

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**40 – 100 kV<sub>p</sub> X-IŞINI DEMET KALİTELERİNDE BOROSİLİKAT CAM VE  
BOROKSİT İLE KALSİYUM SÜLFAT YÜKLEMELİ PARAFİNİN  
ZAYIFLATMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE ÖN KOL VEYA  
BACAĞI TEMSİL EDEN BİR SU EKSTREMİTE FANTOMU İLE  
KARŞILAŞTIRILMASI**

**ARİFE İNCİ**

**MEDİKAL FİZİK ANABİLİM DALI**

**ANKARA  
2014**

**Her hakkı saklıdır**

## TEZ ONAYI

Arife İNCİ tarafından hazırlanan “40– 100 kV<sub>p</sub> X-ışını demet kalitelerinde borosilikat cam ve boroksit ile kalsiyum sülfat yüklemeli parafinin zayıflatma özelliklerinin incelenmesi ve ön kol veya bacağı temsil eden bir su ekstremite fantomu ile karşılaştırılması” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Medikal Fizik Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : (Prof. Dr. Haluk YÜCEL)

Jüri Üyeleri :

Prof. Dr. Haluk YÜCEL, Ankara Üniversitesi  
Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü

Doç. Dr. Turan OLĞAR, Ankara Üniversitesi

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü

Doç. Dr. Bahar DİRİCAN, GATA

Gülhane Askeri Tıp Akademisi, Radyasyon Onkolojisi Anabilim Dalı

**Yukarıdaki sonucu onaylarım.**

**Doç. Dr. Niyazi MERİÇ**  
**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

40 – 100 kV<sub>p</sub> X-IŞINI DEMET KALİTELERİNDE BOROSİLİKAT CAM VE BOROKSİT İLE KALSİYUM SÜLFAT YÜKLEMELİ PARAFİNİN ZAYIFLATMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE ÖN KOL VEYA BACAĞI TEMSİL EDEN BİR SU EKSTREMİTE FANTOMU İLE KARŞILAŞTIRILMASI

ARİFE İNCİ

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü  
Medikal Fizik Anabilim Dalı  
Sağlık Fiziği Yüksek Lisans Programı

Danışman: Prof.Dr. Haluk YÜCEL

Diagnostik radyolojide, klinik uygulamalardan önce hasta dozlarının ve görüntü kalitesinin doğru bir şekilde fantomlarla belirlenmesi için bazı doku eşdeğeri malzemelerin radyasyonu zayıflatma özelliklerinin bilinmesi önemlidir. Bir malzemenin doku eşdeğeri kabul edilebilmesi için dikkat edilen en önemli özelliği insan dokusuyla aynı zayıflatma özelliklerine sahip olmasıdır. Piyasada bu amaçla yaygın olarak kullanılan fantomlar mevcuttur, örneğin PMMA (polimetil metakrilat), bazı plastikler, su vb. Bu tezde borosilikat camın X-ışını zayıflatma özellikleri ölçülmüş ve normal plaka cama göre yarı değer kalınlığı (HVL) değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Tüm ışınlamalar 40-100 kV<sub>p</sub> radyolojik enerji aralığında EN/IEC 61267 protokolüne uygun olarak RQR X-ışını demetleri ile yapılmıştır. Daha sonra doku eşdeğeri fantom üretmek amacıyla Bor oksit (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve Kalsiyum sülfat (CaSO<sub>4</sub>) bileşikleri ayrı ayrı parafinle (C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>) karıştırılmıştır. Son olarak bir borosilikat cam tüp, hem B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı parafinle hemde CaSO<sub>4</sub> katkılı parafinle doldurulmuş ve zayıflatma özellikleri, PMMA'dan yapılmış, ön kolu veya bacağı temsil eden bir ekstremite su fantomu ile karşılaştırılmıştır. Tüm ölçümlerde X-ışını transmisyon verileri radyometrik benç üzerine yerleştirilmiş 28 cm<sup>3</sup> PTW-tipi, kalibrasyonlu bir iyon odası ile elde edilmiştir. Tüm fantomların zayıflatma özellikleri, ölçülmüş doz değerlerinden elde edilen HVL değerleri cinsinden belirlenmiştir.

Borosilikat cam için elde edilen birinci HVL değerinin normal cama göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle radyolojik enerji aralığındaki X-ışınlarında borosilikat cam zırhlama açısından cama göre daha az etkilidir. Bu durum temel olarak camın içerisinde yoğun bir şekilde bulunan bor elementinin düşük atom numarasından (Z=5) kaynaklanmaktadır. Bu yüzden, borosilikat cam, kalsiyum sülfat katkılı parafin gibi diğer katkılarla birlikte kullanıldığında kemik malzemesini temsil edebilir. Örneğin parafin %20'ye varan oranlarda CaSO<sub>4</sub> ile karıştırıldığında foton azalım özellikleri HVL cinsinden 70 kVp'de %36 kadar değişmiştir. Buna karşılık önerilen fantomlara B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı olduğunda, foton azalım etkisinde (HVL cinsinden) ilgilenilen radyolojik enerji aralığında belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir.

Bu karışımlar, kolaylıkla imal edilebilen doku eşdeğeri, homojen fantomlar üretmek için kullanılabilirler. Aynı zamanda karışım oranlarının değiştirilebilir olması, kullanıcının farklı doku tiplerini temsil edebilmesine, özellikle kemik dokusu eşdeğerliğine izin verir. Bir ekstremite fantomunu (ön kol veya bacak) temsil etmesi için, su dolu PMMA sütun fantomunun birinci HVL değerleri, %18 CaSO<sub>4</sub> içeren parafin karışımı dolu borosilikat cam tüpten %2,6-%23,3 aralığında değişmektedir. Bu tezde transmisyon ölçümlerinin ayrıntıları verilmiştir ve önerilen fantom karışımları açısından tartışılmıştır.

**2014, 88 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** X-ışını tüpü, Demet kalitesi, Fantom, Zayıflatma özellikleri, Parafin, Borosilikat, Cam, Boroksit, Kalsiyum sülfat, Doz, İyon odası.

## ABSTRACT

### Master Thesis

INVESTIGATION OF ATTENUATION PROPERTIES OF  
BOROSILICATE GLASS AND PARAFFIN LOADED BY BORON OXIDE AND CALCIUM  
SULPHATE USING 40–100 kV<sub>p</sub> X-RAY BEAM QUALITIES AND IN COMPARISON WITH AN  
WATER EXTREMITY PHANTOM REPRESENTING A FORE ARM OR LEG.

ARİFE İNCİ

Ankara University, Institute of Nuclear Sciences

Department of Medical Physics

Supervisor: Prof. Dr. Haluk YÜCEL

In diagnostic radiology, the knowledge of attenuation properties of some tissue equivalent materials is required for accurate characterization of patient doses in phantoms before clinical applications. Therefore, The main interest for being tissue equivalent is to have a similar attenuation characteristic of human tissue some tissue equivalent materials such as PMMA (polymethyl methacrylate), plastics, water etc. are generally used to produce phantoms used in medical market. In this thesis, the X-ray attenuation properties of borosilicate glass were measured and compared with those of normal plate glass in terms of HVL (half-value layer). All irradiations were carried out in the radiologic energy range of 40–100 kV<sub>p</sub> by use of RQR X-ray beams in accordance with EN/IEC 61267 protocol. Then, boron oxide (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and calcium sulphate (CaSO<sub>4</sub>) are sequentially mixed with paraffin (C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>) to produce tissue equivalent phantoms. In the end, the borosilicate glass tube are filled by paraffin mixed with either B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or CaSO<sub>4</sub>, and its attenuation are compared with that of an extremity phantom, made of PMMA representing the fore arm or leg (pillar phantom). In all measurements, the X-ray transmission data were obtained from a calibrated 28 cm<sup>3</sup> PTW-type, ionization chamber placed in a radiometric bench. Then the attenuation properties are characterized in terms of the first HVL from the measured dose values for all phantoms.

It is found that the first HVL of borosilicate glass is higher than that of normal plate glass, thus yielding to borosilicate glass is less effective for shielding of X-rays in the radiologic energy range. This might be mainly due to its high content of boron element, which has a low atomic number (Z=5). This implies that borosilicate glass can be mimic the bone material together with use of other additives such as paraffin loaded by calcium sulphate. For instance, when paraffin was mixed with different amounts up to 20% CaSO<sub>4</sub>, the attenuation properties in terms of HVL are changed by 36% at 70 kV<sub>p</sub>. On the other hand, the results for HVLs for the proposed phantom mixtures indicated that B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> additive did not make any significant changes in the attenuation properties of paraffin in radiological energy range of interest.

These mixtures may be used for the production of homogenous, approximate tissue equivalent phantoms which can easily be fabricated. Also changing the mixing ratio can allow the user to simulate and mimic different tissue types especially for bone tissue. In order to represent an extremity phantom, the first HVL for a PMMA pillar phantom differ from that our proposed phantom consisted of a borosilicate glass tube, paraffin and 18% CaSO<sub>4</sub> by 2.6%-23.3%. In this thesis, the details of transmission measurements are given and discussed for the proposed phantom mixtures.

**2014, 88 page**

**Key Words:** X-ray tube, Beam quality, Phantom, Attenuation, Paraffin, Borosilicate glass, Plate glass, Boron oxide, Calcium sulphate, Dose, Ionization.

## TEŞEKKÜR

Tecrübesiyle, beni daima bilgilendiren, yönlendiren, yüksek lisans eğitimim boyunca üzerimde büyük emeği olan, birlikte çalışmaktan ve öğrencisi olmaktan onur duyduğum danışman hocam Sayın Prof. Dr. Haluk YÜCEL'e,

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyen Arş.Gör. Şölen ÇUBUKÇU'ya ve Arş.Gör. Emre GÜLLÜOĞLU'na,

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'nde birlikte çalıştığım tüm arkadaşlarıma, özellikle Asuman KOLBAŞI'na,

Benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen eşim Fatih Mehmet İNCİ'ye, canım babam Mehmet SOYGÜDEN'e biricik annem Şükriye SOYGÜDEN'e teşekkür ederim.

Arife İNCİ  
Ankara, Eylül 2014

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
SİMGELER DİZİNİ .....	ivii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iviii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
1.GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1 Işınlama ve Doz Kavramları .....	3
2.1.1 Işınlama.....	3
2.1.2 Işınlama hızı .....	3
2.1.3 Soğurulan doz .....	4
2.1.4 Soğurulan doz hızı.....	4
2.2 Foton Demetlerinin Karakterize Edilmesi için Fiziksel Kavramlar .....	5
2.2.1 Foton akısı ve foton akı hızı .....	5
2.2.2 Kerma.....	5
2.2.3 Kerma hızı .....	6
2.2.4 Doz hızı .....	7
2.2.5 Eşdeğer doz birimi, $H_T$ .....	7
2.2.6 Etkin doz .....	9
2.3 Birinci Yarı Değer Kalınlığı 1.HVL .....	10
2.4 İkinci Yarı Değer Kalınlığı 2. HVL .....	10
2.5 Homojenlik Katsayısı (h) .....	10
2.6 X-Işını Ünitesi.....	10
2.6.1 X-ışını tüpü .....	11
2.6.2 Yüksek gerilim bölücüsü (Dynalyzer) .....	13
2.6.3 Kolimatör.....	14
2.7 Foton Radyasyon Kaynakları .....	14
2.7.1 Tek enerjili (Monokromatik) radyasyon kaynakları .....	14
2.7.2 Çok enerjili (Polikromatik) radyasyon kaynakları .....	14
2.8 X-Işınları .....	15
2.8.1 X-ışınlarının oluşum mekanizması.....	15
2.8.1.1 Bremsstrahlung olayı.....	16
2.8.1.2 Karakteristik X-ışınları .....	17
2.8.2 X-ışınlarının kalite kantitelerine etki eden faktörler.....	18
2.8.2.1 Kalite .....	18
2.8.2.2 Kantite.....	18
2.8.3 IEC-61267 de belirlenmiş olan X-ışını demet kaliteleri .....	23
2.8.3.1RQR X-ışını demet kalitesi.....	25
2.9 Radyasyon Ölçümünde Kullanılan Dedektörler .....	26
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER .....	28
3.1 Tez Kapsamında Kullanılan Sistemler .....	28
3.1.1 X-ışını, ışınlama sistemi .....	28
3.1.2 İyon odası.....	29

3.1.3 Elektrometre.....	30
3.1.4 Gerilim (kV) ölçümünde kullanılan cihazlar.....	30
3.2 X-Işını Spektrum Programları .....	30
3.3 Fantomlar .....	31
3.4 IEC 61267 Protokolünde Belirlenmiş Olan X-Işını Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi .....	31
3.4.1 RQR X-Işını demet kalitesinin elde edilmesi .....	31
3.5 Birinci Yarı Değer, İkinci Yarı Değer Kalınlıklarının ve Homojenlik Katsayısının Hesaplanması.....	32
3.6 Karışım Numunelerin Hazırlanması.....	33
3.6.1 Farklı bileşimde hazırlanan parafin disk numuneler .....	33
3.6.1.1 P-10 beyaz teknik parafin .....	33
3.6.1.2 Kalsiyum sülfat ( $\text{CaSO}_4$ ) .....	34
3.6.1.3 Bor oksit ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) .....	35
3.6.2 Numunelerin hazırlanması.....	35
3.6.3 Numunelerin HVL değerlerinin belirlenmesi .....	36
3.7 Borosilikat Cam .....	37
3.8 IEC 61267 Protokolünde Belirlenmiş Olan X-Işını Demet Kalitelerinin Hazırlanan Numuneler için Elde Edilmesi .....	38
3.8.1 RQR X-Işını demet kalitesinin elde edilmesi .....	38
3.9 Tüp Gerilimi Ölçümü .....	39
4. BULGULAR.....	40
4.1 IEC 61267 Protokolünde Belirlenmiş Olan X-Işını Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi.....	40
4.1.1 RQR X-Işını demet kalitesinin elde edilmesi .....	40
4.2 Dar Demet ve Geniş Demet Karşılaştırması.....	55
4.3 Geniş Demet Koşulunda Kurşun Zırh Kullanmanın Etkisi .....	57
4.4 Normal Cam ile Borosilikat Cam Karşılaştırması.....	57
4.4.1 Zayıflatma özelliklerinin karşılaştırılması .....	57
4.4.1.1 Normal plaka cam.....	58
4.4.1.2 Borosilikat plaka cam .....	58
4.4.2 Yarı kalınlık değerlerinin karşılaştırılması .....	60
4.4.2.1 Normal plaka cam .....	60
4.4.2.2 Borosilikat plaka cam .....	61
4.5 Hazırlanan Numuneler için Zayıflatma Özellikleri.....	63
4.5.1 P-10 beyaz teknik parafin dilim.....	63
4.5.2 %10 $\text{B}_2\text{O}_3$ yüklemeli parafin dilim.....	64
4.5.3 %20 $\text{B}_2\text{O}_3$ yüklemeli parafin dilim .....	65
4.5.4 %10 $\text{CaSO}_4$ yüklemeli parafin dilim.....	65
4.5.5 %20 $\text{CaSO}_4$ yüklemeli parafin dilim.....	66
4.6 Hazırlanan Numuneler için Birinci Yarı Kalınlık Değeri .....	67
4.6.1 P-10 beyaz teknik parafin dilim.....	67
4.6.2 %10 $\text{B}_2\text{O}_3$ yüklemeli parafin dilim.....	69
4.6.3 %20 $\text{B}_2\text{O}_3$ yüklemeli parafin dilim.....	70
4.6.4 %10 $\text{CaSO}_4$ yüklemeli parafin dilim .....	72
4.6.5 %20 $\text{CaSO}_4$ yüklemeli parafin dilim .....	73
4.7 Farklı Yüzdelerde Boroksit ve Kalsiyum Sülfat Katkılı Parafin ile Borosilikat Cam (BSC) Tüpün Dikey Konumda Alınan Ölçümleri .....	75

