

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FOTON DEDEKTÖRLERİ VE KİŞİSEL DOZİMETRELERİN X-IŞINLARI VE
Cs-137 IŞINLAYICI İLE YAPILAN KALİBRASYONLARINA YÖNELİK
PROTOKOLLERİN HAZIRLANMASI**

Kerem DURUER

MEDİKAL FİZİK ANABİLİM DALI

ANKARA

2010

Her hakkı saklıdır

Prof. Dr. Doğan BOR danışmanlığında, Kerem DURUER tarafından hazırlanan '**Foton Dedektörleri ve Kişisel Dozimetrelerin X-Işınları ve Cs-137 Işınlayıcı ile Yapılan Kalibrasyonlarına Yönelik Protokollerin Hazırlanması**' adlı tez çalışması 7 Eylül 2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Medikal Fizik Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr Yeter GÖKSU

İmza: 

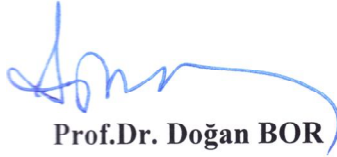
Üye : Prof. Dr. Doğan BOR

İmza: 

Üye : Prof. Dr. Haluk YÜCEL

İmza: 

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.



Prof.Dr. Doğan BOR

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FOTON DEDEKTÖRLERİ VE KİŞİSEL DOZİMETRELERİN X-IŞINLARI VE Cs-137 IŞINLAYICI İLE YAPILAN KALİBRASYONLARINA YÖNELİK PROTOKOLLERİN HAZIRLANMASI

Kerem DURUER

Ankara Üniversitesi
Nükleer Bilimler Enstitüsü
Medikal Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Doğan BOR

Bu çalışmanın amacı 30–100 keV enerji aralığındaki X-ışınları ve 662 keV enerjili fotonlar salan Cs-137 radyoaktif kaynağı kullanılarak; radyoterapi, diagnostik radyoloji gibi alanlarda ya da çevresel ölçüm yapılan alanlarda kullanılan foton dedektörlerinin ve radyasyonun kullanıldığı her alanda bireylerin taşıdığı kişisel dozimetrelerin kalibrasyonlarının ikinci dereceden doğrulukla gerçekleştirilmesini sağlayacak sistemlerin kurulması ve bu amaca yönelik protokollerin hazırlanmasıdır.

Bu çalışmada farklı uluslar arası protokoller referans alınarak, foton dedektörlerinin ve kişisel dozimetrelerin ikinci dereceden doğrulukla kalibrasyonları için referans nitelikte bir protokol hazırlanmıştır. Hazırlanan bu protokol doğrultusunda kullanılan her iki sistem için de belirli testler gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmada birinci aşamada X-ışın ışınlama sisteminde ISO ve IEC tarafından belirlenmiş olan X-ışın demet kaliteleri elde edilmiştir. Bu işlemde belirtilen X-ışın demet kalitelerinin spektrumlarının elde edilmesi için düşük enerjilerde çok yüksek ayırma gücüne sahip olan germanyum yarı iletken dedektör kullanılmış ve tüp çıkışına eklenen filtreler sayesinde protokollerde belirtilmiş olan X-ışın spektrumları elde edilmiştir.

Yapılan çalışmanın ikinci aşamasında ise farklı tipteki toplam 15 foton dedektörü ve 14 kişisel dozimetrenin kalibrasyonları ve enerji bağımlılıkları, X-ışın ve Cs-137 ışınlama sistemleri kullanılarak, uluslararası protokollerin belirlediği standartlara uygun olarak ikinci dereceden doğrulukla belirlenmiştir.

2010, 190 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kalibrasyon laboratuvarı, Dedektör kalibrasyonu, Kişisel dozimetre kalibrasyonu, Demet kalitesi, Spektrum analizi, ISO, IEC

ABSTRACT

Master Thesis

PREPARATION THE PROTOCOL OF CALIBRATION OF PHOTON DETECTORS AND PERSONAL DOSIMETERS BY USING THE X-RAYS AND Cs-137 IRRADIATOR

Kerem DURUER

**Ankara University
Institute of Nuclear Science**

Supervisor: Prof. Dr. Doğan BOR

The aim of this study is to establish systems that would provide the realization, with an accuracy of second degree, of photon detectors witch are used in radiotherapy, diagnostic radiology or the photon detectors witch are used at area measurements and personal dosimeters calibrations through the utilization of Cs-137 radioactive source which emits photons with an energy of 662 keV and X-rays with an energy interval of 30-100 keV and to prepare the protocols intended for this objective.

In this study, referring to various international protocols, a protocol of reference is prepared for the calibration, with an accuracy of second degree, of photon detectors and personal dosimeters. In line with the prepared protocol, specific tests have been conducted for both of the systems which are used.

During the first stage of the study, in terms of X-ray irradiation systems, X-ray beam qualities which are determined by ISO and IEC have been obtained. In this process, in order to obtain the spectrums of X-ray beam qualities which are defined, semiconductor germanium detector, having a very significant resolution capacity in very low energy levels, is used and owing to the filters that are added to the output of the tube, X-ray spectrums, which are defined in the protocols, have been obtained.

In the second stage of this study, calibrations and energy dependencies of totally 15 photon detectors and of 14 personal dosimeters of different types are determined, with an accuracy of second degree, through the utilization of X-ray and Cs-137 irradiation systems and according to the standards defined by international protocols.

2010, 190 Pages

Key Words: Calibration laboratory, Detector calibration, Personal dosimeter calibration, Beam quality, Spectrum analysis, ISO, IEC

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőması Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü laboratuvar olanakları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle çalıőmalarımnda bana araőtırma olanağı sağlayan, yönlendiren ve geniş hoőtörüsü ile destek veren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Doğan BOR'a, çalıőmamın her aşamasında engin bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Haluk YÜCEL'e, Sayın Prof. Dr. Yeter GÖKSU' ya, Sayın Doç. Dr Bahar DİRİCAN'a ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Turan OLĐAR'a, çalıőmalarım süresince desteklerinden dolayı yüksek lisans öğrencisi Sayın Aytaç BARIŐ ve Ersin KANBERLİ'ye, Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'nde birlikte çalıőtıđım tüm arkadaşlarıma, benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyerek her zaman beni destekleyen babam Sayın B. Hayati DURUER'e, annem Sayın Vildan DURUER'e, ablam Sayın Özlem TEKERİL'e ve çalıőmam süresince çok ilgilenemediğim biricik yeğenim Sayın Ilgın TEKERİL'e sonsuz minnet ve teőtekkürlerimi sunarım.

Kerem DURUER

Ankara, Eylül 2010

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xx
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1 Tanımlamalar.....	3
2.2 Radyasyon Kaynakları	13
2.2.1 Monokromatik radyasyon kaynakları.....	13
2.2.2 Polikromatik radyasyon kaynakları.....	13
2.2.2.1 X-Işınları.....	14
2.2.2.1.1 X-ışınları oluşumu	15
2.2.2.1.1.1 Bremsstrahlung	15
2.2.2.1.1.2 Karakteristik X-ışınları.....	16
2.3 Radyasyon Ölçümünde Kullanılan Dedektörlerin Özellikleri	16
2.3.1 Alan ölçüm cihazları	16
2.3.1.1 Gaz odalı dedektörler.....	17
2.3.1.1.1 İyon odası.....	18
2.3.1.1.2 Orantılı sayaç.....	20
2.3.1.1.3 Geiger-Müller dedektörü	21
2.3.1.2 Sintilasyon dedektörü.....	23
2.3.1.3 Yarı iletken dedektörü	25

2. 3.1.3.1 Yüksek saflıkta germanyum yarı iletken dedektörler.....	26
2. 3.2 Kişisel dozimetreler	27
2.3.2.1 Termolüminesans dozimetreler	27
2. 3.2.2 Film dozimetreler	29
2.3.2.3 Elektronik dozimetreler	30
2.4 Dozimetre ve Doz Hız Ölçerler için İşlevsel Nicelikler	30
2.4.1 Alan ölçümleri.....	32
2.4.1.1 Ortam eşdeğer dozu, $H^*(d)$	33
2.4.1.2 Yönlü eşdeğer doz, $H'(d, \Omega)$	34
2.4.2 Kişisel ölçümler	35
2.4.2.1 Kişisel eşdeğer doz, $H_p(D)$	35
2.5 Cihazların ve Standart Laboratuvarların Sınıflandırılması	37
2.5.1 Cihazların sınıflandırılması	37
2.5.1.1 Birincil standart	37
2.5.1.2 İkincil standart	38
2.5.1.3 Üçüncül standart	38
2.5.1.4 Ulusal standart	38
2.5.2 Birinci dereceden standart dozimetri laboratuvarı	38
2.5.3 İkinci dereceden standart dozimetri laboratuvarı.....	38
2.5.4 Uluslararası ölçüm sistemi (IMS)	38
2.5.5 İkincil standart dozimetri laboratuvarları.....	39
2.6 Foton Dedektörlerinin Kalibrasyonu	40
2.6.1 Foton dedektörlerinin ve kişisel dozimetrelerin kalibrasyonu için kullanılan referans X-ışın demet kaliteleri.....	40
2.6.1.1 IEC-61267 de belirlenmiş olan X-ışın demet kaliteleri	40

2.6.1.1.1 RQR X-ışın demet kalitesi.....	42
2.6.1.1.2 RQA X-ışın demet kalitesi.....	44
2.6.1.2 ISO 4037–1 de belirlenmiş olan X-ışın demet kaliteleri.....	46
2.6.2 ISO referans foton radyasyonları için dönüşüm katsayıları	48
2.6.2.1 X-Işınları.....	48
2.6.2.1.1 Filtre edilmiş X-ışınları	48
2.6.2.2 Radyoaktif kaynaklardan elde edilen foton radyasyonu	56
2.7 Kalibrasyonun Temelleri	59
2.7.1 Kalibrasyon ve testler	59
2.7.2 Referans bir dedektör kullanarak kalibrasyon faktörünün belirlenmesi.....	60
2.7.2.1 Kaynak çıkışında herhangi bir monitor chamber (geçirgen iyon odası) olmadan alınan ölçümler	63
2.7.2.1.1 Kalibrasyon	63
2.7.2.1.2 Etkiyen enerji ve açının fonksiyonu olarak dedektör yanıtının belirlenmesi	65
2.7.2.2 Kaynak çıkışında bir monitor chamber varken alınan ölçümler	67
2.7.2.2.1 Kalibrasyon	67
2.7.2.2.2 Etkiyen enerji ve açının fonksiyonu olarak dedektör yanıtının belirlenmesi	69
2.7.2.3 Referans ölçüm aleti ve kalibrasyonu yapılan ölçüm aletinin eş zamanlı olarak ışınlanmasıyla elde edilen ölçümler	70
2.7.2.3.1 Kalibrasyon	70
2.7.2.3.2 Etkiyen enerji ve açının fonksiyonu olarak dedektör yanıtının belirlenmesi	73
2.7.2.4 Kalibrasyon faktörünün ve yanıtın bilinen bir radyasyon alanında tanımlanması.....	74

2.7.2.4.1 Kalibrasyon	74
2.7.2.4.2 Etkiyen enerji ve açının fonksiyonu olarak dedektör yanıtının belirlenmesi	74
2.7.3 Kalibrasyonlar için ek etkenler	75
2.7.3.1 Dedektörün hatalı yerleştirilmesi	75
2.7.3.2 Cihaz ve kaynak destekleri (taşıyıcıları)	75
2.7.3.3 Radyoaktif kaynakların azalımı için düzeltmeler	75
2.7.3.4 Ortam (background) radyasyonu	76
2.7.3.5 Gerekli (istenen) okumaların sayısı	76
2.7.3.6 Doğrusallık testi	76
2.7.3.7 Aşırı yükleme kontrolleri	76
2.7.4 Kişisel dozimetre kalibrasyonu	77
2.7.4.1 Kalibrasyon	80
2.7.4.1.1 Monitor chamber kullanılmadan, referans dedektör kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon	80
2.7.4.1.2 Monitor chamber ve referans dedektör kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon	82
2.7.4.1.3 Bilinen bir radyasyon alanında gerçekleştirilen kalibrasyon	83
2.7.5 Referans ölçüm cihazları	84
2.7.5.1 Referans ölçüm cihazları için gereksinimler	84
2.7.5.2 Referans ölçüm cihazı için düzeltmeler	85
2.7.5.2.1 Genel	85
2.7.5.2.2 Sıfır göstergesi (background)	86
2.7.5.2.3 Basınç	86
2.7.5.2.4 Sıcaklık	87
2.7.5.2.5 Nem	87

2.7.5.2.6 Dedektör boyutu.....	87
2.7.5.2.7 Saçılan radyasyon.....	87
2.8 Radyasyon Alanının Kalibrasyonu ve Özelliklerinin Belirlenmesi.....	88
2.8.1 X-Işınları	88
2.8.2 Radyoaktif kaynakların foton radyasyonu	95
2.9 Yardımcı Kalibrasyon Ekipmanları.....	97
3. MATERYAL ve YÖNTEM	99
3.1 Tez Kapsamında Kalibrasyon İşlemlerinin Gerçekleştirildiği Sistemler.....	99
3.1.1 X-ışın ışınlama sistemi.....	99
3.1.2 Cs-137 ışınlama sistemi	99
3.2 Kalibrasyon İşleminde Kullanılan Referans Dedektörler	100
3.2.1 İyon odaları	100
3.2.2 İyon odası elektrometreleri.....	101
3.3 X-Işın Spektrumlarının Toplanması için Kullanılan Sistem	101
3.4 X-Işın Spektrum Programları	102
3.5 kV Ölçümünde Kullanılan Cihazlar.....	102
3.6 Test Objeleri.....	102
3.7 Tez Kapsamında Kalibrasyonu Gerçekleştirilen Dedektörler	103
3.8 X-Işın Sisteminde X-Işın Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi.....	105
3.8.1 IEC 61267 protokolünde belirlenmiş olan X-ışın demet kalitelerinin elde edilmesi.....	105
3.8.1.1 RQR X-ışın demet kalitesinin elde edilmesi	105
3.8.1.1.1 Birinci, ikinci yarı değer kalınlıklarının (1.HVL ve 2. HVL) ve homojenlik katsayısının hesaplanması.....	106
3.8.1.2 RQA X-ışın demet kalitesinin elde edilmesi	107

3.8.1.3 kV ölçümü.....	108
3.8.2 ISO 4037–1 protokolünde belirlenmiş olan X-ışın demet kalitelerinin elde edilmesi.....	108
3.8.2.1 Doğal filtrasyonun belirlenmesi.....	108
3.8.2.2 ISO 4037–1 de tanımlanan bazı X-ışın demet kalitelerindeki X-ışın spektrumlarının toplanması	109
3.8.2.3 Birinci ve ikinci yarı kalınlık değerinin elde edilmesi.....	110
3.8.2.4 X-ışın spektrumlarının bitiş noktaları kullanılarak X-ışın tüpüne uygulanan yüksek gerilimin belirlenmesi.....	110
3.8.2.5 Kolimatörün tamamen kapatıldığı durumdaki doz hızı ölçümü.....	110
3.8.2.6 Elde edilmiş olan X-ışın demet kalitelerinin spektrumlarının Xcomp5r spektrum programı ile elde edilen spektrumlarla karşılaştırılması.....	111
3.9 Cs–137 Işınlama Sisteminde Farklı Mesafelerdeki Doz Hızı Ölçümleri.....	111
3. 9.1 Referans dedektörler ile ölçülen değerlerin teorik olarak hesaplanan değerler ile karşılaştırılması	112
3.9.2 Farklı referans dedektörler ile aynı mesafelerde elde edilmiş olan doz hızı değerlerinin karşılaştırılması	112
3. 9.3 Azaltıcı levhaların (atenatör) farklı mesafelerdeki azaltma katsayılarının belirlenmesi	112
3.9.4 Doz hızı ölçümlerine saçılan ışınların etkisinin belirlenmesi.....	113
3.9.5 Işınlama alanındaki doz dağılımının belirlenmesi	113
3.10 X-Işın Sisteminde Foton Dedektörlerinin Kalibrasyon İşlemi	114
3. 11 X-Işın Sisteminde Foton Dedektörlerinin Enerji Bağımlılığının Belirlenmesi	114
3.12 X-Işın Sisteminde Kişisel Dozimetrelerin Kalibrasyon İşlemi.....	115
3.13 Cs–137 Işınlama Sisteminde Foton Dedektörlerinin Kalibrasyon İşlemi	117
3.14 Cs–137 Işınlama Sisteminde Kişisel Dozimetrelerin Kalibrasyon İşlemi	119

4. BULGULAR.....	120
4.1 IEC 61267 Protokolünde Belirlenmiş Olan X-Işın Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi	120
4.1.1 RQR X-ışın demet kalitesinin elde edilmesi	120
4.1.2 RQA X-ışın demet kalitesinin elde edilmesi	125
4.1.3 kV ölçümü	131
4.2 ISO 4037–1 Protokolünde Belirlenmiş Olan X-Işın Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi	131
4.2.1 Doğal filtrasyonun belirlenmesi.....	131
4.2.2 ISO 4037–1 de tanımlanan bazı X-ışın demet kalitelerindeki X-ışın spektrumlarının toplanması	132
4.2.3 Birinci ve ikinci yarı kalınlık değerinin elde edilmesi.....	135
4.2.4 X-ışın spektrumlarının bitiş noktaları kullanılarak X-ışın tüpüne uygulanan yüksek gerilimin belirlenmesi.....	137
4.2.5 Kolimatörün tamamen kapatıldığı durumdaki doz hızı ölçümü.....	138
4.2.6 Elde edilmiş olan X-ışın demet kalitelerinin spektrumlarının Xcomp5r spektrum programı ile elde edilen spektrumlarla karşılaştırılması.....	139
4.3 Cs–137 Işınlama Sisteminde Farklı Mesafelerdeki Doz Hızı Ölçümü	154
4.3.1 Referans dedektörler ile ölçülen değerlerin teorik olarak hesaplanan değerler ile karşılaştırılması.....	157
4.3.2 Farklı referans dedektörler ile aynı mesafelerde elde edilmiş olan doz hızı değerlerinin karşılaştırılması	159
4.3.3 Azaltıcı levhaların(atenatör) farklı mesafelerdeki azaltma katsayılarının belirlenmesi	161
4.3.4 Doz hızı ölçümlerine saçılan ışınların etkisinin belirlenmesi.....	162
4.3.5 Işınlama alanındaki doz dağılımının belirlenmesi	163
4.4 X-Işın Sisteminde Foton Dedektörlerinin Kalibrasyon İşlemi	163

4.4.1 X-ışın sisteminde foton dedektörlerinin enerji bağımlılığının belirlenmesi.	164
4.5 Cs-137 Işınlama Sisteminde Foton Dedektörlerinin Kalibrasyon İşlemi	168
4.6 X-Işın Sisteminde Kişisel Dozimetrelerin Kalibrasyon İşlemi	168
4.7 Cs-137 Işınlama Sisteminde Kişisel Dozimetrelerin Kalibrasyon İşlemi	170
5. SONUÇ ve TARTIŞMA.....	171
EKLER.....	175
EK 1.....	175
EK 2.....	179
EK 3.....	184
KAYNAKLAR.....	187
ÖZGEÇMİŞ.....	190

SİMGELER DİZİNİ

HPGe	Yüksek Saflıkta Germanyum
Gy	Gray
R	Röntgen
Sv	Sievert
HVL	Yarı Değer Kalınlığı
LiF	Lityum Fluorit
PMMA	Polymethyl Methacrylate
mAs	Miliampersaniye
kVp	Kilovolt Tepe Değeri
H	Eşdeğer doz
h	Homojenlik Katsayısı
R _E	Spektral Ayırma Gücü
PSDL	Birinci Dereceden Standart Dozimetri Laboratuvarı
SSDL	İkinci Dereceden Standart Dozimetri Laboratuvarı
\bar{E}	Ortalama Enerji
E	Etkin Doz
N _R	Referans Dedektörün Kalibrasyon Faktörü
N _I	Kalibre Edilen Dedektörün Kalibrasyon Faktörü
F	Flüoresans Radyasyon
S	Radyoaktif Kaynak
L	Düşük Hava Kerma Hızı Serisi
N	Dar Spektrum Serisi
W	Geniş Spektrum Serisi
H	Yüksek Hava Kerma Serileri
d _F	Fantom Yüzeyindeki Radyasyon Alan Çapı
PM tüp	Foto çoğaltıcı tüp

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Azaltıcı levhalar	3
Şekil 2.2 Kolimatör.....	6
Şekil 2.3 Monitor chamber (geçirgen iyon odası)	7
Şekil 2.4 ΔE , spektrumun yarı yükseklikteki tam genişliği	10
Şekil 2.5 Voltaj bölücüsü	11
Şekil 2.6.a. Kurşun zırh içerisindeki X-ışın tüpü ve bağlantıları	
b. Yüksek frekans jeneratörü	12
Şekil 2.7 X-ışın tüpü	14
Şekil 2.8 X-ışın oluşumu.....	14
Şekil 2.9 Bremsstrahlung X-ışını oluşumu	15
Şekil 2.10 Karakteristik X-ışın oluşumu.....	16
Şekil 2.11 Gaz doldurulmuş dedektörlerin farklı çalışma bölgeleri.....	18
Şekil 2.12 İyon odası	20
Şekil 2.13 Şematik olarak Townsend çığı oluşumu.....	21
Şekil 2.14 Orantılı sayaç	21
Şekil 2.15 Geiger-Müller dedektörü	23
Şekil 2.16 Sintilasyon dedektörü çalışma şeması.....	24
Şekil 2.17 Sintilasyon dedektörü.....	25
Şekil 2.18 Yüksek saflıkta germanyum yarı iletken dedektör	26
Şekil 2.19 Basit termoluminesans modeli.....	27
Şekil 2.20 Termoluminesans dozimetreler.....	28
Şekil 2.21 Film dozimetre	29

Şekil 2.22 Elektronik dozimetre	30
Şekil 2.23 Referans radyasyon alanlarında kullanılan ölçülebilir ve türetilmiş nicelikler	31
Şekil 2.24 a. Genişletilmiş b. Genişletilmiş ve hizalanmış alanların şematik gösterimi.....	33
Şekil 2.25 a. Genişletilmiş b. Genişletilmiş ve hizalanmış radyasyon alanlarındaki eşdeğer doz tanımları	34
Şekil 2.26 Kişisel dozimetrelerin kalibrasyonunda kullanılan fantomlar	36
Şekil 2.27 Uluslararası ölçüm sisteminin (IMS) şematik gösterimi	39
Şekil 2.28 RQR demet kalitesinin elde edileceği düzenek	43
Şekil 2.29 RQA demet kalitesinin elde edileceği düzenek	45
Şekil 2.30 Düşük hava kerma hızı serisinin farklı nicelikleri için belirlenmiş olan dönüşüm katsayılarının enerji ile değişimi.....	49
Şekil 2.31 Dar spektrum serisinin farklı nicelikleri için belirlenmiş olan dönüşüm katsayılarının enerji ile değişimi.....	50
Şekil 2.32 Geniş spektrum serisinin farklı nicelikleri için belirlenmiş olan dönüşüm katsayılarının enerji ile değişimi.....	51
Şekil 2.33 Yüksek hava kerma hızı serisinin farklı nicelikleri için belirlenmiş olan dönüşüm katsayılarının enerji ile değişimi.....	52
Şekil 2.34 ISO tarafından tanımlanmış teorik X-ışın spektrumları	56
Şekil 2.35 Kullanılan dört farklı kalibrasyon metodu.....	61
Şekil 2.36 E_{ph} enerjili fotonlar için hava kermadan (k_a), $h^*(10)$ ve $H'(0.07, 0^0)$ niceliklerinin saptanmasını sağlayan katsayıların gösterildiği grafik.....	62
Şekil 2.37 Üçüncü kalibrasyon metodunun şematik gösterimi	71
Şekil 2.38 ISO kişisel dozimetre kalibrasyon fantomları	77
Şekil 2.39 Kişisel dozimetrelerin kalibrasyon yöntemi	80

Şekil 2.40 Kişisel dozimetrelerin monitor chamber kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon yöntemi.....	82
Şekil 2.41 X-ışın sistemi kullanılarak yapılan kalibrasyonlarda kullanılan sistemin şematik gösterimi.....	88
Şekil 2.42 Monitor chamber ve filtreler.....	89
Şekil 2.43 X-ışın spektroskopi sistemi.....	92
Şekil 2.44 Cs-137 radyoaktif kaynağı ile kullanılan kolimatör sisteminin örnekleri	96
Şekil 3.1 RQR X-ışın demet kalitesinin elde edildiği deney düzeneği.....	105
Şekil 3.2 RQA X-ışın demet kalitesinin elde edildiği deney düzeneği	108
Şekil 3.3 Doğal filtrasyonun hesaplanabilmesi için kurulan düzenek.....	109
Şekil 3.4 X-ışın spektrumlarının toplandığı deney düzeneği	109
Şekil 3.5 Cs-137 ışınlama sistemi deney düzeneği.....	111
Şekil 3.6 Saçılan ışınların miktarının belirlendiği deney düzeneği.....	113
Şekil 3.7 X-ışın sisteminde foton dedektörlerinin kalibrasyon işlemi için hazırlanan deney düzeneği	114
Şekil 3.8 X-ışın sistemi ve referans Hp(10) dedektörü.....	117
Şekil 3.9 Cs-137 ışınlama sisteminde foton dedektörlerinin kalibrasyon işlemi için hazırlanan deney düzeneği	118
Şekil 3.10 Cs-137 ışınlama sisteminde foton dedektörünün kalibrasyon işlemi	118
Şekil 3.11 Kişisel dozimetrelerin farklı açılarda ışınlanması.....	119
Şekil 4.1 RQR 2 demet kalitesi için elde edilen ‘Filtre-Doz hızı’ grafiği	120
Şekil 4.2 RQR 3 demet kalitesi için elde edilen ‘Filtre-Doz hızı’ grafiği	121
Şekil 4.3 RQR 4 demet kalitesi için elde edilen ‘Filtre-Doz hızı’ grafiği	121
Şekil 4.4 RQR 5 demet kalitesi için elde edilen ‘Filtre-Doz hızı’ grafiği	122
Şekil 4.5 RQR 6 demet kalitesi için elde edilen ‘Filtre-Doz hızı’ grafiği	123
Şekil 4.6 RQR 7 demet kalitesi için elde edilen ‘Filtre-Doz hızı’ grafiği	123

Şekil 4.7 RQR 8 demet kalitesi için elde edilen ‘Filtre-Doz hızı’ grafiği	124
Şekil 4.8 RQA 2 demet kalitesi için elde edilen ‘Filtre-Doz hızı’ grafiği	125
Şekil 4.9 RQA 3 demet kalitesi için elde edilen ‘Filtre-Doz hızı’ grafiği	126
Şekil 4.10 RQA 4 demet kalitesi için elde edilen ‘Filtre-Doz hızı’ grafiği	126
Şekil 4.11 RQA 5 demet kalitesi için elde edilen ‘Filtre-Doz hızı’ grafiği	127
Şekil 4.12 RQA 6 demet kalitesi için elde edilen ‘Filtre-Doz hızı’ grafiği	128
Şekil 4.13 RQA 7 demet kalitesi için elde edilen ‘Filtre-Doz hızı’ grafiği	128
Şekil 4.14 RQA 8 demet kalitesi için elde edilen ‘Filtre-Doz hızı’ grafiği	129
Şekil 4.15 60 kv’de ‘Filtre kalınlığı- Doz hızı’ grafiği	132
Şekil 4.16 N40 spektrumu	133
Şekil 4.17 N60 spektrumu	133
Şekil 4.18 N80 spektrumu	134
Şekil 4.19 N100 spektrumu	135
Şekil 4.20 N40 X-ışın demet kalitesi için ‘Filtre kalınlığı – Doz hızı’ grafiği	135
Şekil 4.21 N60 X-ışın demet kalitesi için ‘Filtre kalınlığı – Doz hızı’ grafiği	136
Şekil 4.22 N80 X-ışın demet kalitesi için ‘Filtre kalınlığı – Doz hızı’ grafiği	136
Şekil 4.23 N100 X-ışın demet kalitesi için ‘Filtre kalınlığı – Doz hızı’ grafiği	137
Şekil 4.24 N80 X-ışın spektrumunun bitiş noktası	137
Şekil 4.25 Elde edilen RQR 2 X-ışın demet kalitesi	139
Şekil 4.26 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQR 2 X-ışın demet kalitesi	139
Şekil 4.27 Elde edilen RQR 3 X-ışın demet kalitesi	140
Şekil 4.28 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQR 3 X-ışın demet kalitesi	140
Şekil 4.29 Elde edilen RQR 4 X-ışın demet kalitesi	141

Şekil 4.30 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQR 4 X-ışın demet kalitesi	141
Şekil 4.31 Elde edilen RQR 5 X-ışın demet kalitesi	142
Şekil 4.32 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQR 5 X-ışın demet kalitesi	142
Şekil 4.33 Elde edilen RQR 6 X-ışın demet kalitesi	143
Şekil 4.34 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQR 6 X-ışın demet kalitesi	143
Şekil 4.35 Elde edilen RQR 7 X-ışın demet kalitesi	144
Şekil 4.36 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQR 7 X-ışın demet kalitesi	144
Şekil 4.37 Elde edilen RQR 8 X-ışın demet kalitesi	145
Şekil 4.38 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQR 8 X-ışın demet kalitesi	145
Şekil 4.39 Elde edilen RQA 2 X-ışın demet kalitesi	146
Şekil 4.40 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQA 2 X-ışın demet kalitesi	146
Şekil 4.41 Elde edilen RQA 3 X-ışın demet kalitesi	147
Şekil 4.42 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQA 3 X-ışın demet kalitesi	147
Şekil 4.43 Elde edilen RQA 4 X-ışın demet kalitesi	148
Şekil 4.44 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQA 4 X-ışın demet kalitesi	148
Şekil 4.45 Elde edilen RQA 5 X-ışın demet kalitesi	149
Şekil 4.46 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQA 5 X-ışın demet kalitesi	149
Şekil 4.47 Elde edilen RQA 6 X-ışın demet kalitesi	150

Şekil 4.48 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQA 6 X-ışın demet kalitesi	150
Şekil 4.49 Elde edilen RQA 7 X-ışın demet kalitesi	151
Şekil 4.50 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQA 7 X-ışın demet kalitesi	151
Şekil 4.51 Elde edilen RQA 8 X-ışın demet kalitesi	152
Şekil 4.52 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQA 8 X-ışın demet kalitesi	152
Şekil 4.53 2. Kaynak kullanılarak TM23361 referans dedektörü ile elde edilen ‘Mesafe-Doz hızı’ grafiği.....	154
Şekil 4.54 2. Kaynak kullanılarak TM32005 referans dedektörü ile elde edilen ‘Mesafe-Doz hızı’ grafiği.....	155
Şekil 4.55 2. Kaynak kullanılarak TM30010(s/n=0484) referans dedektörü ile elde edilen ‘Mesafe-Doz hızı’ grafiği	155
Şekil 4.56 2. Kaynak kullanılarak TM30010(s/n=0638) referans dedektörü ile elde edilen ‘Mesafe-Doz hızı’ grafiği	156
Şekil 4.57 1. Kaynak kullanılarak TM23361 referans dedektörü ile elde edilen ‘Mesafe-Doz hızı’ grafiği.....	156
Şekil 4.58 1. Kaynak kullanılarak TM32005 referans dedektörü ile elde edilen ‘Mesafe-Doz hızı’ grafiği.....	156
Şekil 4.59 TM23361 referans dedektörü ile ölçülen ve teorik olarak oluşturulan ‘Mesafe-Doz hızı’ grafikleri	157
Şekil 4.60 TM32005 referans dedektörü ile ölçülen ve teorik olarak oluşturulan ‘Mesafe-Doz hızı’ grafikleri.....	158
Şekil 4.61 Referans dedektörler ile ölçülmüş farklı mesafelerdeki doz hızları ve bu dedektörler ile elde edilmiş olan ölçümler kullanılarak elde edilen teorik doz hızları.	161
Şekil 4.62 Azaltıcı levhaların farklı mesafelerdeki azaltma faktörleri.....	161
Şekil 4.63 Referans dedektörün merkezin 75 cm yukarısına yerleştirilmesi	162

Şekil 4.64 Kaynaktan 2 metre uzaklıktaki doz dağılımı	163
Şekil 4.65 Radcal 10x5-6, s/n = 16446 dedektörünün enerji bağımlılığı grafiği.....	164
Şekil 4.66 Radcal 10x5-6, s/n = 17819 dedektörünün enerji bağımlılığı grafiği.....	165
Şekil 4.67 Radcal 10x6-6, s/n = 03-0458 dedektörünün enerji bağımlılığı grafiği.....	165
Şekil 4.68 Radcal 10x5-60, s/n = 9638 dedektörünün enerji bağımlılığı grafiği.....	165
Şekil 4.69 Radcal 10x5-60, s/n = 9608 dedektörünün enerji bağımlılığı grafiği.....	166
Şekil 4.70 Radcal 10x6-60, s/n = 07-0361 dedektörünün enerji bağımlılığı grafiği ...	166
Şekil 4.71 Radcal 10x5-180, s/n = 17997 dedektörünün enerji bağımlılığı grafiği.....	166
Şekil 4.72 Radcal 10x5-180, s/n = 18006 dedektörünün enerji bağımlılığı grafiği.....	167
Şekil 4.73 Radcal 10x6-180, s/n = 08-0236 dedektörünün enerji bağımlılığı grafiği .	167

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Cs-137 radyoaktif kaynağı ile ilgili bilgiler	13
Çizelge 2.2 Alan ve kişisel ölçümlerde genel olarak kullanılan nicelikler	31
Çizelge 2.3 RQR X-ışın demet kaliteleri	42
Çizelge 2.4 RQA X-ışın demet kaliteleri	45
Çizelge 2.5 ISO 4037-1 de belirtilmiş olan referans radyasyon alanları	47
Çizelge 2.6 ISO 4037-1 de tanımlanmış olan X-ışın demet kaliteleri	48
Çizelge 2.7 Düşük hava kerma hızı serisinin farklı nicelikleri için belirlenmiş olan dönüşüm katsayıları	49
Çizelge 2.8 Dar spektrum serisinin farklı nicelikleri için belirlenmiş olan dönüşüm katsayıları	50
Çizelge 2.9 Geniş spektrum serisinin farklı nicelikleri için belirlenmiş olan dönüşüm katsayıları	51
Çizelge 2.10 Yüksek hava kerma hızı serisinin farklı nicelikleri için belirlenmiş olan dönüşüm katsayıları	52
Çizelge 2.11 N,L,W ve H serileri için belirlenmiş olan dönüşüm katsayılarının geçerli oldukları mesafeler	53
Çizelge 2.12 L ve N serileri için ortalama enerji(\bar{E}) ve spektral ayırma gücü(R_E) değerleri.....	54
Çizelge 2.13 W serisi için ortalama enerji(\bar{E}) ve spektral ayırma gücü(R_E), H serisi için ise ortalama enerji(\bar{E}) değerleri.....	55
Çizelge 2.14 ISO tarafından belirlenmiş olan referans foton radyasyonlarının özellikleri	57
Çizelge 2.15 ISO tarafından belirlenmiş olan referans foton radyasyonları için belirlenmiş olan dönüşüm katsayıları	57

Çizelge 2.16 ISO tarafından referans olarak gösterilmiş radyoaktif kaynakların kullanılması durumunda kullanılan düzeltme katsayıları	58
Çizelge 2.17 Referans ve test koşulları.....	63
Çizelge 2.18 ISO tarafından belirlenmiş olan dar spektrum serileri için gövde fantomu kullanılarak, hava kermadan(Ka) cilt eşdeğer dozu (Hp(0.07)) niceliğine dönüşümü sağlayan farklı açılardaki dönüşüm katsayıları	78
Çizelge 2.19 ISO tarafından belirlenmiş olan dar spektrum serileri için gövde fantomu kullanılarak, hava kermadan(Ka) eşdeğer doz (Hp(10)) niceliğine dönüşümü sağlayan farklı açılardaki dönüşüm katsayıları.....	79
Çizelge 2.20 ISO tarafından belirlenmiş olan referans radyasyon alanları için gövde fantomu kullanılarak, hava kermadan(Ka) eşdeğer doz (Hp(10)) niceliğine dönüşümü sağlayan farklı açılardaki dönüşüm katsayıları	79
Çizelge 2.21 X-ışınlarının filtrasyonunda kullanılan metallerin özellikleri.....	90
Çizelge 2.22 60 kv da 1. HVL ile doğal filtrasyon arasındaki ilişki	91
Çizelge 2.23 Düşük hava kerma hızı serilerini (L) belirleyen parametreler	93
Çizelge 2.24 Dar spektrum serilerini (N) belirleyen parametreler	93
Çizelge 2.25 Geniş spektrum serilerini (W) belirleyen parametreler	94
Çizelge 2.26 Yüksek hava kerma hızı serilerini (H) belirleyen parametreler	95
Çizelge 3.1 Referans dedektör bilgileri.....	100
Çizelge 3.2 HPGe dedektörün özellikleri.....	101
Çizelge 3.3 Kalibrasyonu gerçekleştirilen dedektörlerin özellikleri	103
Çizelge 4.1 RQR 2 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar	120
Çizelge 4.2 RQR 3 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar	121
Çizelge 4.3 RQR 4 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar	122
Çizelge 4.4 RQR 5 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar	122
Çizelge 4.5 RQR 6 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar	123
Çizelge 4.6 RQR 7 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar	124

Çizelge 4.7 RQR 8 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar.....	124
Çizelge 4.8 RQA 2 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar.....	125
Çizelge 4.9 RQA 3 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar.....	126
Çizelge 4.10 RQA 4 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar.....	127
Çizelge 4.11 RQA 5 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar.....	127
Çizelge 4.12 RQA 6 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar.....	128
Çizelge 4.13 RQA 7 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar.....	129
Çizelge 4.14 RQA 8 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar.....	129
Çizelge 4.15 Elde edilmiş olan RQR X-ışın demet kalitesi için sonuçlar	130
Çizelge 4.16 Elde edilmiş olan RQA X-ışın demet kalitesi için sonuçlar	130
Çizelge 4.17 Voltaj bölücüsü ile RQR ve RQA X-ışın demet kalitelerinin hesaplanması esnasında elde edilen yüksek gerilim ortalama değerleri.....	131
Çizelge 4.18 X-ışın spektrumlarından elde edilen yüksek gerilim değerleri.....	138
Çizelge 4.19 ISO 4037-1 de tanımlanmış olan X-ışın demet kalitelerinden N40, N60, N80 ve N100 X-ışın demet kaliteleri için elde edilmiş olan sonuçlar	138
Çizelge 4.20 Elde edilmiş olan X-ışın demet kalitelerinin ortalama enerji(\bar{E}) ve 1. HVL değerinin, nominal değerler ve Xcomp5r programı ile hesaplanan değerlerle karşılaştırıldığı çizelge	153
Çizelge 4.21 TM23361 referans dedektörü ile ölçülen ve teorik olarak oluşturulan doz hızı değerlerinin aynı mesafeler için yüzdece farkları.....	157
Çizelge 4.22 TM32005 referans dedektörü ile ölçülen ve teorik olarak oluşturulan doz hızı değerlerinin aynı mesafeler için yüzdece farkları.....	159
Çizelge 4.23 TM23361 ve TM32005 referans dedektörleri kullanılarak farklı mesafelerde elde edilmiş olan doz hızı ölçümlerinin yüzdece farkları.....	159
Çizelge 4.24 Referans dedektörler ile farklı mesafelerde ölçülmüş olan doz hızları ...	160
Çizelge 4.25 Merkezden 75 cm yukarıda, 75 cm solda ve 75 cm sağda alınan ölçümler ve bu ölçümlerin merkezden alınan ölçümden yüzdece farkları	162

Çizelge 4.26 X-ışın sistemi kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon işlemi sonuçları	163
Çizelge 4.27 Farklı Radcal marka dedektörlerin enerji bağımlılıkları	167
Çizelge 4.28 Cs-137 ışınlama sistemi kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon işlemi sonuçları	168
Çizelge 4.29 X-ışın sistemi kullanılarak gerçekleştirilen kişisel dozimetre kalibrasyon işlemi sonuçları ($H_p(10)$ niceliğine göre).....	169
Çizelge 4.30 X-ışın sistemi kullanılarak gerçekleştirilen kişisel dozimetre kalibrasyon işlemi sonuçları ($H_p(0.07)$ niceliğine göre).....	169
Çizelge 4.31 Cs-137 ışınlama sistemi kullanılarak gerçekleştirilen kişisel dozimetre kalibrasyon işlemi sonuçları.....	170

1. GİRİŞ

Kalibrasyon, kontrol altındaki standart koşullarda, kalibre edilen cihazın gösterdiği değerin, doğruluğu kesin olan referans cihazın ölçtüğü değerin bir fonksiyonu olarak ifade edilmesidir (Anonymous 2000).

Bir cihazın ölçüm yapabiliyor olması ne kadar önemliyse, yaptığı ölçümün hatasız olması da bir o kadar önemlidir. Bu sebeple herhangi bir amaçla ölçüm yapan cihazın kalibrasyonunun yapılmış olması gerekir.

Radyasyon insan sağlığı için zararlı olduğundan, radyasyon ölçümünde kullanılan cihazların kalibrasyonunun yapılmış olması çok önemlidir. Radyasyon ölçümü yapan cihazın neyi ölçtüğünün yanı sıra, ne kadar doğrulukla da ölçtüğü büyük önem arz etmektedir.

Herhangi bir cihazın kalibrasyonu yapılırken öncelikle doğruluğu kesin olan bir cihaz (referans) ile ölçüm yapılır. Sonrasında kalibre edilecek olan cihaz ile ölçüm yapılır ve elde edilen sonuçlar oranlanır. Bu oran, kalibre edilen cihazın sonucunu referans cihazın sonucu cinsinden verebilmek için kalibre edilen cihazın sonucu ile çarpılır. Kalibre edilecek olan cihaz artık ne değer okursa okusun elde edilmiş olan katsayı ile çarpıldığında gösterdiği değer referans cihazın gösterge değeri ile aynı olur.

Yapılan bu tez çalışmasında, 40–125 kVp ışınlama aralığında bir X-ışın sistemi ve 47 mCi–8.58 Ci aktiviteli 2 adet Cs–137 radyoaktif kaynağa sahip bir Cs–137 ışınlama sistemi kullanılmıştır.

X-ışın sisteminde IEC–61267 protokolündeki RQR2, RQR3, RQR4, RQR5, RQR6, RQR7, RQR8, RQA2, RQA3, RQA4, RQA5, RQA6, RQA7 ve RQA8 X-ışın demet kaliteleri ve ISO 4037 protokollerindeki N40, N60, N80 ve N100 X-ışın demet kaliteleri elde edilmiştir. Elde edilen bu demet kalitelerinin aynı zamanda çok yüksek ayırma gücüne sahip olan bir yarı iletken germanyum dedektör ile X-ışın spektrumları

toplanmıştır. Bu X-ışın spektrumları Xcomp5r X-ışın spektrum programı tarafından teorik olarak çizilen spektrumlarla karşılaştırılmıştır.

Yapılan bu çalışmada; radyoterapi, diagnostik radyoloji gibi alanlarda ya da çevresel ölçüm yapılan alanlarda kullanılan foton dedektörlerinin ve radyasyonun kullanıldığı her alanda bireylerin taşıdığı kişisel termolüminesans dozimetrelerin kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu kalibrasyon işlemleri Cs-137 ışınlama sistemi ve X-ışın sistemi kullanarak yapılmıştır. Her iki sistemdeki kalibrasyonlar için de ISO, IEC gibi kuruluşların, tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde açıklanacak olan, yayınlamış oldukları protokollerdeki yöntemler uygulanmıştır. Aynı Şekilde yine tez çalışmasının ilerleyen kısımlarında açıklanacak olan, ISO 4037 de belirtilen bazı testler (rn; saçılan ışın testi, kolimatör yaprağı geçirgenlik testi, ışınlanan alandaki doz hızı homojenitesi testi vb.) gerçekleştirilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Tanımlamalar

2.1.1 Azaltıcı levhalar

Dedektöre ulaşan x ya da gama ışın demetinin önüne yerleştirilmiş ve bunların şiddetinin azaltılmasını sağlayan soğurucu materyal.



Şekil 2.1 Azaltıcı Levhalar

2.1.2 Birinci yarı değer kalınlığı (hava kerma), 1.HVL

Hava kerma ya da hava kerma hızını, herhangi bir materyal kullanılmadan ki değerinin yarısına azaltan spesifik materyal kalınlığıdır (Anonymous 2005).

2.1.3 Build up materyali

Yüksek enerjili fotonların ölçüldüğü radyasyon alanlarında iyon odalarında etkileşmeler sonucu oluşan iyonizasyonun en yüksek değerinin iyon odası içerisinde gerçekleşmesini sağlamak için kaynak ile iyon odası arasına yerleştirilen materyal.

2.1.4 Efektif enerji, E_{eff}

Aynı HVL değerine sahip mono enerjik X-ışınlarının enerjisi.

2.1.5 Enerji aktarımı

İyonize radyasyon tarafından bir hacme aktarılan enerji (M) aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$M = R_{in} - R_{out} + \sum Q \quad (2.1)$$

Burada;

R_{in} , hacme gelen ışıyan enerji yani hacme giren bütün yüklü ve yüksüz parçacıkların toplam enerjisi

R_{out} , hacimden çıkan ışıyan enerji yani hacmi terk eden bütün yüklü ve yüksüz parçacıkların enerjilerinin toplamı

$\sum Q$, hacmin herhangi bir yerinde meydana gelen etkileşimlerin çekirdek ve temel parçacıklarının geride kalan enerjilerinin toplamı olarak tanımlanır. Birimi J 'dir (Anonymous 2000).

2.1.6 Eşdeğer doz, H

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

$$H = Q \times D \quad (2.2)$$

Burada Q, o noktadaki radyasyon kalite faktörü, D ise soğrulan dozdur. Birimi $J.kg^{-1}$ dir.

2.1.7 Fantom

DeneySEL doz ölçümlerinde hastayı temsil eden, radyasyonu soğurmaya yarayan araç.

2.1.8 Homojenlik katsayısı, h

Birinci yarı değer kalınlığının ikinci yarı değer kalınlığına oranıdır.

$$h = \frac{1.HVL}{2.HVL} \quad (2.3)$$

2.1.9 Işınlama, X

Işınlama aşağıdaki oran ile tanımlanır.

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (2.4)$$

Bütün elektronlar havanın birim kütlesinde(dm) durdurulduğunda dQ, havanın birim kütlesinde oluşan tek yüklü iyonların toplam elektriksel yükleridir. Işınlamanın SI birim sistemindeki birimi C/kg 'dır. Işınlamanın önceden kullanılan birimi Roentgen(R) olarak da tanımlanır.

$$1R = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg 'dır (Faison 2004).}$$

2.1.10 Işınlama hızı

Birim zamanda meydana gelen ışınlama miktarıdır. Birimi C/(kg.s)'dir.

2.1.11 İkinci yarı değer kalınlığı (hava kerma), 2. HVL

Hava kerma ya da hava kerma hızı değerini, herhangi bir soğurucu materyal kullanılmadan ölçülen değerini dörtte birine azaltan spesifik materyal kalınlığından, başlangıçtaki hava kerma ya da hava kerma hızı değerini yarıya düşüren soğurucu kalınlığının (1. HVL) farkıdır.

2.1.12 Kerma, K

Birim küttelede, 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 $J.kg^{-1}$ 'dir. Kermanın SI birimi Gray'dir.

2.1.13 Kerma hızı, \dot{K}

Kerma hızı aşağıdaki oran ile tanımlanır.

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt} \quad (2.5)$$

Burada dK , dt zaman aralığındaki kermadaki artıştır. Birimi $J.kg^{-1}.s^{-1}$ 'dir. Kerma hızının SI birim sistemindeki birimi $Gy.s^{-1}$ 'dir.

2.1.14 Kolimatör

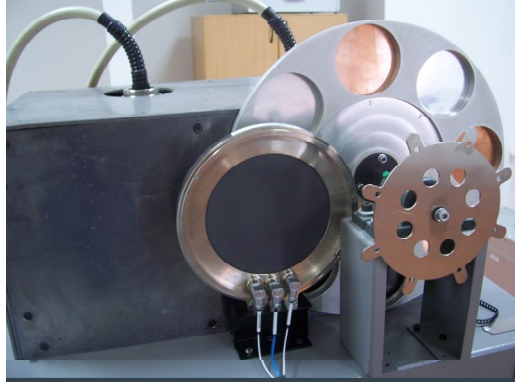
İşinlenen radyasyon alanının şeklini ve boyutunu belirleyen alettir.



Şekil 2.2 Kolimatör

2.1.15 Monitor chamber (Geçirgen iyon odası)

İçerisinden geçen X-ışınını minimum azalım ve saçılma ile ölçmek için tasarlanmış ince duvarlı iyon odasıdır. Birbiri ardına elde edilen X-ışın ölçümlerinde ki olası dalgalanmaların ölçüm sonuçlarına olan etkisinin ortadan kaldırılması için kullanılan cihazdır.



Şekil 2.3 Monitor Chamber (Geçirgen iyon odası)

2.1.16 Ortalama foton enerjisi, \bar{E}

Spektrumdaki fotonların enerjilerinin ağırlıklı ortalamasıdır. keV olarak ifade edilir. Aşağıda belirtilmiş olan formülden de hesaplanabilir.

$$\bar{E} = \frac{\int_0^{E_{\max}} \Phi_E E dE}{\int_0^{E_{\max}} \Phi_E dE} \quad (2.6)$$

Burada Φ_E , enerjileri E ve E+dE arasında olan E enerjili birincil fotonların akışının türevidir. Akış;

$$\Phi_E = \frac{d\Phi(E)}{dE} \quad (2.7)$$

olarak tanımlanır (Anonymous 1996).

Yapılan bu tez çalışmasında, ortalama foton enerjisi tanımı, ortalama enerji olarak sadeleştirilmiştir.

2.1.17 Primer radyasyon (ya da ışın)

X-ışın tüpünden çıkıp yönü değişmeyen ve saçılmaya uğramayan radyasyon ya da ışın.

2.1.18 Radyasyon kalitesi (X-ışın demet kalitesi)

X-ışın radyasyonunun kalitesi aşağıdaki parametrelere göre belirlenir,

- ışının ortalama enerjisi, \bar{E} , kiloelektronvolt(keV) olarak ifade edilir;
- spektral ayırma gücü, R_E , yüzde olarak ifade edilir;
- yarı değer kalınlığı (hava kerma), HVL, milimetre(mm) Al yada Cu olarak ifade edilir;
- homojenlik katsayısı, h.

Uygulamada radyasyon kalitesinin elde edilmesi başlıca

- X-ışın tüpüne uygulanan yüksek voltaja,
- doğal (inherent) filtrasyonun kalınlığına ve eklenen ilave filtrelerin cinsine ve kalınlığına,
- hedef (anot) özelliklerine,

bağlıdır (Anonymous 1996).

2.1.19 Radyoaktivite

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

$$A = \frac{dN}{dt} \quad (2.8)$$

Burada dN , dt zaman aralığındaki ani nükleer dönüşümlerin sayısıdır. SI birim sisteminde aktivitenin birimi becquerel (Bq)'dir. Birçok alanda aktivitenin eski birimi olan curie(Ci) hala kullanılmaktadır. $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ 'dir. Bir miktar radyoaktif çekirdeğin aktivitesi, azalım sabiti (λ) ile o anki(t) tanecik(çekirdek) sayısının(N) çarpımına eşittir.

$$A = \lambda \cdot N \quad (2.9)$$

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

$$A = A_0 \cdot e^{-(\ln 2 / T_{1/2}) \cdot t} \quad (2.10)$$

Burada A_0 başlangıç aktivitesi, t ise azalım süresidir.

2.1.20 Saçılan radyasyon

Radyasyonun herhangi bir madde ile etkileşimi sonunda yönünün ve enerjisinin değişimidir.

2.1.21 Sızıntı radyasyon

Kullanılan ışının haricinde, X-ışın tüpünün zırhından ya da radyoaktif kaynağın bulunduğu zırhtan sızan radyasyon.

2.1.22 Soğurulan doz, D

Soğurulan doz aşağıdaki oran ile tanımlanır.

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm} \quad (2.11)$$

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

2.1.23 Soğurulan doz hızı, \dot{D}

Soğurulan doz hızı aşağıdaki oran ile tanımlanır.

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (2.12)$$

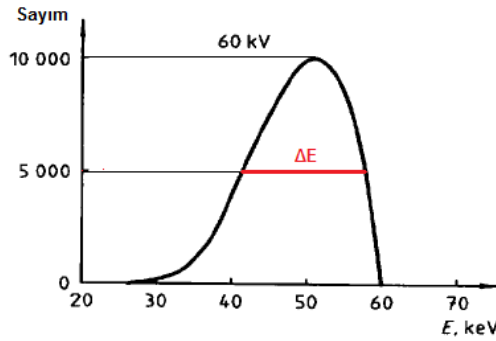
Burada; dD, dt zaman aralığında soğurulan dozdaki artıştır. Birimi $\text{j.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$ 'dir. Soğurulan doz hızının SI birimi $\text{Gy}.\text{s}^{-1}$ 'dir.

2.1.24 Spektral ayırma gücü, R_E (yarı yükseklikteki tam genişlik)

R_E , yüzde olarak ifade edilmiş formülle tanımlanan oranda;

$$R_E = \frac{\Delta E}{E} \times 100 \quad (2.13)$$

olarak tanımlanır. Burada artış ΔE , spektrum ordinatındaki maksimumun yarısındaki genişlik, \overline{E} ise spektrumdaki ortalama enerjidir (Anonymous 1996).



Şekil 2.4 ΔE , spektrumun yarı yükseklikteki tam genişliği

2.1.25 Tepe-tepe voltaj değeri, dalgacıklanma

Aşağıdaki formülde yüzdece ifade edilmiş olan orandır.

$$\frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max}} \times 100 \quad (2.14)$$

Burada U_{\max} voltaj dalgalanmasındaki maksimum değeri, U_{\min} ise voltaj dalgalanmasındaki minimum değeri.

2.1.26 Voltaj bölücüsü

Jeneratör ile X-ışın tüpü arasında paralel olarak bağlanan ve X-ışın tüpüne jeneratör tarafından gönderilen yüksek gerilimde hiçbir şekilde azalmaya neden olmadan, üzerinden çıkan sinyal kablolarının bir osiloskopa bağlanmasıyla yüksek gerilimin ölçülmesini sağlayan cihazdır.



Şekil 2.5 Voltaj Bölücüsü

2.1.27 X-ışın tüpü zırhı

Saçılan X-ışınlarının primer ya da sekonder radyasyona olan katkısını azaltmaya yönelik sabit ya da mobil panel.

2.1.28 X-ışın tüpü

Isıtılan bir flamanndan salınan elektronların odaklanarak, bir potansiyel fark ile hızlandırılıp anot yüzeyine çarptırılması sonucu X-ışını elde edilmesini sağlayan vakumlu tüp.

2.1.29 X-ışın ünitesi

Yüksek voltaj kaynağı, koruyucu muhafazası ile birlikte X-ışın tüpü ve yüksek voltaj elektriksel bağlantılarının birleşiminden oluşur.



(a)

(b)

Şekil 2.6 a) Kurşun zırh içerisindeki X-ışın tüpü ve bağlantıları b) Yüksek frekans jeneratörü

2.2 Radyasyon Kaynakları

2.2.1 Monokromatik radyasyon kaynakları

Enerji spektrumunda, tek bir enerjide enerji yüklü parçacık ya da parçacıklar salan radyasyon kaynaklarına monokromatik radyasyon kaynakları denir. Monokromatik radyasyon kaynaklarına en güzel örnek radyoaktif elementlerdir. Bu elementler ayrık enerjilerde yüklü ya da yüksüz parçacık salarlar. Yapılan bu çalışmada Cs-137 radyoaktif kaynağı kullanılmıştır.

Cs-137 radyoaktif kaynağının yarı ömrü 11050 gündür ve spesifik aktivitesi 3.22 GBq/g'dir. Cs-137 radyoaktif kaynağı ile ilgili bilgiler aşağıdaki çizelgede belirtilmiştir.

Çizelge 2.1 Cs-137 radyoaktif kaynağı ile ilgili bilgiler

Salınım	$E_{\text{MAKSİMUM}}$ (keV)	E_{eff} (keV)	Doz Hızı ($\mu\text{Sv/h/GBq}$ 1 metrede)
Beta(β)	511(% 94.6)	157	-
Gama(γ)/ X-ışını	662 (% 89.9)	-	103
Alfa(α)	-	-	-
Nötron(n)	-	-	-

2.2.2 Polikromatik radyasyon kaynakları

Bir radyasyon kaynağında farklı enerjilerde parçacıklar salınıyorsa bu parçacıkların oluşturduğu enerji spektrumu polikromatik enerji spektrumudur. X-ışınları polikromatiktir.

