromanyetik(e.m) indüksiyon	İhmal edilebilir	Yerin manyetik alanı nedeniyle meydana gelen indüksiyon
Doğal foton radyasyonu	Ortam doz eşdeğer hızı olarak < 0,1 µSv/h (uygulanabilirse)	Ortam doz eşdeğer hızı olarak < 0,25 µSv/h

2.5.14 Standart Deney Şartları

Kalibrasyon veya tepki tayininin yapılmasını etkileyen niceliklerin bir grubunun değerler aralığını temsil eden şartlardır. İdeal olarak, kalibrasyonlar referans şartlar altında yapılmalıdır. Ancak bu her zaman yapılamadığı (örneğin, ortam hava basıncı) veya elverişli olmadığında (örneğin, ortam sıcaklığı ve bağıl nem), referans değerleri civarındaki (küçük) bir aralık kullanılabilir. Referans şartlar altındaki kalibrasyon faktörünün değerinden sapmalar düzeltilmelidir(Anonymous 1996). Bir cihazın kalibrasyonunda standart deney şartları örnek olarak çizelge 2.2’ de verilmiştir.

2.5.15 Kalibrasyon Şartları

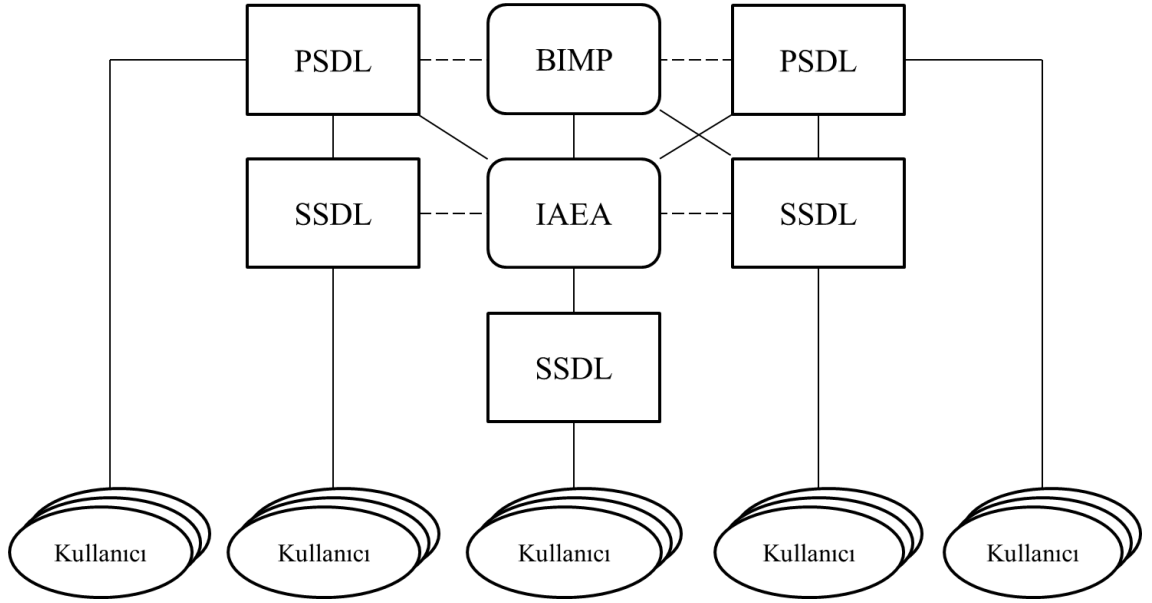
Kalibrasyon sürecinde, standart deney şartları aralığında hakim olan durumlardır ve bu şartlar, referans yön ve referans yönelime uygun bir kalibrasyon yapılabilirliğini gösterir(Anonymous 1996).

2.6 Standart Laboratuvarların Sınıflandırılması

Radyasyondan korunma ve radyasyon izlemesi için kullanılan cihazlara kalibrasyonu için uluslararası izlenebilirliği olan laboratuvarların kurulmuş olması gerekmektedir. Bu izlenebilirlik, aynı zamanda doğrudan radyasyon doz ölçüm hizmeti sunan laboratuvarların akreditasyonu için de bir zorunluluktur. Bunun için PSDL ve SSDL ölçümlerine dayalı bir dozimetre hizmeti sunmak yasal bir zorunluluktur. Ülkemizde bu yönetmelik ve yönergeleri yetkili kurum olarak TAEK uygulamakta ve izlemektedir.

2.6.1 Uluslararası Ölçüm Sistemi(IMS)

IMS, kullanıcılara kalibrasyonlu radyasyon cihazlarının dağıtılmasıyla, radyasyon dozimetresindeki tutarlılık için bir mekanizma sağlar ve bu cihazlar birincil standart laboratuvarında izlenebilirler. Uluslararası ölçüm sistemi, BIMP, PSDL, SSDL ve pek çok kullanıcı ölçümlerinden oluşmaktadır(Anonymous 2007).



Şekil 2.5 Uluslararası ölçüm sisteminin(IMS) şematik gösterimi(Anonymous 2007)

2.6.2 Birincil Dereceden Standart Dozimetre Laboratuvarı(PSDL)

Radyasyon dozimetresindeki birincil standartların geliştirilmesi, yükseltilmesi ve korunması amacıyla kurulan ulusal standart laboratuvarlardır(Anonymous 2007).

2.6.3 İkincil Dereceden Standart Dozimetre Laboratuvarı (SSDL)

Kalibrasyon servisi sağlamak için yetkili kurumlar tarafından atanmış, birincil standarda göre kalibre edilmiş en az bir tane ikincil standartlara uygun donanımı olan dozimetre laboratuvarıdır. Türkiye’de bu TAEK-SANAEM’in SSDL olma projesi devam etmektedir ve yakın gelecekte bu hizmetin Türkiye’de SSDL seviyesinde sunulacağı beklenmektedir. SSDL Laboratuvar eğitimi düzeyinde, sadece foton radyasyonu için Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü s-Cs(0,662 MeV) referans kaynakla kalibrasyon ve ışınlama hizmeti sunulmaktadır.

Radyasyon dozimetresiyle ilgili dünyada sadece yirmi ülkede PSDL’ler bulunmaktadır ve bu kuruluşlar tüm dünyadaki kullanımda olan çok büyük sayıdaki radyasyon dozimetrelerini kalibre edememektedir. SSDL’nin ana rolü ise PSDL ile iyonize radyasyon kullanıcıları arasında var olan boşlukta, kalibrasyonların PSDL’den kullanıcı cihazına transferini gerçekleştirilmesiyle bir köprü oluşturmaktır. SSDL’ler cihazın kullanımına uygun radyasyon kalitelerinde kalibrasyonları gerçekleştirir ve kalibrasyon belirsizliğine ilişkin açıklamalarda bulunur. Birçok ülkede SSDL’ler iyonize radyasyon uygulamaları yapan hastanelerdeki ve diğer kuruluşlardaki kullanıcılara dozimetrede uzman hizmet sağlamaktadırlar. Bazı ülkelerde SSDL’nin rolü akredite olmuş ikincil kalibrasyon laboratuvarlarınca gerçekleştirilir. Bunun için herhangi bir PSDL’de kalibre edilmiş ikincil standarda sahip olmalı, karşılaştırmalara katılmalı ve bu akreditasyon için ulusal metroloji kuruluşunda akredite olmalıdır(Anonymous2007).

2.7 Doz Hızı Ölçerler ve Dozimetreler için Kullanılan Nicelikler ve Fantomlar

1991 yılında ICRP bireyler radyasyondan korunma amacıyla birincil limit değerlerinin şartnamesinin de dahil olduğu yeniden düzenlenmiş bir doz limit sistemi tavsiye etmiştir. IAEA ICRP’nin tavsiyelerini kendi temel güvenlik standartlarında birleştirmiştir. Doz limit sistemi çeşitli organ ve dokulardaki eşdeğer doz(H_t), ve bazı doku ve organlardaki bireysel ve ağırlıklı eşdeğer doz miktarına, - etkin doz(E), dayanır. Bu koruma nicelikleri aslında hesaba dayalıdır ve ölçülebilir değerler

değildirler. Bunların çalışma şartlarındaki ölçülen değerler vasıtasıyla hesaplanması gerekir. Bunlar “*receptor present conditions*” olarak tanımlanır. Burada reseptör; alan ölçümleri için ICRU küresi, kişisel ölçümler için ise insan vücududur. Radyasyon ölçümlerinde radyasyonun alanda ya da kişilerde ölçülmesine yönelik iki tane kullanım niceliği ya da büyüklüğü (operational quantities) vardır.

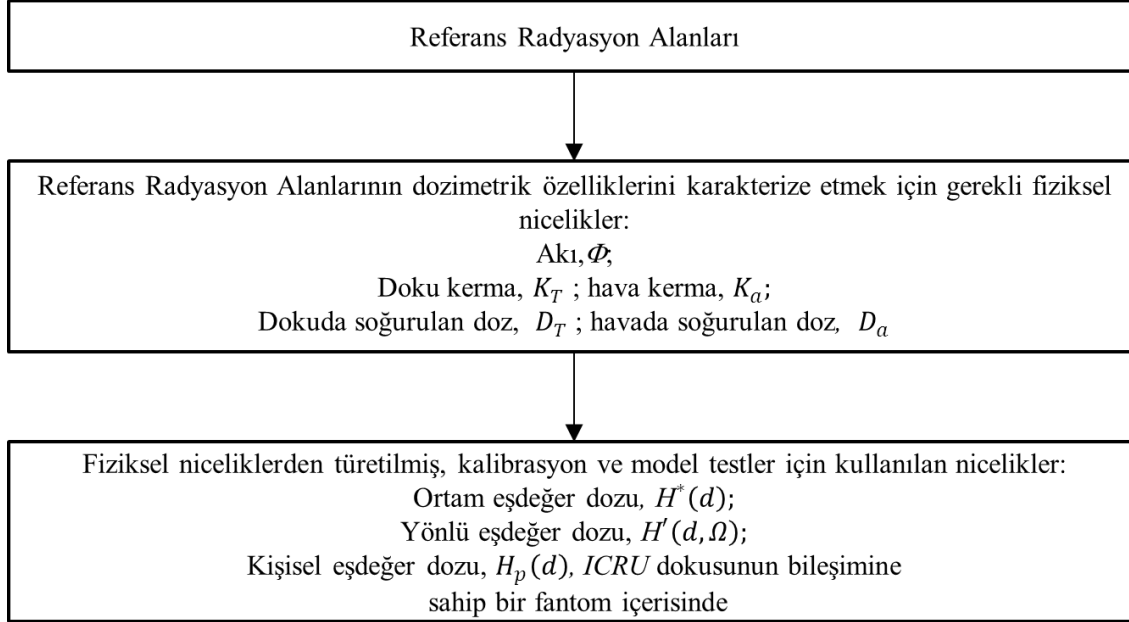
Hangi doz eşdeğerinin limit değerine yakın olduğuna göre radyasyon “*düşük giricilikte*” ya da “*yüksek giricilikte*” olarak karakterize edilebilir. Düşük giricilikteki radyasyon için gözdeki lens ya da ciltteki eşdeğer doz uygundur. Yüksek giricilikteki radyasyon ise etkin dozun saptanması için uygundur.

Çizelge 2.3 Alan ve kişisel ölçümlerde kullanılan operasyonel doz nicelikler(Anonymous 2000)

Radyasyon	Limit Niceliği	Kullanım Niceliği (Operational Quantities)	
		Alan Ölçümleri	Kişisel Ölçümler
Yüksek Giricilikteki Radyasyon için	Etkin Doz	$H^*(10)$	$H_p(10)$
Düşük Giricilikteki Radyasyon için	Cilt Dozu	$H'(0,07,\alpha)$	$H_p(0,07)$
	Gözdeki Lens Dozu	$H'(3,\alpha)$	$H_p(3)$

Şekil 2.6’da referans radyasyon alanları, referans radyasyon alanlarının dozimetrik özelliklerini karakterize eden fiziksel nicelikler ve kalibrasyon ve model testi için kullanılan nicelikler gösterilmektedir. Kalibrasyon laboratuvarında kullanılacak referans radyasyon alanları ISO tarafından tavsiye edilir. Referans radyasyon alanını karakterize eden temel radyasyon nicelikleri referans cihazlar ile ölçülür. Kalibrasyon ve model test ile ilgili nicelikler uygun dönüşüm katsayılarıyla temel radyasyon niceliklerinden türetilir. Kişisel dozimetreler gövde, sütun ya da çubuk fantom içinde

tanımlanan nicelikleri kesin olarak ölçmek için kullanım nicelikleri, $H_p(d)$, iyi bir yaklaşımla gösterge olarak varsayılır(Anonymous 2000).



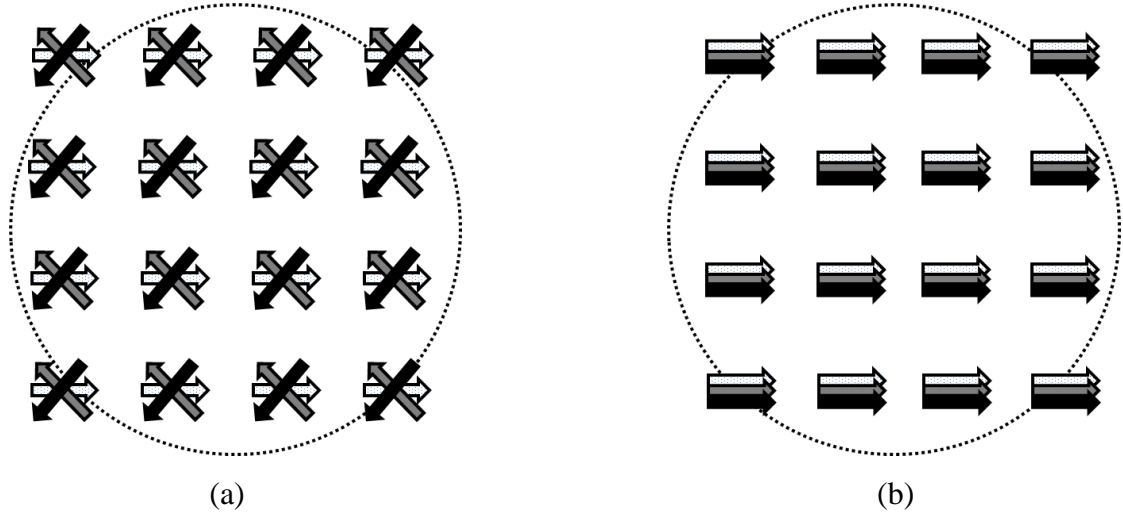
Şekil 2.6 Referans radyasyon alanlarında kullanılan ölçülebilir ve türetilmiş nicelikler(Anonymous 2000)

2.7.1 Alan Ölçümleri

Rutin radyasyondan korunma amacı için, kişilerin potansiyel olarak ışınlanmasını tek bir doz eşdeğeri niceliğinde karakterize etmek gerekir. Bunun için insan vücuduna benzeyen bir fantom bulunmaktadır. Bu fantoma ‘ICRU küresi’ denir. 30 cm çaplı doku eşdeğeri olan bu küre, yoğunluğu 1 g/cm^3 olan ve kütlece bileşimi % 76,2 oksijen, %11,1 karbon, %10,1 hidrojen ve % 2,6 azottan oluşan bir materyalden oluşmaktadır. Bu materyale “ICRU dokusu” denir.

Alan ölçümleri için, gerçek radyasyon alanlarından türetilmiş belirli radyasyon alanlarının kullanılmasının şart koşulması faydalıdır. Radyasyon alanlarını karakterize etmek için “genişletilmiş” ve “hizalanmış” 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 2.7’de şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.7 (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 $H^*(10)$ 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.

2.7.1.1 Ortam Eşdeğer Dozu, $H^*(d)$

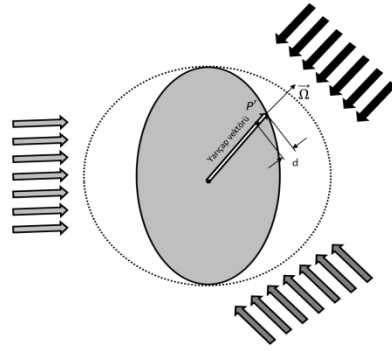
Ortam eşdeğer dozu, ICRU küresindeki $d(mm)$ derinliğinde, hizalanmış radyasyon alanına zıt yöndeki yarıçapta ve karşılık gelen genişletilmiş ve hizalanmış alana eşdeğer bir radyasyon alanından elde edilen bir noktadaki eşdeğer dozdur(Anonymous 1993).

Birimi: $J \cdot kg^{-1}$

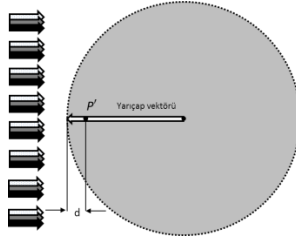
Ortam eşdeğer dozu, $H^*(d)$ biriminin özel adı *Sievert(Sv)* olarak tanımlanır.

Ortam eşdeğer dozu için her durumda bir referans derinliği (d) belirlenir. Gösterim olarak d , *milimetre* olarak tanımlanır.

Yüksek giricilikteki radyasyon için derinlik (d), 10 mm olarak tavsiye edilmektedir. Bu derinlik için çevre eşdeğer dozu $H^*(10)$ olarak ifade edilir. Düşük giricilikteki radyasyon için $0,07\text{ mm}$ 'lik derinlik cilt için, 3 mm 'lik derinlik ise göz için kullanılmaktadır.



(a) Genişletilmiş radyasyon alanı



(b) Genişletilmiş ve hizalanmış radyasyon alanı

Şekil 2.8 (a) Genişletilmiş, (b) genişletilmiş ve hizalanmış radyasyon alanlarındaki eşdeğer doz tanımı

a) Genişletilmiş radyasyon alanında tanımlanan, ICRU küresi içindeki bir P' noktasındaki eşdeğer doz tanımı.

b) Genişletilmiş ve hizalanmış radyasyon alanında tanımlanan ICRU küresi içindeki bir P' noktasındaki eşdeğer doz tanımı.

2.7.1.2 Yönlü Eşdeğer Doz, $H'(d, \Omega)$

Yönlü eşdeğer doz, $H'(d, \Omega)$, ICRU küresindeki $d(mm)$ derinliğinde, spesifik bir yöndeki yarıçapta Ω , genişletilmiş radyasyon alanına denk bir radyasyon alanında, bir noktadaki eşdeğer dozdur.

Birimi: $J \cdot kg^{-1}$

Yönlü eşdeğer doz biriminin özel adı *Sievert (Sv)* olarak tanımlanır.

Yönlü eşdeğer dozu için her durumda bir referans derinlik d ve yön Ω belirlenmelidir. Gösterim olarak d , *milimetre* olarak tanımlanmalıdır.

Düşük giricilikteki radyasyon için $0,07 mm$ 'lik derinlik cilt için ve $3 mm$ 'lik derinlik ise göz için kullanılır. Bu derinliklerdeki yönlü eşdeğer doz sırasıyla $H'(0,07, \Omega)$, $H'(3, \Omega)$ şekillerinde ifade edilir.

2.7.2 Kişisel Ölçümler

2.7.2.1 Kişisel Eşdeğer Doz, $H_p(d)$

Kişisel eşdeğer doz, $H_p(d)$, vücut üzerinde spesifik bir noktada, uygun bir $d(mm)$ derinliğinde ICRU dokusundaki eşdeğer dozdur.

Birimi: $J \cdot kg^{-1}$

Kişisel eşdeğer doz biriminin özel adı *Sievert (Sv)* olarak tanımlanır.

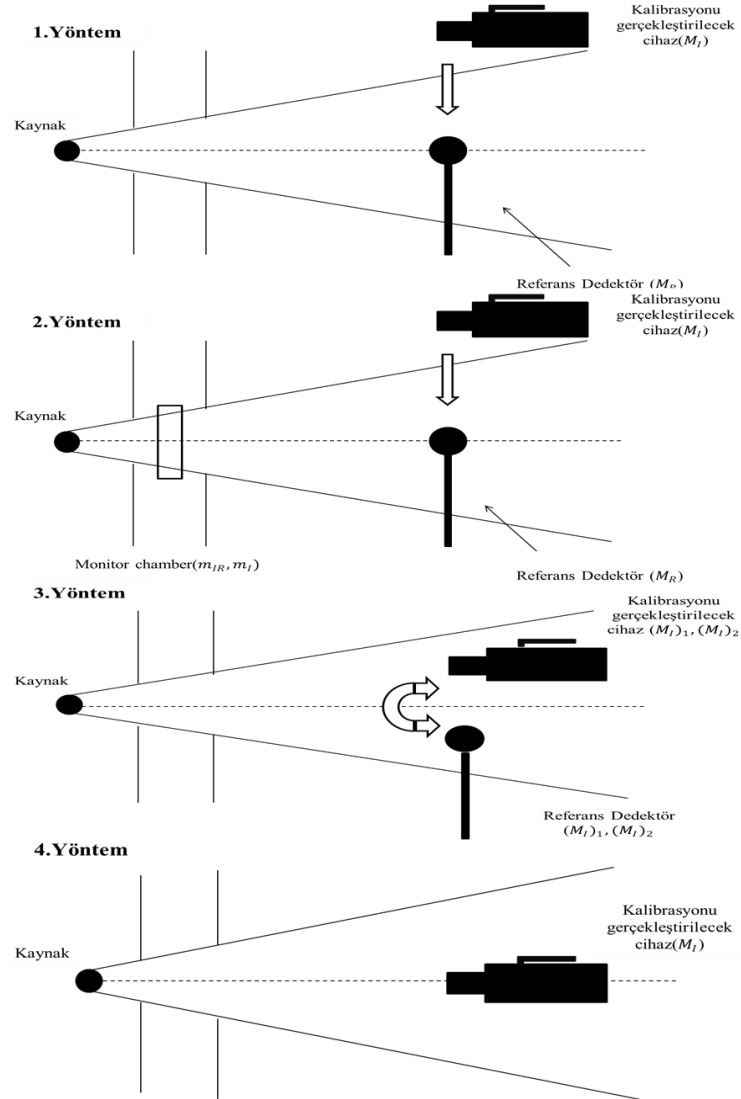
Kişisel eşdeğer dozu için her durumda bir referans derinliği d , belirlenmelidir. Gösterim olarak d , *milimetre* olarak tanımlanmalıdır.

2.8 Kalibrasyon için Gereklilikler

Yeni üretilen cihazlar için tip(model) deneyler ve kabul deneyleri yapılır. Bazı özel durumlarda tip(model) deneye benzer özel kalibrasyonlar yapılır. Bu tez çalışmasında, rutin uygulamalarda kullanılan doz hızı ölçerlere uygulanan “rutin kalibrasyonlar” yapılacaktır. Rutin kalibrasyon daha önce bir *SSDL*'de kalibrasyonu yapılmış doz ölçerin doğrulanması amacıyla yapılır.

2.8.1 Kalibrasyon Faktörünün ve Referans Dedektör Yanıtının Belirlenmesi

Referans cihazlar sıklıkla radyasyon alanında yapılan ölçümlerde farklı nicelikler(örneğin, nötron radyasyonu için akı(ϕ) ya da foton radyasyonu için hava kerma(K_a) vb.) karakterize etmek için kullanılırlar. Eşdeğer doz niceliği ise bu temel radyasyon kalitelerinden uygun dönüşüm katsayıları(h) kullanılarak elde edilir. Diğer bir ifade ile genelde kalibrasyonlarda kullanılan referans cihazlar her zaman doz eşdeğerini göstermezler. Cihaz kalibrasyonunda yaygın olarak 4 farklı yöntem kullanılır.



Şekil 2.9 Kalibrasyonun dört farklı yönteminin uygulanmasının şematik gösterimi(Anonymous 2000).