4.7.1 P-10 beyaz teknik parafin ile borosilikat cam tüp dikey konumda alınan ölçümler.....	75
4.7.2 Borosilikat cam tüp dikey konumda %10 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + %90 parafin karışımı ile alınan ölçümler .....	76
4.7.3 Borosilikat cam tüp dikey konumda %20 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + %80 parafin karışımı ile alınan ölçümler .....	76
4.7.4 Borosilikat cam tüp dikey konumda %10 CaSO <sub>4</sub> + %90 parafin karışımı ile alınan ölçümler .....	77
4.7.5 Borosilikat cam tüp dikey konumda %15 CaSO <sub>4</sub> + %85 parafin karışımı ile alınan ölçümler .....	77
4.7.6 Borosilikat cam tüp dikey konumda %18 CaSO <sub>4</sub> + %82 parafin karışımı ile alınan ölçümler .....	78
4.7.7 Borosilikat cam tüp dikey konumda % 20 CaSO <sub>4</sub> + % 80 parafin karışımı ile alınan ölçümler .....	78
4.7.8 ISO su sütunu fantomu (ön kol veya bacak temsili) ile alınan ölçümler .....	78
4.7.9 ISO su sütunu fantomu (ön kol veya bacak temsili) ile hesaplanan farklı yüzdelerdeki parafin malzemelerin borosilikat cam içinde alınan ölçümlerinin karşılaştırılması.....	79
5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....	82
KAYNAKLAR .....	86
ÖZGEÇMİŞ.....	88



## SİMGELER DİZİNİ

Bq	Becquerel
BSC	Borosilikat cam
C	Coulomb
h	Homojenlik katsayısı
$\mu$	Doğrusal azalım katsayısı
$\mu/\rho$	Kütle azalım katsayısı
$\rho$	Yoğunluk
HVL	Yarı Değer Kalınlığı
PMMA	Polimetil metakrilat
PT	Sıcaklık, basınç
NIST	National Institute of Standards and Technology
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRU	International Commission on Radiation Units
ICRP	International Commission on Radiological Protection
Gy	Gray
R	Röntgen
Sv	Sievert
mAs	Miliamper saniye
kV <sub>p</sub>	Kilovolt Tepe Değeri
H	Eşdeğer doz
E	Etkin Doz

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 a) Yüksek frekans jeneratörü	
b) Kurşun zırh içerisindeki X-ışını tüpü ve bağlantıları .....	11
Şekil 2.2 Kullanılan X-ışını tüpü resmi ve şematik gösterimi .....	12
Şekil 2.3 Dynalyzer yüksek gerilim bölücü .....	13
Şekil 2.4 Kolimatör .....	14
Şekil 2.5 X-ışınları oluşumu .....	15
Şekil 2.6 Sürekli X-ışınlarının çekirdek alanında üretimi – Bremsstrahlung .....	16
Şekil 2.7 Karakteristik X-ışınlarının atomik yörüngelerde oluşumu .....	17
Şekil 2.8 100 mAs’da 1mm Al kalınlığında ve 80 kV <sub>p</sub> tüp geriliminde hesaplanan spektrum .....	19
Şekil 2.9 100 mAs’da 1mm Al kalınlığında ve 90 kV <sub>p</sub> tüp geriliminde hesaplanan spektrum .....	19
Şekil 2.10 100 mAs’da 80 kV <sub>p</sub> tüp geriliminde ve 2 mm Al kalınlığında hesaplanan spektrum .....	21
Şekil 2.11 100 mAs’da 80 kV <sub>p</sub> tüp geriliminde ve 5 mm Al kalınlığında hesaplanan spektrum .....	21
Şekil 2.12 80 kV <sub>p</sub> tüp geriliminde, 1 mm Al kalınlığında ve 100 mAs’da hesaplanan spektrum .....	22
Şekil 2.13 80 kV <sub>p</sub> tüp geriliminde, 1 mm Al kalınlığında ve 500 mAs’da hesaplanan spektrum .....	23
Şekil 2.14 İyon odası için kullanılan elektrometre .....	27
Şekil 3.1 PTW tipi iyon odası .....	29
Şekil 3.2 Elektrometre .....	30
Şekil 3.3 ISO fantomları (1.Su dilim fantom, 2. Su sütun fantom, 3. PMMA çubuk fantom .....	31
Şekil 3.4 RQR X-ışını demet kalitesinin elde edildiği deney düzeneği.....	32
Şekil 3.5 Hazırlanan numuneler ve etiket bilgileri .....	33
Şekil 3.6 Plastik kaplar .....	36
Şekil 3.7 Numunelerin ölçümü için oluşturulan düzenek .....	37
Şekil 3.8 Kullanılan X-ışını sistemi ve radyometrik benç .....	38
Şekil 4.1 RQR-2, 40 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için Spectrum GUI programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri .....	41
Şekil 4.2 RQR-2, 40 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için Xcomp5r programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri.....	41
Şekil 4.3 RQR-3, 50 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için Spectrum GUI programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri .....	43
Şekil 4.4 RQR-3, 50 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için Xcomp5r programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri.....	43
Şekil 4.5 RQR-4, 60 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için Spectrum GUI programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri .....	45
Şekil 4.6 RQR-4, 60 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için Xcomp5r programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri .....	45
Şekil 4.7 RQR-5, 70 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için Spectrum GUI programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri .....	47
Şekil 4.8 RQR-5, 70 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için Xcomp5r programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri.....	47
Şekil 4.9 RQR-6, 80 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için Spectrum GUI programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri .....	49
Şekil 4.10 RQR-6, 80 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için Xcomp5r programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri .....	49

Şekil 4.11 RQR-7, 90 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için Spectrum GUI programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri .....	51
Şekil 4.12 RQR-7, 90 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için Xcomp5r programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri.....	51
Şekil 4.13 RQR-8, 100 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için Spectrum GUI programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri.....	53
Şekil 4.14 RQR-8, 100 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için Xcomp5r programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri.....	53
Şekil 4.15 Dar demet, geniş demet karşılaştırma için kurulan düzenek .....	56
Şekil 4.16 RQR-5 X-ışını demet kalitesinde normal cam ve borosilikat cam için transmisyon eğrisi .....	59
Şekil 4.17 RQR serisi X-ışını demet kalitesinde normal plaka cam için transmisyon eğrisi .....	61
Şekil 4.18 RQR serisi X-ışını demet kalitesinde borosilikat plaka cam için transmisyon eğrisi .....	62
Şekil 4.19 Numuneler için zayıflatma özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan düzenek .....	63
Şekil 4.20 RQR-5, 70 kV <sub>p</sub> X-ışını demet kalitesinde hazırlanan numuneler için transmisyon eğrisi .....	67
Şekil 4.21 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde parafin dilim malzeme için transmisyon eğrisi .....	68
Şekil 4.22 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde %10 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> yüklemeli parafin dilim malzeme için transmisyon eğrisi.....	70
Şekil 4.23 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde %20 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> yüklemeli parafin dilim malzeme için transmisyon eğrisi.....	71
Şekil 4.24 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde %10 CaSO <sub>4</sub> yüklemeli parafin dilim malzeme için transmisyon eğrisi .....	73
Şekil 4.25 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde %20 CaSO <sub>4</sub> yüklemeli parafin dilim malzeme için transmisyon eğrisi .....	74

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Radyasyon tiplerine göre $W_R$ değerleri (Lombardi 2007).....	8
Çizelge 2.2 Doku ağırlık faktörleri .....	9
Çizelge 2.3 Standart RQR X-ışını demet kaliteleri .....	25
Çizelge 3.1 X-ışını sisteminin özellikleri.....	28
Çizelge 3.2 Referans dedektör bilgileri .....	29
Çizelge 3.3 $CaSO_4$ 'ün özellikleri.....	34
Çizelge 3.4 $B_2O_3$ 'ün özellikleri.....	35
Çizelge 3.5 Hazırlanan numuneler için deneysel olarak hesaplanan yoğunluk değerleri .....	36
Çizelge 3.6 Uygulanan gerilim ve ölçülen gerilim karşılaştırılması .....	39
Çizelge 4.1 RQR-2, 40 kV <sub>p</sub> Demet kalitesi için filtrasyon kalınlığına bağlı ölçülen doz değerleri .....	40
Çizelge 4.2 RQR-2, 40 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan 1.HVL değerleri .....	42
Çizelge 4.3 RQR-2,40 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan ortalama enerji değerleri.....	42
Çizelge 4.4 RQR-3, 50 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için filtrasyon kalınlığına bağlı ölçülen doz değerleri ...	42
Çizelge 4.5 RQR-3, 50 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan 1.HVL değerleri .....	43
Çizelge 4.6 RQR-3,50 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan ortalama enerji değerleri.....	44
Çizelge 4.7 RQR-4, 60 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için filtrasyon kalınlığına bağlı ölçülen doz değerleri ..	44
Çizelge 4.8 RQR-4, 60 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan 1.HVL değerleri.....	46
Çizelge 4.9 RQR-4, 60 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan ortalama enerji değerleri.....	46
Çizelge 4.10 RQR-5, 70 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için filtrasyon kalınlığına bağlı ölçülen doz değerleri .	46
Çizelge 4.11 RQR-5, 70 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan 1.HVL değerleri .....	47
Çizelge 4.12 RQR-5, 70 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan ortalama enerji değerleri.....	48
Çizelge 4.13 RQR-6, 80 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için filtrasyon kalınlığına bağlı ölçülen doz değerleri .	48
Çizelge 4.14 RQR-6, 80 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan 1.HVL değerleri .....	49
Çizelge 4.15 RQR-6, 80 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan ortalama enerji değerleri.....	50
Çizelge 4.16 RQR-7, 90 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için filtrasyon kalınlığına bağlı ölçülen doz değerleri .	50
Çizelge 4.17 RQR-7, 90 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan 1.HVL değerleri .....	51
Çizelge 4.18 RQR-7, 90 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan ortalama enerji değerleri.....	52
Çizelge 4.19 RQR-8, 100 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için filtrasyon kalınlığına bağlı ölçülen doz değerleri .....	52

Çizelge 4.20 RQR-8, 100 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan 1.HVL değerleri .....	54
Çizelge 4.21 RQR-8, 100 kV <sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan ortalama enerji değerleri .....	54
Çizelge 4.22 RQR serisi X-ışını demet kalitesi karakteristiği .....	54
Çizelge 4.23 RQR X-ışını demet kalitesinde, dar demet, geniş demet karşılaştırmasında ölçülen doz değerleri.....	56
Çizelge 4.24 RQR X-ışını demet kalitesinde, geniş demette (10x10 cm <sup>2</sup> ) kurşun zırh karşılaştırmasında ölçülen doz değerleri.....	57
Çizelge 4.25 Normal plaka cam için 70 kV <sub>p</sub> 'de cam kalınlığına karşılık ölçülen doz değerleri .....	58
Çizelge 4.26 Borosilikat plaka cam için 70 kV <sub>p</sub> 'de cam kalınlığına karşılık ölçülen doz değerleri .....	59
Çizelge 4.27 40 kV <sub>p</sub> ile 100 kV <sub>p</sub> demet kalitelerinde normal plaka cam için cam kalınlığına karşılık ölçülen doz değerleri.....	60
Çizelge 4.28 40 kV <sub>p</sub> ile 100 kV <sub>p</sub> demet kalitelerinde borosilikat plaka cam için cam kalınlığına karşılık ölçülen doz değerleri.....	61
Çizelge 4.29 RQR X-ışını demet kalitesinde normal cam ile borosilikat cam için hesaplanan 1.HVL değerleri ve % fark.....	62
Çizelge 4.30 70 kV <sub>p</sub> 'de P-10 teknik beyaz parafin dilim için parafin kalınlığına karşılık ölçülen doz değeri .....	64
Çizelge 4.31 70 kV <sub>p</sub> 'de % 10 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> yüklemeli parafin dilim için parafin kalınlığına karşılık ölçülen doz değerleri .....	64
Çizelge 4.32 70 kV <sub>p</sub> 'de %20 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> yüklemeli parafin dilim için parafin kalınlığına karşılık ölçülen doz değerleri .....	65
Çizelge 4.33 70 kV <sub>p</sub> 'de % 10 CaSO <sub>4</sub> yüklemeli parafin dilim için parafin kalınlığına karşılık ölçülen doz değerleri.....	66
Çizelge 4.34 70 kV <sub>p</sub> 'de %20 CaSO <sub>4</sub> yüklemeli parafin dilim için parafin kalınlığına karşılık ölçülen doz değerleri.....	66
Çizelge 4.35 40 kV <sub>p</sub> ile 100 kV <sub>p</sub> demet kalitelerinde P-10 teknik beyaz parafin dilim için ölçülen doz azalım değerleri.....	68
Çizelge 4.36 40 kV <sub>p</sub> ile 100 kV <sub>p</sub> demet kalitelerinde % 10 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> yüklemeli parafin dilim için ölçülen doz azalım değerleri .....	69
Çizelge 4.37 40 kV <sub>p</sub> ile 100 kV <sub>p</sub> demet kalitelerinde %20 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> yüklemeli parafin dilim için ölçülen doz azalım değerleri .....	71
Çizelge 4.38 40 kV <sub>p</sub> ile 100 kV <sub>p</sub> demet kalitelerinde % 10 CaSO <sub>4</sub> yüklemeli parafin dilim için ölçülen doz azalım değerleri .....	72
Çizelge 4.39 40 kV <sub>p</sub> ile 100 kV <sub>p</sub> demet kalitelerinde %20 CaSO <sub>4</sub> yüklemeli parafin dilim için ölçülen doz azalım değerleri .....	73
Çizelge 4.40 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde P-10 beyaz teknik parafin ve farklı yüzdelerdeki bor oksit ve kalsiyum sülfat yüklemeli parafin dilimler için hesaplanan 1.HVL değerleri .....	74
Çizelge 4.41 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde P-10 beyaz teknik parafin doldurulan borosilikat cam tüp dikey konumda ölçülen doz değerleri .....	75
Çizelge 4.42 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde % 10 boroksit yüklemeli parafin doldurulan borosilikat cam tüp dikey konumda ölçülen doz değerleri .....	76
Çizelge 4.43 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde % 20 boroksit yüklemeli parafin doldurulan borosilikat cam tüp dikey konumda ölçülen doz değerleri.....	76