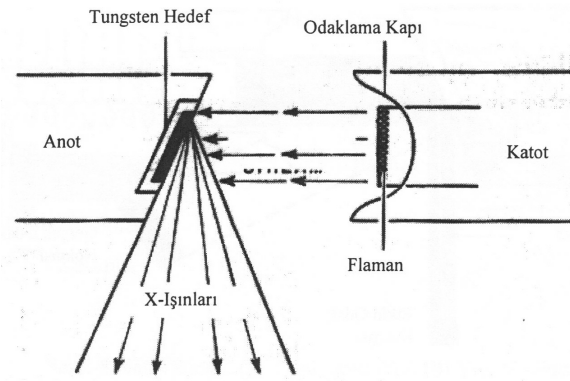
2.2.2.1 X-ışınları

X-ışın tüpü, içerisinde katot ve anot olarak isimlendirilen iki elektrot bulunan havası boşaltılmış bir cam tüpten oluşur.



Şekil 2.7 X-ışın tüpü

Serbest elektronlar katotta üretildikten sonra katot-anot arasına uygulanan yüksek voltajla hızlandırılarak anoda çarptırılırlar. Yüksek hızdaki elektron bombardımanı sonucunda anotta X-ışın fotonları meydana gelir. Anot üzerinde X-ışınlarının oluştuğu noktaya odak noktası denir (Bor 2009).



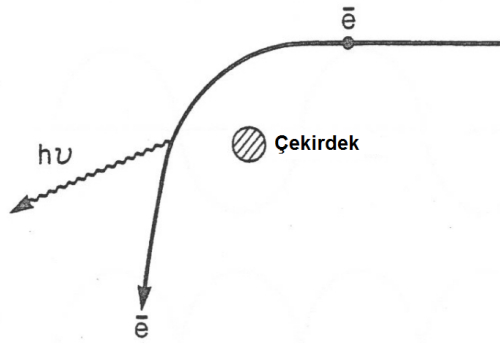
Şekil 2.8 X-ışın oluşumu

2.2.2.1.1 X-ışınları oluşumu

X-ışınlarının meydana gelmesinde elektronların hedef madde atomları ile etkileşme şekillerine göre iki farklı mekanizma vardır.

2.2.2.1.1.1 Bremsstrahlung

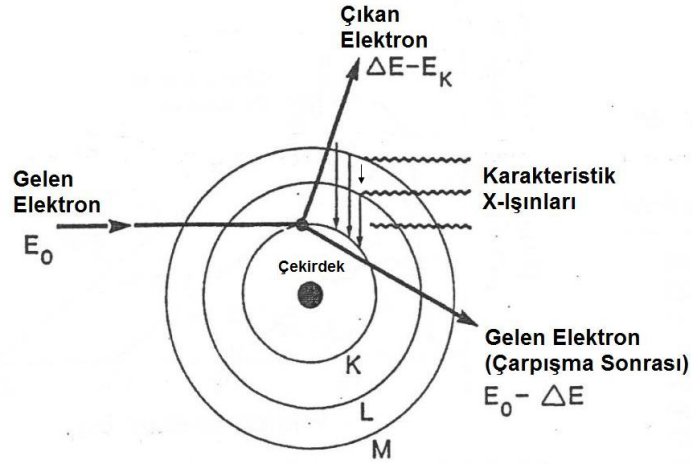
Bu etkileşme, hedef içerisinde ilerleyen elektronların hedef maddenin çekirdeğine yaklaşması esnasında gerçekleşir. Negatif yüklü elektronlar çekirdeğin pozitif alanından etkilenerek yollarından saparlar ve kinetik enerjilerinde azalma olur. Bu kinetik enerji kaybı bir X-ışını fotonu olarak salınır. Bu fotonun enerjisi; elektron ve çekirdek arasındaki mesafeye, elektron enerjisine ve etkileşen çekirdeğin yüküne bağlıdır. Bremsstrahlung fotonlarının geniş bir enerji dağılımları vardır. Hedefe farklı enerjilerde elektronların ulaşması ve elektronların enerjilerini aşamalı olarak kayıp etmeleri bu dağılımın nedenleridir. Anot içerisinde ilerleyen elektronlar artan derinlikle daha fazla etkileşim yaparlar. Dolayısıyla her etkileşme sonrasında bir miktar enerji kaybettikleri için bu etkileşme sonucunda oluşacak olan fotonların enerjileri düşük olur. Anot yüzeyinde oluşan etkileşmelerde ise oluşan fotonların enerjileri daha yüksektir. Dolayısıyla artan anot kalınlığıyla foton enerjileri azalmaktadır. Bunun yanı sıra elektronların hedefin çekirdeğine olan yakınlıkları da farklı foton enerjilerinin oluşmasına neden olur. Çekirdeğe en yakın bölgelerden etkilenen elektronlar en fazla kuvvet altında kalan elektronlardır. Dolayısıyla bunlar enerjisi en yüksek olan fotonları yaratacaklardır. En dış bölgelerden etkilenen elektronlar ise en zayıf kuvvetler etkisinde olanlardır. Bunun sonucunda da bu elektronlar en düşük enerjili fotonları oluşturacaklardır (Bor 2009).



Şekil 2.9 Bremsstrahlung X-ışını oluşumu

2.2.2.1.1.2 Karakteristik X-ışınları

X-ışınlarının meydana gelmesindeki ikinci olay, gelen elektronların hedef atomun iç yörüngelerindeki elektronlarla etkileşmelerine dayanan iyonizasyon olayıdır. Bu etkileşme en fazla K yörünge elektronları ile gerçekleşir ve sonuçta bir elektron yörüngesinden koparılır ve geride bir boşluk kalır. Daha sonra K yörüngesinde oluşan bu boşluğu genelde L yörüngesinden bir elektron doldurur ve bir X-ışını salınır. Elektronun K yörüngesine düşmesi sonucunda, bu tabaka L-K yörüngeleri arasındaki enerji farkı kadar uyarılır ve uyarılan bu tabakanın enerjisi X-ışını olarak salınır ya da Auger elektronuna verilir.



Şekil 2.10 Karakteristik X-ışın oluşumu

2.3 Radyasyon Ölçümünde Kullanılan Dedektörlerin Özellikleri

Radyasyon ölçümünde kullanılan dedektörler temel olarak, alan ölçüm cihazları ve kişisel dozimetreler olmak üzere ikiye ayrılır.

2.3.1 Alan ölçüm cihazları

Aşağıda, doz ya da doz hızını ölçmeye yarayan çeşitli ve farklı tipteki radyasyon ölçen çevresel ölçüm sistemlerinin özellikleri hakkında kısaca bilgi verilecektir. Bu sistemler radyasyon spektrumunu ölçerler ya da ölçmüş oldukları bu spektrumdan doz eşdeğerini

(örneğin hava kerma hızını) hesaplarlar. Bu sistemler kendi aralarında üç grupta toplanabilirler.

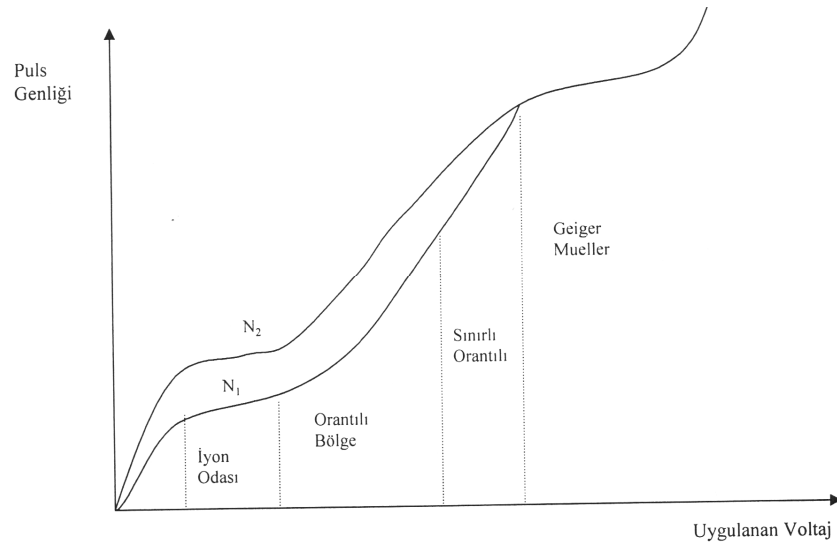
1. Gaz odalı dedektörler
 - 1.1. İyon odası
 - 1.2. Orantılı sayaç
 - 1.3. Geiger-Müller dedektörü
2. Sintilasyon dedektörleri
3. Yarıiletken dedektörleri

2.3.1.1 Gaz odalı dedektörler

İçerisinde farklı gaz bulunan radyasyon dedektörlerine gaz odalı dedektörler denir. Gelen radyasyonun oluşturduğu iyon çiftlerinin, dedektörün içerisinde bulunan gaz atomları ile etkileşmeleri prensibine göre çalışırlar. Dedektörler uygulanan yüksek gerilim sonucunda, dedektör plakaları arasında oluşturulan elektrik alan ile elde edilmiş olan iyon çiftleri elektrotlara ulaşırlar. Bunun sonucunda oluşan pulslar ile radyasyon ölçümü sağlanır. Uygulanan yüksek gerilim ile elektrik alan doğru orantılıdır ve her dedektör tipi için uygulanacak olan yüksek gerilim farklıdır.

Alanın çok küçük değerlerinde, oluşan iyon çiftleri elektrotlara ulaşacak yeterli enerjiyi kazanamadıkları için bir kısmı tekrar birleşmektedir ve toplanan yük miktarı meydana gelen iyon çifti sayısından daha azdır. Voltaj arttırılmaya devam edilirse başlangıçta oluşan tüm birincil iyon çiftleri elektrotlarda toplanır ve daha fazla bir voltaj artışı iyon akımını etkilemez, zira meydana gelen tüm yükler toplanmıştır. Bu plato kısmı iyon odasının çalışma bölgesidir. Eğer her biri N_1 ve N_2 gibi farklı sayıda iyon çifti oluşturan iki farklı iyonize olay dikkate alınır, ikinci olay yani N_2 iyon çifti için plato başlangıcı biraz daha yüksek bir voltaj değerinde görülecektir, zira tekrar birleşme olasılığı iyon çifti sayısının artmasıyla fazlalaşır. Voltajın arttırılmasıyla gaz çoğalım etkisi başlar, toplanan yük miktarı ve gözlenen puls genliği büyür. Voltajın belirli bir aralığında gaz çoğalımı doğrusaldır ve toplanan yük, gelen radyasyon tarafından meydana getirilen başlangıçtaki iyon çifti sayısı ile orantılıdır. Bu bölgeye doğru orantılı bölge denir ve

orantılı sayaçların çalışma bölgesini temsil eder. N_2 ve N_1 'in oranları bu bölgede hep aynıdır. Voltajın daha fazla arttırılması ile bu orantılılık kayıp olmaya başlar. N_2 eğrisi hızla N_1 'e yaklaşır. Puls genliği, yine artan voltajla artmaktadır ancak artık orijinal iyon sayısı ile orantılı değildir. Bu bölgeye sınırlı orantılı bölge denir. Voltajın daha da yükseltilmesiyle gittikçe artan pozitif yük sayısı, elektrik alanını daha fazla bir gaz çoğaltımının olmayacağı bir seviyeye indirir, yani sistemde, yeni iyon çiftlerinin oluşmasını sağlayan neden ortadan kalkar. Burada dikkat edilmesi gereken önemli nokta, elektrik alan değerini artık çıkı yaratamayacak daha düşük bir değere indiren uzay yükü miktarı hep aynıdır ve sonuçta elde edilen pulsların hepsinin genlikleri birbirine eşittir ve gelen radyasyonun hiçbir özelliğini yansıtmaz. Bu bölgeye Geiger-Müller bölgesi denir (Knoll 2000).



Şekil 2.11 Gaz doldurulmuş dedektörlerin farklı çalışma bölgeleri

2.3.1.1.1 İyon odası

Nükleer radyasyon dedektörlerinin pek çoğu, dedektöre gelen radyasyonun oluşturduğu iyonları ayırmak için bir elektrik alan kullanırlar. En basit tipte ki dedektör bir iyon odasıdır. Bunlar plakalarının arasına gaz (daha çok hava) doldurulmuş paralel düzlem kondansatörlerdir (Krane 1987). Bir başka tasarım ise merkezinde tel bulunan (anot) silindirik tasarımlardır. Gama ışınlaşmasının ölçülmesinin istendiği durumlarda en uygun gaz havadır. İyonizasyon yoğunluğunun artmasının istendiği durumlarda argon gibi daha yoğun gazlar kullanılmaktadır. İyon odasına gelen radyasyon gaz atomları ile

etkileşerek atomik uyarma ve iyonizasyona neden olacak ve enerjisini kaybedecektir. İyonizasyon sonucu oluşan serbest elektronlar ve pozitif iyonlar, elektrotlar arasına uygulanan alanın etkisiyle anot ve katoda ulaşarak bir iyon akımı meydana getirirler. Oda içerisindeki tüm iyonlar elektrotlara ulaştıklarında dış devreden okunan akım oda içerisindeki iyonizasyon akımına eşit olur. İyon akımı (i) ile, oluşan ortalama iyon çiftleri (N) arasındaki bağıntı;

$$i = N e \quad (2.15)$$

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

İyon odaları iki farklı çalışma prensibine göre çalışabilirler. Bunlardan birincisi akım modudur. Bu prensibe göre çalışan iyon odaları ortama sürekli olarak giren radyasyonun oluşturduğu ortalama iyonizasyonu algılayacak şekilde tasarlanmışlardır. Bu sistemlerde, her bir radyasyonun oluşturduğu iyonizasyon akımları çok küçük olduklarından ayrı ayrı ölçülemeyip, gelen radyasyonun ortalama bir şiddeti elde edilir. Diğer bir iyon odası çalışma prensibi ise puls modu çalışma prensibidir. Bu prensibe göre çalışan iyon odalarında gelen her radyasyonun oluşturduğu sinyal pulsları ayrı ayrı sayılırlar (Knoll 2000).

İyon odalarındaki amaç gelen radyasyonun şiddetini ölçmek olduğundan, mümkün olduğu kadar gelen radyasyonun enerjisinden bağımsız¹ yapılırlar. Sonuçta gelen demetin enerjisi ne olursa olsun iyon akımı demetteki parçacık sayısına bağlı olacaktır. Ancak bu enerji bağımsızlığı çok geniş bir enerji skalasında yapmak mümkün değildir. Her iyon odası belirli bir enerji aralığı için enerjiden bağımsız yapılır ya da belli bir enerji aralığı için enerji bağımlılığını düzeltme faktörleri kullanılarak enerjiden bağımsız yapılır.

İyon odaları farklı doz – doz hızı aralıklarında kullanılmak için tasarlanmışlardır. Şöyle ki, genellikle hacmi geniş olan iyon odalarının hassasiyetleri, hacmi dar olan iyon odalarına göre daha yüksektir. Yani bir başka deyişle hacmi geniş olan iyon odaları ile

¹ Gelen fotonun enerjisine göre dedektörün yanıtındaki değişim.

daha düşük sınırlarda doz –doz hızı ölçümü yapılırken, hacmi daha dar olan iyon odaları ile daha yüksek doz-doz hızı sınırlarında ölçüm yapılmaktadır.

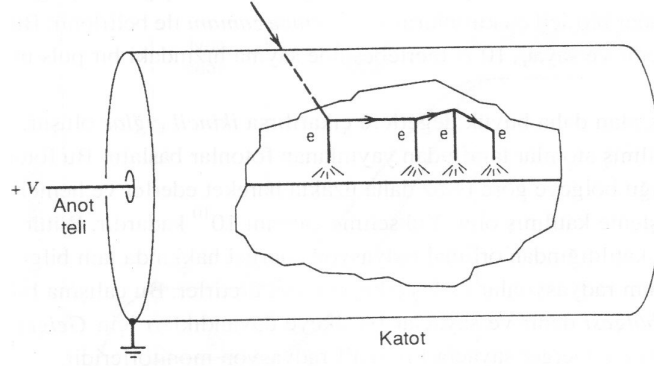


Şekil 2.12 İyon odası

2.3.1.1.2 Orantılı sayaç

Orantılı sayaçta, iyon odası tasarımında olduğu gibi içerisinde gaz doldurulmuş kapalı bir hacim dedeksiyon ortamı oluşturmakta ve aralarına yüksek voltaj uygulanacak anot ve katot bulunmaktadır. Gelen radyasyonun oluşturduğu orijinal iyon çiftlerinin gaz atomları ile etkileşmeleri prensibine göre ve her zaman puls modunda çalışırlar. Pulsların genlikleri aynı şartlarda çalışan iyon odasında elde edilen pulslara göre daha büyüktür. Bu nedenle daha çok, alçak enerjilerdeki X-ışınlarının dedeksiyon ve spektroskopisinde, nötron dedeksiyonunun da kullanılırlar. Diğer bir amaç ise alfa ve beta radyasyonlarının dedeksiyonudur.

Elektrik alanın ufak değerlerinde elektron ve pozitif iyonlar elektrotlara doğru hareket ederlerken ortamdaki nötral gaz molekülleri ile birçok etkileşme yaparlar, artan alan şiddeti ile serbest elektronlar daha fazla kinetik enerji kazanırlar. Eğer bu enerji gaz moleküllerinin iyonizasyon enerjisinden daha fazla ise bu etkileşmeler sonucunda ilave iyon çiftlerinin de yaratılması mümkün olur. Bu ikincil iyonizasyon işlemi ile serbest kalan elektronlar, elektrik alanın etkisiyle hızlanarak diğer gaz molekülleri ile çarpışırlar ve ilave iyonizasyon olaylarına neden olurlar. Böylelikle gazın iyonizasyonu çoğaltması bir şelale gibi devam eder ve Townsend Çıığı olarak nitelendirilir. Bu çıığı tipi çoğalma elektronların anotta çoğalması ile sona erer.



Şekil 2.13 Şematik olarak Townsend çığı oluşumu

Orantılı sayaçlarda genellikle %90 oranında argon ve %10 oranında metan karışımı olan (P-10) gazı kullanılır. Orantılı sayaçların hassasiyeti içerisine konan gazın cinsine bağlıdır.



Şekil 2.14 Orantılı sayaç

2.3.1.1.3 Geiger-Müller dedektörü

Geiger-Müller (GM) dedektörleri çalışma prensibi iyonizasyona dayanan diğer bir gaz odası sistemidir. GM tüpte uygulanan elektrik alan değerinin hayli yüksek olması nedeniyle, bölüm 2.3.1.1.2 de açıklanmış olan, oluşan Townsend çığı çok şiddetlidir ve her çığ dedektör içerisinde bir başka pozisyonda bir başka çığ oluşturur. GM tüpte tek bir etkileşmenin sonrasında çığlar tüm tüpü sarar ve sonuçta oluşan tüm pulsların genlikleri birbirine eşit olup, başlangıçtaki iyon çifti sayısına bağlı değildir. Bu nedenle GM sayaçları spektroskopi amacıyla değil, sadece radyasyonun basit dedeksiyonu için kullanılır (Knoll 2000).

Bir GM sayacının çıkış sinyalleri pek çok ış işlemi sonucu birikmiş elektronları içerir; bu sinyal 1 V civarındadır ve genellikle daha fazla yükselme gerekli değildir. Elektronların birikme süresi 10^{-6} sn kadardır. Bu süre içerisinde pozitif iyonlar ış bölgesinden çok uzağa gidemezler. Böylece anot teli civarı pozitif yüklü iyon bulutuyla çevrilir. Bu bulut elektrik alan şiddetini dşrtr ve sonucunda ış işlemi durur. Pozitif iyonların katoda sürüklenmeleri ve nötralize olmalarıyla çevrim tamamlanır, fakat bu süredeki hareketleri esnasında iyonlar hızlanırlar ve katottan elektron skebilecek kadar yeterli enerji kazanabilirler ve ış tekrar başlamış olur. Sürekli artıştan korunmak için tüpe ikinci bir tür gaz eklenir, buna söndürücü gaz denir. Söndürücü gaz genellikle etanol gibi kompleks organik moleklldr; ilk konulan gaz ise argon gibi basit moleküllü bir gazdır. Tipik bir karışım %90 argon ve %10 etanoldur (Krane 1987).

Eğer bir Geiger boşalımının hemen sonrasında, daha elektrik alan kritik değerinin altında olduğu bir anda yeni bir iyonizasyon etkileşmesi meydana gelirse, bu etkileşmeye ait ikinci bir puls gaz çoğalımı olmadığı için gözlenmeyecektir. Bu zaman boyunca tp ldr ve bu süre içerisinde olan tüm etkileşmeler kayıp olacaktır. Bir GM tüpün l zamanı, ilk puls ile boyutuna bakılmaksızın ikinci Geiger boşalımının başladığı zaman arasındaki aralıktır.

GM dedektörlerinin düşük foton enerjilerindeki yanıtları(enerji bağımlılıkları) ok yüksektir. Bunun üstesinden gelmek için GM'lere enerji dengeleyici filtre yerleştirilmiştir. evre ölçümlerinde halen en geniş kullanımı olan dedektrdrler (Anonymous 1999). En fazla kullanım alanı radyasyonun basit dedeksiyonudur ancak uygun kalibrasyon ile okumaları hava kerma ya da ışınlama(R)(exposure) cinsinden verilebilir.



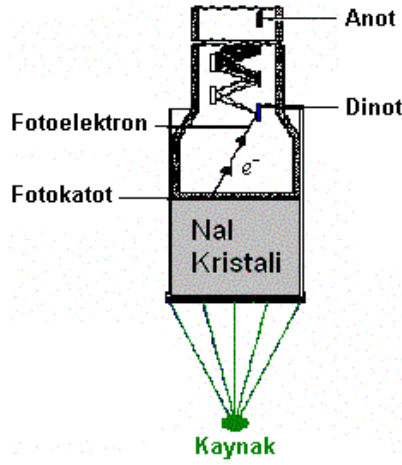
Şekil 2.15 Geiger-Müller dedektörü

2.3.1.2 Sintilasyon dedektörü

İyonize radyasyonun bazı maddelerde oluşturduğu sintilasyon ışığı ile algılanması eski yöntemlerden biri olup, farklı radyasyonların dedeksiyonu ve spektroskopisinde en yararlı tekniklerden bir tanesidir. İdeal bir sintilasyon maddesinin özellikleri aşağıdaki gibi olmalıdır.

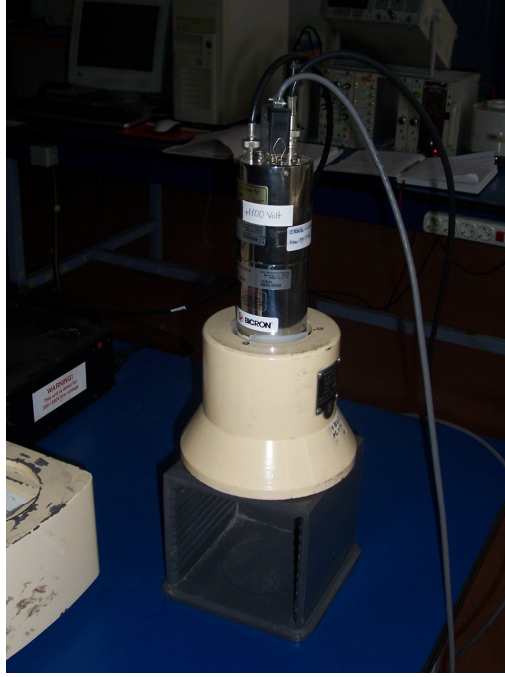
- Yüklü parçacıkların kinetik enerjilerini, yüksek bir sintilasyon etkinliği ile dedekte edilebilecek ışığa çevirmelidir.
- Bu dönüşüm doğrusal olmalıdır. Yani, ışık verimi soğurulan enerji ile geniş bir aralıkta orantılı olmalıdır.
- Işığın etkin bir şekilde toplanması için ortam kendi salınımının dalga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

Sintilasyon dedektörlerinin çalışma şekli kısaca şu şekilde özetlenebilir. Gelen radyasyon dedektöre girer ve atomları uyarılmış düzeylere çıkaran çok fazla sayıda etkileşme yapar. Uyarılmış durumlar hızla, görünür bölgede(veya görünür bölgeye yakın) ışık yayarlar. Böyle materyallere fluoresans denir. Bu ışık fotonları PM tüpte bulunan fotokatoda çarparak foton başına en çok bir fotoelektron salınmasına neden olur. Bu ikincil elektronlar PM tüpte çoğaltılır, hızlandırılır ve çıkış pulsları şekline dönüştürülür (Krane 1987). Elde edilmiş olan bu pulsların işlenmesiyle radyasyon ölçümü gerçekleştirilir. Gelen fotonların enerjisi ile anotta elde edilen pulsun genliği orantılıdır. Bu sayede enerji ayırımı yapılır.



Şekil 2.16 Sintilasyon dedektörü çalışma şeması

Sintilasyon dedektörleri temelde inorganik sintilasyon dedektörleri ve organik sintilasyon dedektörleri olmak üzere ikiye ayrılır. İnorganik kristaller arasında sodyum iyodür, organiklerde ise plastik ve organik yapıli sıvılar en popüler olanlarıdır. İnorganiklerin ışık verimi ve doğrusallığı en iyiyken, cevap zamanları nispeten yavaştır. Organik sintilatörler ise daha az ışık veriminde ama çok hızlıdırlar. Bileşik maddelerin yüksek atom numaraları ve yoğunlukları inorganikleri gama spektroskopisi için en uygun yaparken, organikler beta spektroskopisi ve hızlı nötron dedeksiyonun da tercih edilirler (Knoll 2000).



Şekil 2.17 Sintilasyon dedektörü

2.3.1.3 Yarı iletken dedektörü

Yarı iletken dedektörlerin işlevleri genelde iyon odalarına benzer ancak yük taşıyıcıları elektron ve pozitif iyonlar değil elektron ve deşiklerdir. En yaygın olarak kullanılan yarı iletken dedektörler silikon ve germanyumdan yapılmışlardır. Bu dedektörlerin diğerlerine göre en önemli üstünlükleri enerji ayırma güçlerinin son derece yüksek olmasıdır. Diğer önemli özellikleri ise;

- Geniş bir enerji aralığında radyasyona karşı yanıtları doğrusaldır.
- Belirli bir boyut için etkinlikleri yüksektir, zira yapılarında yüksek yoğunlukta sert madde kullanılmaktadır.
- Farklı geometrik tasarımlarda yapılmaları mümkündür.
- Puls doğma zamanları hızlıdır(gaz dedektörlerine göre).
- Vakum altında çalışırlar.
- Manyetik alanlara karşı hassas değildirler. (Knoll 2000)

2.3.1.3.1 Yüksek saflıkta germanyum yarı iletken dedektörler

P-i-N yapısında yarı iletken diyotlardır. Gelen gama ışınlarının germanyum kristali ile etkileşerek oluşturduğu elektron-deşik çiftleri uygulanan elektrik alanın etkisiyle p ve n elektrotlarına hareket ederek sinyal oluştururlar. Germanyum kristalinde bir elektron deşik çifti oluşturmak için gerekli ortalama enerji 77 K'deki sıvı azot sıcaklığında 2,96 eV'dur. Oluşan yüklerin (elektron-deşik çiftlerinin) en az tuzaklandığı (yapısal kusurların en az olduğu) germanyumun bant aralığı enerjisi 0,67 eV'dur. Uygun elektron-deşik mobilitelerine (elektronlar için $3.6 \times 10^4 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ve deşikler için $4.2 \times 10^4 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$) ve yeterli foton soğurma katsayısı, atom numarası (32) ve yoğunluğa ($5,32 \text{ g.cm}^{-3}$) sahiptirler. Ancak sızıntı akıma bağlı oluşan gürültü sinyalinin önlenmesi için HPGe dedektörler sıvı azot sıcaklığında (77 K) çalıştırılır.

HPGe dedektörler p-tipi (pozitif alıcı safsızlıklara sahip) veya n-tipi (negatif verici safsızlıklara sahip) düzlemsel (planar) ve eş-eksenli (coaxial) olarak tasarımlanabilirler. Eş eksenli geometrinin avantajı gama spektrometresinde ihtiyaç duyulan geniş aktif hacmin sağlanmasıdır. Eş eksenli HPGe dedektörler aynı zamanda kuyu tipi olarak da kullanılır. Kaynağın bu kuyu içine yerleştirilmesiyle kaynak neredeyse tamamen kristal tarafından sarılmış olur ve dedeksiyon verimi artar.



Şekil 2.18 Yüksek saflıkta germanyum yarı iletken dedektör

2.3.2 Kişisel dozimetreler

Kişilerin üzerlerinde taşıdıkları ve üzerlerinde taşıdıkları süre boyunca anlık ya da toplam süredeki dozu ölçen dedektörlere kişisel dozimetreler denir. Kişisel dozimetreler kendi içlerinde üçe ayrılabilirler.

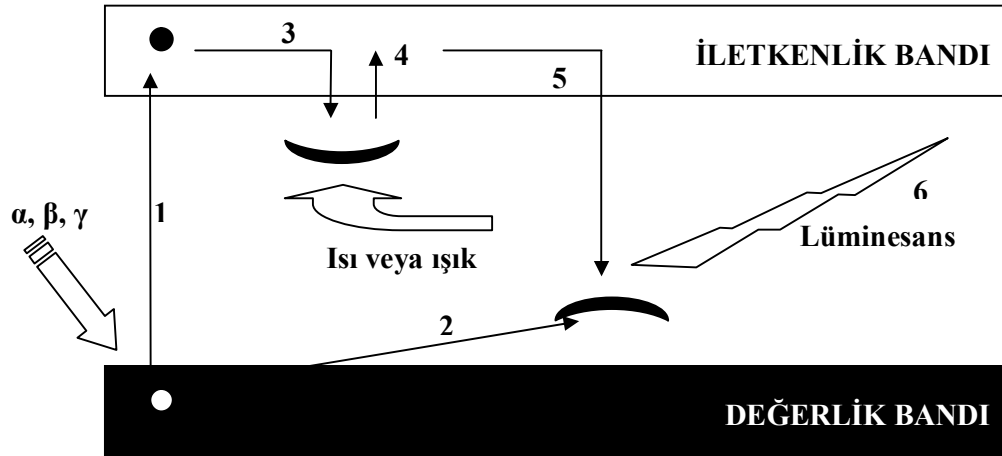
2.3.2.1 Termolüminesans dozimetreler

2.3.2.2 Film dozimetreler

2.3.2.3 Elektronik dozimetreler

2.3.2.1 Termolüminesans dozimetreler

Termolüminesans(TL), bir yalıtkanın ya da yarı iletkenin ısıtıldığında, daha önce ışınlanması sonucu soğurduğu enerji ile orantılı olarak ışık yayması olayıdır. Isıtılan maddenin artan sıcaklıkla yayılan ışık miktarına bağlı olarak çizilen grafiğe ‘ışınma eğrisi’ denir.



Şekil 2.19 Basit termolüminesans modeli

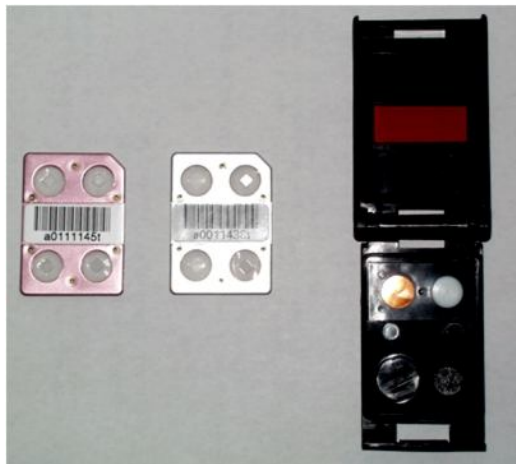
(1) Radyasyona maruz kalan kristalde elektronlar, enerji kazanarak değerlik bandından iletkenlik bandına çıkarlar. (2) Elektronların ayrıldığı yerde boşluklar (deşikler, holler) oluşur. Budeşikler difüzyonla değerlik bandı üzerindeki lüminesans merkezlerine taşınırlar. (3) Termal dengeden dolayı iletim bandından elektronlar tekrar değerlik

bandına doğru hareket ederler. Bu esnada yasak bölgede bulunan tuzaklarda yakalanırlar. Elektronların yakalandığı bu tuzaklardaki ömürleri tuzağın derinliğine bağlı olarak birkaç saatlik bir süreden yüz binlerce yıllık bir süreye kadar değişim gösterebilir. Bir dış etken (ısı) vasıtasıyla tuzaklanan elektronlar tuzaklardan çıkartılabilirler. (4,5) Tuzaklardan çıkan elektronlar önce iletim bandına, oradan da birleşme merkezlerine hareket ederek buradaki deşiklerle birleşebilirler. (6) Bu sırada sistemden ısı veya ışık yayılımı (lüminesans) gözlemlenir. Tuzaklardan elektronları çıkarmak için ısı kullanılırsa bu işleme termolüminesans denir.

İyi bir termolüminesans dozimetre aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır.

- Basit ışımaya eğrisine sahip olmalıdır.
- Gama ışınlarına hassasiyeti yüksek olmalıdır.
- Tekrar edilebilir olmalıdır.
- Doz hızından bağımsız olmalıdır.
- Yeniden kullanım için basit tavlama prosedürüne sahip olmalıdır.
- Gün ışığına karşı duyarsız olmalıdır.
- TL sönmeye uğramadan oda sıcaklığında birkaç hafta depolanabilmelidir.
- Boyutları küçük ve kullanım uygunluğu yüksek olmalıdır.
- Doku eşdeğeri olmalıdırlar.

Başlıca termolüminesans dozimetreler; LiF:Mg, LiF:Mg-Cu-P, CaF₂:Mn, CaF₂:Dy, CaSO₄:Dy, CaSO₄:Mn, CaSO₄:Tm, BeO, Al₂O₃, Li₂B₄O₇, MgB₄O₇

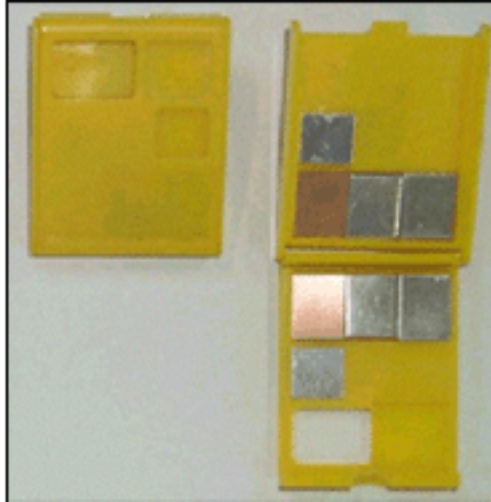


Şekil 2.20 Termolüminesans dozimetreler

2.3.2.2 Film dozimetreler

Film dozimetreler kişisel dozimetride kullanılan en eski sistemlerden biridir. Dozimetrenin içerisinde bulunan radyografik filmde meydana gelen kararma ile kişinin maruz kaldığı doz hesaplanır. Film komponentleri veya emülsiyon cinsi radyasyonun cinsine ya da ölçülecek radyasyon seviyelerine göre değişebilir. Filmler üzerlerinde bir pencere bulunan taşıyıcılarla korunur.

Film dozimetrelerin kişisel dozimetrideki en önemli avantajları küçük, hafif, dayanıklı olmaları, birden fazla tipteki radyasyonları aynı zamanda kaydetmeleri ve geniş bir ölçü sahasındaki toplam ışınlamaların ölçümünü temin edebilmeleridir. Dezavantajları ise belli bir enerji aralığında enerjiye fazla miktarda bağımlı olmaları, filmlerin banyo ve densitometre problemleridir. Enerji bağımlılığını ortadan kaldırmak ve farklı tipteki radyasyonların sebep oldukları kararmaları ayırt edebilmek için film üzerine alüminyum, kalay, bakır, gümüş gibi metalik filtreler yerleştirilir. Film dozimetrelerin bir diğer dezavantajı, termolüminesans dozimetrelere oranla hassasiyetlerinin düşük olmasıdır.



Şekil 2.21 Film dozimetre

2.3.2.3 Elektronik dozimetreler

Piyasadaki elektronik dozimetreler kullanıcının üzerinde taşıyabileceği ve kişisel eşdeğer doz nicelikleri de ($H_p(10)$, $H_p(0,07)$) dâhil olmak üzere pek çok doz niceliğini ölçebilecek şekilde tasarlanmışlardır. Çoğu elektronik dozimetre dedektör olarak Geiger Müller(GM) ya da katı hal cihazlarını kullanır. GM kullanılan modellerdeki enerji bağımlılığı düşük enerjilerde yüksektir.



Şekil 2.22 Elektronik dozimetre

2.4 Dozimetre ve Doz Hız Ölçerler için İşlevsel Nicelikler

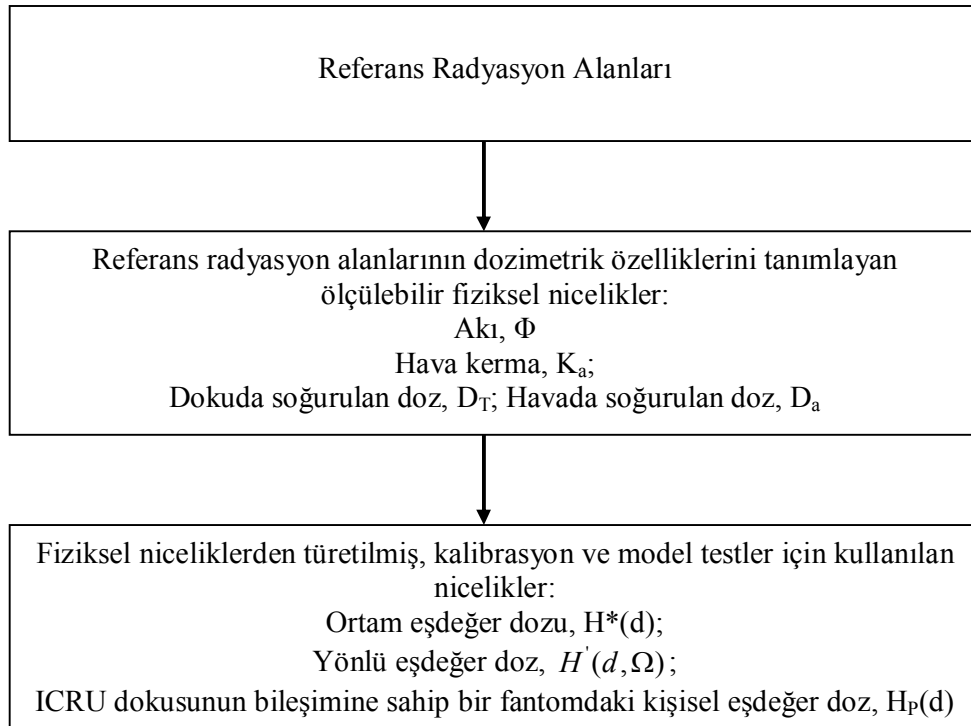
1991 yılında ICRP (International Commission on Radiological Protection) radyasyondan korunma amacı için birincil limit değerlerinin şartnamesinin de dâhil olduğu yeniden düzenlenmiş bir doz limit sistemi tavsiye etmiştir. Uluslararası Atom Enerji Kurumu(IAEA) ICRP'nin tavsiyelerini kendi temel güvenlik standartlarında birleştirmiştir. Doz limit sistemi eşdeğer doz (H) ve etkin doza (E) dayanır. Bu korunma nicelikleri aslında 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 içinse 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 daha 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 (Anonymous 2000).

Çizelge 2.2 Alan ve kişisel ölçümlerde genel olarak kullanılan nicelikler

Radyasyon	Limit Niceliği	Kullanılan Yer	
		Alan Ölçümleri	Kişisel Ölçümler
Yüksek Giricilikteki Radyasyon	Etkin Doz	$H^*(10)$	$H_p(10)$
Düşük Giricilikteki Radyasyon	Cilt Dozu	$H'(0.07, \alpha)$	$H_p(0.07)$
	Gözdeki Lens Dozu	$H'(3, \alpha)$	$H_p(3)$

Şekil 2.23’ da referans radyasyon alanları, referans radyasyon alanlarının dozimetrik özelliklerini karakterize eden fiziksel nicelikler ve kalibrasyon ve model testi için kullanılan nicelikler arasındaki ilişkiyi gösteriliyor.



Şekil 2.23 Referans radyasyon alanlarında kullanılan ölçülebilir ve türetilmiş nicelikler

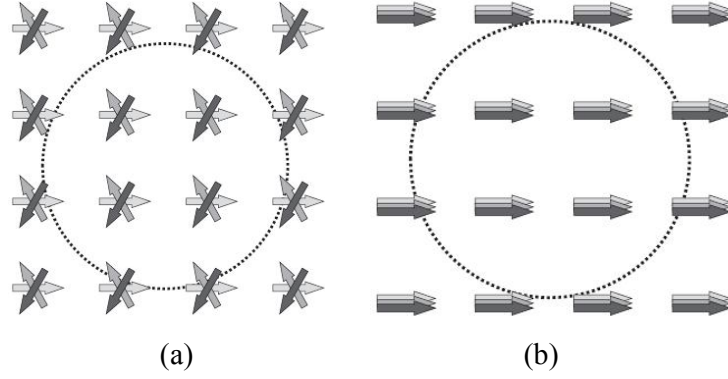
Kalibrasyon laboratuvarında kullanılacak referans radyasyon alanları ISO tarafından tavsiye edilir. Referans radyasyon alanını karakterize eden temel radyasyon nicelikleri referans cihazlar ile ölçülür. Kalibrasyon ve model test ile ilgili nicelikler uygun dönüşüm katsayılarıyla temel radyasyon niceliklerinden türetilir. Örneğin ölçülen hava kerma değeri (K_a) verilen bir katsayı ile çarpılarak kişisel eşdeğer doz niceliği $H_p(d)$ elde edilebilir.

Radyasyon ölçümleri, alan ölçümleri ve kişisel ölçümler olmak üzere temelde ikiye ayrılır. Alan ölçümleri de kendi aralarında çevre(ortam) eşdeğer dozu ve yönlü eşdeğer doz olarak iki şekilde incelenir.

2.4.1 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 birleşimi %76,2 oksijen, %11,1 karbon, %10,1 hidrojen ve %2,6 nitrojenden oluşan bir materyalden oluşmaktadır. Bu materyale “ICRU dokusu” denir. Radyasyon alanlarını karakterize etmede “genişletilmiş”, “hizalanmış(doğrultulmuş)” terimleri kullanılır. Genişletilmiş alanda; ilgilenilen tüm hacim boyunca gerçek alandaki 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 tek yönlüdür.

Genişletilmiş alan konseptinde şekil 2.24(a)'da da görüldüğü gibi ölçüm noktasına her yönden radyasyon gelmektedir. Yani ölçüm noktaları (dedektörün hassas hacmi), radyasyon alanı içerisinde ölçüm sanki tek bir noktada yapılmış gibidir. Bir başka deyişle radyasyon alanı içerisinde kalmış bir kişinin, aynı ölçüm noktalarında olduğu gibi, tüm vücudunun aynı akı ve enerji dağılımındaki bir radyasyona maruz kaldığı kabul edilir. Hizalanmış alanda ise akı ve enerji dağılımı tek bir yönden gelmektedir.

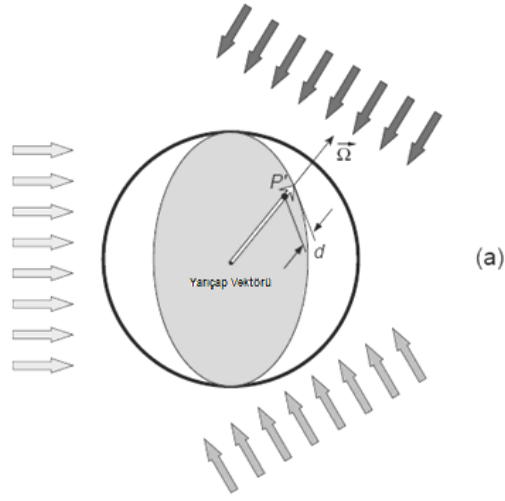


Şekil 2.24 (a) Genişletilmiş ve (b) genişletilmiş ve hizalanmış alanların şematik gösterimi

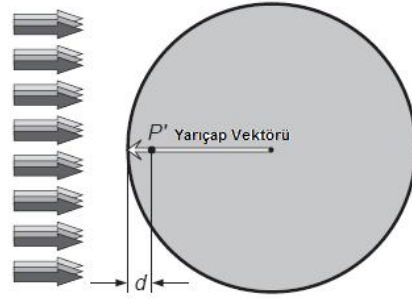
$H^*(10)$ ölçmek için tasarlanmış cihazların izotropik (eş yönlü, yönden bağımsız) cevaplarının olması gerekir. Alan dozimetrelerinin kalibrasyonları ve model testleri havada yapılmalıdır.

2.4.1.1 Ortam eşdeğer dozu, $H^*(d)$

ICRU küresindeki $d(\text{mm})$ derinliğinde, hizalanmış radyasyon alanına zıt yöndeki yarıçapta, genişletilmiş ve hizalanmış alana eşdeğer bir radyasyon alanından elde edilen bir noktadaki eşdeğer dozdur. Birimi j/kg 'dır. SI birim sisteminde sievert(Sv) 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 mm'lik derinlik cilt ve 3 mm'lik derinlik ise göz için benzer gösterimlerle kullanılır.



(a)



(b)

Şekil 2.25 (a)Genişletilmiş, (b) genişletilmiş ve hizalanmış radyasyon alanlarındaki eşdeğer doz tanımları

a) Genişletilmiş radyasyon alanında tanımlanan, ICRU küresindeki P noktasındaki eşdeğer doz. b) Genişletilmiş ve hizalanmış radyasyon alanında tanımlanan ICRU küresindeki P noktasındaki eşdeğer doz. Genişletilmiş alanda radyasyon, ICRU küresine farklı yönlerden çarpabilir. $H'(d, \Omega)$ yarıçap vektörünün yönünü α tanımlar. Bir genişletilmiş ve hizalanmış alan içinde $H^*(d)$ için tanımlanan yarıçap vektörü daima radyasyon alanının yönüne zıttır.

2.4.1.2 Yönlü eşdeğer doz, $H'(d, \Omega)$

ICRU küresindeki $d(\text{mm})$ derinliğinde, spesifik bir yöndeki yarıçapta Ω , genişletilmiş radyasyon alanına denk bir radyasyon alanında, bir noktadaki eşdeğer dozdur. Birimi

j/kg 'dır. SI birim sisteminde Sievert (Sv) olarak tanımlanır. Düşük gıricilikteki 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 edilirler.

2.4.2 Kişisel ölçümler

2.4.2.1 Kişisel eşdeğer doz, $H_p(d)$

Vücut üzerinde spesifik bir noktada, uygun bir $d(mm)$ derinliğinde ICRU dokusundaki eşdeğer dozdur. Eşdeğer dozun birimi j/kg'dır. Eşdeğer dozun birimi sievert (Sv) olarak gösterilir. Düşük gıricilikteki radyasyon için 0,07 mm'lik derinlik cilt ve 3 mm'lik derinlik ise göz için kullanılır. Bu derinliklerdeki kişisel eşdeğer dozlar sırasıyla $H_p(0,07)$ ve $H_p(3)$ olarak ifade edilir. Yüksek gıricilikteki radyasyon içinse 10mm'lik derinlik benzer gösterimle kullanılır, $H_p(10)$ (Anonymous 2000). Burada dikkat edilmesi gereken husus bu büyüklüklerin kişilerin taşıdıkları kişisel dozimetrelerden okunan değerler olduğudur. Yani kişisel dozimetreler bu üç niceliğe göre kalibre edilmelidir.

Not: Kişisel dozimetre kalibrasyonlarında kullanılan aşağıdaki fantomların, $H_p(d)$ 'nin tanımında da belirtildiği üzere, ICRU dokusundan oluştuğu dikkate alınır.

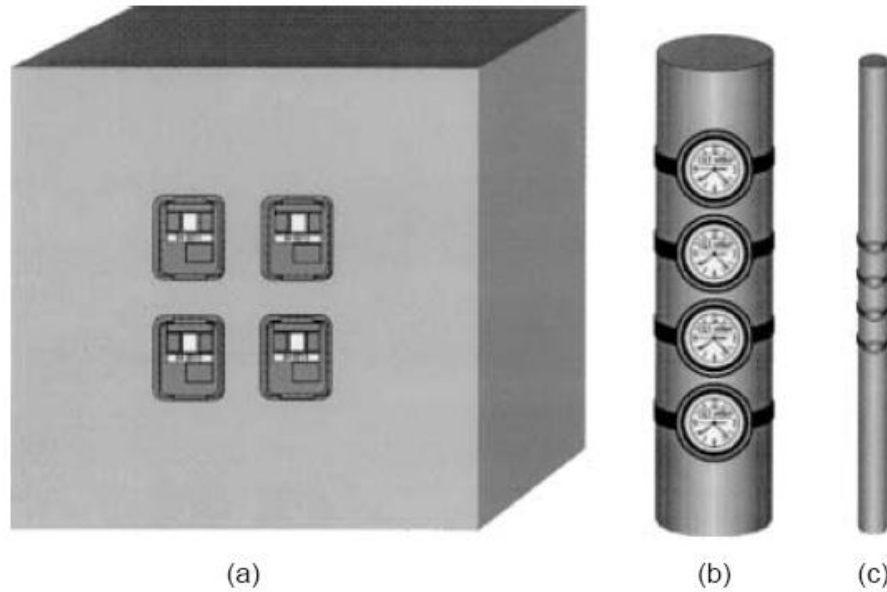
- insan gövdesini temsil eden 300 mm x 300 mm x 150 mm boyutlarındaki düz fantom
- 73 mm çapında ve 300 mm uzunluğunda aşağı kol ve bacağı temsil eden silindir şeklindeki direk fantomu
- 19 mm çapında ve 300 mm uzunluğunda parmakları temsil eden(yüzük dozimetrelerin kalibrasyonu için) silindir şeklindeki çubuk fantomu

Esas olarak fantomlar standartlaşmış fantomlarda ışınlanmalıdır. Foton, beta ve nötron radyasyonlarında kalibrasyon ve model testi için üç fantom seçilmiştir.

- 1) ISO water slab phantom(Gövde Fantomu): Gelen radyasyonun geri saçılımı ile insan gövdesini temsil eden 300 mm x 300 mm x 150 mm boyutlarındaki

fantoma ISO water slab fantom (gövde fantomu) denir. Katı fantomunun ön yüzü 2,5 mm kalınlığındaki PMMA² plakasından oluşmaktadır. Diğer fantom kesitleri 10 mm kalınlıktaki PMMA' dır.

- 2) ISO water pillar phantom(Sütun Fantomu): 73 mm çapında ve 300 mm uzunluğunda(yükseklğinde), gelen radyasyonun geri saçılımı ile aşağı kol ya da bacakları temsil eden el ve ayak bileklerindeki dozimetreleri test etmeye yarayan fantomdur. Fantomun duvarları PMMA' dan oluşmuştur. Dairesel duvarlar 2,5mm ve bitiş duvarları 10mm kalınlığa sahiptirler.
- 3) ISO PMMA rod phantom(Çubuk Fantomu): 19 mm çapında ve 300 mm uzunluğunda(yükseklğinde), gelen radyasyonun geri saçılımı ile parmakları temsil eden, parmak(yüzük) dozimetrelerini test etmeye yarayan fantomdur. Bu fantom PMMA' dan oluşmuştur (Anonymous 2000).



Şekil 2.26 Kişisel dozimetrelerin kalibrasyonunda kullanılan fantomlar

a) ISO water slab phantom b) ISO water pillar phantom c) ISO PMMA rod phantom

Örnek olarak her bir fantoma dört adet dozimetre yerleştirilmiştir.

Bu üç tip fantomun kabaca vücudun sadece ilgili bölümlerini temsil ettiği açıktır. Fakat bunları belli amaç için yaparlar çünkü;

² PMMA(polimetil metakrilat)'nın yoğunluğu 1,19 gr/cm³ ve kütlece %8,05 H, %59,99 C ve %31,96 O 'den oluşan bir karışımdır.

- $H_p(d)$ 'nin tanımına göre, bir kişisel dozimetre radyasyonun vücuttan geri saçılımına karşı hassas olmalıdır. Dozimetrenin takıldığı yerdeki gerçek vücut parçası ile standart fantom arasındaki geri saçılım farkı böylece otomatik olarak ölçülmüş olur.
- Üç farklı şekilde tasarlanan fantomlar, kalibrasyon ve model test ihtiyacını karşılar.
 1. Örneğin etkin dozun hesaplanmasında gövde de taşınan tüm vücut dozimetreleri.
 2. El ve ayak bileği dozimetreleri ve yüzük dozimetreleri gibi vücudun belli bölgelerindeki dozun hesaplanmasını sağlayan dozimetreler.
- Standartlarda verilen dönüşüm katsayıları sadece, ICRU dokusundan oluşan ve aynı şekillerde olan referans fantomlarla aittir.
- Tavsiye edilen fantomların devamlı olarak kullanılması, kalibrasyon ve model testlerin farklı laboratuvarlar ile karşılaştırılmasını olası kılar.

Bu fantomlar kullanıldığında, ICRU dokusuna göre geri saçılım faktörlerindeki farklılıkları düzeltmeye yarayan düzeltme faktörlerinin kullanılmasına gerek kalmaz. Zira geri saçılım zaten ölçülen değerde vardır. Şekil 2.22 'de bu fantomların şematik çizimleri ve dozimetrelerin bu fantomlara yerleştirilmesinin örnekleri gösterilmektedir.

2.5 Cihazların ve Standart Laboratuvarların Sınıflandırılması

2.5.1 Cihazların sınıflandırılması

2.5.1.1 Birincil standart

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

2.5.1.2 İkincil standart

Değeri bir birincil standartla direkt karşılaştırılarak belirlenip ve bir sertifika ile beraber izlenebilirliği belgelenmiş standarttır.

2.5.1.3 Üçüncül standart

Değeri bir ikincil standart ile karşılaştırılarak belirlenmiş standarttır.

2.5.1.4 Ulusal standart

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

2.5.2 Birinci dereceden standart dozimetri laboratuvarı

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

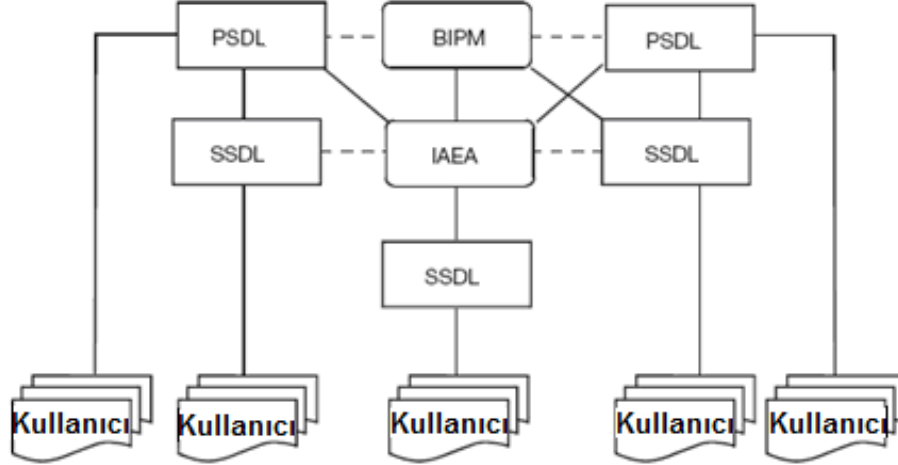
2.5.3 İkinci dereceden standart dozimetri laboratuvarı

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

2.5.4 Uluslararası Ölçüm Sistemi (IMS)

IMS, kullanıcılara kalibrasyonlu radyasyon cihazlarının dağıtılmasıyla, radyasyon dozimetrisinde ki tutarlılık için bir mekanizma sağlar ve bu cihazlar birincil standart laboratuvarlarda izlenebilirler. Uluslar arası ölçüm sistemi Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), ulusal birincil standart dozimetri laboratuvarları (PSDL),

ikincil standart dozimetri laboratuvarları (SSDL) ve pek çok kullanıcı ölçümlerinden oluşmaktadır (Anonymous 2007).



Şekil 2.27 Uluslararası ölçüm sisteminin (IMS) şematik gösterimi

2.5.5 İkincil standart dozimetri laboratuvarları

Radyasyon dozimetrisiyle ilgili dünyada sadece yirmi ülkede PSDL'leri bulunmaktadır ve bu kuruluşlar tüm dünyadaki kullanımda olan çok büyük sayıdaki radyasyon dozimetrelerini kalibre edememektedirler. SSDL'in ana rolü ise PSDL ile iyonize radyasyon kullanıcıları arasında var olan boşlukta, kalibrasyonların PSDL'dan kullanıcı cihazına transferini gerçekleştirmesiyle bir köprü oluşturmaktır. SSDL'lar 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 dozimetride uzman hizmet sağlamaktadırlar. Bazı ülkelerde SSDL'in rolü akredite olmuş ikincil kalibrasyon laboratuvarlarıncı gerçekleştirilir. Bunun için herhangi bir PSDL'da kalibre edilmiş ikincil standarda sahip olmalı, karşılaştırmalara katılmalı ve bu akreditasyon için ulusal metroloji kuruluşunda akredite olmalıdır (Anonymous 2007).