Yöntem 1: Hiçbir monitör odası(chamber) olmadan referans dedektör ile elde edilen kalibrasyon; yöntem 2: referans bir dedektör ve monitör odası ile elde edilen kalibrasyon; yöntem 3: referans bir dedektör ve kalibre edilen dedektörün eş zamanlı ışınlanması yapılarak kalibrasyonu; yöntem 4: önceden bilinen bir radyasyon alanı ile kalibrasyon.

Bu tezde Şekil 2.10'da şematik gösterimi verilen geometrideki 1. Yöntem uygulanmıştır. 1., 2. ve 3. yöntemlerde kalibrasyon faktörü referans dedektör vasıtasıyla elde edilir. 4. yöntemde ise temel radyasyon nicelikleri ile karakterize edilmiş ve önceden bilinen radyasyon alanları kullanılır. Burada referans dedektöre gerek yoktur. Eğer kalibrasyon sertifikasında kalibrasyon faktörü(N_R) belirtilmiş olan bir referans dedektör kullanılırsa, bu eşdeğer dozun(H) gerçek değerinin elde edilmesinde kullanılır. Bununla birlikte eşdeğer doz için uygun dönüşüm katsayısı(h) ve referans dedektör ile ölçülmüş (referans şartlar için düzeltilmiş) ölçüm değeri (M_R) kullanılır.

$$H = h_K N_R M_R \quad (2.26)$$

İki durum söz konusudur;

1. Referans ölçüm aleti ile kalibrasyonu yapılan ölçüm aleti aynı gösterge değerini gösterdiği durumda kalibrasyon.

$$h_K = 1 \text{ Sv/Gy (dönüşüm katsayısı)}$$

Referans ölçüm aleti ile kalibrasyon yapılan ölçüm aleti farklı gösterge değerini gösterdiği durumda kalibrasyon. Burada uygun dönüşüm katsayısı(h) kullanılmalıdır. Referans ölçüm aletinin kullanımı kalibrasyon sertifikası ve kullanım kılavuzu ile uyum içinde olmalıdır. Örneğin, sıfır ayarı kontrolü, ısınma zamanı ve batarya kontrolü gibi. Referans ölçüm cihazlarının periyodik kalibrasyonları arasındaki zaman aralıkları, ulusal yönetmelikler tarafından belirlenmiş uygun periyotlar içerisinde olmalıdır. Ulusal bir yönetmelik yoksa zaman aralığı iki yılı geçmemelidir.

Referans ölçüm cihazının tekrarlanabilirliğinin sertifikadaki değer $\pm \% 2$ 'lik sınır değerler içerisinde kaldığını göstermek için ölçümler düzenli olarak, radyoaktif kontrol kaynağı ya da kalibre edilmiş radyasyon alanı kullanılarak gerçekleştirilmelidir. Radyoaktif azalım ve gerekliyse referans koşullara göre hava yoğunluğundaki değişim için düzeltmeler yapılmalıdır (Anonymous 2000).

2.8.2 Uygulanan Kalibrasyon Prosedürü

Kaynak çıkışına herhangi bir monitör chamber(radyasyon geçirgen iyon odası) konulmadan sadece referans dedektör ve sonra aynı konumda kalibrasyonu yapılacak cihaz ışınlanarak alınan ölçümler yapılmaktadır.

Radyasyon alanını karakterize eden fiziksel nicelik (örneğin hava kerma hızı) kalibrasyon süresince sabit ise bu prosedür uygulanabilir. Kalibrasyon referans test koşullarına yakın olan standart koşullarda gerçekleştirilmektedir. Referans ölçüm aletinin ve kalibrasyonu yapılan ölçüm aletinin referans noktaları sırayla radyasyon alanının merkezindeki test noktasına yerleştirilmelidir(Anonymous 2000).

Referans dedektör için kalibrasyon faktörü;

$$N_R = \frac{H}{h_K M_R} \quad (2.27)$$

Kalibrasyonu yapılan ve gösterge değeri eşdeğer doz(H) niceliğinde olan dedektör için kalibrasyon faktörü;

$$N_X = \frac{H}{M_X} \quad (2.28)$$

Bu iki cihazın aynı okuma değerini vermeleri amaçlandığından H değeri her iki cihaz için de aynıdır. Bu sebeple iki formülün birleştirilmesiyle kalibrasyonu yapılan ölçüm aletinin kalibrasyon faktörü;

$$N_X = N_R \frac{h_K M_R}{M_X} \quad (2.29)$$

şeklinde elde edilir.

Burada;

N_R : SSDL'deki referans koşullar altındaki referans dedektörün sertifikasında verilen kalibrasyon faktörü;

N_X : SSDL'deki referans koşullar altındaki kalibrasyonu yapılan ölçüm cihazının kalibrasyon faktörü;

M_R : Referans koşullara göre düzeltilmiş, yani gösterge değeri uygun düzeltme katsayıları ile çarpılmış (örneğin hava yoğunluğundaki değişiklikler için) , referans ölçüm aleti ile ölçülmüş değer;

M_X : Referans koşullara göre düzeltilmiş, yani gösterge değeri uygun düzeltme katsayıları ile çarpılmış (örneğin hava yoğunluğundaki değişiklikler için) , kalibrasyonu yapılan dedektör ile ölçülmüş değer;

h : Referans ölçüm aleti ile ölçülen niceliği, kalibrasyonu yapılan ölçüm aletinin doz eşdeğerine dönüşümü sağlayan katsayıdır. Kerma ölçümü için h_k , akı ölçümü için h_ϕ sembolü kullanılır.

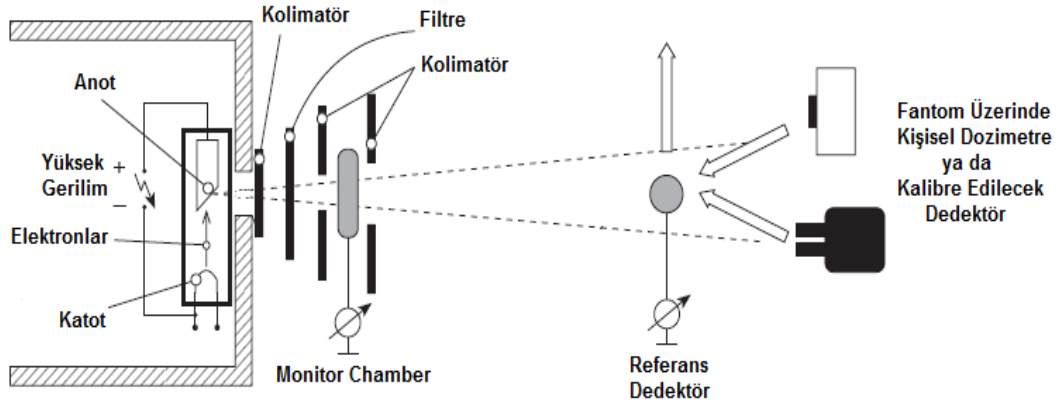
2.9 Radyasyon Alanları ve Karakteristikleri

X-ışın tüp sistemlerinden x-ışınları, radyoizotop kaynaklarından γ -ışınları elde edilerek foton radyasyon alanları elde edilir. Ancak bu radyasyon alanlarının belirli karakteristiklere sahip olması gerekmektedir.

2.9.1 Kalibrasyon için kullanılacak X-ışın sisteminin gereksinimleri

X-ışın tüpü çıkışındaki olası değişimler dikkate alınmalı ve x-ışını foton akısındaki oluşan dalgalanmaları belirlemek için bir monitor chamber kullanılmalıdır. Bu amaçla uygun bir transmisyon iyon odası monitor chamber olarak kullanılabilir. Filtre edilmiş x-ışın radyasyonları için monitor chamber, eklenen filtrelere çok yakın ve hemen sonrasına yerleştirilir. Eklenmiş filtrelere kıyasla monitor chamber tarafından yapılan filtrasyon önemsiz olmalıdır.

Ölçümler esnasında oluşan havadaki basınç ve sıcaklık değişimlerini monitor chamberın gösterge değeri için düzeltmek gereklidir. Monitor chamberın bulunduğu yerdeki hava sıcaklığı ile test noktasındaki hava sıcaklığın birbirinden farklı olabileceği hatırlanmalı bu yüzden iki durumda da uygulanacak düzeltme faktörleri farklı olmalıdır.



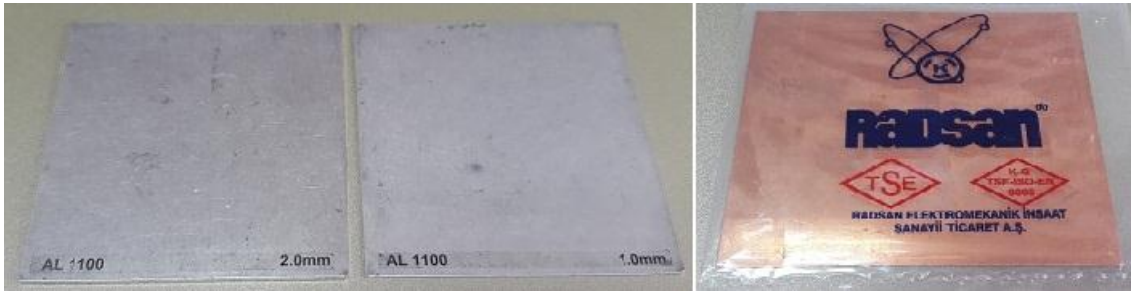
Şekil 2.10 X-ışın sistemi kullanılarak yapılan kalibrasyonda kullanılan sistemin şematik gösterimi(Anonymous 2000)

X-ışın ünitesi "sabit potansiyel" tipinde olmalıdır(yüksek voltajdaki maksimum dalgalanma % 10'u geçmemelidir). Düşük enerjili x-ışın aralığındaki ölçümler için tüp yüksek gerilimi devamlı en az 10-60 kV ve 0,1-30 mA, yüksek enerji aralığında tüp gerilimi 30-300 kV ve 0,1-10 mA aralığındaki akımlarla ayarlanabilir olmalıdır. Bu aralıklarda x-ışın tüpünün anot materyali tungsten olmalıdır.

Kolimatör yaprakları (shutter) tarafından sağlanan zırhlama, hava kerma hızını en az 1000 kat azaltmalıdır. Eğer ışınlama kolimatör yapraklarının kontrolü ile gerçekleştiriliyorsa, ışınlama süreleri yaprakların geçiş sürelerinin 1000 katından daha uzun olmalıdır. Filtre materyalleri için gereklilikler tabloda verilmiştir.

Çizelge 2.4 X-ışınlarının filtrasyonunda kullanılan filtrelerin özellikleri(Anonymous 2000)

Metal	Kalite	Nominal yoğunluk(g·cm ⁻³)
Alüminyum	Asgari saflık % 99,9	2,70
Bakır	Asgari saflık % 99,9	8,94
Kalay	Asgari saflık % 99,9	7,28
Kurşun	Asgari saflık % 99,9	11,3



Şekil 2.11 X-ışınlarının filtrasyonunda kullanılan materyal örnekleri

Kalibrasyon düzeneğinde, X-ışın tüpü odak noktası ile dedektör arasındaki mesafenin tekrarlanabilirliğinin ± 1 mm'lik sınırlar içerisinde kaldığına emin olunmalıdır. Yüksek voltaj kalibrasyonlarını yaparken ya kalibre edilmiş bir direnç zinciri ya da maksimum foton enerjisinin spektrometrik ölçümü kullanılarak düzenli kontroller yapılması tavsiye edilir(Anonymous 2000).

Düşük enerji aralığında X-ışın tüpünün doğal filtrasyonu toplam filtrasyonda önemli bir rol oynar. Doğal filtrasyon, X-ışın tüpünün 60 kV'ye ayarlandığı ve herhangi bir ek filtrenin kullanılmadığı durumda yapılan HVL ölçümü ile belirlenir. Alüminyum soğurucular ile X-ışın tüpü odağı ile dedektör arasındaki mesafenin ortasına yerleştirilmelidir. Dedektörün bulunduğu yerdeki X-ışın demetinin çapı, dedektörü yeterince ve homojen olarak ışınlayabileceği mesafede olmalıdır. Alüminyum

soğurucular ile dedektör arasındaki mesafe, dedektörün bulunduğu yerdeki X-ışın alanının çapının en az 5 katı büyüklüğünde olmalıdır. Eklenen alüminyum levhalar sonucunda çizilen azalım eğrisinden sonra 1. HVL değeri belirlenmelidir. Elde edilen 1. HVL değeri kullanılarak doğal filtrasyonun değeri aşağıdaki çizelgeden belirlenir.

Çizelge 2.5 60 kV'da 1.HVL ile doğal filtrasyon arasındaki ilişki(Anonymous 2000)

60 kV'daki 1.HVL (mm Al)	Doğal Filtrasyon(mm Al)
0,33	0,25
0,38	0,3
0,54	0,4
0,67	0,5
0,82	0,6
1,02	0,8
1,15	1,0
1,54	1,5
1,83	2
2,11	2,5
2,35	3
2,56	3,5
2,75	4
2,94	4,5
3,08	5
3,35	6
3,56	7

Doğal filtrasyonun değeri, doğal filtrasyonun bileşen elementlerine dayandırılarak foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak mm Al cinsinden tanımlanır.

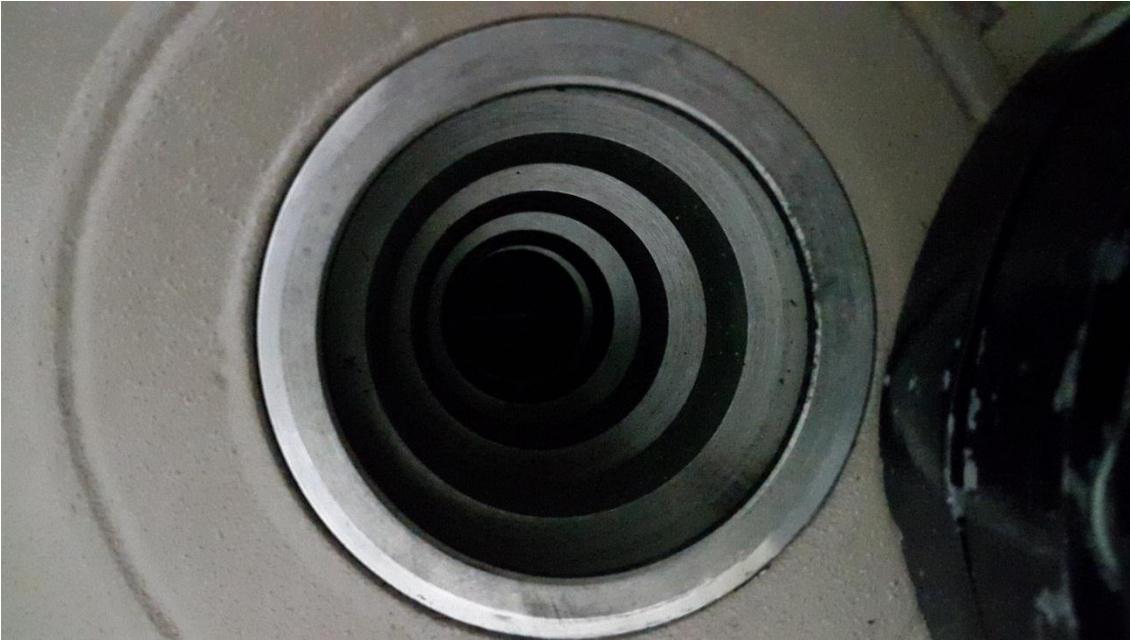
2.9.2 Kalibrasyon Amaçlı Radyonüklit Gama Radyasyon Kaynağı

Radyasyon alanının kalibrasyonu için referans ölçüm cihazı kullanılır. Her test noktasında, ölçüm gruplarının deneysel standart sapmasının referans ölçüm cihazının beklenen performansı ile tutarlı olacak şekilde yeterli miktarda ölçüm alınır. Ölçülen hava kerma hızı değerleri için birbirini takip eden ölçümler arasında yeterli süreyle beklenmesi tercih edilir.

Bir referans kaynak(örneğin ISO s-Cs veya ISO s-Co) kullanılarak her kalibrasyon mesafesindeki hava kerma hızı, SSDL'de önceden kalibre edilmiş "referans ölçüm cihazı" kullanılarak belirlenmesi gerekir. İstenilen hava kerma hızı aralığının

sağlanabilmesi için bazı durumlarda birden fazla kaynak(aktivitleri farklı olabilir) gerekebilir. Bu doz aralığı, 10 $\mu\text{Gy/h}$ -10 Gy/h 'dır. Bu tür durumlarda, kullanılacak kaynaklar aynı radyoaktif maddeden yapılmış ve özdeş fiziksel özelliklere(örneğin kaynak çapı ve kapsülü) sahipler ise belirlenmiş bir kalibrasyon mesafesinde(l) her iki kaynak içinde hava kerma hızı referans ölçüm cihazı ile ölçülür. Sonrasında bir tane kaynak 'referans' kaynak olarak belirlenir.

Her kalibrasyon mesafesinde referans kaynak kullanılarak referans ölçüm cihazı ile hava kerma hızı ölçülür. Diğer kaynakların farklı mesafelerindeki hava kerma hızları, l mesafesindeki referans kaynağın hava kerma hızının yine l mesafesindeki referans olmayan kaynağın hava kerma hızına oranına çarpılması ile hesaplanır.



Şekil 2.12Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'nde bulunan ^{137}Cs radyoaktif kaynağı ışınlama sisteminde kullanılan kolimatör

Pratikte, güvenli zırhlama için kaynak radyasyon şiddetini yaklaşık 1000 kat azaltacak şekilde bir materyal kullanılmalıdır. ^{60}Co (max.2,5 MeV, ort.1,25 MeV) için bu kalınlık asgari 12,5 cm kurşun iken ^{137}Cs (0,662 MeV) için 6,5 cm kurşun kalınlığı yeterlidir. Uygulamalarda radyasyon ışınlamasını (dozu) daha da azaltmak için daha büyük kalınlıkta zırh materyalleri gerekebilir.

Doz hızları, farklı aktivitelere sahip kaynaklar kullanmak yerine, hava kerma hızı kolime edilmiş ^{137}Cs ve ^{60}Co demetleri için kurşun plakalar kullanılarak da değiştirilebilir. Zayıflatıcı disklerin kolimatörün çıkış açıklığının yakınına yerleştirilmesi kaçak radyasyonu önler. ^{137}Cs ve ^{60}Co radyoaktif kaynakları için zayıflatıcıların kalınlıkları yaklaşık sırasıyla 20, 40, 60 mm vb. ve 38, 76, 114 mm vb. uygulanabilmektedir. Saçılmayı asgaride tutmak için kalibrasyon süresince dedektör, kolimatör yüzeyinin en az 30 cm önünde ve kalibrasyon odasının arka duvarından en az 1 m önde olması önerilir (Anonymous 1996). Test noktasında kolime edilmiş ışındaki saçılan radyasyonun etkisini değerlendirmek için referans ölçüm cihazı, penumbrası(gölgesi) ile birlikte demet yarıçapının iki katı mesafeye, ışın demetine dik bir düzlemde yerleştirilmeli ve ölçülen hava kerma hızı ışın demetinin merkezindeki değer % 5'inden az olmamalıdır(Anonymous 2000).

2.10 Foton Dedektörlerinin Kalibrasyonu için Protokoller

Bu tezde kalibrasyon amacıyla AAPM TG-61 ve ISO 4037-1 protokolleri açıklanmıştır.

2.10.1 Foton Dedektörlerinin Kalibrasyonu için Kullanılan Referans NIST X-ışın Demet Kaliteleri

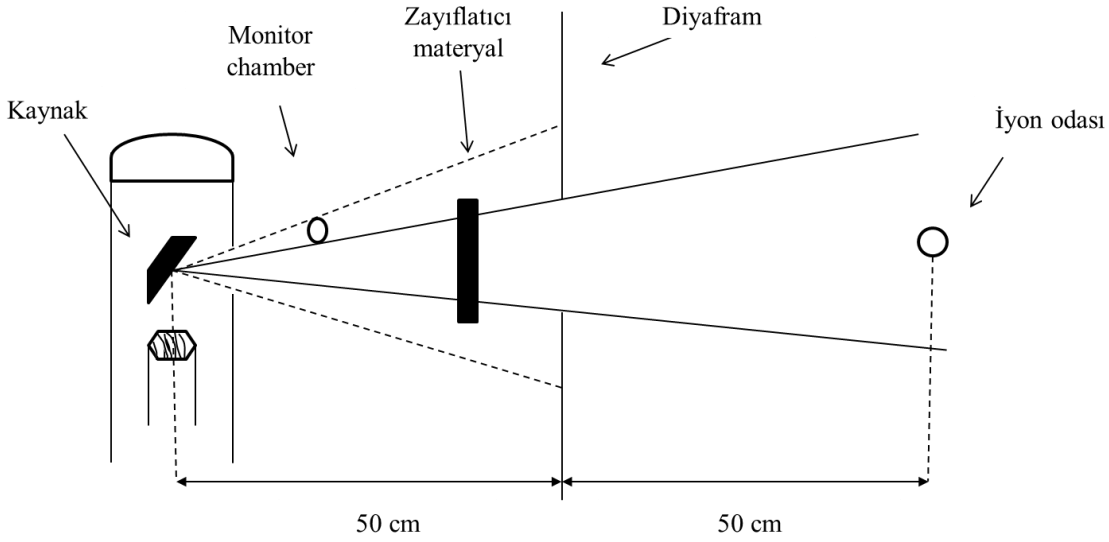
Foton dedektörlerinin kalibrasyonları için AAPM TG-61 protokolünde belirtilmiş olan referans X-ışın demet kaliteleri kullanılacaktır. Doz ve doz hızı ölçen cihazların kalibrasyonunda ve enerji bağımlılıklarının belirlenmesinde kullanılan bu referans demet kalitelerinin nasıl elde edildiği tezin 4. bölümünde belirtilmiştir.

2.10.1.1 AAPM TG-61' de Belirlenmiş Olan X-ışın Demet Kalitesi Özellikleri

X-ışın demetlerinin en detaylı özellikleri, onların spektral dağılımları ile verilir. X-ışın spektrometresini karakterize etmek için sıklıkla; uygulanan gerilim, 1. ve 2. HVL değerleri kullanılır.

HVL, düşük enerjili x-ışınları için “mm Al” orta enerjili x-ışınları için ise “mm Cu” olarak belirtilir. Ancak kolaylık olarak 150 kV tüp potansiyeline kadar elde edilen x-ışınların demetlerinde de “mm Al” kullanılabilir.

Demet kalitesi tüp potansiyeli, hedef açısı, hedef materyal, pencere materyali ve kalınlığı, iyon odası materyali ve kalınlığı, filtrasyon malzemesi ve kalınlığı, kolimatör şekli ve kaynak-dedektör mesafesi gibi birçok önemli faktöre bağlıdır. Bir HVL ölçümü deneysel ayarların ayrıntılarından, prosedürlere ve dozimetre kullanımının enerji bağımlılığından etkilenebilir.



Şekil 2.13 AAPM TG-61 protokolünde belirtilen NIST X-ışın demet kalitelerinin elde edildiği düzenek (Ma vd. 2001)

Genel olarak bir demeti açıkça belirtmek için sadece tüp potansiyeli ya da HVL’yi kullanmak yetersizdir. Yaygın olarak kullanılan demet kaliteleri benzer tüp potansiyeline uyan geniş HVL değerleri aralığında yayınlanmaktadır.