Çizelge 4.44 RQR serisi yedi farklı X–ışını demet kalitesinde % 10 kalsiyum sülfat yüklemeli parafin doldurulan borosilikat cam tüp dikey konumda ölçülen doz değerleri .....	77
Çizelge 4.45 RQR serisi yedi farklı X–ışını demet kalitesinde % 15 kalsiyum sülfat yüklemeli parafin doldurulan borosilikat cam tüp dikey konumda ölçülen doz değerleri .....	77
Çizelge 4.46 RQR serisi yedi farklı X–ışını demet kalitesinde % 18 kalsiyum sülfat yüklemeli parafin doldurulan borosilikat cam tüp dikey konumda ölçülen doz değerleri .....	78
Çizelge 4.47 RQR serisi yedi farklı X–ışını demet kalitesinde % 20 kalsiyum sülfat yüklemeli parafin doldurulan borosilikat cam tüp dikey konumda ölçülen doz değerleri .....	78
Çizelge 4.48 RQR serisi yedi farklı X–ışını demet kalitesinde ISO su sütun fantomu, ekstremitte fantomu ile dikey konumda dikey konumda ölçülen doz değerleri .....	79
Çizelge 4.49 RQR serisi yedi farklı X–ışını demet kalitesinde su sütun fantomu, ekstremitte fantomu ile borosilikat cam tüp+farklı bor yüzdeleri için karşılaştırmalı ölçülmüş doz değerleri .....	79
Çizelge 4.50 RQR serisi yedi farklı X–ışını demet kalitesinde su sütun fantomu, ekstremitte fantomu ile borosilikat cam tüp+farklı bor yüzdeleri için karşılaştırmalı ölçülmüş doz değerlerindeki % farklar.....	80
Çizelge 4.51 RQR serisi yedi farklı X–ışını demet kalitesinde su sütun fantomu, ekstremitte fantomu ile borosilikat cam tüp+farklı kalsiyum sülfat yüzdeleri için karşılaştırmalı ölçülmüş doz değerleri.....	80
Çizelge 4.52 RQR serisi yedi farklı X–ışını demet kalitesinde su sütun fantomu, ekstremitte fantomu ile borosilikat cam tüp+farklı kalsiyum sülfat yüzdeleri için karşılaştırmalı ölçülmüş doz değerlerindeki % farklar.....	81

## 1. GİRİŞ

Radyolojide teşhis ve tedavi amaçlı 40-300 kV<sub>p</sub> aralığında X-ışını demet kaliteleri çeşitli ışınlamalar için yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu bağlamda, radyolojik X-ışını donanımlarının, hasta dozu ve görüntü kalitesi bakımından değerlendirilmesi için “doku eşdeğeri” malzemeler/fantomlar da gereklidir. Bir malzeme için asıl önemli nokta, doku eşdeğerliğinin insan dokusuna benzer bir radyasyon zayıflatmasına sahip olmasıdır (White 1977). Bu nedenle en yaygın olarak kullanılan doku eşdeğeri malzemeler; PMMA (polimetil metakrilat), bazı plastikler, su, vb. malzemeler olup, radyasyon alanlarındaki doz tahminleri ve tedavi planlamalarında klinik öncesi fantom çalışmalarında sıklıkla kullanılırlar. Ayrıca radyografi ve floroskopi amaçlı X-ışını ünitelerinin kurulu olduğu medikal X-ışını görüntüleme odalarında veya yakınlarındaki radyasyon alanlarının zırhlanması için kullanılan beton ve kurşun dışında, saydam akrilik, tabaka cam ve kurşun camlar gibi insana fiziksel görüş sağlayan çeşitli saydam malzemeler de bu tür yerlerde sıkça kullanılır. Sanayide geniş uygulama alanı bulan borosilikat camın X-ışınlarına karşı zayıflatma özelliğinin bilinmesi de önemlidir. Bilindiği gibi borosilikat cam, yüksek sıcaklıkta (200°C -300°C) ısıya dayanıklılığı, fiziksel dayanımı (mukavemeti) gibi çeşitli fiziksel özellikleri nedeniyle çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (TS 3399 ISO 3585, 2005). Örneğin, borosilikat cam, güneş enerjisinden yararlanmak için özel filtreler yardımıyla güneş ışığı spektrumunu istenen dalga boylarında geçirimi sağlanarak “güneş enerjisi kollektörü” olarak suyun ısıtılması gibi amaçlar için pratikte kullanılmaktadır (TS 13594, 2014). Bu tezde, normal plaka cama göre, borosilikat camın X-ışını zayıflatma özelliğinin 40-100 kV<sub>p</sub> radyolojik enerji aralığında ölçülmesi amaçlanmıştır. Sonra, 4,5 cm çap ve 30 cm uzunluktaki bir ucu kapalı silindirik borosilikat cam bir boru içerisinde parafin, boroksit (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve kalsiyum sülfat (CaSO<sub>4</sub>) yüklemeli parafin sisteminin ön kol ve bacağı temsil edecek bir ekstremite fantomu olarak kullanılabilirliği hakkında bilgi sağlanacaktır. Bu amaçla, H ve C element içeriğinin dokuya yakınlık sağlaması, işlenebilir ve kolay şekil verilebilir olması bakımından bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri nedeniyle parafin malzemesinin, bir fantom denemesine uygun olacağı değerlendirilmiştir. Çalışmada hazırlanan parafin+kalsiyum sülfat+bor oksit veya bunların belirli oranlarda bileşimleri borosilikat cam bir silindire doldurulmuştur. Daha sonra hazırlanan bu fantom, RQR serisi X-ışını demet kalitelerindeki radyasyon zayıflatma parametresi (HVL-Yarı Değer Kalınlık) ölçülerek, yine insan dokusuna eş değer bir ön kol veya bacağı temsil eden 7,3 cm çap ve

30 cm uzunlukta dik silindir (duvar kalınlığı 2,5 mm, alt ve üst kapakları 10 mm olan) PMMA su sütun fantomu (PTW, 2014) ölçüleriyle zayıflatma özelliği kıyaslanmıştır. Böylece borosilikat cam+parafin+kalsiyum sülfat fantomunun, bir kemik doku eşdeğeri açısından nicel bilgilere ulaşılması hedeflenmiştir. Literatürde, radyolojik enerji aralığında parafinin X-ışınlarına karşı zayıflatma özelliğinin dokuya yakın hale getirilmesi için parafine sırasıyla  $B_2O_3$  ve  $CaSO_4$  yüklemeli materyal bileşimlerinin araştırılmasının ilginç olacağı düşünülmüştür (Çubukçu ve ark. 2014). Yapılan literatür taramasında, insan dokusunu simüle etmek için özellikle bir baş fantomu için parafinin toplam kütle zayıflatma katsayısının değerlendirilmesi yapılmıştır (Ferreira et al. 2010). Ancak ilgilenilen diagnostik enerji aralığında borosilikat cam ve kalsiyum sülfat katkılı parafin model karışımı için X-ışınlarının zayıflatma özelliğiyle ilgili deneysel bir veriye rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu tezde borosilikat cam+parafin+kalsiyum sülfat bileşimindeki bir fantom için elde edilen X-ışını ışınlama sonuçlarının, ön kol veya bacağı temsil eden su dolu bir PMMA ekstremite fantomu (sütun fantom) ile karşılaştırılması mümkün olabilecektir.

Bu tez, ilk giriş bölümü ile birlikte beş bölümden oluşmaktadır. İkinci Bölümde, doz kavramları ve bir foton demetinin karakterize edilmesinde kullanılan nicelikler açıklanmıştır. Üçüncü Bölümde X-ışını sisteminin kurulması, RQR serisi demet kalitelerinin IEC EN 61267 protokolüne uygun olarak elde edilmesi ve sırasıyla cam, borosilikat cam, parafin ve boroksit, kalsiyumsülfat yüklemeli parafin numunelerin hazırlanması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra söz konusu fantom denemeleri 40-100 kV<sub>p</sub> demet kaliteleri aralığında RQR serisi olmak üzere yedi adet X-ışını demet kalitesinde ışınlanarak zayıflatma karakteristikleri belirlenmesi için bir iyon odası kullanılarak doz ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Dördüncü Bölümde deneysel bulgular çizelge ve grafikler şeklinde sunulmuştur. Elde edilen deneysel bulgular, sonuç ve tartışma bölümü olarak Beşinci Bölümde tartışılmıştır.



## 2. KURAMSAL TEMELLER

Radyasyon ile ilgili yapılan tüm çalışmalarda doz kavramları ve radyolojide sıkça kullanılan bir foton demetinin tanımlanmasında kullanılan niceliklerin bilinmesi önemlidir. Bu tez kapsamında kullanılan niceliklerin eski ve özel birimleri arasındaki dönüşümler de verilmiştir.

### 2.1 Işınlama ve Doz Kavramları

#### 2.1.1 Işınlama

Işınlama, X- veya gama ışınlarının havayı iyonlaştırma kapasitesinin bir ölçüsüdür. Işınlama, kuru havada tümüyle durdurulan fotonların havanın birim kütleinde(dm) oluşturduğu iyonların (elektronlar ve pozitronlar) tek işaretli yüklerinin (dQ) toplam ortalama değeridir. SI birim sistemindeki birimi Birimi C·kg<sup>-1</sup>'dir. Özel birimi ise Röntgen (R)'dir (ICRU Report 85, 2011).

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

1R= 2,58x10<sup>-4</sup> C·kg<sup>-1</sup>'dir.

Röntgen; normal koşullarda (0°C sıcaklık ve 760 mmHg hava basıncı) 1 kg kuru havada 2,58x10<sup>-4</sup> Coulomb (C)'luk elektrik yükü değerinde pozitif ve negatif iyonlar oluşturan X- veya gama radyasyonu miktarıdır (Tsoulfanidis 1995).

Uygulamada, Röntgen tanımını sınırlandıran iki etken vardır:

1. Sadece elektromanyetik radyasyon için tanımlanır.
2. Sadece hava için tanımlanır.

#### 2.1.2 Işınlama hızı

Işınlama hızı, zamana bağlı ışınlama (maruziyet) miktarıdır. Eşitlik 2.2'deki gibi tanımlanır.

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} \quad (2.2)$$

Bu eşitlikteki dX; dt zaman aralığında ışınlamadaki değişimdir (ICRU Report 85, 2011). SI birim sisteminde C·kg<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup> olarak, eski birimlerde R/h olarak ifade edilir.

Radyasyondan korunma ile ilgili genellikle saat başına ışınlama için (R/h, mR/h, µR/h) kullanılır. Burada, h: saat'i gösterir.

### 2.1.3 Soğurulan doz

Soğurulan doz, iyonlaştırıcı radyasyon tarafından bir maddenin belirli miktarına aktarılan (deposited) ortalama enerjidir. Aşağıda gibi tanımlanır.

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (2.3)$$

Burada dE; ışınlanan maddenin 1 kg'ına 1 Joule'lük (J) enerji veren radyasyon miktarıdır. SI sistemindeki birimi Gray (Gy)'dir. Özel birimi ise rad (radiation absorbed dose)'dir (IAEA TRS 457, 2007).

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g}$$

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$$

Röntgen ile gray arasındaki ilişki:

$$1R = \frac{1 \text{ esu}}{1,293 \times 10^{-3} \text{ g}} (2,082 \times 10^9) \text{ iyon çiftleri/esu} \times (34 \text{ eV/çifti}) \times 1,602 \times 10^{-12} \text{ ergs/eV}$$

$$\approx 88 \text{ ergs/g} = 0,88 \text{ rad} = 8,8 \text{ mGy}$$

$$D \cong 0,88 \cdot X \quad (2.4)$$

Burada D, soğurulan doz,

X= Havadaki ışınlama (exposure)

### 2.1.4 Soğurulan doz hızı

Soğurulan doz hızı, aşağıda oran ile tanımlanır.

$$D = \frac{dE}{dm \cdot dt} \quad (2.5)$$

Bu eşitlikteki dE; dt zaman aralığında, dm birim kütleye iyonlaştırıcı radyasyon tarafından aktarılan enerjidir. Birimi  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 'dir. Özel adı ise  $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ 'dir.

## 2.2 Foton Demetlerinin Karakterize Edilmesi için Fiziksel Kavramlar

Harici (dış) kullanılan foton demetleri, foton akısı (fluence), enerji akısı, foton akı hızı (fluence rate) ve hava kerma (air kerma) gibi fiziksel parametrelerle karakterize edilirler. Ancak bu foton demetleri üretildikleri orijine, üretim şekline ve enerjisine bağlı olarak çeşitli kategorilerde yer alırlar. X-ışınları, ivmelendirilmiş elektronlarla bombardıman edilen bir hedeften kaynaklanır. Hedeften elde edilen X-ışınları, Bremsstrahlung fotonları ve karakteristik fotonlardan oluşur ve sürekli bir spektrum verirler. Yani polikromatik enerji+karakteristik X-ışınlarının birlikte bulunduğu heterojen bir spektrum olarak gözlenir. X-ışınları, bir X-ışını tüpünde (superficial veya orthovoltage X-rays) ya da bir linac (megavoltage X-rays)'da üretilirler (Podgorsak 2005). Foton demetleri, enerjisi ve fotonların sayısı ile ilişkilidir. Radyasyon dozunun belirlenmesinde, foton şiddeti ve enerjisi ile birlikte foton demetinin enerjisinin aktarıldığı ortamın hava, su veya biyolojik materyal olması da önemlidir.

### 2.2.1 Foton akısı ve foton akı hızı

Bir radyasyon alanında N tane fotonun, hayali (imajiner) bir kürenin kesit alanından (dA) geçenlerinin sayısıdır.

$$\phi = \frac{dN}{dA} \quad (2.6)$$

Foton akısının birimi, foton/cm<sup>2</sup>'dir. Foton akı hızı (fluence rate) ise

$$\varphi = \frac{d\phi}{dt} = \frac{dN}{dA \cdot dt} \quad (2.7)$$

Foton akı hızı birimi, foton.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>'dir.

### 2.2.2 Kerma

Kerma, dm kütleli malzemede, yüksüz parçacıkların (X ve γ fotonları gibi) açığa çıkardığı yüklü parçacıkların kinetik enerjilerinin toplamının dE<sub>tr</sub> söz konusu malzemenin dm kütlesine bölümüdür (ICRP 103, 2007).