2.6 Foton Dedektörlerinin Kalibrasyonu

Referans dedektörlerin ve referans radyasyon alanlarının (foton) kalibrasyonlarında hava kerma niceliği kullanılmalıdır. Radyasyondan korunma ölçüm cihazlarının (radiation protection monitoring instruments) kalibrasyonu eşdeğer doz niceliğinde yapılmalıdır. Alan dozimetreleri ya da doz hızı metreleri (doz hızı ölçüm cihazları) herhangi bir fantom olmadan (örneğin havada) ortam eşdeğer doz niceliğinde ($H^*(d)$) ya da yönlü eşdeğer doz niceliğinde ($H'(d, \Omega)$) kalibre edilmelidirler. Kişisel dozimetrelerin ya da doz hızı ölçüm aletlerinin kalibrasyonları ise ISO water slab fantom (Gövde fantomu), ISO water pillar fantom (Sütun fantomu) ya da ISO PMMA rod fantomlarında (Çubuk fantomu) ICRU dokusuna göre farklılık gösteren geri saçılım düzeltilmesi için herhangi bir düzeltme faktörü kullanılmadan gerçekleştirilir.

2.6.1 Foton dedektörlerinin ve kişisel dozimetrelerin kalibrasyonu için kullanılan referans X-ışın demet kaliteleri

Foton dedektörlerinin ve kişisel dozimetrelerin kalibrasyonları için ISO 4037-1 ya da IEC 61267 tarafından seçilmiş olan referans X-ışın demet kaliteleri kullanılmalıdır. Doz ve doz hızı ölçen cihazların kalibrasyonunda ve enerji bağımlılıklarının belirlenmesinde kullanılan bu referans radyasyonların nasıl elde edildiği tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde belirtilecektir.

2.6.1.1 IEC-61267 de belirlenmiş olan X-ışın demet kaliteleri

X-ışın demetlerinin en kapsamlı özellikleri, onların spektral dağılımları ile verilir. X-ışın spektrometresi oldukça uzmanlık gerektiren ve uygulanması epeyce zaman harcayan bir çalışma olduğundan X-ışın kaliteleri sıklıkla; uygulanan gerilim, 1. ve 2. HVL değerleri ile tanımlanırlar (Anonymous 2007).

IEC-61267 tarafından tanımlanmış olan 'standart radyasyon şartları' aşağıdaki parametrelerle tanımlanır;

- a. Anot (hedef) materyalinin cinsi ve özellikleri
- b. X-ışın tüpüne uygulanan yüksek gerilim
- c. Toplam filtrasyon
 - X-ışın sisteminin bünyesindeki filtrasyon
 - Eklenen filtrenin ya da fantomun kalınlığı ve yapıldığı materyal
- d. Birinci yarı kalınlık değeri (1.HVL)
- e. Homojenlik katsayısı
- f. Ölçümlerin alındığı mesafe

IEC-61267 tarafından belirlenmiş olan X-ışın demet kaliteleri elde edilirken ve bu demet kaliteleri kullanılırken, X-ışın tüpüne uygulanan gerilimdeki dalgalanma %10'u geçmemelidir. X-ışın tüpündeki anot materyali ise tungsten olmalıdır.

IEC-61267 tarafından belirlenmiş olan X-ışın demet kaliteleri;

1. **RQR:** Herhangi bir fantom ya da ek filtre kullanılmadan X-ışın kaynağından çıkan ışınlar ile elde edilen demet kalitesidir.
2. **ROA:** Işınlanan bir hastayı temsil eden ek bir filtreden çıkan ışınlar ile elde edilen demet kalitesidir.
3. **RQC:** Saçılmanın olmadığı ortamda, floroskopi sistemlerinin otomatik parlaklık kontrolünün ayarlanması için elde edilen demet kalitesidir.
4. **RQT:** Bilgisayarlı tomografi uygulamalarının özelliklerini tanımlanmada kullanılan demet kalitesidir.
5. **RQN:** Ölçüm sonuçlarında elde edilen sinyale, saçılan ışınların katkısının minimum yapılması istendiğindeki elde edilen demet kalitesidir.
6. **RQB:** Ölçüm sonuçlarında elde edilen sinyale, saçılan ışınların katkısının fazla olmasının istendiği durumlarda elde edilen demet kalitesidir.
7. **RQR-M:** Mamografi uygulamalarında, filtrelenmemiş X-ışın kaynağından çıkan ışınlar ile elde edilen demet kalitesidir.
8. **RQA-M:** Mamografi uygulamalarında, ışınlanan bir hastayı temsil eden ek bir filtreden(A1) çıkan ışınlar ile elde edilen demet kalitesidir.

9. **RQN-M:** Mamografi uygulamalarında ki ölçüm sonuçlarında elde edilen sinyale, saçılan ışınların katkısının minimum yapılması istendiğindeki elde edilen demet kalitesidir.

10. **RQB-M:** Mamografi uygulamalarında ki ölçüm sonuçlarında elde edilen sinyale, saçılan ışınların katkısının fazla olmasının istendiği durumlarda elde edilen demet kalitesidir.

Bu çalışmada IEC 61267’de belirlenmiş olan RQR ve RQA X-ışın demet kaliteleri elde edilmiş ve deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.

2.6.1.1.1 RQR X-ışın demet kalitesi (**Radiation Qualities in Radiation beams emerging from the x-ray source assembly**)

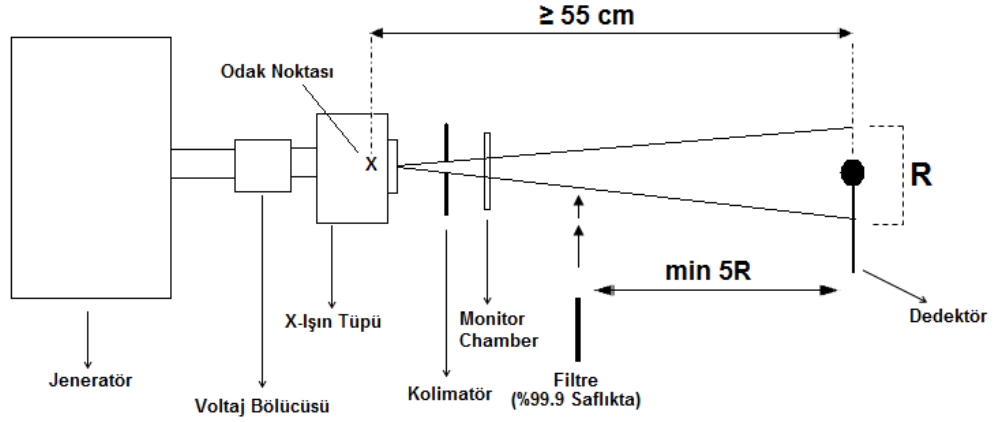
RQR, herhangi bir fantom ya da ek filtre kullanılmadan X-ışın kaynağından çıkan ışınlar ile elde edilen demet kalitesidir. Bu X-ışın demet kalitesi genel radyografi, floroskopi ve dental uygulamalarda hastaya gelen demeti temsil eder.

Çizelge 2.3 RQR X-ışın demet kaliteleri

Radyasyon kalitesi	X-ışın tüpüne uygulanan gerilim (kV)	1. HVL (mm Al)	Homojenlik katsayısı (h)
RQR 2	40	1.42	0.81
RQR 3	50	1.78	0.76
RQR 4	60	2.19	0.74
RQR 5	70	2.58	0.71
RQR 6	80	3.01	0.69
RQR 7	90	3.48	0.68
RQR 8	100	3.97	0.68
RQR 9	120	5.00	0.68
RQR 10	150	6.57	0.72

RQR X-ışın demet kaliteleri aşağıda verilen parametrelere göre tanımlanır.

- Anot materyali tungsten olmalıdır.
- X-ışın tüpüne uygulanan gerilim çizelge 2.3 de 2. sütunda verilen değere ayarlanmalıdır.
- X-ışın sisteminin toplam filtrasyonu ayarlanabilmelidir.
- 1. HVL değerleri çizelge 2.3 de 3. sütunda verilen değerlerde olmalıdır.
- Homojenlik katsayısı çizelge 2.3 de 4. sütunda verilen değerlerde ya da bu değerlerin ± 0.03 'lük limitleri içerisinde olmalıdır.



Şekil 2.28 RQR demet kalitesinin elde edileceği düzenek

X-ışın tüpüne uygulanan yüksek gerilim ve bu gerilim değerlerinin ayarlanması bir adet yüksek frekans jeneratörü ile gerçekleştirilir. Yüksek frekans jeneratörü ile X-ışın tüpü arasında paralel olarak bağlanmış bir voltaj bölücüsü bulunmaktadır. X-ışın tüpüne uygulanan gerilim, jeneratör ile X-ışın tüpü arasında paralel olarak bağlanmış olan bu voltaj bölücüsü ile sürekli olarak herhangi bir şekilde tüp çıkışına müdahale edilmeksizin izlenebilmektedir. X-ışın tüpüne uygulanan yüksek gerilim tanımlanmış olan değere %1.5 ya da 1.5 kV'lık belirsizlikle ayarlanmalıdır. HVL ölçümlerinde ve toplam filtrasyonun ayarlanmasında kullanılan filtreler %99.9 saflıkta alüminyum olmalıdır ve bu filtrelerin bilinen değeri ± 0.01 mm'lik limitler içerisinde olmalıdır. Dedektör ile odak noktası arasındaki mesafe 55 cm den fazla olmalıdır bu sayede saçılan ışınların dedektöre olan etkisi azaltılır. Dedektörün bulunduğu yerdeki radyasyon alanı dedektör boyutuna göre homojen ve tam olarak ışınlayabilecek genişlikte açılmalıdır. Bu alan ne çok dar ne de çok aşırı geniş açılmamalıdır. Çok dar

açıldığı durumlarda ışınlama alanı homojen dağılım göstermeyebilir ve aynı zamanda dedektörün tüm hacmi ışınlanmayabilir. Bu durumda da ölçüm sonuçlarında hata meydana gelir. Çok geniş açılırsa da elde edilen alandaki saçılan ışınlar ölçüm sonuçlarına etki eder. Dedektör ile soğurucu filtre arasındaki mesafe, dedektör yüzeyindeki ışın alanının en az 5 katı olacak şekilde ayarlanır. Bu sayede soğurucu filtreden kaynaklanan saçılan radyasyon ölçüm sonuçlarını etkilemez.

Elde edilmesi istenen demet kalitesinde ki HVL ölçümleri öncelikle o demet kalitesinin elde edileceği yüksek gerilimin ayarlanmasıyla başlanır. HVL ölçümlerinde öncelikle herhangi bir filtre yokken(doğal filtrasyon) doz ya da doz hızı ölçülür. Sonrasında filtreler eklenerek önce, doz ya da doz hızının yarıya düştüğü filtre kalınlığı sonra da doz ya da doz hızının dörtte birine düştüğü filtre kalınlığı belirlenir. Elde edilen değerler çizelge 2.3 de belirtilen değerlerden farkı ise X-ışın tüpüne belirli bir kalınlıkta filtre eklenir ve bu işlemler tekrar edilir. Bu işlemlere istenilen 1. HVL ve homojenlik katsayısı değerleri elde edilinceye kadar devam edilir. İstenilen 1. HVL ve homojenlik katsayısı değerlerinin elde edilmesinde başka bir yolda kullanılabilir. Herhangi bir filtre eklemeyen, elde edilecek olan X-ışın demet kalitesinde kullanılan yüksek gerilim değeri çok az miktarda değiştirilerek istenilen 1. HVL ve homojenlik katsayısı değerleri elde edilebilir. Elde edilen 1. HVL değeri çizelge 2.3 de belirtilen değerde ya da ± 0.1 mm'lik limitler içerisinde olmalıdır.

2.6.1.1.2 RQA X-ışın demet kalitesi (Radiation Qualities based on a Phantom made up of aluminium Added filter)

RQA X-ışın demet kalitesinin karakteristik özellikleri aşağıdaki gibidir.

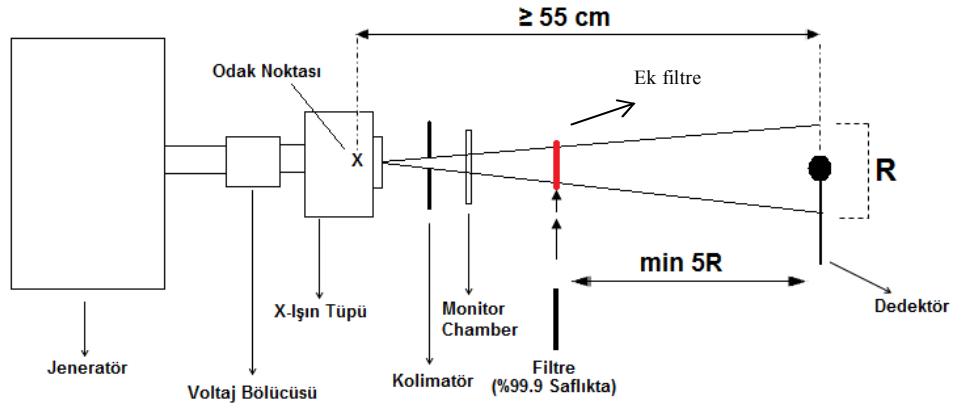
- Ölçümler hastayı temsil eden bir fantomdan (eklenmiş olan Al filtreler) çıkan ışınlar ile gerçekleştirilir.
- Dedekte edilen X-ışın demetindeki saçılan radyasyon miktarı çok önemli değildir.

Çizelge 2.4 RQA X-ışın demet kaliteleri

Radyasyon kalitesi	X-ışın tüpüne uygulanan gerilim (kV)	Ek filtre (mm Al)	1. HVL (mm Al)
RQA 2	40	4	2.2
RQA 3	50	10	3.8
RQA 4	60	16	5.4
RQA 5	70	21	6.8
RQA 6	80	26	8.2
RQA 7	90	30	9.2
RQA 8	100	34	10.1
RQA 9	120	40	11.6
RQA 10	150	45	13.3

RQA X-ışın demet kaliteleri aşağıda verilen parametrelere göre tanımlanır.

- Anot materyali tungsten olmalıdır.
- X-ışın tüpüne uygulanan gerilim çizelge 2.4 de 2. sütunda verilen değere ayarlanmalıdır.
- X-ışın sisteminin toplam filtrasyonu ayarlanabilmelidir.
 - i. Eklenen filtrasyon çizelge 2.4 de 3. sütunda verilen değerde olmalıdır.
- 1. HVL değerleri çizelge 2.4 de 3. sütunda verilen değerlerde olmalıdır.



Şekil 2.29 RQA demet kalitesinin elde edileceği düzenek

RQA X-ışın demet kalitesinin elde edilmesi, RQR X-ışın demet kalitesinin elde edildiği şekilde gerçekleştirilir. Fakat bu iki demet kalitesi arasındaki en büyük fark RQA demet kalitesinde bulunan ve soğurucu ortamı (örneğin; hasta) temsil eden ek filtredir. Bu ek filtre istenen demet kalitesindeki kalınlığa göre yerleştirilir ve HVL ölçümlerinde daima sabit kalır. Ölçümler bu filtre varken yapılır. 2. HVL değerinin ölçülmesine dolayısıyla homojenlik katsayısının bulunmasına gerek yoktur. Burada elde edilmesi gereken 1. HVL değeri çizelge 2.4 de 4. sütunda verilen değerde ya da ± 0.1 mm'lik limitler içerisinde olmalıdır.

2.6.1.2 ISO 4037–1 de belirlenmiş olan X-ışın demet kaliteleri

ISO 4037'de, hava kerma hızı aralığı $10 \mu\text{Gy/saat}^{-1}$ ile 10Gy/saat^{-1} arasında olan radyasyon dedektörlerinin kalibrasyonları ve enerji bağımlılıklarının incelenmesi için, referans x ve gama ışın kalitelerinin özellikleri ve nasıl elde edileceği belirtilmiştir. Referans x ve gama ışın kaliteleri 4 farklı gruba ayrılmışlardır. Bu gruplar aşağıda belirtilmiştir.

- a) 7 keV - 250 keV enerji aralığındaki filtre edilmiş X-ışınları ve Am-241 den elde edilen gama ışınları
- b) 8 keV - 100 keV enerji aralığındaki fluoresans x radyasyonu
- c) 600 keV - 1.3 MeV enerji aralığındaki radyonüklitlerden salınan gama radyasyonu
- d) 4 MeV - 9 MeV enerji aralığındaki reaktör ve hızlandırıcılardan elde edilen gama radyasyonu

Kolaylık olması açısından ISO 4037-1'de belirtilen flüoresans, radyoaktif kaynak, düşük hava kerma hızı, dar, geniş ve yüksek hava kerma serileri sırasıyla F,S,L,N,W ve H harfleri ile kısaltılmışlardır. Bu çalışmada ISO 4037-1'de belirlenmiş olan S-Cs(Cs-137) ve N referans X-ışın demet kaliteleri kullanılmıştır.

Çizelge 2.5 ISO 4037–1 de belirtilmiş olan referans radyasyon alanları

Demet Kalitesi	\bar{E} (keV)	Demet Kalitesi	\bar{E} (keV)	Demet Kalitesi	\bar{E} (keV)	Demet Kalitesi	\bar{E} (keV)	Demet Kalitesi	\bar{E} (keV)
F-Zn	8.6	L-10	8.5	N-10	8	W-60	45	H-10	7.5
F-Ge	9.9	L-20	17	N-15	12	W-80	57	H-20	12.9
F-Zr	15.8	L-30	26	N-20	16	W-110	79	H-30	19.7
F-Mo	17.5	L-35	30	N-25	20	W-150	104	H-60	37.3
F-Cd	23.2	L-55	48	N-30	24	W-200	137	H-100	57.4
F-Sn	25.3	L-70	60	N-40	33	W-250	173	H-200	102
F-Cs	31.0	L-100	87	N-60	48	W-300	208	H-250	122
F-Nd	37.4	L-125	109	N-80	65			H-280	146
F-Sm	40.1	L-170	149	N-100	83			H-300	147
F-Er	49.1	L-210	185	N-120	100				
F-W	59.3	L-240	211	N-150	118				
F-Au	68.8			N-200	164				
F-Pb	75.0			N-250	208				
F-U	98.4			N-300	250				
Radyonüklit				Yüksek Enerjili Fotonlar					
Demet Kalitesi	Radyoizotop	\bar{E} (keV)	Demet Kalitesi	Reaksiyon	E (MeV)				
S-Am	Am ²⁴¹	59.5	R-C ¹²	C ¹² (p,p' γ) C ¹²	4.36				
S-Cs	Cs ¹³⁷	662	R-F ¹⁹	F ¹⁹ (p, α γ) O ¹⁶	6.61				
S-Co	Co ⁶⁰	1250	R-Ti(n,K)	(n, γ)	5.14				
			R-Ni(n,K)	(n, γ)	6.26				
			R-O ¹⁶	O ¹⁶ (n,p) N ¹⁶	6.61				

ISO 4037–1 tarafından belirlenmiş olan filtre edilmiş X-ışın referans demet kaliteleri aşağıdaki parametrelere göre karakterize edilir.

- Ortalama enerji, \bar{E}
- Spektral ayırma gücü, R_E

- c) Yarı değer kalınlığı, HVL
- d) Homojenlik katsayısı, h

Referans demet kaliteleri ise aşağıdaki parametrelere bağlıdır.

- i. X-ışın tüpüne uygulanan yüksek gerilime
- ii. Toplam filtrasyonun cinsine ve kalınlığına
- iii. Hedefin(anodun) özelliklerine

2.6.2 ISO referans foton radyasyonları için dönüşüm katsayıları

2.6.2.1 X-ışınları

2.6.2.1.1 Filtre edilmiş X-ışınları

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.

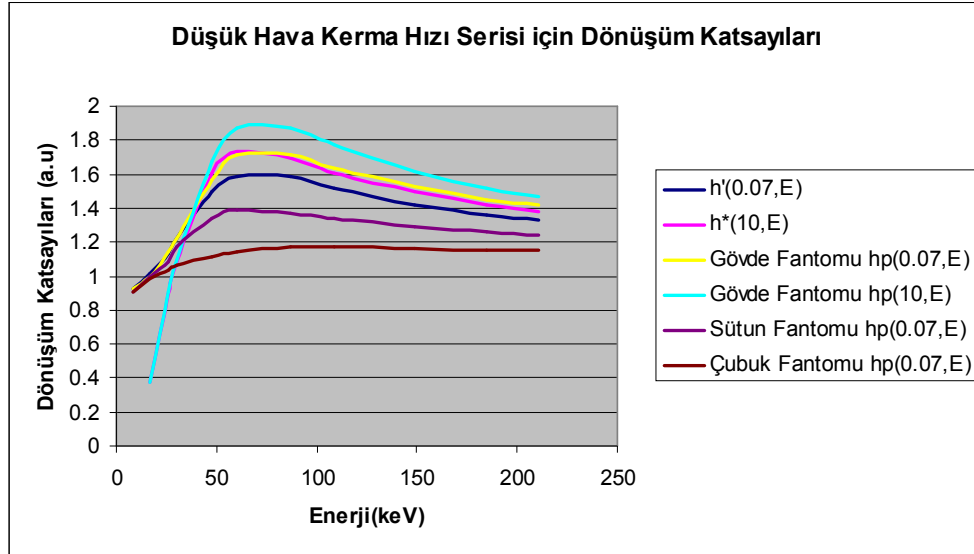
Çizelge 2.6 ISO 4037–1 de tanımlanmış olan X-ışın demet kaliteleri

Serinin Adı	Spektral Ayırma Gücü, R_E (%)	Homojenlik Katsayısı, h (yaklaşık değerler)
Düşük Hava Kerma Hızı	18'den 22'ye	1.0
Dar Spektrum	27'den 37'ye	0.75'den 1.0'e
Geniş Spektrum	48'den 57'ye	0.67'den 0.98'e
Yüksek Hava Kerma Hızı	Belirlenmemiş	0.64'den 0.86'ya

ISO 4037–1 tarafından belirtilmiş olan X-ışın demet kalitelerinden olan N serisinin elde edilmesi tezin ileriki bölümlerinde bahsedilecektir. Aşağıdaki çizelgelerde dört farklı filtre edilmiş X radyasyon serileri için hava kermadan eşdeğer doz niceliğine dönüşümü sağlayan katsayılar verilmektedir.

Çizelge 2.7 Düşük hava kerma hızı serisinin farklı nicelikleri için belirlenmiş olan dönüşüm katsayıları

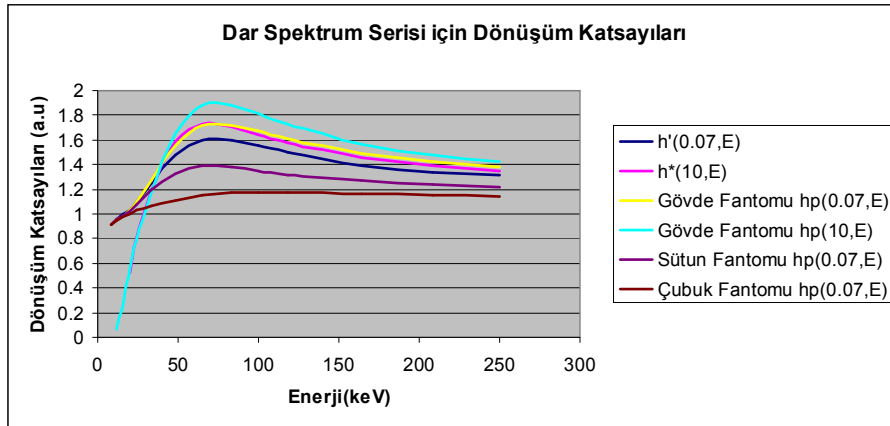
Demet Kalitesi	\bar{E} (keV)	Dönüşüm Katsayıları, h					
		$H'(0.07)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)	$H^*(10)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)	Gövde Fantomu		Sütun Fantomu	Çubuk Fantomu
				$Hp(0.07)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)	$Hp(10)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)	$Hp(0.07)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)	$Hp(0.07)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)
L-10	8.5	0.93		0.93		0.91	0.91
L-20	17	1.01	0.37	1.00	0.37	1.00	0.99
L-30	26	1.13	0.90	1.14	0.91	1.08	1.03
L-35	30	1.22	1.08	1.22	1.09	1.17	1.06
L-55	48	1.50	1.61	1.57	1.67	1.34	1.11
L-70	60	1.59	1.73	1.71	1.87	1.39	1.14
L-100	87	1.59	1.69	1.71	1.87	1.37	1.17
L-125	109	1.52	1.61	1.64	1.77	1.34	1.17
L-170	149	1.42	1.50	1.53	1.62	1.29	1.16
L-210	185	1.36	1.42	1.45	1.52	1.26	1.15
L-240	211	1.33	1.38	1.42	1.47	1.24	1.15



Şekil 2.30 Düşük hava kerma hızı serisinin farklı nicelikleri için belirlenmiş olan dönüşüm katsayılarının enerji ile değişimi

Çizelge 2.8 Dar spektrum serisinin farklı nicelikleri için belirlenmiş olan dönüşüm katsayıları

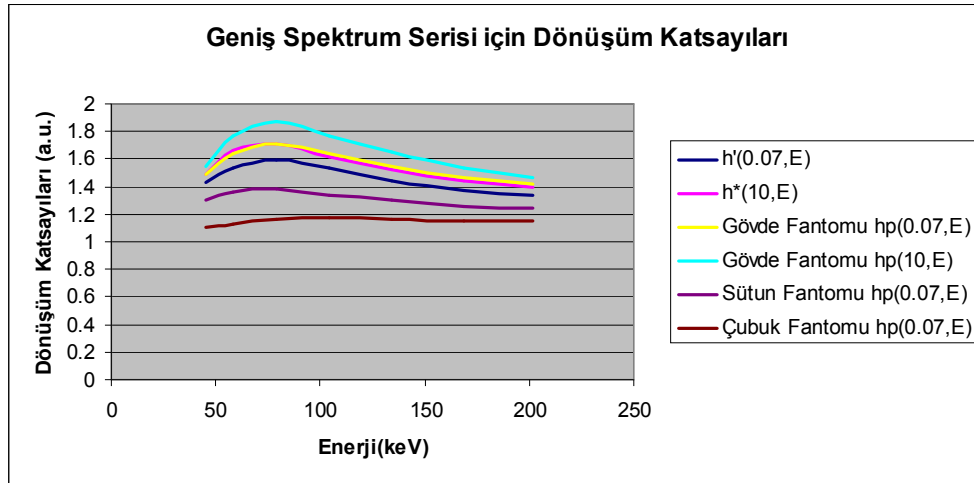
Demet Kalitesi	\bar{E} (keV)	Dönüşüm Katsayıları, h					
		$H'(0.07)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)	$H^*(10)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)	Gövde Fantomu		Sütun Fantomu	Çubuk Fantomu
				$H_p(0.07)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)	$H_p(10)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)	$H_p(0.07)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)	$H_p(0.07)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)
N-10	8	0.91		0.91		0.91	0.91
N-15	12	0.96		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



Şekil 2.31 Dar spektrum serisinin farklı nicelikleri için belirlenmiş olan dönüşüm katsayılarının enerji ile değişimi

Çizelge 2.9 Geniş spektrum serisinin farklı nicelikleri için belirlenmiş olan dönüşüm katsayıları

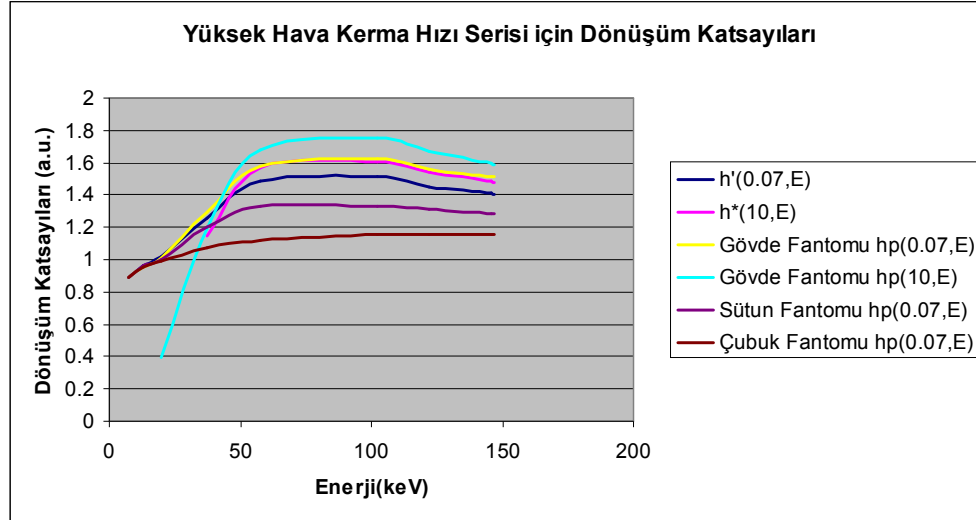
Demet Kalitesi	\bar{E} (keV)	Dönüşüm Katsayıları, h					
		$H'(0.07)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)	$H^*(10)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)	Gövde Fantomu		Sütun Fantomu	Çubuk Fantomu
				$H_p(0.07)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)	$H_p(10)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)	$H_p(0.07)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)	$H_p(0.07)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)
W-60	45	1.43	1.49	1.49	1.55	1.30	1.10
W-80	58	1.54	1.66	1.64	1.77	1.36	1.13
W-110	79	1.59	1.71	1.71	1.87	1.38	1.16
W-150	104	1.53	1.62	1.64	1.77	1.34	1.17
W-200	134	1.44	1.52	1.55	1.65	1.30	1.16
W-250	169	1.37	1.44	1.47	1.54	1.26	1.15
W-300	202	1.34	1.39	1.42	1.47	1.24	1.15



Şekil 2.32 Geniş spektrum serisinin farklı nicelikleri için belirlenmiş olan dönüşüm katsayılarının enerji ile değişimi

Çizelge 2.10 Yüksek hava kerma hızı serisinin farklı nicelikleri için belirlenmiş olan dönüşüm katsayıları

Demet Kalitesi	\bar{E} (keV)	Dönüşüm Katsayıları, h					
		$H'(0.07)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)	$H^*(10)/K_a$ (Sv.Gy ⁻¹)	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)
H-10	7.5	0.89		0.89		0.89	0.89
H-20	12.9	0.96		0.95		0.96	0.95
H-30	19.7	1.02		1.01	0.39	1.00	0.99
H-60	37.3	1.26	1.15	1.29	1.19	1.20	1.07
H-100	57.4	1.49	1.57	1.58	1.68	1.33	1.12
H-200	102	1.51	1.61	1.62	1.75	1.33	1.16
H-250	122	1.45	1.54	1.56	1.67	1.31	1.16
H-280	146	1.41	1.49	1.51	1.60	1.28	1.16
H-300	147	1.40	1.48	1.51	1.59	1.28	1.16



Şekil 2.33 Yüksek hava kerma hızı serisinin farklı nicelikleri için belirlenmiş olan dönüşüm katsayılarının enerji ile değişimi

Bu dönüşüm katsayıları 2m'lik kalibrasyon mesafesi için belirlenmiştir. Bu dönüşüm katsayılarının uygulanabilir olduğu mesafe aralıkları, bir başka ifadeyle kalibrasyon

işleminin gerçekleştirilebileceği mesafe aralıkları ISO tarafından belirlenmiştir ve N,L,W ve H serileri için belirtilen bu mesafeler aşağıdaki çizelgede belirtilmektedir.

Çizelge 2.11 N,L,W ve H serileri için belirlenmiş olan dönüşüm katsayılarının geçerli oldukları mesafeler

Demet Kalitesi	Işınlama Mesafesi (m)	Demet Kalitesi	Işınlama Mesafesi (m)	Demet Kalitesi	Işınlama Mesafesi (m)	Demet Kalitesi	Işınlama Mesafesi (m)
N-25	1,0 – 2,0	L-20	1,0 – 2,0	W-60	1,0 – 3,0	H-60	1,0 – 3,0
N-30	1,0 – 2,0	L-30	1,0 – 2,0	W-80	1,0 – 3,0	H-100	1,0 – 3,0
N-40	1,0 – 3,0	L-35	1,0 – 2,0	W-110	1,0 – 3,0	H-200	1,0 – 3,0
N-60	1,0 – 3,0	L-55	1,0 – 3,0	W-150	1,0 – 3,0	H-250	1,0 – 3,0
N-80	1,0 – 3,0	L-70	1,0 – 3,0	W-200	1,0 – 3,0	H-280	1,0 – 3,0
N-100	1,0 – 3,0	L-100	1,0 – 3,0	W-250	1,0 – 3,0	H-300	1,0 – 3,0
N-120	1,0 – 3,0	L-125	1,0 – 3,0	W-300	1,0 – 3,0		
N-150	1,0 – 3,0	L-170	1,0 – 3,0				
N-200	1,0 – 3,0	L-210	1,0 – 3,0				
N-250	1,0 – 3,0	L-240	1,0 – 3,0				
N-300	1,0 – 3,0						

Her serinin farklı ayırma gücünde ve farklı hava kerma hızındaki spektrumları elde edilir. Ayırma gücü(R_e) yüzde olarak tanımlanır ve aşağıdaki formül (2.16) ile gösterilir.

$$R_e = \frac{\Delta E}{\bar{E}} \quad (2.16)$$

Burada; ΔE , enerji-sayım spektrumundaki yarı yükseklikteki tam genişliktir. \bar{E} ise spektrumdaki ortalama enerjidir.

Düşük hava kerma hızı 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. En dar spektrum serisi(L), dedektör yanıtının, gelen fotonun enerjisinin değişimiyle nasıl değiştiğinin yani enerji bağımlılığının ölçülmesinde kullanılmalıdır. Yine ayrı şekilde 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 yükleme karakterlerinin belirlenmesi için uygundur.

Referans laboratuvar da spektrometrik bir çalışma ile düşük hava kerma hızı, dar ve geniş spektrum serilerinde elde edilen ortalama enerji değeri \pm %3 ve spektrumun ayırma gücü değeri \pm %10 'luk sınırlar içerisinde çizelge 2.12 ve çizelge 2.13 de verilen değerlere göre elde edilmelidir. Bu üç referans radyasyon serisinde ortalama enerjileri 30 keV'den düşük olan radyasyon kalitelerinde, ortalama enerji \pm %5, spektrumun ayırma gücü \pm %15 'lik sınırlar içerisinde çizelge 2.12 ve çizelge 2.13 de verilen değerlere göre elde edilmelidir (Anonymous 1996).

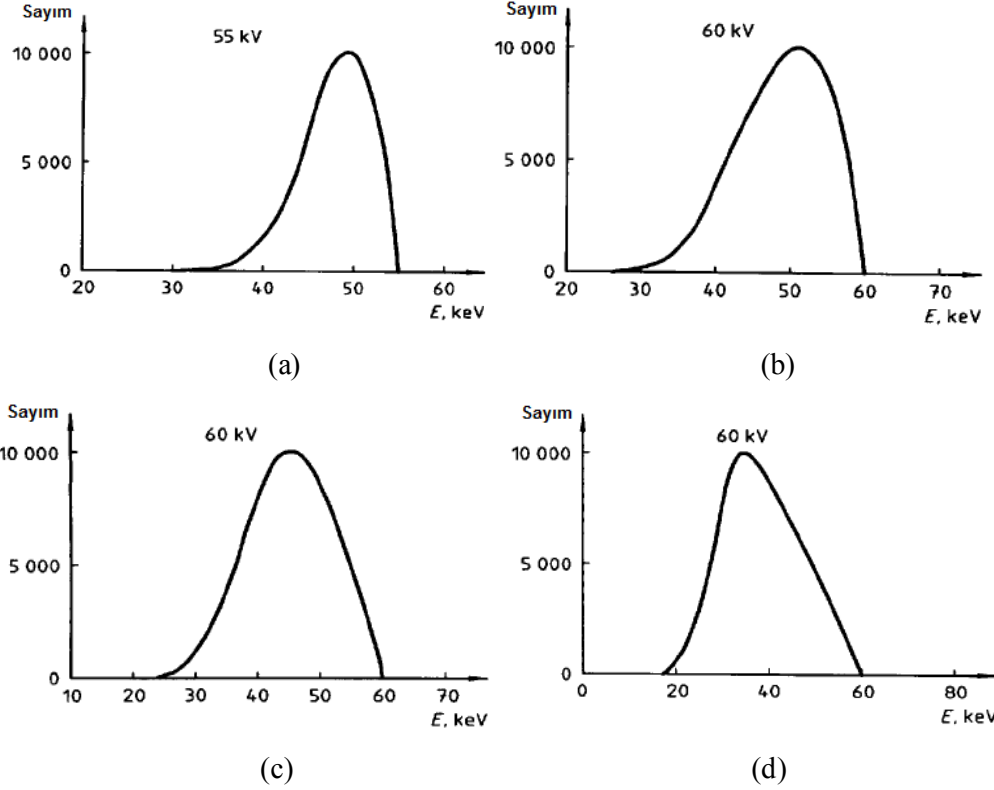
Çizelge 2.12 L ve N serileri için ortalama enerji(\bar{E}) ve spektral ayırma gücü(Re) değerleri

Demet Kalitesi	Ortalama Enerji, \bar{E} (keV)	Spektral Ayırma Gücü, Re (%)	Demet Kalitesi	Ortalama Enerji, \bar{E} (keV)	Spektral Ayırma Gücü, Re (%)
L-10	8.5		N-10	8	28
L-20	17	21	N-15	12	33
L-30	26	21	N-20	16	34
L-35	30	21	N-25	20	33
L-55	48	22	N-30	24	32
L-70	60	22	N-40	33	30

L-100	87	22	N-60	48	36
L-125	109	21	N-80	65	32
L-170	149	18	N-100	83	28
L-210	185	18	N-120	100	27
L-240	211	18	N-150	118	37
			N-200	164	30
			N-250	208	28
			N-300	250	27

Çizelge 2.13 W serisi için ortalama enerji(\bar{E}) ve spektral ayırma gücü(Re), H serisi için ise ortalama enerji(\bar{E}) değerleri

Demet Kalitesi	Ortalama Enerji, \bar{E} (keV)	Spektral Ayırma Gücü, Re (%)	Demet Kalitesi	Ortalama Enerji, \bar{E} (keV)
W-60	45	48	H-10	7.5
W-80	57	55	H-20	12.9
W-110	79	51	H-30	19.7
W-150	104	56	H-60	37.3
W-200	137	57	H-100	57.4
W-250	173	56	H-200	102
W-300	208	57	H-250	122
			H-280	146
			H-300	147



Şekil 2.34 ISO tarafından tanımlanmış teorik X-ışın spektrumları

a) Teorik L55 spektrumu b) Teorik N60 spektrumu c) Teorik W60 spektrumu d) Teorik H60 spektrumu (Anonymous 1996)

Bir deney düzeneği ile bir başka deney düzeneği arasındaki spektral dağılımdaki farklılıklar birçok fazla sayıdaki nedenden kaynaklanabilir. Örneğin; anot açısı, anot yüzeyinin pürüzlenmesi, tüp penceresine buharlaşan tungstenin yapışması, ışın içerisinde monitor chamberin (geçirgen iyon odası) bulunması, filtre kalınlıklarındaki nominal değerden sapmalar, odak noktası ve test noktası arasındaki uzunluk, ölçüm anındaki atmosferik basınç ve sıcaklık.

2.6.2.2 Radyoaktif kaynaklardan elde edilen foton radyasyonu

Kalibrasyonlar aşağıdaki çizelgede belirtilen ISO tarafından belirlenmiş referans foton radyasyonları tarafından gerçekleştirilmelidir.

Çizelge 2.14 ISO tarafından belirlenmiş olan referans foton radyasyonlarının özellikleri

Radyasyon Kalitesi	Radyasyon Enerjisi (MeV)	Yarı Ömür (Gün)	Hava Kerma Hızı Sabiti ($\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}$)
S- ⁶⁰ Co	1.1733	1925.5	0.31
	1.3325		
S- ¹³⁷ Cs	0.6616	11050	0.079
S- ²⁴¹ Am	0.05954	157788	0.003
R- ¹² C	4.44		
R- ¹⁹ F	6.13–7.12		
R-Ti(n,K)	5.14		
R-Ni(n,K)	6.26		
R- ¹⁶ O	6.13–7.12		

Çizelge 2.15 ISO tarafından belirlenmiş olan referans foton radyasyonları için belirlenmiş olan dönüşüm katsayıları

Radyasyon Kalitesi	Normal Etki İçin Dönüşüm Katsayıları		Gövde Fantomu İçin Dönüşüm Katsayıları		Dönüşüm Katsayıları	
	$h'(0.07)/\text{Ka}$ (Sv.Gy ⁻¹)	$H^*(10)/\text{Ka}$ (Sv.Gy ⁻¹)	$hp(0.07)/\text{Ka}$ (Sv.Gy ⁻¹)	$hp(10)/\text{Ka}$ (Sv.Gy ⁻¹)	Sütun Fantomu	Çubuk Fantomu
S- ⁶⁰ Co		1.16		1.15		
S- ¹³⁷ Cs		1.20	1.25	1.21		
S- ²⁴¹ Am	1.59	1.74		1.89	1.39	1.14
R- ¹² C		1.12		1.11		
R- ¹⁹ F		1.11		1.12		
R-Ti(n,K)		1.11		1.11		
R-Ni(n,K)		1.11		1.11		
R- ¹⁶ O		1.11		1.12		

Çizelge 2.15 de aynı zamanda hava kermadan ortam ya da yönlü eşdeğer doz niceliklerine dönüşüm katsayıları Sv/Gy biriminde, normal etki ve gövde fantomu için

10 ve 0.07 mm derinliklerinde, sütun ve çubuk fantomları içinse 0.07 mm derinliği için verilmiştir.

Çizelge 2.16 ISO tarafından referans olarak gösterilmiş radyoaktif kaynakların kullanılması durumunda ölçümlerin hangi mesafelerde yapılacağını, build-up materyali olmayan dedektörler için kaynak ile dedektör arasına kaç mm'lik PMMA koyulacağını ve hava kermadan ortam eşdeğer doza geçişi sağlayan katsayıların bulunduğu çizelge

Demet Kalitesi	Işınlama Mesafesi (m)	Build-Up Tabakası Kalınlığı (mm)	k_{PMMA}	$h_K^*(10;S)$ $h_K^*(10;R)$
S-Am	1,0 – 2,0	1,74
S-Cs	1,0 – 3,0	2	1,00	1,20
S-Co	1,0 – 3,0	4	1,00	1,16
R-C	1,0 – 3,0	25	0,94	1,12
R-F	1,0 – 3,0	25	0,94	1,11
R-Ti	1,0 – 3,0	25	0,94	1,11
R-Ni	1,0 – 3,0	25	0,94	1,11
R-O	1,0 – 3,0	25	0,94	1,11

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. Saçılan radyasyonun ölçüldüğü bu çalışma, en yakın, en uzak ve çeşitli ara noktalarda yapılmalıdır. Kolime edilmemiş sistemlerde saçılan radyasyonun miktarının birincil(primer) radyasyonun %5'inden az olması için zırhlanmış odanın boyutları en az 4m x 4m x 3m büyüklüğünde olmalıdır.

2.7 Kalibrasyonun Temelleri

2.7.1 Kalibrasyon ve testler

Kontrol altındaki standart koşullarda kalibrasyon, kalibre edilen cihazın gösterdiği değerin, doğruluğu kesin olan referans cihazın ölçtüğü değerin bir fonksiyonu olarak ifade edilmesidir. Kalibrasyonun amaçları aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

1. Kalibre edilen cihazın doğru çalıştığına ve ölçüm yapabilmek için uygun olduğuna emin olmak
2. Kontrol altındaki standart koşullarda, kalibre edilen cihazda ölçülen değerin, ölçülmesi gereken değerin bir fonksiyonu olmasını sağlamak. Bu işlem aynı zamanda kalibre edilen cihazın tüm ölçüm aralığında yapılmalıdır.

Testler ise bir cihazın doğru olarak çalıştığı ve/veya cihazın limit değerinin üzerindeki elektriksel ve çevresel koşullarda ki gösterge değerindeki dalgalanmaların tanımlanması amacıyla yapılan ölçümlerdir.

Kalibrasyonunda aralarında bulunduğu dört farklı (bağımsız) cihaz test kategorisi vardır. Bu kategoriler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

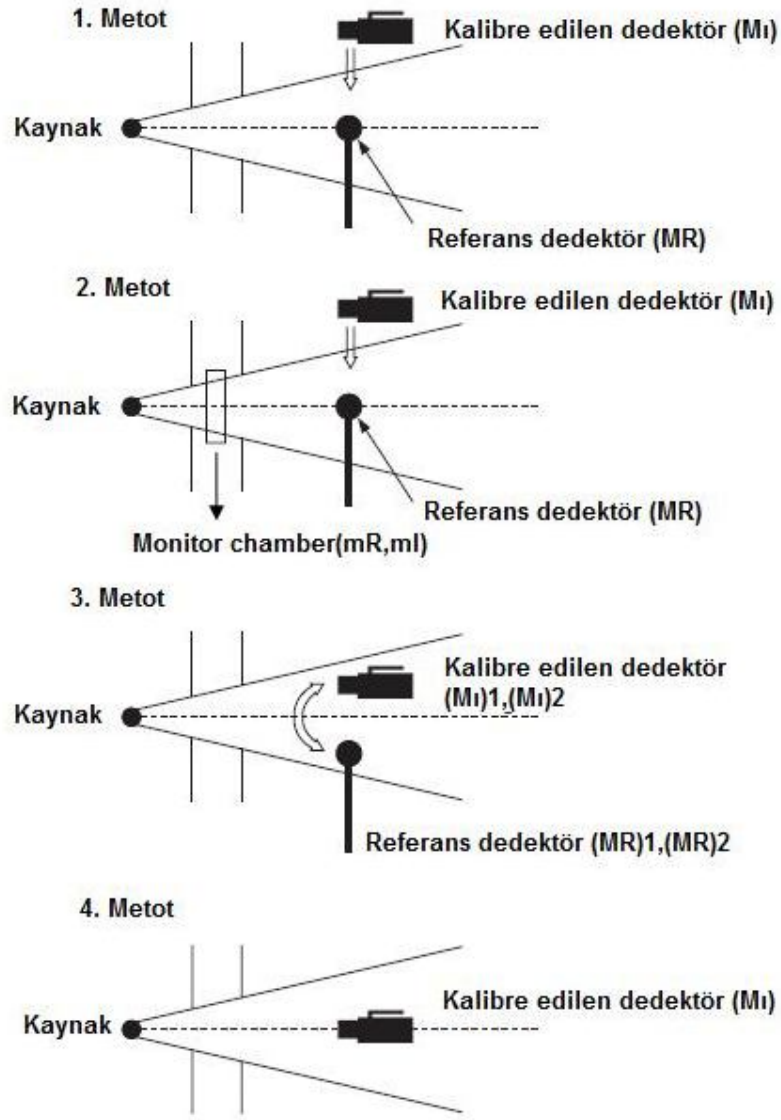
- a) Model Testleri:** Cihaz kullanıcıya bilgi sağlayan bu testler genellikle ulusal ya da sekonder standart laboratuvarlarda gerçekleştirilir. Bu testler ile cihazın belirli bir tipi ya da modelinin özellikleri tanımlamak istenilir.
- b) Özel Kalibrasyonlar:** Bazı özel durumlarda model teste benzer olarak bazı özel kalibrasyonların yapılması gerekir. Bunlar; örneğin, eğer bir doz ya da doz hızı ölçen cihaz anormal şartlarda çalıştırılır ya da rutin kalibrasyon veya model test yeterli bilgi sağlayamıyorsa, gerçekleştirilmek zorundadırlar.

- c) **Rutin Kalibrasyonlar:** Rutin uygulamalarda kullanılan doz ya da doz hızı ölçen cihazlara uygun kalibrasyon faktörleri belirlemeye yöneliktirler. Rutin kalibrasyon doğrulama amacıyla da yapılabilir. Örneğin kalibrasyonu satıcı firma tarafından yapılmış olan bir doz ya da doz hızı ölçen cihazı kontrol etmek yada doz yada doz hızı ölçen cihazın kalibrasyon faktörünün aradan geçen uzun zaman içerisinde kararlılığını koruduğunu kontrol etmek için kullanılabilirler.
- d) **Kabul Testleri:** Bu tip testler yeni alınan tüm cihazlarda ilk defa yapılan testlerdir.

2.7.2 Referans bir dedektör kullanarak kalibrasyon faktörünün belirlenmesi

Genelde, kalibrasyonlarda kullanılan referans cihazlar uygun doz eşdeğerini göstermezler. Bunun yerine referans cihazlar sıklıkla radyasyon alanını başka ölçümlerle (örneğin, nötron radyasyonu için akı ya da foton radyasyonu için hava kerma vb.) karakterize etmek için kullanılırlar. Eşdeğer doz niceliği ise bu temel radyasyon kalitelerinden uygun dönüşüm katsayıları (h) kullanılarak elde edilir.

Şekil 2.35’de kullanılabilecek olan dört farklı kalibrasyon metodu gösterilmiştir.



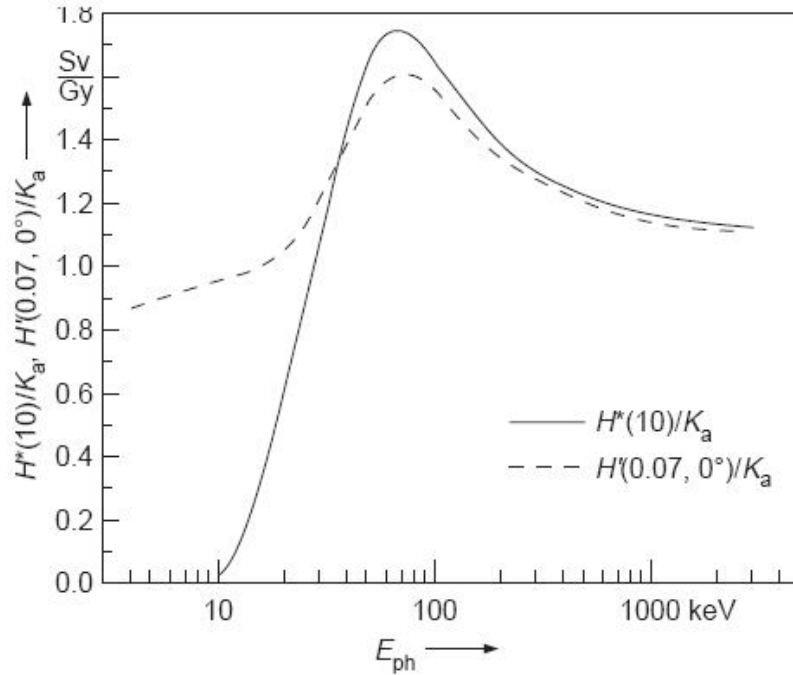
Şekil 2.35 Kullanılan dört farklı kalibrasyon metodu

1,2 ve 3. metotlarda kalibrasyon faktörü referans ölçü aleti vasıtasıyla elde edilir. 4. metotda ise temel radyasyon nicelikleri ile karakterize edilmiş ve önceden bilinen radyasyon alanları kullanılır. Burada referans ölçü aletine gerek yoktur. Eğer kalibrasyon sertifikasında kalibrasyon faktörü (N_R) belirtilmiş olan bir referans ölçü aleti kullanılırsa, bu değer eşdeğer dozun (H) klasik gerçek değerinin elde edilmesinde kullanılır. Bununla birlikte eşdeğer doz için uygun dönüşüm katsayısı (h) ve referans ölçü aleti ile ölçülmüş (referans şartlar için düzeltilmiş) ölçüm değeri (M_R) kullanılır.

$$H = hN_R M_R \quad (2.17)$$

İki durum söz konusudur;

- Eğer referans ölçüm aleti ile kalibrasyonu yapılan ölçüm aleti aynı gösterge değerini gösteriyorlarsa, dönüşüm katsayısı $h=1$ 'dir. Örneğin her iki ölçüm aleti de hava kerma değerini okuyorsa dönüşüm katsayısı 1 seçilir.
- Eğer referans ölçüm aleti ile kalibrasyonu yapılan ölçüm aleti farklı gösterge değerini gösteriyorsa, burada uygun dönüşüm katsayısı (h) kullanılmalıdır. Örneğin aşağıdaki şekil 2.32' de mono enerjik fotonlar için hava kermadan (K_a) $H^*(10)$, $H'(0,07,0^0)$ niceliklerinin saptanmasını sağlayan dönüşüm katsayıları, yani h değerleri gösterilmektedir.



Şekil 2.36 E_{ph} enerjili fotonlar için hava kermadan (K_a), $H^*(10)$ ve $H'(0,07,0^0)$ niceliklerinin saptanmasını sağlayan katsayıların gösterildiği grafik (Anonymous 2000)

Tezin ilerleyen kısımlarında bu katsayıların nümerik değerlerine değinilecektir.

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. Eğer böyle bir yönetmelik yoksa zaman aralığı üç 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.

2.7.2.1 Kaynak çıkışında herhangi bir monitor chamber (geçirgen iyon odası) olmadan alınan ölçümler (1. kalibrasyon metodu)

2.7.2.1.1 Kalibrasyon

Eğer radyasyon alanını karakterize eden fiziksel nicelik (örneğin hava kerma hızı) kalibrasyon süresince sabitse bu prosedür uygundur. Kalibrasyon referans test koşullarına yakın olan standart koşullarda gerçekleştirilmelidir.

Çizelge 2.17 Referans ve test koşulları

Etkiyen Nicelikler	Referans Koşullar	Standart Test Koşulları
Ortam Sıcaklığı	20 C ⁰	18-22 C ⁰
Atmosfer Basıncı	101.3 kPa	86-106 kPa
Bağıl Nem	% 65	% 50-75
Radyasyonun Geliş Açısı	$\alpha = 0^0$	$\alpha = \pm 5^0$
Ortam Radyasyonu (Background)	Ortam doz eşdeğeri hızı (H*(10)) 0.1 μ Sv/h ya da daha az olmalıdır	Ortam doz eşdeğeri hızı (H*(10)) 0.25 μ Sv/h'den daha az olmalıdır

Güç Kaynağı Tarafından Uygulanan Gerilim	Nominal değer	Nominal değerden ± %3 fark
Frekans	Nominal değer	Nominal değerden ± %1 fark
Bekleme Zamanı	15 dakika	15 dakikadan fazla

Referans ölçüm aletinin ve kalibrasyonu yapılan ölçüm aletinin referans noktaları sırayla radyasyon alanının merkezindeki test noktasına yerleştirilmelidir. Referans ölçüm aleti (R ile gösteriliyor) için kalibrasyon faktörü;

$$N_R = \frac{H}{hM_R} \quad (2.18)$$

kalibrasyonu yapılan ve gösterge değeri eşdeğer doz (H) niceliğinde olan ölçüm aleti için kalibrasyon faktörü ise;

$$N_I = \frac{H}{M_I} \quad (2.19)$$

şeklindedir.

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;

$$N_I = N_R \frac{hM_R}{M_I} \quad (2.20)$$

şeklinde elde edilir. Burada;

N_R , referans ölçüm cihazının sertifikasında yazan kalibrasyon faktörü (referans koşullardaki);

N_I , kalibrasyonu yapılan ölçüm cihazının kalibrasyon faktörü (referans koşullardaki);

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_I , 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 katsayı.