Bu protokolde, demet kalitesinin tanımlanması konusu iki aşamaya ayrılmıştır. Birinci aşamada, standart laboratuvarlardan hava-kerma kalibrasyon faktörü N_K bulunması ele alınmıştır. İyon odası, klinik durumda kalibrasyon faktörünün doğruluğunun sağlanması için, kullanıcının demet kalitesine tüp potansiyeli ve HVL bakımından

yeterince yakın bir demet kalitesinde kalibre edilmelidir. Tercihen, iyon odası kullanıcının demet kalitesini düzgün şekilde elde etmesi için birden fazla x-ışın kalitesinde kalibre edilmelidir. İkinci aşamada ise, kullanılan demetteki soğurulan dozun ölçülmesi ele alınmıştır. Bu ikinci aşamada HVL sadece demet kalitesi belirleyicisi olarak göz önüne alınır. Bu protokolda uygunluk için, x-ışın enerji sırasını belirtmek için sadece tüp potansiyeli kullanılmıştır(Ma vd. 2001).

2.10.1.2 AAPM TG-61' de HVL Belirlenmesi

AAPM TG-61 protokolü, X-ışın demetinin 1. HVL' si dar bir demette hava kerma hızını yarı değerine indirecek zayıflatıcı kalınlığı olarak tanımlamaktadır. HVL' nin belirlenmesi dar demet ve serbest saçılmadaki bir noktada hava kermanın zayıflatıcı kalınlığı ile değişiminin ölçümünü şart koşmuştur. Diğer bir ifadeyle, “Bu ölçüm için, dedektörler kontamine elektronların etkilerini elimine etmek için yeterli *build up kılıf kalınlığı* seçilerek kullanılmalıdır” anlamına gelir.

Şekil 2.15 HVL ölçümü için deneysel ayarlarını göstermektedir. Demet çapı diyafram-kolimatör tarafından 4 cm ya da daha az olarak tanımlanır. Diyafram kalınlığı ana demeti % 0,1 zayıflatacak yeterli kalınlıkta olmalıdır. Dedektör zayıflatıcı materyal ve diyaframdan en az 50 cm uzağa yerleştirilir. Kaynağın hizasının, diyafram ve dedektörün radyografik kontrolü yapılır. Monitor chamber HVL ölçümü sırasında demette ek filtrasyonlar tarafından hava kerma hızı önemli derecede düşürüldüğü zaman, hava kerma hızındaki önemli değişimler için doğru kullanılır. Bu durumda, saçıcı faktörler eklenerek dar demetleri pertürbe etmemesi ve onun cevabı(response) zayıflatıcı materyalin kalınlığı tarafından etkilenmemesi için uygun bir şekilde yerleştirilir. Hava kerma ölçümleri için, küçük boyutlu dedektörler tercih edilmektedir. Demet dedektörün hassas hacmini kapsamalıdır. Dedektör yanıtı doğru HVL ölçümü için demet-kalite bağımlılığı (40 ve 300 kV aralığında % 5 içinde) sınırlandırılır. Zayıflatıcı filtre yüksek saflıkta (%99,9) maddeden yapılmalı ve kalınlığı 0,05 mm ölçüm belirsizliği dahilinde belirlenir(Ma vd. 2001).

2.10.2 ISO X-Işın Demet Kaliteleri

Filtrelenmiş X- ışının kalitesi, aşağıdaki parametreler ile tanımlanır:

- Kiloelektron volt (keV) olarak ifade edilen, bir X-ışını demetinin ortalama enerjisi, \bar{E}
- Yüzde olarak ifade edilen ayırma gücü, R_E
- Al veya Cu tabaka kalınlığı cinsinden ifade edilen ve milimetre olarak verilen yarı değer kalınlığı (hava kerma), HVL
- Homojenlik katsayısı, h .

ISO 4037-1 standardına göre; her biri, spektrumun ayırma gücüyle karakterize edilen referans radyasyonunun dört serisi aşağıda verildiği gibi belirlenir:

- Hava kerma hızı düşük olan seriler,
- Dar spektruma sahip seriler,
- Geniş spektruma sahip seriler,
- Hava kerma hızı yüksek olan seriler.

ISO 4037-1' de belirtilen fluoresans, radyoaktif kaynak, düşük hava kerma hızı, dar, geniş ve yüksek hava kerma serileri sırasıyla F , S , L , N , W ve H harfleri ile kısaltılmıştır. Düşük hava kerma serileri (L) en dar spektruma ve en düşük hava kerma hızına sahiptirler. Yüksek hava kerma hızı serileri (H) çok geniş bir spektruma ve en yüksek hava kerma hızına sahiptirler. L serisi, dedektör yanıtının, gelen fotonun enerjisinin değişimiyle nasıl değiştiğinin yani enerji bağımlılığının ölçülmesinde kullanılmalıdır.

Dar spektrum serileri (N), dedektörlerin enerji bağımlılığının belirlenmesinde kullanılır. Düşük doz hızlarını ölçen dedektörlerin enerji bağımlılığı genelde L serileri, daha yüksek doz hızlarını ölçen dedektörlerin enerji bağımlılıkları ise genelde N serileri ile belirlenir. Geniş spektrum serileri (W), dar spektrum serilerine göre daha geniş enerji aralıklarının kullanılması gereken durumlarda kullanılırlar. Yüksek hava kerma hızı serileri bazı cihazların aşırı yüklenme karakterlerinin belirlenmesi için uygundur (Anonymous 1996).

2.10.2.1 ISO Dar Spektrumlu Serilerin Özellikleri

Yapılan bu çalışmada ISO 4037-1’de belirlenmiş olan dar (*N*) referans X-ışın demetleri kullanılmıştır. Bu dar demet kalitelerinin bazı özellikleri Çizelge 2.6’da verilmiştir.

Çizelge 2.6 Dar spektrumlu ISO X-ışın demet kalitelerinin özellikleri(Anonymous 2000)

Demet Kalitesi	Ortalama enerji, \bar{E} (keV)	Ayırma gücü, R_E (%)	İlave filtreleme ^a			1. HVL ^b		2. HVL ^b	
			Pb (mm)	Sn (mm)	Cu (mm)	Al (mm)	Al (mm)	Cu (mm)	Al (mm)
N-10	8	28				0,1	0,047		0,052
N-15	12	33				0,5	0,14		0,16
N-20	16	34				1,0	0,32		0,37
N-25	20	33				2,0	0,66		0,73
N-30	24	32				4,0	1,15		1,30
N-40	33	30			0,21			0,084	0,091
N-60	48	36			0,6			0,24	0,26
N-80	65	32			2,0			0,58	0,62
N-100	83	28			5,0			1,11	1,17
N-120	100	27		1,0	5,0			1,71	1,77
N-150	118	37		2,5				2,36	2,47
N-200	164	30	1,0	3,0	2,0			3,99	4,05
N-250	208	28	3,0	2,0				5,19	5,23
N-300	250	27	5,0	3,0				6,12	6,15

^a X-ışını tüpünün kendi yapısından kaynaklanan tavsiye edilen filtrelemesi, 1 mm kalınlığındaki berilyuma karşılık geldiğinde, birinci kolonda verilen en düşük ilk beş enerjinin dışında, X-ışını tüpünün kendi yapısından kaynaklanan filtreleme ile ilâve filtrelemeden oluşan toplam filtreleme, 4 mm kalınlığındaki Al’a eşit olmalıdır. X-ışını tüpünün kendi yapısından kaynaklanan tavsiye edilen filtrelemesi, 1 mm kalınlığındaki berilyuma eşittir. Ancak çizelgedeki ortalama enerji \pm % 5 toleransla ve ayırma güçleri ise \pm % 15 toleransla verilmesi şartıyla diğer filtreleme değerleri de kullanılabilir.

^b HVL’ler, X-ışını tüpünde odak noktasından itibaren 1 m mesafede ölçülür.

2.11 ISO Dar Spektrumlu X-ışın Demet Serileri için Belirlenmiş Doz Dönüşüm Katsayıları

ISO tarafından belirlenmiş, dört farklı filtre edilmiş(düşük hava kerma hızı, dar, geniş ve yüksek hava kerma serileri) x-ışın serileri vardır. ISO 4037-1 tarafından referans demet kaliteleri dört seriye ayrılırlar ve her seri spektrumunun ayırma gücüne göre karakterize edilir.

Çizelge 2.8 Dar spektrumlu ISO X-ışın demet kalitelerinin farklı nicelikleri için belirlenmiş dönüşüm katsayıları(Anonymous 2000)

Radyasyon Demeti	Ortalama enerji, \bar{E} (keV)	Doz Dönüşüm Katsayıları, h					
		$H'(0,07)/K_a$ (Sv·Gy ⁻¹)	$H^*(10)/K_a$ (Sv·Gy ⁻¹)	Vücut(gövde) Fantomu		Sütun Fantomu	Çubuk Fantomu
				$H_p(0,07)/K_a$ (Sv·Gy ⁻¹)	$H_p(10)/K_a$ (Sv·Gy ⁻¹)	$H_p(0,07)/K_a$ (Sv·Gy ⁻¹)	$H_p(0,07)/K_a$ (Sv·Gy ⁻¹)
N-10	8	0,91		0,91		0,91	0,91
N-15	12	0,96		0,96	0,06	0,96	0,95
N-20	16	1,00		0,98	0,27	0,99	0,98
N-25	20	1,03	0,52	1,03	0,55	1,02	1,00
N-30	24	1,10	0,80	1,10	0,79	1,08	1,03
N-40	33	1,25	1,18	1,27	1,17	1,20	1,07
N-60	48	1,48	1,59	1,55	1,65	1,33	1,11
N-80	65	1,60	1,73	1,72	1,88	1,39	1,15
N-100	83	1,60	1,71	1,72	1,88	1,38	1,17
N-120	100	1,55	1,64	1,67	1,81	1,35	1,17
N-150	118	1,50	1,58	1,61	1,73	1,32	1,17
N-200	164	1,39	1,46	1,49	1,57	1,27	1,16
N-250	208	1,34	1,39	1,42	1,48	1,24	1,15
N-300	250	1,31	1,35	1,38	1,42	1,22	1,14

ISO 4037-1'de belirtilen N serisi x-ışın demet kalitelerinden bazılarının elde edilişi tezin ilerleyen kısımlarında anlatılacaktır. Çizelge 2.8'de X-ışın demet kalitelerinin dar spektrum serisi için hava kermadan eşdeğer doz niceliğine dönüşümünü sağlayan katsayılar verilmektedir.

ISO x-ışın referans radyasyonlarından dar spektrum serileri için verilen dönüşüm katsayıları 2 m' lik kalibrasyon mesafesi için belirlenmiştir. Bu dönüşüm katsayılarının uygulanabilir olduğu mesafe aralıkları, yani kalibrasyonun gerçekleştirilebileceği mesafe aralıkları ISO tarafından belirlenmiştir.

2.12 ISO 4037-1'de Belirlenmiş Olan Referans s-¹³⁷Cs Kaynak Çıkışındaki Foton Radyasyonları için Belirlenmiş Olan Doz Dönüşüm Katsayıları

Çizelge 2.9 ISO tarafından belirlenmiş olan referans s-Cs(0,662 MeV) kaynak çıkışlı foton radyasyonu için doz dönüşüm katsayıları(Anonymous 2000)

Radyasyon Kalitesi	Doz Dönüşüm Katsayıları					
	Normal Etki için		Vücut Fantomu için		Sütun Fantomu için	Çubuk Fantomu için
	$H^*(0,07)/K_a$ (Sv·Gy ⁻¹)	$H^*(10)/K_a$ (Sv·Gy ⁻¹)	$H_p(0,07)/K_a$ (Sv·Gy ⁻¹)	$H_p(10)/K_a$ (Sv·Gy ⁻¹)	$H_p(0,07)/K_a$ (Sv·Gy ⁻¹)	$H_p(0,07)/K_a$ (Sv·Gy ⁻¹)
s-Cs(0,662 MeV)	-	1,20	1,25	1,21	-	-

Yukarıdaki çizelgede hava kermadan ortam dozu ya da yönlü eşdeğer doz niceliklerine dönüşüm katsayısı Sv/Gy biriminde, normal etki ve gövde fantomu için 10 ve 0,07 mm derinlikleri için verilmiştir.

Çizelge 2.10 s-¹³⁷Cs kaynağının genişletilmiş ve hizalı verilen alanlar radyasyon kaliteleri ve kolime edilmiş ışın demetleri ICRU küresi için K_a hava kermasından, $H^*(10)$ ortam doz eşdeğerine $h^*_k(10;S)$ dönüşüm katsayısı(Anonymous 1996)

Radyasyon Kalitesi	Işınlama mesafesi (m)	Yığılma(build up) tabakası kalınlığı (mm)	k_{PMMA}	$h^*_k(10;S)$ $h^*_k(10;R)$ (Sv·Gy ⁻¹)
s-Cs (0,662 MeV)	1,5 - 4,0	2	1,00	1,20

PMMA: Polimetilmetakrilat, referans mesafesi 2 m' dir.

Kolime edilmemiş ışınlama geometrisi kullanıldığında, ayrıca ışınlama mesafesi bu parametre için ISO 4037-2'deki tavsiye edilen aralıkta olmalıdır.

Test noktasındaki çevreden, cihaz ve destek yerlerinden kaynaklanan saçılan radyasyonların oluşturduğu hava kerma hızı birincil(primer) radyasyonun % 5'ini geçmemelidir. Kalibrasyonlar kolime edilmiş ışın ya da radyoaktif kaynağın serbestçe havada olduğu geometrilerin her ikisi ile de gerçekleştirilebilir. Hem kolime edilmiş hem de kolime edilmemiş kalibrasyon geometrileri için ikinci bir metot kullanılabilir. Her test noktasında, ışının tam merkezinde ölçümler alınmalıdır. Alınan bu ölçümlere havadaki azalım düzeltilmesi uygulandıktan sonra elde edilen sonuçlar birbirleriyle \pm %5'lik sınırlar içerisinde kalacak şekilde orantılı olmalıdır.

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

3.1 Tez Kapsamında Kullanılan Sistemler

Bu tezde kullanılan sistemlerin bazı teknik özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

3.1.1 Konvansiyonel X-Işın Sistemi

X-ışın sistemi olarak max 150 kV_p, 630 mA Varian marka x-ışın tüpü kullanılmıştır. Sistemin teknik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 X-ışın sistemi özellikleri

Marka	Varian
Model	DIA150KV
Gerilim(kV) Aralığı	40-150
Akım(mA) Aralığı	10-630
Konvansiyonel X-ışın Sisteminin Tüpü	
Marka	Varian
Model	2226680
Doğal(inherent) Filtrasyonu	0,6 mm Al
Ek Filtre	1 mm Al
Odak Nokta Boyutu	0,6 mm-1,2 mm
Anot Materyali	Tungsten
Anot Açısı	12°

3.1.2 ISO s-Cs(0,662) Kaynaklı Işınlama Sistemi

Çift radyoizotop ^{137}Cs kaynaklı, çelik zırhlanmış kaynak pnömatik hareketle konumlanan ve radyometrik benci bulunan standardize bir ışınlama sistemi kullanılmıştır. Sistemin teknik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 ^{137}Cs kaynak içeren ışınlama sisteminin özellikleri

Üreticisi: Hopwell Designs, Inc. , G10 Gamma Beam Irradiator, USA	
Kurulum tarihi	2009
Radyoaktif kaynak	^{137}Cs
Radyoaktif kaynak aktivitesi	47 mCi (Ref. Tarihi:14.05.2009)
Radyoaktif kaynak aktivitesi	8,58 Ci (Ref. Tarihi:14.05.2009)
Şiddet azaltıcı levhalar	3 adet 19,4 mm kalınlığında kurşun
Kolimatör	ISO Collimator, 17°

3.2 Kalibrasyon İşleminde Kullanılan Referans Dedektörler

3.2.1 İyon Odaları

Almanya’nın birincil standart dozimetri laboratuvarı (PSDL) Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) tarafından izlenebilir PTW, ikincil standart dozimetri laboratuvarı (SSDL) tarafından kalibre edilen referans dedektörlere ilişkin bilgiler silindirik iyon odası için Çizelge 3.3’de, küresel iyon odası için Çizelge 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.1 PTW marka, 30 cm³ hassas hacimli silindirik iyon odası(TM 23361)

Çizelge 3.3 PTW, TM 23361 silindirik iyon odası özellikleri

Tipi	Silindirik iyon odası
Nominal Tepki	1µC/Gy
İyon odası gerilimi	Nominal 400 V
Nominal Hassas Hacmi	30 cm ³
Hassas hacmin duvarı	1 mm PMMA
Build-up kap	3 mm PMMA
İyon birleşme zamanı	1,3 ms
Max. doz hızı	
≥ % 99,5 saturasyon için	60 mGy/s
≥ % 99,0 saturasyon için	120 mGy/s
Max. doz (puls başına)	
≥ % 99,5 saturasyon için	50 µGy
≥ % 99,0 saturasyon için	100 µGy
Enerji Bağımlılığı	40 keV- 1,25 MeV(⁶⁰ Co) arasında ≤ ± % 4



Şekil 3.2 PTW marka, 27,9 cm³ hassas hacimli küresel iyon odası(TM 32005)

Çizelge 3.4 PTW, TM 32005 küresel iyon odası özellikleri

Tipi	Küresel iyon odası
Nominal Tepki	0,8 µC/Sv
İyon odası gerilimi	Nominal 400 V
Nominal Hassas Hacmi	27,9 cm ³
Hassas hacmin duvarı	3 mm POM
İyon birleşme zamanı	4,5 ms
Max. doz hızı ≥ % 99 saturasyon için ≥ % 90 saturasyon için	29,4 mSv/s 294 mSv/s
Max. doz (puls başına) ≥ % 99 saturasyon için	26 µSv
Enerji Bağımlılığı	48 keV - 1,25 MeV(⁶⁰ Co) arasında ≤ ± % 5

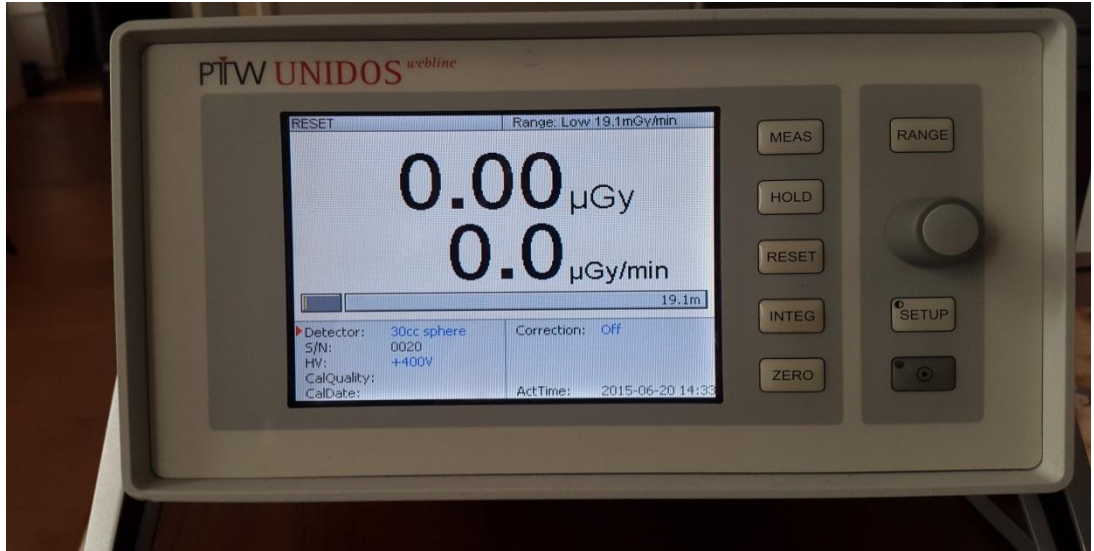
POM: Poliasetal

3.3 İyon Odası Elektrometresi

Elektrometre, 10^{-2} A gibi iyon odası çıkışında 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:

- 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 3.3 Elektrometre

3.4 X-Işın Spektrum Programları

- I. Xcom5r, R. Nowotny, A. Hofer
- II. Spectrum GUI

3.5 Test Objeleri

Dedektör tutucuları, PTW marka Al ve Cu soğurucu filtreler, CCD kamera ve monitör, Hassas sıcaklık, basınç ve nemölçer, lazer



Şekil 3.4 Test objeleri örneği(dedektör tutucusu, kamera, lazer)

3.6 Tez Kapsamında Kalibrasyonu Gerçekleştirilen Dedektörler

1. The Victoreen Geiger-Mueller(GM), Model:489-110D
2. PTW, $H_p(10)$, Model: T 34035 Secondary Standard Chamber
3. Unfors, Model: 543, S/N: 6433 iyon odası
4. Radcal 10x6-6, 6 cc, S/N: 03-0458 iyon odası
5. Radcal 10x6-60, 60 cc, S/N: 07-0361 iyon odası

Çizelge 3.5 Kalibrasyonu gerçekleştirilen dedektörlerin özellikleri

Dedektör üretici	Modeli	Doz Aralığı		Doz Hızı Aralığı		Enerji Bağımlılığı
		Min	Max	Min	Max	
The Victoreen	Fluke Geiger-Mueller 489-110D pancake prob (Neon ve Halojen sönmlemeli)	*	*	0 mR/saat	80 mR/saat (0,8 mSv/saat)	X- ve gama ışınları için 6 keV üstündeki tüm enerjilere hassas ve verimi ^{**} ¹³⁷ Cs kaynak için %24'tir
Unfors	543 İyon odası	100 µGy	9,99 kGy	6 mGy/dk	30 mGy/dk	50-150 kV _p aralığında < % 5
Radcal	6 cc 10x6-6 S/N:03-0458 İyon odası	100 nGy	700 Gy	600 nGy/dk	11,4 Gy/dk	30 keV-1,33 MeV arasında % 5
Radcal	60 cc 10x6-60 S/N: 07-0361 İyon odası	10 nGy	70 Gy	60 nGy/dk	1,4 Gy/dk	20 keV-1,33 MeV arasında % 5

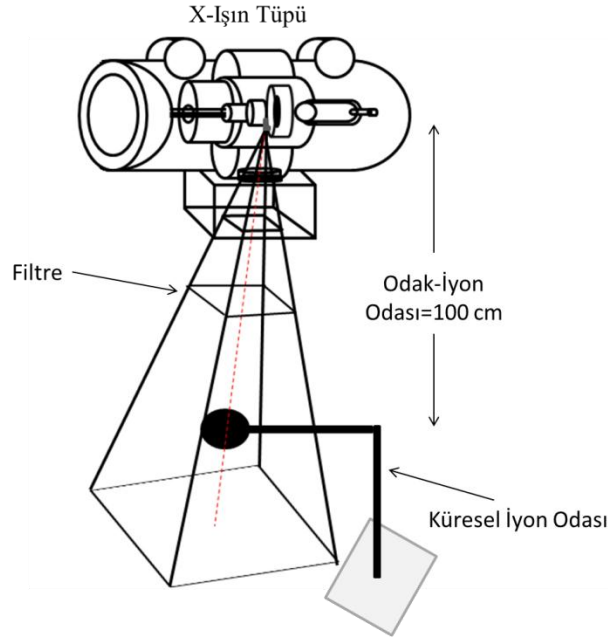
*: Bu özellik tanımlı değil.

**% Verim= 100 x(CPM/ DPM).

Burada, CPM: Dakikadaki dedektör sayım hızı ve DPM: Dakikadaki kaynak parçalanma hızıdır. Tipik doğal fon ise 30CPM'dir.

3.7 X-Işın Sisteminde X-Işın Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi

Doğal filtrasyonun belirlenmesinde, NIST x-ışın demet kaliteleri ve ISO x-ışın demet kalitelerinin elde edilmesinde kurulan x-ışın sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.2'de verilmiştir. Şematik olarak x-ışın tüpü ile dedektör arası mesafe 100 cm'ye ayarlanmış, filtre x-ışın tüpünden 12 cm aşağıya yerleştirilmiş sistem görülmektedir.