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (2.8)$$

Kerma, X-ışını ve  $\gamma$ -ışınları gibi iyonlaştırıcı radyasyonun aktardığı enerjiyle radyasyon alanını ilişkilendirmek için kullanılan bir kavramdır. Kerma tanımlanırken, gelen radyasyonun taşıdığı enerji ve malzeme içinde gerçekleşen etkileşmeler sonrasında oluşan ürün parçacıklara (Compton elektronları, fotoelektronlar gibi) kazanılan enerji etkileşim noktasında soğurulan kinetik enerji tanıma dahil edilir. Etkileşme bölgesinde soğurulmayan enerji ise (Compton'da saçılan foton, karakteristik fluoresans ışınması, yok olma fotonları gibi) tanıma dahil değildir (IAEA TRS 457, 2007). Hava ortamındaki mono enerjilik bir foton demeti için hava kerması,

$$K = K_a^{hava} = \phi \cdot E \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{hava} \quad (2.9)$$

Burada  $\phi$ , parçacık akısı, ve

E: foton enerjisi (yani,  $h\nu$ ) dir.

$(\mu_{tr}/\rho)_{hava}$  hava için kütle-enerji transfer katsayısı ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )'dir. Kütle enerji soğurma katsayısı

$(\mu_{en}/\rho)_{hava}$  ise ortamın  $Z$ 'si ve foton enerjisi 1 MeV'den düşük olması durumlarında kütle-enerji transfer katsayısına eşit alınır, yani  $\bar{g} = 0$  alınabilir (Podgorsak 2005).

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} \cdot (1 - \bar{g}) \quad (2.10)$$

Burada  $\rho$ , yoğunluk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )'tur.

Kerma birimi ise  $\text{J}/\text{kg}$  veya Gray'dir

### 2.2.3 Kerma hızı

$$K = \frac{dK}{dt} \quad (2.11)$$

$dt$  zaman aralığında kerma'daki değişim kerma hızını verir.

Birimi  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 'dir. Kerma hızının SI sistemindeki birimi  $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ 'dir (IAEA TRS 457, 2007).

#### 2.2.4 Doz hızı

Doz hızı, ölçülebilen önemli parametrelerden birisidir. Herhangi bir durumda belli bir zaman periyodunda alınan dozun ifadesidir. Doz hızı, yaygın olarak  $\mu\text{Sv/h}$ ,  $\text{mSv/h}$  cinsinden ölçülebilir.

Doz hızının bilinmesi ile çalışma ortamındaki normal veya kaza durumuna dayalı değerlendirme yapılabilir.

#### 2.2.5 Eşdeğer doz birimi, $H_T$

SI birim sisteminde eşdeğer doz birimi  $\text{J/kg}$  olup özel adı Sievert (Sv)'dir ve  $1 \text{ Sv}$ ;  $1 \text{ Gy}$ 'lik X- veya gama ışını ile aynı biyolojik etkiyi meydana getiren herhangi bir radyasyon miktarı olarak tanımlanmaktadır.

**Doz eşdeğeri (dose equivalent)** tanımı, doku içinde herhangi bir noktada soğurulan doz ile bu noktadaki spesifik radyasyon için kalite faktörünün çarpımıdır (ICRP 103, 2007).

$$H = D \cdot Q \cdot N = D \cdot Q \quad (2.12)$$

$N$  = Tüm düzeltme faktörlerinin çarpımı=1

$Q$  = Kalite faktörü

$D$  = Soğurulan doz

Kalite faktörü,  $Q$  dokuda yüklü parçacıkların yolları boyunca meydana gelen iyonlaşma yoğunluğunu temel alan bir radyasyonun biyolojik etkinliğini karakterize eden faktördür.  $Q$  faktörü yüklü parçacıkların su içinde sınırsız lineer enerji transferinin,  $L_\infty$  (genellikle LET veya  $L$  ile gösterilir) bir fonksiyonudur, yani  $Q=Q(L)$ 'dir. Örneğin lineer enerji transferi  $L < 10 \text{ keV}/\mu\text{m}$  için  $Q(L)=Q=1$ 'dir (ICRP 103, 2007).

ICRP Komisyonu, eski “**doz eşdeğeri (dose equivalent)**” tanımında  $Q$  kalite faktörü yerine  $W_R$  radyasyon ağırlık faktörü kullanılmasını tavsiye etmiştir. Bu nedenle artık **eşdeğer doz (equivalent dose)** kavramı kullanılmaktadır.

$T$  ile gösterilen bir doku veya organın alacağı eşdeğer doz  $H_T$  ise:

$$H_T = \sum_R D_{TR} \cdot W_R \quad (2.13)$$

Burada,  $D_{T,R}$  : T dokusun veya organında, R tipi radyasyondan kaynaklanan ortalama soğurulan dozdur. Radyasyon ağırlık faktörü  $W_R$  boyutsuz olduğundan  $H_T$  eşdeğer dozun birimi,  $D_{T,R} (J \cdot kg^{-1})$  soğurulan doz ile aynı  $J \cdot kg^{-1}$  olup özel adı Sievert'dir.

Eski birimde ise,

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ rad} \cdot W_R \quad (2.14)$$

bağıntısı ile dönüşümü yapılır. Yani, eşdeğer dozun özel birimi ise rem (Röntgen equivalent man)'dir.

1 rem: 1 R'lik X- veya gama ışını ile aynı biyolojik etkiyi oluşturan herhangi bir radyasyon miktarıdır. SI birim sisteminde karşılığı

$$1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv} \quad (2.15)$$

X-ışınları, gama ışınları, beta parçacıkları için Gray sayısal olarak Sievert'e eşittir.

$$\text{Sv} = \text{Gy} \cdot W_R = \text{Gy} \cdot 1 \quad (2.16)$$

Çizelge 2.1 Radyasyon tiplerine göre  $W_R$  değerleri (Lombardi 2007)

Radyasyon Tipi	Radyasyon Ağırlık Faktörleri $W_R$
Beta, gama, X-ışınları	1
Nötronlar, < 10 keV	5
> 10-100 keV	10
> 100 keV -2 MeV	20
< 2-20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protonlar, > 2 MeV	2
Alfa, ağır iyonlar	20

Çizelge 2.1'de verilen radyasyon ağırlık faktörleri  $W_R$  için en son ICRP 103 (2007) tavsiyeleri geçerlidir. Çünkü Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonunun (International Commission on Radiological Protection, ICRP) en son ICRP 103 (2007) yayını, ICRP 26 (1977) ve ICRP 60 (1991)'yi iptal ederek yerine resmi olarak geçmiştir (ICRP 103, 2007).

## 2.2.6 Etkin doz

Doku veya organ tarafından soğurulan doz radyasyon ağırlık faktörü ile çarpılınca, organ veya doku eşdeğer dozu bulunur. Daha sonra bu değerlerin her biri doku ağırlık faktörleri ile çarpılıp toplanırsa etkin doz ( $H_{\text{etkin}}$ ) bulunur.

$$H_E = \sum_T W_T \cdot H_T \text{ veya } H_E = \sum_T W_T \cdot \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \quad (2.17)$$

Etkin doz kavramı vücudun belirli bölümünün ışınlanması nedeniyle ortaya çıkacak radyasyon hasarlarının değerlendirilmesi için ortaya konulan, tüm vücut ışınlanmasından elde edilen verilerden türetilmiş bir kavramdır. Etkin doz, vücudun belirli bölgesinin ışınlanması durumunda aynı hasara neden olan ortalama soğurulan dozun ifadesidir.

Çizelge 2.2 Doku ağırlık faktörleri

Doku ve organ	Doku ağırlık faktörü		
	ICRP 26 (1977)	ICRP 60 (1991)	ICRP 103 (2007)
Gonadlar	0,25	0,20	0,08
Kırmızı kemik iliği	0,12	0,12	0,12
Kolon	-	0,12	0,12
Mide	-	0,12	0,12
Akciğer	0,12	0,12	0,12
Yemek borusu	-	0,05	0,04
Karaciğer	-	0,05	0,04
Mesane	-	0,05	0,04
Meme	0,15	0,05	0,12
Tiroit	0,03	0,05	0,04
Deri	-	0,01	0,01
Kemik yüzeyi	0,03	0,01	0,01
Tükürük bezi	-	-	0,01
Beyin	-	-	0,01
Diğer organlar	0,30*	0,05**	0,12***
Toplam	1	1	1

\*ICRP 26 (1977) diğer organlar; yüksek oranda doz alan beş organ için (her bir organın ağırlık faktörü 0,06)

\*\*ICRP 60 (1991) diğer organlar; böbrek üstü bezi, üst kalın bağırsak, ince bağırsak, böbrek, kas, pankreas, dalak, timus ve rahim.

\*\*\*ICRP 103 (2007) diğer organlar; böbrek üstü bezi, ekstratorasik doku, kalp duvarı, böbrek, lenf nodları, kas, ağız mukozası, pankreas, prostat, ince bağırsak, dalak, timus ve rahim.

Etkin doz, herhangi organ için eşdeğer dozun ( $H_T$ ), o organ için belirlenen doku ağırlık faktörleri ( $W_T$ ) ile çarpımının ilgili tüm organlar üzerinden toplamıdır. Burada i ilgilenilen organları gösterir. Tüm vücut dozu olarak düşünülebilir.

### 2.3 Birinci Yarı Değer Kalınlığı, 1.HVL

X-ışınları bir malzemenin içinden geçerken belirli bir kısmı soğurulur. Bir ışın demetindeki foton sayısını yarı değerine indiren madde kalınlığına “yarı değer kalınlığı” (*half value layer*, HVL) denir. Yüksek enerjili ışınlar (hardening spectrum) daha az soğurulurlar. HVL, polikromatik enerjili, yani sürekli Bremsstrahlung X-ışının sertliğini belirtmekte kullanılan en yaygın ve geçerli yoldur. Örneğin HVL’si 3mm bakır olan X-ışını demetinin sertliği HVL’si 1mm bakır olan ışınlardan çok daha fazladır (ICRU 74, 2005).

### 2.4 İkinci Yarı Değer Kalınlığı 2. HVL

Hava kerma değerini veya hava kerma hızı değerini, hiçbir soğurucu metaryal kullanılmadan ölçülen değer d<sub>1/4</sub>’e azaltan kalınlıktan (d<sub>1/4</sub>), ölçülen değeri yarıya azaltan kalınlığın (d<sub>1/2</sub>) çıkarılmasıyla elde edilen değerdir (ICRU 74, 2005).

$$2.HVL=d_{1/4}-d_{1/2} \quad (2.18)$$

### 2.5 Homojenlik Katsayısı (h)

Birinci yarı değer kalınlığının ikinci yarı değer kalınlığına oranıdır (Ma et al.2001).

$$h=\frac{1.HVL}{2.HVL} \quad (2.19)$$

### 2.6 X-Işını Ünitesi

Kurşun zırh içerisinde X-ışını tüpü, tüpün enerji ihtiyacını karşılayan yüksek frekans jeneratörü ve yüksek voltaj elektriksel bağlantılarının birleşiminden oluşan bir sistemdir.





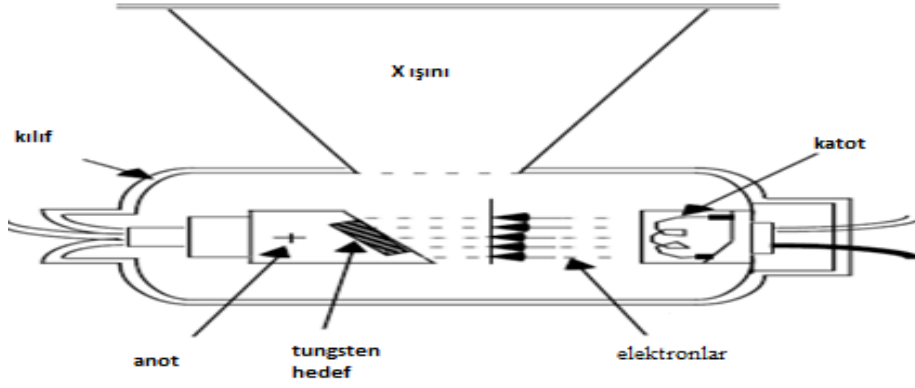
Şekil 2.1 a) Yüksek frekans jeneratörü b) Kurşun zırh içerisindeki X-ışını tüpü ve bağlantıları

### 2.6.1 X-ışını tüpü

X-ışını tüpü yüksek voltajlı bir katot ışını tüpüdür. Tüp yüksek vakumda havası boşaltılmış cam bir kılıftan oluşmuştur. Bir ucunda anot (pozitif elektrot), diğer ucunda katot (negatif elektrot) bulunur ve bunların her ikisi de lehimlenerek sızdırmazlığı sağlanmıştır. Katot, ısıtıldığında elektron salan tungsten materyalinden yapılmış bir flamanıdır. Anot, kalın bir çubuk ve bu çubuğun sonundaki metal hedeften oluşur. Anot ve katot arasına yüksek voltaj uygulandığında katot flamanı elektron yayınlanır. Bu elektronlar yüksek gerilim altında anoda doğru hızlandırılır ve hedefe çarpmadan önce yüksek hızlara ulaşır. Yüksek hızlı elektronlar metal hedefe çarptıklarında enerjilerini aktararak bir foton yayınlanır. Oluşan X-ışını demeti cam zarfın içindeki ince cam pencereden geçer.



a) Varian, RAD-21 X-ışını tüpü resmi



b) X-ışını tüpü şematik gösterimi

Şekil 2.2 Kullanılan X-ışını tüpü resmi ve şematik gösterimi

Belirli bir kinetik enerji kazanan yüksek hıza sahip bir elektron,  $Z$ 'si ve yoğunluğu yüksek bir hedefe, örneğin tungstene çarpınca, elektron durdurulana kadar birçok atomla çarpışmak zorunda kalabilir. Elektronun durdurulması sırasında kaybedilen kinetik enerjinin yüzde biri veya daha az kısmı X-ışını ışımasına, geri kalan kısmı ise ısı enerjisine dönüşür (Bor 2002). Bu nedenle X-ışını tüplerinin çalışma esnasında, bu ısının alınması için su gibi bir akışkanla sürekli soğutulmaları gerekir.