2.7.2.1.2 Etkiyen enerji ve açının fonksiyonu olarak dedektör yanıtının belirlenmesi

Sırasıyla radyasyon alanındaki test noktasına referans noktaları yerleştirilen referans ölçüm aleti ile kalibrasyonu yapılan ölçüm aletinin yanıtları eşdeğer doz cinsinden belirlenmelidir. Referans ölçüm aleti referans doğrultuda (örneğin $\alpha = 0^0$) ışınlanırken test edilen ölçüm aleti bu doğrultuda ışınlanmıyor olabilir ($\alpha \neq 0^0$). Radyasyon alanı radyasyonun enerjisi (E) ve geliş açısı (α) ile karakterize edilir. Referans ölçüm aleti için kalibrasyon faktörü aşağıdaki formül ile elde edilir.

$$N_R = \frac{H(E, \alpha)}{h(E, \alpha)k_{en}(E)M_R(E)} \quad (2.21)$$

Referans ölçüm aleti ile ölçülen değer her zaman olduğu gibi etki eden niceliklerdeki referans koşullara göre olan değişiklikler için(örneğin sıcaklık, basınç) düzeltilmelidir. Fakat ışınlama şartları da referans şartlardan farklılık gösterir, bunu düzeltmek için bir düzeltme faktörü $k_{en}(E)$ kullanılmalıdır. Test edilen ölçüm aletinin yanıtı $R(E, \alpha)$ aşağıdaki gibi verilir.

$$R(E, \alpha) = \frac{M_I(E, \alpha)}{H(E, \alpha)} \quad (2.22)$$

Yukarıdaki iki formülün (2.21 ve 2.22) kombinasyonu olarak test edilen ölçüm aletinin yanıtı;

$$R(E, \alpha) = \frac{1}{N_R} = \frac{M_I(E, \alpha)}{h(E, \alpha)k_{en}(E)M_R(E)} \quad (2.23)$$

şeklinde elde edilir. Burada;

N_R , referans ölçüm cihazının kalibrasyon faktörü(referans koşullardaki);

$M_R(E)$, kullanılan radyasyon kalitesi hariç diğer referans şartlar için düzeltilmiş referans ölçüm aleti tarafından ölçülen değer;

$M_I(E, \alpha)$, kullanılan radyasyonun enerjisi ve geliş açısı hariç diğer referans koşullar için düzeltilmiş, yanıtının belirlenmesi istenen dedektör tarafından ölçülen değer;

$h(E, \alpha)$, gelen radyasyonun enerjisi (E) ve geliş açısı (α) için referans ölçüm aleti tarafından ölçülen niceliği eşdeğer doza çeviren dönüşüm katsayısı;

$k_{en}(E)$, referans şartlar ile kalibrasyonu yapılan cihazın enerji yanıtının belirlendiği enerjideki referans ölçüm aletinin yanıtı ile kalibrasyonu yapılan cihazın yanıtları arasındaki farkı hesaba katan düzeltme faktörü.

Burada dikkat edilecek olan husus, referans dedektörün 0^0 de ışınlanıyor olmasıdır. Yani bir başka deyişle gelen ışın ile herhangi bir açı yapmadan ışınlanıyor olmasıdır. Kalibre edilecek olan dedektör ise açığa bağımlılığının belirleneceği olan açıda ışınlanır. Referans dedektör ile ölçülen değer, kalibre edilecek olan dedektörün ışınlandığı açı için belirlenmiş olan dönüşüm katsayısı ile çarpılarak her iki dedektöründe aynı geometrik koşullarda ölçüm vermesi sağlanır.

Genellikle cihazın yanıtı göreceli yanıt (r) olarak verilir ve referans şartlardaki yanıtına bağlıdır.

$$r = \frac{R}{R_r} \quad (2.24)$$

Burada R_r cihazın referans şartlardaki yanıtıdır.

2.7.2.2 Kaynak çıkışında bir monitor chamber varken alınan ölçümler (2.kalibrasyon metodu)

2.7.2.2.1 Kalibrasyon

Radyasyon alanının dozimetrik özelliklerini karakterize eden fiziksel niceliklerdeki çeşitli değişiklikler (örneğin hava kerma hızı) ölçüm esnasında bir monitor chamber kullanılarak düzeltilir. Bu teknik genellikle referans ölçüm aletinin ve kalibrasyonu yapılan ölçüm aletinin sırasıyla aynı test noktasına yerleştirildiği X-ışın sistemlerinde hava kerma hızındaki dalgalanmaları düzeltmek için kullanılır. Test noktasındaki eşdeğer doz H , monitor chamberın kalibrasyon faktörü (N_M) ve ölçtüğü değer (m) ile ilişkilidir.

$$N_M = \frac{H}{m} \quad (2.25)$$

Referans ölçüm aleti ve kalibrasyonu yapılan ölçüm aleti ile ilgili eşitlikler aşağıdaki gibidir.

$$N_R = \frac{H}{hM_R} \quad (2.26)$$

$$N_I = \frac{H}{M_I} \quad (2.27)$$

Bu iki formüldeki eşdeğer doz nicelikleri (H) yerine, 2.25 formülünde belirtilmiş olan, hem referans hem de kalibrasyonu yapılan ölçüm aletlerinin kalibrasyon faktörleri ve monitor chamber'dan alınan değerlerinin çarpımları yazılır. Bunun sonucunda da aşağıdaki formüller elde edilir.

$$N_R = \frac{N_M m_R}{h M_R} \quad (2.28)$$

$$N_I = \frac{N_M m_I}{M_I} \quad (2.29)$$

2.28 ve 2.29 formüllerinin oranlanmasıyla kalibrasyonu yapılan ölçüm cihazının kalibrasyon faktörü aşağıdaki gibi elde edilir.

$$N_I = N_R \left(\frac{h M_R}{m_R} \right) \left(\frac{m_I}{M_I} \right) \quad (2.30)$$

Burada;

N_R , referans ölçüm cihazının kalibrasyon faktörü(referans koşullardaki);

N_I , kalibrasyonu yapılan ölçüm cihazının kalibrasyon faktörü(referans koşullardaki);

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

m_R , referans koşullara göre düzeltilmiş, yani gösterge değeri uygun düzeltme katsayıları ile çarpılmış (örneğin hava yoğunluğundaki değişimler için), referans ölçüm aletinin ışınlanması esnasında monitor chamber tarafından ölçülen değer;

m_I , referans koşullara göre düzeltilmiş, yani gösterge değeri uygun düzeltme katsayıları ile çarpılmış (örneğin hava yoğunluğundaki değişimler için), kalibrasyonu yapılan ölçüm aletinin ışınlanması esnasında monitor chamber tarafından ölçülen değer;

h , referans ölçüm aleti ile ölçülen niceliği, kalibrasyonu yapılan ölçüm aletinin doz eşdeğerine dönüşümü sağlayan katsayıdır.

Not: Monitor chamber'ın iyi bir uzun süreli kararlılığa sahip olduğu durumlarda monitor chamber, başka bir referans ölçüm aleti ile kalibre edildikten sonra referans ölçüm aleti olarak hizmet verebilir.

2.7.2.2.2 Etkiyen enerji ve açının fonksiyonu olarak dedektör yanıtının belirlenmesi

Sırasıyla radyasyon alanındaki test noktasına referans noktaları yerleştirilen referans ölçüm aleti ile kalibrasyonu yapılan ölçüm aletinin yanıtları eşdeğer doz cinsinden belirlenmelidir. Referans ölçüm aleti referans doğrultuda (örneğin $\alpha = 0^0$) ışınlanırken test edilen ölçüm aleti bu doğrultuda ışınlanmıyor olabilir ($\alpha \neq 0^0$). Referans ölçüm aleti ve kalibrasyonu yapılan ölçüm aletinin ışınlanmaları esnasında monitor chamber'dan okunan değerler (m_R ve m_I) aracılığı ile cihazın yanıtı aşağıdaki gibi elde edilir.

$$R(E, \alpha) = \frac{1}{N_R} \left(\frac{m_R(E)}{h(E, \alpha) k_{en}(E) M_R(E)} \right) \left(\frac{M_I(E, \alpha)}{m_I(E)} \right) \quad (2.31)$$

Burada;

N_R , referans ölçüm cihazının kalibrasyon faktörü (referans koşullardaki);

$M_R(E)$, kullanılan radyasyon kalitesi hariç diğer referans şartlar için düzeltilmiş referans ölçüm aleti tarafından ölçülen değer;

$M_I(E, \alpha)$, kullanılan radyasyonun enerjisi ve geliş açısı hariç diğer referans koşullar için düzeltilmiş, yanıtının belirlenmesi istenen ölçüm aleti tarafından ölçülen değer;

$m_R(E)$, referans ölçüm aleti ışınlanırken, kullanılan radyasyonun enerjisi hariç diğer referans şartlar için düzeltilmiş monitor chamber tarafından ölçülen değer.

$m_I(E)$, kalibrasyonu yapılan ölçüm aleti ışınlanırken, kullanılan radyasyonun enerjisi hariç diğer referans şartlar için düzeltilmiş monitor chamber tarafından ölçülen değer.

$h(E, \alpha)$, gelen radyasyonun enerjisi (E) ve geliş açısı (α) için referans ölçüm aleti tarafından ölçülen niceliği eşdeğer doza çeviren dönüşüm katsayısı;

$k_{en}(E)$, referans şartlar ile kalibrasyonu yapılan cihazın enerji yanıtının belirlendiği enerjideki referans ölçüm aletinin yanıtı ile kalibrasyonu yapılan cihazın yanıtları arasındaki farkı hesaba katan düzeltme faktörü.

2.7.2.3 Referans ölçüm aleti ve kalibrasyonu yapılan ölçüm aletinin eş zamanlı olarak ışınlanmasıyla elde edilen ölçümler

(3. kalibrasyon metodu)

2.7.2.3.1 Kalibrasyon

Bazı durumlarda referans dedektör ve kalibrasyonu yapılan ölçüm aletinin eş zamanlı olarak aynı radyasyon alanında, ışın merkezine simetrik ve kaynaktan eşit uzaklıkta olmak üzere kalibrasyonu gerçekleştirilir. İki dedektör arasındaki mesafe birbirlerine olan etkilerin %2'yi geçmeyecek şekilde yeterince geniş olmalıdır.

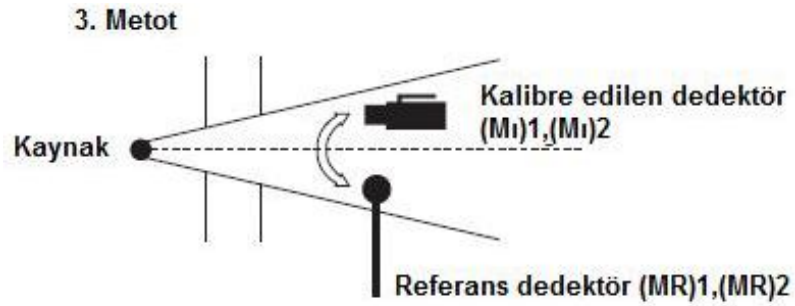
Öncelikli olarak bu metot fantoma gerek duyulmadığı durumlarda (örneğin alan ölçüm dozimetrelerinde) kullanılmalıdır. Bu teknik genellikle referans radyasyonların hızlandırıcılarda elde edildiği ya da kolime edilmemiş kaynakların kullanıldığı durumlarda kullanılır. İki simetrik noktadaki eşdeğer doz niceliği (H), 1 numaralı test noktasındaki(Şekil 2.37) referans ölçüm aletinin kalibrasyon faktörü ile ilişkilidir ve kalibrasyon faktörü aşağıdaki gibi verilir.

$$N_R = \left(\frac{H}{hM_R} \right)_1 \quad (2.32)$$

Kalibrasyonu yapılan ve 2 numaralı test noktasında bulunan ölçüm aletinin kalibrasyon faktörü ise

$$N_I = \left(\frac{H}{M_I} \right)_2 \quad (2.33)$$

şeklinde verilir.



Şekil 2.37 Üçüncü kalibrasyon metodunun şematik gösterimi

Radyasyon alanındaki asimetriyi yok etmek için cihazların yerleri değiştirilir ve ölçümler tekrarlanır. Bu durumda da her iki cihaz için kalibrasyon faktörleri aşağıdaki gibi verilir.

$$N_R = \left(\frac{H}{hM_R} \right)_2 \quad (2.34)$$

$$N_I = \left(\frac{H}{M_I} \right)_1 \quad (2.35)$$

H₁(2.32 – 2.35 numaralı formüller) ve H₂(2.33 – 2.34 numaralı formüller) ilgili formüllerin birleştirilmesiyle yok edilirse aşağıdaki formüller elde edilir.

$$\frac{N_I}{N_R} = \left(\frac{hM_R}{M_I} \right)_1 \quad (2.36)$$

$$\frac{N_I}{N_R} = \left(\frac{hM_R}{M_I} \right)_2 \quad (2.37)$$

Bu iki formülün çarpılmasıyla kalibrasyonu yapılan ölçüm aletinin kalibrasyon faktörü aşağıdaki gibi elde edilir.

$$N_I = N_R \sqrt{\left(\frac{hM_R}{M_I} \right)_1 \left(\frac{hM_R}{M_I} \right)_2} \quad (2.38)$$

Burada;

N_R , referans ölçüm cihazının kalibrasyon faktörü(referans koşullardaki);

N_I , kalibrasyonu yapılan ölçüm cihazının kalibrasyon faktörü(referans koşullardaki);

$(M_R / M_I)_1$, 1 numaralı test noktasında referans ölçüm cihazı ile ölçülen değer kalibrasyonu yapılan cihaz ile ölçülen değere oranı (her iki değer referans şartlara göre uygun düzeltme faktörleri ile çarpılarak düzeltilmiştir (örneğin hava yoğunluğundaki değişimler)),

$(M_R / M_I)_2$, 2 numaralı test noktasında referans ölçüm cihazı ile ölçülen değer kalibrasyonu yapılan cihaz ile ölçülen değere oranı (her iki değer referans şartlara göre uygun düzeltme faktörleri ile çarpılarak düzeltilmiştir (örneğin hava yoğunluğundaki değişimler)),

h , referans ölçüm aleti ile ölçülen niceliği, kalibrasyonu yapılan ölçüm aletinin doz eşdeğerine dönüşümü sağlayan katsayıdır.

2.7.2.3.2 Etkiyen enerji ve açının fonksiyonu olarak dedektör yanıtının belirlenmesi

Aynı anda radyasyon alanındaki simetrik test noktalarına referans noktaları yerleştirilen referans ölçüm aleti ile kalibrasyonu yapılan ölçüm aletinin yanıtları eşdeğer doz cinsinden belirlenmelidir. Referans ölçüm aleti referans doğrultuda (örneğin $\alpha = 0^0$) ışınlanırken test edilen ölçüm aleti bu doğrultuda ışınlanmıyor olabilir ($\alpha \neq 0^0$). Cihazın yanıtı aşağıdaki gibi elde edilir.

$$R(E, \alpha) = \frac{1}{N_R h(E, \alpha) k_{en}(E)} \sqrt{\left(\frac{M_I(E, \alpha)}{M_R(E)} \right)_1 \left(\frac{M_I(E, \alpha)}{M_R(E)} \right)_2} \quad (2.39)$$

Burada;

N_R , referans ölçüm cihazının kalibrasyon faktörü (referans koşullardaki);

$\left(\frac{M_I(E, \alpha)}{M_R(E)} \right)_1$, 1 numaralı test noktasına yerleştirilmiş, yanıtı belirlenecek olan ölçüm aleti tarafından ölçülen değer, referans ölçüm aleti tarafından ölçülmüş olan değere oranı (her iki değerde kullanılan radyasyonun enerjisi ve geliş açısı hariç referans şartlara göre düzeltilmiştir),

$\left(\frac{M_I(E, \alpha)}{M_R(E)} \right)_2$, 2 numaralı test noktasına yerleştirilmiş, yanıtı belirlenecek olan ölçüm aleti tarafından ölçülen değer, referans ölçüm aleti tarafından ölçülmüş olan değere oranı (her iki değerde kullanılan radyasyonun enerjisi ve geliş açısı hariç referans şartlara göre düzeltilmiştir),

$h(E, \alpha)$, gelen radyasyonun enerjisi (E) ve geliş açısı (α) için referans ölçüm aleti tarafından ölçülen niceliği eşdeğer doza çeviren dönüşüm katsayısı;

$k_{en}(E)$, referans şartlar ile kalibrasyonu yapılan cihazın enerji yanıtının belirlendiği enerjideki referans ölçüm aletinin yanıtı ile kalibrasyonu yapılan cihazın yanıtları arasındaki farkı hesaba katan düzeltme faktörü.

2.7.2.4 Kalibrasyon faktörünün ve yanıtın bilinen bir radyasyon alanında tanımlanması

(4. kalibrasyon metodu)

2.7.2.4.1 Kalibrasyon

Doz eşdeğerinin (H) bilindiği bir radyasyon alanındaki test noktasında, kalibrasyonu yapılan bir cihazın kalibrasyon faktörü N_I aşağıdaki gibi elde edilir.

$$N_I = \frac{H}{M_I} \quad (2.40)$$

Burada;

N_I , kalibrasyonu yapılan ölçüm cihazının kalibrasyon faktörü(referans koşullardaki);

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

H, ölçülen niceliğin eşdeğer doz değeridir.

2.7.2.4.2 Etkiyen enerji ve açının fonksiyonu olarak dedektör yanıtının belirlenmesi

Radyasyon alanındaki test noktasına referans noktası yerleştirilen kalibrasyonu yapılan ölçüm aletinin yanıtı eşdeğer doz (H) cinsinden belirlenmelidir. Kalibrasyonu yapılan ölçüm aleti referans doğrultuda ışınlanmıyor olabilir ($\alpha \neq 0^0$). Bu aletin yanıtı aşağıdaki gibi belirlenir.

$$R(E, \alpha) = \frac{M_I(E, \alpha)}{H(E, \alpha)} \quad (2.41)$$

Burada;

$M_I(E, \alpha)$, kullanılan radyasyonun enerjisi ve geliş açısı hariç diğer referans koşullar için düzeltilmiş, yanıtının belirlenmesi istenen ölçüm aleti tarafından ölçülen değer;

$H(E, \alpha)$, kullanılan radyasyonun enerjisi (E) ve geliş açısı (α) için eşdeğer doz niceliği.

2.7.3 Kalibrasyonlar için ek etkenler

2.7.3.1 Dedektörün hatalı yerleştirilmesi

Referans kaynak ve ölçüm aleti arasındaki tüm mesafeler, kaynak ve ölçüm aletinin referans noktası arasındaki mesafe olarak alınmalıdır. Merkezi ışın doğrultusunda dedektörün ΔR miktarında hatalı yerleştirilmesi, R mesafesindeki ölçümlerde $2\Delta R / R$ 'lik bağıl hataya neden olur. Dedektörün ışın aksına ΔR miktarında hatalı yerleştirilmesi ise ölçümlerde $(2\Delta R / R)^2$ 'lik bağıl hataya neden olur.

2.7.3.2 Cihaz ve kaynak destekleri (taşıyıcıları)

Kalibrasyon kaynağı, referans ve kalibrasyonu yapılan cihazlar için kullanılan destekler mümkün olduğunca az, saçılan radyasyon yaratmalıdırlar. Bu şekildeki saçılan radyasyonların cihazların ölçümlerine olan etkileri hesaba katılmalıdır.

2.7.3.3 Radyoaktif kaynakların azalımı için düzeltmeler

Yeterli uzunlukta yarı ömrü olan bir referans radyoaktif kaynak ile yapılan kalibrasyonlar için, uzun bir periyot içerisinde sadece bir kere referans ölçüm aleti ile eşdeğer doz hızının belirlenmesi gereklidir. Kaynağın yarı ömrü ($t_{1/2}$) hesaba katılarak radyoaktif azalım aşağıdaki eşitlik ile belirlenir.

$$H(t) = H(0) \exp(-0.693t / t_{1/2}) \quad (2.42)$$

Burada;

$H(t)$, başlangıç ölçümünden($H(0)$) belli bir t zaman sonraki eşdeğer doz hızı,

$H(0)$, referans ölçüm aleti ile ölçümün yapıldığı zamanki eşdeğer doz hızı.

2.7.3.4 Ortam (Background) radyasyonu

Ölçüm yapılan cihazın background okumaları ortamda herhangi bir referans radyoaktif kaynak yokken kaydedilmeli ve gerekliyse düzeltilmelidir.

2.7.3.5 Gerekli (istenen) okumaların sayısı

Uygun seviyedeki belirsizliğin sağlanması için yeterli sayıda ölçüm alınmalıdır. Ölçümlerin istatistiksel olarak birbirinden bağımsız olması için ölçümler arasında yeterli miktarda zaman geçmelidir.

2.7.3.6 Doğrusallık testi

Bir ölçüm cihazının kalibrasyonu o cihazın her skalasındaki en az bir noktada gerçekleştirilmelidir. Eğer farklı skalalarda ölçülen değerlerin kalibrasyon faktörleri arasında belirgin farklılıklar varsa kalibrasyonu yapan kişi cihazın arızalı olup olmadığını yada kalibrasyonun kendisinde bir hata olup olmadığını dikkatlice incelemelidir. Eğer böyle bir durum söz konusu değilse cihazın lineer olmadığı varsayılabilir ve ölçüm bir ya da iki noktada tekrarlanabilir veya ölçüm skalasının (range) üzerinde fazlaca ölçümler alınabilir.

2.7.3.7 Aşırı yükleme kontrolleri

Bazı ölçüm cihazlarının aşırı yükleme özelliklerinin kontrol edilmesi önemlidir. Bu cihazlar kalibrasyondan önce ve sonra aşırı yükleme testine tabii tutulurlar ve bu testten sonra doğru çalışıp çalışmadığı kontrol edilir. Bu testlerin yapılmasındaki amaç, cihazın

kullanımı esnasında isteyerek ya da istemeyerek aşırı yüklendikten sonra doğru çalışıp çalışmadığının kontrol edilmesidir. Çoğu IEC standartlarında gereklilikler ve aşırı yükleme özelliğinin tanımlanması için gerekli olan test metotları açıkça belirtilmiştir. Genellikle bunlar cihazın en üst skalasındaki maksimum eşdeğer doz hızının on katı bir dozla ışınlaması gerektiğini ve cihazın gösterge değerinin en yüksek değer dışında kaldığına emin olunması gerektiğini içerirler. Bunu takiben cihazın performansının en düşük skalada belirlenen limitler içerisinde kalıp kalmadığı kontrol edilir.

2.7.4 Kişisel dozimetre kalibrasyonu

Kişisel doz ölçümünde kullanılan dozimetrelerin kalibrasyonları, insan vücudundan kaynaklanan geri saçılımı ve soğurulmayı temsil etmesi açısından uygun fantomlarda gerçekleştirilir. Bu amaçla kişinin üzerinde bulunan dozimetreler, üzerlerinde buldukları vücut parçasını temsil eden ISO tarafından özellikleri belirlenmiş çeşitli fantomların üzerine yerleştirilerek kalibre edilirler.



Şekil 2.38 ISO kişisel dozimetre kalibrasyon fantomları

Kalibrasyonlar farklı derinliklerdeki kişisel eşdeğer doz niceliklerinde ($H_p(10)$, $H_p(0.07)$) gerçekleştirilebilir. Kişisel dozimetrelerin kalibrasyonunda dozimetrelerin, gelen fotonun enerjisine ve geliş açısına göre yanıtlarının yani bir başka deyişle gelen fotonun enerjisine ve açısına bağımlılıklarının mutlaka belirlenmesi gerekir. Bu amaçla

öncelikle ISO 4037-1 de belirtilmiş olan(bölüm 2.6.1.2) referans radyasyon alanları kullanılır.

Genel olarak referans dedektörler $H_p(10;E,\alpha)$ niceliğinde ölçüm yapmazlar. Bunun yerine genellikle hava kerma niceliğinde ölçüm yaparlar. Fakat uygun dönüşüm katsayıları kullanılarak (örneğin $h_{pk}(10;E, \alpha)$) hava kerma niceliğinden, kişisel eşdeğer doz ($H_p(10;E,\alpha)$) niceliğine geçiş mümkündür.

$$H_p(10;E,\alpha) = K_a \times h_{pk}(10;E, \alpha) \quad (2.43)$$

Yukarıdaki formülden de anlaşılacağı üzere kalibrasyon işlemi gerçekleştirilebilmek için aşağıda belirtilen hava kermadan(K_a) eşdeğer doz ($H_p(10)$, $H_p(0.07)$) niceliklerine geçişi sağlayan dönüşüm faktörleri kullanılmalıdır.

Çizelge 2.18 ISO tarafından belirlenmiş olan dar spektrum serileri için gövde fantomu kullanılarak, hava kermadan(K_a) cilt eşdeğer dozu ($H_p(0.07)$) niceliğine dönüşümü sağlayan farklı açılardaki dönüşüm katsayıları

Demet Kalitesi	d_F (cm)	$h_p(0.07;N,\alpha)$									
		0^0	10^0	20^0	30^0	40^0	45^0	50^0	60^0	70^0	80^0
N-10	25	0.91	0.91	0.90	0.90	0.89	0.88	0.87	0.84	0.79	0.63
N-15	25	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94	0.93	0.91	0.84
N-20	25	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.95	0.91
N-25	23	1.03	1.03	1.03	1.03	1.02	1.02	1.02	1.02	1.00	0.96
N-30	20	1.10	1.10	1.10	1.10	1.09	1.09	1.08	1.07	1.05	1.00
N-40	16	1.27	1.26	1.26	1.26	1.24	1.23	1.22	1.19	1.16	1.09
N-60	11	1.55	1.55	1.54	1.53	1.50	1.49	1.47	1.42	1.35	1.24
N-80	11	1.72	1.71	1.70	1.70	1.66	1.65	1.63	1.58	1.50	1.37
N-100	11	1.72	1.70	1.70	1.70	1.68	1.66	1.65	1.60	1.53	1.42
N-120	11	1.67	1.66	1.66	1.65	1.63	1.62	1.61	1.58	1.52	1.43
N-150	11	1.61	1.60	1.60	1.60	1.58	1.58	1.57	1.54	1.50	1.42
N-200	12	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.48	1.46	1.45	1.40
N-250	13	1.42	1.42	1.42	1.42	1.43	1.43	1.44	1.43	1.42	1.37
N-300	15	1.38	1.38	1.38	1.38	1.40	1.40	1.41	1.40	1.40	1.36

Çizelge 2.19 ISO tarafından belirlenmiş olan dar spektrum serileri için gövde fantomu kullanılarak, hava kermadan(Ka) eşdeğer doz (Hp(10)) niceliğine dönüşümü sağlayan farklı açılardaki dönüşüm katsayıları

Demet Kalitesi	d _F (cm)	hp(10;N,α)									
		0 ⁰	10 ⁰	20 ⁰	30 ⁰	40 ⁰	45 ⁰	50 ⁰	60 ⁰	70 ⁰	80 ⁰
N-15	25	0.06	0.06	0.06	0.04	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00
N-20	25	0.27	0.27	0.26	0.23	0.20	0.17	0.15	0.09	0.04	0.00
N-25	23	0.55	0.55	0.53	0.50	0.44	0.41	0.37	0.28	0.15	0.04
N-30	20	0.79	0.78	0.77	0.74	0.68	0.65	0.60	0.49	0.32	0.12
N-40	16	1.17	1.16	1.15	1.12	1.06	1.02	0.98	0.85	0.65	0.32
N-60	11	1.65	1.64	1.62	1.59	1.52	1.47	1.42	1.27	1.04	0.60
N-80	11	1.88	1.87	1.86	1.83	1.76	1.71	1.66	1.50	1.26	0.80
N-100	11	1.88	1.88	1.86	1.82	1.76	1.73	1.68	1.53	1.31	0.86
N-120	11	1.81	1.80	1.79	1.76	1.71	1.68	1.64	1.51	1.28	0.87
N-150	11	1.73	1.72	1.71	1.68	1.64	1.61	1.58	1.46	1.26	0.86
N-200	12	1.57	1.56	1.56	1.55	1.51	1.49	1.46	1.38	1.23	0.86
N-250	13	1.48	1.48	1.48	1.47	1.44	1.42	1.40	1.33	1.21	0.87
N-300	15	1.42	1.42	1.42	1.41	1.40	1.38	1.36	1.30	1.19	0.87

Çizelge 2.20 ISO tarafından belirlenmiş olan referans radyasyon alanları için gövde fantomu kullanılarak, hava kermadan(Ka) eşdeğer doz (Hp(10)) niceliğine dönüşümü sağlayan farklı açılardaki dönüşüm katsayıları

Demet Kalitesi	d _F (cm)	hp(10;N,α)									
		0 ⁰	10 ⁰	20 ⁰	30 ⁰	40 ⁰	45 ⁰	50 ⁰	60 ⁰	70 ⁰	80 ⁰
S-Am	11	1.89	1.88	1.86	1.83	1.77	1.72	1.66	1.50	1.25	0.79
S-Cs	15	1.21	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.19	1.14	0.92
S-Co	15	1.16	1.15	1.15	1.15	1.16	1.16	1.16	1.14	1.12	0.96
R-C	15	1.11	1.11	1.12	1.12	1.11	1.11	1.11	1.11	1.10	1.03
R-F	15	1.12	1.12	1.12	1.11	1.11	1.11	1.11	1.12	1.13	1.07
R-Ti	15	1.11	1.11	1.11	1.11	1.10	1.11	1.11	1.11	1.12	1.05

R-Ni	15	1.11	1.11	1.11	1.11	1.10	1.10	1.10	1.11	1.12	1.06
R-O	15	1.12	1.12	1.12	1.11	1.11	1.11	1.11	1.12	1.13	1.07

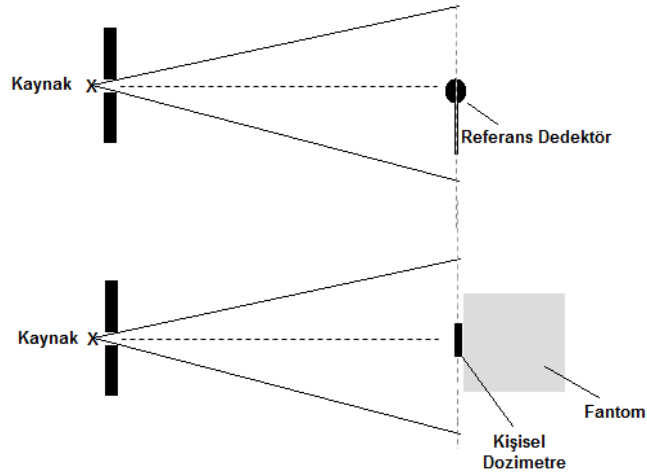
Çizelgeler 2.18, 2.19 ve 2.20 de belirtilmiş olan d_F niceliği, ışınlanan fantom yüzeyindeki radyasyon alan çapını tanımlar.

2.7.4.1 Kalibrasyon

Kişisel dozimetrelerin kalibrasyonunda üç farklı metot kullanılabilir.

2.7.4.1.1 Monitor chamber kullanılmadan, referans dedektör kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon

Bu metot, kalibrasyon işlemi esnasında hava kerma hızı değerinin sabit olduğu durumlarda kullanılır. Kalibrasyon referans test koşullarına yakın olan standart test koşullarında gerçekleştirilir. Fakat bu koşullardan uygun olanları yine referans şartlara göre düzeltilirler. Kalibrasyon düzeneği aşağıdaki şekil 2.38 de belirtilmiştir.



Şekil 2.39 Kişisel dozimetrelerin kalibrasyon yöntemi

Referans dedektörün ve kalibrasyonu gerçekleştirilecek olan kişisel dozimetrelerin referans noktaları sırasıyla radyasyon alanındaki test noktasına, $H_p(10,E,\alpha)$ niceliğindeki kalibrasyon için yerleştirilirler. Referans dedektör tarafından $H_p(10,E,\alpha)$ niceliği aşağıdaki gibi elde edilir.

$$H_p(10;E,\alpha)=N_R h_{pK}(10;E,\alpha) M_R \quad (2.44)$$

Burada;

N_R ; referans ölçüm aletinin(dedektörün) kalibrasyon faktörü(referans koşullar için);

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;

$h_{pK}(10;E,\alpha)$; hava kerma ölçüm niceliğinden, $H_p(10;E,\alpha)$ ölçüm niceliğine geçişi sağlayan dönüşüm katsayısıdır.

Kalibrasyonu gerçekleştirilecek olan kişisel dozimetreler, referans noktaları test noktasına gelecek şekilde ISO water slap fantom (gövde fantomu) üzerine yerleştirilirler ve bu fantom radyasyon alanına öncelikle $\alpha = 0^0$ olacak şekilde hizalanır. Dozimetreler tarafından elde edilen $H_p(10;E,\alpha)$ niceliği aşağıdaki gibi elde edilir.

$$H_p(10;E,\alpha) = N_I M_I \quad (2.45)$$

Burada;

N_I , kalibrasyonu yapılan ölçüm cihazının kalibrasyon faktörü(referans koşullardaki);

M_I , kalibrasyonu yapılan dedektör ile ölçülmüş değerdir.

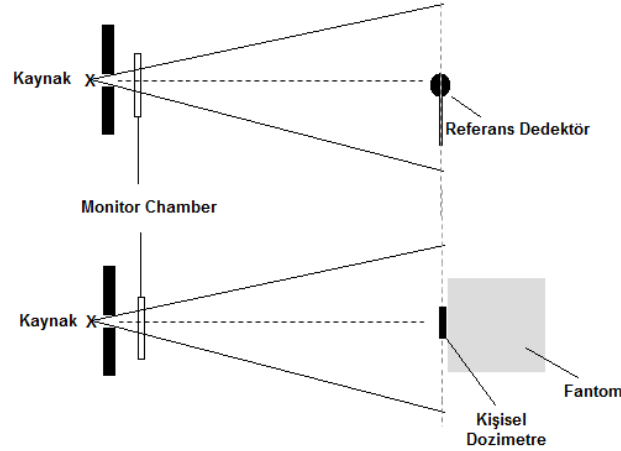
Formül 2.44 ve 2.45 kullanılarak kişisel dozimetrelerin kalibrasyon faktörü aşağıdaki gibi elde edilir.

$$N_I = N_R \frac{h_{pK}(10, E, \alpha) M_R}{M_I} \quad (2.46)$$

Burada referans dedektörün gösterge birimi Gy, $h_{pK}(10, E, \alpha)$ dönüşüm katsayısının birimi Sv/Gy ve TLD 'nin okuma birimi nC'dur. Bu birimler yukarıdaki formülde yerine yazıldığında elde edilen kalibrasyon faktörünün biriminin Sv/nC olduğu görülür.

2.7.4.1.2 Monitor chamber ve referans dedektör kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon

Bu metot hava kerma hızının kişisel dozimetrelerin kalibrasyonu esnasında sabit kalmadığı durumlarda kullanılır. Kullanılan deney düzeneği aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.40 Kişisel dozimetrelerin monitor chamber kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon yöntemi

Referans dedektör ve kalibrasyonu gerçekleştirilecek olan kişisel dozimetrelerin referans noktaları radyasyon alanındaki test noktasına sırasıyla yerleştirilir. Öncelikle referans dedektör ve referans dedektör ile birlikte eş zamanlı olarak monitor chamber ile ölçümler alınır. Sonrasında kişisel dozimetreler ISO water slap fantomun üzerine yerleştirilir ve fantomun doğrultusu $\alpha = 0^\circ$ olacak şekilde ayarlanıp hem dozimetrelerle

hem de monitor chamber ile eş zamanlı olarak ölçümler alınır. Kişisel dozimetrelerin kalibrasyon faktörü aşağıdaki formülden elde edilebilir.

$$N_I = N_R \left(\frac{h_{pK}(10, E, \alpha) M_R}{m_R} \right) \left(\frac{m_I}{M_I} \right) \quad (2.47)$$

Burada;

N_R ; referans ölçüm aletinin(dedektörün) kalibrasyon faktörü(referans koşullar için);

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;

$h_{pK}(10;E,\alpha)$; hava kerma ölçüm niceliğinden, $H_p(10;E,\alpha)$ ölçüm niceliğine geçişi sağlayan dönüşüm katsayısı;

M_I , kalibrasyonu yapılan dozimetre ile ölçülmüş değer;

m_R , referans koşullara göre düzeltilmiş, yani gösterge değeri uygun düzeltme katsayıları ile çarpılmış (örneğin hava yoğunluğundaki değişimler için), referans ölçüm aletinin ışınlanması esnasında monitor chamber tarafından ölçülen değer;

m_I , referans koşullara göre düzeltilmiş, yani gösterge değeri uygun düzeltme katsayıları ile çarpılmış (örneğin hava yoğunluğundaki değişimler için), kalibrasyonu yapılan ölçüm aletinin ışınlanması esnasında monitor chamber tarafından ölçülen değerdir.

2.7.4.1.3 Bilinen bir radyasyon alanında gerçekleştirilen kalibrasyon

Radyasyon alanındaki bir test noktasında $H_p(10;E,\alpha)$ niceliği direkt olarak biliniyorsa kişisel dozimetrelerin kalibrasyon faktörü aşağıdaki formülden elde edilebilir.

$$N_I = \frac{H_p(10;E,\alpha)}{M_I} \quad (2.48)$$

Burada;

M_I , kalibrasyonu yapılan dozimetre ile ölçülmüş ve referans koşullar için düzeltilmiş değerdir.

Bu formülde belirtilen $H_p(10;E,\alpha)$ niceliği belirli bir mesafedeki hava kerma değeri ile uygun $h_p(10;E,\alpha)$ dönüşüm katsayısının çarpılmasıyla elde edilir. Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise kişisel dozimetrelerin her zaman olduğu gibi fantom üzerinde ışınlanması gerektiğidir.

2.7.5 Referans ölçüm cihazları

2.7.5.1 Referans ölçüm cihazları için gereksinimler

Normalde referans ölçüm cihazı olarak bir iyon odası kullanılır. Fakat, örneğin düşük hava kerma hızının belirlenmesindeki gibi bazı uygulamalarda, diğer tipte ölçüm cihazları (örneğin sintilasyon dedektörleri) kullanılır.

Referans ölçüm cihazı, kullanılması planlanan enerji, hava kerma ve hava kerma hızı aralığında kalibre edilmelidir. Referans ölçüm cihazının kalibrasyonunda kullanılan referans radyasyonlar eğer mümkünse radyasyondan korunma ölçüm cihazlarının kalibrasyonunda da kullanılmalıdır. Referans ölçüm cihazlarının kalibrasyon faktörleri belirli bir enerji, spektrum ve polarizasyon gerilimi(çalışma gerilimi) için geçerlidir. Cihaz kullanılacağı her zaman bu gerilimde kullanılmalıdır.

Radyasyonun geliş doğrultusundaki iyon odasının oryantasyonu ölçüm sonuçlarını etkileyebilir. Bu yüzden iyon odasının referans oryantasyonunun, referans ölçüm cihazının kalibrasyonunda ve bu cihazın başka ölçüm cihazlarının kalibrasyonu için kullanımında, kullanılması önemlidir.

2.7.5.2 Referans ölçüm cihazı için düzeltmeler

2.7.5.2.1 Genel

Ölçülen değerin doğru(convantional true value) değerini (H) elde edebilmek için referans ölçüm cihazının ölçümlerini, standart test koşulları ile referans test koşulları arasındaki farklılıklardan doğan farklılıkları, çeşitli faktörler ile düzeltmek gerekir. Eşdeğer doz niceliği(H) aşağıdaki formülden elde edilir.

$$H = hN_R M_R \quad (2.49)$$

Burada;

h, eşdeğer doz niceliğini, referans ölçüm cihazı tarafından ölçülen fiziksel nicelikten elde etmek için kullanılan dönüşüm katsayısı,

N_R , referans şartlar altındaki referans ölçüm cihazının kalibrasyon faktörü,

M_R , referans şartlara göre düzeltilmiş, referans ölçüm cihazı tarafından ölçülen değer.

M_R ifadesinin yerine aşağıdaki 2.50 numaralı eşitlik yazılırsa 2.51 numaralı eşitlik elde edilir.

$$M_R = (\bar{M}_{RI} - \bar{M}_{R0})k_{pr}k_Tk_Ck_Sk_r \quad (2.50)$$

$$H = hN_R(\bar{M}_{RI} - \bar{M}_{R0})k_{pr}k_Tk_Ck_Sk_r \quad (2.51)$$

Burada;

\bar{M}_{RI} , kalibrasyon anındaki cihazın ortalama gösterge değeri,

\bar{M}_{R0} , kaynak kaldırıldıktan sonraki(background) cihazın ortalama gösterge değeri,

k_{pr} , hava basıncı için düzeltme faktörü,

k_T , sıcaklık için düzeltme faktörü,

k_C , dedektör boyutu için düzeltme faktörü (dedektör hacmi üzerindeki alanın homojen olmaması),

k_S , saçılan radyasyon için düzeltme faktörü,

k_r , skala yada aralık için düzeltme faktörü, genellikle ölçüm cihazının kalibrasyon sertifikasında yer alır.

Eşdeğer doz niceliği (H) farklı bir radyasyon niceliğinde, enerji bağımlılığı için ek bir düzeltme faktörü (k_{en}) kullanılarak belirlenebilir. k_{en} değerleri genellikle kalibrasyon sertifikalarından elde edilebilir.

Referans ölçüm cihazı, ölçülebilecek maksimum kerma hızına kadar kalibre edilmelidir.

2.7.5.2.2 Sıfır göstergesi (background)

Doğal fonun (background) haricinde herhangi bir ışınlama olmadığı durumdaki sızıntı akımı, cihazın en hassas skalasındaki aralığın maksimum değerinin %2 sinden düşük olmalıdır.

2.7.5.2.3 Basınç

Açık iyon odaları için, o anki basınç değerinin (p) referans basınç değerinden sapması ($p_0=101.3$ kPa) aşağıdaki formül ile düzeltilir.

$$k_{pr} = \frac{P_0}{p} \quad (2.52)$$

2.7.5.2.4 Sıcaklık

Açık iyon odaları için, o anki sıcaklık değerinin (T) referans sıcaklık değerinden sapması ($T_0=293.15 \text{ K}^0$) aşağıdaki formül ile düzeltilir.

$$k_T = \frac{T}{T_0} \quad (2.53)$$

2.7.5.2.5 Nem

Prensip olarak, bağıl nem referans değeri %50 olan havanın, bu bağıl neminden olan sapmaların bir düzeltme faktörü kullanılarak düzeltilmesi gerekir. Fakat bağıl nemin %30-%80 aralığında olması durumunda bu düzeltme işlemi ihmal edilebilir. Nemin %30 ile %80 arasına değişmesi ölçüm sonuçlarında % 0.15 den daha az bir değişime neden olur (Anonymous 2007).

2.7.5.2.6 Dedektör boyutu

Kısa kaynak dedektör mesafelerinde, dedektörün ölçülebilir boyutları radyasyon ölçümlerini etkileyebilir. Dedektörün hacminin tamamının homojen olarak ışınlanmaması ölçüm sonuçlarında hataya neden olabilir. Bu sebeple dedektörün bütün hacminin homojen olarak ışınlandığından emin olunmalıdır.

2.7.5.2.7 Saçılan radyasyon

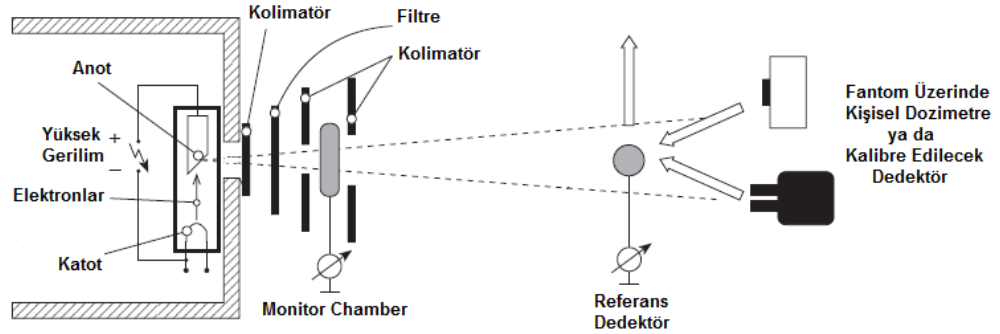
Referans dedektörün radyasyon alanı içerisinde durmasını sağlayan yapı(destekler), minimum saçılan radyasyon üretecek şekilde dizayn edilmelidir. Bu yapı, düşük yoğunluklu ve atom numaralı malzemelerden yapılmış olmalıdır (örneğin polimetil metakrilat).

Referans ölçüm cihazını kalibre etmekte kullanılan radyasyon alanı belirgin ölçüde farklılık göstermiyorsa, iyon odasının gövdesinden kaynaklanan saçılan radyasyon için bir düzeltme faktörü kullanmaya gerek yoktur.

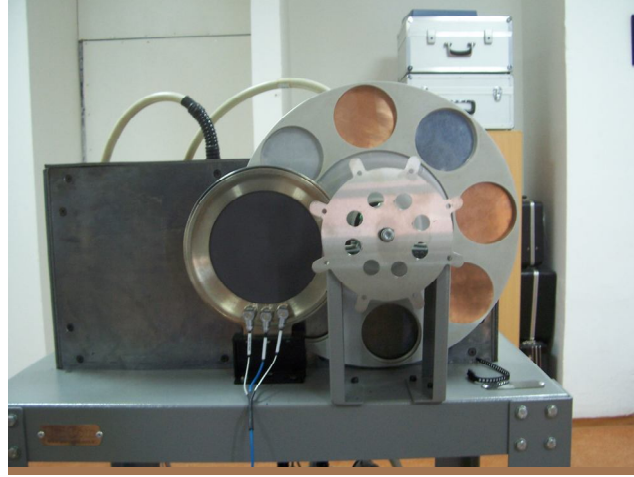
2.8 Radyasyon Alanının Kalibrasyonu ve Özelliklerinin Belirlenmesi

2.8.1 X-ışınları

X ışın sisteminden kaynaklanan, X-ışın tüpü çıkışındaki olası değişimlerden dolayı, X-ışınının foton akısındaki oluşan dalgalanmaları hesaba katmak için bir monitor chamber kullanılır. Açık (unsealed) bir transmisyon iyon odası monitor chamber olarak kullanılabilir. Filtre edilmiş X-ışını radyasyonları için bu monitor chamber, eklenmiş filtrelerle yakın ve hemen sonrasında yerleştirilmelidir.



Şekil 2.41 X-ışın sistemi kullanılarak yapılan kalibrasyonlarda kullanılan sistemin şematik gösterimi



Şekil 2.42 Monitor Chamber ve filtreler

Eklenmiş filtrelere kıyasla monitor chamber tarafından yapılan filtrasyon önemsiz olmalıdır. Monitor chamberın iyon toplama verimi kullanılan bütün hava kerma hızlarında en az %99 olmalıdır ve sızıntı akımı, ölçülebilen en düşük akımın %2'sinden az olmalıdır.

Ölçümler esnasında oluşan havadaki basınç ve sıcaklık değişimleri monitor chamberın gösterge değeri için düzeltilmelidir. Aynı zamanda monitor chamberın bulunduğu yerdeki hava sıcaklığı ile test noktasındaki hava sıcaklığı birbirinden farklı olabilir. Bu durumda iki farklı düzeltme faktörünün kullanılacağı unutulmamalıdır.

X-ışın ünitesi “sabit potansiyel” tipinde (yüksek voltajdaki dalgalanma %10'u geçmemelidir) olmalıdır. Tercihen kullanılan X-ışın ünitesi olabildiğince en düşük dalgalanmaya sahip olmalıdır. Düşük enerjili X-ışın aralığındaki ölçümler için tüp yüksek gerilimi devamlı en az 10–60 kV arasında ve 0.1–30 mA aralığındaki akımlarla ayarlanabilir olmalıdır.

X-ışın tüpünün hedef(anot) materyali tungsten olmalıdır ve anot açısı 20^0 'den küçük olmamalıdır. Işınlama esnasında tüp potansiyelinin ortalama değeri \pm %1'lik limitler içerisinde sabit olmalıdır.

Not: X-ışın tüpü aşınma etkileri minimum olacak şekilde kullanılmalıdır. Bu etkiler doğal filtrasyonu artırır.

Referans laboratuvar, tüp potansiyelini göstermekte kullanılan cihazı, çalışma şartlarında ve çeşitli noktalarda kalibre etmelidir. En iyi yol bir kalibre edilmiş voltaj bölücüsü (dynalyzer) kullanmak ya da yüksek ayırma güçlü bir spektrometri sistemi ile elde edilen ölçümün (spektrumun) en yüksek foton enerjisini saptamaktır. Eğer kalibrasyon spektrometri sistemi ile yapılıyorsa, tüp potansiyeli spektrumun yüksek enerji kısmının lineer olarak extrapole edildiği noktanın, spektrumun enerji eksenine ile kesişimidir. Tüp potansiyelinin doğru değeri \pm %2'lik limitler içerisinde olmalıdır. Yüksek voltaj kalibrasyonunun maksimum foton enerjisinin spektrometrik ölçümü ile ya da voltaj bölücüsü (Dynalyzer) kullanılarak düzenli olarak kontrol edilmesi tavsiye edilir.

Kolimatör yaprakları (shutter) tarafından sağlanan zırhlama ile merkezi ışındaki hava kerma hızının en az 1000 kat azaltılması gerekir. Eğer ışınlama kolimatör yapraklarının kontrolü ile gerçekleştiriliyorsa, ışınlama süreleri yaprakların geçiş sürelerinin 1000 katından fazla olmalıdır. Filtre materyalleri için gereklilikler aşağıdaki tabloda belirtilmiştir.

Çizelge 2.21 X-ışınlarının filtrasyonunda kullanılan metallerin özellikleri

Metal	Kalite	Nominal Yoğunluk (g/cm ³)
Alüminyum	Minimum % 99.9 Saflık	2.70
Bakır	Minimum % 99.9 Saflık	8.94
Kalay	Minimum % 99.9 Saflık	7.28
Kurşun	Minimum % 99.9 Saflık	11.3

X-ışın tüpünün filtre, kolimatör ve monitor chamberın hizası radyografik X-ışın filmi ya da radyokromatik film kullanılarak belirlenmelidir. Hizanın kesinliği bir adet 0.075mm çaplı iğne delik (pinhole) kullanılarak belirlenebilir. Hızlı bir şekilde hizanın sağlanması X-ışın demetinin merkezinden geçen bir lazer ile sağlanabilir.

Kalibrasyon düzeneğinde, X-ışın tüpü odak noktası ile dedektör arasındaki mesafenin tekrarlanabilirliğinin ± 1 mm'lik sınırlar içerisinde kaldığına emin olunmalıdır.

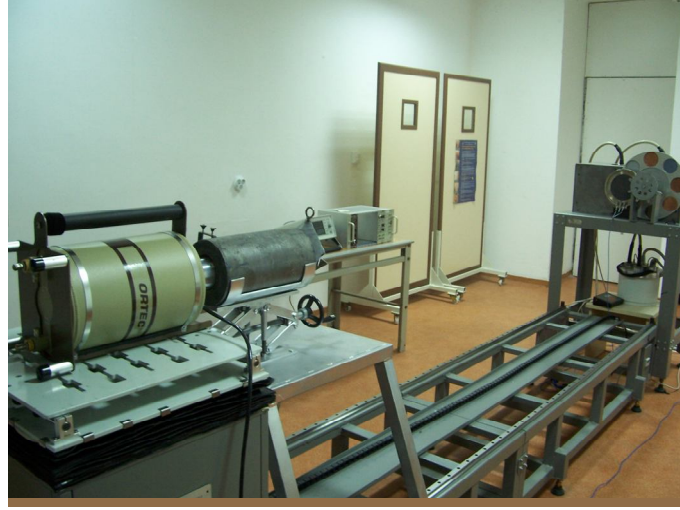
Düşük enerji aralığında X-ışın tüpünün doğal filtrasyonu toplam filtrasyonda önemli bir rol oynar. Doğal filtrasyon, X-ışın tüpünün 60 kV'ye ayarlandığı ve herhangi bir ek filtrenin kullanılmadığı durumda yapılan HVL ölçümü ile belirlenir. Alüminyum soğurucular X-ışın tüpü odağı ile dedektör arasındaki mesafenin ortasına yerleştirilmelidir. Dedektörün bulunduğu yerdeki X-ışın demetinin çapı, dedektörü yeterince ve homojen olarak ışınlayabileceği genişlikte olmalıdır. Alüminyum soğurucular ile dedektör arasındaki mesafe, dedektörün bulunduğu yerdeki X-ışın alanının çapının en az 5 katı büyüklüğünde olmalıdır. Bu sayede alüminyum soğuruculardan kaynaklanan saçılan ışınlar ölçüm sonuçlarını etkilemez. Eklenen alüminyum levhalar sonucunda çizilen azalım eğrisinden sonra 1. HVL belirlenmelidir. Elde edilen 1. HVL değeri kullanılarak doğal filtrasyonun değeri aşağıdaki çizelgeden belirlenir. Doğal filtrasyonun değeri mm Al cinsinden tanımlanır.

Çizelge 2.22 60 kV da 1. HVL ile doğal filtrasyon arasındaki ilişki

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 filtrasyon değeri elde edildikten sonra aşağıda belirtilen, ISO 4037-1 tarafından tanımlanmış olan filtre edilmiş X-ışın demet kaliteleri, gerekli olan filtre kalınlıklarının yerleştirilmesi sonucunda elde edilir. Bu demet kalitelerinin elde edilmesi için bir spektroskopi sistemine ihtiyaç vardır.



Şekil 2.43 X-ışın spektroskopi sistemi

Tablolarda belirtilen filtreler yerleştirildikten sonra spektrumlar toplanır ve daha önceden belirtilmiş olan ortalama foton enerjisi (\bar{E}), spektral ayırma gücü (R_E) ve 1.HVL değerleri protokolda verilen değerler ile karşılaştırılır. Eğer elde edilmiş olan değerler limitlerin içerisinde kalıyorsa çizelge 2.7, çizelge 2.8, çizelge 2.9 ve çizelge 2.10 da belirtilmiş olan hava kermadan eşdeğer doz niceliğine dönüşümü sağlayan katsayılar kullanılabilir.

Çizelge 2.23 Düşük hava kerma hızı serilerini (L) belirleyen parametreler

Demet Kalitesi	Ortalama Enerji, \bar{E} (keV)	Spektral Ayırma Gücü, R_E (%)	Tüp Gerilimi (kV) ^a	Ek Filtre ^b (mm)				1. HVL ^c (mm)
				Pb	Sn	Cu	Al	
L-10	8.5		10				0.3	0.058 Al
L-20	17	21	20				2.0	0.42 Al
L-30	26	21	30			0.18	4.0	1.46 Al
L-35	30	21	35			0.25		2.20 Al
L-55	48	22	55			1.2		0.25 Cu
L-70	60	22	70			2.5		0.49 Cu
L-100	87	22	100		2.0	0.5		1.24 Cu
L-125	109	21	125		4.0	1.0		2.04 Cu
L-170	149	18	170	1.5	3.0	1.0		3.47 Cu
L-210	185	18	210	3.5	2.0	0.5		4.54 Cu
L-240	211	18	240	5.5	2.0	0.5		5.26 Cu

a) X-ışın tüpüne uygulanan gerilim çalışma esnasında ölçülmelidir.

b) Tavsiye edilen doğal filtrasyonun 1 mm Be olduğu en düşük üç enerji hariç, ilave filtreler ve doğal filtrasyondan oluşturulan toplam filtrasyon 4 mm Al'ye ayarlanmalıdır.

c) HVL ölçümleri odak noktasına 1 m mesafede yapılmalıdır.

Çizelge 2.24 Dar spektrum serilerini (N) belirleyen parametreler

Demet Kalitesi	Ortalama Enerji, \bar{E} (keV)	Spektral Ayırma Gücü, R_E (%)	Tüp Gerilimi (kV) ^a	Ek Filtre (mm) ^b				1. HVL (mm) ^c	2. HVL (mm) ^c
				Pb	Sn	Cu	Al		
N-10	8	28	10				0.1	0.047 Al	0.052 Al
N-15	12	33	15				0.5	0.14 Al	0.16 Al
N-20	16	34	20				1.0	0.32 Al	0.37 Al

N-25	20	33	25				2.0	0.66 Al	0.73 Al
N-30	24	32	30				4.0	1.15 Al	1.30 Al
N-40	33	30	40			0.21		0.084 Cu	0.091 Cu
N-60	48	36	60			0.6		0.24 Cu	0.26 Cu
N-80	65	32	80			2.0		0.58 Cu	0.62 Cu
N-100	83	28	100			5.0		1.11 Cu	1.17 Cu
N-120	100	27	120		1.0	5.0		1.71 Cu	1.77 Cu
N-150	118	37	150		2.5			2.36 Cu	2.47 Cu
N-200	164	30	200	1.0	3.0	2.0		3.99 Cu	4.05 Cu
N-250	208	28	208	3.0	2.0			5.19 Cu	5.23 Cu
N-300	250	27	250	5.0	3.0			6.12 Cu	6.15 Cu

- a) X-ışın tüpüne uygulanan gerilim çalışma esnasında ölçülmelidir.
- b) Tavsiye edilen doğal filtrasyonun 1 mm Be olduğu en düşük beş enerji hariç, ilave filtreler ve doğal filtrasyondan oluşturulan toplam filtrasyon 4 mm Al'ye ayarlanmalıdır.
- c) HVL ölçümleri odak noktasına 1 m mesafede yapılmalıdır.

Çizelge 2.25 Geniş spektrum serilerini (W) belirleyen parametreler

Demet Kalitesi	Ortalama Enerji, \bar{E} (keV)	Spektral Ayırma Gücü, R_E (%)	Tüp Gerilimi (kV) ^a	Ek Filtre (mm) ^b		1. HVL (mm) ^c	2. HVL (mm)
				Sn	Cu		
W-60	45	48	60		0.3	0.18	0.21
W-80	57	55	80		0.5	0.35	0.44
W-110	79	51	110		2.0	0.96	1.11
W-150	104	56	150	1.0		1.86	2.10
W-200	137	57	200	2.0		3.08	3.31
W-250	173	56	250	4.0		4.22	4.40
W-300	208	57	300	6.5		5.20	5.34

- a) X-ışın tüpüne uygulanan gerilim çalışma esnasında ölçülmelidir.

b) İlave filtreler ve doğal filtrasyondan oluşturulan toplam filtrasyon her durumda 4 mm Al'ye ayarlanmalıdır.

c) HVL ölçümleri odak noktasına 1 m mesafede yapılmalıdır.