Şekil 3.5 Doğal filtrasyonun belirlenmesi, NIST ve ISO x-ışın demet kalitelerinin elde edilmesi için kurulan düzenek şeması

3.7.1 Doğal Filtrasyonun Belirlenmesi

X-ışın sisteminin doğal filtrasyonu Şekil 3.5’de belirtilen düzenek kurularak hesaplanmıştır. Düzenek kurulduktan sonra x-ışın tüpüne uygulanan gerilim 60 kV’a ayarlanmış ve 1. yarı değer kalınlığı belirlenmiştir. Elde edilen değer, IAEA Safety Report Series No.16’da belirtilmiş olan ‘1. Yarı kalınlık değerinden doğal filtrasyona geçiş’ tablosu (Çizelge 2.5) kullanılarak doğal filtrasyon hesaplanmıştır.

3.7.2 AAPM TG-61 Protokolünde Belirtilen NIST Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi

NIST X-ışın demet kalitelerinin elde edilmesi için Şekil 3.5’de belirtilen şekilde ölçüm geometrisi kurulmuştur. Odak noktası ile dedektör arasındaki mesafe 100 cm’ye ayarlanmıştır. Soğurucu filtreler % 99,9 saflıktadır ve dedektör ile aralarındaki mesafe 88 cm’dir. Ölçümlerin alındığı referans dedektör PTW marka TM 32005 model küresel iyon odasıdır.

X-ışın alanının ayarlanması kolimatör ışığı ile sağlanmıştır. Dedektörün bulunduğu noktaya yeterli genişlikteki kolimatör açılarak istenilen boyutta bir alan açılması mümkün olmuştur. Işınlama esnasında radyasyondan korunma açısından x-ışın koruyucu bariyerlerin(1 mm Pb eşdeğeri) arkasına geçilmiştir. Işınlama boyunca kişisel dozimetre kullanılmıştır. Geri saçılmaları engellemek için dedektör, sistem masasından belirli bir yüksekliğe konulmuştur.

Ölçüm sonucunda elde edilen veriler Xcomp5r, SpectrumGUI ile karşılaştırılmıştır. İstatistiksel değerlendirme ve grafik ortamına aktarılması için LabFitting ve MS-Excel programları kullanılmıştır.

3.7.2.1 Birinci Yarı Değer Kalınlığı, İkinci Yarı Değer Kalınlığı ve Homojenlik Katsayısının Hesaplanması

AAPM TG-61 protokolünde belirtilen demetler için öncelikle verilen kV değerinde, sistemin doğal filtrasyonu göz önünde bulundurularak, uygun filtreler eklenerek başlangıç doz hızı ölçülmüştür. Sonrasında belirtilmiş olan noktaya soğurucu alüminyum, bakır ve kurşun filtreler yerleştirilerek ölçümler alınmış ve bu işleme başlangıçtaki doz hızının yarısına ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. Elde edilen doz hızı değerleri ile 'Filtre kalınlığı(mm Al) – Doz(μ Gy)' grafiği elde edilmiştir. Elde edilen bu eğrideki değerler kullanılarak, başlangıçtaki doz hızının yarısını tam olarak elde etmeyi sağlayacak olan filtre kalınlığını daha sonra interpolasyon(ara değerlendirme) formülü yardımıyla ve çizilen grafikten elde edilen denklemle hesaplanmıştır.

Elde edilen 1. yarı değer kalınlığı(*I.HVL*), AAPM TG-61 protokolünde verilen değerden farklı olduğu durumlarda x-ışın tüpü çıkışına bir adet kalınlığı belli olan alüminyum filtre yerleştirilmiş ve eklenen bu filtre tüpün toplam filtrasyonuna dahil edilerek 1. yarı değer kalınlığı ölçümü tekrar edilmiştir. İstenilen 1. yarı değer kalınlığı bulununcaya kadar sürekli tüpün toplam filtrasyonuna filtreler ilave edilmiştir. Eklenen filtre kalınlıkları sayesinde elde edilen 1. yarı değer kalınlığı protokolde verilen değer ile uyuşunca, diğer demet kaliteleri için tüpe uygulanan yüksek gerilim protokolde belirtilen bir başka değere ayarlanmış ve bütün işlemler tekrar edilmiştir.

İkinci yarı değer kalınlığı(2.HVL), 'Filtre kalınlığı(mm Al) – Doz(μ Gy)' grafiğinde elde edilen eğrinin başlangıçtaki doz hızının dörtte birine düştüğü değere kadar devam ettirilmesiyle elde edilmiştir. Fakat elde edilen eğriden daha doğru sonuçlar alınabilmesi için bu eğri, daha kalın filtreler yerleştirilerek düşük doz hızı değerlerine ulaşıncaya kadar devam ettirilmiştir. Başlangıçtaki doz hızını dörtte birine düşüren filtre kalınlığının tam olarak hesaplanabilmesi için lineer interpolasyon yönteminden yararlanılmıştır. Elde edilen değerden ikinci yarı değer kalınlığı 2. Bölümde verilen(2.17) numaralı formül ile elde edilmiştir.

Protokolde belirtilen bütün kV değerinde elde edilmiş olan 1. yarı değer kalınlıkları ile 2. yarı değer kalınlıkları kullanılarak 2. Bölüm'de verilen Eşitlik (2.18) yardımıyla homojenlik katsayısı elde edilmiştir.

3.7.3 ISO 4037-1 Protokolünde Belirlenmiş Olan Bazı Dar Spektrumlu(N) X-Işın Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi

ISO 4037-1 protokolünde belirlenmiş olan dar spektrum X-ışın demet kalitelerinden(Çizelge 2.6) bazılarının elde edilmesi için Şekil 3.5'de belirtilen şekilde ölçüm geometrisi kurulmuştur. Odak noktası ile dedektör arasındaki mesafe 100 cm'ye ayarlanmıştır. Soğurucu filtreler % 99,9 saflıktadır ve dedektör ile aralarındaki mesafe 88 cm'dir. Ölçümlerin alındığı referans dedektör PTW marka TM 32005 model küresel iyon odasıdır.

X-ışın alanının ayarlanması kolimatör ışığı ile sağlanmıştır. Dedektörün bulunduğu noktaya yeterli genişlikteki kolimatör açılarak istenilen boyutta bir alan açılması mümkün olmuştur. Işınlama esnasında radyasyondan korunma açısından x-ışın koruyucu bariyerlerin(1 mm Pb eşdeğeri) arkasına geçilmiştir. Işınlama boyunca kişisel dozimetre kullanılmıştır.

3.7.3.1 Birinci Yarı Değer, İkinci Yarı Değer Kalınlıklarının ve Homojenlik Katsayısının Hesaplanması

ISO 4037-1 protokolünde belirtilen demetler için öncelikle verilen kV değerinde, sistemin doğal filtrasyonu göz önünde bulundurularak, uygun filtreler eklenerek başlangıç doz hızı ölçülmüştür. Sonrasında belirtilmiş olan noktaya soğurucu alüminyum ve bakır filtreler yerleştirilerek ölçümler alınmış ve bu işleme başlangıçtaki doz hızının yarısına ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. Elde edilen değerler ile 'Filtre kalınlığı($mm\ Cu$) – Doz(μGy)' grafiği elde edilmiştir. Elde edilen bu eğrideki değerler kullanılarak, başlangıçtaki doz hızının yarısını tam olarak elde etmeyi sağlayacak olan filtre kalınlığı çizilen grafikten elde edilen denklemle hesaplanmıştır.

Elde edilen 1. yarı değer kalınlığı(1. *HVL*), ISO 4037-1 protokolünde verilen değerden farklı olduğu durumlarda x-ışın tüpü çıkışına bir adet kalınlığı belli olan alüminyum filtre yerleştirilmiş ve eklenen bu filtre tüpün toplam filtrasyonuna dahil edilerek 1. yarı değer kalınlığı ölçümü tekrar edilmiştir. İstenilen 1. yarı değer kalınlığı bulununcaya kadar sürekli tüpün toplam filtrasyonuna filtreler ilave edilmiştir. Eklenen filtre kalınlıkları sayesinde elde edilen 1. yarı değer kalınlığı protokolde verilen değer ile uyuşunca, diğer demet kaliteleri için tüpe uygulanan yüksek gerilim protokolde belirtilen bir başka değere ayarlanmış ve bütün işlemler tekrar edilmiştir. İkinci yarı değer kalınlığı(2.*HVL*), 'Filtre kalınlığı($mm\ Cu$) – Doz(μGy)' grafiğinde elde edilen eğrinin başlangıçtaki doz hızının dörtte birine düştüğü değere kadar devam ettirilmesiyle elde edilmiştir. Fakat elde edilen eğriden daha doğru sonuçlar alınabilmesi için bu eğri, daha kalın filtreler yerleştirilerek daha düşük doz hızı değerlerine kadar devam ettirilmiştir. Başlangıçtaki doz hızını dörtte birine düşüren filtre kalınlığının tam olarak hesaplanabilmesi için basit lineer interpolasyon yapılmıştır. Elde edilen değerden ikinci yarı değer kalınlığı, Eşitlik (2.17) ile elde edilmiştir.

Protokolde belirtilen bütün kV değerinde elde edilmiş olan 1. yarı değer kalınlıkları ile 2. yarı değer kalınlıkları kullanılarak Eşitlik (2.18) yardımıyla homojenlik katsayısı elde edilmiştir.

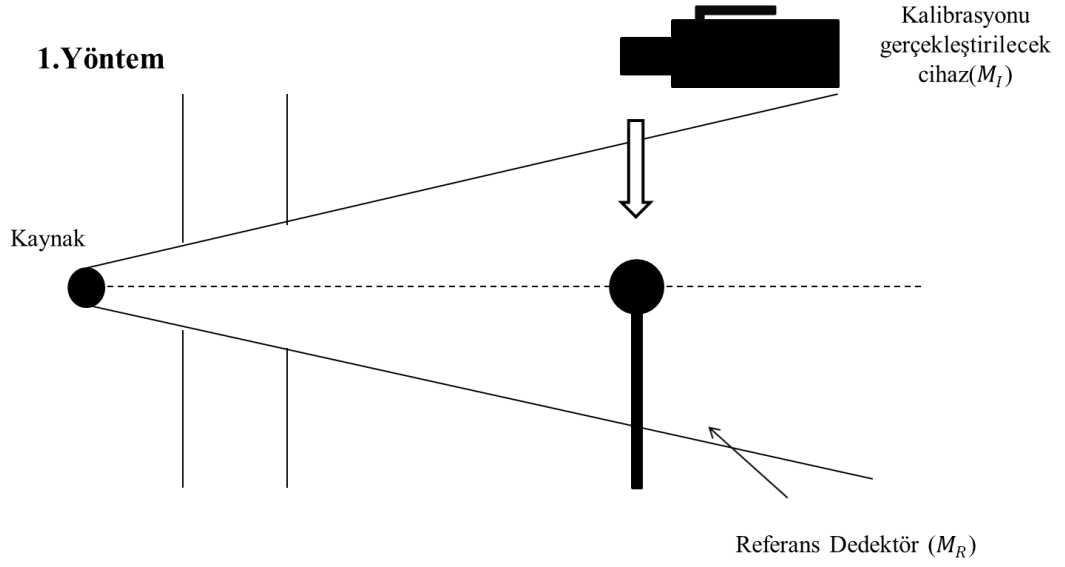
3.8 Elde Edilen NIST X-Işın Demet Kalitelerinin ve ISO X-Işın Demet Kalitelerinin Karşılaştırılması

Şekil 3.5’de belirtilen deney düzeneği kurularak elde edilmiş olan NIST x-ışın demet kaliteleri (*H40, H60, H100*), AAPM TG-61 raporunda uyumlu olduğu belirtilen ISO 4037-1 ‘de bulunan dar spektrum x-ışın demet kaliteleri(*N40, N60, N100*) ile karşılaştırılmış ve aynı şartlarda Xcomp5r ve SpectrumGUI programları kullanılarak elde edilen spektrumlarla karşılaştırılmıştır.

3.9 X-ışın Sisteminde Elde Edilen NIST ve ISO Demet Kaliteleriyle Foton Dedektörlerinin Kalibrasyon İşlemi

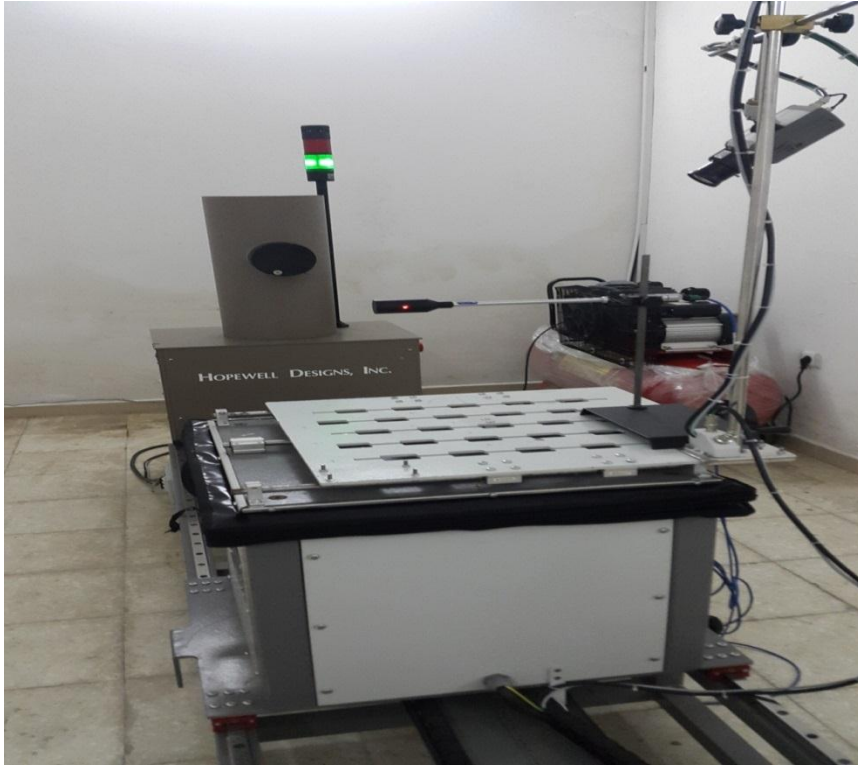
Deney düzeneği kurulduktan sonra kalibrasyon işleminin gerçekleştirileceği mesafeye öncelikle referans dedektör yerleştirilmiş ve en az 5 olmak üzere birçok ölçüm alınmıştır. Referans dedektör ile belli sayıda alınan ölçümlerden sonra referans dedektör deney düzeneğinden kaldırılmış ve kalibre edilecek olan dedektör tam olarak referans dedektörün bulunduğu noktaya(test noktası) yerleştirilmiştir.

Kalibre edilecek olan dedektör ile de ışınlama şartları değiştirilmeden aynı sayıda ölçüm alınmıştır. Elde edilen veriler, düzeltme faktörleri ve Eşitlik (2.29) formül kullanılarak kalibre edilecek olan dedektörün kalibrasyon faktörü hesaplanmıştır. Bu kalibrasyon yöntemi 2. Bölümde açıklanmıştır.



Şekil 3.6 Dedektör kalibrasyon yöntemi

3.10 ^{137}Cs Işınlama Sisteminde Foton Dedektörlerinin Kalibrasyon İşlemi



Şekil 3.7 ^{137}Cs ışınlama sistemi

Şekilde belirtilen deney düzeneği kurulduktan sonra kalibrasyon işleminin gerçekleştirileceği mesafeye öncelikle referans dedektör yerleştirilmiş ve en az 5 ölçüm

olmak üzere birçok ölçüm alınmıştır. Referans dedektör ile belli sayıda alınan ölçümlerden sonra referans dedektör deney düzeneğinden kaldırılmış ve kalibre edilecek olan dedektör tam olarak referans dedektörün bulunduğu noktaya(test noktası) yerleştirilmiştir.

Kalibre edilecek olan dedektör ile de ışınlama şartları değiştirilmeden aynı sayıda ölçüm alınmıştır. Elde edilen bütün veriler, düzeltme faktörleri ve Eşitlik 2.29'daki formül kullanılarak kalibre edilecek olan dedektörün kalibrasyon faktörü hesaplanmıştır.

3.11 Kalibrasyonlar için Diğer Etkenler

3.11.1 Ortamdaki Doğal Fon(Background) Radyasyonu

Zırhlı(90 cm beton) oda ve kaynak çelik zırhının içindeyken ölçülen ortam dozudur. Ölçüm yapılan cihazın background okumaları ortamda herhangi bir referans radyoaktif kaynak yokken kaydedilir ve gerekliyse düzeltilir(Anonymous 2000).

3.11.2 Ölçülen Okumaların Sayısı

En az $\pm 1,96\sigma$ (%95 güven seviyesinde) rastgele belirsizliğin(Tip A) sağlanması için yeterli sayıda ölçüm alınmıştır. Ölçümlerin istatistiksel olarak birbirinden bağımsız olması için ölçümler arasında yeterli miktarda zaman beklenerek bu tez çalışmasında en az 5 kez okumalar kaydedilmiştir (Anonymous 2000).

3.12 Referans Cihazlar

3.12.1 Referans Cihazlar için Gereksinimler

Bu çalışmada, “referans cihaz” olarak iyon odası kullanılmıştır. Ancak bazı uygulamalarda, örneğin düşük hava kerma hızlarının belirlenmesi için referans cihazların diğer tipleri, örneğin sintilasyon dedektörleri de kullanılır. Referans cihaz kullanılması planlanan enerjiler ve hava kerma ya da hava kerma hızları aralığında kalibre edilir. Referans cihazın kalibrasyonunda kullanılan referans radyasyonlar eğer

mümkünse radyasyondan korunma ölçüm cihazlarının kalibrasyonunda da benzer olarak kullanılması gerekir. Referans cihazların kalibrasyon faktörleri, belirli kalibrasyon enerjileri, spektrumu ve spesifik olarak uygulanan gerilimi ile ilişkilidir. Bu gerilim, cihazın kullanılacağı her zaman aynı değerde kullanılır. Radyasyonun geliş doğrultusundaki iyon odasının yöneliminin ölçüm sonuçlarını etkileyebilir. Bu yüzden iyon odasının referans yönünün (orientation), referans ölçüm cihazının kalibrasyonunda ve bu cihazın başka ölçüm cihazının kalibrasyonu için kullanımında, aynı şekilde kullanılması önemlidir(Anonymous 2000).

3.12.2 Referans Ölçüm Cihazı için Düzeltmeler

3.12.2.1 Basınç

Radyasyona maruz bırakılan iyon odaları(open ion chambers) için, o anki basınç değerinin (p) referans basınç değerinden sapması ($p_0=101,3 \text{ kPa}$) aşağıdaki gibi düzeltilir(Anonymous 2000).

$$k_{pr} = p_0/p \quad (3.12)$$

3.12.2.2 Sıcaklık

Radyasyona maruz bırakılan iyon odaları(open ion chambers) için, o anki sıcaklık için Kelvin birimindeki değerinin (T) referans sıcaklık değerinden sapması ($T_0=293,15 \text{ K}$) aşağıdaki gibi düzeltilir(Anonymous 2000).

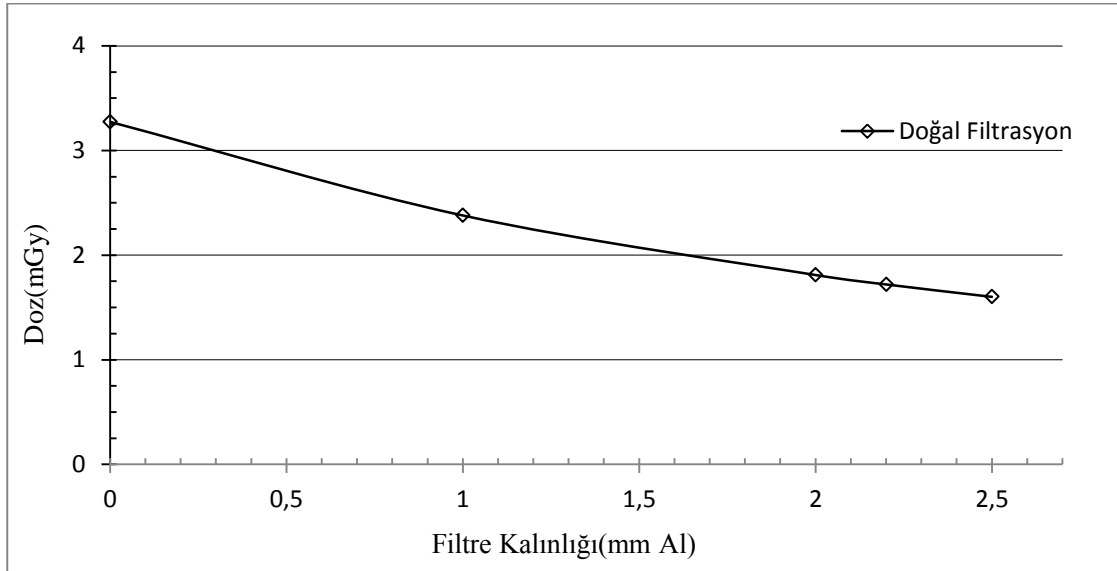
$$k_T = T/T_0 \quad (3.13)$$

4. BULGULAR

4.1 Doğal Filtrasyonun Belirlenmesi

X-ışın tüpünün doğal filtrasyonunun belirlenmesi için materyal ve yöntem bölümünde belirtilen şekilde ölçüm geometrisi kurulmuştur. X-ışın tüpüne uygulanan gerilim 60 kV 'a ayarlandıktan sonra 'Filtre Kalınlığı-Doz' grafiği çizilmiş ve buradan elde edilen 1. yarı kalınlık değeri, ISO 4037-1'de belirtilmiş olan '1. yarı kalınlık değerinden doğal filtrasyona geçiş' tablosunda yerine koyularak x- ışın sisteminin doğal filtrasyonu elde edilmiştir.

Doğal filtrasyon, 2,72 mm Al olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.1 60 kV_p gerilimde filtre kalınlığına göre doz değişimi

4.2. X-ışın Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi

4.2.1 AAPM TG-61' de Belirtilmiş Olan NIST X-ışın Demet Kaliteleri

NIST tungsten x-ışın demet kalitelerini filtrasyona göre üç gruba ayırır, light(*L*), moderate(*M*), ve heavy(*H*) filtrasyon. Demet kodları üretilen sürekli potansiyel kilovoltları takiben *L, M*, ya da *H* harflerinden oluşur. Örneğin, M100 orta filtrasyon ve 100 kV sürekli potansiyeli gösterir.

H demet kaliteleri genellikle koruyucu bir bariyere nüfuz etmiş beklenene en yakın radyasyon ve her üretilen gerilimde dar spektruma sahip olduklarından radyasyondan korunma aletlerinin kalibrasyonu için kullanılmaktadır. *M* demet kaliteleri genellikle radyoterapi cihazlarının kalibrasyonu için kullanılmaktadır. *L* demet kaliteleri ise ağırlıklı olarak filtresiz durumlarda sık sık kullanılan yüksek ışınlama hızları veren düşük filtre edilmiş demetlerin ölçümleri için kullanılan aletlerin kalibrasyonu için kullanılır(Anonymous 2001).