### 2.6.2 Yüksek gerilim bölücüsü (Dynalyzer)

Jeneratör ile X-ışını tüpü arasına paralel olarak bağlanan ve X-ışını tüpüne jeneratör tarafından verilen yüksek gerilimde hiçbir şekilde azalmaya neden olmadan, üzerinden çıkan sinyal kablolarının osiloskopa bağlanmasıyla uygulanan yüksek gerilimin ölçülmesini sağlayan cihazdır (Duruer 2009). Çelik bir kap içinde atmosfer basıncında kükürt florür ( $\text{SF}_6$ ) gazı doldurulan ve içinde üç farklı aralığa sahip hareketli bir bobin (coil)'le birlikte doğru akım ölçer (d.c. mA meter), bir mAs ölçer, a.c. flaman akımı ölçer ve bir gerilim bölücü bulunur. Ampermetreler, elektrostatik olarak zırhlanmıştır (GiCi 2014). Şekil 2.3 a)'da GiCi Model 2000 High Voltage Divider ünitesinde, amper metrelerin anot ve katotla yüksek gerilim kablosuyla seri bağlanmasını görmek için kutunun üstünde pencereler görülmektedir. Şekil 2.3 b)'de ise bu bağlantıların yapılmış hali görülmektedir.



a) GiCi model 2000 yüksek gerilim bölücü (bağlanmamış resmi)

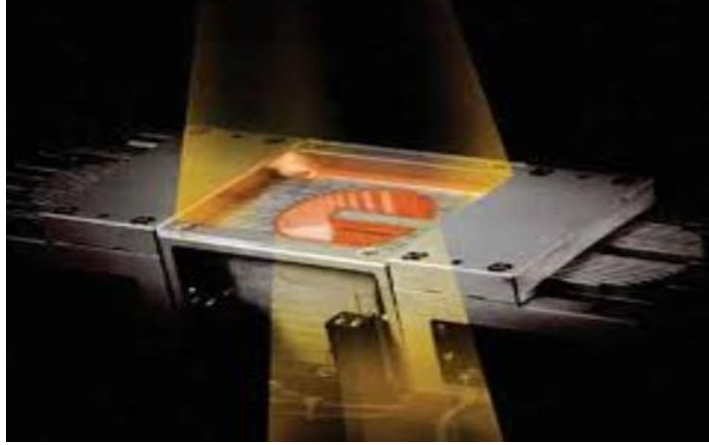


b) GiCi model 2000 yüksek gerilim bölücü  
(150 kV<sub>p</sub> X-ışını tüp jeneratörüne bağlantılandırılmış resmi)

Şekil 2.3 Dynalyzer yüksek gerilim bölücü

### 2.6.3 Kolimatör

Işınlanan alanın, şeklini ve boyutunu ayarlayan kurşun gibi X-ışını durdurucu malzemeden yapılan bir araçtır.



Şekil 2.4 Kolimatör

## 2.7 Foton Radyasyon Kaynakları

X- ve gama fotonlarının yapay olarak üretilmesi için çok çeşitli yol ve yöntemler vardır. Ancak bu tezin kapsamındaki çalışma radyolojide kullanılan X-ışını tüpleriyle sınırlıdır. Örneğin, lineer hızlandırıcılarda üretilen sürekli X-ışını demetleri veya radyoizotop kaynaklarından elde edilen gama fotonları bu tezin kapsamı dışındadır.

### 2.7.1 Tek enerjili (Monokromatik) radyasyon kaynakları

Enerji spektrumunda, tek enerjilerde parçacık ya da parçacıklar salan radyasyon kaynaklarına tek enerjili radyasyon kaynakları denir. Radyoaktif izotoplardan bazıları tek enerjili radyasyon yayımlayabilir (Örneğin  $^{54}\text{Mn}$  (834 keV) (Bor 2002).

### 2.7.2 Çok enerjili (Polikromatik) radyasyon kaynakları

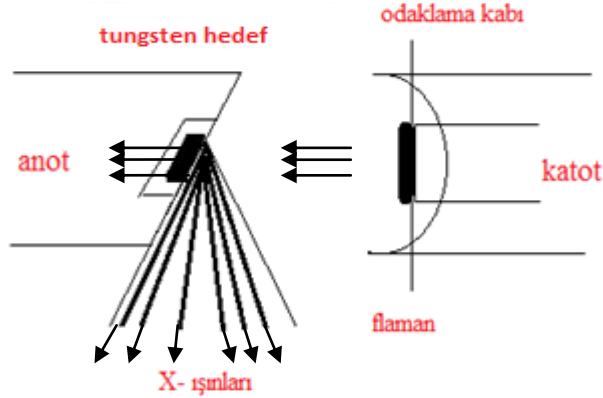
Bir radyasyon kaynağında farklı enerjilerde parçacıklar salınıyorsa, bu parçacıkların oluşturduğu enerji spektrumu polikromatik enerji spektrumudur. X-ışını tüpünden yayımlanan X-ışınları, çok enerjili radyasyon kaynağıdır (Bor 2002).

## 2.8 X-Işınları

X-ışını tüpü; içerisinde anot ve katot olarak adlandırılan iki elektrot bulunan vakumlanmış bir cam tüpten oluşur.

Katotta elektron üretimini sağlayacak olan flaman dışında flamanın ısıtılması için gerekli elektrik enerjisini taşıyacak bağlantı kabloları ile metal odaklama kabı bulunur. Tungsten telden akım geçmesi ile ısınan telin atomlarından elektronlar serbest kalarak flaman etrafında bir uzay yükü oluştururlar. Serbest elektronlar üretildikten sonra katot-anot arasına uygulanan yüksek gerilimle hızlandırılarak hedefe (anot) çarptırılır. Bu yüksek hızdaki elektron bombardımanı sonucu anotta X-ışını fotonları meydana gelir.

Elektronların birbirlerini itmelerinden dolayı elektron demetinin dağılarak anodun geniş yüzeyini bombardıman etmemesi için katot etrafına odaklama kabı yerleştirilmiştir ve bu kaba uygulanan negatif gerilimle (30-60 kV) elektronların anoda ince bir demet halinde gitmeleri sağlanır (Bor 2002).



Şekil 2.5 X-ışınları oluşumu

X-ışınlarının oluşumunda elektronlar hedef madde atomlarının çekirdeği ve yörünge elektronları ile etkileşmesi sonucunda iki mekanizma vardır. Bunlardan birincisi Bremsstrahlung (frenleme ışınımı) radyasyonu, ikincisinde ise karakteristik X-ışınları meydana gelir.

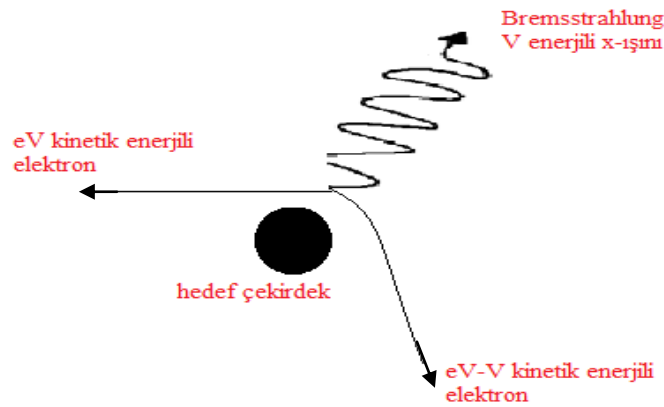
### 2.8.1 X-ışınlarının oluşum mekanizması

Bu araştırmada, borosilikat cam ve parafin esaslı üretilen fantomların radyasyon soğurma özelliklerinin incelenmesinde X-ışını üreten cihazla çalışıldığından, bu bölümde özel olarak

X-ışınlarının oluşumu ve madde ile etkileşiminden de söz edilmiştir. X-ışınının meydana gelmesinde elektronların hedef madde ile etkileşmesi için Bremsstrahlung olayı (frenleme radyasyonu) kısaca açıklanmıştır.

### 2.8.1.1 Bremsstrahlung olayı

Bilindiği gibi, Wilhelm Roentgen, birkaç deneyi takip eden büyük keşfinden sonra karakteristik X-ışınlarının tanımını yapabirmiştir. Fakat atomlar, parçacıklar ve kuantum kavramları anlaşılincaya kadar X-ışınlarının nasıl üretildiğini açıklamak mümkün olmamıştır. Şimdi ise negatif yüklü ve  $eV$  kinetik enerjili bir elektron, hedef atomun pozitif yüklü çekirdeğinin kuvvet alanına girdiğinde yollarından sapar ve kinetik enerjisinde bir 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 ( $Ze$ ) bağlıdır. Bu kuvvet alanı tungsten gibi yüksek atom numaralı materyallerde çok daha büyüktür. Bu alan içindeki elektronlar, çekirdeğin yakınında doğrultularından saparak negatif yönde ivmelenir ve elektromanyetik radyasyon yayımına sebep olur. Bu sırada elektron enerji kaybettiği için çekirdeğin kuvvet alanından yavaşlayarak ayrılır. Elektronun yavaşlamadan sonraki enerjisi  $E=eV-hv$  olup, burada  $hv$  elektromanyetik radyasyonun enerjisidir (Şekil 2.6). Röntgen, bu radyasyonun bilinmeyen yönlerini karakterize etmek için onları “X-ışınları” olarak adlandırmıştır. Yavaşlayan elektronlar tarafından üretilen bu ışınlar “frenleme radyasyonu” anlamına gelen “Bremsstrahlung” olarak ifade edilir.



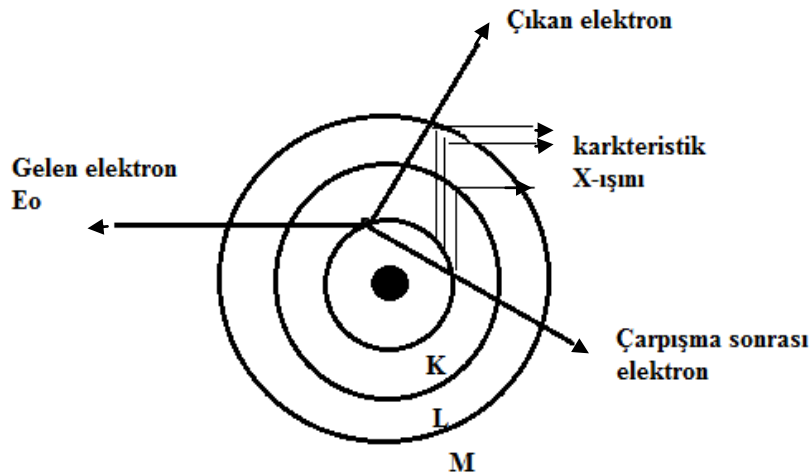
Şekil 2.6 Sürekli X-ışınlarının çekirdek alanında üretimi – Bremsstrahlung

X-ışını üretimi olasılığa dayalıdır. Çünkü verilen bir elektron herhangi bir yolu alabilir ve enerjisinin tümünü kaybederek hedef çekirdeği geçebilir. Bremsstrahlung ışınları  $E_v$

İvmelenme enerjisine kadar tüm enerjilerde ve tüm yönlerde, hedefte soğurularak yayımlanır. Maksimum enerjinin büyüklüğü hedef materyale bağlı değildir. Fakat direkt olarak maksimum voltajla doğru orantılıdır. İvmelenmiş elektronların kinetik enerjilerinin yaklaşık % 98'i ısı olarak kaybedilir. Çünkü etkileşime giren elektronların çoğu, enerjilerini hedef atomları iyonlaştırmak için harcarlar (Bor 2002, Martin 2006).

### 2.8.1.2 Karakteristik X-ışınları

Atomda sökülen bir orbital elektronunun yeri, bir dış kabukta bulunan elektron tarafından veya serbest bir elektron tarafından, enerji seviyelerindeki değişimle ya da Bohr'un da tanımladığı gibi elektromanyetik radyasyon yayınımları ile daha düşük potansiyel enerji seviyesine atlayarak doldurulabilir. Yayınlanan enerji, doldurulan kabuğun bağlanma enerjisi ile elektronun geldiği kabuğun bağlanma enerjisi arasındaki farka eşittir. Herbir elementteki elektronlar tek enerji seviyesine sahip olduğundan elektromanyetik radyasyonun bu yayınımları o elementin karakteristiğidir. Bu yüzden 'karakteristik X-ışınları' olarak adlandırılırlar Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Karakteristik X-ışınlarının atomik yörüngelerde oluşumu

Eğer K kabuğunda bir elektron boşluğu varsa bu boşluğu doldurma işleminde yayınlanan karakteristik X-ışınları 'K kabuğu X-ışınları' olarak bilinir. Elektron boşluklarını dolduran elektronlar L, M, N, ...kabuklarından gelse bile karakteristik X-ışınları doldurulan kabuğa göre tanımlanır (Bor 2002, Martin 2006).

Tungsten hedef kullanıldığında, sürekli X-ışını spektrumu üzerinde tungstenin karakteristik pikleri ( $WK\alpha_1=59,318$  keV(%47),  $WK\alpha_2=57,981$  keV(%27,4) ve  $WK\beta_1=67,244$  keV(%10,3),  $WK\beta_2=69,067$  keV(%3,58) ve  $WK\beta_3=66,950$  keV(%5,35) ve benzer şekilde molibden hedef kullanıldığında sürekli spektrum üzerinde karakteristik pikleri Mo  $K\alpha_1=17,479$  keV(%42,6),  $MoK\alpha_2=17,374$  keV(%22,4) ve  $MoK\beta_1=19,607$  keV(%6,61) gözlenir (Firestone 1996).

## **2.8.2 X-ışınlarının kalite kantitelerine etki eden faktörler**

### **2.8.2.1 Kalite**

1.  $kV_p$
2. Dalga şekli
3. Filtrasyon
4. Hedef maddesi

### **2.8.2.2 Kantite**

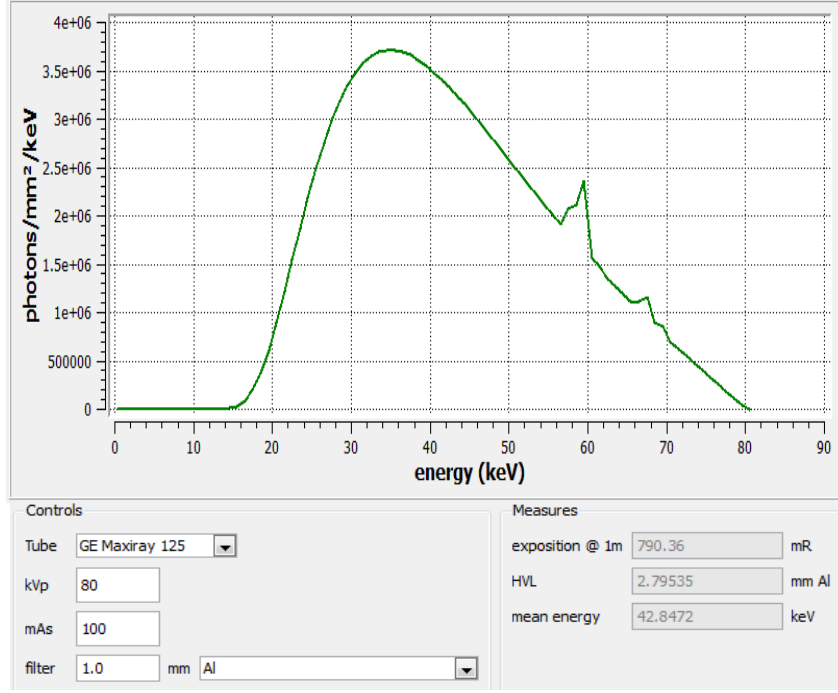
1.  $kV_p$
2. Tüp akımı
3. Dalga şekli
4. Filtrasyon
5. Hedef maddesi
6. Odaktan olan mesafe ve odak açısı

### **Uygulanan gerilim ( $kV_p$ )**

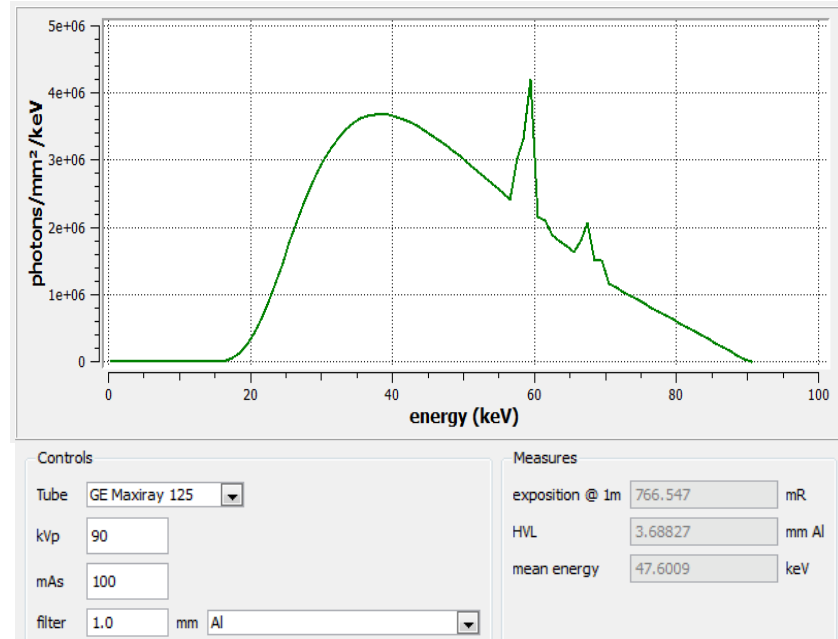
X-ışını tüpüne uygulanan tepe gerilim değeri spektrumun maksimum enerji noktasını belirler. Artan elektron enerjisiyle birlikte yayımlanan foton enerjisi de artar ve sürekli spektrumun (Bremsstrahlung) maksimum değeri büyür. Buna bağlı olarak spektrumun ortalama enerjisi de artar. Hedefe uygulanan gerilim yeterli durumda ise örneğin tungsten hedef maddenin ( $70$   $kV_p$  üzeri) karakteristik radyasyonu da spektrumda oluşur ama artan gerilim ile bu radyasyonun spektrumdaki yeri değişmez (Bor 2002).