Çizelge 2.26 Yüksek hava kerma hızı serilerini (H) belirleyen parametreler

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV)	Ek Filtre (mm) ^a			Yarı Değer Kalınlığı (mm) ^b				Ortalama Enerji, \bar{E} (keV)
					Birinci		İkinci		
		Al	Cu	Hava	Al	Cu	Al	Cu	
H-10	10			750	0.036	0.010	0.041	0.011	7.5
H-20	20	0.15		750	0.12	0.007	0.16	0.009	12.9
H-30	30	0.52		750	0.38	0.013	0.60	0.018	19.7
H-60	60	3.2		750	2.42	0.079	3.25	0.11	37.3
H-100	100	3.9	0.15	750	6.56	0.30	8.05	0.47	57.4
H-200	200		1.15	2250	14.7	1.70	15.5	2.40	102
H-250	250		1.6	2250	16.6	2.47	17.3	3.29	122
H-280	280		3.0	2250	18.6	3.37	19	3.99	146
H-300	300		2.5	2250	18.7	3.40	19.2	4.15	147

a) 100 kV dan yüksek tüp gerilimleri için ilave filtreler ve doğal filtrasyondan oluşturulan toplam filtrasyon her durumda 4 mm Al'ye ayarlanmalıdır. 100 kV dan yüksek tüp gerilimlerinde ise doğal filtrasyon yaklaşık 4 mm Be olmalıdır.

b) HVL ölçümleri odak noktasına 1 m mesafede yapılmalıdır.

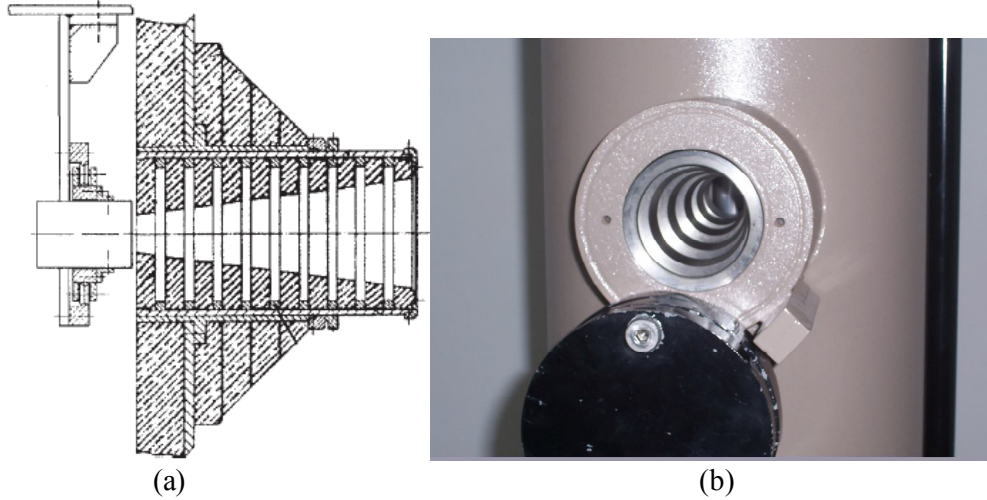
2.8.2 Radyoaktif kaynakların foton radyasyonu

Radyasyon alanının kalibrasyonu için referans ölçüm cihazı kullanılmalıdır. Her test noktasında, ölçüm gruplarının deneysel standart sapmasının referans ölçüm cihazının beklenen performansı ile tutarlı olacak şekilde, yeterli miktarda ölçüm alınmalıdır. Ölçülen hava kerma hızı değerlerinin birbirlerinden bağımsız olduğuna emin olunması için birbirini takip eden ölçümler arasında yeteli miktarda zaman beklenmelidir.

Referans kaynak kullanılarak her kalibrasyon mesafesindeki hava kerma hızı referans ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmelidir. Fakat kalibrasyon için gerekli olan hava kerma hızı aralığının tamamlanması için birden fazla kaynak gerekebilir. Bu aralık 10 $\mu\text{Gy/h}$ -10 Gy/h 'dır. Böyle durumlarda eğer kaynaklar aynı radyoaktif madde ve eş özelliklere (örneğin kaynak çapı ve kapsülü) sahiplerse 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 mesafelerdeki hava kerma hızları, L mesafesindeki referans kaynağın hava kerma hızının referans olmayan kaynağın hava kerma hızına oranına çarpılması ile hesaplanır.

Cs-137 radyoaktif kaynağı ile kullanılan kolimatör sisteminin örneği aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.44 Cs-137 radyoaktif kaynağı ile kullanılan kolimatör sisteminin örnekleri
a) Cs-137 radyoaktif kaynağında kullanılan kolimatör sistemi b) A.Ü Nükleer Bilimler Enstitüsü bünyesinde bulunan Cs-137 ışınlama sisteminde kullanılan kolimatör

Güvenli bir zırlama için radyasyonu yaklaşık 1000 kat azaltacak kurşun kalınlığı gerekmektedir. Cs-137 için minimum kurşun kalınlığı 6.5 cm'dir. Atenatörler(azaltıcı plakalar) diyaframın (kolimatör ağzının) yakınına yerleştirilmiş olmalıdır. Cs-137 radyoaktif kaynakları için atenatörlerin kalınlıkları yaklaşık 20, 40, 60 mm vb. olmalıdır. Kullanılan sistemdeki atenatörlerin kalınlıkları yaklaşık 19.4 mm'dir. Atenatörler hava kerma hızını belli bir oranda azaltmaya yarar. Gerçek azalım miktarı alan boyutu gibi geometrik parametrelere bağlıdır. Bundan dolayı test noktasındaki hava kerma hızı dozimetrik ölçümlerle belirlenmelidir.

Kalibrasyon esnasında dedektör, kolimatör yüzeyinin minimum 30 cm önünde ve kalibrasyon odasının arka duvarından en az 1 m önde olmalıdır.

Test noktasında kolime edilmiş ışındaki saçılan radyasyonun etkisini değerlendirmek için referans ölçüm aleti, penubrası ile birlikte demet yarıçapının iki katı mesafeye, ışın demetine dik bir düzlemde yerleştirilmelidir ve ölçülen hava kerma hızı ışın demetinin merkezindeki değer %5'inden az olmalıdır.

2.9 Yardımcı Kalibrasyon Ekipmanları

Aşağıdaki liste kurulmuş olan ışınlama sisteminden ayrı olarak (örneğin X-ışını, filtreler), bir foton kalibrasyon laboratuvarı tarafından ihtiyaç duyulabilecek ilgili ekipmanların listesidir.

- 2 adet hassas(kesin) termometre
- Nemölçer
- Kalibrasyon mesafelerinin ölçümü için hassas cihazlar, örneğin kalibre edilmiş çelik şeritler
- Hassas elektronik zamanlayıcılar(kuvars)
- Ana güç sabitleyici
- Yarı değer kalınlığı (HVL) ölçümü için alüminyum ve bakır levhalar
- Kontrol edilebilir kamera ve bağlı olduğu monitör
- ISO özelliklerine göre
 - ISO water slab phantom (Gövde Fantomu)

- ISO PMMA rod phantom (Çubuk Fantomu)
- ISO water pillar phantom (Sütun Fantomu)
- Radyasyondan korunma cihazları
 - Foton hava kerma ya da eşdeğer doz hızı ölçüm cihazları
 - Kontaminasyon dedektörleri
 - Kişisel alarmlı dozimetreler
 - Işınlama odalarına yerleştirilmiş, doz hızı seviyesini görsel olarak belirten(kırmızı-yeşil lambalar) ve göstergesi kalibrasyon odasının dışına giriş kapısının yanına yerleştirilmiş alan dedektörleri (aynı zamanda işitsel bir alarmında bulunması gerekebilir)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Tez Kapsamında Kalibrasyon İşlemlerinin Gerçekleştirildiği Sistemler

3.1.1 X-ışın ışınlama sistemi

Kurulum tarihi:	2008
X-ışın jeneratörü:	İtalray, Pıxel HF
	Frekansı: 50/60 kHz
	Maksimum güç: 50 kW
	kV aralığı: Radyografi: 40-150 kV
	Floroskopi : 40-125 kV
	mA aralığı: Radyografi: 25-600 mA
	Floroskopi: 0.5-6 mA
X- ışın tüpü:	Varian, RAD-21
	Odak nokta boyutu: 0.6 mm – 1.2 mm
	Anot materyali: Tungsten
	Anot açısı: 12 ⁰
Voltaj bölücüsü:	GİCİ-PM, Model 2000 High Voltage Divider
	Gerilim aralığı: 0–150 kV
	Bölme oranı: 10000:1 ya da 1000:1
	Empedans: 1 megaohm ya da 10 megaohm

3.1.2 Cs–137 ışınlama sistemi

Hopwell Designs, Inc. , G10 Gamma Beam Irradiator	
Kurulum tarihi:	2009
1. Radyoaktif kaynak:	Cs–137
1. Radyoaktif kaynak aktivitesi:	47 mCi (14.05.2009)
2. Radyoaktif kaynak:	Cs–137
2. Radyoaktif kaynak aktivitesi:	8.58 Ci (14.05.2009)
Azaltıcı levhalar:	3 adet 19.4 mm kalınlığında, kurşun
Kolimatör:	ISO Collimator, 17 ⁰

3.2 Kalibrasyon İşleminde Kullanılan Referans Dedektörler

3.2.1 İyon odaları

- I. PTW, TM 786 (Monitor Chamber), 94 cm³
- II. PTW, TM 23361, 30 cm³
- III. PTW, TM 32005, 27.9 cm³
- IV. PTW, TM 30010, 0.6 cm³, 2 adet
- V. PTW, TM 32003, 10 litre
- VI. PTW, Hp(10) T 34035 Secondary Standard Chamber

Çizelge 3.1 Referans dedektör bilgileri

Dedektör	Tipi	Çalışma Gerilimi (V)	Doz Aralığı		Doz Hızı Aralığı		Enerji Bağımlılığı
			Min	Maks	Min	Maks	
PTW,30 cm ³ Silindirik İyon Odası	TM 23361	+300	2.0 μGy	20 mGy	12 μGy/ dak	56 Gy/ dak	40 keV- Co-60 arasında ≤ ± %4
PTW,28 cm ³ Küresel İyon Odası	TM 32005	+400	2.2 μGy	23.8 mGy	12.96 μGy/ dak	65 Gy/ dak	48 keV- Co-60 arasında ≤ ± %5
PTW,10 dm ³ Küresel İyon Odası	TM 32003	+400	6.0 nGy	66 μGy	36.6 nGy/ dak	0.18 Gy/ dak	40 keV- Co-60 arasında ≤ ± %4
PTW,0.6 cm ³ İyon Odası	TM 30010	+400	100 μGy	1.0 Gy	0.6 mGy/ dak	2.8 kGy/ dak	70kV–280 kV arasında ≤ ± %2 200kV-Co–60 arasında ≤ ± %4
PTW, 10 cm ³ Paralel Plakalı İyon Odası	T 34035	+300	-	-	-	-	-
PTW,Monitor	TM	+400	Doz ya da doz hızı limitleri				-

Chamber	786		demet genişliğine ve doyuma bağlı olduğu için genel bir bilgi verilemez	
---------	-----	--	---	--

3.2.2 İyon odası elektrometreleri

PTW, Unidos Weblin (3 adet)

3.3 X-ışın Spektrumlarının Toplanması İçin Kullanılan Sistem

Tezde ilgilenilen enerji aralığı (30–100 keV) olduğundan, ölçümler bu enerji aralığı için düşük enerji bölgesinde çok yüksek ayırma gücüne sahip olan, Çizelge 1’de de özellikleri verilen bir p-tipi Alüminyum pencerele eş eksenli yüksek saflıkta HPGe dedektör (Ortec SGD-GEM-3615P4) ile yapılmıştır. Dedektörün azot soğutması için de 7 L hacminde, çift duvarlı (vakumlu) bir sıvı azot kabı kullanılmıştır.

Çizelge 3.2 HPGe dedektörün özellikleri

Dedektör geometrisi ve kristal tipi		Eş eksenli, p-tipi
Bağıl verimi		% 30
Ge kristali	Çap	37.7 mm
	Yükseklik	16.4 mm
Kriyostat kuyusu	Çap	9.4 mm
	Derinlik	7.1 mm
Enerji ayırma gücü (FWHM)	122 keV (^{57}Co)	0.6 keV
	1332,5 keV (^{60}Co)	1.6 keV

Direnç geri beslemeli önyükselteç (A257N) ve sızdırmaz HV filtreli dedektöre Ortec DSPEC jr 2.0 dijital sinyal işleme sistemi bağlanmıştır. Dedektöre bağlı dijital sinyal işleme sistemi ile yükselteç, ADC ve MCA ayarları bilgisayardan kontrol edilmektedir. Spektrumlar, Ortec Gamma Vision versiyon 6.01 gama spektroskopi yazılımı ile kontrol edilebilen 14 bit sabit dönüşüm zamanlı analog sayısal dönüştürücülü, 16K dönüştürme kazançlı çok kanallı analizör ile kaydedilmiştir.

Çevreden gelen ve saçılan fotonları engellemek için 40 mm kalınlığında silindirik kurşun zırh hazırlanmış ve yarı iletken dedektör bu zırhın içerisine yerleştirilmiştir. Gelen fotonların akısını azaltmak için 30 mm kalınlığında yaklaşık 1 mm çapında bir deliğe sahip olan kurşun bir plaka hazırlanmış ve bu plaka yarı iletken dedektörün önüne yerleştirilmiştir. 40 mm kalınlığındaki silindirik kurşun zırhın iç, 30 mm kalınlığındaki plakanın da arka kısmına 4.0 mm kalınlığında bakır plakalar yerleştirilmiştir.

3.4 X-ışın Spektrum Programları

1. Xcomp5r, R. Nowotny, A. Hofer
2. SpekCalc, F.DeBlois, G.Landry, F.Verhaegen
3. Report 78 Spectrum Processor, J. Reilly, D. Sutton,(IPEM 1997)

Bu çalışmada ISO 4037 ve IEC 61267 protokollerinde belirlenmiş olan X-ışın demet kalitelerinden elde edilmiş olanlarının karşılaştırılmasında, yukarıda belirtilen spektrum programlarından Xcomp5r spektrum programı seçilmiş ve kullanılmıştır.

3.5 kV Ölçümünde Kullanılan Cihazlar

1. GiCi marka voltaj bölücüsü
2. Radcal kVp Metre; 40x12-W
3. Radcal kVp Metre; 40x5-W

3.6 Test Objeleri

Dedektör tutucuları, ISO water slab phantom, ISO PMMA rod phantom, ISO water pillar phantom, PTW marka Al ve Cu soğurucu filtreler, CCD kamera ve monitör, Vidar marka film tarayıcı, radyografik film, fosfor plakası, hassas sıcaklık, basınç ve nem ölçer

3.7 Tez Kapsamında Kalibrasyonu Gerçekleştirilen Dedektörler

1. Radcal 10x5-6, 6 cm³, S/N = 16446
2. Radcal 10x5-6, 6 cm³, S/N = 17819
3. Radcal 10x6-6, 6 cm³, S/N = 03-0458
4. Radcal 10x5-60, 60 cm³, S/N = 9638
5. Radcal 10x5-60, 60 cm³, S/N = 9608
6. Radcal 10x6-60, 60 cm³, S/N = 07-0361
7. Radcal 10x5-180, 180 cm³, S/N = 17997
8. Radcal 10x5-180, 180 cm³, S/N = 18006
9. Radcal 10x6-180, 180 cm³, S/N = 08-0236
10. The Victoreen Geiger-Mueller(GM), Model: 489-110D
11. Bicon, Micro Sievert Survey Meter
12. Unfors, Model: 543, S/N: 6433, Conv
13. Unfors, Model: 543, S/N: 6433, I.I
14. The Victoreen Model: 06-526, Rad-Check Plus
15. Saint-Gobain Crystals and Detectors, Mini-Instruments SmartION,
Model: 2120 G
16. Harshaw, TLD-100(LiF:Mg,Ti)

Çizelge 3.3 Kalibrasyonu gerçekleştirilen dedektörlerin özellikleri

Dedektör	Tipi	Doz Aralığı		Doz Hızı Aralığı		Enerji Bağımlılığı
		Min	Maks	Min	Maks	
Radcal 6 cm ³	10x5-6 S/N = 16446	0.01 μGy	600 Gy	0.1 μGy/ dak	7.4 Gy/ dak	20keV-1.33Mev arasında ± %5
Radcal 60 cm ³	10x5-60 S/N = 9638	1,0 nGy	60 Gy	0.01 μGy/ dak	730 mGy/ dak	20keV-1.33Mev arasında ± %5
Radcal 180 cm ³	10x5-180 S/N = 17997	0.1 nGy	20 Gy	16.6 nGy/ Gy/	0.25 Gy/	30keV-1.33Mev arasında

				dak	dak	± %5
Radcal 6 cm ³	10x5-6 S/N = 17819	0.01 μGy	600 Gy	0.1 μGy/ dak	7.4 Gy/ dak	20keV-1.33Mev arasında ± %5
Radcal 60 cm ³	10x5-60 S/N = 9608	1.0 nGy	60 Gy	0.01 μGy/ dak	730 mGy/ dak	20keV-1.33Mev arasında ± %5
Radcal 180 cm ³	10x5-180 S/N = 18006	0.1 nGy	20 Gy	16.6 nGy/ dak	0.25 Gy/ dak	30keV-1.33Mev arasında ± %5
Radcal 6 cm ³	10x6-6 S/N=03-0458	100 nGy	700 Gy	600 nGy/ dak	11.4 Gy/ dak	30keV-1.33Mev arasında %5
Radcal 60 cm ³	10x6-60 S/N=07-0361	10 nGy	70 Gy	60 nGy/ dak	1.14 Gy/ dak	20keV-1.33Mev arasında %5
Radcal 180 cm ³	10x6-180 S/N=08-0236	2.0 nGy	23.0 Gy	0.03 nGy/ dak	318 mGy/ dak	30keV-1.33Mev arasında %5
The Victoreen Geiger- Mueller	489-110D	-	-	0 mR/saat	80 mR/saat	-
Bicron	Micro Sievert	-	-	3.33 nSv/dak	33.3 μSv/dak	-
Unfors	Model:543 Conv	100 μGy	9.99 kGy	6.0 mGy/ dak	30.0 Gy/ dak	50-150 kVp aralığında < %5
Unfors	Model:543 I.I	100 nGy	9.99 kGy	6.0 μGy/ dak	30.0 mGy/ dak	50-150 kVp aralığında < %5
The Victoreen Rad-Check Plus	06-526	0.001 R	2 R	0.01 R/dak	20 R/dak	30-150 kVp aralığında

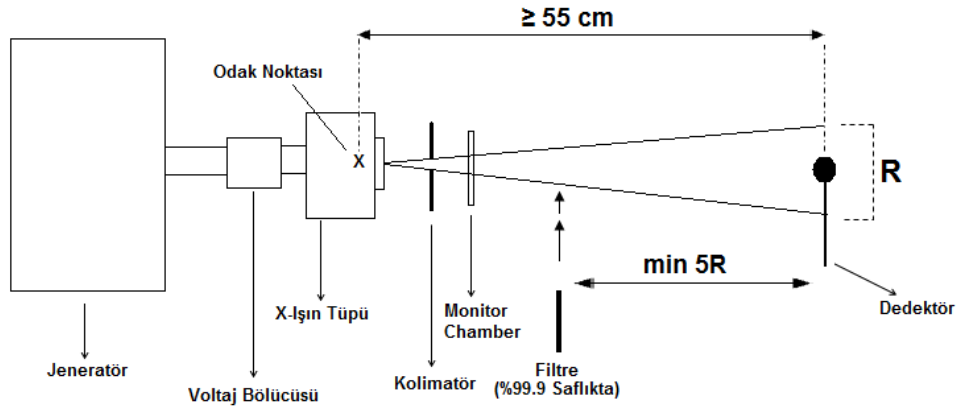
						\pm %5
Mini-Instruments SmartION	2120 G	1.0 μ Sv	500 μ Sv	16.6 nSv/ dak	8.33 mSv/ dak	-
Harshaw	TLD-100 (LiF:Mg,Ti)	10 μ Gy	10 Gy	-	-	30 keV- ⁶⁰ Co aralığında 1.25

3.8 X-ışın Sisteminde X-ışın Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi

3.8.1 IEC 61267 protokolünde belirlenmiş olan X-ışın demet kalitelerinin elde edilmesi

3.8.1.1 RQR X-ışın demet kalitesinin elde edilmesi

RQR X-ışın demet kalitesinin elde edilmesi için aşağıdaki belirtildiği gibi ölçüm geometrisi kurulmuştur.



Şekil 3.1 RQR X-ışın demet kalitesinin elde edildiği deney düzeneği

Odak noktası ile dedektör arasındaki mesafe 100 cm'ye ayarlanmıştır. Soğurucu filtreler %99.9 safılıktadır ve dedektör ile aralarındaki mesafe 75 cm'dir. Ölçümlerin alındığı referans dedektör PTW marka TM 32005 modelindeki iyon odasıdır. Dedektörün bulunduğu noktadaki ışınlama alanı 10x10 cm² olarak ayarlanmıştır. X-ışını alanının hatasız bir şekilde ayarlanması bir adet fosfor tabakasının ışınlanması ile

gerçekleştirilmiştir. Dedektörün bulunduğu noktaya yeterli genişlikteki bir fosfor tabakası yerleştirildikten sonra oda tamamıyla karartılıp ışınlama gerçekleştirilmiştir. Fosfordaki parıdamaya göre de istenilen boyutta bir alan açılması mümkün olmuştur. Işınlama esnasında radyasyondan korunma açısından kurşun bariyerlerin arkasına geçilmiş ve bu bariyerlerde bulunan kurşun eşdeğerli camlardan bakılarak parıdamaya izlenmiştir.

3.8.1.1.1 Birinci, ikinci yarı değer kalınlıklarının (1.HVL ve 2. HVL) ve homojenlik katsayısının hesaplanması

Öncelikle herhangi bir filtre yokken referans dedektör ile 40 kV'de doz hızı ölçülmüştür. Sonrasında belirtilmiş olan noktaya soğurucu alüminyum filtreler yerleştirilerek ölçümler alınmış ve bu işleme başlangıçtaki doz hızının yarısına ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. Elde edilen değerler ile 'Filtre kalınlığı (mmAl) – Doz hızı (µGy/min)' grafiği elde edilmiştir. Elde edilen bu eğrideki değerler kullanılarak, başlangıçtaki doz hızını tam olarak elde etmeyi sağlayacak olan filtre kalınlığını aşağıdaki lineer interpolasyon formülü yardımıyla elde edilmiştir.

$$\frac{X - X_1}{X_1 - X_2} = \frac{Y - Y_1}{Y_1 - Y_2} \quad (3.1)$$

Elde edilen 1. yarı değer kalınlığı (1.HVL), IEC 61267 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 dâhil 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, 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 hızı(µGy/min)' 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 lineer interpolasyon yapılmıştır. Elde edilen değerden ikinci yarı değer kalınlığı aşağıdaki formül ile elde edilmiştir.

$$2.HVL = d_{1/4} - d_{1/2} \quad (3.2)$$

Burada;

$d_{1/4}$, başlangıçtaki doz hızı değerini dörtte birine düşüren filtre kalınlığı,

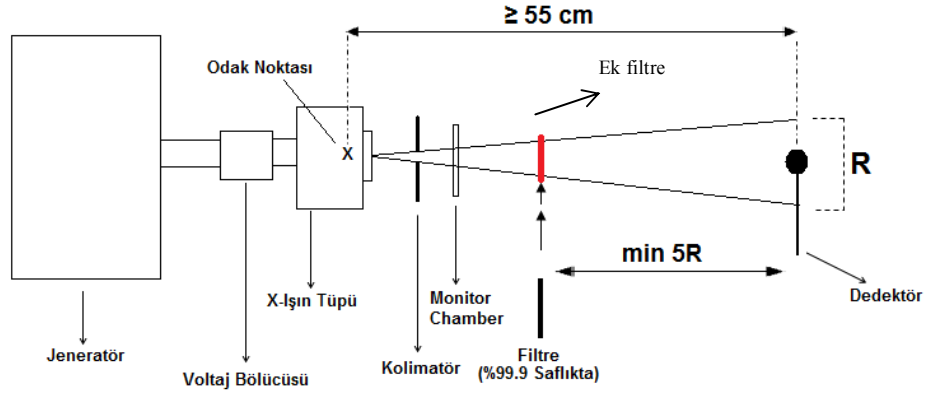
$d_{1/2}$, başlangıçtaki doz hızı değerini yarıya düşüren filtre kalınlığıdır.

Protokolde belirtilen bütün kV değerinde elde edilmiş olan 1. yarı değer kalınlıkları ile 2. yarı değer kalınlıkları kullanılarak aşağıdaki formül yardımıyla homojenlik katsayısı elde edilmiştir.

$$h = \frac{HVL_1}{HVL_2} \quad (3.3)$$

3.8.1.2 RQA X-ışın demet kalitesinin elde edilmesi

RQA X-ışın demet kalitesinin elde edilmesi için aşağıda belirtildiği gibi ölçüm geometrisi kurulmuştur.



Şekil 3.2 RQA X-ışın demet kalitesinin elde edildiği deney düzeneği

Odak noktası ile dedektör arasındaki mesafe 100 cm'ye ayarlanmıştır. Soğurucu filtreler % 99.9 saflıktadır ve dedektör ile aralarındaki mesafe 75 cm'dir. Ölçümlerin alındığı referans dedektör PTW marka TM 32005 modelindeki iyon odasıdır. Dedektörün bulunduğu noktadaki ışınlama alanı 10x10 cm² olarak ayarlanmıştır.

Protokolde belirtilen kalınlıktaki, soğurucu ortamı temsil eden alüminyum filtre yerleştirildikten sonra, RQR X-ışın demet kalitesinin elde edilmesinde kullanılan yöntem kullanılarak 1. yarı kalınlık değeri hesaplanmıştır.

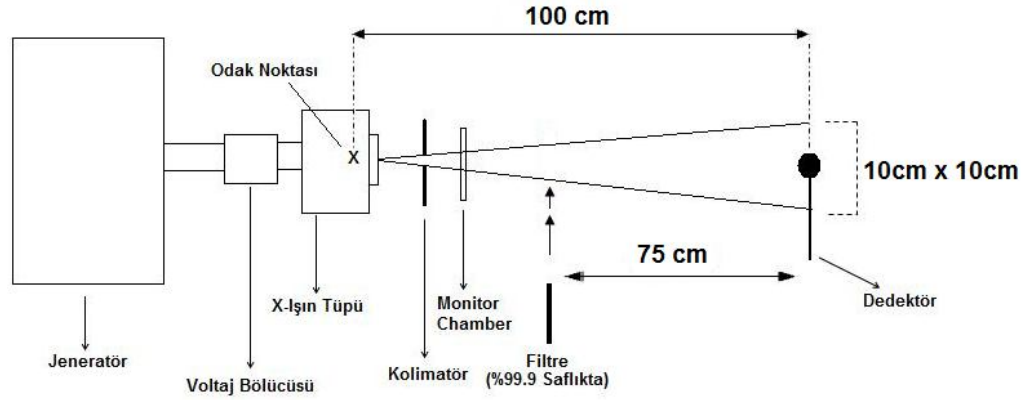
3.8.1.3 kV ölçümü

kV ölçümü, RQR ve RQA X-ışın demet kalitelerinin elde edilmesinde, X-ışın tüpü ile jeneratör arasında paralel olarak bağlı olan bir adet voltaj bölücüsü ile gerçekleştirilmiştir.

3.8.2 ISO 4037-1 protokolünde belirlenmiş olan X-ışın demet kalitelerinin elde edilmesi

3.8.2.1 Doğal filtrasyonun belirlenmesi

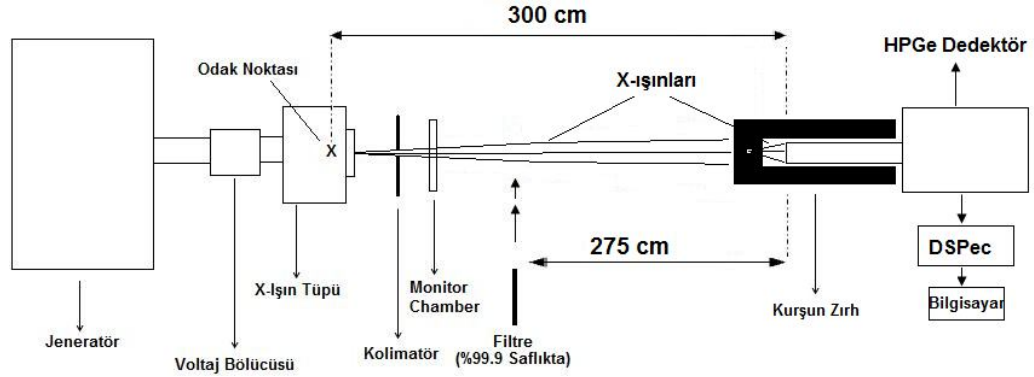
X-ışın sisteminin doğal filtrasyonu aşağıda belirtilen düzenek kurularak hesaplanmıştır.



Şekil 3.3 Doğal filtrasyonun hesaplanabilmesi için kurulan düzenek

Yukarıdaki düzenek kurulduktan sonra X-ışın tüpüne uygulanan gerilim 60 kV'a ayarlanmış ve 1. yarı kalınlık değeri hesaplanmıştır. Elde edilen değer, ISO 4037-1 de belirtilmiş olan '1. yarı kalınlık değerinden doğal filtrasyona geçiş' tablosunda (Çizelge 2.22) kullanılarak doğal filtrasyon hesaplanmıştır.

3.8.2.2 ISO 4037-1 de tanımlanan bazı X-ışın demet kalitelerindeki X-ışın spektrumlarının toplanması



Şekil 3.4 X-ışın spektrumlarının toplandığı deney düzeneği

Öncelikle yukarıdaki şekil 3.4 de belirtilen deney düzeneği kurulmuştur. N40, N60 N80 ve N100 X-ışın demet kalitelerinin elde edilebilmesi için, protokolda demetin önüne yerleştirilmesi belirtilen bakır ve alüminyum filtreler, sistemin doğal filtrasyonu da göz önünde bulundurularak demetin önüne yerleştirilmiştir. Gelen foton akısı çok yüksek

olduğundan ve çevreden gelen saçılan foton miktarı yüksek olduğundan dedektör 4 cm kalınlığında kurşun bir zırhın içine yerleştirilmiştir. Dedektörün önüne de 3 cm kalınlığında üzerinde 1 mm çapında delik olan kurşun bir kolimatör yerleştirilmiştir. Bunun sonucunda dedektörde elde edilen pulsların üst üste binmesinin önüne geçilmiştir. ISO 4037-1 protokolünde belirtilen N40, N60 N80 ve N100 X-ışın demet kalitelerinin spektrumları, özellikle düşük enerji bölgesinde yüksek ayırma gücüne sahip bir yarı iletken dedektör olan Ortec marka HPGe ile elde edilmiştir. Sistemin enerji kalibrasyonu Ba-133, Am-241, Cd-109 ve Co-57 radyoaktif kaynakları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.8.2.3 Birinci ve ikinci yarı kalınlık değerinin elde edilmesi

Şekil 3.3 deki deney düzeneği kurulduktan sonra 1. ve 2. yarı kalınlık değerleri bakır filtreler kullanılarak elde edilmiştir.

3.8.2.4 X-ışın spektrumlarının bitiş noktaları kullanılarak X-ışın tüpüne uygulanan yüksek gerilimin belirlenmesi

N40,N60,N80 ve N100 X-ışın demet kalitelerinin elde edildiği spektrumların bitiş noktalarındaki enerji değerleri kullanılarak X-ışın tüpüne uygulanan yüksek gerilim belirlenmiştir.

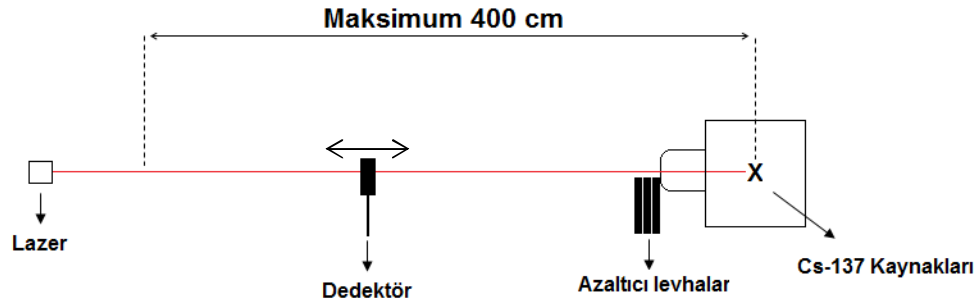
3.8.2.5 Kolimatörün tamamen kapatıldığı durumdaki doz hızı ölçümü

Kolimatör yaprakları, dedektörün bulunduğu noktada $10 \times 10 \text{ cm}^2$ lik bir alan oluşturacak şekilde açılmış ve sonrasında doz hızı değeri ölçülmüştür. Dedektörün yeri değiştirilmeden kolimatör yaprakları tamamen kapatılmış ve tekrardan doz hızı ölçülmüştür. Bu çalışmanın yapılış amacı, kolimatör yapraklarının belirtilen oranlarda soğurma gerçekleştirip gerçekleştirmediğini belirlemektir.

3.8.2.6 Elde edilmiş olan X-ışın demet kalitelerinin Xcomp5r spektrum programı ile elde edilen spektrumlarla karşılaştırılması

Şekil 3.4 de belirtilen deney düzeneği kurularak elde edilmiş olan X-ışın demet kaliteleri (RQR2, RQR3, RQR4, RQR5, RQR6, RQR7, RQR8, RQA2, RQA3, RQA4, RQA5, RQA6, RQA7, RQA8, N40, N60, N80 ve N100) aynı şartlarda Xcomp5r programı kullanılarak elde edilen spektrumlar ile karşılaştırılmıştır.

3.9 Cs-137 Işınlama Sisteminde Farklı Mesafelerdeki Doz Hızı Ölçümleri



Şekil 3.5 Cs-137 ışınlama sistemi deney düzeneği

Yukarıdaki düzenek kullanılarak 1. kaynak (47 mCi) ve 2. kaynak (8.58 Ci) ile farklı mesafelerde doz hızı ölçümleri yapılmıştır. İlk olarak 2. kaynak ile 50 cm'den başlayarak 5 cm aralıklarla 370 cm'ye kadar referans dedektörler ile doz hızı ölçülmüştür. Bu işlemden sonra 1. kaynak ile aynı ölçüm tekrarlanmıştır. Fakat birinci kaynağın aktivitesi düşük olduğu için doz hızı 2. kaynağa göre oldukça düşük kalmıştır. Referans dedektörlerin doz hızı aralığı birbirlerinden farklı olduğu için ve bazı dedektörler yüksek doz hızlarında kullanılmak için tasarlandığından 1. kaynak ile yapılan ölçümlerde bütün referans dedektörler kullanılmamıştır. Kullanılan dedektörler ile alınan ölçümler de ise 370 cm'ye kadar ölçümler alınamamıştır. Doz hızı ölçümlerinde, kullanılan referans dedektörün build-up cap'i varsa kullanma kılavuzlarındaki bilgi doğrultusunda build-up cap takılı olarak ölçüm alınmıştır.

Kullanılan dedektörün tam olarak ışın demetinde olup olmadığının belirlenmesi bir adet lazer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Lazer tam olarak, kaynağın ışınlama pozisyonuna

geldiği durumda karşısında olacak şekilde yerleştirilmiştir. Işınlama yapılmadan önce de kullanılan dedektörün referans noktası lazerle çakışacak şekilde ayarlanmıştır.

3.9.1 Referans dedektörler ile ölçülen değerlerin teorik olarak hesaplanan değerler ile karşılaştırılması

TM 23361 referans dedektörü kullanılarak 370 cm de yeterli sayıda ölçüm alınmıştır. Elde edilen ölçüm değerlerinin ortalaması kullanılarak teorik olarak farklı mesafelerde doz hızı değerleri elde edilmiştir. Teorik olarak hesaplama işlemi Matlab programı kullanılarak, bu programda “ters kare kanununa” ilişkin bir program yazılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Aynı mesafede teorik değer ile ölçülen değer arasındaki farkın %5’ den az olması gerekir. Yapılan testin amacı, hesaplanan bu farkın limit değerinin altında kalıp kalmadığının kontrol edilmesidir. Eğer bu fark limit değerinin üstündeyse ölçümler tekrarlanmalıdır.

3.9.2 Farklı referans dedektörler ile aynı mesafelerde elde edilmiş olan doz hızı değerlerinin karşılaştırılması

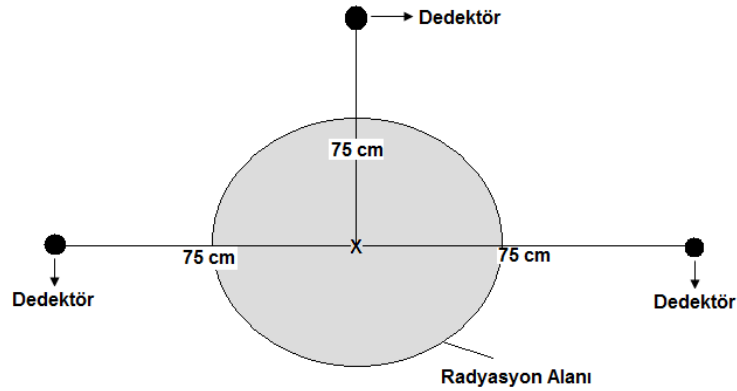
TM23361 ve TM32005 referans dedektörleri kullanılarak farklı mesafelerde arka arkaya ölçümler alınmıştır. Ölçüm sonuçları gerekli düzeltme faktörleri (basınç, sıcaklık, enerji bağımlılığı gibi) ile çarpıldıktan sonra elde edilen değerlerin yüzdece farkları belirlenmiştir.

3.9.3 Azaltıcı levhaların (atenatör) farklı mesafelerdeki azaltma katsayılarının belirlenmesi

Geniş bir doz hızı aralığı elde etmek için kullanılan azaltıcı levhaların her biri yaklaşık olarak doz hızını 10 kat azaltırlar. Yapılan bu test ile farklı mesafelerdeki her 3 azaltıcı levha ile doz hızının ne kadarlık bir azalışa uğradığı hesaplanmıştır.

3.9.4 Doz hızı ölçümlerine saçılan ışınların etkisinin belirlenmesi

Dedektör en çok kullanılan mesafe olan 2 metreye, referans noktası ışın merkezine gelecek şekilde ayarlandıktan sonra bir dizi ölçüm alınmıştır. 2 metredeki radyasyon alanının çapı 75 cm'dir. Merkezde alınan ölçümlerden sonra dedektör merkezden 1 çap mesafesi kadar (75 cm) alanın dışına çıkartılmış (aynı düzlemde kalacak şekilde) ve 3 farklı noktada (yukarı, sağ ve sol) ölçümler alınmıştır.



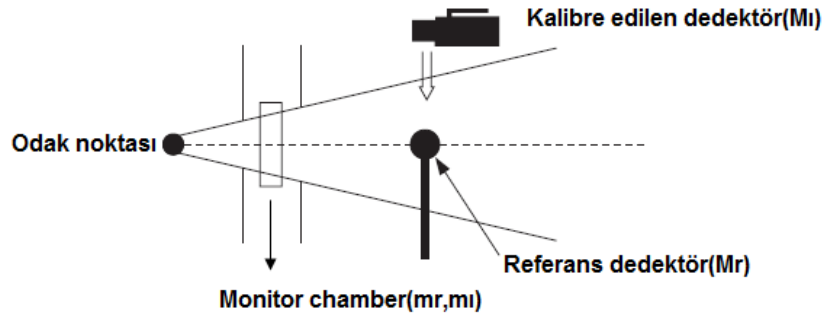
Şekil 3.6 Saçılan ışınların miktarının belirlendiği deney düzeneği

3.9.5 Işınlama alanındaki doz dağılımının belirlenmesi

Kaynaktan 2 metre uzağa iki adet kaset içerisinde radyografik film yerleştirilmiştir. Işınlanan sahadaki radyasyon alanının çapı 75 cm'dir. Filmlerin merkezindeki optik yoğunluk 1 olacak şekilde filmler ışınlanmış ve banyo işleminden sonra Vidar marka film tarayıcıda taratılıp verileri bilgisayara aktarılmıştır. Bu testin yapılmasındaki amaç, merkezdeki doz dağılımının %5'inden daha düşük doz dağılımına sahip olan bölgelerin belirlenmesi ve dedektör kalibrasyonlarında bu bölgelere dedektörün yerleştirilmemesidir.

3.10 X-ışın Sisteminde Foton Dedektörlerinin Kalibrasyon İşlemi

Şekil 3.7 de belirtilen deney düzeneği kurulduktan sonra kalibrasyon işleminin gerçekleştirileceği mesafeye öncelikle referans dedektör yerleştirilmiş ve bir dizi ölçüm alınmıştır. Bu işlem esnasında sabit duran monitor chamber ile de eş zamanlı ölçümler 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 yerleştirilmiştir. Kalibre edilecek olan dedektör ile de ışınlama şartları değiştirilmeden bir dizi ölçüm alınmıştır. Bu esnada da sabit tutulan monitor chamber'dan eş zamanlı olarak ölçümler alınmıştır. Elde edilen bütün veriler, düzeltme faktörleri ve aşağıdaki formül kullanılarak kalibre edilecek olan dedektörün kalibrasyon faktörü hesaplanmıştır.



Şekil 3.7 X-ışın sisteminde foton dedektörlerinin kalibrasyon işlemi için hazırlanan deney düzeneği

$$N_I = N_R \left(\frac{hM_R}{m_R} \right) \left(\frac{m_I}{M_I} \right) \quad (3.4)$$

Formüldeki değişkenler 2. bölümde açıklanmıştır.

3.11 X-ışın Sisteminde Foton Dedektörlerinin Enerji Bağımlılığının Belirlenmesi

X-ışın sisteminde foton dedektörlerinin kalibrasyon işlemi için yapılan işlemler tekrarlanmış ve aşağıdaki formül kullanılarak kalibre edilen dedektörün enerji bağımlılığı belirlenmiştir.

$$R(E) = \frac{1}{N_R} \left(\frac{m_R(E)}{h(E)k_{en}(E)M_R(E)} \right) \left(\frac{M_I(E)}{m_I(E)} \right) \quad (3.5)$$

Formüldeki değişkenler 2. bölümde açıklanmıştır.

3.12 X-ışın Sisteminde Kişisel Dozimetrelerin Kalibrasyon İşlemi

X-ışın sisteminde gerçekleştirilen kalibrasyon işleminde referans dedektör olarak PTW marka T34035 H_p(10) ve TM32005 referans dedektörleri kullanılmıştır. Kalibrasyon işleminde bu dedektörlerle eş zamanlı olarak monitor chamber kullanılmıştır. Öncelikle şekil 2.39 da belirtilen deney düzeneğinin 1. kısmı kurulmuştur. Bu aşamada referans dedektör olarak iki farklı dedektör kullanılmıştır. Referans H_p(10) dedektörü, arkasında bulunan ve fotonların hastadaki geri saçılımını ve soğurulmasını temsil eden, ISO gövde fantomunun yerini tutan bir fantoma sahip olduğu için hem tasarımı hem de fabrikada yapılan kalibrasyonu ile direkt olarak kişisel eşdeğer doz (H_p(10)) niceliğinde okumalar vermektedir. Dolayısıyla hava kermadan kişisel eşdeğer doz niceliğine dönüşümü sağlayan katsayıların kullanılmasına ihtiyaç yoktur. Referans TM32005 dedektörü ise hava kerma niceliğinde okumalar vermektedir ve arkasında herhangi bir fantom olmadan havada ölçümler alınmaktadır. Bu sebeple bu dedektör kullanılarak alınan ölçümlerde hava kermadan kişisel eşdeğer doz niceliğine dönüşümü sağlayan katsayılar kullanılır (Bkz. Çizelge 2.18, 2.19, 2.20). Kullanılan bu katsayılar aynı zamanda hastadaki soğurulmayı ve geri saçılımı da hesaba katarlar.

H_p(10) dedektörü kullanılarak yapılan kalibrasyon işleminde dedektör, kalibrasyonun gerçekleştirileceği mesafeye kaynak ile arasındaki açı 0⁰ olacak şekilde yerleştirildikten sonra arkasına ISO standartlarına uyan ve dedektör ile birlikte kullanılan fantom yerleştirilmiştir. ISO tarafından belirlenmiş olan farklı X-ışın demet kalitelerinde, hem referans dedektörle hem de bununla eş zamanlı olarak monitor chamber ile 100 er saniyelik bir dizi doz ölçümü alınmıştır. Bu işlemden sonra H_p(10) dedektörünün referans noktasının yerine, kişisel dozimetrelerin referans noktaları gelecek şekilde, kişisel dozimetreler ISO fantomu üzerinde bu noktaya yerleştirilmişlerdir. Aynı şekilde

kişisel dozimetreler ve monitor chamber eş zamanlı olarak 100 saniye boyunca farklı X-ışın demet kalitelerinde ışınlanmışlardır.

Bir diğer kalibrasyon şeklide sürekli ışınlamalar yerine sistemin radyografik mod da kullanılmasıdır. Yukarıda bahsedilen yöntem ile birebir aynı olan bu yöntemin farkı, ışınlamaların 100 mA ve 500 mS'lik ışınlamalar şeklinde olmasıdır. Yapılacak olan ışınlamaların sayısı her iki ışınlamada da (referans dedektör ışınlaması ve kişisel dozimetre ışınlaması) eşit olmalıdır. Işınlamaların sayısı dedektörlere yaklaşık 100 µSv'lik doz (Strachotinsky 1999) verilecek şeklide olmalıdır.

Elde edilen veriler aşağıda belirtilen formülde kullanılarak kişisel dozimetreler için kalibrasyon faktörü elde edilmiştir.

$$N_I = N_R \left(\frac{h_{pK}(10, E, \alpha) M_R}{m_R} \right) \left(\frac{m_I}{M_I} \right) \quad (3.6)$$

Formüldeki değişkenler 2. bölümde açıklanmıştır. Hp(10) dedektörü kullanıldığı durumlarda $h_{pK}(10, E, \alpha)$ dönüşüm katsayısı, dedektörün eşdeğer doz niceliğinde okuma yapmasından dolayı 1 kabul edilir. TM32005 referans dedektörünün kullanıldığı durumlardaki ışınlamada ise herhangi bir fantom kullanılmadığından ve dedektörün hava kerma niceliğinde okuma yapmasından dolayı $h_{pK}(10, E, \alpha)$ dönüşüm faktörü çizelge 2.18, 2.19 ve 2.20 de belirtilen katsayılardan, kullanılan X-ışın demet kalitesine göre seçilir.



Şekil 3.8 X-ışın sistemi ve referans Hp(10) dedektörü

Kişisel dozimetrelerin kalibrasyonunda dozimetrelerin enerjiye ve radyasyonun geliş açısına bağımlılıkları da incelenebilir. Yukarıda anlatılan yöntemden farklı olarak eğer referans dedektör olarak $H_p(10)$ referans dedektörü kullanılırsa bu dedektör istenilen açıda ve enerjide ışınlanmalıdır. Aynı şekilde kalibre edilecek olan kişisel dozimetrelerde aynı açıda ve enerjide ışınlanmalıdır. Fakat referans dedektör olarak TM32005 gibi bir dedektör kullanıldığında yani dedektörün okuduğu niceliğin hava kerma olduğu durumlarda ise referans dedektör radyasyon alanına yukarıda anlatıldığı gibi 0° ile yerleştirilip ölçümler alınmalı ve farklı açıdaki eşdeğer doz niceliğine geçişi sağlayan katsayılar ile geçiş yapılmalıdır (Bkz. Çizelge 2.18, 2.19, 2.20).

3.13 Cs-137 Işınlama Sisteminde Foton Dedektörlerinin Kalibrasyon İşlemi

Şekil 3.5 de belirtilen deney düzeneği kurulduktan sonra kalibre edilecek olan dedektör kalibrasyon işleminin gerçekleştirileceği mesafeye yerleştirilmiştir. Bu mesafede bir dizi ölçüm alınmıştır. Bu işlemden sonra referans dedektör ile herhangi bir ölçüm alınmamıştır çünkü daha önceden belirli bir tarihte tüm mesafeler için bir doz hızı ölçümü yapılmıştır. Kalibrasyonun yapılacağı mesafedeki bu değer için aşağıdaki denklemde belirtilen radyoaktif kaynak azalımı düzeltmesi yapıldıktan sonra bu değer referans doz hızı değeri olarak kullanılmıştır.

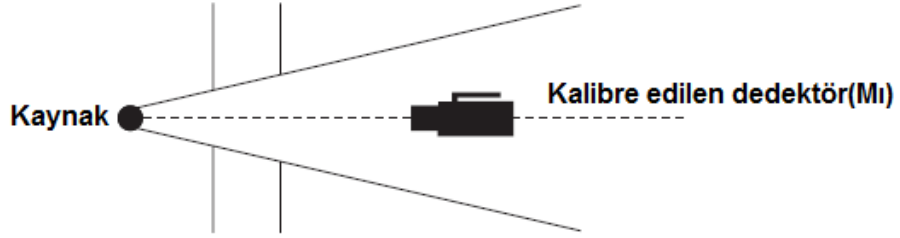
$$H(t) = H(0) \exp(-0.693t / t_{1/2}) \quad (3.7)$$

Formüldeki değişkenler 2. bölümde açıklanmıştır.

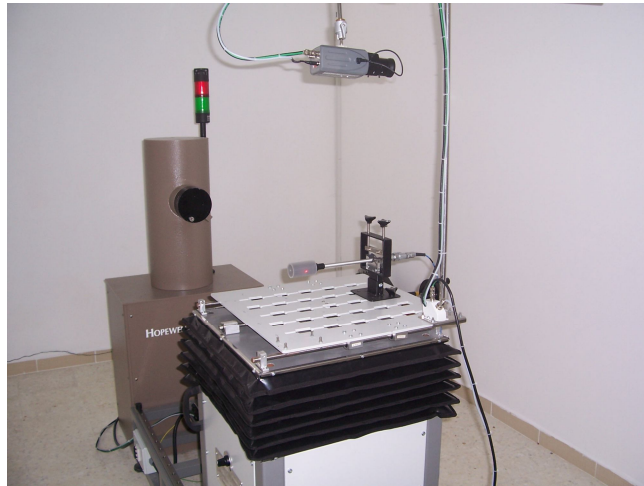
Kalibre edilecek olan dedektörün kalibrasyon faktörü aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$N_I = \frac{H}{M_I} \quad (3.8)$$

Formüldeki değişkenler 2. bölümde açıklanmıştır.



Şekil 3.9 Cs-137 ışınlama sisteminde foton dedektörlerinin kalibrasyon işlemi için hazırlanan deney düzeneği



Şekil 3.10 Cs-137 ışınlama sisteminde foton dedektörünün kalibrasyon işlemi

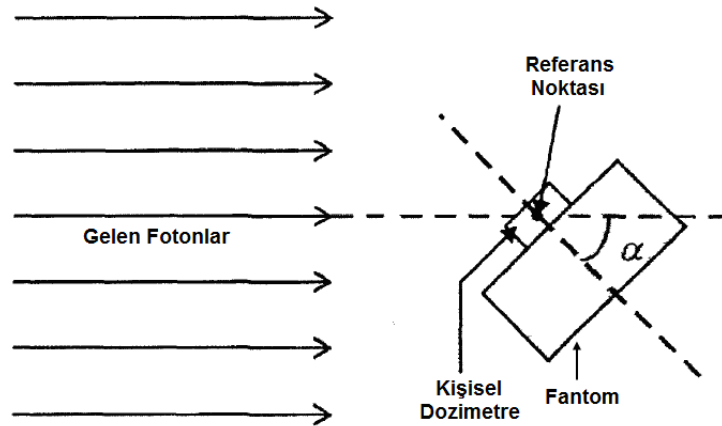
3.14 Cs-137 Işınlama Sisteminde Kişisel Dozimetrelerin Kalibrasyon İşlemi

Cs-137 ışınlama sistemi ile yapılan kişisel dozimetre kalibrasyonu işleminde, belli bir tarihte TM23361 referans dedektörü ile elde edilmiş olan hava kerma hızı değerleri, azalım düzeltmesi ve hava kermadan eşdeğer doza dönüşüm katsayıları kullanılarak (çizelge 2.20) eşdeğer doz hızı ($H_p(10)$) niceliklerine dönüştürülmüştür. Kalibre edilecek olan kişisel dozimetrelerin referans noktaları istenilen mesafeye denk gelecek şekilde ISO tarafından belirlenmiş olan fantomların üzerine yerleştirilmiştir. Kişisel dozimetreler elde edilmesi istenilen doz miktarına erişilinceye kadar belli bir süre ışınlanmışlardır. Elde edilen veriler kullanılarak kişisel dozimetrelerin kalibrasyon faktörleri aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$N_I = \frac{H_p(10; E, \alpha)}{M_I} \quad (3.9)$$

Formüldeki değişkenler 2. bölümde açıklanmıştır.

Kişisel dozimetrelerin gelen fotonun açısına olan bağımlılıklarının belirlenmesinde ise TM23361 referans dedektör ile ölçülmüş olan hava kerma hızı değerleri çizelge 2.20 de belirtilmiş olan farklı açılar için hava kerma hızından eşdeğer doz niceliğine dönüşümü sağlayan katsayılar ile çarpılırlar. Kişisel dozimetreler de buldukları fantomla birlikte istenilen açıda çevrilirler ve istenilen süre boyunca ışınlanırlar. Yukarıdaki formül kullanılarak dozimetrelerin gelen fotonun açısına bağımlılıkları belirlenir.



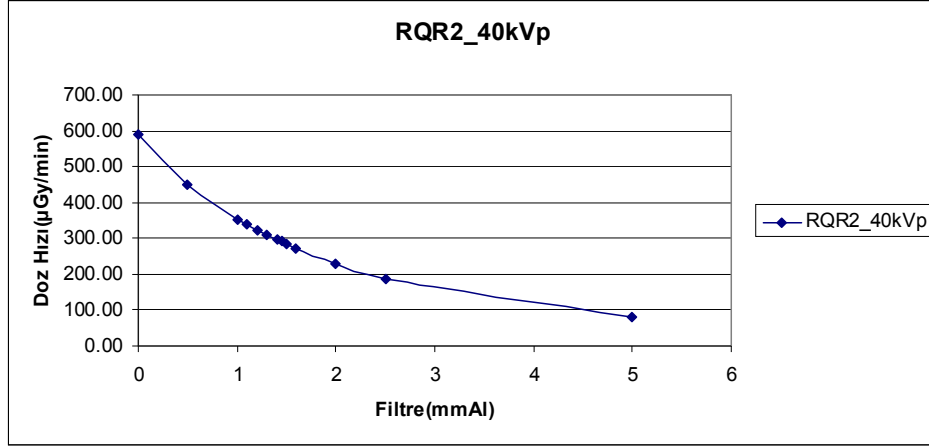
Şekil 3.11 Kişisel dozimetrelerin farklı açılarda ışınlanması

4. BULGULAR

4.1 IEC 61267 Protokolünde Belirlenmiş Olan X-ışın Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi

4.1.1 RQR X-ışın demet kalitesinin elde edilmesi

Farklı kalınlıklarda filtreler kullanılarak kurulan deney düzeneğinde, ‘Filtre Kalınlığı – Doz Hızı’ grafikleri çizilerek buradaki sonuçlardan 1. ve 2. yarı kalınlık(HVL) değerleri hesaplanmıştır.