HVL ve tüp potansiyeli grafiğinin sonucunda elde edilen eğriler doğrultusunda her grubun özellikleri belirlenmiştir. Bu demet kaliteleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 NIST x-ışın demet kaliteleri(Anonymous 2001)

Demet Kodu ^a	Ek Filtrasyon ^b				HVL		Homojenlik Katsayı ^c , h(%)		Etkin Enerji ^d (keV)	Mesafe ^e (cm)
	Al (mm)	Cu (mm)	Sn (mm)	Pb (mm)	Al (mm)	Cu (mm)	Al	Cu		
<u>X-Işın Demet Kaliteleri</u>										
L10					0,035		89			50
L15					0,057		68			50
L20					0,069		73			50
L30	0,30				0,22		63			50
L40	0,53				0,50		59			50
L50	0,71				0,76		60			50
L80	1,45				1,83		57			50
L100	1,98				2,77		57			50
M20	0,27				0,15		69			50
M30	0,5				0,36		65			50
M40	0,89				0,73		69			50
M50	1,07				1,02		66			50
M60	1,56				1,68		66			50
M80	2,61				2,97		67			50
M100	5,0				5,02		73			50

M120 6,87 6,79 77

Çizelge 4.1 “NIST x-ışın demet kaliteleri(Anonymous 2001)” devamı

Demet Kodu ^a	Ek Filtrasyon ^b				HVL		Homojenlik Katsayısı ^c , h(%)		Etkin Enerji ^d (keV)	Mesafe ^e (cm)
	Al (mm)	Cu (mm)	Sn (mm)	Pb (mm)	Al (mm)	Cu (mm)	Al	Cu		
M150	5,0	0,25			10,2	0,67	87	62		
M200	4,1	1,12			14,9	1,69	95	69		
M250	5,0	3,2			18,5	3,2	98	86		
M300	4,0		6,5		22,0	5,3	100	97		
H10	0,105				0,05		91			50
H15	0,5				0,153		86			50
H20	1,01				0,36		91			50
H30	4,50				1,23		93			50
H40	4,53	0,26			2,90		90			50
H50	4,0			0,1	4,2	0,142	92	90	38	
H60	4,0	0,61			6,0	0,24	94	89	46	
H100	4,0	5,2			13,5	1,14	100	94	80	
H150	4,0	4,0	1,51		17,0	2,5	100	95	120	
H200	4,0	0,6	4,16	0,77	19,8	4,1	100	99	166	
H250	4,0	0,6	1,04	2,72	22,0	5,2	100	98	211	
H300	4,1		3,0	5,0	23,0	6,2	99	98	252	
S60	4,35				2,77		72			
S75	1,5				1,86		63			50

Gama-Işın Demet Kaliteleri

¹³⁷ Cs	10,8	662
⁶⁰ Co	14,9	1250

^a X-ışın demet kodları için, harfler light(L), moderate(M) ve heavy(H), ve numaralarda kilovolt olarak sürekli potansiyeli belirtir.

^b Tabloda bulunan ek filtre değerleri doğal filtrasyonu içermemektedir. Doğal filtrasyon transmisyon monitörlerinden alınan filtrasyon sonucunda yaklaşık olarak L10-L100, M20-M50 ve H10-H40 demet kodları için 1,0 mm Be; M60-M300, H50-H300 demet kodları için 7,0 mm Be'dir.

^c Homojenlik katsayısı 100 olarak alınır(1.HVL/2.HVL).

^d Etkin enerji, demet kalitesinin karakterizasyonu anlamını taşır.

^e Mesafe, radyasyon kaynağı ile dedektör merkezini ya da referans çizgi arasını ortaya koyar. Demet kodları için mesafe listeye konmamıştır, mesafeler 78 ve 200 cm aralığındadır, demet boyutuna arzu edilir şekilde ayarlanabilir.

4.2.2 ISO 4037-1' de Belirtilmiş Olan ISO X-Işın Demet Kaliteleri

ISO x-ışın demet kaliteleri NIST'te mevcuttur. NIST'te bulunan ISO demet kalitelerinin bir listesi de aşağıdaki şekildedir. NIST x-ışın demetlerindeki H grubu demet kaliteleri ISO 4037 dokümanında belirtilen ISO dar demet kaliteleri (NS) ile uyum içindedir. Bu uyum Almanya ulusal metroloji enstitüsünde bulunan PTB laboratuvarlarında test edilmiştir(Anonymous 2001).

Çizelge 4.2 ISO x-ışın demet kaliteleri(Anonymous 1996)

Demet Kodu ^a	Ek Filtrasyon ^b				1.HVL		2.HVL	
	Al (mm)	Cu (mm)	Sn (mm)	Pb (mm)	Al (mm)	Cu (mm)	Al (mm)	Cu (mm)
HK10					0,04		0,05	
HK20	0,15				0,13		0,16	
HK30	0,52				0,39		0,59	
HK60	3,19					0,08		0,11
HK100	3,90	0,15				0,31		0,46
HK200		1,15				1,72		2,43
HK250		1,60				2,52		3,37
HK280		3,06				3,45		4,07
HK300		2,51				3,46		4,21
WS60		0,3				0,18		0,21
WS80		0,5				0,35		0,44
WS110		2,0				0,96		
WS150			1,03			1,88		2,13
WS200			2,01			3,09		3,35
WS250			4,01			4,30		4,50
WS300			6,54			5,23		5,38
NS10	0,095				0,051		0,060	
NS15	0,49				0,15		0,18	
NS20	0,90				0,32		0,33	
NS25	2,04				0,69		0,76	
NS30	4,02				1,16		1,35	

Çizelge 4.2 “ISO x-ışın demet kaliteleri(Anonymous 1996)” devamı

Demet Kodu ^a	Ek Filtrasyon ^b				1.HVL		2.HVL	
	Al (mm)	Cu (mm)	Sn (mm)	Pb (mm)	Al (mm)	Cu (mm)	Al (mm)	Cu (mm)
NS40		0,21				0,085		0,092
NS60		0,6				0,25		0,26
NS80		2,0				0,59		0,66
NS100		5,0				1,13		1,19
NS120		4,99	1,04			1,70		1,85
NS150			2,50			2,40		2,52
NS200		2,04	2,98			4,09		4,20
NS250			2,01	2,97		5,26		5,32
NS300			2,99	4,99		6,17		6,30
LK10	0,30				0,062			
LK20	2,04				0,43		0,43	
LK30	3,98	0,18			1,48			
LK35		0,25			2,16		2,16	
LK55		1,19				0,26		
LK70		2,64				0,51		
LK100		0,52	2,0			1,27		
LK125		1,0	4,0			2,04		
LK170		1,0	3,0	1,5		3,47		
LK210		0,5	2,0	3,5		4,54		
LK240		0,5	2,0	5,5		5,26		

^a Demet kodlarında, harfler düşük hava kerma hızını(LK), yüksek hava kerma hızını(HK), dar spektrumu(NS) ve geniş spektrum(W.S); ve numaralarda kilovolt olarak sürekli potansiyeli belirtir.

^b Doğal filtrasyon; tüp potansiyeli 30 kV ve altında olan demet kodları için yaklaşık olarak 1,0 mm Be; HK60-HK100 için yaklaşık olarak 7,0 mm Be ve diğer bütün tekniklerde 4 mm Al'a ayarlanmalıdır.

4.2.3 AAPM TG-61 Protokolünde Belirtilmiş Olan NIST X-ışın Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi

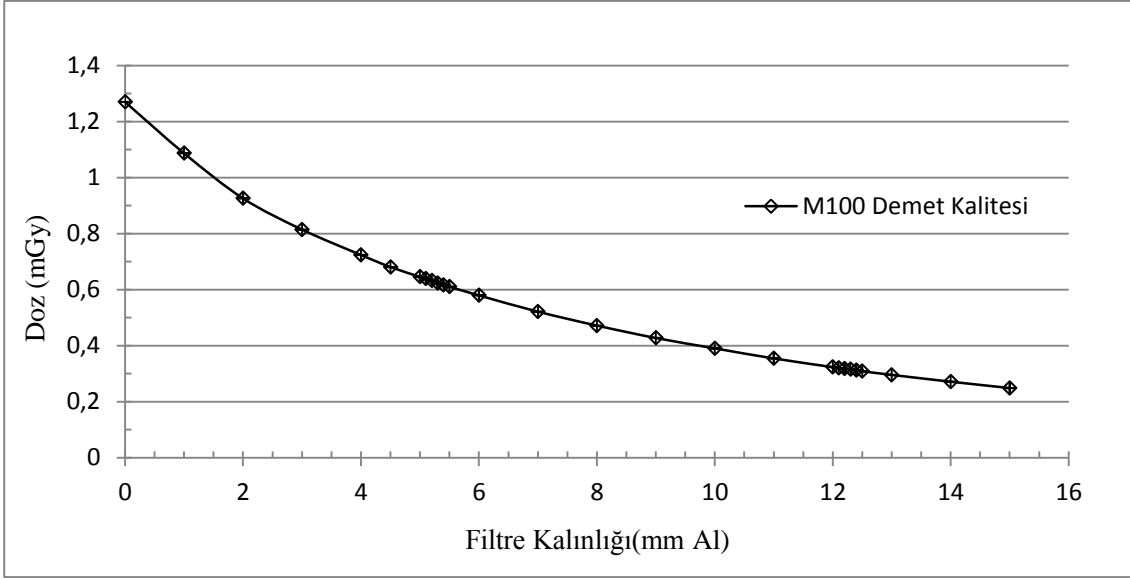
NIST X-ışın demet kalitelerinin elde edilmesi için aşağıda belirtilen şekilde ölçüm geometrisi kurulmuştur. Odak noktası ile dedektör arasındaki mesafe 100 cm'ye ayarlanmıştır. Soğurucu filtreler % 99,9 saflıktadır ve dedektör ile aralarındaki mesafe 88 cm'dir. Ölçümlerin alındığı referans dedektör PTW marka TM 32005 model küresel iyon odasıdır.



Şekil 4.2 NIST X-ışın demet kalitelerinin elde edildiği düzenek

4.2.3.1 AAPM TG-61 Protokolünde Belirtilmiş Olan M100 NIST X-ışın Demet Kalitesinin Elde Edilmesi

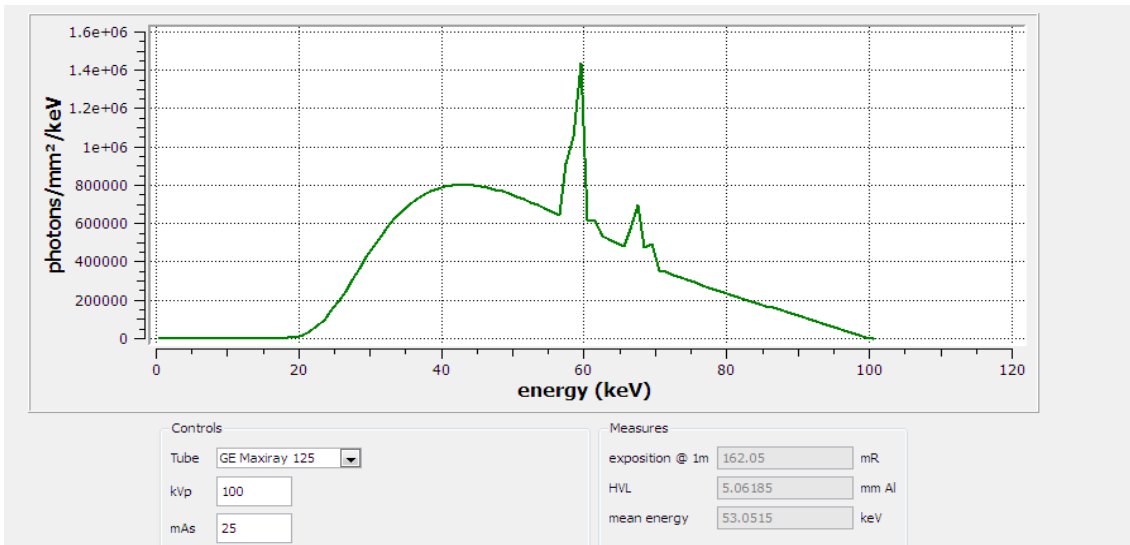
Doz ölçümleri farklı kalınlıklarda filtreler kullanılarak kurulan deney düzeneğinde iyon odasıyla en az 5 ölçüm olmak üzere ölçümler alınmıştır. Elde edilen verilerle 'Filtre Kalınlığı-Doz' grafikleri çizilerek buradaki sonuçlardan 1. ve 2. HVL değerleri hesaplanmıştır.



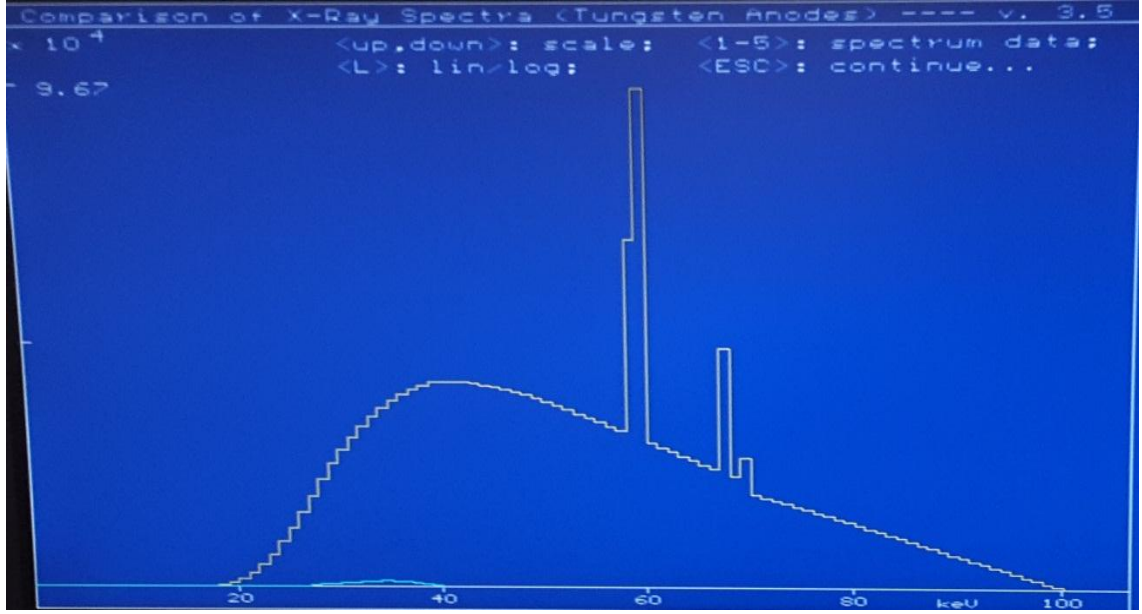
Şekil 4.3 M100 demet kalitesi için filtre kalınlığına göre doz değişimi

Çizelge 4.3 M100 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

Toplam Tüp Filtrasyonu (mm Al)	Nominal 1.HVL (mm Al)	Elde Edilen 1.HVL (mm Al)	1.HVL Farkı (mm Al)	Elde Edilen 2.HVL (mm Al)	Nominal Homojenlik Katsayısı	Elde Edilen Homojenlik Katsayısı	Homojenlik Katsayısı Farkı
Inh+2	5,02	5,0	-0,02	12,2	0,73	0,69	-0,04



Şekil 4.4 M100, 100 kV_p demet kalitesi için SpectrumGUI programından elde edilen spektrum



Şekil 4.5 M100, 100 kV_p demet kalitesi için Xcomp5r programından elde edilen spektrum

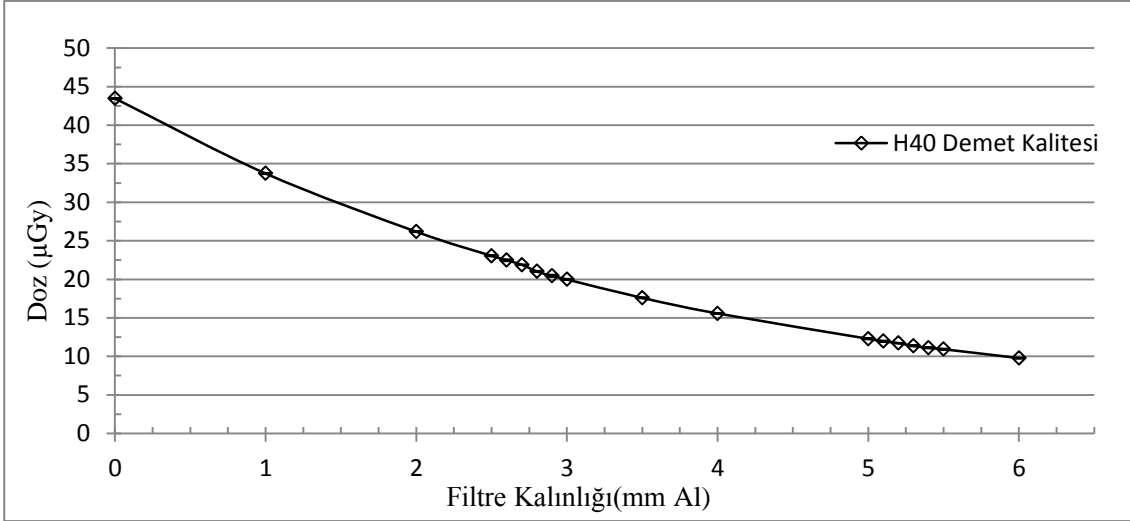
X-ışın sisteminin doğal(inherent) filtrasyonuna 2 mm Al ilave edildiğinde AAPM TG-61 protokolünde belirtilen M100 demet kalitesi elde edilmiştir.

Çizelge 4.4 M100 demet kalitesi için ölçülen ve SpectrumGUI, Xcomp5r programlarından elde edilen 1. HVL değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi	Filtrasyon Kalınlığı (mm Al)	Nominal 1. HVL	Ölçülen 1. HVL	SpectrumGUI Prog. Hesaplanan 1.HVL	Xcomp5r Prog. Hesaplanan 1.HVL
M100	100	Inh+2	5,02	5,0	5,06	5,26

4.2.3.2 AAPM TG-61 Protokolünde Belirtilmiş Olan H40 NIST X-ışın Demet Kalitesinin Elde Edilmesi

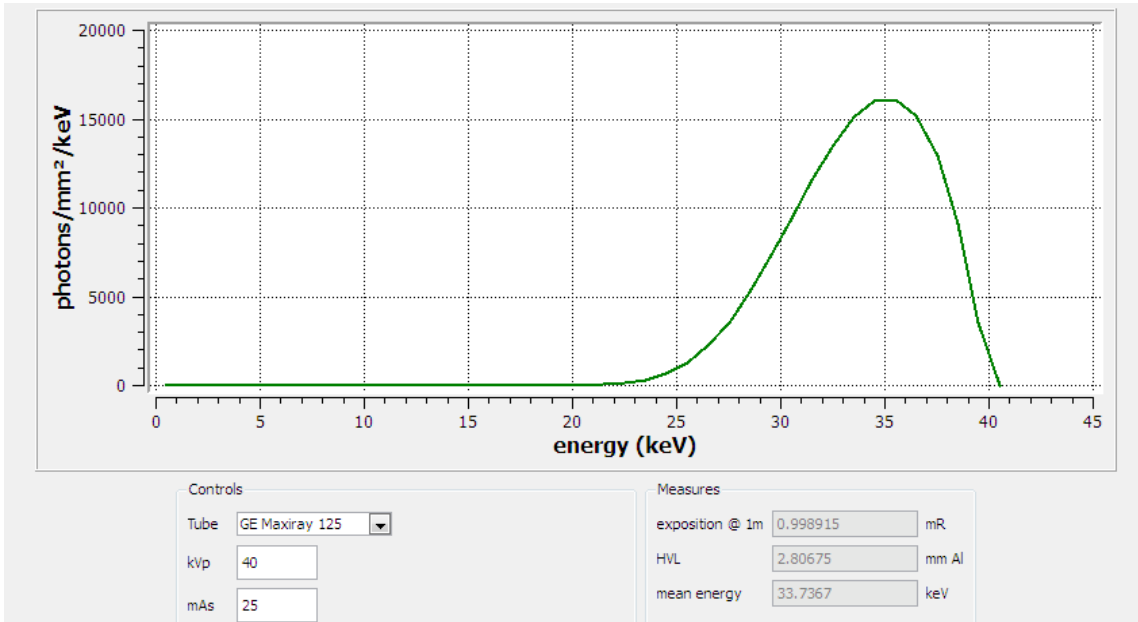
Doz ölçümleri farklı kalınlıklarda filtreler kullanılarak kurulan deney düzeneğinde iyon odasıyla alınmıştır. Elde edilen verilerle 'Filtre Kalınlığı-Doz' grafikleri çizilerek buradaki sonuçlardan 1. ve 2. HVL değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.6 H40 demet kalitesi için filtre kalınlığına göre doz değişimi

Çizelge 4.5 H40 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

Toplam Tüp Filtrasyonu (mm Al +mmCu)	Nominal 1.HVL (mm Al)	Elde Edilen 1.HVL (mm Al)	1.HVL Farkı (mm Al)	Elde Edilen 2.HVL (mm Al)	Nominal Homojenlik Katsayısı	Elde Edilen Homojenlik Katsayısı	Homojenlik Katsayısı Farkı
Inh+1,5+0,25	2,90	2,9	0	2,44	0,90	1,18	+0,28



Şekil 4.7 H40, 40 kV_p demet kalitesi için SpectrumGUI programından elde edilen spektrum



Şekil 4.8 H40, 40 kV_p demet kalitesi için Xcomp5r programından elde edilen spektrum

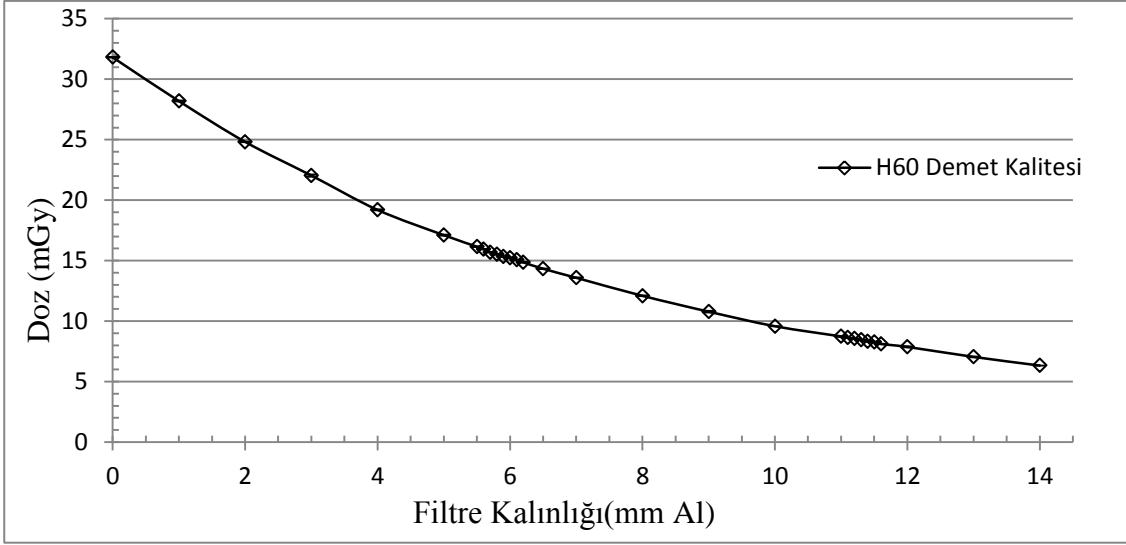
H40 demet kalitesi için ölçülen ve Şekil 4.7’de gösterilen SpectrumGUI, Şekil 4.8’de gösterilen Xcomp5r programlarından elde edilerek 1. HVL değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 4.6’te verilmiştir.