Tüm şartlar aynı tutularak  $80$   $kV_p$  ile  $90$   $kV_p$  'de Spectrum GUI programıyla elde edilen spektrum değerleri karşılaştırılmıştır.





Şekil 2.8 100 mAs'da, 1mm Al kalınlığında ve 80 kV<sub>p</sub> tüp geriliminde hesaplanan spektrum



Şekil 2.9 100 mAs'da, 1mm Al kalınlığında ve 90 kV<sub>p</sub> tüp geriliminde de hesaplanan spektrum

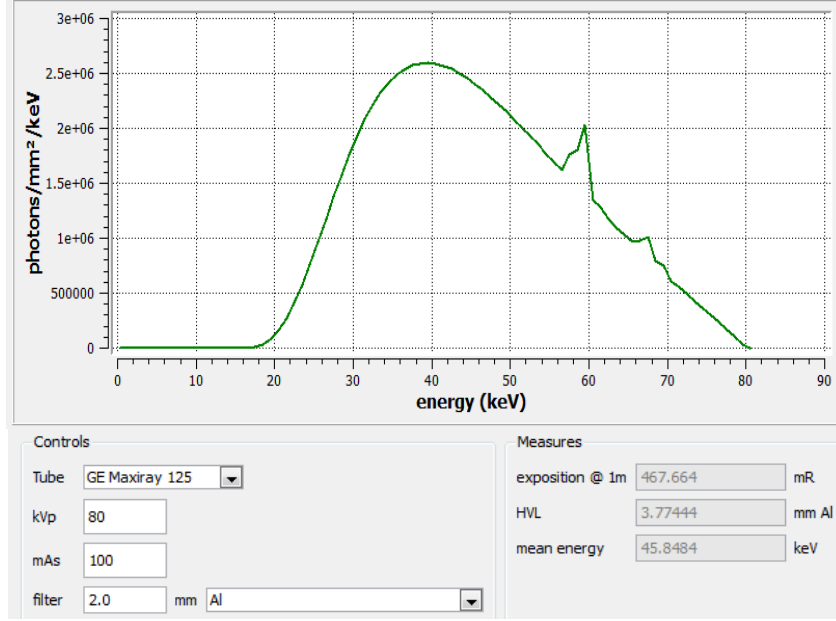
Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da görüldüğü üzere karakteristik X-ışınlarının yeri değişmemiştir. Ancak gerilim arttıkça, spektrum sertleşerek, karakteristik X-ışınları daha belirginleşmiştir.

Jeneratör tipine bağı olarak uygulanan  $kV_p$  ile X-ışını foton sayısı da üstel olarak artar. HVL (demet şiddetini yarıya indiren kalınlık) değerleri de artan gerilim ile demet şiddeti de arttığından artar.  $kV_p$  değerinin arttırılmasıyla X-ışını foton sayısı üstel olarak artacağından toplam foton sayısı artmıştır. Aynı zamanda demetin şiddeti ve giriciliğı arttığı için 1.HVL değerleri artmıştır. Benzer şekilde uygulanan gerilime bağı olarak demetin enerjisi arttığı için spektrumun ortalama (etkin) enerjisi de artmıştır. Diğer bir ifadeyle, uygulanan tüp gerilimi arttıkça, HVL değeri dolayısıyla spektrum ortalama etkin enerjisi daima yükselir.

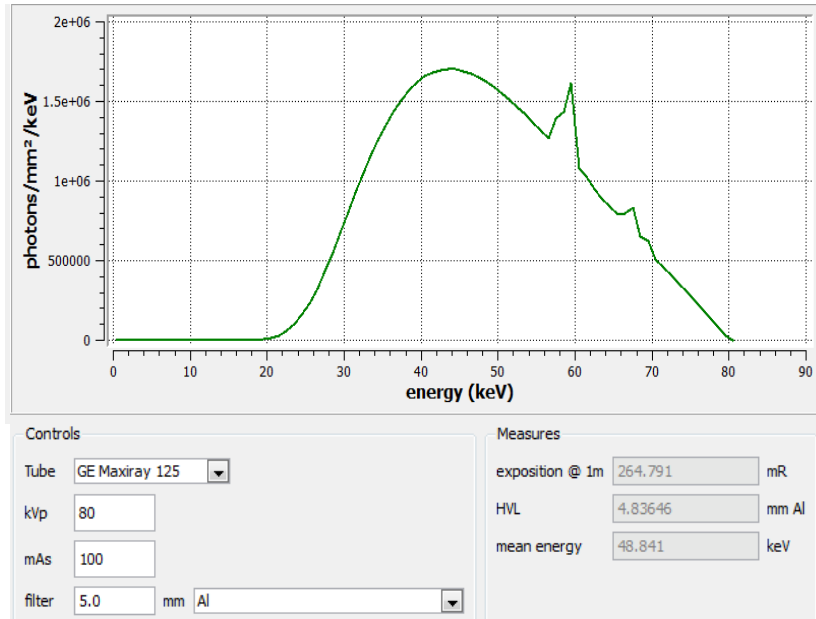
### **Filtrasyon**

X-ışını tütünün yapısından kaynaklanan malzemeler nedeniyle spektrum, tüp çıkışında kısmen filtrelenmiş olur. Tüp yapısından kaynaklanan kısımlar (tüp camının kalınlığı, zırh penceresi, kolimatör aynaları, yağ tabakasının kalınlığı) doğal filtrasyonu (inherent filtration) oluşturur. X-ışını demetinin ortalama enerjisini değiştirmek için tüp çıkışında demet önüne yerleştirilmiş ilave malzeme kalınlıkları da ek filtrasyonu (added filtration) oluşturur. Doğal ve ek filtrasyonların toplamı ise toplam filtrasyon olarak ifade edilir. Bu toplam filtre, demetteki düşük enerjili fotonları soğurur ve demetin ortalama enerjisi nispeten artar. Buna bağı olarak HVL değerleri de artar. Düşük enerjili fotonlar soğurulduğundan foton akısında azalma olur. Spektrumun maksimum enerji noktası değişmez sadece minimum enerji noktası değişir (Bor 2002).

Bu amaçla, tüm şartlar aynı tutularak, 2 mm Al filtre ve 5 mm Al filtre kalınlığında Spectrum GUI programı ile simüle edilen spektrum değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.10 100 mAs'da, 80 kV<sub>p</sub> tüp geriliminde ve 2 mm Al kalınlığında hesaplanan spektrum

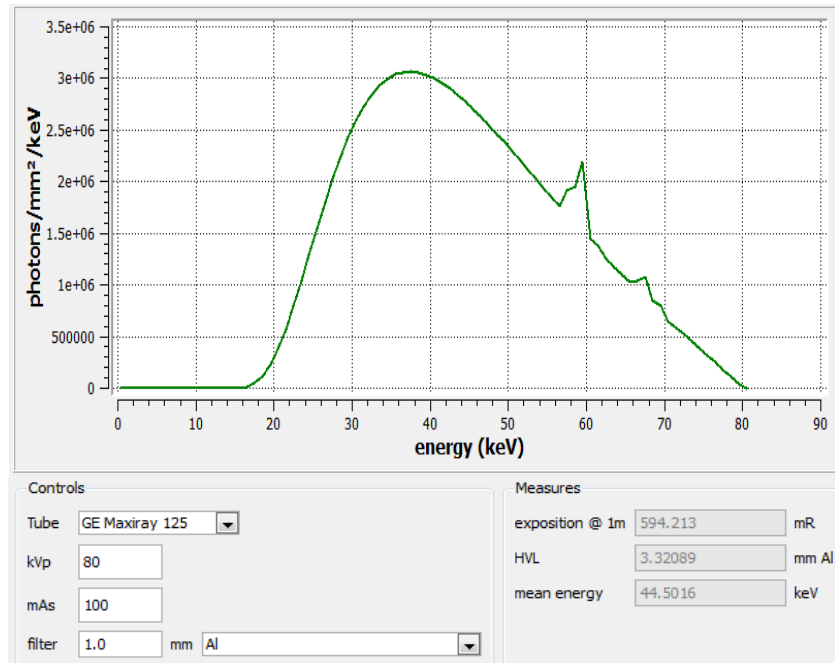


Şekil 2.11 100 mAs'da, 80 kV<sub>p</sub> tüp geriliminde ve 5 mm Al kalınlığında hesaplanan spektrum

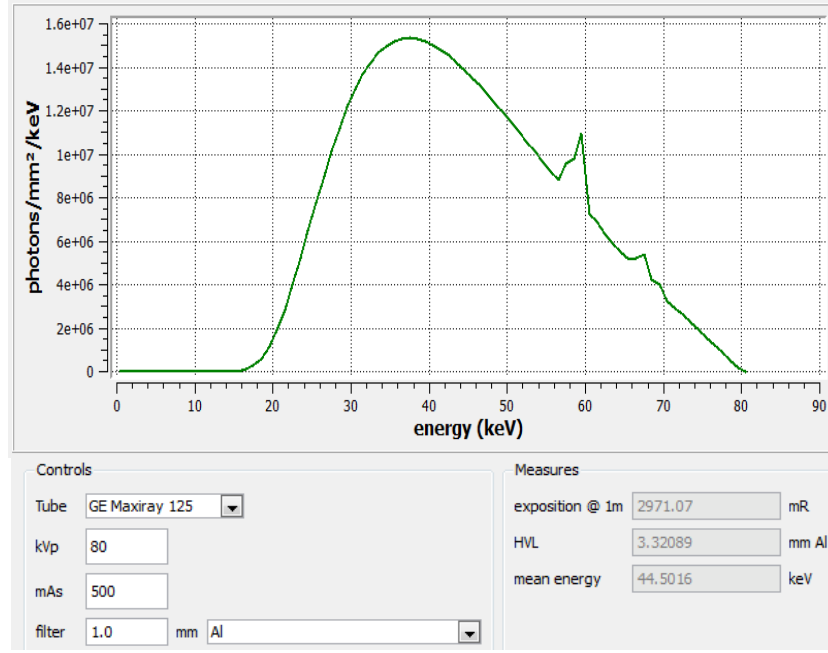
Filtre kalınlığının arttırılmasıyla malzeme tarafından daha fazla foton soğurulacağından toplam foton sayısı azalmıştır. Dolayısıyla 2 mm Al filtrasyon durumu için 1 metre mesefadaki 467,66 mR'lük ışınlama değeri 5 mm Al ek filtrasyonda 264,79 mR'e düşmüştür. Aynı zamanda X-ışını demetinde düşük enerjili fotonların belirli bir kısmı soğurulacağından spektrumun etkin (ortalama) enerjisi ve minimum enerji noktası artmıştır.

### Tüp akımı

Bir X-ışını tüp sisteminde tüm şartlar ( $kV_p$ , filtrasyon) aynı tutularak 100 mAs ile 500 mAs da Spectrum GUI programıyla elde edilen spektrum değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.12 80  $kV_p$  tüp geriliminde, 1 mm Al kalınlığında ve 100 mAs'da hesaplanan spektrum



Şekil 2.13 80 kV<sub>p</sub> tüp geriliminde, 1 mm Al kalınlığında ve 500 mAs’da hesaplanan spektrum

X-ışını tüpüne uygulanan akım arttıkça, elde edilen foton akısı, yani sayısını artmıştır. Bu özel durumda, 100 mAs için spektrum tepe noktasında  $\sim 3 \times 10^6$  foton/mm<sup>2</sup>/keV olarak hesaplanan foton akısı, 500 mAs için  $\sim 15 \times 10^6$  foton/mm<sup>2</sup>/keV’ yükselmiştir. Dolayısıyla mAs arttıkça belirli mesafede ışınlama miktarı, yani doz da artmıştır.

### 2.8.3 IEC-61267 de belirlenmiş olan X-ışını demet kaliteleri

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

IEC-61267 tarafından tanımlanmış olan ‘standart radyasyon şartları’ aşağıda parametrelerle tanımlanır;

- Anot (hedef) materyalinin cinsi ve özellikleri
- X-ışını tüpüne uygulanan yüksek gerilim
- Toplam filtrasyon

- X-ışını sisteminin bünyesindeki (inherent) 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-ışını demet kaliteleri elde edilirken ve bu demet kaliteleri kullanılırken, X-ışını tüpüne uygulanan gerilimdeki dalgalanma %10'u geçmemelidir. X-ışın tüpündeki anot materyali ise tungsten olmalıdır.

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

**1. RQR:** Herhangi bir fantom ya da ek filtre kullanılmadan X-ışını kaynağından çıkan ışınlar ile doğrudan elde edilen demet kalitesidir.

**2. RQA:** Işınlanan bir hastayı temsil eden ek bir filtreden geçerek 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-ışını kaynağından çıkan ışınlar ile elde edilen demet kalitesidir.

**8. RQA-M:** Mamografi uygulamalarında, ışınlanan bir hastayı temsil eden ek bir filtreden (Al) geçen 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 X-ışını demet kaliteleri elde edilmiş ve deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.