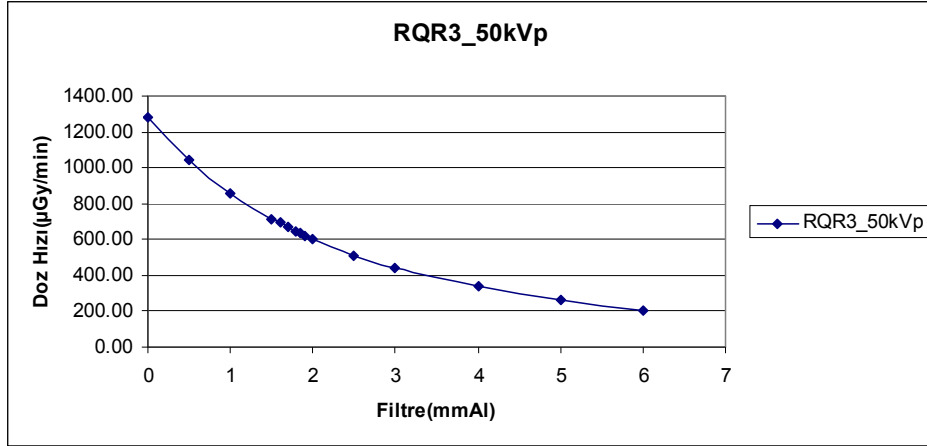


Şekil 4.1 RQR2 demet kalitesi için elde edilen ‘Filtre-Doz Hızı’ grafiği

Çizelge 4.1 RQR2 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

<i>Toplam Tüp Filtrasyonu (mm Al)</i>	<i>Nominal 1. HVL (mm Al)</i>	<i>Elde Edilen 1. HVL (mm Al)</i>	<i>1.HVL Farkı (mm Al)</i>	<i>Elde Edilen 2. HVL (mm Al)</i>	<i>Nominal Homojenlik Katsayısı</i>	<i>Elde Edilen Homojenlik Katsayısı</i>	<i>Homojenlik Katsayısı Farkı</i>
Inh.+1,5	1,42	1,41	- 0.01	1.81	0.81	0.78	- 0.03

X-ışın sisteminin doğal (inherent) filtrasyonuna 1.5 mm Al filtre ilave edildiğinde IEC 61267 protokolünde belirtilen RQR2 demet kalitesi elde edilmiştir.

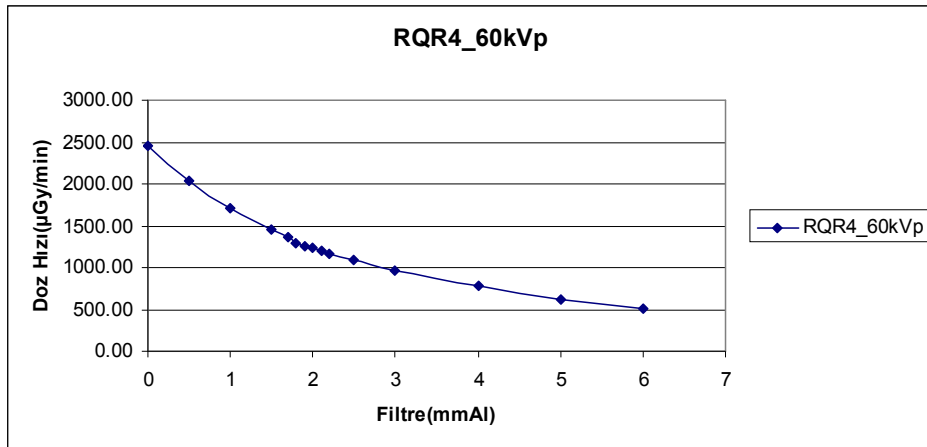


Şekil 4.2 RQR3 demet kalitesi için elde edilen ‘Filtre-Doz Hızı’ grafiği

Çizelge 4.2 RQR3 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

<i>Toplam Tüp Filtrasyonu (mm Al)</i>	<i>Nominal 1. HVL (mm Al)</i>	<i>Elde Edilen 1. HVL (mm Al)</i>	<i>1.HVL Farkı (mm Al)</i>	<i>Elde Edilen 2. HVL (mm Al)</i>	<i>Nominal Homojenlik Katsayısı</i>	<i>Elde Edilen Homojenlik Katsayısı</i>	<i>Homojenlik Katsayısı Farkı</i>
Inh.+1,5	1,78	1,81	+0,03	2,52	0,76	0,75	- 0,01

X-ışın sisteminin doğal (inherent) filtrasyonuna 1.5 mm Al filtre ilave edildiğinde IEC 61267 protokolünde belirtilen RQR3 demet kalitesi elde edilmiştir.

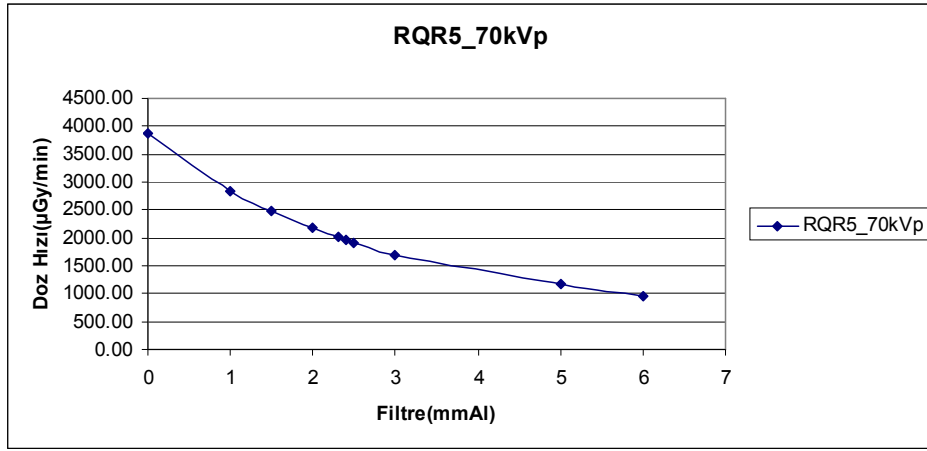


Şekil 4.3 RQR4 demet kalitesi için elde edilen ‘Filtre-Doz Hızı’ grafiği

Çizelge 4.3 RQR4 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

<i>Toplam Tüp Filtrasyonu (mmAl)</i>	<i>Nominal 1. HVL (mmAl)</i>	<i>Elde Edilen 1. HVL (mmAl)</i>	<i>1.HVL Farkı (mmAl)</i>	<i>Elde Edilen 2. HVL (mmAl)</i>	<i>Nominal Homojenlik Katsayısı</i>	<i>Elde Edilen Homojenlik Katsayısı</i>	<i>Homojenlik Katsayısı Farkı</i>
Inh.+1,6	2.19	2.21	+0.02	3.06	0.74	0.72	- 0.02

X-ışın sisteminin doğal(inherent) filtrasyonuna 1.6 mm Al filtre ilave edildiğinde IEC 61267 protokolünde belirtilen RQR4 demet kalitesi elde edilmiştir.

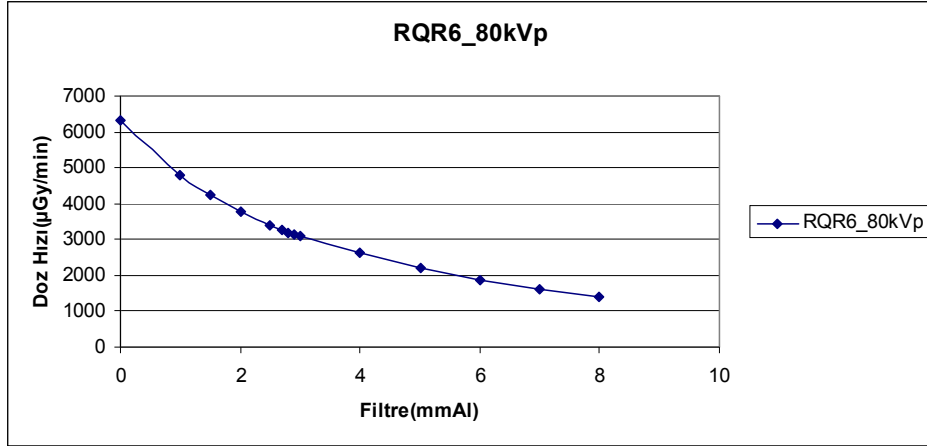


Şekil 4.4 RQR5 demet kalitesi için elde edilen 'Filtre-Doz Hızı' grafiği

Çizelge 4.4 RQR5 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

<i>Toplam Tüp Filtrasyonu (mmAl)</i>	<i>Nominal 1. HVL (mmAl)</i>	<i>Elde Edilen 1. HVL (mmAl)</i>	<i>1.HVL Farkı (mmAl)</i>	<i>Elde Edilen 2. HVL (mmAl)</i>	<i>Nominal Homojenlik Katsayısı</i>	<i>Elde Edilen Homojenlik Katsayısı</i>	<i>Homojenlik Katsayısı Farkı</i>
Inh.+1,7	2.58	2.61	+0.03	3.78	0.71	0.69	- 0.02

X-ışın sisteminin doğal(inherent) filtrasyonuna 1.7 mm Al filtre ilave edildiğinde IEC 61267 protokolünde belirtilen RQR5 demet kalitesi elde edilmiştir.

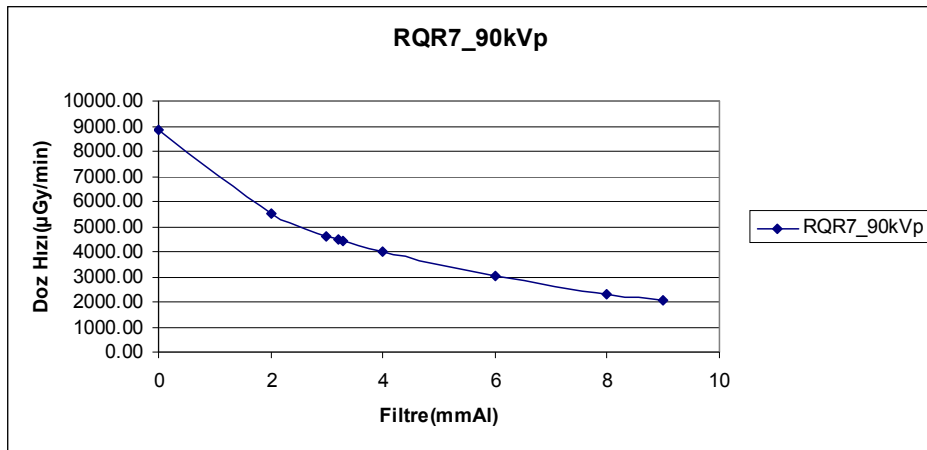


Şekil 4.5 RQR6 demet kalitesi için elde edilen 'Filtre-Doz Hızı' grafiği

Çizelge 4.5 RQR6 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

<i>Toplam Tüp Filtrasyonu (mmAl)</i>	<i>Nominal 1. HVL (mmAl)</i>	<i>Elde Edilen 1. HVL (mmAl)</i>	<i>1.HVL Farkı (mmAl)</i>	<i>Elde Edilen 2. HVL (mmAl)</i>	<i>Nominal Homojenlik Katsayısı</i>	<i>Elde Edilen Homojenlik Katsayısı</i>	<i>Homojenlik Katsayısı Farkı</i>
Inh.+1,7	3.01	2.97	-0.04	4.29	0.69	0.69	0

X-ışın sisteminin doğal (inherent) filtrasyonuna 1.7 mm Al filtre ilave edildiğinde IEC 61267 protokolünde belirtilen RQR6 demet kalitesi elde edilmiştir.

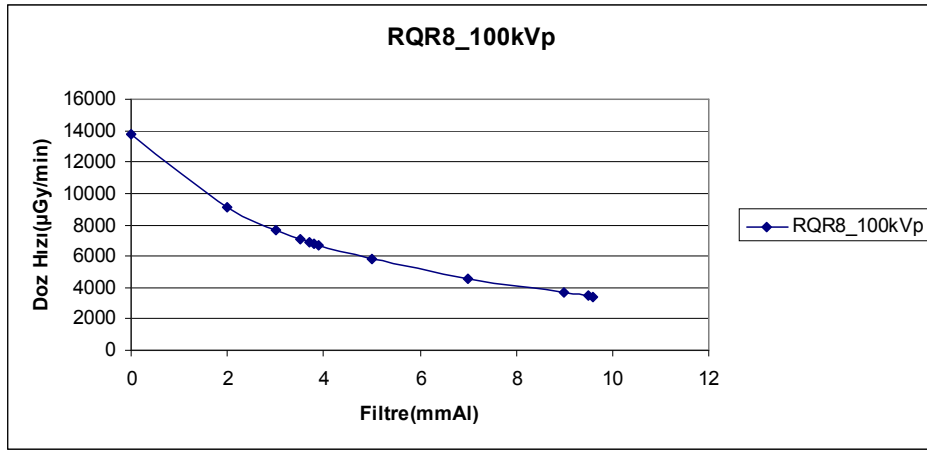


Şekil 4.6 RQR7 demet kalitesi için elde edilen 'Filtre-Doz Hızı' grafiği

Çizelge 4.6 RQR7 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

<i>Toplam Tüp Filtrasyonu (mmAl)</i>	<i>Nominal 1. HVL (mmAl)</i>	<i>Elde Edilen 1. HVL (mmAl)</i>	<i>1.HVL Farkı (mmAl)</i>	<i>Elde Edilen 2. HVL (mmAl)</i>	<i>Nominal Homojenlik Katsayısı</i>	<i>Elde Edilen Homojenlik Katsayısı</i>	<i>Homojenlik Katsayısı Farkı</i>
Inh.+1,9	3.48	3.50	+0.02	5.0	0.68	0.70	+0.02

X-ışın sisteminin doğal(inherent) filtrasyonuna 1.9 mm Al filtre ilave edildiğinde IEC 61267 protokolünde belirtilen RQR7 demet kalitesi elde edilmiştir.



Şekil 4.7 RQR8 demet kalitesi için elde edilen 'Filtre-Doz Hızı' grafiği

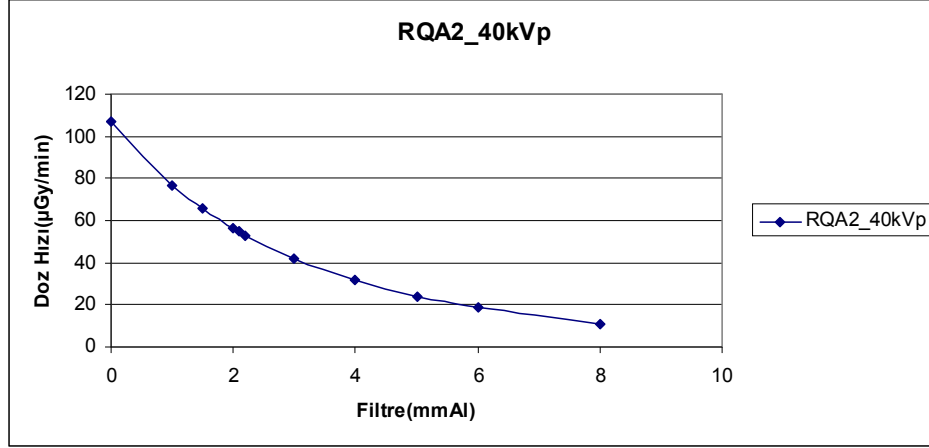
Çizelge 4.7 RQR8 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

<i>Toplam Tüp Filtrasyonu (mmAl)</i>	<i>Nominal 1. HVL (mmAl)</i>	<i>Elde Edilen 1. HVL (mmAl)</i>	<i>1.HVL Farkı (mmAl)</i>	<i>Elde Edilen 2. HVL (mmAl)</i>	<i>Nominal Homojenlik Katsayısı</i>	<i>Elde Edilen Homojenlik Katsayısı</i>	<i>Homojenlik Katsayısı Farkı</i>
Inh.+2.0	3.97	3.96	-0.01	5.82	0.68	0.68	0

X-ışın sisteminin doğal(inherent) filtrasyonuna 2.0 mm Al filtre ilave edildiğinde IEC 61267 protokolünde belirtilen RQR8 demet kalitesi elde edilmiştir.

4.1.2 RQA X-ışın demet kalitesinin elde edilmesi

Farklı kalınlıklarda filtreler kullanılarak kurulan deney düzeneğinde, ‘Filtre Kalınlığı – Doz Hızı’ grafikleri çizilerek buradaki sonuçlardan 1. yarı kalınlık (1.HVL) değerleri hesaplanmıştır.

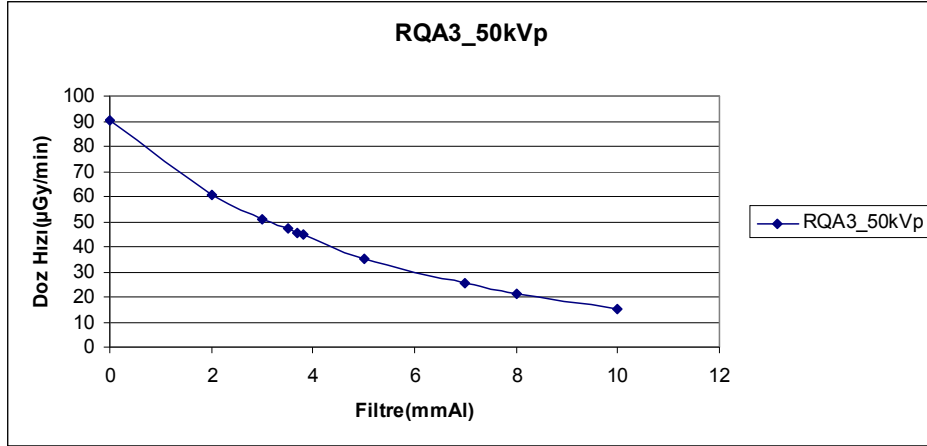


Şekil 4.8 RQA2 demet kalitesi için elde edilen ‘Filtre-Doz Hızı’ grafiği

Çizelge 4.8 RQA2 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

<i>Demet Kalitesi</i>	<i>X-Işın Tüpü Gerilimi (kV)</i>	<i>Toplam Tüp Filtrasyonu (mm Al)</i>	<i>Ek Filtre (mm Al)</i>	<i>Nominal 1.HVL (mm Al)</i>	<i>Elde Edilen 1.HVL (mm Al)</i>	<i>1.HVL Farkı (mm Al)</i>
<i>RQA2</i>	<i>40</i>	<i>Inh.+1,5</i>	<i>4</i>	<i>2,20</i>	<i>2.23</i>	<i>+ 0.03</i>

X-ışın sisteminin doğal (inherent) filtrasyonuna 1.5 mm Al filtre ve hasta kalınlığını temsil eden 4 mm Al ek filtre ilave edildiğinde IEC 61267 protokolünde belirtilen RQA2 demet kalitesi elde edilmiştir.

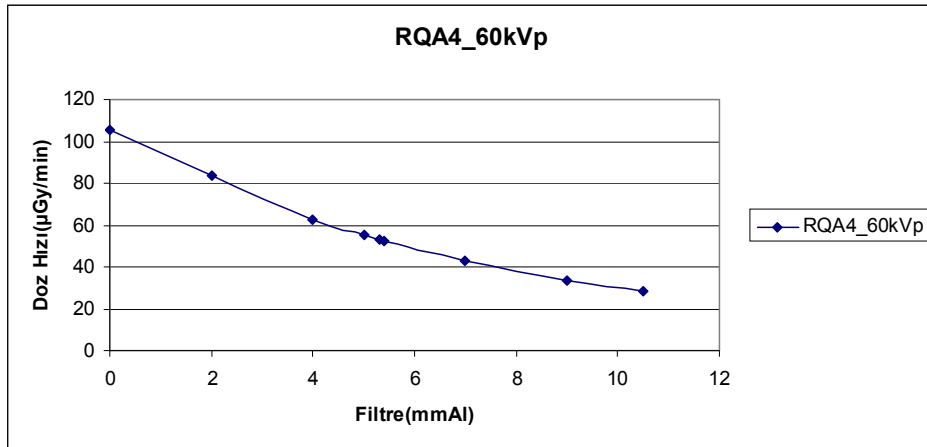


Şekil 4.9 RQA3 demet kalitesi için elde edilen 'Filtre-Doz Hızı' grafiği

Çizelge 4.9 RQA3 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

<i>Demet Kalitesi</i>	<i>X-Işın Tüpü Gerilimi (kV)</i>	<i>Toplam Tüp Filtrasyonu (mm Al)</i>	<i>Ek Filtre (mm Al)</i>	<i>Nominal 1.HVL (mm Al)</i>	<i>Elde Edilen 1.HVL (mm Al)</i>	<i>1.HVL Farkı (mm Al)</i>
<i>RQA3</i>	<i>50</i>	<i>Inh.+1,5</i>	<i>10</i>	<i>3.80</i>	<i>3.84</i>	<i>+ 0.04</i>

X-ışın sisteminin doğal (inherent) filtrasyonuna 1.5 mm Al filtre ve hasta kalınlığını temsil eden 10 mm Al ek filtre ilave edildiğinde IEC 61267 protokolünde belirtilen RQA3 demet kalitesi elde edilmiştir.

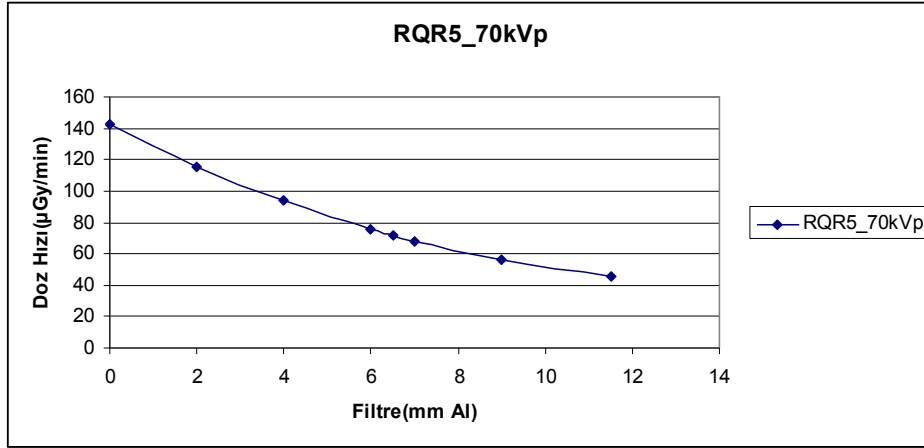


Şekil 4.10 RQA4 demet kalitesi için elde edilen 'Filtre-Doz Hızı' grafiği

Çizelge 4.10 RQA4 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

<i>Demet Kalitesi</i>	<i>X-Işın Tüpü Gerilimi (kV)</i>	<i>Toplam Tüp Filtrasyonu (mm Al)</i>	<i>Ek Filtre (mm Al)</i>	<i>Nominal 1.HVL (mm Al)</i>	<i>Elde Edilen 1.HVL (mm Al)</i>	<i>1.HVL Farkı (mm Al)</i>
RQA4	60	Inh.+1,6	16	5,40	5.33	- 0.07

X-ışın sisteminin doğal(inherent) filtrasyonuna 1.6 mm Al filtre ve hasta kalınlığını temsil eden 16 mm Al ek filtre ilave edildiğinde IEC 61267 protokolünde belirtilen RQA4 demet kalitesi elde edilmiştir.

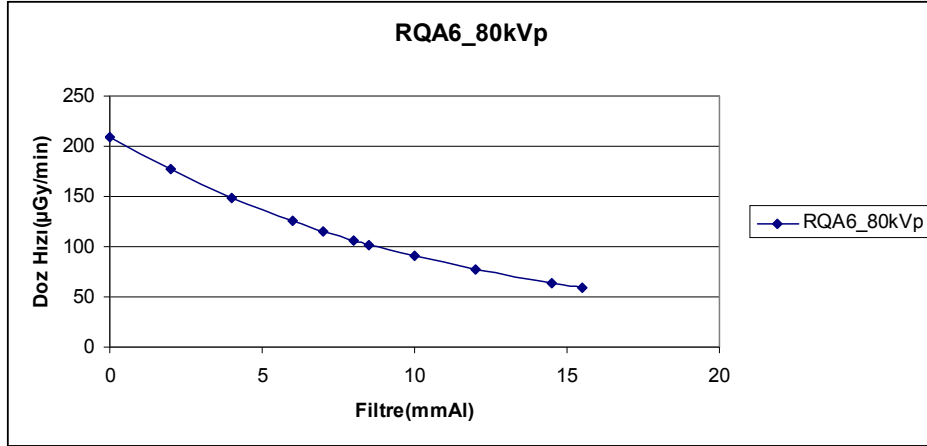


Şekil 4.11 RQA5 demet kalitesi için elde edilen 'Filtre-Doz Hızı' grafiği

Çizelge 4.11 RQA5 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

<i>Demet Kalitesi</i>	<i>X-Işın Tüpü Gerilimi (kV)</i>	<i>Toplam Tüp Filtrasyonu (mm Al)</i>	<i>Ek Filtre (mm Al)</i>	<i>Nominal 1.HVL (mm Al)</i>	<i>Elde Edilen 1.HVL (mm Al)</i>	<i>1.HVL Farkı (mm Al)</i>
RQA5	70	Inh.+1,7	21	6,80	6.78	- 0.02

X-ışın sisteminin doğal(inherent) filtrasyonuna 1.7 mm Al filtre ve hasta kalınlığını temsil eden 21 mm Al ek filtre ilave edildiğinde IEC 61267 protokolünde belirtilen RQA5 demet kalitesi elde edilmiştir.

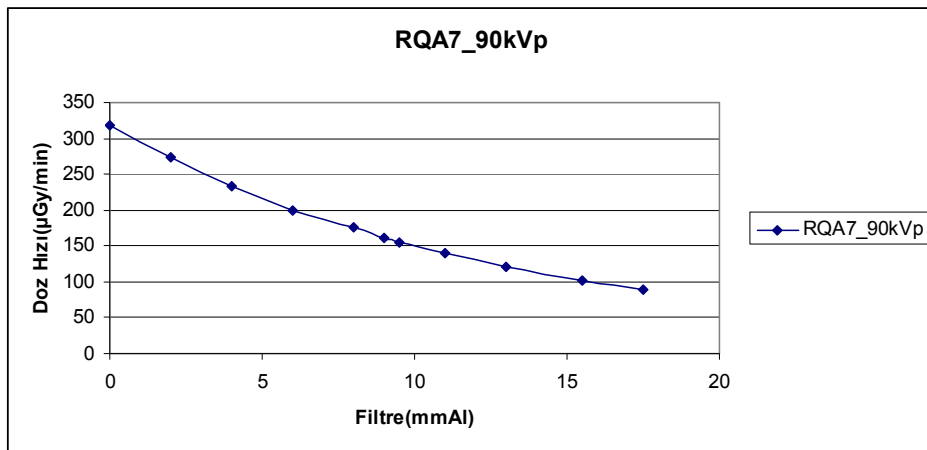


Şekil 4.12 RQA6 demet kalitesi için elde edilen 'Filtre-Doz Hızı' grafiği

Çizelge 4.12 RQA6 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

<i>Demet Kalitesi</i>	<i>X-Işın Tüpü Gerilimi (kV)</i>	<i>Toplam Tüp Filtrasyonu (mm Al)</i>	<i>Ek Filtre (mm Al)</i>	<i>Nominal 1.HVL (mm Al)</i>	<i>Elde Edilen HVL (mm Al)</i>	<i>1.HVL Farkı (mm Al)</i>
RQA6	80	Inh.+1,7	26	8,20	8.15	- 0.05

X-ışın sisteminin doğal (inherent) filtrasyonuna 1.7 mm Al filtre ve hasta kalınlığını temsil eden 26 mm Al ek filtre ilave edildiğinde IEC 61267 protokolünde belirtilen RQA6 demet kalitesi elde edilmiştir.

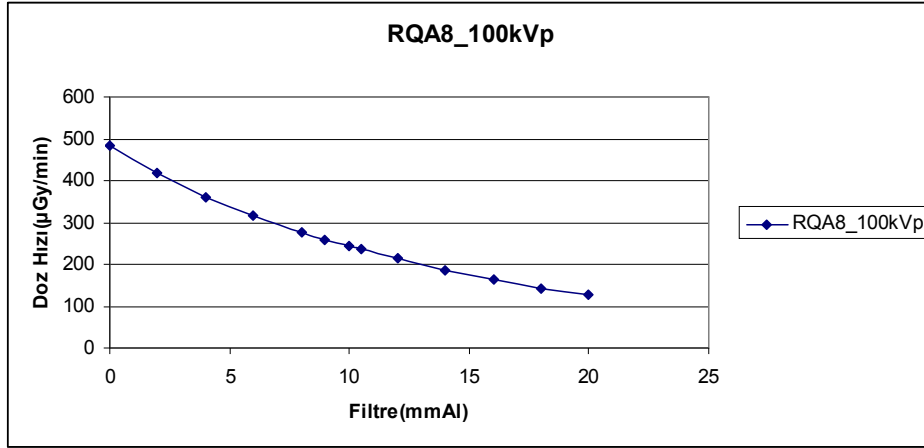


Şekil 4.13 RQA7 demet kalitesi için elde edilen 'Filtre-Doz Hızı' grafiği

Çizelge 4.13 RQA7 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

Demet Kalitesi	X-Işın Tüpü Gerilimi (kV)	Toplam Tüp Filtrasyonu (mm Al)	Ek Filtre (mm Al)	Nominal 1.HVL (mm Al)	Elde Edilen 1.HVL (mm Al)	1.HVL Farkı (mm Al)
RQA7	90	Inh.+1,9	30	9,20	9.17	- 0.03

X-ışın sisteminin doğal(inherent) filtrasyonuna 1.9 mm Al filtre ve hasta kalınlığını temsil eden 30 mm Al ek filtre ilave edildiğinde IEC 61267 protokolünde belirtilen RQA7 demet kalitesi elde edilmiştir.



Şekil 4.14 RQA8 demet kalitesi için elde edilen 'Filtre-Doz Hızı' grafiği

Çizelge 4.14 RQA8 demet kalitesi için elde edilen sonuçlar

Demet Kalitesi	X-Işın Tüpü Gerilimi (kV)	Toplam Tüp Filtrasyonu (mm Al)	Ek Filtre (mm Al)	Nominal 1.HVL (mm Al)	Elde Edilen 1.HVL (mm Al)	1.HVL Farkı (mm Al)
RQA8	100	Inh.+2,0	34	10,10	10.30	+ 0.2

X-ışın sisteminin doğal(inherent) filtrasyonuna 2.0 mm Al filtre ve hasta kalınlığını temsil eden 34 mm Al ek filtre ilave edildiğinde IEC 61267 protokolünde belirtilen RQA8 demet kalitesi elde edilmiştir.

Çizelge 4.15 Elde edilmiş olan RQR X-ışın demet kalitesi için sonuçlar

<i>Demet Kalitesi</i>	<i>X-Işın Tüpü Gerilimi (kV)</i>	<i>Toplam Tüp Filtrasyonu (mmAl)</i>	<i>Nominal HVL (mmAl)</i>	<i>Elde Edilen HVL (mmAl)</i>	<i>HVL Farkı (mmAl)</i>	<i>Nominal Homojenlik Katsayısı</i>	<i>Elde Edilen Homojenlik Katsayısı</i>	<i>Homojenlik Katsayısı Farkı</i>
<i>RQR2</i>	<i>40</i>	<i>Inh.+1,5</i>	<i>1,42</i>	<i>1,41</i>	<i>- 0.01</i>	<i>0.81</i>	<i>0.78</i>	<i>- 0.03</i>
<i>RQR3</i>	<i>50</i>	<i>Inh.+1,5</i>	<i>1,78</i>	<i>1,81</i>	<i>+ 0.03</i>	<i>0.76</i>	<i>0.75</i>	<i>- 0.01</i>
<i>RQR4</i>	<i>60</i>	<i>Inh.+1,6</i>	<i>2,19</i>	<i>2,21</i>	<i>+ 0.02</i>	<i>0.74</i>	<i>0.72</i>	<i>- 0.02</i>
<i>RQR5</i>	<i>70</i>	<i>Inh.+1,7</i>	<i>2,58</i>	<i>2,61</i>	<i>+ 0.03</i>	<i>0.71</i>	<i>0.69</i>	<i>- 0.02</i>
<i>RQR6</i>	<i>80</i>	<i>Inh.+1,7</i>	<i>3,01</i>	<i>2,97</i>	<i>- 0.04</i>	<i>0.69</i>	<i>0.69</i>	<i>0</i>
<i>RQR7</i>	<i>90</i>	<i>Inh.+1,9</i>	<i>3,48</i>	<i>3,50</i>	<i>+ 0.02</i>	<i>0.68</i>	<i>0.70</i>	<i>+ 0.02</i>
<i>RQR8</i>	<i>100</i>	<i>Inh.+2,0</i>	<i>3,97</i>	<i>3,96</i>	<i>- 0.01</i>	<i>0.68</i>	<i>0.68</i>	<i>0</i>

Elde edilen tüm RQR X-ışın demet kaliteleri.

1. yarı kalınlık değeri için limitler: ± 0.10 mm

Homojenlik katsayısı için limitler: ± 0.03

Çizelge 4.16 Elde edilmiş olan RQA X-ışın demet kalitesi için sonuçlar

<i>Demet Kalitesi</i>	<i>X-Işın Tüpü Gerilimi (kV)</i>	<i>Toplam Tüp Filtrasyonu (mm Al)</i>	<i>Ek Filtre (mm Al)</i>	<i>Nominal HVL (mm Al)</i>	<i>Elde Edilen HVL (mm Al)</i>	<i>HVL Farkı (mm Al)</i>
<i>RQA2</i>	<i>40</i>	<i>Inh.+1,5</i>	<i>4</i>	<i>2,20</i>	<i>2.23</i>	<i>+ 0.03</i>
<i>RQA3</i>	<i>50</i>	<i>Inh.+1,5</i>	<i>10</i>	<i>3,80</i>	<i>3.84</i>	<i>+ 0.04</i>
<i>RQA4</i>	<i>60</i>	<i>Inh.+1,6</i>	<i>16</i>	<i>5,40</i>	<i>5.33</i>	<i>- 0.07</i>
<i>RQA5</i>	<i>70</i>	<i>Inh.+1,7</i>	<i>21</i>	<i>6,80</i>	<i>6.78</i>	<i>- 0.02</i>
<i>RQA6</i>	<i>80</i>	<i>Inh.+1,7</i>	<i>26</i>	<i>8,20</i>	<i>8.15</i>	<i>- 0.05</i>
<i>RQA7</i>	<i>90</i>	<i>Inh.+1,9</i>	<i>30</i>	<i>9,20</i>	<i>9.17</i>	<i>- 0.03</i>
<i>RQA8</i>	<i>100</i>	<i>Inh.+2,0</i>	<i>34</i>	<i>10,10</i>	<i>10.30</i>	<i>+ 0.2</i>

Elde edilen tüm RQA X-ışın demet kaliteleri.

1. yarı kalınlık değeri için limitler: ± 0.10 mm

4.1.3 kv ölçümü

RQR ve RQA X-ışın kaliteleri elde edilirken eş zamanlı olarak voltaj bölücüsü ile yüksek gerilim değerleri ölçülmüştür. Çizelge 4.17 de belirtilen değerler her X-ışın demet kalitesi için ayrı ayrı ve ortalama değer olarak verilmiştir.

Çizelge 4.17 Voltaj bölücüsü ile RQR ve RQA X-ışın demet kalitelerinin hesaplanması esnasında elde edilen yüksek gerilim ortalama değerleri

Kurulan Gerilim (kV)	Voltaj Bölücüsü (kV)			
	RQR	% Fark	RQA	% Fark
40	39.43	1.43	39.5	1.25
50	49.39	1.22	49.27	1.46
60	59.18	1.37	59.27	1.22
70	69.15	1.21	69.18	1.17
80	78.98	1.28	79.03	1.21
90	88.95	1.17	89.07	1.03
100	98.72	1.28	98.88	1.12

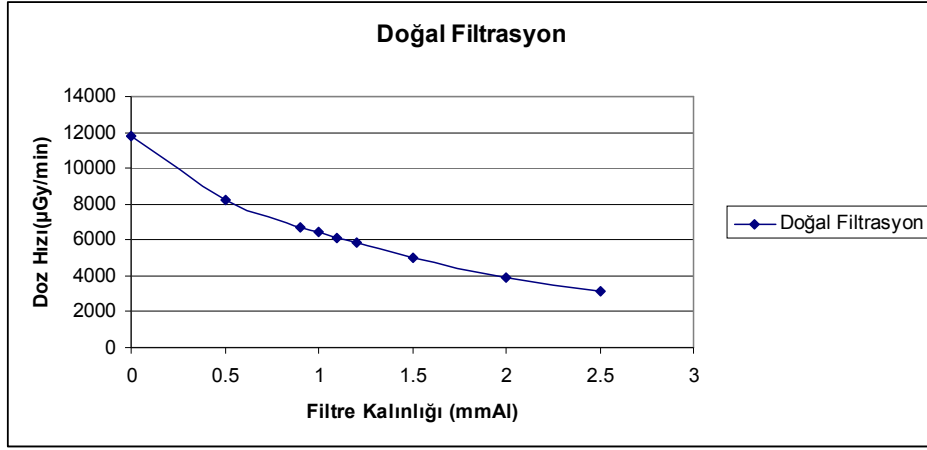
Kabul sınırları: $\pm\%1.5$

4.2 ISO 4037–1 Protokolünde Belirlenmiş Olan X-ışın Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi

4.2.1 Doğal filtrasyonun belirlenmesi

X-ışın tüpüne uygulanan gerilim 60 kV yapıldıktan sonra ‘Filtre Kalınlığı – Doz Hızı’ 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, 1.2 mm Al olarak hesaplanmıştır.

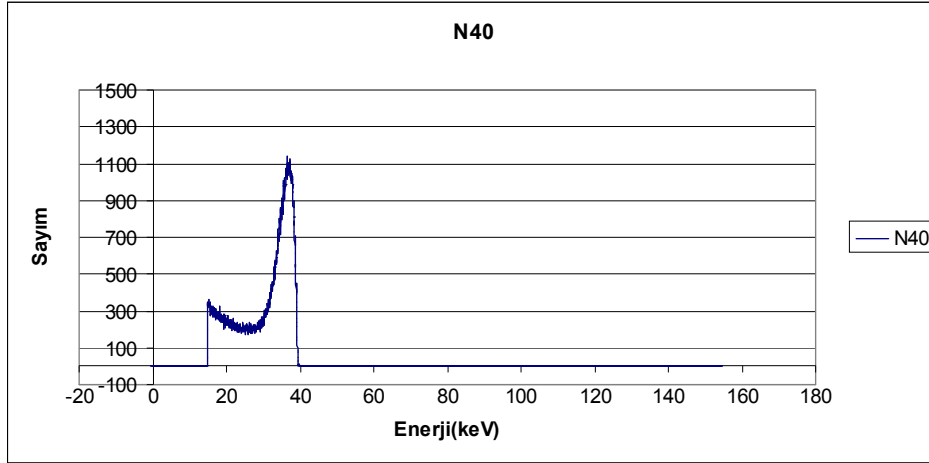


Şekil 4.15 60 kV'de 'Filtre kalınlığı- Doz Hızı' grafiği

4.2.2 ISO 4037-1 de tanımlanan bazı X-ışın demet kalitelerindeki X-ışın spektrumlarının toplanması

Şekil 3.4 deki deney düzeneği kurulup ISO 4037-1 de belirtilen X-ışın demet kalitelerinden N40, N60, N80 ve N100 spektrumları elde edilmiştir. IEC 61267 protokolünde belirlenmiş olan RQR2, RQR3, RQR4, RQR5, RQR6, RQR7, RQR8, RQA2, RQA3, RQA4, RQA5, RQA6, RQA7 ve RQA8 X-ışın demet kalitelerinin spektrumları elde edilmiştir. Dar spektrum serilerinin (N40, N60, N80, N100) ortalama enerjileri (\bar{E}), ayırma güçleri (R_E), 1. yarı kalınlık değerleri (1.HVL) ve 2. yarı kalınlık değerleri (2.HVL) elde edilmiştir. Fakat bazı spektrumlarda 2. yarı kalınlık değerleri, doz hızının referans dedektörün limitlerinden daha düşük değerlere düşmesinden elde edilememiştir. IEC 61267 protokolünde belirlenen X-ışın demet kalitelerinin ise ortalama enerjileri hesaplanmıştır. Bu demet kalitelerinin, protokolde belirtilen spektrumları ya da ortalama enerjileri olmadığından elde edilmiş olan veriler Xcomp5r programı ile elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

N40 spektrumunu elde edebilmek için 4 mm Al ve 0.21 mm Cu bakır filtrenin kullanılması gerekmiştir. X-ışın sisteminin doğal filtrasyonu 1.2 mm Al olduğundan 2.8 mm Al ve 0.21 mm Cu filtre X-ışın tüpünün önüne yerleştirilmiştir.

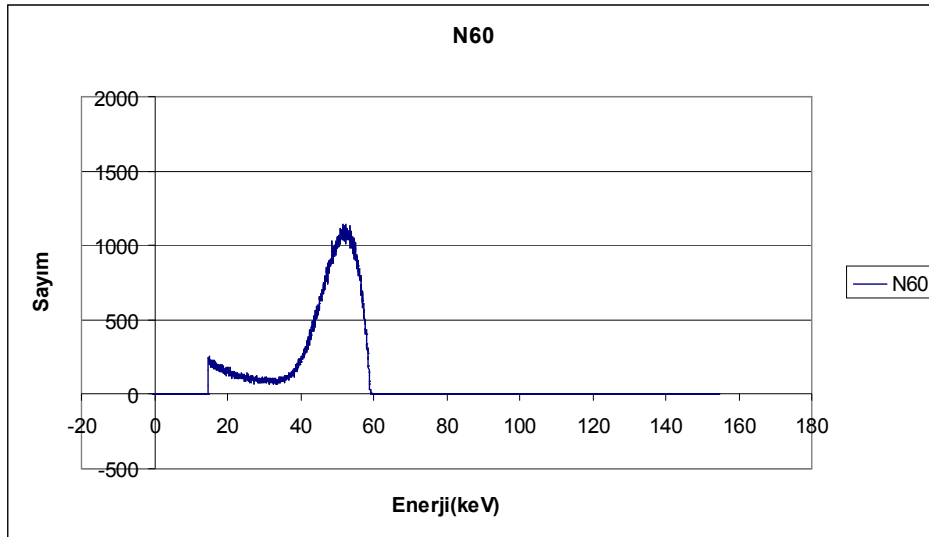


Şekil 4.16 N40 spektrumu

Ortalama Enerji(\bar{E}): 31.95 keV

Ayırma gücü(R_E): %19.12

N60 spektrumunu elde edebilmek için 4 mm Al ve 0.60 mm Cu bakır filtrenin kullanılması gerekmiştir. X-ışın sisteminin doğal filtrasyonu 1.2 mm Al olduğundan 2.8 mm Al ve 0.60 mm Cu filtre X-ışın tüpünün önüne yerleştirilmiştir.

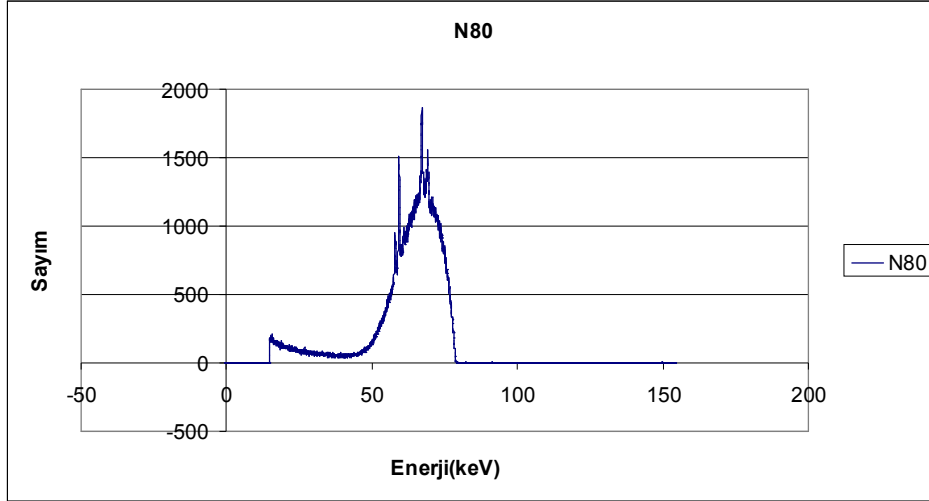


Şekil 4.17 N60 spektrumu

Ortalama Enerji(\bar{E}): 48.32 keV

Ayırma gücü(R_E): %30.0

N80 spektrumunu elde edebilmek için 4 mm Al ve 2.0 mm Cu bakır filtrenin kullanılması gerekmiştir. X-ışın sisteminin doğal filtrasyonu 1.2 mm Al olduğundan 2.8 mm Al ve 2.0 mm Cu filtre X-ışın tüpünün önüne yerleştirilmiştir.

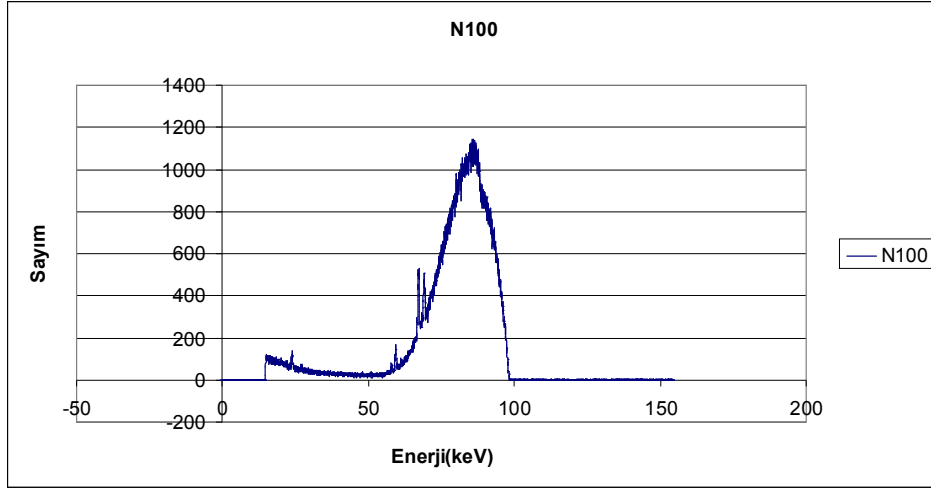


Şekil 4.18 N80 spektrumu

Ortalama Enerji(\bar{E}): 65.16 keV

Ayırma gücü(R_E): % 29.47

N100 spektrumunu elde edebilmek için 4 mm Al ve 5.0 mm Cu bakır filtrenin kullanılması gerekmiştir. X-ışın sisteminin doğal filtrasyonu 1.2 mm Al olduğundan 2.8 mm Al ve 5.0 mm Cu filtre X-ışın tüpünün önüne yerleştirilmiştir.



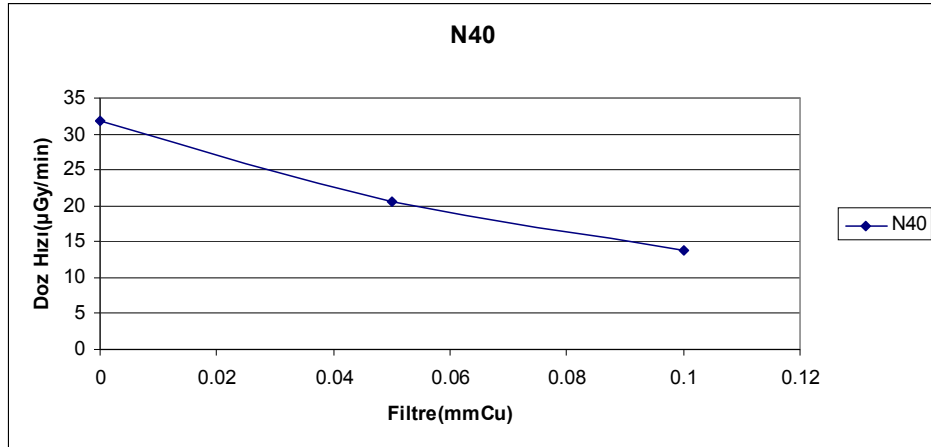
Şekil 4.19 N100 spektrumu

Ortalama Enerji(\bar{E}): 82.08 keV

Ayrırma gücü(R_E): % 26.80

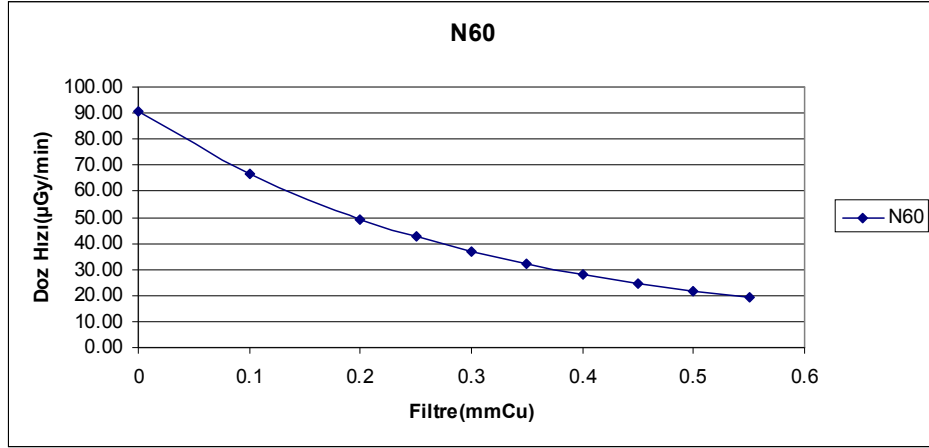
4.2.3 Birinci ve ikinci yarı kalınlık değerinin elde edilmesi

N40, N60, N80 ve N100 X-ışın demet kalitelerinde ‘Filtre Kalınlığı – Doz Hızı’ grafikleri çizilerek 1. yarı kalınlık değeri mm Cu cinsinden elde edilmiştir.



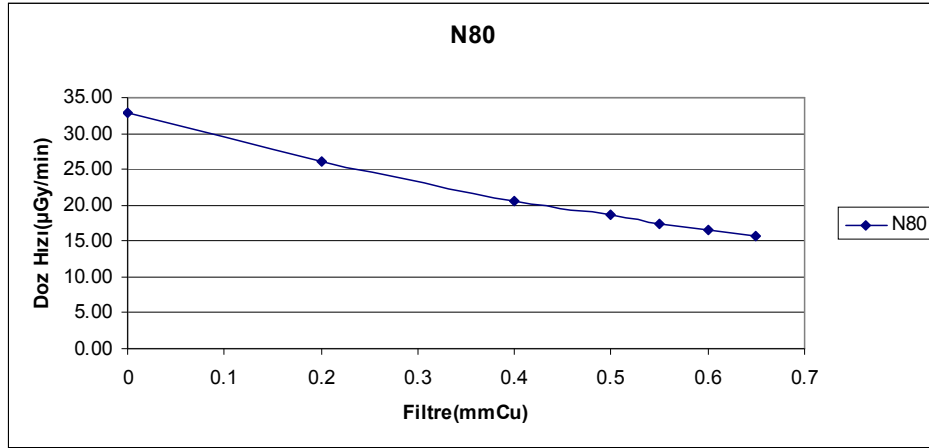
Şekil 4.20 N40 X-ışın demet kalitesi için ‘Filtre Kalınlığı – Doz Hızı’ grafiği

1. HVL: 0.084 mm Cu



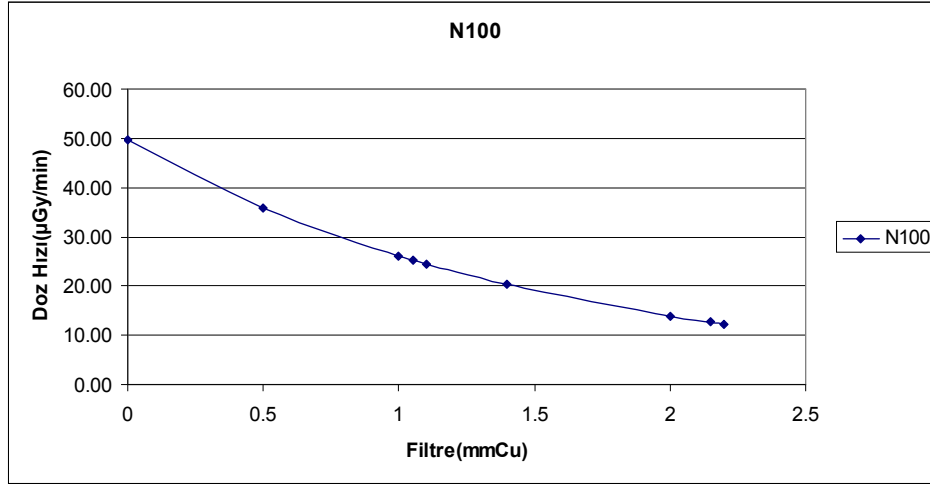
Şekil 4.21 N60 X-ışın demet kalitesi için 'Filtre Kalınlığı – Doz Hızı' grafiği

1. HVL: 0.24 mm Cu
2. HVL: 0.255 mm Cu



Şekil 4.22 N80 X-ışın demet kalitesi için 'Filtre Kalınlığı – Doz Hızı' grafiği

1. HVL: 0.605 mm Cu

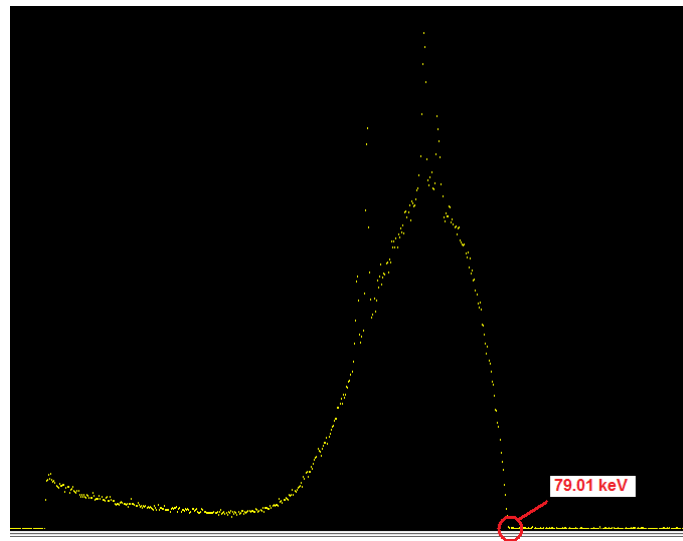


Şekil 4.23 N100 X-ışın demet kalitesi için 'Filtre Kalınlığı – Doz Hızı' grafiği

1. HVL: 1.072 mm Cu
2. HVL: 1.113 mm Cu

4.2.4 X-ışın spektrumlarının bitiş noktaları kullanılarak X-ışın tüpüne uygulanan yüksek gerilimin belirlenmesi

X-ışın spektrumlarının bitiş noktaları kullanılarak X-ışın tüpüne uygulanan gerilim belirlenmiştir.



Şekil 4.24 N80 X-ışın spektrumunun bitiş noktası

Çizelge 4.18 X-ışın spektrumlarından elde edilen yüksek gerilim değerleri

Demet Kalitesi	Nominal Gerilim (kV)	Elde Edilen Gerilim (kV)	% Fark
N40	40	39.55	1.13
N60	60	59.36	1.07
N80	80	79.01	1.24
N100	100	98.42	1.58

ISO 4037–1 de tanımlanmış olan X-ışın demet kalitelerinden N40, N60, N80 ve N100 X-ışın demet kaliteleri için elde edilmiş olan sonuçlar aşağıdaki çizelge 4.19 da toplanmış, kabul sınırları belirtilmiştir.

Çizelge 4.19 ISO 4037–1 de tanımlanmış olan X-ışın demet kalitelerinden N40, N60, N80 ve N100 X-ışın demet kaliteleri için elde edilmiş olan sonuçlar

Demet Kalitesi	Nominal Ortalama Enerji (keV)	Elde Edilen Ortalama Enerji (keV)	% Fark	Nominal Ayırma Gücü (%)	Elde Edilen Ayırma Gücü (%)	% Fark	Nominal 1. HVL (mm Cu)	Elde Edilen 1. HVL (mm Cu)	% Fark	Nominal kV	Elde Edilen kV	% Fark
N40	33	31.95	3.18	30	19.12	36	0.084	0.084	0	40	39.55	1.13
N60	48	48.32	0.66	36	30.00	16.6	0.24	0.232	3.33	60	59.36	1.07
N80	65	65.16	0.25	32	29.47	7.9	0.58	0.605	4.31	80	79.01	1.24
N100	83	82.08	1.11	28	26.80	4.28	1.11	1.072	3.42	100	98.42	1.58

Ortalama enerji için kabul sınırları: $\pm \% 3$

Ayırma gücü için kabul sınırları: $\pm \% 10$

1. HVL için kabul sınırları: $\pm \% 5$

X-ışın tüpüne uygulanan yüksek gerilim (kV) için kabul sınırları: $\pm \% 2$

4.2.5 Kolimatörün tamamen kapatıldığı durumdaki doz hızı ölçümü

Kolimatör açıklığı dedektörün bulunduğu düzlemde 10x10 cm olacak şekilde ayarlanmış ve X-ışın tüpüne, fotonların giriciliğinin yüksek olması için 120 kV uygulanmıştır. Bir dizi ölçüm alındıktan sonra dedektörün yeri değiştirilmeden

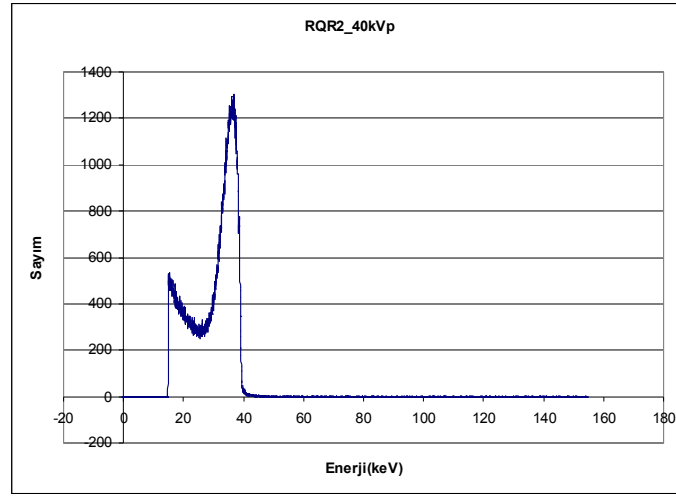
kolimatör yaprakları kapatılmış ve tekrardan bir dizi ölçüm alınmıştır. Elde edilen doz hızı oranı en az 1000 olmalıdır.