Çizelge 4.6 H40 demet kalitesi için ölçülen ve SpectrumGUI, Xcomp5r programlarından elde edilen 1. HVL değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi	Filtrasyon Kalınlığı (mm Al+mm Cu)	Nominal 1. HVL (mm Al)	Ölçülen 1. HVL (mm Al)	SpectrumGUI Prog. Hesaplanan 1.HVL	Xcomp5r Prog. Hesaplanan 1.HVL
H40	40	Inh+1,5+0,25	2,90	2,9	2,80	2,77

4.2.3.3 AAPM TG-61 Protokolünde Belirtilmiş Olan H60 NIST X-ışın Demet Kalitesinin Elde Edilmesi

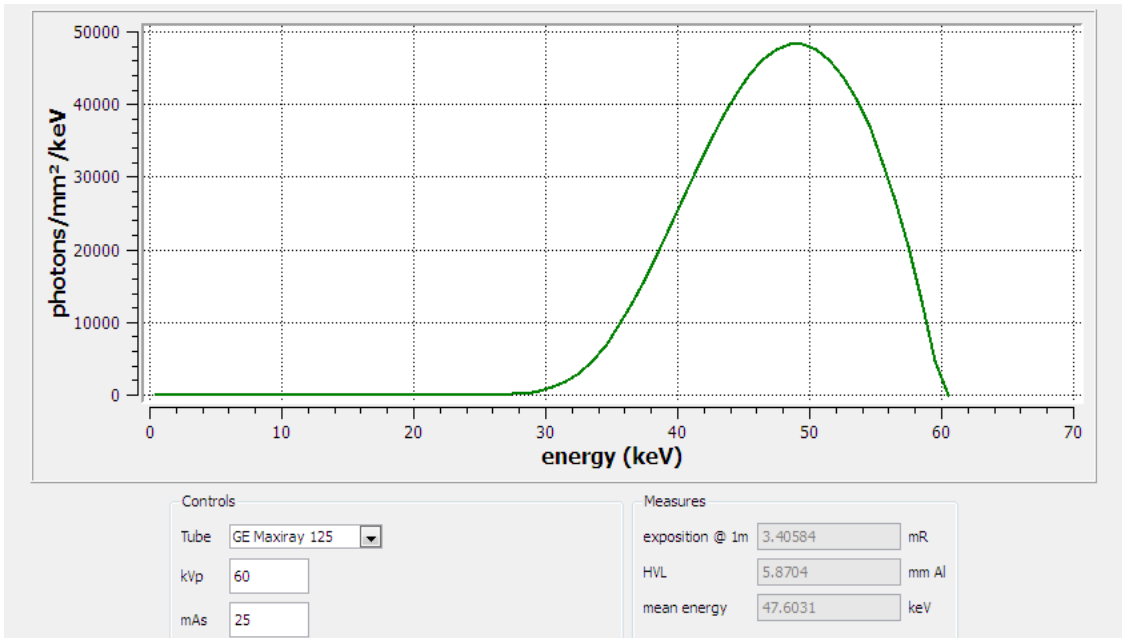
Doz ölçümleri farklı kalınlıklarda filtreler kullanılarak kurulan deney düzeneğinde iyon odasıyla alınmıştır. Elde edilen verilerle ‘Filtre Kalınlığı-Doz’ grafikleri çizilerek buradaki sonuçlardan 1. ve 2. HVL değerleri hesaplanmıştır.



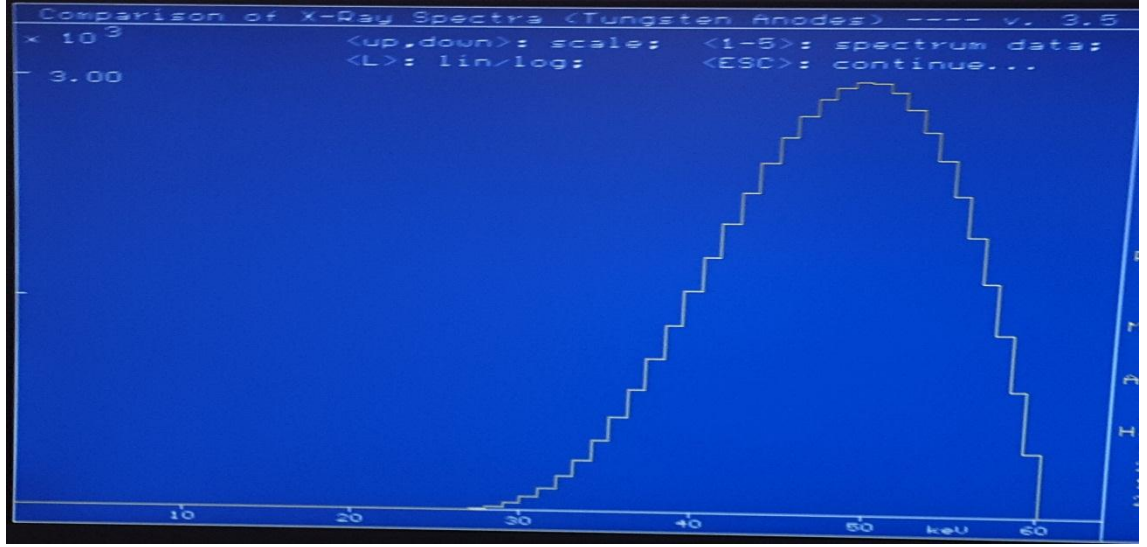
Şekil 4.9 H60 demet kalitesi için filtre kalınlığına göre doz değişimi

Çizelge 4.7 H60 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

Toplam Tüp Filtrasyonu (mm Al +mmCu)	Nominal 1.HVL (mm Al)	Elde Edilen 1.HVL (mm Al)	1.HVL Farkı (mm Al)	Elde Edilen 2.HVL (mm Al)	Nominal Homojenlik Katsayısı	Elde Edilen Homojenlik Katsayısı	Homojenlik Katsayısı Farkı
Inh+1+0,6	6	6	0	5,5	0,94	1,09	+0,15



Şekil 4.10 H60, 60 kV_p demet kalitesi için SpectrumGUI programından elde edilen spektrum



Şekil 4.11 H60, 60kV_p demet kalitesi için Xcomp5r programından elde edilen spektrum

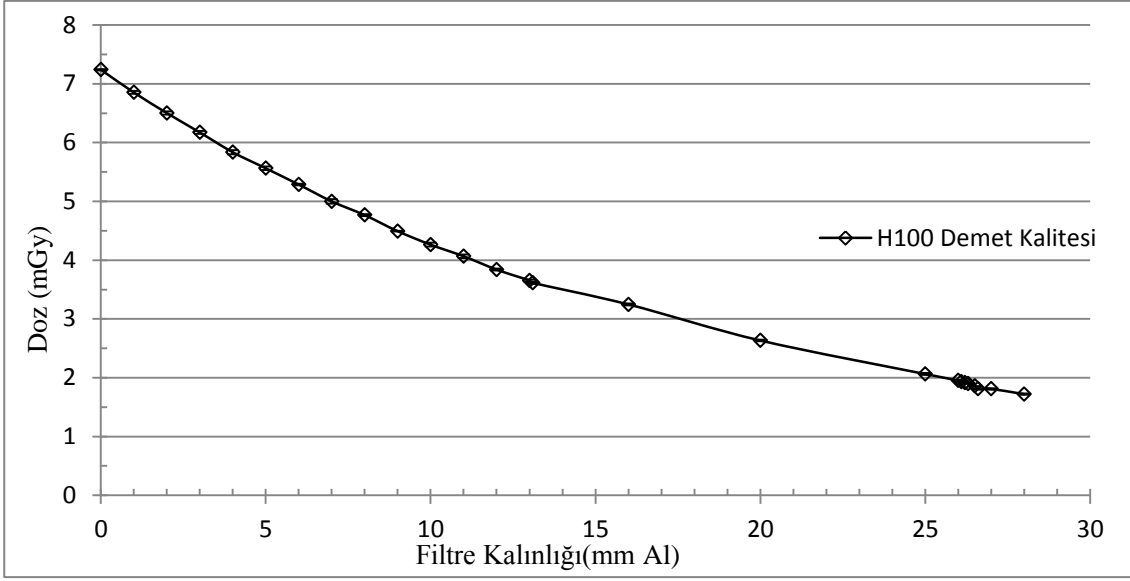
H60 demet kalitesi için ölçülen ve Şekil 4.10’de gösterilen SpectrumGUI, Şekil 4.11’de gösterilen Xcomp5r programlarından elde edilerek 1. HVL değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 4.8’te verilmiştir.

Çizelge 4.8 H60 demet kalitesi için ölçülen ve SpectrumGUI, Xcomp5r programlarından elde edilen 1. HVL değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi	Filtrasyon Kalınlığı (mm Al + mm Cu)	Nominal 1. HVL (mm Al)	Ölçülen 1. HVL (mm Al)	SpectrumGUI Prog. Hesaplanan 1.HVL	Xcomp5r Prog. Hesaplanan 1.HVL
H60	60	Inh+1+0,6	6	6	5,87	5,85

4.2.3.4 AAPM TG-61 Protokolünde Belirtilmiş Olan H100 NIST X-ışın Demet Kalitesinin Elde Edilmesi

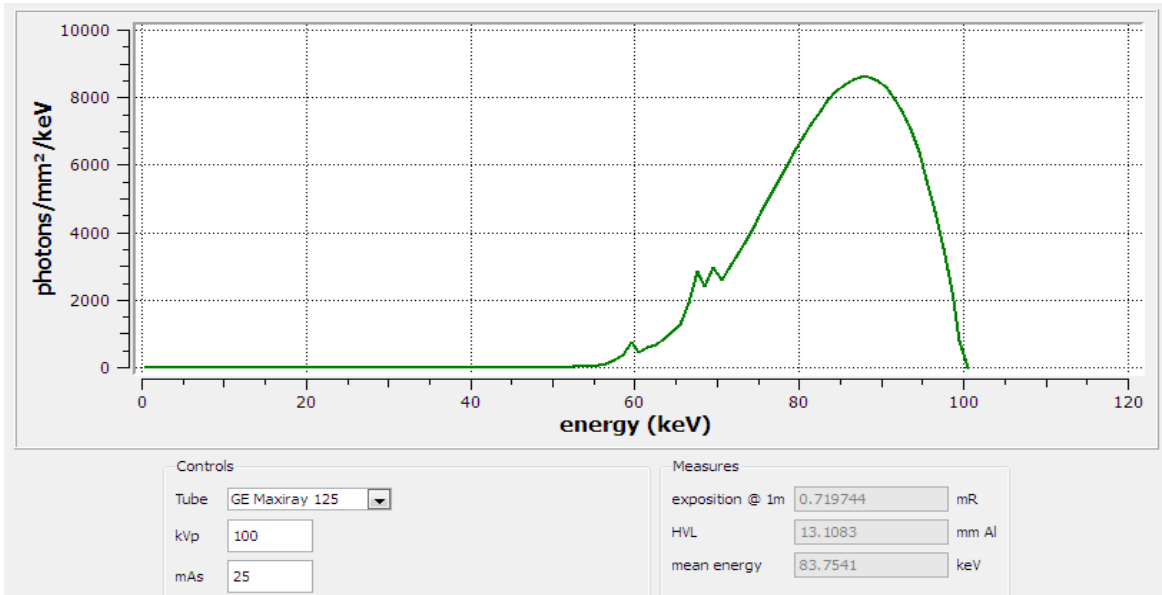
Doz ölçümleri farklı kalınlıklarda filtreler kullanılarak kurulan deney düzeneğinde iyon odasıyla alınmıştır. Elde edilen verilerle ‘Filtre Kalınlığı-Doz’ grafikleri çizilerek buradaki sonuçlardan 1. ve 2. HVL değerleri hesaplanmıştır.



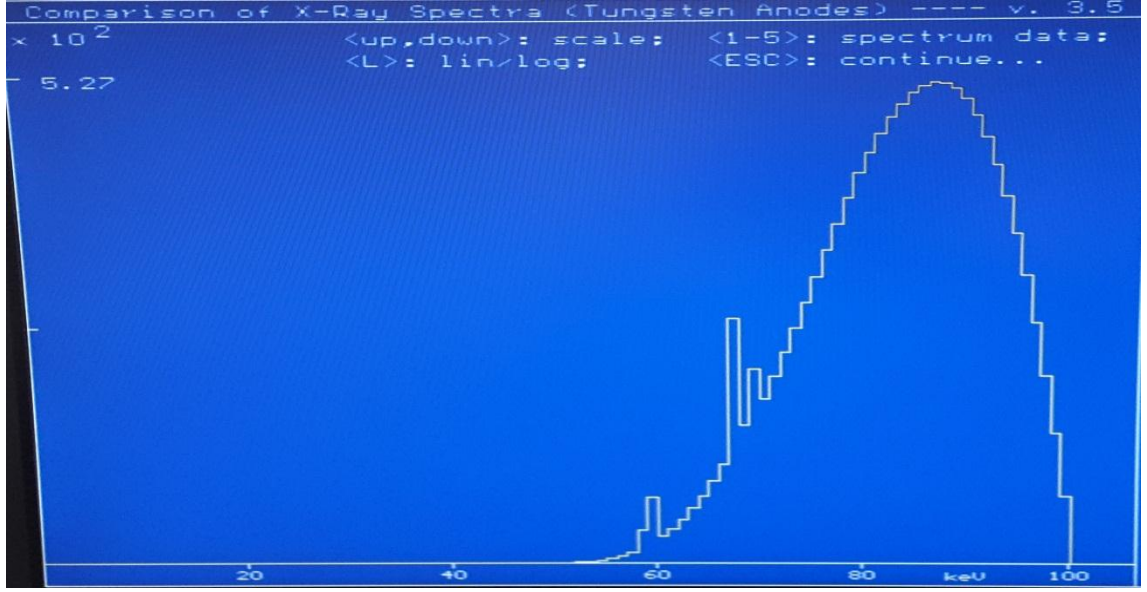
Şekil 4.12 H100 demet kalitesi için filtre kalınlığına göre doz değişimi

Çizelge 4.9 H100 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

Toplam Tüp Filtrasyonu (mm Al +mmCu)	Nominal 1.HVL (mm Al)	Elde Edilen 1.HVL (mm Al)	1.HVL Farkı (mm Al)	Elde Edilen 2.HVL (mm Al)	Nominal Homojenlik Katsayısı	Elde Edilen Homojenlik Katsayısı	Homojenlik Katsayısı Farkı
Inh+1+5,2	13,5	13,5	0	12,9	1,00	1,04	+0,04



Şekil 4.13 H100, 100 kV_p demet kalitesi için SpectrumGUI programından elde edile spektrum



Şekil 4.14 H100, 100 kV_p demet kalitesi için Xcomp5r programından elde edilen spektrum

H100 demet kalitesi için ölçülen ve Şekil 4.13’de gösterilen SpectrumGUI, Şekil 4.14’de gösterilen Xcomp5r programlarından elde edilerek 1. HVL değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.10 H100 demet kalitesi için ölçülen ve SpectrumGUI, Xcomp5r programlarından elde edilen 1. HVL değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi	Filtrasyon Kalınlığı (mm Al + mm Cu)	Nominal 1. HVL (mm Al)	Ölçülen 1. HVL (mm Al)	SpectrumGUI Prog. Hesaplanan 1.HVL	Xcomp5r Prog. Hesaplanan 1.HVL
H100	100	Inh+1+5,2	13,5	13,5	13,1	13,01

4.2.4 ISO 4037-1’de Belirtilmiş Olan ISO X-ışın Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi

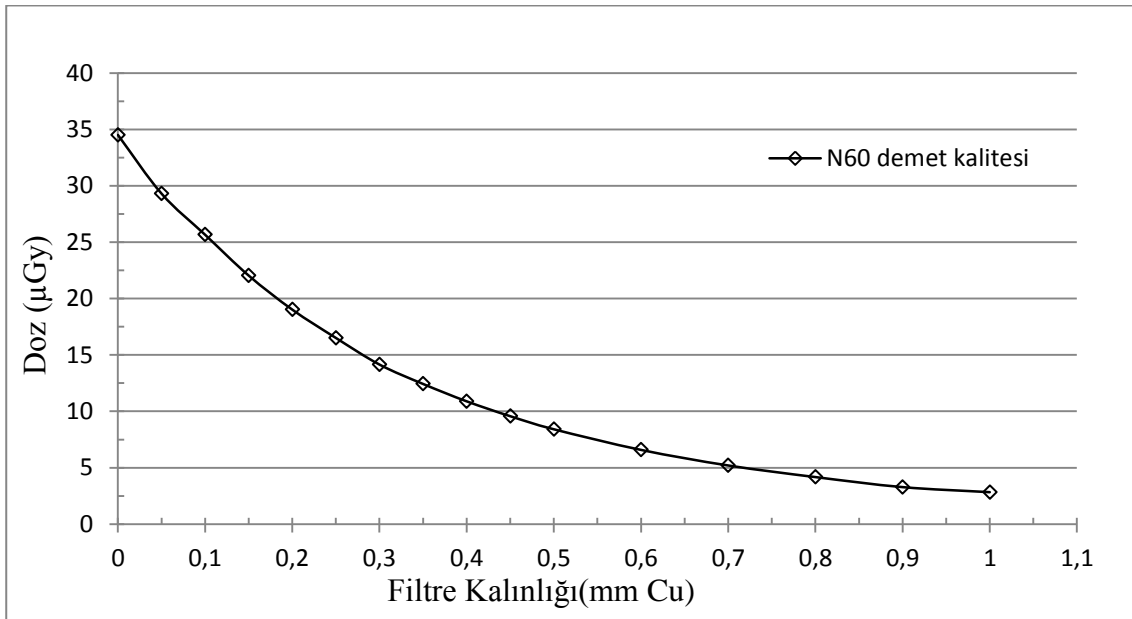
ISO X-ışın demet kalitelerinin elde edilmesi için aşağıda belirtilen şekilde ölçüm geometrisi kurulmuştur. Odak noktası ile dedektör arasındaki mesafe 100 cm’ye ayarlanmıştır. Soğurucu filtreler % 99,9 saflıktadır ve dedektör ile aralarındaki mesafe 88 cm’dir. Ölçümlerin alındığı referans dedektör PTW marka TM 32005 model küresel iyon odasıdır.



Şekil 4.15 ISO demet kalitelerinin elde edildiği düzenek

4.2.4.1 ISO 4037-1’de Belirtilmiş Olan N60 ISO X-ışın Demet Kalitesinin Elde Edilmesi

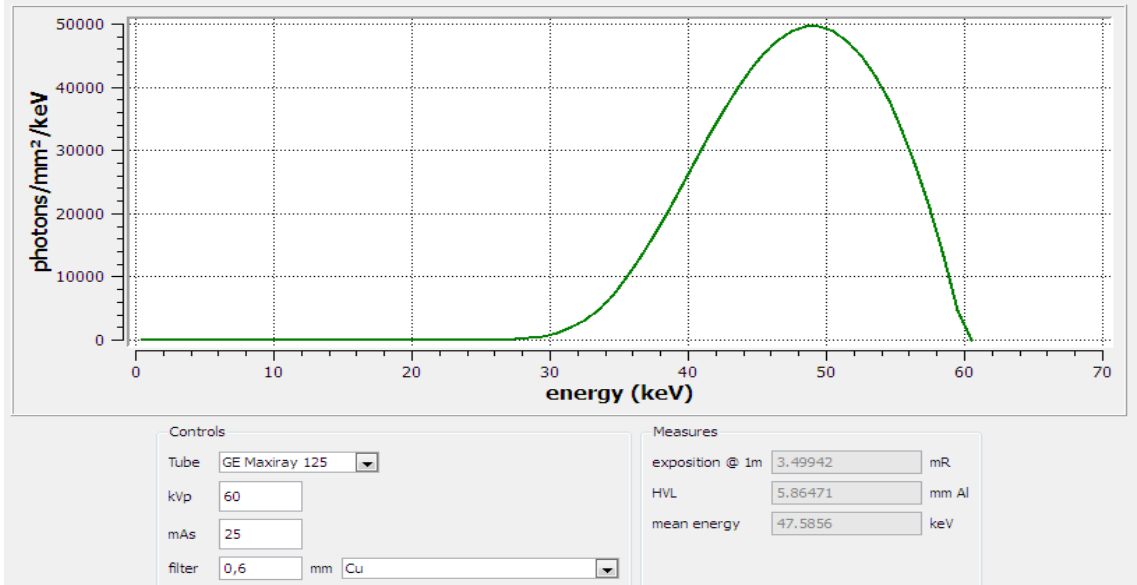
Doz ölçümleri farklı kalınlıklarda filtreler kullanılarak kurulan deney düzeneğinde iyon odasıyla alınmıştır. Elde edilen verilerle ‘Filtre Kalınlığı-Doz’ grafikleri çizilerek buradaki sonuçlardan 1. ve 2. HVL değerleri hesaplanmıştır.