### 2.8.3.1 RQR X-ışını demet kalitesi

RQR, (Radiation Qualities in Radiation beams emerging from the X-ray source assembly) herhangi bir fantom ya da ek filtre kullanılmadan X-ışını kaynağından çıkan ışınlar ile elde edilen demet kalitesidir. Bu X-ışını demet kalitesi genel radyografi, floroskopi ve dental uygulamalarda hastaya gelen demeti temsil eder.

Çizelge 2.3 Standart RQR X-ışını demet kaliteleri

Radyasyon Kalitesi	Uygulanan Gerilim (kV <sub>p</sub> )	Birinci 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-ışını demet kaliteleri aşağıda verilen parametrelere göre tanımlanır.

1. Anot materyali tungsten olmalıdır.
2. X-ışını tüpüne uygulanan gerilim Çizelge 2.3’de 2. sütunda verilen değere ayarlanmalıdır.
3. X- ışını sisteminin toplam filtrasyonu ayarlanabilmelidir.
4. Birinci HVL (kısaca, 1.HVL) değerleri Çizelge 2.3’de 3. sütunda verilen değerlerde olmalıdır.

5. Homojenlik katsayısı Çizelge 2.3'de 4. sütunda verilen değerlerde ya da bu değerlerin  $\pm 0,03$ 'lük limitleri içerisinde olmalıdır.

X-ışını tüpüne uygulanan yüksek gerilim ve bu gerilim değerlerinin ayarlanması bir adet yüksek frekans jeneratörü ile gerçekleştirilir. Yüksek frekans jeneratörü ile X-ışını tüpü arasına paralel olarak bağlanmış bir voltaj bölücüsü bulunmaktadır. X-ışını tüpüne uygulanan gerilim, jeneratör ile X-ışını tüpü arasına paralel olarak bağlanmış olan bu gerilim bölücüsü ile sürekli olarak herhangi bir şekilde tüp çıkışına müdahale edilmeksizin izlenebilmektedir. X-ışını tüpüne uygulanan yüksek gerilim tanımlanmış olan değere %1,5 ya da 1,5 kV'lık belirsizlikle ayarlanmalıdır (IEC 61267, 2005). Bu koşul metaryal yöntemler bölümünde Çizelge 3.6 yapılan gerilim ölçümlerinde azami % 0,8 belirsizlik olarak elde edilmiştir. HVL ölçümlerinde ve toplam filtrasyonun ayarlanmasında kullanılan filtreler % 99,9 saflıkta alüminyum olmalıdır ve bu filtrelerin bilinen değeri  $\pm 0,01$  mm'lik limitler içerisinde olmalıdır.

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 farklı ise X-ışını 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 ekmeden, elde edilecek olan X-ışını 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  $\pm 0,1$ mm'lik limitler içerisinde olmalıdır.

## **2.9 Radyasyon Ölçümünde Kullanılan Dedektörler**

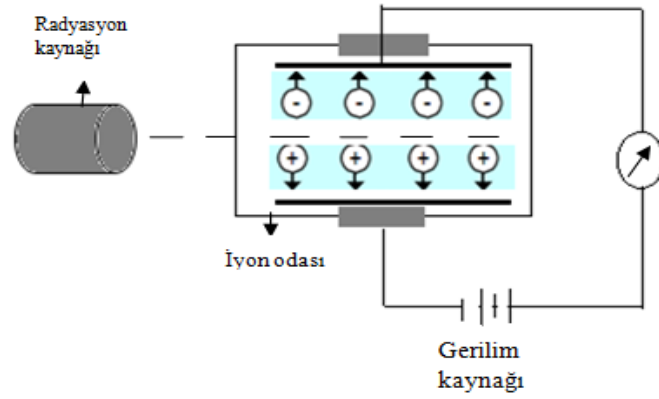
- 1) Gazlı Dedektörler (İyon odaları, Orantılı sayıcılar, Geiger-Mueller tüpleri)
- 2) Sintilasyon Dedektörleri
- 3) Yarı İletken Dedektörler



## İyon odaları

İyon odalarında akımlar küçüktür ( $10^{-13}$ – $10^{-16}$  A gibi) ve uygulanan çalışma geriliminden bağımsızdır. İyon odaları, hassasiyetleri düşük olduğundan X-ışını spektrometrelerde kullanılmazlar. İyon odaları yüksek şiddetli radyasyon alanlarında, doz hızı ölçümleri için yaygın olarak kullanılır.

Fotonlar, iyon odasının hassas hacmi içindeki gazı iyonlaştırdığında bir elektrik akımı meydana gelir ve bu akım ölçülür. İyon odası bölgesinde tüpe uygulanan gerilim sadece iyonizasyon sonucu meydana gelen iyonların elektrotlara toplanmasına yeterli olacak kadardır. Uygulanan gerilim, iyon odasındaki gazın cinsine, basıncına, elektrotların geometrik yapısına bağlı olarak değişir. Bu bölgede anot tarafından toplanan elektronların sayısı radyasyon tarafından meydana getirilen elektron sayısına eşittir (Knoll 2000).



Şekil 2.14 İyon odası için kullanılan elektrometre

### 3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

#### 3.1 Tez Kapsamında Kullanılan Sistemler

##### 3.1.1 X-ışını, ışınlama sistemi

Çizelge 3.1 X-ışını sisteminin özellikleri

<b>Kurulum tarihi</b>	2008
<b>X-ışını jeneratörü</b>	İtalray, Pixel 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
<b>X- ışını tüpü</b>	Varian, RAD-21
	Odak nokta boyutu: 0,6 mm – 1,2 mm
	Anot materyali: Tungsten
	Anot açısı: 12°
<b>Gerilim bölücüsü:</b>	GiCi-PM, Model 2000 High Voltage Divider
	Gerilim aralığı: 0–150 kV
	Bölme oranı: 10000:1 ya da 1000:1
	Empedans: 1 MΩ ya da 10 MΩ

### 3.1.2 İyon odası

28 cm<sup>3</sup> hassas hacimli, küresel PTW marka, kalibrasyonlu bir iyon odası kullanılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 PTW tipi iyon odası

Almanya'nın birincil standart dozimetri laboratuvarı (PSDL) Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) tarafında izlenebilir PTW (Freiburg Alm.), ikincil standart dozimetri laboratuvarı (SSDL) tarafından kalibre edilen referans dedektöre ilişkin bilgiler Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Referans dedektör bilgileri

Dedektör	PTW, 28 cm <sup>3</sup> Küresel İyon Odası
Tipi	TM 32005
Çalışma gerilimi (V)	+400
Doz aralığı (µGy)	2,2 µGy - 23,8 mGy
Doz aralığı hızı (µGy/dak)	12,96 µGy/dak – 65 Gy/dak
Enerji bağımlılığı	48 keV ile Co-60 (1,25 MeV) arasında, ≤ ± %5

### 3.1.3 Elektrometre

PTW (Freiburg), ikincil standart dozimetri laboratuvarı (SSDL) tarafından kalibre edilen PTW Unidos Webline elektrometre kullanılmıştır.

Bazı temel özellikleri aşağıda verilmiştir:

1. Eş zamanlı doz ve doz hızı ölçümü,
2. Uzaktan erişim işlevselliği,
3. Veri kayıt özelliği,
4. Geniş görüntüleme açıları ile aktif, yapılandırılabilir TFT ekran,
5. Navigasyon düğmesi ve yardım sistemi ile kolay ve hızlı menü işlemi



Şekil 3.2 Elektrometre

### 3.1.4 Gerilim (kV) ölçümünde kullanılan cihazlar

1. GiCi marka Model 2000 gerilim bölücüsü,
2. Radcal marka kV<sub>p</sub> metre; model 40X12-W,
3. Radcal marka kV<sub>p</sub> metre; model 40X5-W

### 3.2 X-Işını 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),
4. Spectrum GUI

IEC-61267 protokollerinde belirlenmiş olan X-ışını demet kalitelerinin elde edilmesinde Xcomp5r ve Spectrum GUI programları kullanılmıştır.

### 3.3 Fantomlar

1. ISO water slab phantom (Su dilim fantomu - tüm vücut),
2. ISO water pillar phantom (Su sütun fantomu-ön kol veya bacak),
3. ISO PMMA rod phantom (PMMA çubuk fantomu)



Şekil 3.3 ISO fantomları (1. Su dilim fantom, 2. Su sütun fantom, 3. PMMA çubuk fantom)

Tez kapsamın da yukarda görülen fantomlardan ISO su sütun fantomu kullanılmıştır. Ön kol veya bacak temsil eder ve su ile doldurulur. 73 mm çapında ve 300 mm uzunluğu olan dairesel kesitli bir silindirden oluşur. Duvarları PMMA dan oluşmuştur. Duvar kalınlığı 2,5 mm alt ve üst kapaklarının her birinin kalınlığı 10 mm dir (PTW 2014). Çalışmada sütun fantomunun içi saf suyla doldurulmuştur.

### 3.4 IEC 61267 Protokolünde Belirtilen X-ışını Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi

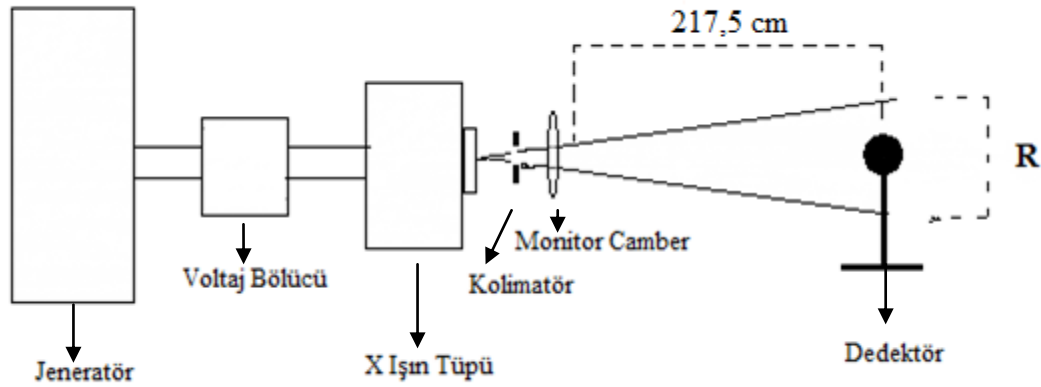
#### 3.4.1 RQR X-ışını demet kalitesinin elde edilmesi

RQR X-ışını demet kalitesinin elde edilmesi için aşağıda belirtildiği gibi ölçüm geometrisi kurulmuştur. Odak noktası ile dedektör arasındaki mesafe 217,5 cm'ye ayarlanmıştır. Soğurucu filtreler %99,9 saflıktadır. Ölçümlerin alındığı referans dedektör PTW marka TM 32005 modelindeki iyon odasıdır. Dedektörün bulunduğu noktadaki ışınlama alanı  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  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 karartılarak ışınlama takip edilmiştir.

Fosfordaki parıldamaya göre de istenilen boyutta bir alan açılması mümkün olmuştur. Işınlama esnasında radyasyondan korunma açısından kurşun bariyerlerin arkasına geçilmiş ve bu bariyerlerde bulunan kurşun camlardan bakılarak parıldama izlenmiştir. Işınlama boyunca kişisel dozimetri kullanılmıştır.

Ölçüm sonucunda elde edilen veriler excell, Xcomp5r, Spectrum GUI, lab fit programlarında çizdirilmiş ve karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.4 RQR X-ışını demet kalitesinin elde edildiği deney düzeneği

### 3.5 Birinci Yarı Değer, İkinci Yarı Değer Kalınlıklarının ve Homojenlik Katsayısının Hesaplanması

İkinci yarı değer kalınlığı (2.HVL), 'Filtre kalınlığı (mm Al) – Doz ( $\mu\text{Gy}$ ) grafiğinde elde edilen eğrinin başlangıçtaki doz hızının dörtte birine düştüğü değere kadar devam ettirilmesiyle elde edilmiştir. Başlangıçtaki doz hızını dörtte birine düşüren filtre kalınlığının tam olarak hesaplanabilmesi için lineer interpolasyon yapılmıştır. Elde edilen değerden ikinci yarı değer kalınlığı aşağıda formül ile elde edilmiştir.

$$2.HVL = d_{1/4} - d_{1/2} \quad (3.1)$$

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 aşağıda formül yardımıyla homojenlik katsayısı elde edilmiştir.

$$h = \frac{HVL 1}{HVL 2} \quad (3.2)$$

### 3.6 Karışım Numunelerin Hazırlanması

#### 3.6.1 Farklı bileşimde hazırlanan parafin disk numuneler



Şekil 3.5 Hazırlanan numuneler ve etiket bilgileri

- 10 adet sadece P-10 beyaz teknik parafin,
- 10 adet % 10 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüklemeli parafin,
- 10 adet % 20 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüklemeli parafin,
- 10 adet % 10 CaSO<sub>4</sub> yüklemeli parafin,
- 10 adet % 20 CaSO<sub>4</sub> yüklemeli parafin

### 3.6.1.1 P-10 beyaz teknik parafin

Katran, petrol, neft vb. maddelerinden çıkarılan beyaz yarı saydam, buharı parlak bir alevle yanan kimyasal etkenlere karşı ilgisiz alkan, hidrokarbon. Sanayide P-10 teknik parafin olarak bilinen ve yoğunluğu yaklaşık 0,80-0,93 g/cm<sup>3</sup> olan parafin mum (paraffin wax)

Formülü: C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>, n=20

Molekül ağırlığı: 275-600 g/mol

Erime noktası: 70-80° C

Etkin atom numarası Z<sub>eff</sub>=4,72

Etkin kütle numarası A<sub>eff</sub>=6,42

### 3.6.1.2 Kalsiyum sülfat (CaSO<sub>4</sub>)

(Merck marka araştırma kalitesinde) > %98 saflıkta

Etkin atom numarası Z<sub>eff</sub>=13,42

Etkin kütle numarası A<sub>eff</sub>=23,66

Çizelge 3.3 CaSO<sub>4</sub>'ün özellikleri

Moleküler formülü	CaSO <sub>4</sub>
Molar kütlesi	136,14 g/mol (susuz)
Görünüm	Beyaz kat
Koku	Kokusuz
Yoğunluk	2,96 g/cm <sup>3</sup> (susuz)
Ergime noktası	1460° C
Çözünürlük	20 ° C (susuz) 0,21g/100ml

Kalsiyum sülfat, dünya çapında pek çok yerde, doğal olarak oluşan alçıtaşı ve anhidrit gibi maddelerden bir dizi işlem yapılarak üretilir.