Kolimatör yaprakları açıkken ki ortalama doz hızı: 22140 $\mu\text{Gy/dak}$

Kolimatör yaprakları kapalıyken ki ortalama doz hızı: 1.5 $\mu\text{Gy/dak}$

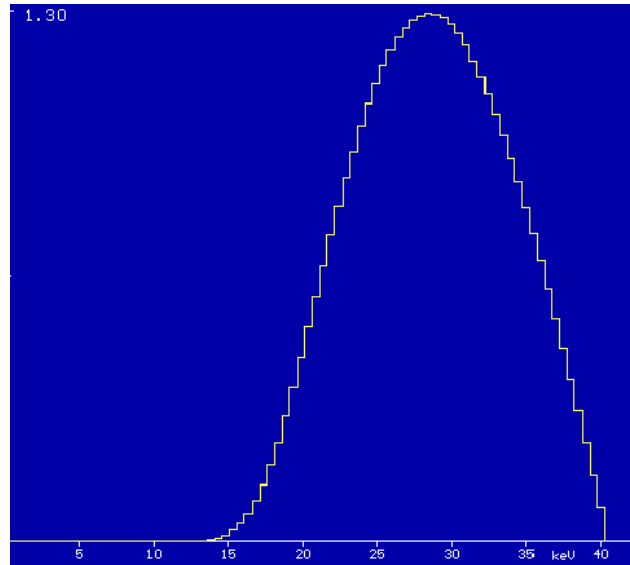
Kolimatör azalımı: 14760 kat

4.2.6 Elde edilmiş olan X-ışın demet kalitelerinin spektrumlarının Xcomp5r spektrum programı ile elde edilen spektrumlarla karşılaştırılması



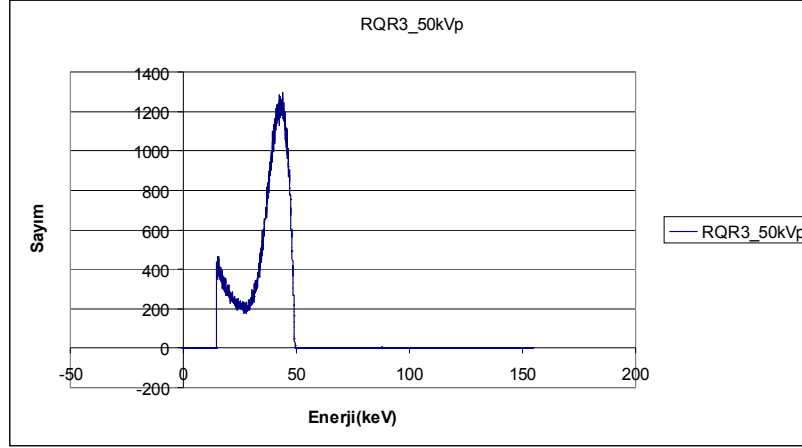
Şekil 4.25 Elde edilen RQR2 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 29.8 keV



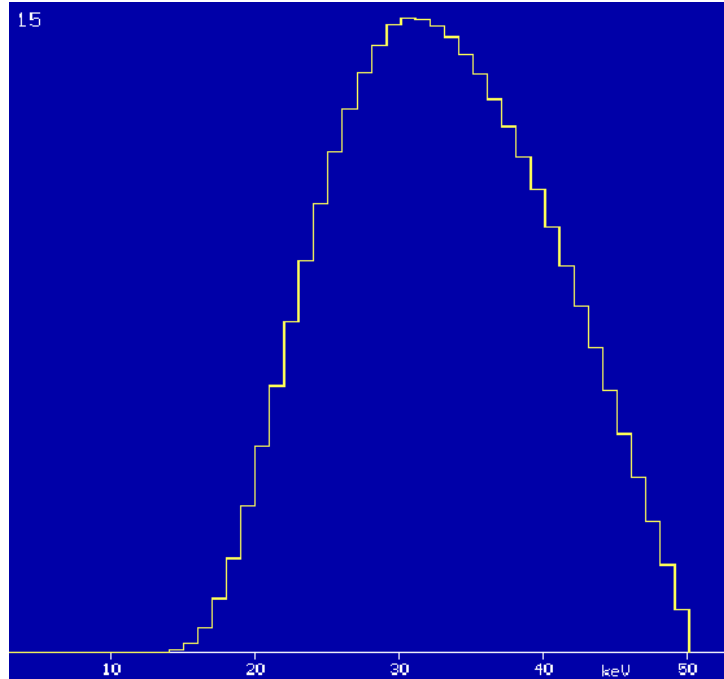
Şekil 4.26 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQR2 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 28.4 keV



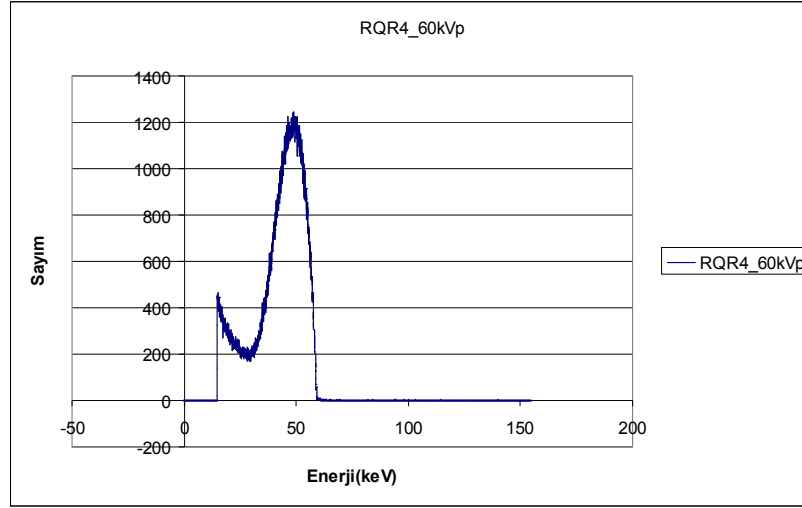
Şekil 4.27 Elde edilen RQR3 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 36.71 keV

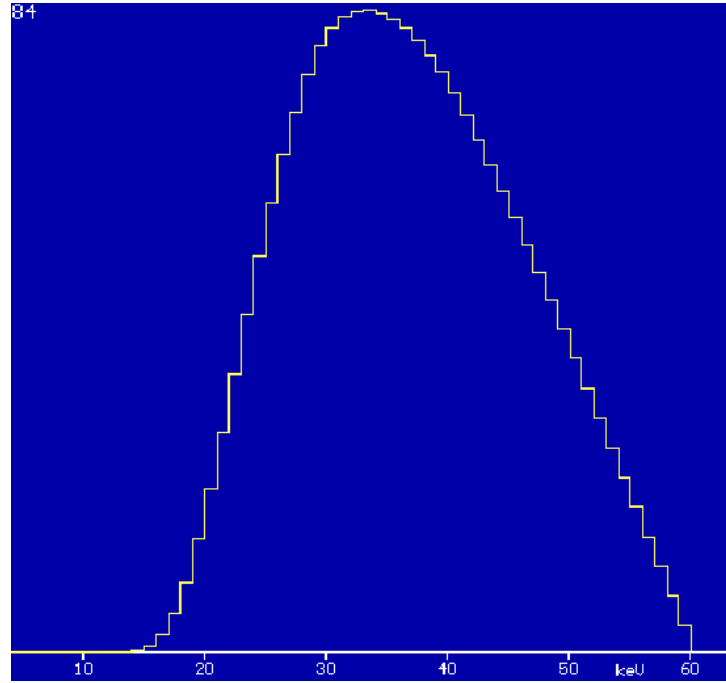


Şekil 4.28 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQR3 X-ışın demet kalitesi

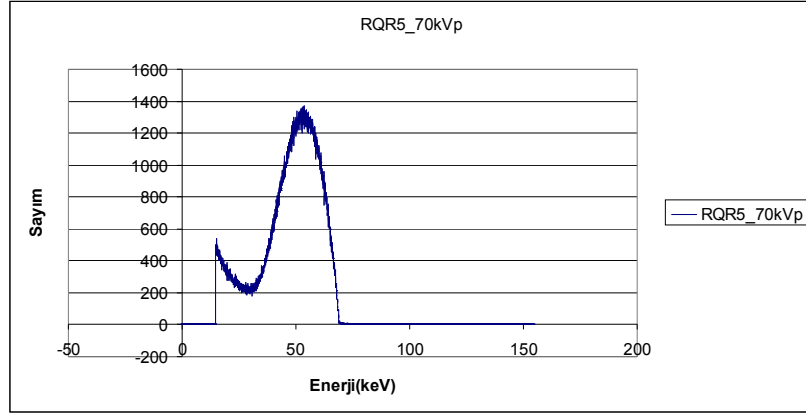
Ortalama enerji: 32.8 keV



Şekil 4.29 Elde edilen RQR4 X-ışın demet kalitesi
Ortalama enerji: 42.36 keV

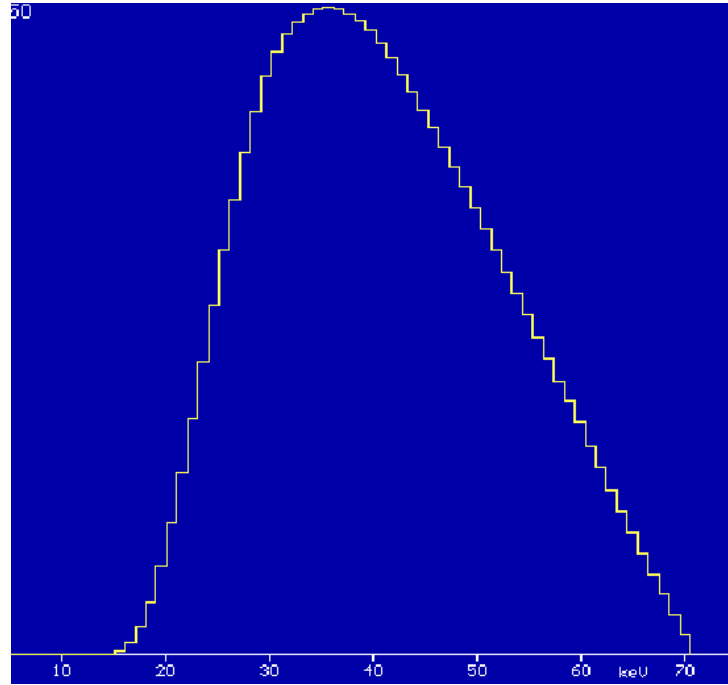


Şekil 4.30 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQR4 X-ışın demet kalitesi
Ortalama enerji: 36.9 keV



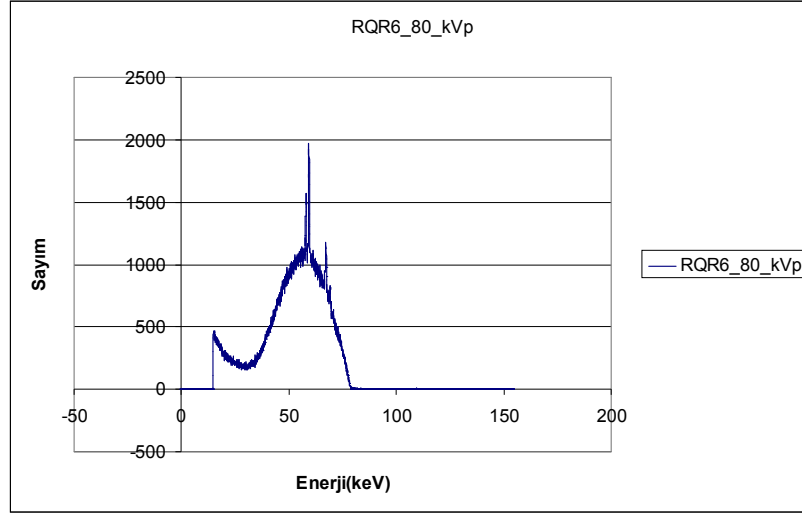
Şekil 4.31 Elde edilen RQR5 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 47.5 keV



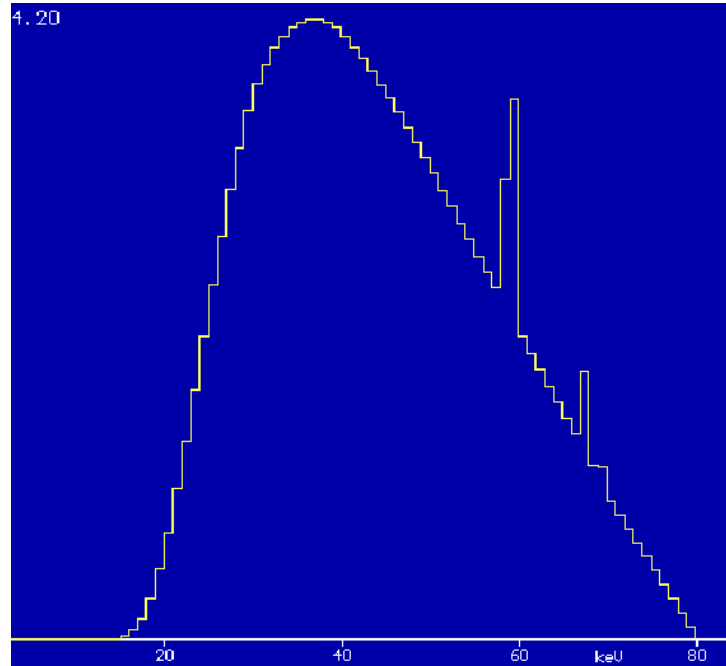
Şekil 4.32 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQR5 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 40.6 keV



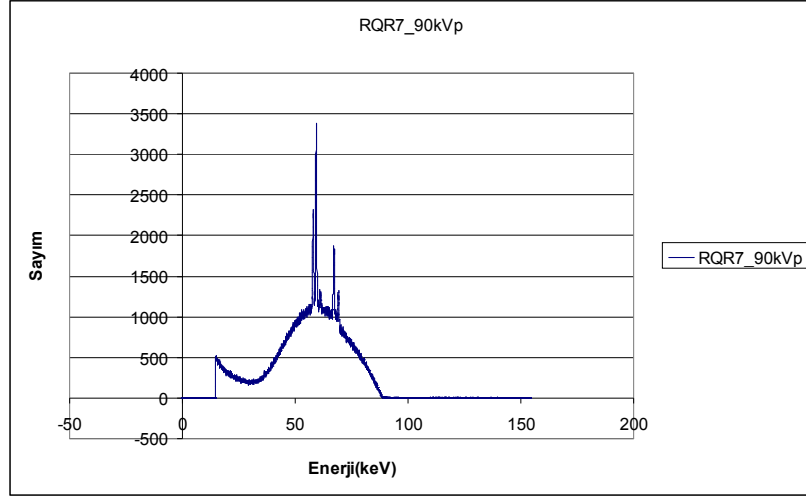
Şekil 4.33 Elde edilen RQR6 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 52.06 keV

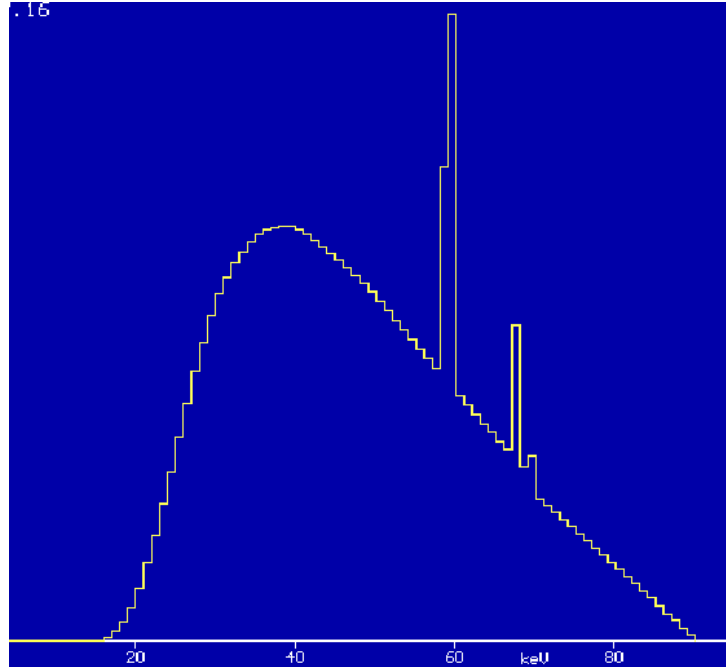


Şekil 4.34 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQR6 X-ışın demet kalitesi

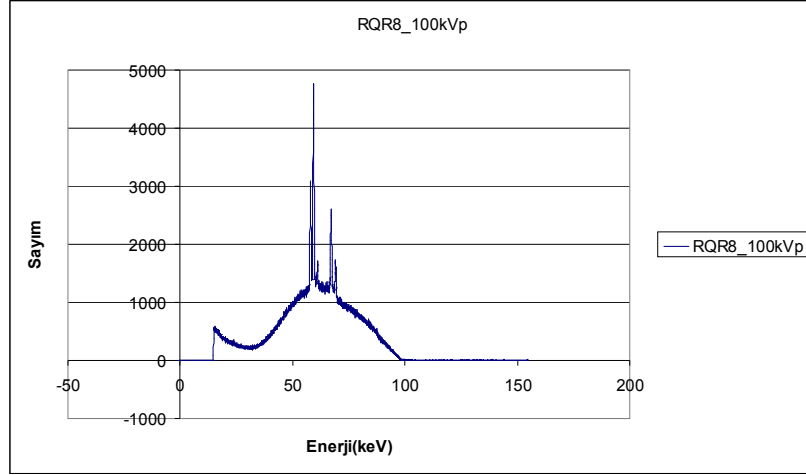
Ortalama enerji: 44.4 keV



Şekil 4.35 Elde edilen RQR7 X-ışın demet kalitesi
Ortalama enerji: 56.06 keV

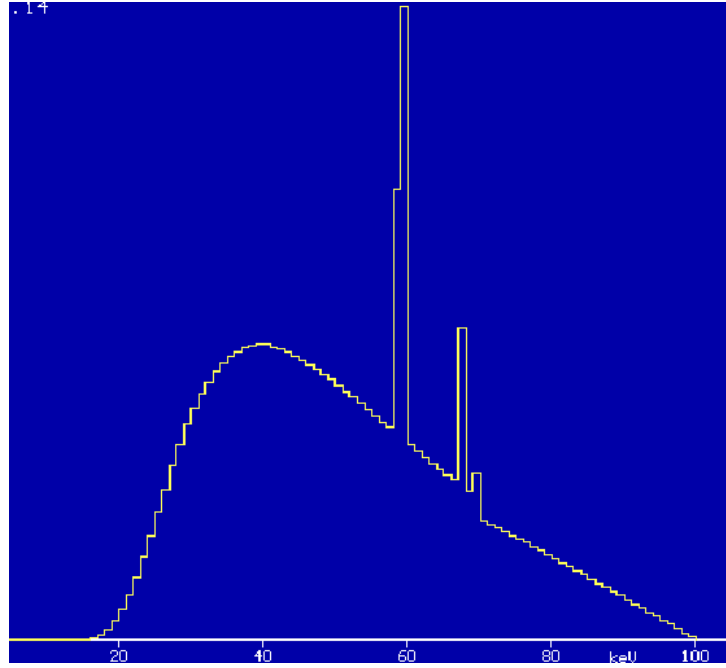


Şekil 4.36 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQR7 X-ışın demet kalitesi
Ortalama enerji: 48.1 keV



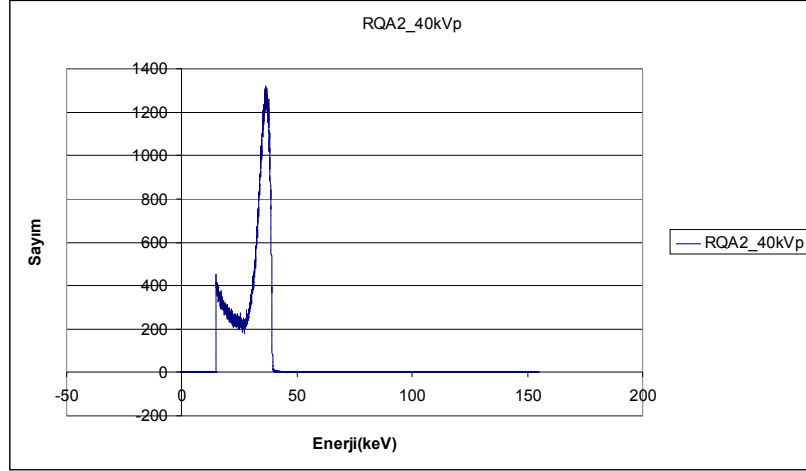
Şekil 4.37 Elde edilen RQR8 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 59.43 keV



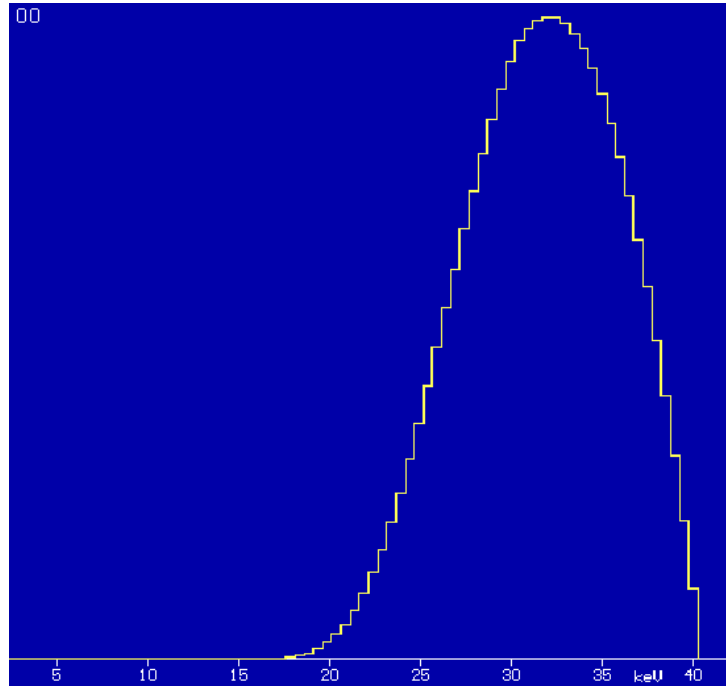
Şekil 4.38 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQR8 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 51.3 keV



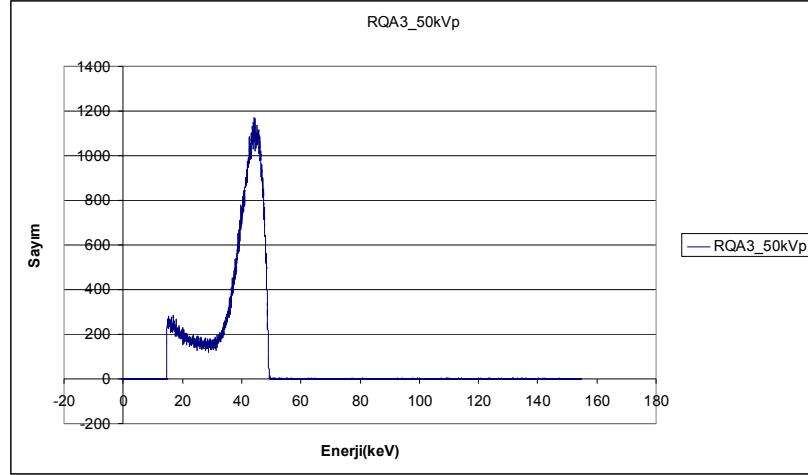
Şekil 4.39 Elde edilen RQA2 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerjisi: 31.41 keV



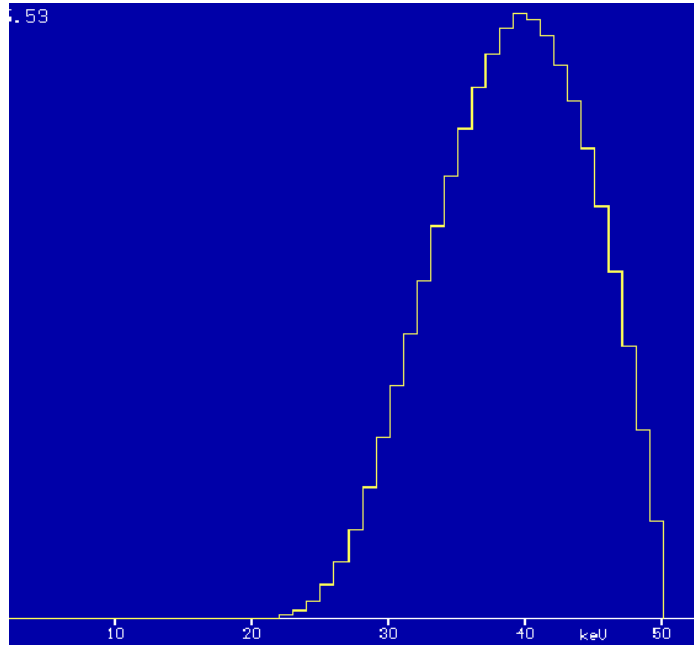
Şekil 4.40 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQA2 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerjisi: 31.4 keV



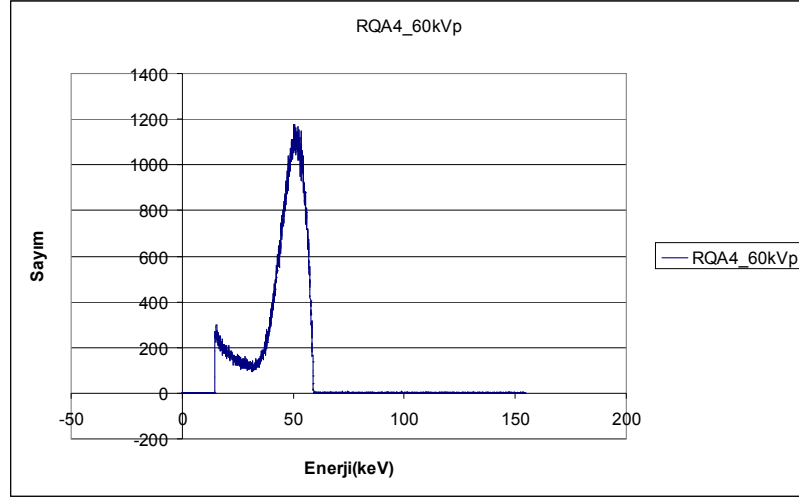
Şekil 4.41 Elde edilen RQA3 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 39.97 keV



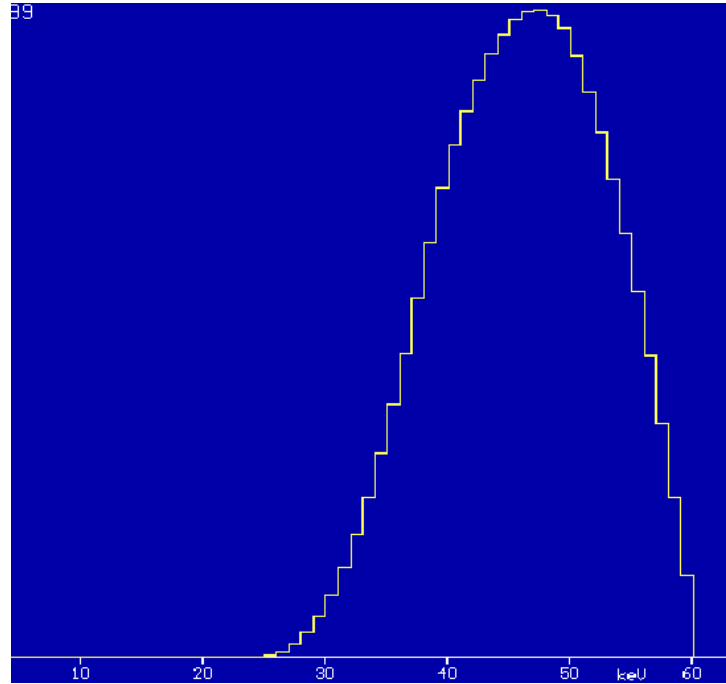
Şekil 4.42 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQA3 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 38.9 keV



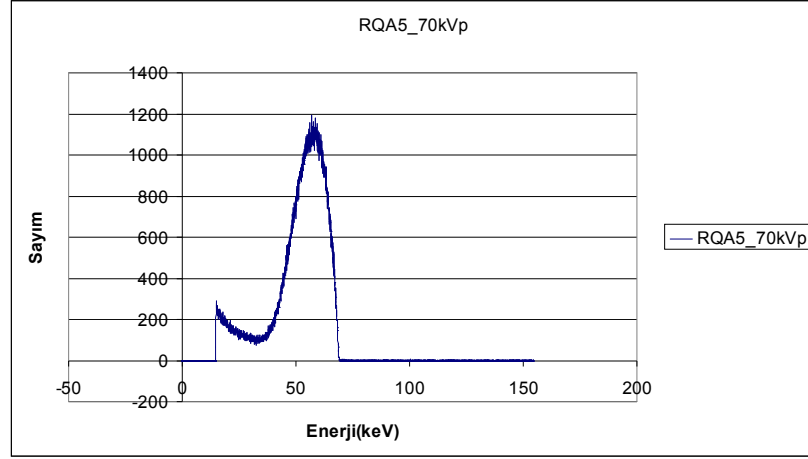
Şekil 4.43 Elde edilen RQA4 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 46.89 keV



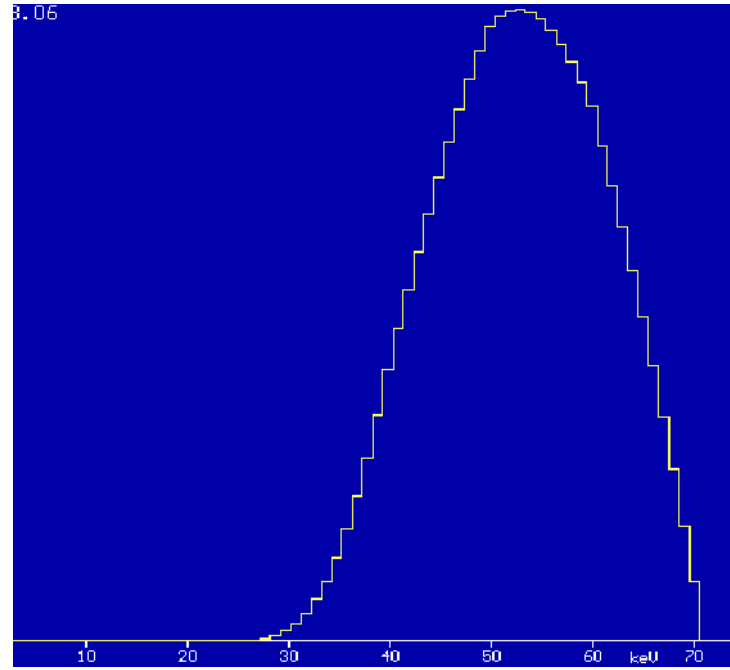
Şekil 4.44 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQA4 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 45.9 keV



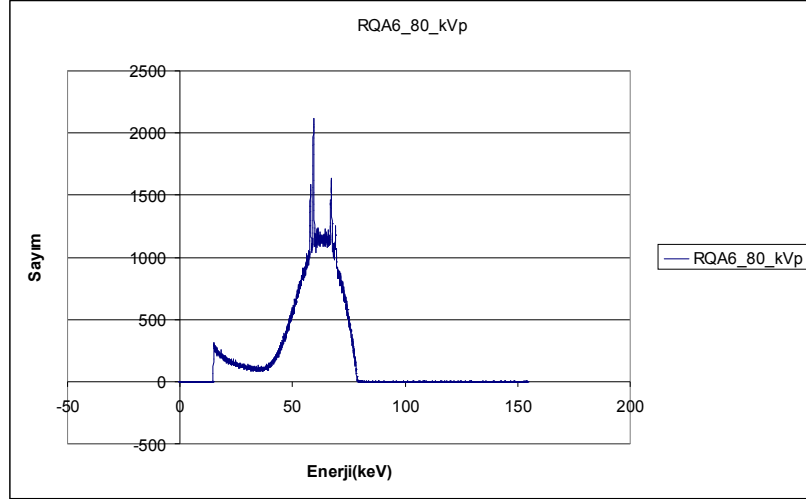
Şekil 4.45 Elde edilen RQA5 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 53.6 keV



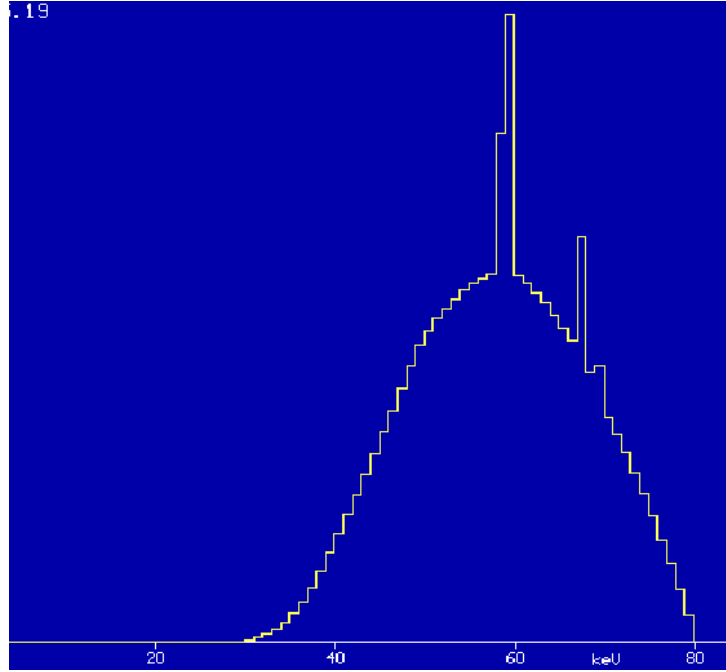
Şekil 4.46 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQA5 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 52.2 keV



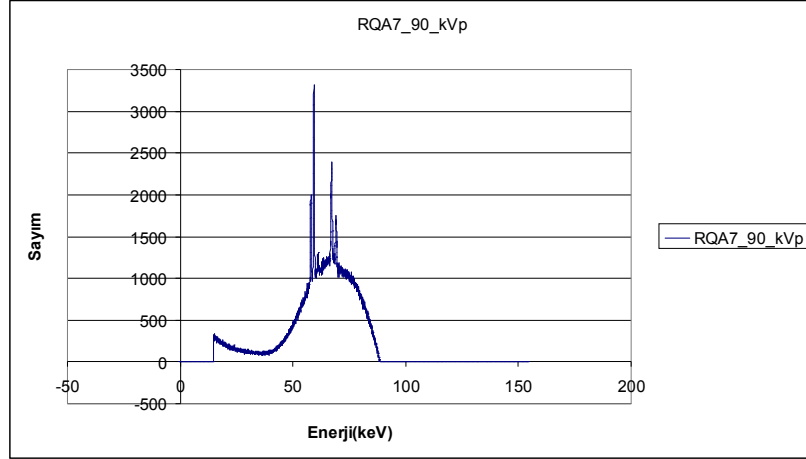
Şekil 4.47 Elde edilen RQA6 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 60.02 keV



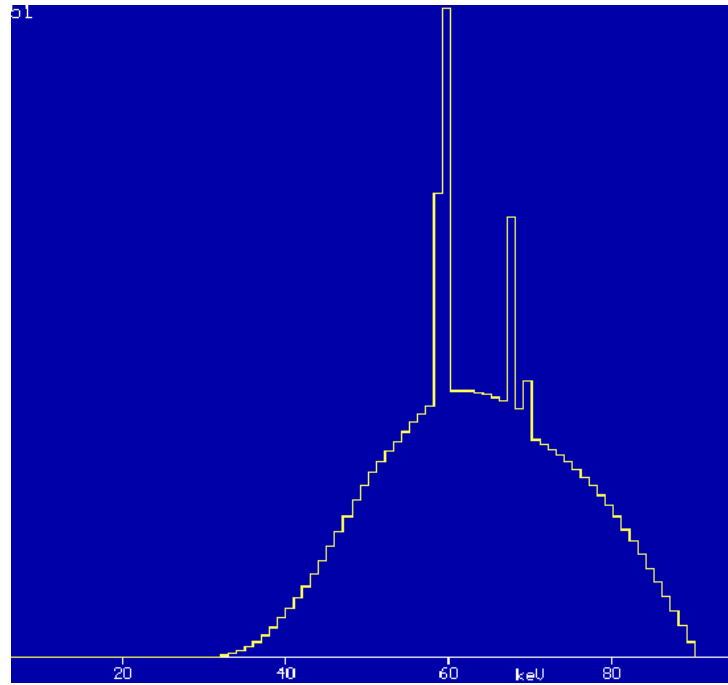
Şekil 4.48 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQA6 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 58.2 keV



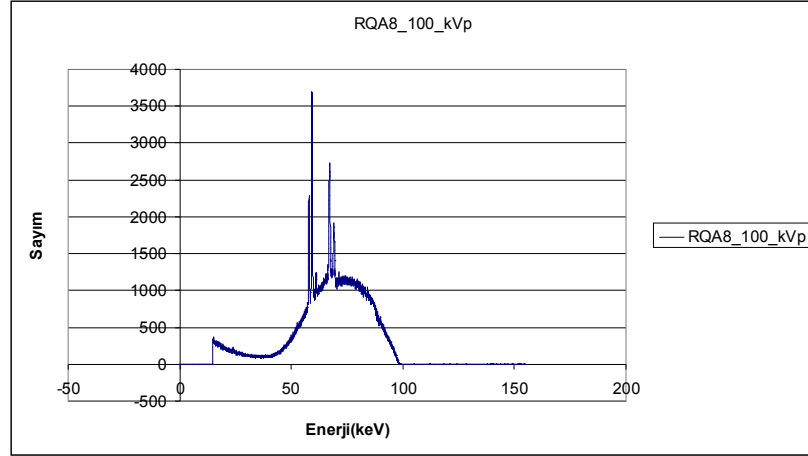
Şekil 4.49 Elde edilen RQA7 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 64.97 keV



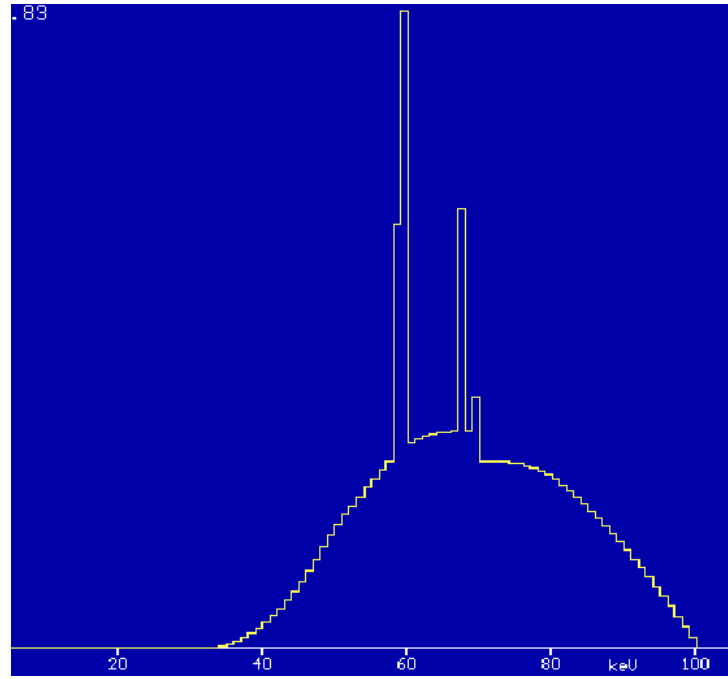
Şekil 4.50 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQA7 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 63.4 keV



Şekil 4.51 Elde edilen RQA8 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 69.73 keV



Şekil 4.52 Xcomp5r spektrum programı kullanılarak elde edilen RQA8 X-ışın demet kalitesi

Ortalama enerji: 68.1 keV

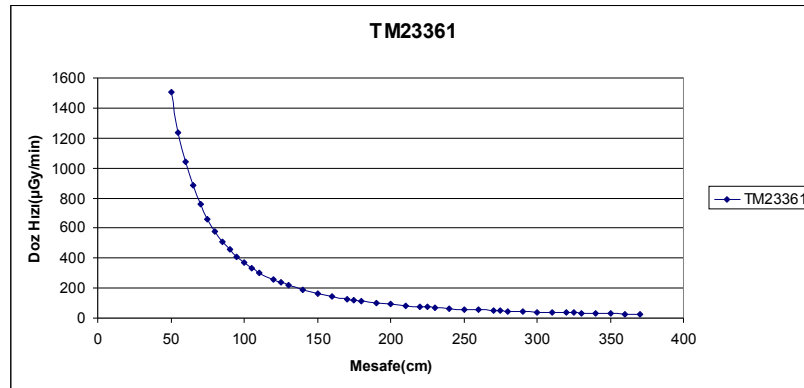
Çizelge 4.20 Elde edilmiş olan X-ışın demet kalitelerinin ortalama enerji(\bar{E}) ve 1. HVL değerinin, nominal değerler ve Xcomp5r programı ile hesaplanan değerlerle karşılaştırıldığı çizelge

Demet Kalitesi	Nominal 1. HVL	Xcomp5r Tarafından Hesaplanan 1. HVL	Elde Edilen 1. HVL	Nominal \bar{E} (keV)	Xcomp5r Tarafından Hesaplanan \bar{E} (keV)	Elde Edilen \bar{E} (keV)
N40	0.084 mm Cu	0.083 mm Cu	0.084 mm Cu	33	33	31.95
N60	0.24 mm Cu	0.239 mm Cu	0.232 mm Cu	48	47.5	48.32
N80	0.58 mm Cu	0.591 mm Cu	0.605 mm Cu	65	64.7	65.16
N100	1.11 mm Cu	1.128 mm Cu	1.072 mm Cu	83	82.8	82.08
RQR2	1,42 mm Al	1.46 mm Al	1.41 mm Al	-	28.4	29.8
RQR3	1,78 mm Al	1.95 mm Al	1.81 mm Al	-	32.8	36.71
RQR4	2,19 mm Al	2.38 mm Al	2.21 mm Al	-	36.9	42.36
RQR5	2,58 mm Al	2.82 mm Al	2.61 mm Al	-	40.6	47.5
RQR6	3,01 mm Al	3.25 mm Al	2.97 mm Al	-	44.4	52.06
RQR7	3,48 mm Al	3.81 mm Al	3.50 mm Al	-	48.1	56.06
RQR8	3,97 mm Al	4.34 mm Al	3.96 mm Al	-	51.3	59.43
RQA2	2,2	2.17	2.23	-	31.4	31.41

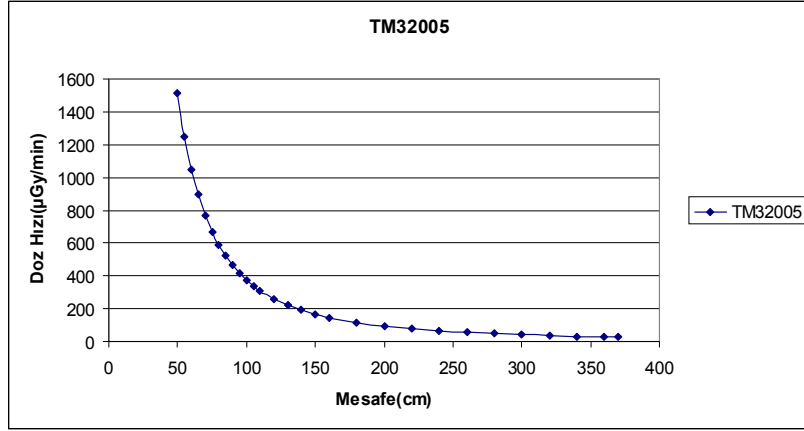
	mm Al	mm Al	mm Al			
RQA3	3,8 mm Al	3.76 mm Al	3.84 mm Al	-	38.9	39.97
RQA4	5,4 mm Al	5.36 mm Al	5.33 mm Al	-	45.9	46.89
RQA5	6,8 mm Al	6.77 mm Al	6.78 mm Al	-	52.2	53.60
RQA6	8,2 mm Al	8.12 mm Al	8.15 mm Al	-	58.2	60.02
RQA7	9,2 mm Al	9.20 mm Al	9.17 mm Al	-	63.4	64.97
RQA8	10,1 mm Al	10.12 mm Al	10.30 mm Al	-	68.1	69.73

4.3 Cs-137 Işınlama Sisteminde Farklı Mesafelerdeki Doz Hızı Ölçümü

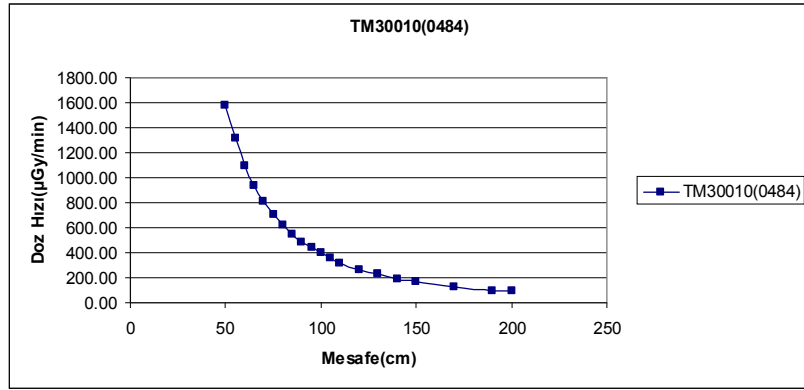
Cs-137 ışınlama sisteminde farklı mesafelerde farklı referans dedektörler ile 1. kaynak(47 mCi) ve 2. kaynak(8.58 Ci) kullanılarak doz hızı ölçülmüştür.



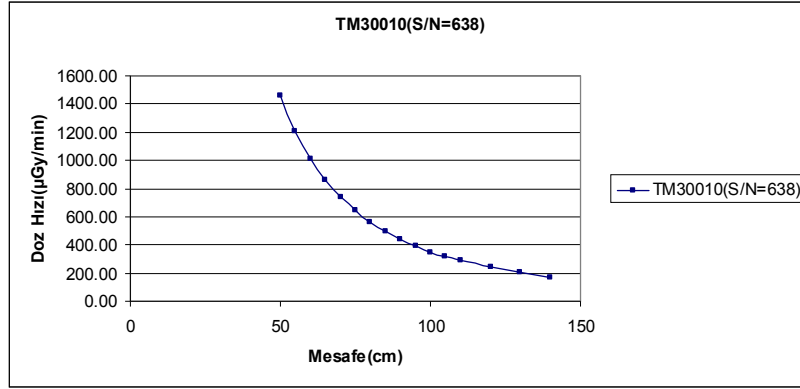
Şekil 4.53 2. kaynak kullanılarak TM23361 referans dedektörü ile elde edilen ‘Mesafe-Doz Hızı’ grafiği



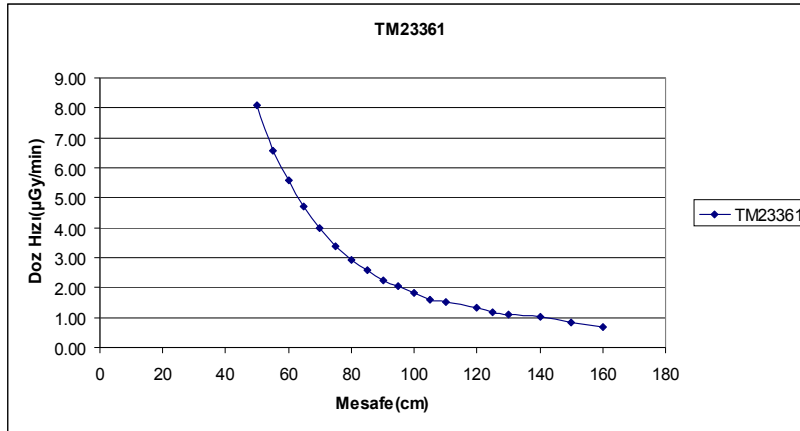
Şekil 4.54 2. kaynak kullanılarak TM32005 referans dedektörü ile elde edilen ‘Mesafe-Doz Hızı’ grafiği



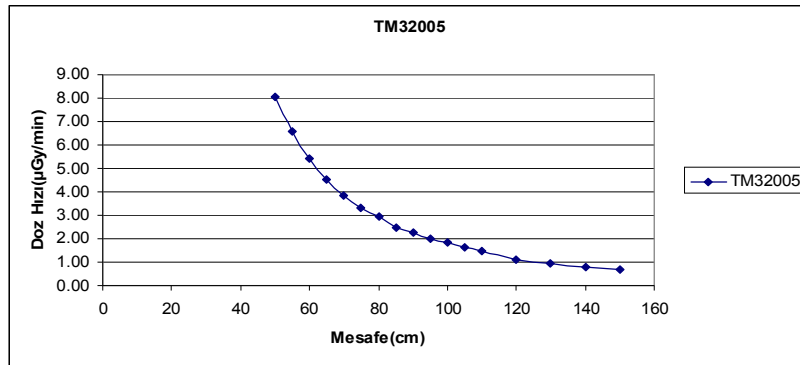
Şekil 4.55 2. kaynak kullanılarak TM30010(S/N=0484) referans dedektörü ile elde edilen ‘Mesafe-Doz Hızı’ grafiği



Şekil 4.56 2. kaynak kullanılarak TM30010(S/N=0638) referans dedektörü ile elde edilen ‘Mesafe-Doz Hızı’ grafiği



Şekil 4.57 1. kaynak kullanılarak TM23361 referans dedektörü ile elde edilen ‘Mesafe-Doz Hızı’ grafiği

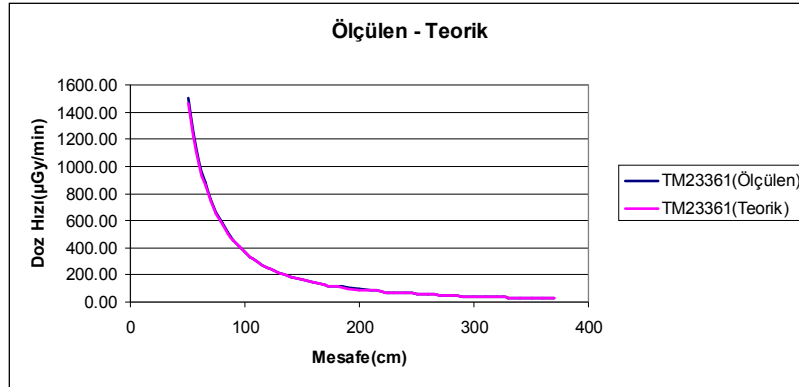


Şekil 4.58 1. kaynak kullanılarak TM32005 referans dedektörü ile elde edilen ‘Mesafe-Doz Hızı’ grafiği

4.3.1 Referans dedektörler ile ölçülen değerlerin teorik olarak hesaplanan değerler ile karşılaştırılması

TM23361 ve TM32005 referans dedektörleri ile 370 cm de alınan ölçümler kullanılarak farklı mesafelerde teorik doz hızı değerleri hesaplanmıştır. Teorik olarak hesaplama işlemi Matlab programı kullanılarak, bu programda “ters kare kanununa” ilişkin bir program yazılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Aynı mesafede teorik değer ile ölçülen değer arasındaki farkın %5’ den az olması gerekir. Yüzde fark aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Yüzde Fark} = \frac{\text{Ölçülen Değer} - \text{Teorik Değer}}{\text{Ölçülen Değer}} \times 100 \quad (4.1)$$

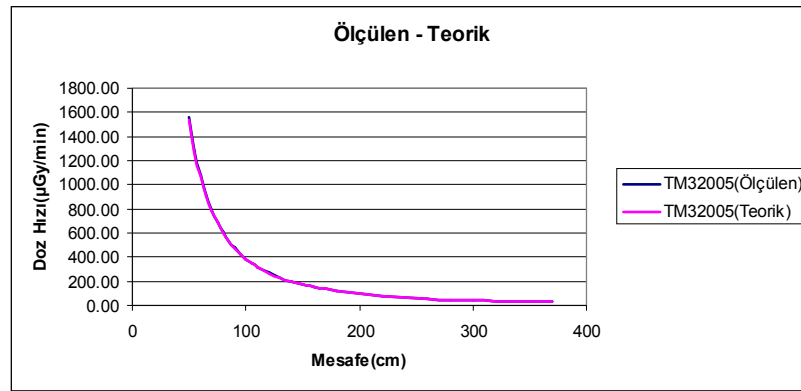


Şekil 4.59 TM23361 referans dedektörü ile ölçülen ve teorik olarak oluşturulan ‘Mesafe-Doz Hızı’ grafikleri

Çizelge 4.21 TM23361 referans dedektörü ile ölçülen ve teorik olarak oluşturulan doz hızı değerlerinin aynı mesafeler için yüzdece farkları

Mesafe (cm)	%Fark	Mesafe (cm)	%Fark
50	2.85	190	0.99
55	2.53	200	1.03
60	2.50	210	1.09
65	2.15	220	1.13
70	1.78	225	0.75

75	1.30	230	0.74
80	1.13	240	0.62
85	1.05	250	0.68
90	1.03	260	0.33
95	1.02	270	0.54
100	0.99	275	0.54
105	0.91	280	0.30
110	0.78	290	0.34
120	0.86	300	0.13
125	0.87	310	-0.12
130	0.67	320	-0.11
140	0.71	325	0.53
150	0.70	330	0.07
160	0.93	340	0.26
170	0.68	350	0.16
175	0.74	360	0.17
180	0.78	370	0.00



Şekil 4.60 TM32005 referans dedektörü ile ölçülen ve teorik olarak oluşturulan ‘Mesafe-Doz Hızı’ grafikleri

Çizelge 4.22 TM32005 referans dedektörü ile ölçülen ve teorik olarak oluşturulan doz hızı değerlerinin aynı mesafeler için yüzdece farkları

Mesafe (cm)	%Fark	Mesafe (cm)	%Fark
50	1.32	140	0.67
55	1.40	150	0.46
60	1.19	160	0.59
65	1.34	180	0.75
70	1.25	200	0.64
75	1.13	220	0.70
80	0.99	240	0.55
85	1.01	260	0.53
90	0.92	280	0.06
95	0.87	300	-0.05
100	0.46	320	-0.05
105	0.69	340	-0.10
110	0.70	360	0.08
120	0.66	370	0.00
130	0.62		

4.3.2 Farklı referans dedektörler ile aynı mesafelerde elde edilmiş olan doz hızı değerlerinin karşılaştırılması

TM23361 ve TM32005 referans dedektörleri ve 2. kaynak (8.58 Ci) kullanılarak farklı mesafelerde elde edilmiş olan doz hızı ölçümlerinin birbirlerine göre yüzdece farkları hesaplanmıştır.