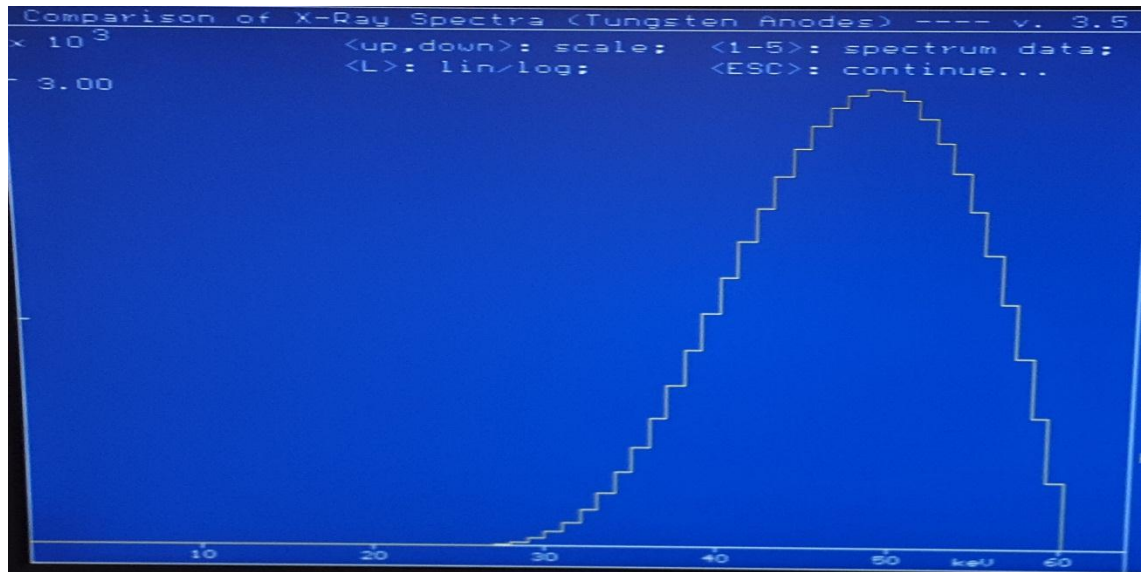
Şekil 4.16 N60 demet kalitesi için filtre kalınlığına göre doz değişimi

Çizelge 4.11 N60 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

Toplam Tüp Filtrasyonu (mm Al +mmCu)	Nominal 1.HVL (mm Cu)	Elde Edilen 1.HVL (mm Cu)	1.HVL Farkı (mm Cu)	Elde Edilen 2.HVL (mm Cu)	Nominal Homojenlik Katsayısı	Elde Edilen Homojenlik Katsayısı	Homojenlik Katsayısı Farkı
Inh+1+0,6	0,24	0,24	0	0,27	0,92	0,88	-0,04



Şekil 4.17 N60, 60 kV_p demet kalitesi için SpectrumGUI programından elde edilen spektrum



Şekil 4.18 N60, 60 kV_p demet kalitesi için Xcomp5r programından elde edilen spektrum

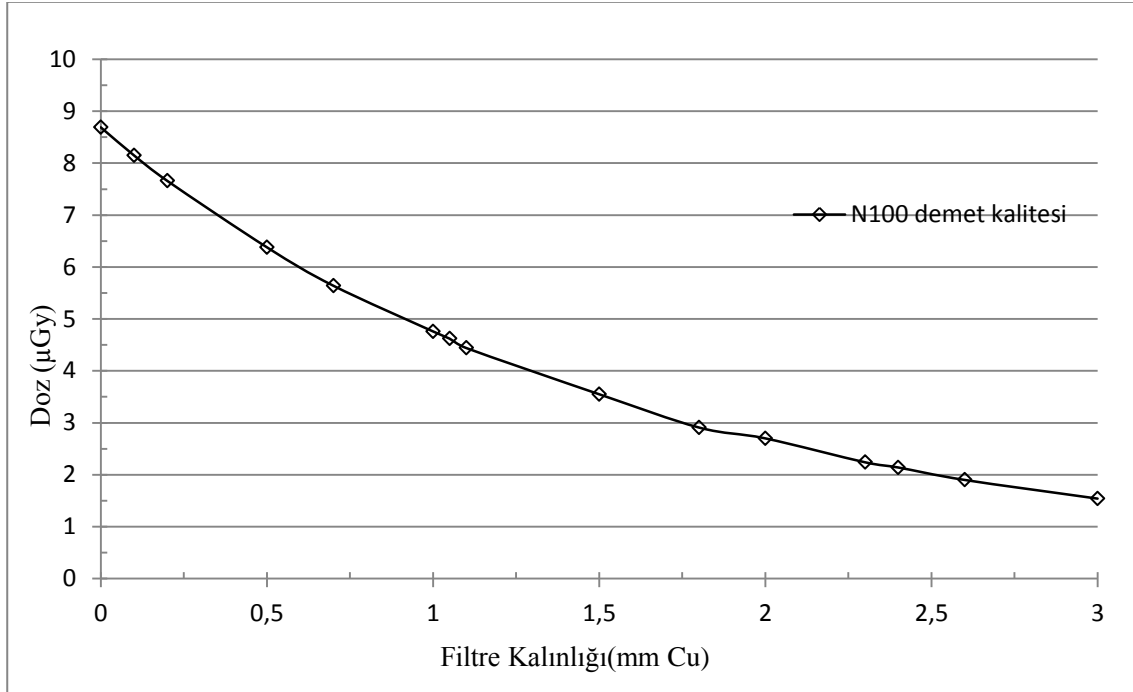
ISO N60 demet kalitesi için ölçülen ve Şekil 4.17’de gösterilen SpectrumGUI, Şekil 4.18’de gösterilen Xcomp5r programlarından elde edilerek 1. HVL değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12 N60 demet kalitesi için ölçülen ve SpectrumGUI, Xcomp5r programlarından elde edilen 1. HVL değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi	Filtrasyon Kalınlığı (mm Al + mm Cu)	Nominal 1. HVL (mm Cu)	Ölçülen 1. HVL (mm Cu)	SpectrumGUI Prog. Hesaplanan 1.HVL (mm Cu)	Xcomp5r Prog. Hesaplanan 1.HVL (mm Cu)
N60	60	Inh+1+0,6	0,24	0,24	-	0,239

4.2.4.2 ISO 4037-1’de Belirtilmiş Olan N100 ISO X-ışın Demet Kalitesinin Elde Edilmesi

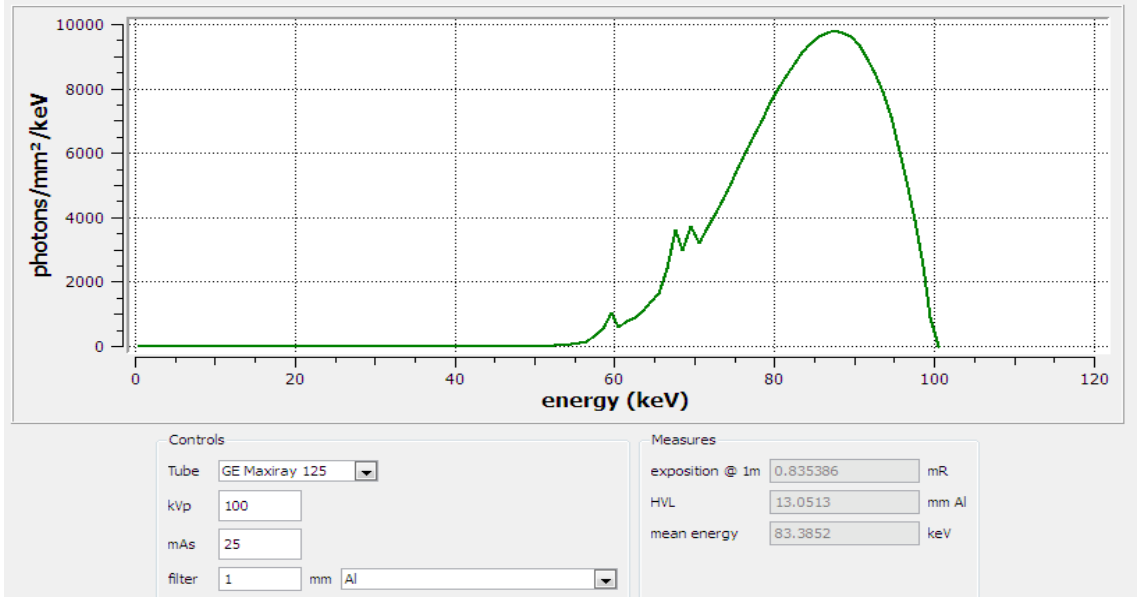
Doz ölçümleri farklı kalınlıklarda filtreler kullanılarak kurulan deney düzeneğinde iyon odasıyla alınmıştır. Elde edilen verilerle ‘Filtre Kalınlığı-Doz’ grafikleri çizilerek buradaki sonuçlardan 1. ve 2. HVL değerleri hesaplanmıştır.



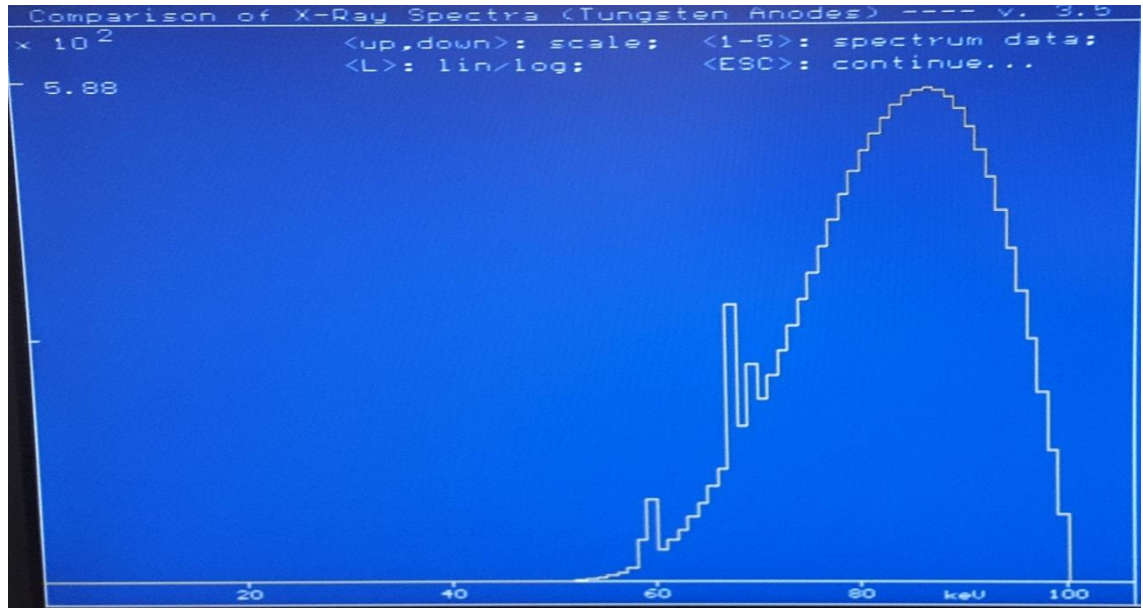
Şekil 4.19 N100 demet kalitesi için filtre kalınlığına göre doz değişimi

Çizelge 4.13 N100 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

Toplam Tüp Filtrasyonu (mm Al +mmCu)	Nominal 1.HVL (mm Cu)	Elde Edilen 1.HVL (mm Cu)	1.HVL Farkı (mm Cu)	Elde Edilen 2.HVL (mm Cu)	Nominal Homojenlik Katsayısı	Elde Edilen Homojenlik Katsayısı	Homojenlik Katsayısı Farkı
Inh+1+5	1,11	1,16	+0,06	1,19	0,94	0,97	+0,03



Şekil 4.20 N100, 100 kV_p demet kalitesi için SpectrumGUI programından elde edilen spektrum



Şekil 4.21 N100, 100 kV_p demet kalitesi için Xcomp5r programından elde edilen spektrum

Çizelge 4.14 N100 demet kalitesi için ölçülen ve SpectrumGUI, Xcomp5r programlarından elde edilen 1. HVL değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi	Filtrasyon Kalınlığı (mm Al + mm Cu)	Nominal 1. HVL (mm Cu)	Ölçülen 1. HVL (mm Cu)	Spectrum GUI Prog. Hesaplanan 1.HVL (mm Cu)	Xcomp5r Prog. Hesaplanan 1.HVL (mm Cu)
N100	100	Inh+1+5	1,11	1,16	-	1,118

4.3 Elde edilmiş olan NIST X-ışın demet kalitelerinin ve ISO X-ışın demet kalitelerinin Karşılaştırılması

NIST X-ışın demet kalitelerindeki H grubu demet kaliteleri ile ISO 4037 dokümanında belirtilen ISO dar demet kaliteleri (NS) ile uyum içindedir. Bu uyum Almanya ulusal metroloji enstitüsünde bulunan PTB laboratuvarlarında test edilmiştir. Bu demet kalitelerinden elde edilen H60 ile N60, H100 ile N100 karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.15 NIST ve ISO x-ışın demet kalitelerinin karşılaştırılması

Demet Kalitesi	Toplam Tüp Filtrasyonu (mm Al +mmCu)	Nominal 1.HVL	Elde Edilen 1.HVL	1.HVL Farkı	Elde Edilen 2.HVL	Nominal Homojenlik Katsayısı	Elde Edilen Homojenlik Katsayısı	Homojenlik Katsayısı Farkı
H60	Inh+1+0,6	6 mm Al	6 mm Al	0	5,5 mm Al	0,94	1,09	+0,15
N60	Inh+1+0,6	0,24 mm Cu	0,24 mm Cu	0	0,27 mm Cu	0,92	0,88	-0,04
H100	Inh+1+5,2	13,5 mm Al	13,5 mm Al	0	12,9 mm Al	1,00	1,04	+0,04
N100	Inh+1+5	1,11 mm Cu	1,16 mm Cu	+0,06	1,19 mm Cu	0,94	0,97	+0,03

4.4 X-ışın Sisteminde Elde Edilen NIST ve ISO Demet Kaliteleriyle Foton Dedektörlerinin Kalibrasyon İşlemi

Bölüm 2’de belirtilen 1. yöntem kullanılıp M100, H60, N60, H100 ve N100 demet kaliteleri ile gerçekleştirilen kalibrasyon işlemleri sonucunda elde edilen kalibrasyon faktörleri aşağıdaki çizelgede belirtilmiştir.

Çizelge 4.16 M100 için referans dedektör ve kalibrasyonu yapılacak olan dedektörlerle alınan ölçümler

Dedektör	1.Ölçüm (μGy)	2.Ölçüm (μGy)	3.Ölçüm (μGy)	4.Ölçüm (μGy)	5.Ölçüm (μGy)	Ortalama (μGy)	Değişim katsayısı (%)
Referans							
PTW, 30 cm ³ TM 23361	262,8	262,3	262,6	262,8	262,5	262,6	0,08
Radcal 6 cc	271,5	274,2	275,5	275,3	275,1	274,32	0,6
Radcal 60cc	263,1	263,2	263,5	263,2	263,7	263,34	0,09
Unfors 543	299	300	300	300	301	300	0,23

*Ölçümler aynı gün içerisinde alındığından dolayı basınç sıcaklık düzeltme faktörleri bütün ölçümler için aynıdır.

Çizelge 4.17 NIST M100 demet kalitesi kullanılarak gerçekleştirilen iyon odaları için belirlenen kalibrasyon faktörleri

Dedektör	Kalibrasyon Faktörü
Radcal 10x6-6, S/N = 03-0458	0,957 \pm 0,033
Radcal 10x6-60, S/N = 07-0361	0,997 \pm 0,034
Unfors 543, S/N: 6433	0,875 \pm 0,030

Çizelge 4.18 NIST H60 ve ISO N60* demet kalitesi kullanılarak gerçekleştirilen iyon odaları için belirlenen kalibrasyon faktörleri

Dedektör	Kalibrasyon Faktörü
Radcal 10x6-6, S/N = 03-0458	0,944 ± 0,062
Radcal 10x6-60, S/N = 07-0361	0,888 ± 0,058
Unfors 543, S/N: 6433	0,981 ± 0,064

* NIST H60 demet kalitesi ISO N60 demet kalitesi ile aynı karakteristiklere sahiptir.

Çizelge 4.19 NIST H60 ve ISO N60 demet kaliteleri ile elde edilen kalibrasyon faktörlerinin karşılaştırılması

Dedektör	NIST H60 ile elde edilen Kalibrasyon Faktörü	ISO N60 ile elde edilen Kalibrasyon Faktörü	%Uyum
Radcal 10x6-6, S/N = 03-0458	0,944 ± 0,062	0,944 ± 0,062	100
Radcal 10x6-60 S/N = 07-0361	0,888 ± 0,058	0,888 ± 0,058	100
Unfors 543 S/N: 6433	0,981 ± 0,064	0,981 ± 0,064	100

Çizelge 4.20 NIST H100 demet kalitesi kullanılarak gerçekleştirilen iyon odaları için belirlenen kalibrasyon faktörleri

Dedektör	Kalibrasyon Faktörü
Radcal 10x6-6, S/N = 03-0458	0,935 ± 0,032
Radcal 10x6-60 S/N = 07-0361	0,883 ± 0,030

Çizelge 4.21 ISO N100 demet kalitesi kullanılarak gerçekleştirilen iyon odaları için belirlenen kalibrasyon faktörleri

Dedektör	Kalibrasyon Faktörü
Radcal 10x6-6, S/N = 03-0458	0,944 ± 0,033
Radcal 10x6-60 S/N = 07-0361	0,879 ± 0,030

Çizelge 4.22 NIST H100 ve ISO N100 demet kaliteleri ile elde edilen kalibrasyon faktörlerinin karşılaştırılması

Dedektör	NIST H100 ile elde edilen Kalibrasyon Faktörü	ISO N100 ile elde edilen Kalibrasyon Faktörü	% Uyum
Radcal 10x6-6, S/N = 03-0458	0,935 ± 0,032	0,944 ± 0,033	96
Radcal 10x6-60 S/N = 07-0361	0,883 ± 0,030	0,879 ± 0,030	99

Çizelge 4.22’de NIST H100 ve ISO N100 demet kalitesi kullanılarak gerçekleştirilen Radcal marka iyon odaları kalibrasyon işleminde iki farklı kalibrasyon faktörlerini %96-99 arasında uyumlu olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.23 6 cm³ iyon odası (Radcal 10x6-6, S/N = 03-0458) için farklı demetlerde elde edilen kalibrasyon faktörleri

Kullanılan Demet Kalitesi	Elde Edilen Kalibrasyon Faktörü
NIST M100	0,957 ± 0,033
NIST H60	0,944 ± 0,062
ISO N60	0,944 ± 0,062
NIST H100	0,935 ± 0,032
ISO N100	0,944 ± 0,033
Ortalama Değer	0,945± 0,044

Çizelge 4.24 60 cm³ iyon odası (Radcal 10x6-60 S/N = 07-03618) için farklı demetlerde elde edilen kalibrasyon faktörleri

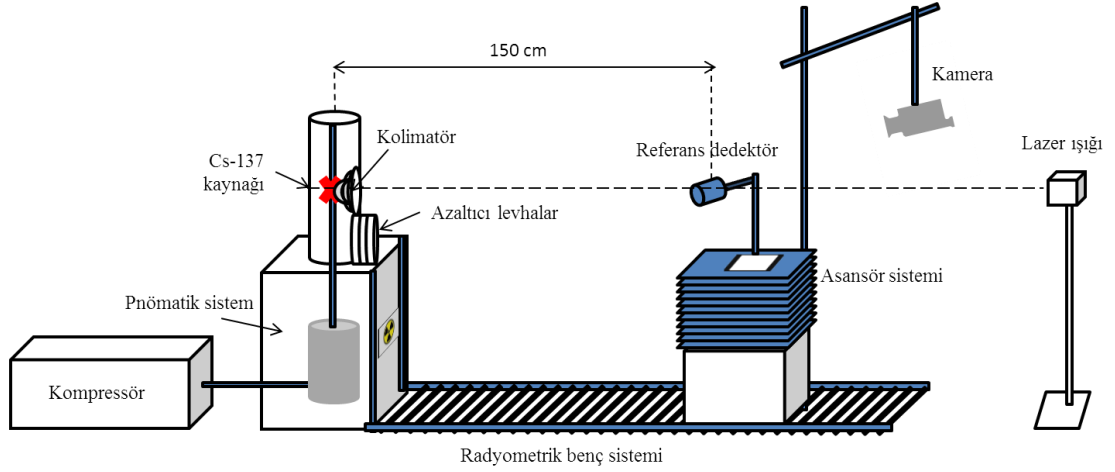
Kullanılan Demet Kalitesi	Elde Edilen Kalibrasyon Faktörü
NIST M100	0,997 ± 0,034
NIST H60	0,888 ± 0,058
ISO N60	0,888 ± 0,058
NIST H100	0,883 ± 0,03
ISO N100	0,879 ± 0,03
Ortalama Değer	0,907± 0,042

Çizelge 4.25 63,18 mm³ iyon odası (Unfors 543 S/N = 6433) için farklı demetlerde elde edilen kalibrasyon faktörleri

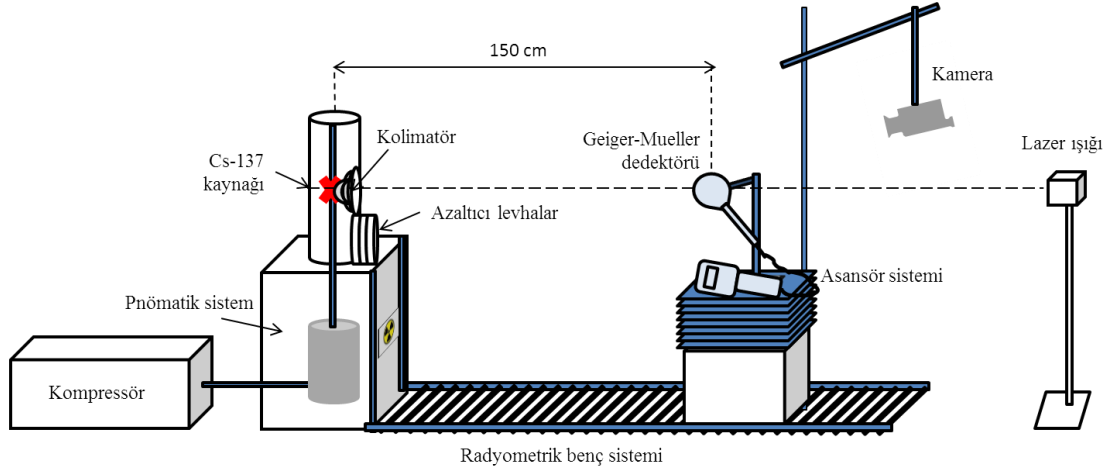
Kullanılan Demet Kalitesi	Elde Edilen Kalibrasyon Faktörü
NIST M100	0,875 ± 0,03
NIST H60	0,981 ± 0,064
ISO N60	0,981 ± 0,064
NIST H100	-
ISO N100	-
Ortalama Değer	0,945± 0,052

4.5 ^{137}Cs Işınlama Sisteminde Foton Dedektörlerinin Kalibrasyon İşlemi

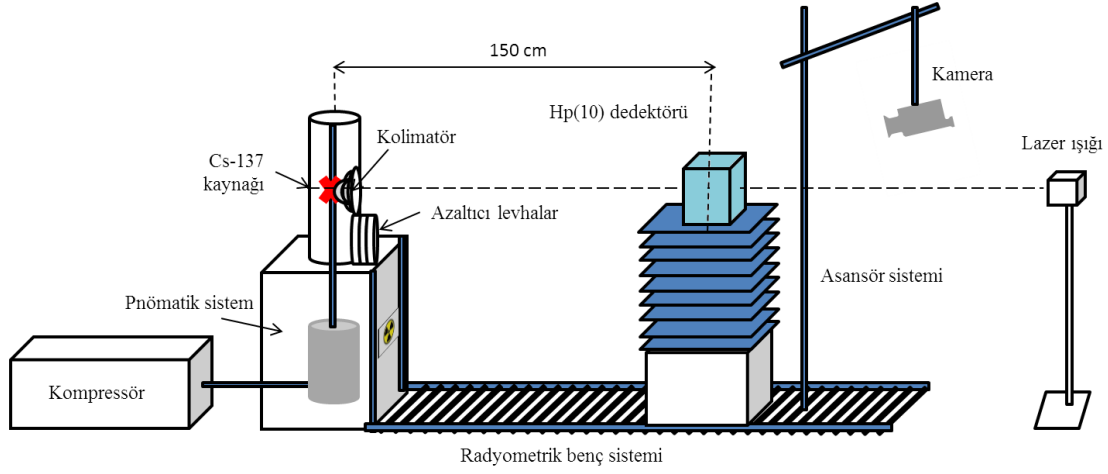
Bölüm 2’de belirtilen 1. yöntem kullanılıp Cs-137 kaynağı ile gerçekleştirilen kalibrasyon işlemlerinin şematik olarak Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 ’de gösterilmiştir.



Şekil 4.22 ^{137}Cs kaynağı ile yapılan kalibrasyon işleminde referans dedektör konumunun şematik gösterimi



Şekil 4.23 ^{137}Cs kaynağı ile yapılan kalibrasyon işleminde GM dedektörü konumunun şematik gösterimi

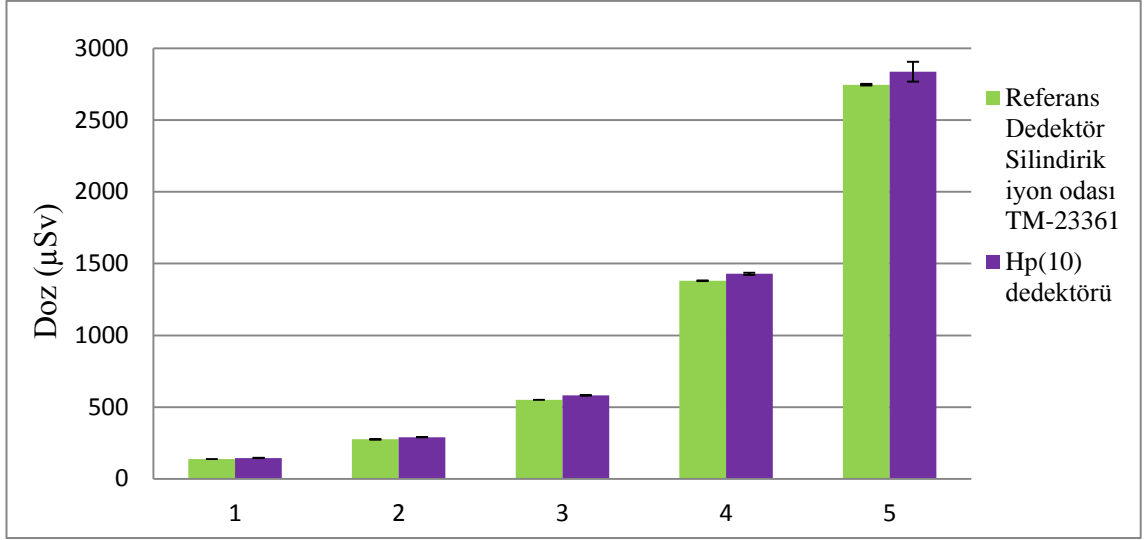


Şekil 4.24 ^{137}Cs kaynağı ile yapılan kalibrasyon işleminde $\text{H}_p(10)$ dedektörü konumunun şematik gösterimi

^{137}Cs kaynağı ile gerçekleştirilen kalibrasyon işlemlerinin sonucunda elde edilen kalibrasyon faktörleri aşağıdaki çizelgede belirtilmiştir.

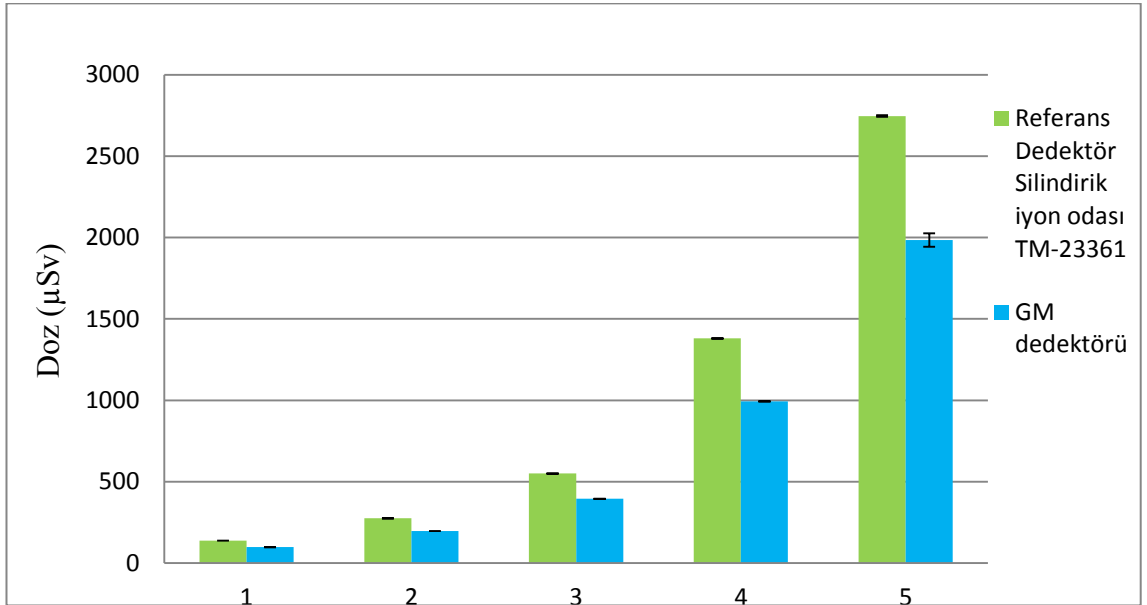
Çizelge 4.26 ^{137}Cs kaynağı kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon işlemi sonuçları

Dedektör	Kalibrasyon Faktörü
The Victoreen Geiger-Mueller(GM)	$1,389 \pm 0,092$
PTW $\text{H}_p(10)$ T 34035	$0,965 \pm 0,034$



Şekil 4.25 Referans dedektör(silindirik iyon odası TM-23361) ve Hp(10) dedektör doz karşılaştırmaları

1: Ölçüm süresi 500 sn, 2: Ölçüm süresi 1000 sn, 3: Ölçüm süresi 2000 sn,
4: Ölçüm süresi 5000 sn, 5: Ölçüm süresi 10000 sn



Şekil 4.26 Referans dedektör(silindirik iyon odası TM-23361) ve GM dedektör doz karşılaştırmaları

1: Ölçüm süresi 500 sn, 2: Ölçüm süresi 1000 sn, 3: Ölçüm süresi 2000 sn,
4: Ölçüm süresi 5000 sn, 5: Ölçüm süresi 10000 sn

Şekil 4.26'da G-M sayacının yüksek dozlara ulaşıldığında, iyon odasına oranla doz gösteriminin düşük olması bu sayaçların yüksek dozlarda ciddi derecede ölü zamana girmelerinden kaynaklı sinyal kaybından ileri gelmektedir.

Doz ölçümlerinde ölçüme dayalı ve istatitksel dağılıma uygun (Tip A) ve sistematik doğası gereği tahminle öngörülen belirsizlik kaynakları(Tip B) Çizelge 4.27’de belirli aralıklar olarak verilmiştir. Dedektörden dedektöre ve ölçüm geometrisindeki farklı kurulum farkları nedeniyle bu aralıklar her kurulum için hesaplarda gözönüne alınmıştır. Her bir ölçüme ait toplam belirsizlik MS-excel programında hesaplanmıştır. Tüm toplam belirsizlikler $\pm 1.96\sigma$ (%95 güven seviyesinde) verilmiştir. Tekrarlanan doz ölçümleri için t-student faktörü n=5 için uygulanmıştır ve değişim katsayıları da hesaplanmıştır.

Çizelge 4.27 Belirsizlik bütçesi

Belirsizlik Kaynağı	Belirsizlik aralığı, %
kV tüp gerilimindeki dalgalanma	1-3,6
Dedektör doz tepkisi	$\leq \pm 0,5$
Işınlama mesafesindeki değişme	1-1,5
Dedektör konumlama	2-3
mAs ölçümü	2-3
Hava-kerma hızı ölçümü	1-2,5
Diğer sistematik belirsizlikler	1-2
Toplam belirsizlik	3,5- 6,61

*Belirtilen aralıkları kV tüp gerilimindeki dalgalanma, mAs ölçümü, hava-kerma hızı ölçümü ve diğer sistematik ölçümler için Yücel vd.(2014) çalışmasından alınmıştır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında ilk olarak AAPM TG-61 protokolünde belirtilen NIST x-ışın demet kalitelerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Doz ölçümleri PTW(Freiburg, Alm.) SSDL'de kalibre edilmiş dedektörler referans olarak kullanılarak yapılmıştır. Doz ölçümleri, tekrarlanabilirliğini sağlamak için en az 5 kez tekrarlanmış ve hesaplamalarda ortalama değerler kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalarla bu protokolde belirtilen x-ışın demet kalitelerinden, H40, H60, H100 ve M100 demet kaliteleri nominal değerlerine uygun karakteristiklerde elde edilmiştir. Bu demet kaliteleri öncelikle sistemin doğal(inherent) filtrasyonu ölçülerek, daha sonra ek filtrasyon yardımıyla istenilen kaliteye(enerjiye) ve homojenliğe getirilmiştir. Deneysel parametreler SpectrumGUI ve Xcomp5r simulasyon programı yardımıyla da test edilmiştir. Kullanılan filtre kalınlıkları kullanılarak bu demet kaliteleri için birinci yarı değer kalınlığı(1.HVL) ve homojenlik katsayıları elde edilmiştir. Bulgular kısmında elde edilen bu NIST x-ışın demet kaliteleri verilerinde görüldüğü gibi demet kalitelerinin, 1.HVL değerlerinde %100'e yakın uyum sağlanırken, homojenlik katsayılarında % 4-7 arasında uyumsuzluk belirlenmiştir. Bu sonucun olası sebebi demet kalitesi elde edilirken kullanılan toplam filtrasyonun protokolde belirtilen filtrasyon kalınlığına tam denk gelmemesidir.

NIST'in Özel Yayını 250-58' de belirtilen veriler dikkate alındığında NIST x-ışın demet kalitelerinden H serisi ile ISO x-ışın demet kalitelerinden N serisi büyük uyum göstermiştir. Bu uyumu, nicel olarak kanıtlamak amacıyla elde edilen H60 ve H100 demet kalitelerine karşılık aynı konvansiyonel x-ışın sisteminde N60 ve N100 demet kaliteleri de elde edilerek, bunların demet karakteristikleri belirlenmiştir. N60 ve N100 demet kaliteleri tez çalışmasının bulgular bölümünde belirtildiği üzere H60 ve H100 demet kalitelerinde uyumluluk sağlanmıştır. H60 ve N60 kaliteleri eşdeğer toplam filtrasyona sahipken H100 ve N100 demet kaliteleri 0,2 mm Cu farkına sahip olarak elde edilmiştir. Ancak düşük enerjide, örneğin N40 demet kalitesinde 0,21 mm Cu ek filtrasyonu istenen 0,085 mm Cu 1. HVL değerinin bulunması laboratuvar şartları nedeniyle bu incelikte saf elektrolitik Cu bulunamadığı için elde edilememiştir.

NIST demet kalitelerinden düşük seviye filtrasyonlu L-serisinden; L10, L15, L20, L30, L40, L50, L80, L100, orta seviye filtrasyonlu M-serisinden; M20, M30, M40, M50, M60, M80, M120, M150, M200, M250, M300, yüksek filtrasyonlu H-serisinden; H10, H15, H20, H30, H40, H50, H150, H200, H250, H300 ve ISO demet kalitelerinden N10, N15, N20, N25, N30, N40, N120, N150, N200, N250, N300 demet kaliteleri kullanılan konvansiyonel x-ışın tüpünün doğal filtrasyonun (inherent) yüksek olması, yeterli incelikte Al, Cu, Pb ve Sn ek filtrelerin olmayışı, kullanılan x-ışın sisteminin kV aralığının dışında kalması gibi teknik güçlükler nedeniyle karakterize edilememiştir. Bu demet kalitelerinde sadece tüpün yüksek inherent filtrasyonu değil aynı zamanda düşük filtrasyonlu seri (L-serisi) için, daha ince tüp pencere kalınlığı ve malzemesi (örneğin Be değil) gerekliliği olan daha özel tasarım x-ışın donanımı kullanılması ve laboratuvarında mevcutlardan daha ince kalınlıkta ve düzgünlükte ek filtre sağlanması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu teknik nedenlerin aşılması, yeni bir x-ışın donanımı veya uygun başka bir tüpün satın alınmasını öngördüğünden ve bu ciddi bir maliyet gerektirdiğinden böyle bir çalışmanın sonucu bu husus not edilmektedir.

AAPM TG-61 ve ISO 4037-1'de belirlenmiş olup elde edilebilen x-ışın demet kalitelerinin deneysel 1.HVL değerleri teorik olarak Xcomp5r ve SpectrumGUI simülasyon programları ile elde edilen 1.HVL değerleri ile karşılaştırılmalı olarak tez çalışmasının Bölüm 4 Bulgular bölümünde belirtilmiştir. M100, H60 ve H100 demet kaliteleri için deneysel olarak elde edilen 1. HVL değerleri, Xcomp5r ve SpectrumGUI programları ile hesaplanmış olan değerler ile karşılaştırıldığında SpectrumGUI programı değerleriyle daha uyum göstermekte iken Xcomp5r programı değerleriyle bir miktar farklılık göstermiştir. Deney düzeneği ile teorik hesaplamalarla elde edilen farklılıklar birçok nedenden kaynaklanabilir. Olası en belirgin sebep programlarda kullanılan x-ışın tüplerinin doğal filtrasyonu (inherent) ile deney düzeneğinde kullanılan x-ışın tüpünün doğal filtrasyonun uyuşmamış olmasıdır. Bunun dışında anot yüzeyinin pürüzlenmesi, tüp penceresine buharlaşan tungstenin yapışması, filtre kalınlıklarındaki nominal değerlerden sapmalar, odak noktası ve test noktası arasındaki uzunluk farklılıkları, ölçüm anındaki atmosferik basınç ve sıcaklık ölçümündeki belirsizlikler gibi nedenlerle de uyumsuzluklar için ek etkenler olabilir.

Bulgular bölümünde anlatılan x-ışın sistemi kullanılarak elde edilen bu NIST ve ISO demet kaliteleriyle yapılan dedektör kalibrasyon işlemlerinin sonuçları sırasıyla çizelge 4.17, çizelge 4.18, çizelge 4.19 ve çizelge 4.20’de belirtilmiştir. Bu faktörlerin toplam belirsizliği, olası belirsizlik bileşenleri normal hata yayılım formülüne göre birleştirilerek %3,5-6,2 aralığında belirlenmiştir. Çizelge 4.19’a göre NIST H60 ve ISO N60 demet kalitesi için yapılan dedektör kalibrasyon işleminde Radcal marka farklı modellerdeki tüm iyon odaları ve Unfors marka dedektöründe kalibrasyon faktörleri %100 uyumlu çıkmıştır. Çizelge 4.22’ye göre NIST H100 ve ISO N100 demet kaliteleri için yapılan dedektör kalibrasyon işleminde Radcal marka farklı modellerdeki iyon odalarında(6 cm³ ve 60 cm³) kalibrasyon faktörleri için %96-99 dahilinde uyumlu sonuçlara ulaşılmıştır. Ancak doz aralığı uygunsuzluğu yüzünden Unfors 543 marka dedektörde ise ölçüm alınamamıştır. Yapılan işlemler sonucunda NIST H60, ISON60, NIST H100 ve ISO N100 demet kaliteleri için Radcal marka farklı modellerdeki iyon odaları ve Unfors marka dedektör için kalibrasyon faktörleri için ortalama değerler belirlenmiştir. Bu sonuçlar, kalibrasyon faktörlerinin elde edilmesi için AAP-TG61’ e uygun olarak oluşturulan yöntemin geçerliliğini kanıtlamıştır.

ISO 4037-1 protokolüne uygun ¹³⁷Cs(0,662 MeV) ışınlama sisteminde yapılan gama doz hızı ölçümleriyle G-M survey metre ve H_p(10) dedektörleri için kalibrasyon işlemleri, uygun dozun sağlanması için 1,5 metrede gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerde laboratuvarda bulunan 2 numaralı kaynak(yüksek aktiviteli) kullanılmış ve ¹³⁷Cs kaynağının önündeki 1 numaralı zayıflatıcı kullanılacak olan dedektörlerin doz hızı aralığına uygun olarak kapalı tutulmuş ve yapılan ölçümler 500 s, 1000 s, 2000 s, 5000 s, 10000 s ve 65000 s süreyle ve her bir ölçüm süresinde beş kez olmak üzere ölçümler tekrarlanarak alınmıştır. Enstitü’nün ¹³⁷Cs ışınlama-kalibrasyon laboratuvar ortamında bulunan 1 numaralı kaynak ile(47mCi) aynı mesafelerde doz hızı ölçümleri almak ise mümkün olamamıştır. Ölçümlerde nem ve sıcaklık-basınç düzeltmeleri için de bu parametreler ayrıca kaydedilmiştir. Kullanılan referans dedektör ve kalibrasyonu yapılacak olan dedektörlerin minimum doz hızının altında doz verilmektedir. Şekil 4.25’de görülen grafikte, H_p(10) dedektöründe ölçülen dozlar, referans dedektör doz sonuçlarıyla daha uyumludur ve Çizelge 4.25’de verilen doz tepkisinde sadece ~ %5 düzeltme gereklidir ve bu ise belirsizlik sınırları içinde kabul edilebilir.

Deney koşulları sabit kalmak şartıyla referans dedektör ve kalibrasyonu yapılacak dedektörler için mesafenin ayarlanması ve daima aynı sabit tutulması koşulu örneğin GM dedektörünün ölü zaman problemi nedeniyle farklı mesafedeki ön ölçümler göz önüne alınarak ayarlanmıştır. Bununla birlikte uzun süreli doz birikiminde doyuma ulaşan ve söz konusu yüksek dozlara ulaşıldığında, Şekil 4.26'de kalibrasyonu yapılan G-M sayacının, iyon odasına oranla doz gösteriminin düşük olması bu sayacın yüksek dozlarda ciddi derecede ölü zaman girmesinden kaynaklı sinyal kaybından ileri gelmektedir. İmalatçısının belirttiği düşük doz tepki hızının 0,8 mSv/saat olması, bu yargıyı desteklemektedir. Bu çalışmadaki, Victoreen marka Fluke GM489-110D pancake(tava tipi) dedektörlü gama sayacı için Çizelge 4.26'da verilen kalibrasyon faktörü $1,389 \pm \% 6,3$ 'nün bulunması bu dedektörün özellikle yüksek dozlara tepkisinin doğrusal olmadığını göstermektedir ve en azından $\sim \%39$ bir düzeltme gereği vardır. Bu durum G-M sayaçlarının genel davranışı içinde beklenen bir durumdur.

Sonuç olarak;

- Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'nde SSDL dedektör kalibrasyonuna uygun ISO s-Cs(0,662 MeV) kaynak ile mevcut bir konvansiyonel radyoloji x-ışını donanımı (150 kV_p) ile foton ve NIST x-ışın demet kaliteleri kullanılarak dedektör kalibrasyonları yapılmıştır. Mevcut x-ışını donanımıyla NIST düşük enerjili(100 kV_p'ye kadar) x-ışın sadece demet kalitelerinin elde edilmesi mümkün olmuştur ve ilk defa böyle bir donanımla karakterizasyonu yapılmıştır. Böylece, ISO'dan farklı bir standart demet kalitesinde(NIST/ADCL) cihaz ışınlama ve kalibrasyon yapabilme imkanı elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında hem NIST hem de ISO demet kaliteleri ile medikal alanda kullanılan x-ışın dedektörleri AAPM TG-61 protokolüne göre kalibre edilmiştir. Uyumlu sonuçlar edilmiştir.
- Bu çalışma dolayısıyla mevcut konvansiyonel bir x-ışın tüpünün teknik özelliklerinin pratikteki NIST demet kaliteleri açısından olumlu yönleri ve yetersizlikleri tecrübe edilmiştir.
- Enstitümüzde bulunan x-ışın sistemlerinin doğal filtrasyonunun yüksek olması sebebiyle NIST'in düşük L-serisinin tamamı ve yüksek H-serisinin ancak birkaç hariç x-ışın demet kaliteleri elde edilememiştir. İnce kalınlıkta Cu, Pb ve

Sn filtre bulunmaması da bazı demetlerin saptanamamasında eksiklik olarak görülmüştür.

- ISO s-Cs(0,662 MeV) standart kaynak ve radyometrik benci kullanılarak foton dedektörleri (G-M sayacı ve doz eşdeğeri $H_p(10)$ dedektörü) kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, Ülkemizde de daha geniş kapsamlı SSDL hizmeti verilecek yatırımlar dikkate alındığında, gelecekte Enstitü'deki mevcut bilgi birikimi ve deneyimin bu alana aktarılabilmesi yüksek olasılıklıdır. Bu tez çalışmasında, Uluslararası geçerliliği kanıtlanmış AAPM TG-61 protokolü esas alınmıştır ve metodolojik alt yapısı ayrıntılı şekilde açıklanmıştır. Radyoloji ve endüstriyel alanlarda kullanılan dedektörlerin kalibrasyon yöntemi için bir prosedür oluşturulmuştur. Bu hedefe ulaşmak için bu tezde, Enstitü'de mevcut konvansiyonel bir x-ışın donanımı kullanılarak ilk defa NIST/ADCL demet kalitelerinden bazılarının elde edilebileceği, ancak bazılarının ise kV aralığı dışında olması ve mevcut inherent (kendinde yapısından kaynaklanan) filtrasyonun yüksek olması nedeniyle elde edilemeyeceği kanıtlanmıştır. Gelecekte, örneğin daha düşük enerjilerde (20 kV tüp gerilimi) x-ışını üretebilen ve örneğin bir Be pencereci bir x-ışın donanımı sağlanması durumunda, radyoloji uygulamalarındaki düşük ve yüksek enerjili NIST ve ISO demet kalitelerinin hem dedektör kalibrasyonu için hem de başka araştırmaların yapılabilmesine olanak sağlayacağı olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, Enstitü'deki ISO 4037-1'e uygun s-Cs(0,662 MeV) kalibrasyon kaynağı ve radyometrik benç'in, yeni araştırmalar için oldukça elverişli bir olanak olduğu ve gelecek 30 yıl içinde mevcut kaynakların aktivitesi yükseltılarak ışınlama ve dedektör kalibrasyonu amaçları için etkin olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- Anonymous. 1968. Medical X-ray and Gamma-ray Protection for Energies up to 10 MeV. NCRP; 33 Washington
- Anonymous. 1985. Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources. ICRU; Report 39
- Anonymous. 1992. Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations. ICRU; Report 47
- Anonymous. 1993. Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry. ICRU; Report 51
- Anonymous. 1996. X- and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy, Part 1: Radiation Characteristic and Production Methods. ISO; 4037-1
- Anonymous. 1996. X- and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy, Part 2: Dosimetry for Radiation Protection Over the Energy Ranges 8 keV to 1,3 MeV and 4 MeV to 9 MeV. ISO; 4037-2
- Anonymous. 1996. X- and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy, Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence. ISO; 4037-3
- Anonymous. 2000. Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments. IAEA; Safety Reports Series No.16
- Anonymous. 2001. Calibration of X-ray and Gamma-ray Measuring Instrumens. NIST; Special Publication 250-58
- Anonymous. 2005. Patient Dosimetry for X-rays Used in Medical İmaging. ICRU; Report 74
- Anonymous. 2006. Nuclear Energy, Reference beta-particle radiation.Part 1: Methods of Production ISO; 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. 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP; Publication 103
- Anonymous. 2011. Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation. ICRU; Report 85
- Anonymous. 2011. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA; Safety Series GRS Part 3
- Anonymous. 2012. Radiological Protection, Sealed Radioactive Sources, General Requirements and Classification. ISO; 2919
- Anonymous. 2012. Radiation Protection Instrumentation. Passive Integrating Dosimetry Systems for Environmental and Personal Monitoring. General Characteristics and Performance Requirements. EN IEC; 62387-1
- Anonymous. 2013. Nuclear Energy, Nuclear Technologies and Radiological Protection Part 2:Radiological Protection. ISO; 12749-2
- Behrens, R. 2011. Air Kerma to Dose Equivalent Conversion Coefficients not Included in ISO 4037-3. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, D-38116 Braunschweig, Germany
- Datasheet 2015. VFB-13 A0003en, www.uf.eu
- Dellow, E. 2008. Dose determination at kV X-ray qualities using different protocols. Medical Radiation Physics Clinical Sciences; Lund University
- Firestone, R. B. ve Shirley, V. S. 1996. Table of Isotopes(A=263-272)
- Ma, C.-M., Coffey, C. W., Dewerd, L. A., Liu, C., Nath, R., Seltzer, S. M. and Seuntjens, J. P. 2001. Protocol for 40-300 kV x-ray beam dosimetry in radiotherapy and radiobiology. AAPM(American Association Physicist in Medicine); Task Group 61
- NNDC Web : <http://www.nndc.bnl.gov/chart/>, Erişim tarihi:29.11.2015
- Podgorsak, E.B. 2005. Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students
- Yücel, H., Çubukçu, Ş., Uyar, E. And Engin Y. 2014. Determination of the energy dependence of the BC-408 plastic scintillation detector in medium energy x-ray beams

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Esra VARLI

Doğum Yeri: Bakırköy/İSTANBUL

Doğum Tarihi: 23.07.1991

Medeni Hali: Evli

Yabancı Dili: İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

- Lise : Çobançeşme Lisesi (2004-2007)
- Lisans : Çanakkale 18 Mart Üniversitesi Fizik (2007-2011)
- Yüksek Lisans : İstanbul Teknik Üniversitesi
Nükleer Bilimler Enstitüsü
Radyasyon Bilimi ve Teknolojileri (2011-2012)
- Ankara Üniversitesi
Nükleer Bilimler Enstitüsü
Medikal Fizik Anabilim Dalı (2012-2015)