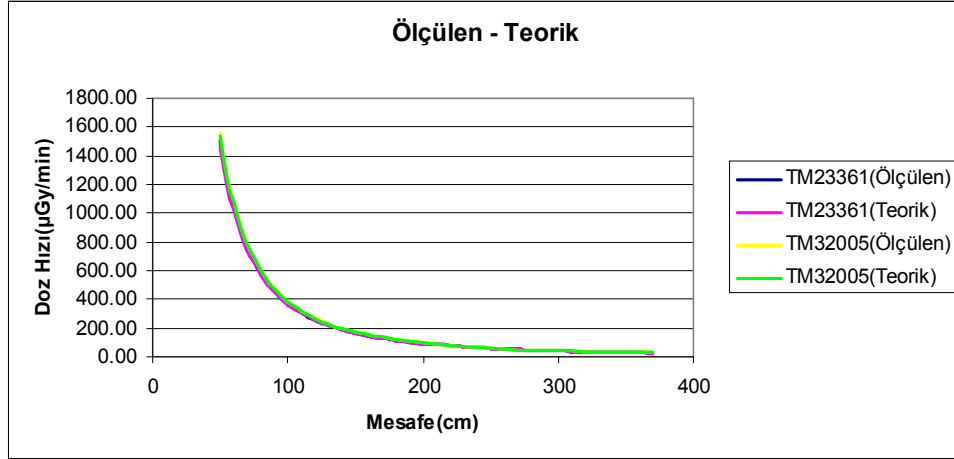
Çizelge 4.23 TM23361 ve TM32005 referans dedektörleri kullanılarak farklı mesafelerde elde edilmiş olan doz hızı ölçümlerinin yüzdece farkları

Mesafe (cm)	% Fark	Mesafe (cm)	% Fark
50	-0.53	140	-2.07
55	-0.93	150	-1.86
60	-0.76	160	-1.76
65	-1.26	180	-2.07

70	-1.55	200	-1.71
75	-1.93	220	-1.67
80	-1.97	240	-2.03
85	-2.07	260	-2.31
90	-2.00	280	-1.87
95	-1.95	300	-1.93
100	-1.57	320	-2.17
105	-1.88	340	-1.73
110	-2.02	360	-2.02
120	-1.90	370	-2.11
130	-2.05		

Çizelge 4.24 Referans dedektörler ile farklı mesafelerde ölçülmüş olan doz hızları

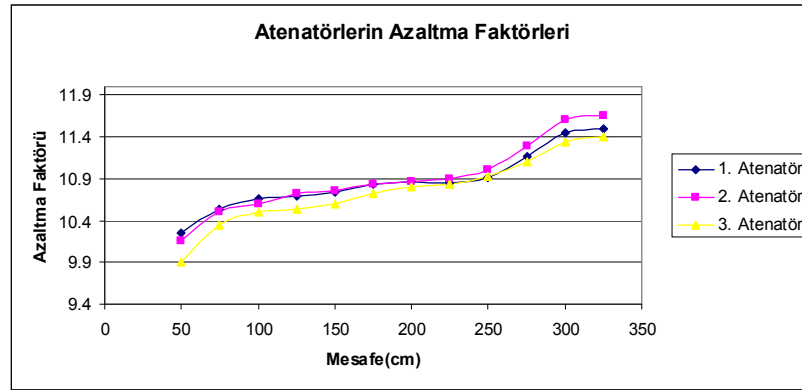
Mesafe (cm)	TM32005 (μGy/dak)	TM23361 (μGy/dak)	Mesafe (cm)	TM32005 (μGy/dak)	TM23361 (μGy/dak)
50	1511.97	1504.00	140	191.59	187.70
55	1250.49	1239.00	150	166.54	163.50
60	1048.54	1040.67	160	146.57	144.03
65	894.76	883.60	180	115.99	113.63
70	770.83	759.03	200	93.85	92.28
75	670.68	657.97	220	77.61	76.33
80	588.64	577.27	240	65.11	63.82
85	521.53	510.97	260	55.47	54.22
90	464.76	455.67	280	47.61	46.73
95	416.89	408.93	300	41.42	40.64
100	374.72	368.93	320	36.41	35.63
105	340.65	334.37	340	32.23	31.68
110	310.42	304.27	360	28.80	28.23
120	260.73	255.87	370	27.25	26.68
130	222.07	217.60			



Şekil 4.61 Referans dedektörler ile ölçülmüş farklı mesafelerdeki doz hızları ve bu dedektörler ile elde edilmiş olan ölçümler kullanılarak elde edilen teorik doz hızları

4.3.3 Azaltıcı levhaların(atenatör) farklı mesafelerdeki azaltma katsayılarının belirlenmesi

Kolimatör çıkışında bulunan azaltıcı levhaların farklı mesafelerdeki azaltma faktörleri, bu mesafelerdeki bilinen doz hızı değerlerinin, azaltıcı levhalar varken ki ölçülen doz hızı değerlerine oranı kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.62 Azaltıcı levhaların farklı mesafelerdeki azaltma faktörleri

4.3.4 Doz hızı ölçümlerine saçılan ışınların etkisinin belirlenmesi

TM23361 referans dedektörü kaynaktan 2 m uzağa yerleştirilip bir dizi ölçüm alındıktan sonra ortalama doz hızı değeri hesaplanmıştır. Bu işlemde sonra aşağıdaki şekil 4.62 de görüleceği üzere referans dedektör merkezden radyasyon alanının o mesafedeki çapı kadar (75 cm) uzağa yerleştirilmiş ve bu noktada bir dizi ölçüm gerçekleştirilip bu ölçümlerin ortalamaları hesaplanmıştır. Bu test merkezin 75 cm yukarısında, 75 cm sağında ve 75 cm solunda gerçekleştirilmiştir.



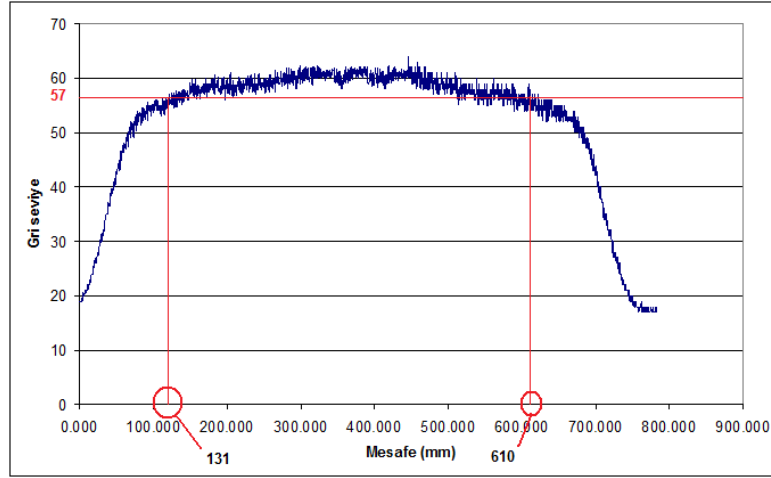
Şekil 4.63 Referans dedektörün merkezin 75 cm yukarısına yerleştirilmesi

Çizelge 4.25 Merkezden 75 cm yukarıda, 75 cm solda ve 75 cm sağda alınan ölçümler ve bu ölçümlerin merkezden alınan ölçümden yüzdece farkları

	Doz Hızı ($\mu\text{Gy/dak}$)	Kabul Sınırı (%)	Fark (%)
Merkez	88.3	-	-
75 cm Yukarı	0.4	5	0.45
75 cm Sol	0.5	5	0.57
75 cm Sağ	0.5	5	0.57

4.3.5 Işınlama alanındaki doz dağılımının belirlenmesi

Kaynaktan 2 metre uzağa iki adet radyografik film yerleştirilmiştir. Bu filmler ışınlanıp, banyo edilip ve tarayıcıda taratıldıktan sonra elde edilen veriler Microsoft Excel programı kullanılarak grafiğe dönüştürülmüştür. Bu testteki doz dağılımı gri seviye cinsinden belirlenmiştir.



Şekil 4.64 Kaynaktan 2 metre uzaklıktaki doz dağılımı

Merkezdeki doz dağılımının %5'inin altında kaldığı sınırlar 13.1 cm ile 61.0 cm arasındır. Kalibre edilecek olan dedektörler bu aralıkta ışınlanmalıdır.

4.4 X-Işın Sisteminde Foton Dedektörlerinin Kalibrasyon İşlemi

Bölüm 2 de belirtilen 2. metot kullanılıp RQR3,RQR5 ve RQR7 demet kaliteleri ile gerçekleştirilen kalibrasyon işlemleri sonucunda elde edilen kalibrasyon faktörlerinin ortalamaları aşağıdaki çizelgede belirtilmiştir.

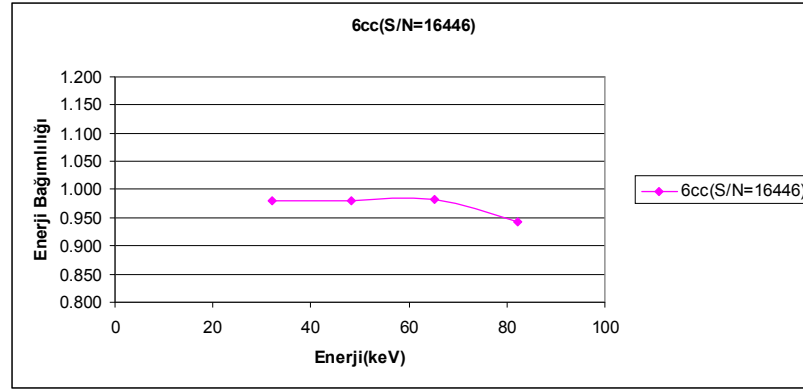
Çizelge 4.26 X-ışın sistemi kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon işlemi sonuçları

<i>Dedektör</i>	<i>Kalibrasyon Faktörü</i>
Radcal 10x5-6, S/N = 16446	0.997
Radcal 10x5-6, S/N = 17819	0.990

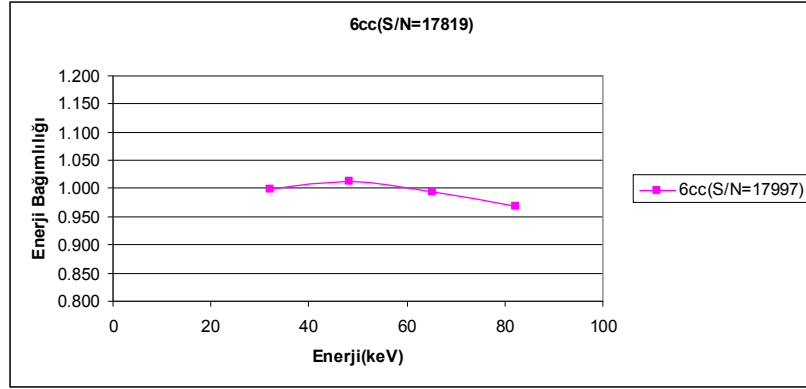
Radcal 10x6-6, S/N = 03-0458	1.008
Radcal 10x5-60, S/N = 9638	0.987
Radcal 10x5-60, S/N = 9608	1.000
Radcal 10x6-60, S/N = 07-0361	0.986
Radcal 10x5-180, S/N = 17997	0.989
Radcal 10x5-180, S/N = 18006	0.997
Radcal 10x6-180, S/N = 08-0236	0.983
Unfors, Conv,	0.810
Unfors, LI,	0.874
Victoreen ,Rad-Check,	0.987

4.4.1 X-ışın sisteminde foton dedektörlerinin enerji bağımlılığının belirlenmesi

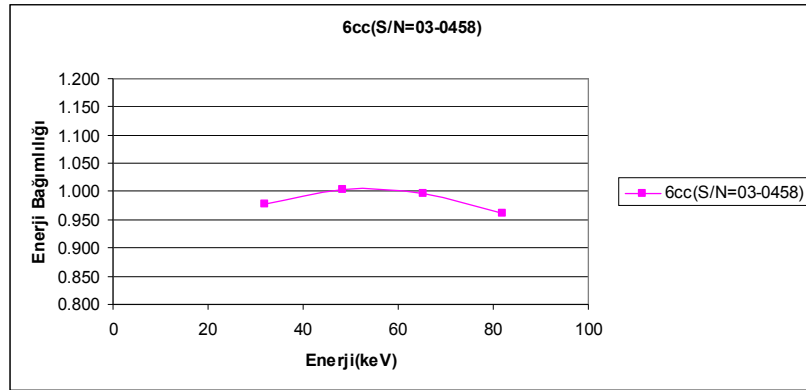
Kullanılan 9 farklı Radcal dedektörünün; N40, N60, N80 ve N100 X-ışın demet kaliteleri kullanılarak, bu demet kalitelerindeki ortalama enerjilerinde dedektörlerin enerji bağımlılıkları belirlenmiştir.



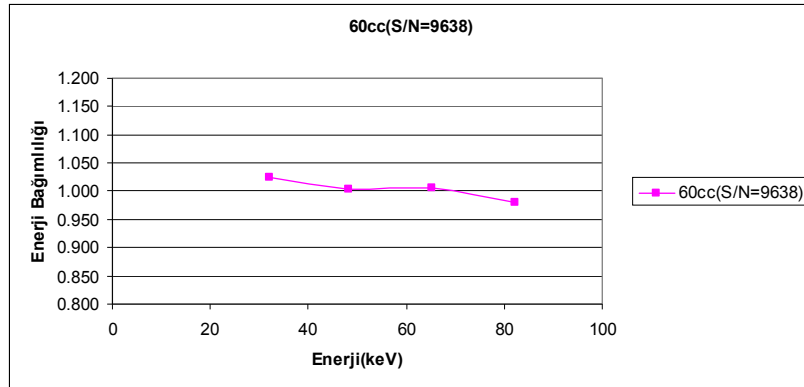
Şekil 4.65 Radcal 10x5-6, S/N = 16446 dedektörünün enerji bağımlılığı grafiği



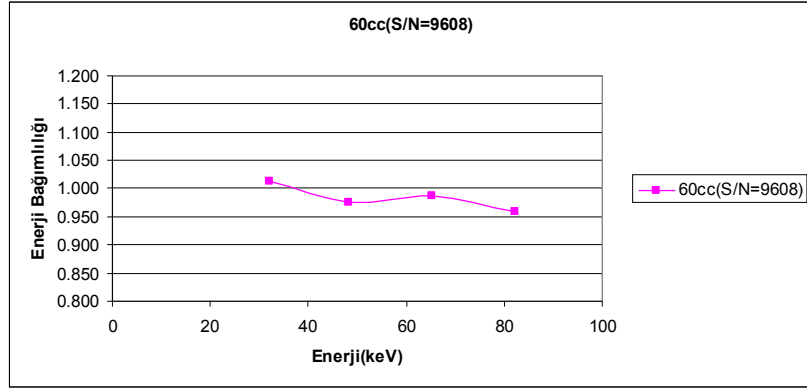
Şekil 4.66 Radcal 10x5-6, S/N = 17819 dedektörünün enerji bağımlılığı grafiği



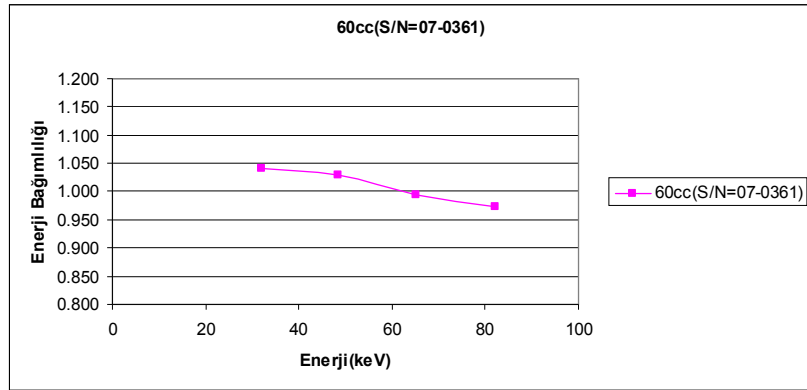
Şekil 4.67 Radcal 10x6-6, S/N = 03-0458 dedektörünün enerji bağımlılığı grafiği



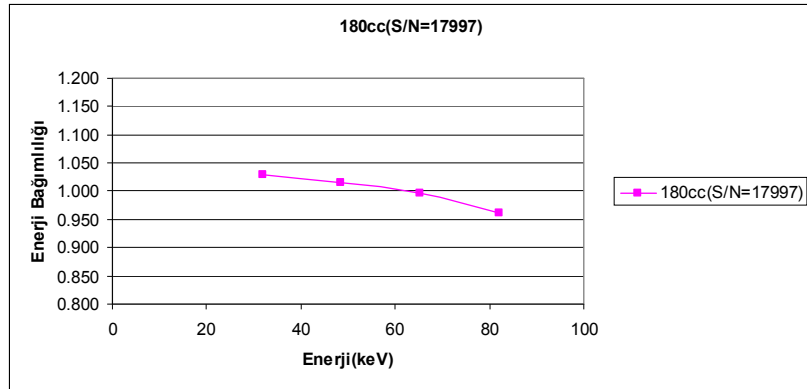
Şekil 4.68 Radcal 10x5-60, S/N = 9638 dedektörünün enerji bağımlılığı grafiği



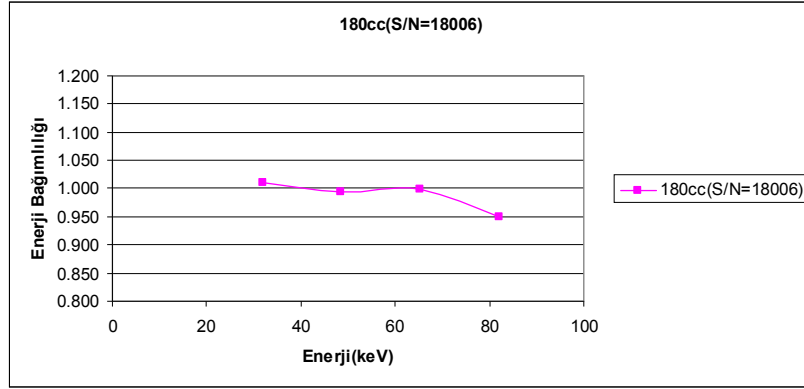
Şekil 4.69 Radcal 10x5–60, S/N = 9608 dedektörünün enerji bağımlılığı grafiği



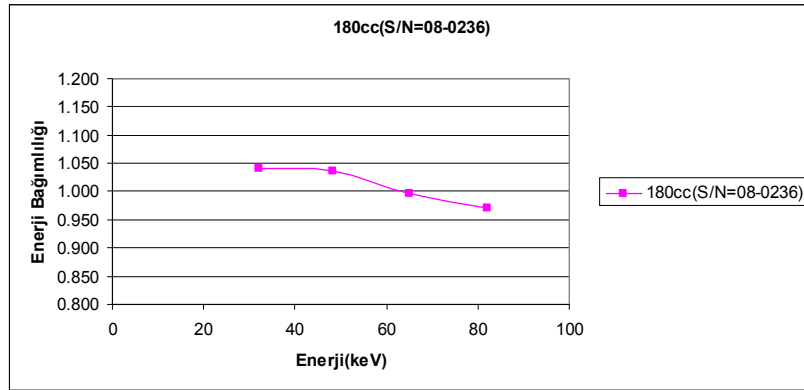
Şekil 4.70 Radcal 10x6–60, S/N = 07-0361 dedektörünün enerji bağımlılığı grafiği



Şekil 4.71 Radcal 10x5–180, S/N = 17997 dedektörünün enerji bağımlılığı grafiği



Şekil 4.72 Radcal 10x5-180, S/N = 18006 dedektörünün enerji bağımlılığı grafiği



Şekil 4.73 Radcal 10x6-180, S/N = 08-0236 dedektörünün enerji bağımlılığı grafiği

Çizelge 4.27 Farklı Radcal marka dedektörlerin enerji bağımlılıkları

<i>Dedektör</i>	<i>Tipi</i>	<i>Ortalama Enerji (\bar{E})</i>			
		<i>31.95</i>	<i>48.32</i>	<i>65.16</i>	<i>82.08</i>
Radcal 6 cm³	10x5-6 S/N = 16446	0.980	0.979	0.981	0.942
Radcal 60 cm³	10x5-60 S/N = 9638	1.026	1.003	1.005	0.979
Radcal 180 cm³	10x5-180 S/N = 17997	1.030	1.014	0.997	0.962
Radcal 6 cm³	10x5-6 S/N = 17819	1.000	1.013	0.994	0.968

Radcal 60 cm³	10x5-60 S/N = 9608	1.012	0.976	0.987	0.959
Radcal 180 cm³	10x5-180 S/N = 18006	1.010	0.993	1.000	0.951
Radcal 6 cm³	10x6-6 S/N=03-0458	0.978	1.004	0.997	0.962
Radcal 60 cm³	10x6-60 S/N=07-0361	1.042	1.029	0.995	0.974
Radcal 180 cm³	10x6-180 S/N=08-0236	1.042	1.036	0.996	0.972

4.5 Cs-137 Işınlama Sisteminde Foton Dedektörlerinin Kalibrasyon İşlemi

Bölüm 2 de belirtilen 4. metot kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon işlemleri sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki çizelgede belirtilmiştir.

Çizelge 4.28 Cs-137 ışınlama sistemi kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon işlemi sonuçları

<i>Dedektör</i>	<i>Kalibrasyon Faktörü</i>
Bicron, Micro Sievert Survey Meter	0.974
The Victoreen Geiger-Mueller(GM)	1.022
Mini-Instruments SmartION	1.023

4.6 X-Işın Sisteminde Kişisel Dozimetrelerin Kalibrasyon İşlemi

Bölüm 2 de belirtilen yöntem kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon işlemleri sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki çizelgede belirtilmiştir. Burada karşılaştırma yapılması amacıyla iki farklı dedektörle kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.29 X-ışın sistemi kullanılarak gerçekleştirilen kişisel dozimetre kalibrasyon işlemi sonuçları ($H_p(10)$ niceliğine göre)

<i>Demet Kalitesi</i>	<i>X-Işın Sistemi</i>	<i>Hp(10) Dedektörü</i>	<i>TM23361 Dedektörü</i>
N60	Hp(10) için Kalibrasyon Faktörü ($\mu\text{Sv/nC}$)	23.78	24.7
N80	Hp(10) için Kalibrasyon Faktörü ($\mu\text{Sv/nC}$)	26.74	27.19
N100	Hp(10) için Kalibrasyon Faktörü ($\mu\text{Sv/nC}$)	32.33	33.94

Çizelge 4.30 X-ışın sistemi kullanılarak gerçekleştirilen kişisel dozimetre kalibrasyon işlemi sonuçları ($H_p(0.07)$ niceliğine göre)

<i>Demet Kalitesi</i>	<i>X-Işın Sistemi</i>	<i>Hp(10) Dedektörü</i>	<i>TM23361 Dedektörü</i>
N60	Hp(0.07) için Kalibrasyon Faktörü ($\mu\text{Sv/nC}$)	-	19.46
N80	Hp(0.07) için Kalibrasyon Faktörü ($\mu\text{Sv/nC}$)	-	20.82
N100	Hp(0.07) için Kalibrasyon Faktörü	-	24.73

	($\mu\text{Sv/nC}$)		
--	-----------------------	--	--

4.7 Cs-137 Işınlama Sisteminde Kişisel Dozimetrelerin Kalibrasyon İşlemi

Bölüm 2 de belirtilen yöntem kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon işlemleri sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki çizelgede belirtilmiştir. Burada karşılaştırma yapılması amacıyla iki farklı dedektörle kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.31 Cs-137 ışınlama sistemi kullanılarak gerçekleştirilen kişisel dozimetre kalibrasyon işlemi sonuçları

<i>Cs-137 Sistemi</i>	Hp(10) Dedektörü	TM23361 Dedektörü
Hp(10) için Kalibrasyon Faktörü ($\mu\text{Sv/nC}$)	30.992	30.915

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Yapılan tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmalar, testler ve kalibrasyonlara ilişkin sonuçlar bir önceki bölümde belirtilmiştir. Bu bölümde ise elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yer almaktadır.

IEC 61267 protokolünde belirlenmiş olan RQR ve RQA X-ışın demet kalitelerinden elde edilmiş olan RQR2, RQR3, RQR4, RQR5, RQR6, RQR7, RQR8, RQA2, RQA3, RQA4, RQA5, RQA6 ve RQA7 X-ışın demet kaliteleri ile ilgili veriler çizelge 4.15 ve çizelge 4.16 da belirtilmiştir. Tez çalışmasının materyal ve yöntem bölümünde de anlatıldığı üzere, çizelge 4.15 ve çizelge 4.16 da bulunan toplam tüp filtrasyonu sütununda belirtilen değerler, X-ışın sisteminin doğal filtrasyonu(inherent) ve demet kalitesinin elde edilebilmesi için eklenen filtrelerdir. Bu sütunda yazan filtre değerleri kullanılarak RQR X-ışın demet kalitesi için 1. yarı kalınlık değeri (1. HVL) ve homojenlik katsayısı, RQA X-ışın demet kalitesi içinse 1. HVL değerleri elde edilmiştir. Tüm RQR X-ışın demet kalitelerinde 1. HVL ve homojenlik katsayılarında elde edilmiş olan değerler IEC tarafından belirlenmiş olan kabul sınırları içerisinde. RQA X-ışın demet kalitesinde ise RQA8 X-ışın demet kalitesi hariç elde edilen bütün X-ışın demet kaliteleri kabul sınırları içerisinde. Bu sonucun olası sebebi, toplam filtrasyonun elde edilmesi için eklenmiş olan ilave filtrenin, protokolde belirtilen filtre kalınlığıyla tam olarak uyum sağlamamış olmasıdır.

RQR ve RQA X-ışın demet kalitelerinin elde edilmesinde X-ışın tüpüne uygulanan yüksek gerilim voltaj bölücüsü ile ölçülmüş olup elde edilen veriler çizelge 4.17 de belirtilmiştir. Bütün X-ışın demet kalitelerinde ayarlanmış olan yüksek gerilim değerleri kabul sınırları içerisinde yer almaktadır.

Sonuç olarak IEC 61267 protokolünde tanımlanmış olan RQR ve RQA X-ışın demet kalitelerinden yukarıda belirtilmiş olanları elde edilmiş ve bu X-ışın demet kaliteleri kalibrasyonlarda ve testlerde kullanılmıştır.

ISO 4037-1 protokolünde belirlenmiş olan dar spektrum serilerinden (N serileri) N40, N60, N80 ve N100 spektrumlarından elde edilmiş olan veriler çizelge 4.19 da belirtilmiştir. X-ışın tüpüne uygulanan yüksek gerilim ve 1. HVL değerleri her dört spektrum içinde kabul sınırları içerisinde. Spektrumların ortalama enerjilerinde(\bar{E}) ise N60, N80 ve N100 spektrumları için elde edilmiş olan ortalama enerji değerleri kabul sınırları içerisinde kalmıştır. Fakat N40 spektrumu için ortalama enerji değeri kabul sınırı dışında kalmıştır. Ayırma gücünde (R_E) ise N80 ve N100 spektrumlarında elde edilen değerler kabul sınırlarının içerisinde kalmış, N40 ve N60 spektrumlarında kabul sınırlarının dışarısında kalmıştır. Kabul sınırlarının dışında kalınmasının muhtemel nedenleri, kullanılan yarı iletken germanyum dedektörünün içerisinde meydana gelen düşük enerjili saçılan fotonlar ve dedektörün bulunduğu bölgeden kaynaklanan saçılan fotonlardır.

X-ışın sisteminde kolimatörün tamamen kapatılıp doz hızının ölçüldüğü ve elde edilen değerlerin kolimatörün açıkken ki ölçülen doz hızı değeri ile karşılaştırıldığı testte elde edilen sonuç kabul sınırlarının içerisinde. Bu sonuç kolimatör yapraklarından, ölçüm sonuçlarını etkileyebilecek düzeyde sızan radyasyon olmadığını göstermiştir.

IEC 61267 ve ISO 4037-1 de belirlenmiş olan X-ışın demet kalitelerinin spektrumlarının deneysel ölçümleri ve teorik olarak Xcomp5r spektrum programı ile elde edilen spektrumların karşılaştırılmaları tez çalışmasının bulgular bölümünde belirtilmiştir. ISO 4037-1 de tanımlanan N40, N60, N80 ve N100 spektrumları için ortalama enerji(\bar{E}) ve 1.HVL değerleri, Xcomp5r programı ile hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilmiş olan değerler ile uyum göstermektedir. IEC 61267 de tanımlanmış olan demet kalitelerinde ise elde edilmiş olan RQA demet kaliteleri için 1.HVL değerleri, Xcomp5r programı ile hesaplanmış ve protokolda verilen değerler ile uyum göstermektedir. RQR demet kalitelerinde ise 1.HVL değerleri, protokolda verilen değerler ile uyum göstermiştir. Fakat bu değerler Xcomp5r programı ile hesaplanmış değerlerden bir miktar farklılık göstermiştir. Bir deney düzeneği ile teorik hesaplamalarla elde edilen spektral dağılımdaki farklılıklar birçok fazla sayıdaki nedenden kaynaklanabilir. Örneğin; anot yüzeyinin pürüzlenmesi, tüp penceresine buharlaşan tungstenin yapışması, ışın içerisinde monitor chamberin (geçirgen iyon

odası) bulunması, filtre kalınlıklarındaki nominal değerden sapmalar, odak noktası ve test noktası arasındaki uzunluk farklılıkları, ölçüm anındaki atmosferik basınç ve sıcaklık ölçümündeki belirsizlikler gibi nedenlerin yanında diğer bir olası sebep ise programa girilen filtre değerinin deneysel olarak hesaplanması ve bu düşük filtre değerlerinde, kullanılan yarı iletken germanyum dedektörünün içerisinde meydana gelen düşük enerjili saçılan fotonların ve dedektörün bulunduğu bölgeden kaynaklanan saçılan fotonların ölçüm sonuçlarına etkisinin yüksek olmasıdır.

Cs-137 ışınlama sisteminde farklı referans dedektörlerle yapılan doz hızı ölçümlerinin sonuçları bulgular bölümünde belirtilmiştir. Her iki kaynak(47 mCi – 8.58 Ci) ile de aynı mesafelerde doz hızı ölçümü, kullanılan referans dedektörlerin minimum doz hızı limit değerleri farklı olduğundan mümkün olmamıştır. 47 mCi' lik kaynak ile alınan verilerde mesafenin uzun tutulmamasının sebebi kullanılan referans dedektörlerin minimum doz hızı limitlerinin dışına çıkmış olmasıdır. Bu kısımda elde edilmiş olan veriler Cs-137 ışınlama sisteminde yapılan testlerde ve kalibrasyonlarda referans veri olarak kullanılmıştır.

Farklı referans dedektörler kullanılarak birçok mesafede ölçülmüş olan doz hızı değerleri ile bu doz hızı değerlerinden elde edilmiş olan teorik doz hızı değerlerinin karşılaştırılması sonucunda elde edilen sonuçlar kabul sınırları içerisinde kalmıştır. Bu test de elde edilen bütün mesafelerdeki sonuçlar limit değerlerin içerisinde kalmış olsa da kaynağa yakın olan mesafelerdeki % farklar nispeten kaynağa uzak olan mesafelerdeki % farklardan yüksek çıkmıştır. Bunun asıl sebebi kaynağa yakın mesafelerdeki saçılan ışınların fazlalığıdır. Aynı şekilde farklı referans dedektörler ile aynı mesafelerde alınan ölçüm sonuçlarının karşılaştırılmasında da elde edilen değerler kabul sınırlarının içerisinde kalmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda Cs-137 ışınlama sistemi ile yapılan doz hızı ölçümlerinin doğruluğu kesinleşmiştir.

Cs-137 ışınlama sisteminde azaltıcı levhaların farklı mesafelerdeki azaltma katsayılarının belirlendiği grafik bulgular bölümünde bulunan şekil 4.61 de belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, kullanılan azaltıcı levhaların azaltma katsayıları artan kaynak-dedektör mesafesiyle birlikte artmaktadır. Bunun olası

sebepleri yakın kaynak-dedektör mesafelerinde dedektöre ulaşabilen, azaltıcı levhalardan düşük açı ile saçılmış olan fotonların artan mesafeyle birlikte dedektöre ulaşamaması ve yakın dedektör-kaynak mesafelerindeki kolimatör çıkışından ve çevreden saçılan ışınların miktarının, uzak dedektör-kaynak mesafelerindeki saçılan ışın miktarından fazla olmasıdır. Bunun sonucunda da azaltıcı levhaların azaltma katsayıları artan kaynak-dedektör mesafesiyle artmıştır.

Cs-137 ışınlama sisteminde, 2 metrede saçılan ışınların doz hızı ölçümlerine olan etkisinin belirlenmesi ve ışınlama alanındaki doz dağılımının belirlenmesi ile ilgili testlerin sonuçları bulgular bölümünde belirtilmiştir. 2 metrede saçılan ışınların ölçüm sonuçlarına olan katkısının belirlendiği testte elde edilen sonuçlar doğrultusunda, saçılan ışınların doz hızı ölçümlerine olan katkıları kabul sınırlarının altındadır. Aynı şekilde 2 metrede gerçekleştirilen, ışınlama alanındaki doz dağılımının belirlendiği teste ise merkezdeki doz dağılımının %5'i içerisinde kalan 47.9 cm çaplı alan, kalibrasyon işlemi esnasında kalibre edilecek olan dedektörün yerleştirilmesi gereken alandır.

Materyal ve yöntem bölümüne anlatılan, X-ışın sistemi ve Cs-137 ışınlama sistemi kullanılarak gerçekleştirilen dedektör kalibrasyon işlemlerinin sonuçları sırasıyla çizelge 4.26 ve çizelge 4.27 de belirtilmiştir. X-ışın sistemi kullanılarak Radcal marka farklı modellerdeki iyon odalarının enerji bağımlılıkları ile ilgili sonuçlar bulgular bölümüne belirtilmektedir. Radcal marka dedektörlerin enerji bağımlılıkları kullanma kılavuzlarında, 30 keV- 1.33 MeV aralığında $\pm\%5$ olarak belirtilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda sadece 16446 seri numaralı dedektörün 82 keV deki enerji bağımlılığı $\pm\%5$ 'lik limitlerin dışarısında kalmıştır. Bunun dışında enerji bağımlılığı belirlenen bütün dedektörlerin enerji bağımlılıkları üretici firma tarafından belirtilen limit değerler içerisinde kalmıştır.

EKLER

EK 1

1. Cs-137 Işınlama Sistemi ile Geiger-Müller (GM) Dedektörünün Kalibrasyonu

Geiger-Müller(GM) dedektörünün kalibrasyonu Cs-137 ışınlama sisteminde ve kuramsal temeller bölümünde açıklanmış olan 4. kalibrasyon metoduna göre gerçekleştirilmiştir. Burada unutulmaması gereken husus aynı kalibrasyon işleminin 1. ve 3. kalibrasyon metotlarıyla da gerçekleştirilebileceğidir.

Hatırlanacağı üzere bu metot da referans dedektör ile belli bir tarihte alınmış olan doz hızı değerleri azalım düzeltilmesi uygulanarak kullanılmaktadır. Bu sebepten dolayı TM 23361 referans dedektörü ile 09.11.2009 tarihinde yapılmış olan doz hızı ölçümleri, kalibrasyonun gerçekleştirileceği tarih olan 26.03.2010 tarihine göre hesaplanmış olan azalım düzeltme faktörü ile çarpılmıştır. Kalibrasyon işlemi, GM dedektörünün ölü zamana girmeyeceği bir doz hızı değerinde gerçekleştirilmelidir. Bu amaçla kalibrasyon işlemi 2 metre mesafede ve A3 azaltıcı levhası kapalıyken gerçekleştirilmiştir.

09.11.2009 tarihinde 2 metredeki A3 azaltıcı levhası kapalı durumdaki doz hızı 8.75 $\mu\text{Gy/dakika}$ 'dır. 09.11.2009 tarihinden 26.03.2010 tarihine kadar olan azalım düzeltilmesi hesabı aşağıdaki gibi yapılmaktadır.

$$\dot{H}(t) = \dot{H}(0) \exp(-0.693t / t_{1/2})$$

Burada;

$\dot{H}(t)$, başlangıç ölçümünden($\dot{H}(0)$) belli bir t zaman sonraki doz hızı,

$\dot{H}(0)$, referans ölçüm aleti ile ölçümün yapıldığı zamanki doz hızı.

Cs-137 radyoaktif kaynağının yarı ömrü: 11050 gün (Anonymous, 1996)

t, 09.11.2009 – 26.03.2010 tarihleri arasındaki gün sayısı: 137

Gerekli hesaplamalar yapıldığında azalım faktörü 0.99144 olarak hesaplanmıştır. Bu faktörün 09.11.2009 tarihindeki doz hızı değeri ile çarpılması sonucu 26.03.2010 tarihindeki doz hızı değeri 8.68 µGy/dakika olarak hesaplanmıştır.

Kullanılan GM dedektörü ortam eşdeğer doz hızı cinsinden ölçüm yaptığı için referans iyon odası ile yapılan hava kerma ölçümünün, ortam eşdeğer doz hızına uygun bir katsayı ile çarpılarak dönüştürülmesi gerekir. Bu sebeple çizelge 2.15 de Cs-137 radyoaktif kaynağı için belirtilmiş olan h*(10) dönüşüm katsayısı kullanılmıştır. Bu değer 1.20 Sv/Gy' dir. 2 metrede A3 azaltıcı levhası kullanılarak elde edilmiş olan 8.68 µGy/dakika 'lık hava kerma değeri, h*(10) dönüşüm katsayısı ile çarpıldıktan sonra 10.416 µSv/dakika olarak hesaplanmıştır.

GM dedektörünün aktif yüzeyindeki referans noktası 2 metreye ve ışın demetinin merkezine gelecek şekilde yerleştirildikten sonra dedektör açılmış ve 5 dakika dedektörün ısınması için beklenmiştir. Bu işlemden sonra ortam(background) ölçümü yapılmıştır. Elde edilen ölçümler sırasıyla 0.21, 0.20, 0.20, 0.18, 0.22, 0.20, 0.20, 0.19, 0.20 ve 0.20 µSv/saat' dır. Ortalama background değeri;

$$\overline{M}_0 = 0.20 \mu\text{Sv/saat}$$

olarak kayıt edilmiştir.

Background ölçümü alındıktan sonra ölçümler arasında yeterli bir miktar zaman olacak şekilde peş peşe 10 adet ölçüm alınmıştır. Elde edilen ölçümler sırasıyla 612, 612, 608, 613, 613, 612, 611, 612, 615 ve 614 µSv/saat' dır. Elde edilen ölçümlerin ortalama değeri;

$$\overline{M} = 612.2 \mu\text{Sv/saat}$$

olarak kayıt edilmiştir. Ölçümlerin ortalama değerinden background değerinin farkı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$(\bar{M} - \bar{M}_0) = 612.2 - 0.20 = 612 \text{ } \mu\text{Sv/saat}$$

Bu değer $\mu\text{Sv/dakika}$ ' ya çevrilirse 10.20 $\mu\text{Sv/dakika}$ olarak hesaplanır.

Ölçümler esnasında basınç ve sıcaklık sürekli olarak ölçülmüştür. Sıcaklık değeri 293 K⁰ ile 295 K⁰ arasında, basınç değeri ise 101.6 kPa ile 101.8 kPa arasında değişim göstermiştir.

Sıcaklık ve basınç düzeltme faktörleri;

$$k_T = \frac{T}{T_0}, \bar{T} = 294 \text{ K } T_0 = 293.15 \text{ K}^0; \quad k_T = 1.004$$

$$k_{pr} = \frac{P_0}{P}, \bar{P} = 101.7 \text{ kPa } P_0 = 101.3 \text{ kPa}; \quad k_P = 0.996$$

Kalibre edilen GM dedektörünün kalibrasyon faktörü aşağıdaki formülden elde edilmiştir.

$$N_I = \frac{H}{M_I}$$

Burada;

N_I , kalibrasyonu yapılan ölçüm cihazının kalibrasyon faktörü (referans koşullardaki);

M_I , referans koşullara göre düzeltilmiş, yani gösterge değeri uygun düzeltme katsayıları ile çarpılmış (örneğin hava yoğunluğundaki değişikler için), kalibrasyonu yapılan ölçüm aleti ile ölçülmüş değer;

H, 26.03.2010 tarihindeki 2 metre mesafede ve A3 azaltıcı levhası kapalı durumdaki ortam eşdeğer doz hızı.

$$H = 10.416 \text{ } \mu\text{Sv/dakika}$$

M_I değeri aşağıdaki formülden elde edilmiştir.

$$M_I = (\bar{M} - \bar{M}_0)k_p k_T$$

$$M_I = 10.1998 \mu\text{Sv/dakika}$$

GM dedektörünün kalibrasyon faktörü, N_I ;

$$N_I = \frac{H}{M_I} \Rightarrow N_I = \frac{10.416 \mu\text{Sv / dakika}}{10.1998 \mu\text{Sv / dakika}} = 1.022 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

EK 2

1. X-IŞIN SİSTEMİ İLE KİŞİSEL DOZİMETRE KALİBRASYONU

1.1 Radyografik Işınlamalarla Kişisel Dozimetre Kalibrasyonu

2. bölümde de açıklandığı üzere kişisel dozimetrelerin kalibrasyonu havada yapılmaz. Bunun yerine insan vücudunun çeşitli bölgelerini temsil eden fantomlarda kalibrasyon işlemi gerçekleştirilir.

Öncelikle kalibrasyon işleminin gerçekleştirileceği X-ışın demet kalitesi belirlenmiştir. Bu amaçla ISO tarafından belirlenmiş olan dar spektrum serilerinden N60 X-ışın demet kalitesi seçilmiştir. Kalibrasyon işleminde kullanılacak referans dedektör olarak TM32005 referans dedektörü seçilmiştir.

Kalibrasyon işlemi için öncelikle, referans dedektör 2 metre mesafeye yerleştirilmiştir. 2. bölümde de açıklandığı üzere kişisel dozimetreler kişisel eşdeğer doz niceliğine göre kalibre edilirler. Fakat referans dedektör hava kerma niceliğinde okuma yaptığı için, ISO tarafından belirlenmiş olan dönüşüm katsayıları kullanılarak (Çizelge 2.19), hava kerma niceliğinden kişisel eşdeğer doz niceliğine geçiş sağlanmıştır. Bu dönüşüm aşağıdaki formül yardımıyla sağlanmıştır.

$$H_p(10;E,\alpha) = K_a \times h_{pk}(10;E, \alpha)$$

Burada;

$H_p(10;E,\alpha)$, kişisel eşdeğer doz,

K_a , hava kerma,

$h_{pk}(10;E, \alpha)$, hava kermadan kişisel eşdeğer doza dönüşümü sağlayan katsayıdır.

Toplamda kalibrasyon için kişisel dozimetrelere 100 μSv 'lik doz verilmesi amacıyla ışınlama parametreleri ayarlanmış ve referans dedektör havada ışınlanmıştır. Elde edilen

hava kerma değeri 60 µGy'dir. Çizelge 2.19'a göre $h_{pk}(10;E, \alpha)$ değeri 1.65 µSv/µGy'dir. Sonuç olarak kişisel eşdeğer doz değeri;

$$\begin{aligned} H_p(10;E,\alpha) &= K_a \times h_{pk}(10;E, \alpha) \\ &= 60 \times 1.65 \end{aligned}$$

$H_p(10;E,\alpha) = 99 \mu\text{Sv}$ olarak hesaplanmıştır.

Referans dedektörün ışınlaması esnasında, tüp çıkışındaki olası dalgalanmaların ölçüm sonuçlarına etkisini ortadan kaldıran monitor chamber da ışınlanmıştır. Bu dedektörde elde edilen ölçüm sonucu 1283 µGy'dir.

İkinci aşamada referans dedektör kaldırılmış, kişisel dozimetre ISO slab (gövde) fantomu üzerine, referans noktası referans dedektörün referans noktasının yerine gelecek şekilde yerleştirilmiştir(Bkz. Şekil 2.39). Işınlama parametreleri değiştirilmeden kişisel dozimetre ve eş zamanlı olarak monitor chamber ışınlanmıştır. Kişisel dozimetre TLD kart okuyucusunda okunduktan sonra elde edilen değer 3.993 nC'dur. Monitor chamber da elde edilen değer ise 1269.2 'dir. Aşağıdaki formül yardımıyla kişisel dozimetrenin kalibrasyon faktörü elde edilmiştir.

$$N_I = \left(\frac{H_p(10, E, \alpha)}{m_R} \right) \left(\frac{m_I}{M_I} \right)$$

Burada;

$H_p(10;E,\alpha)$, referans dedektör ile ölçülmüş kişisel eşdeğer doz niceliğindeki değer,

M_I , kalibrasyonu yapılan dozimetre ile ölçülmüş değer;

m_R , referans koşullara göre düzeltilmiş, yani gösterge değeri uygun düzeltme katsayıları ile çarpılmış (örneğin hava yoğunluğundaki değişimler için), referans ölçüm aletinin ışınlaması esnasında monitor chamber tarafından ölçülen değer;

m_I , referans koşullara göre düzeltilmiş, yani gösterge değeri uygun düzeltme katsayıları ile çarpılmış (örneğin hava yoğunluğundaki değişimler için), kalibrasyonu yapılan ölçüm aletinin ışınlanması esnasında monitor chamber tarafından ölçülen değerdir.

$$N_I = \left(\frac{Hp(10, E, \alpha)}{m_R} \right) \left(\frac{m_I}{M_I} \right)$$
$$= \left(\frac{99}{1283} \right) \left(\frac{1269.2}{3.993} \right)$$

$$N_I = 24.53 \mu\text{Sv/nC}$$

1.2 Sürekli Işınlamalarla Kişisel Dozimetre Kalibrasyonu

Ek 4 1.1 de anlatıldığı üzere kişisel dozimetrelerin kalibrasyonunda radyografik ışınlamalar kullanılabilir. Yine aynı şekilde sürekli ışınlamalar yapılarak da kişisel dozimetrelerin kalibrasyonu gerçekleştirilebilir. Bu kısımda da bu yöntem basamaklandırılarak anlatılmış ve örneklenmiştir.

1. Öncelikle ISO tarafından belirlenmiş olan X-ışın demet kalitelerinden biri seçilir.
2. Referans dedektör ya da ISO slab (gövde) fantom üzerindeki dozimetreler en az 2 metrede ışınlanmalıdırlar.
3. Gövde fantomu ve dozimetreler yokken, referans dedektör ve monitor chamber eş zamanlı olarak ışınlanırlar. Bu ışınlamalar sonucunda hava kerma (K_a) ölçülür.
4. Çizelge 2.19 da ki uygun dönüşüm katsayısı (C) ile ölçülen hava kerma değeri (K_a) çarpılır. Bu sayede kişisel eşdeğer doz niceliği elde edilmiş olunur Hp(10). Kişisel eşdeğer doz niceliği, monitor chamber da okunan bir D değerinde ($C.K_a$)'dır. Böylece monitor chamber da ki her birim, kişisel eşdeğer doz niceliği için ($C.K_a$)/D olarak tanımlanabilir.

5. Bu işlemlerden sonra referans dedektör kaldırılır. Kişisel dozimetre ISO slab (gövde) fantomu üzerine, referans noktası referans dedektörün referans noktasının yerine gelecek şekilde yerleştirilir.
6. Kişisel dozimetreye verilecek olan eşdeğer doz miktarı belirlenir (H) ve kişisel dozimetre, monitor chamber da ki değer (H.D)/ (C.K_a) oluncaya kadar ışınlanır.
7. Son olarak kişisel dozimetre TLD kart okuyucusunda okunur. Okunan değer (A) nC biriminde olduğu için, verilen eşdeğer doz niceliğine (H) eşitlenerek kalibrasyon faktörü hesaplanır.

Bu maddeler aşağıdaki örnekle açıklanmıştır.

Referans demet kalitesi olarak ISO tarafından belirlenmiş olan N80 X-ışın demet kalitesi seçilmiştir. Referans dedektör herhangi bir fantom olmadan 2 metreye yerleştirilmiş ve kolimasyon yapıldıktan sonra hem referans dedektör hem de monitor chamber eş zamanlı olarak ışınlanmıştır. Referans dedektör okuması (K_a) 60 µGy, monitor chamber okuması (D) 1200 µGy olarak kaydedilmiştir. Hava kerma olarak ölçülmüş olan referans dedektör okuması çizelge 2.19 da ki uygun dönüşüm katsayısı (C) kullanılarak kişisel eşdeğer doz niceliğine dönüştürülmüştür.

$$C.K_a = 1.88 \mu\text{Sv} / \mu\text{Gy} \cdot 60 \mu\text{Gy}$$

$$C.K_a = 112.8 \mu\text{Sv}$$

Monitor chamber da ki her bir birim;

$$(C.K_a)/D$$

$$112.8 \mu\text{Sv} / 1200 \mu\text{Gy}$$

$$(C.K_a)/D = 0.094 \mu\text{Sv} / \mu\text{Gy} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Bu işlemlerden sonra referans dedektör kaldırılmıştır. Kişisel dozimetre ISO slab (gövde) fantomu üzerine, referans noktası referans dedektörün referans noktasının yerine gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Kişisel dozimetreye 100 µSv verilmek istenmiştir.

$$\begin{aligned}\text{Monitor chamber da okunacak değer} &= \frac{H.D}{C.K_a} \\ &= \frac{100\mu\text{Sv}.1200\mu\text{Gy}}{1.88\text{Sv/ Gy}.60\mu\text{Gy}} \\ &= 1063.83 \mu\text{Gy}\end{aligned}$$

Bu durumda monitor chamber da okunan değer 1063.83 μGy olduğunda ışınlama kesilmiştir. Bunun sonucunda da kişisel dozimetreye 100 μSv verilmiştir.

Kişisel dozimetre TLD kart okuyucusunda okunmuştur. Okunan değer (A) 4.055 nC'dur.

Kalibrasyon faktörü;

$$\begin{aligned}\text{Kalibrasyon faktörü} &= 100 \mu\text{Sv}/4.055 \text{nC} \\ &= 24.66 \mu\text{Sv/ nC} \text{ olarak hesaplanmıştır.}\end{aligned}$$

EK 3

1. BELİRSİZLİKLER

Herhangi bir ölçümün amacı; ölçüm değerinin doğru elde edilmesidir. Doğal olarak ölçülen değer ile ölçümün ‘doğru’ değeri arasındaki fark(ölçüm hatası) hiçbir zaman sıfır olmaz. Bu değer küçük olabileceği gibi aynı zamanda çok büyük değerlere de ulaşabilir. Aynı zamanda pozitif ya da negatif de olabilir. Bu hata hiçbir zaman kesinlikle bilinemez ve her biri farklı hata kaynağına sahip farklı sayıda bileşenleri vardır. Ölçümün ne kadar ‘yanlış’ olduğunu tanımlayan ölçüme ölçümün belirsizliği denir.

Ölçümlerdeki belirsizliklerin tanımlanması üzerine ISO tarafından hazırlanan rehber, belirsizliklerin belirlenmesi ve rapor edilmesinin yöntemlerinin tanımlarını ve açıklamalarını vermektedir. Bu rehberde ölçümlerdeki belirsizliklerin nasıl belirleneceği anlatılmıştır. Bu rehber belirsizlik değerlendirme yöntemine dayanan A ve B tipi belirsizliklerin kullanılmasını önermektedir. İstatistiksel metotlar A tipi belirsizliği değerlendirmede kullanılır. Bunun tersi olarak B tipi belirsizlikler diğer araçlar ile tanımlanırlar.

1.1 A Tipi Standart Belirsizlik

n tane ölçümün alındığı bir ölçüm serisinde her bir ölçümün değeri x_i ise aritmetik ortalama değeri \bar{x} ;

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

olarak tanımlanır. Ortalama değer etrafındaki ölçülen değerlerin dağılımı tek bir ölçüm için, x_i , standart sapma olarak $s(x_i)$, tanımlanır. Standart sapma, $s(x_i)$,

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

formülü ile tanımlanır. Genelde en çok ilgilenilen parametre, $s(\bar{x})$ olarak yazılan ortalama değerin standart sapmasıdır. Genel olarak;

$$s(\bar{x}) = \frac{1}{\sqrt{n}} s(x_i)$$

olarak tanımlanır.

u_A ile ifade edilen A tipi belirsizlik, istatistiksel olarak bağımsız gözlemlerin ortalamasının standart sapması olarak tanımlanır.

$$u_A = s(\bar{x})$$

Bu eşitlik, herhangi bir nicelik ölçümünün A tipi belirsizliğinin ölçüm sayısının artmasıyla daima azalacağını göstermektedir. A tipi belirsizliğin güvenilirliğinin değerlendirilmesi, düşük sayılı ölçümlerde ($n < 10$) mutlaka dikkate alınmalıdır. A tipi belirsizlik, tekrar eden ölçümlerin istatistiksel analizi kullanılarak elde edilir.

1.2 B Tipi Standart Belirsizlik

Ölçümlerin tekrar edilmesiyle hesaplanamayan çok sayıda ölçüm belirsizliği kaynağı vardır. Bunlara B tipi belirsizlikler denir. Bunlar yalnızca bilinmeyen belirsizlikler değildirler. Bunlar beklenildiği halde ölçüm sürecini etkileyen, ama aynı zamanda küçük etkilerin (basınç ve sıcaklık değişiminden dolayı iyon odasındaki mekanik deformasyonlar) düzeltme faktörlerinin uygulanması ya da fiziksel bilgilerin literatürden alınması ile hesaplanan belirsizliklerdir.

B tipi standart belirsizlik aşağıdaki eşitlikten elde edilir.

$$u_B = \frac{L}{k}$$

Burada $\pm L$ hesaplanmış(tahmini) limitlerde, eğer $k=2$ seçilirse ‘oldukça kesin’, $k=3$ seçilirse ‘tam olarak kesin’ kabul edilir. $k=2$ seçildiği ‘oldukça kesin’ durumu %95’lik güven sınırının, $k=3$ seçildiği ‘tam olarak kesin’ durumu ise %99’luk güven sınırı içerisinde. Bu bağıntılar Gauss dağılımının özelliklerine uyarlar.

1.3 Birleştirilmiş Belirsizlikler ve Genişletilmiş Belirsizlikler

A ve B tipi belirsizliklerin her ikisi hesaplanmış standart sapmalardır. Bundan dolayı bunlar, birleştirilmiş sapmalar için istatistiksel kurallar kullanılarak birleştirilmişlerdir. Eğer u_A ve u_B sırasıyla bir niceliğin A ve B tipi standart belirsizlikleri ise bu niceliğin birleştirilmiş standart belirsizliği, u_C ,

$$u_C = \sqrt{(u_A^2 + u_B^2)}$$

şeklinde tanımlanır. Bu formül, belirsizlik kaynakları birbiriyle ilişkili değilse geçerlidir.

KAYNAKLAR

Anonymous. 2000. Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments. IAEA (International Atomic Energy Agency); Safety Reports Series No. 16

Anonymous. 2007. Dosimetry In Diagnostic Radiology: An International Code Of Practice. IAEA (International Atomic Energy Agency); Technical Reports Series No.457

Anonymous. 1999. Assessment Of Occupational Exposure Due To External Sources Of Radiation. IAEA (International Atomic Energy Agency); Safety Standards Series No.RS-G-1.3

Anonymous. 2005. Medical Diagnostic X-Ray Equipment- Radiation Conditions for Use in the Determination of Characteristics. IEC (International Electrotechnical Commission); IEC 61267

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 characteristics and production methods. ISO (International Organization for Standardization); 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 (International Organization for Standardization); 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 (International Organization for Standardization); ISO 4037-3

Anonymous. 1993. Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry. ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements); ICRU REPORT 51

Anonymous. 2005. Patient Dosimetry for X Rays Used in Medical Imaging. ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements); ICRU REPORT 74

Anonymous. 1999. Technical recommendations on measurements of external environmental gamma radiation doses. European Commission; Radiation Protection 106

Aleinikov V.E. 1999. Calibration of Personal Dosimeters: Quantities and Terminology. IAEA-TECDOC-1126

Bor D. 2009. Doğan Bor Ders Notları. Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü

Böhm J. 1999. Calibration of Personal Dosimeters for Photon Radiation with Respect to the Personal Dose Equivalent Hp(10). IAEA-TECDOC-1126

Christensen P , Julius H.W. and Marshall T. O. 1994. Technical recommendations for individuals occupationally exposed to external radiation, Radiation Protection 73 Report EUR 14852, European Commission

DeWerd L.A. and Wagner L.K. 1999. Characteristics of Radiation Detectors for Diagnostic Radiology, Applied Radiation and Isotopes 50(1999) 125-136

- Faison C.D. and Brickenkamp C.S. 2004. Calibration Laboratories Technical Guide for Ionizing Radiation Measurements. NIST (National Institute of Standards and Technology); NIST HANDBOOK 150-2D
- Griffith R.V. 1999. Quantities and Units for External Dose Assessment. IAEA-TECDOC-1126
- Knoll, F.G. 2000. Radiation Detection and Measurement Third Edition. Wiley, 816, New York.
- Krane K.S. 1987. Introductory Nuclear Physics, 845, Wiley
- Lamperti P.J. and O'Brien M. 2001. Calibration of X-Ray and Gamma-Ray Measuring Instruments. NIST Special Publication 250-58
- Read L.R. and Hageen M. 1988. Realisation of the ISO Narrow Spectrum Series of Filtered Radiations at the National Physical Laboratory. Division of Radiation Science and Acoustics, National Physical Laboratory, Teddington TW11 0LW, UK
- Strachotinsky C. and Stadtmann H. 1999. Calibration of a Personal Dosimeter in the Field of a Radionuclide. IAEA-TECDOC-1126

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Kerem DURUER
Doğum Yeri : Ankara
Doğum Tarihi : 01 / 10 / 1984
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce, Almanca

Eğitim Durumu:

Lise :Ankara Hacı Ömer Tarman Anadolu Lisesi, (1999-2002)
Lisans :Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği
Bölümü, (2003-2008)
Yüksek Lisans :Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Medikal Fizik
Anabilim Dalı (Eylül 2008-Eylül 2010)