### 3.6.1.3 Bor oksit (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

Etkin atom numarası  $Z_{\text{eff}}=7,07$

Etkin kütle numarası  $A_{\text{eff}}=14,04$

Çizelge 3.4 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün özellikleri

Molekülformül	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ortalama kütle	69,620201 g/mol
Monoizotopik kütle	70,003357 g
Görünüm	Renksiz, yarı saydam topraklar veya sert, beyaz, kokusuz kristaller.
Deneyel kaynama noktası	3380 F (1860 ° C)
Deneyel buhar basıncı	0 mmHg
Deneyel erime noktası	450° C

([www.eti.maden.isletmeciligi.com.tr.2014](http://www.eti.maden.isletmeciligi.com.tr.2014))

### 3.6.2 Numunelerin hazırlanması

Öncelikle katı haldeki P-10 beyaz teknik parafin Nükleer Bilimler Enstitüsü laboratuvar imkanlarında sağlanan araç ve gereçler kullanılarak eritilmiştir. Eriyik halde olan parafinden belli bir miktar alınarak hassas terazide ölçümü yapıldı. Öngörülen koşullardaki bir karışım numune hazırlanması için parafin ve karışımı oluşturan diğer maddeler tartılarak ayarlandı. (Örneğin: %10 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + % 90 Parafin için 10 gram B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 90 gram parafin).

Kullanılan maddeler genelde suda az çözünen maddeler olduğundan hemen eriyik içinde dibe çöktüğü tespit edilmiştir. Bunu engellemek için farklı yöntemler denendi ve basit laboratuvar teknikleriyle dibe çökmesi engellendi. Donma aşamasına gelen karışım aşağıda Şekil 3.6'da görülen 1nci kaba döküldü. Tamamen katılaştıran karışım Şekil 3.6'da görülen kaplardan 4ncü kap ile kesilerek kalıp şeklinde çıkarıldı. Hazırlanan numuneler; numaralandırıldı ve belirsizlik hesaplamaları için farklı 10 noktasından kompas yardımıyla kalınlığı ölçülüp not edildi.



Şekil 3.6 Plastik kaplar

Çizelge 3.5 Hazırlanan numuneler için deneysel olarak hesaplanan yoğunluk değerleri

No	P-10 Beyaz Teknik Parafin	Elde edilen yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )			
		%10 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Yüklemeli Parafin	%20 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Yüklemeli Parafin	%10 CaSO <sub>4</sub> Yüklemeli Parafin	%20 CaSO <sub>4</sub> Yüklemeli Parafin
1	0,86	0,81	0,91	0,88	0,94
2	0,81	0,82	1,00	0,85	0,95
3	0,88	0,84	0,98	0,85	0,95
4	0,85	0,84	0,95	0,83	0,96
5	0,85	0,81	0,94	0,86	0,96
6	0,88	0,85	0,94	0,84	0,95
7	0,88	0,84	0,92	0,87	0,89
8	0,87	0,83	0,93	0,84	0,93
9	0,87	0,83	0,93	0,70	0,94
10	0,71	0,84	0,95	0,86	0,95
<b>Ortalama Yoğunluk</b>	0,85±0,05	0,83±0,01	0,94±0,03	0,84±0,05	0,94±0,02

### 3.6.3 Numunelerin HVL değerlerinin belirlenmesi

Şekil 3.7’de gösterilen düzenekte her bir numune tek tek sırayla borosilikat tüp içerisine yerleştirilerek dozlar kademe kademe artan kalınlık için ölçülmüştür. Ölçümler RQR-2 den RQR-8 yedi demet kalitesinde tekrarlandı. Borosilikat cam tüp boş iken de ölçümler her demet kalitesinde gerçekleştirildi.



Şekil 3.7 Numunelerin ölçümü için oluşturulan düzenek

### 3.7 Borosilikat Cam

Borosilikat camlar, cama bor bileşiklerinin eklenmesiyle üretilir. Borik asit camın ısıl genişleme katsayısını düşürür. Bu yüzden borun ısıya direnci artar. Bor bileşikleri çizilmeye, aside dayanıklılığı artırır. Yansımayı, renk ve parlaklığı artırır. Kimyasallara direnci artırır. Cam tipine göre bor oksit içeriği % 0,5 –% 23 bor oksit arasında değişir. Bor ilavesi, bor bileşiklerinden borik asit ve bor minerallerinden boraks, kolemanit veya bunların kombinasyonları şeklinde yapılır. Pyrex camlar dondurulabilir, hızla ısıtılabilir özellikteki tava, servis tabağı ve kahve pişiricilerin bünyesinde ve laboratuvar camlarının yapımında kullanılır. Uygulamada kullanılan ve “borosilikat cam 3.3” olarak belirtilen cam, hem ısıya hem de kimyasal maddelere karşı dayanıklıdır (TS 3399 ISO 3585, 2005).

Borosilikat camlar otomobil farları, çamaşır makinesinin pencere camı, fırın kapları, mutfak seramikleri ısıya dayanıklı kaplar, endüstriyel cam seramikler, ısıya dirençli saydamcamlar ve tüpler, yüksek voltaj izolatörleri, lamba camları ve sinyal camları üretiminde kullanılmaktadır ([www.boren.gov.tr](http://www.boren.gov.tr), 2014). Borosilikat camların normal cama göre termal genişleme katsayısı yüksektir.

Borosilikat camın ortalama doğrusal ısıl uzama katsayısı,  $\alpha$  (20°C; 300 °C),  $(3,3 \pm 0,1) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , 20°C’teki yoğunluğu,  $\rho = 2,23 \text{ g/cm}^3 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$  ve 20°C - 200°C aralığındaki ortalama ısıl iletkenliği,  $\lambda = 1,2 \text{ W / (m.K)}$  olması gerektiği belirtilmektedir (TS 3399 ISO 3585, 2005).

Tez kapsamında 6 adet normal cam plaka, 5 adet borosilikat cam plaka örnekleriyle kıyaslanmak ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra radyasyon azalım özellikleri bakımından

RQR demet kalitelerindeki HVL değerleri ve azalım katsayısı ( $\mu$ ) değerleri karşılaştırılmıştır.

### **3.8 IEC 61267 Protokolünde Belirlenmiş Olan X-Işını Demet Kalitelerinin Hazırlanan Numuneler için Elde Edilmesi**

#### **3.8.1 RQR X-işını demet kalitesinin elde edilmesi**

RQR X-işını demet kalitesinin elde edilmesi için aşağıda belirtildiği gibi ölüm geometrisi kurulmuştur. Odak noktası ile dedektör arasındaki mesafe 217,5 cm'ye ayarlanmıştır. Soğurucu filtreler % 99,9 saflıktadır. lmlerin alındığı referans dedektör PTW marka TM 32005 modelindeki iyon odasıdır. Bu iyon odası saçılmaları en aza indirmek için kurşun zırh içerisine konulmuştur. Dedektörün bulunduğu noktadaki işınlama alanı dedektörü tam kapsayacak şekilde 3,5x3,5 cm<sup>2</sup> olarak ayarlanmıştır. X-işını alanının hatasız bir şekilde ayarlanması bir adet fosfor tabakasının işınlanması ile gerçekleştirilmiştir.

Işınlama esnasında radyasyondan korunma açısından kurşun bariyerlerin arkasına geçilmiş ve bu bariyerlerde bulunan kurşun eşdeğerli camlardan bakılarak parıldama izlenmiştir. Işınlama boyunca kişisel dozimetri kullanılmıştır.



şekil 3.8 Kullanılan X-işını sistemi ve radyometrik ben

### 3.9 Tüp Gerilimi Ölçümü

Tüp gerilimi (kV) ölçümü, RQR X-ışını demet kalitelerinin elde edilmesinde, X-ışını tüpü ile jeneratör arasında bağlı olan bir adet gerilim bölücüsü ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin doğruluğu 40 kV ile 100 kV arasında  $-0,01\%$  ile  $+0,08\%$  arasında değişmiştir.

Çizelge 3.6 Uygulanan gerilim ve ölçülen gerilimin karşılaştırılması

Uygulanan Gerilim (kV)	Ölçülen Gerilim (kV)
40	40,0
50	50,4
60	59,2
70	69,6
80	79,2
90	89,6
100	99,2

## 4. BULGULAR

### 4.1 IEC 61267 Protokolünde Belirtilen X - Işını Demet Kalitelerinin Elde Edilmesi

#### 4.1.1 RQR X- ışını demet kalitesinin elde edilmesi

40 - 100 kV<sub>p</sub> aralığında, doz ölçümleri farklı kalınlıkta filtreler kullanılarak ölçümler iyon odasıyla alınmıştır. Doz sonuçları, HVL ve etkin enerji değerleri Spectrum GUI, Xcomp5r gibi simülasyon programlarıyla da hesaplanmıştır. Daha sonra ölçülen değerler hesaplanan verilerle karşılaştırıldı. Deneysel olarak elde edilen verilerden, 1.HVL, 2.HVL ve homojenlik katsayısı belirlendi. Bunların standartta verilen nominal (anma) değerleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Deney koşulları aşağıda gibi gerçekleştirilmiştir.

Odak noktası – dedektör mesafesi: 200 cm,

Sıcaklık: 24 °C,

Basınç: 1010 hPa’da hesaplanan PT (basınç,sıcaklık) faktörü: 1,02 dir.

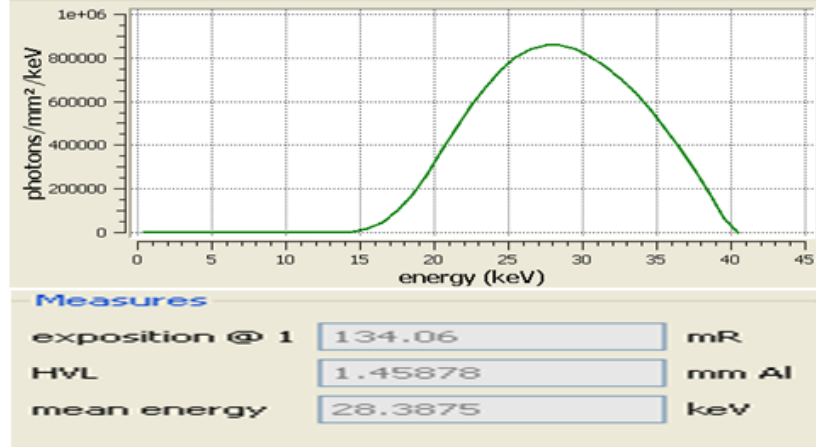
100 mAs’da ölçümler alınmıştır.

#### a) 40 kV<sub>p</sub> demet kalitesi karakteristikleri

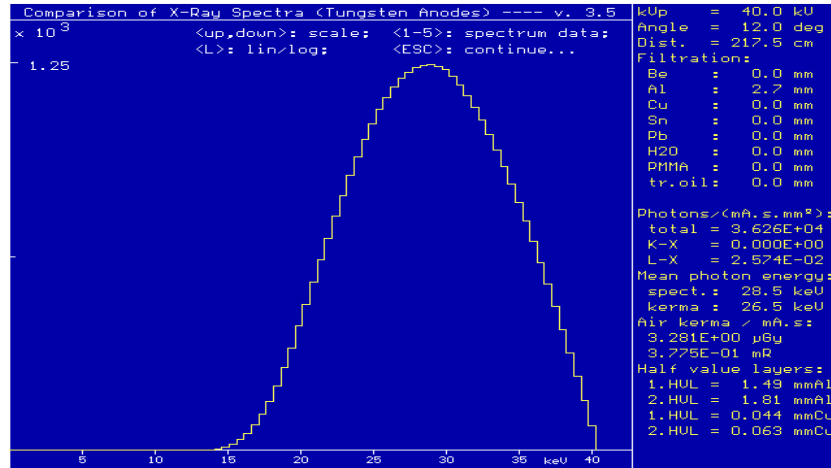
Çizelge 4.1 RQR-2, 40 kV<sub>p</sub> Demet kalitesi için filtrasyon kalınlığına bağlı ölçülen doz değerleri

Gerilim (kV <sub>p</sub> )	Toplam Filtrasyon x (mmAl)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Ortalama Ölçülen Doz D (µGy)	Hesaplanan Doz* D (µGy)
40	2,7	1,11	292,85±3,97	279,41
40	4,1	2,68	151,85±4,30	156,26
40	4,2	3,09	145,41±4,48	149,91
40	5,9	1,69	76,26±1,35	74,02
40	6,0	1,33	73,21±1,06	71,01

\*Doz= 857e<sup>-0,41x</sup>, R<sup>2</sup> = 1



Şekil 4.1 RQR-2, 40 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için Spectrum GUI programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri



Şekil 4.2 RQR-2, 40 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için Xcomp5r programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri

Çizelge 4.2 RQR-2, 40 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan 1.HVL değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Filtrasyon Kalınlığı (mm Al)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Nominal 1.HVL	Ölçülen 1.HVL	Spectrum GUI Prog. Hesaplanan 1.HVL	Xcomp5r Prog. Hesaplanan 1.HVL	Ort. 1.HVL
RQR-2	40	2,7	1,11	1,42	1,58	1,46	1,49	1,51

Çizelge 4.3 RQR-2,40 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan ortalama enerji değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Filtrasyon Kalınlığı (mm Al)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Spectrum GUI Prog. Hesaplanan Ortalama Enerji(keV)	Xcomp5r Prog. Hesaplanan Ortalama Enerji(keV)	Ortalama Enerji (keV)
RQR-2	40	2,7	1,11	28,39	26,5	27,45

RQR-2, 40 kV<sub>p</sub> demet kalitesinde iyon odasıyla ölçülen ve sırasıyla Spectrum GUI ve Xcomp5r simülasyon programlarından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değerleri sırasıyla Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3 de verilmiştir.

RQR-2, 40 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için 1.HVL, 2.HVL, homojenlik katsayısı verilerinin nominal değerler ile karşılaştırılması Çizelge 4.22 verilmiştir.

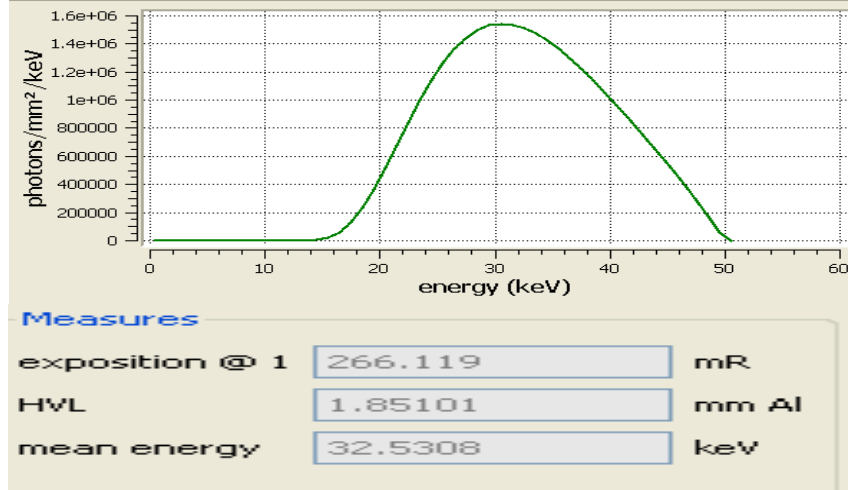
#### b) 50 kV<sub>p</sub> demet kalitesi karakteristikleri

Çizelge 4.4 RQR-3, 50 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için filtrasyon kalınlığına bağlı ölçülen doz değerleri

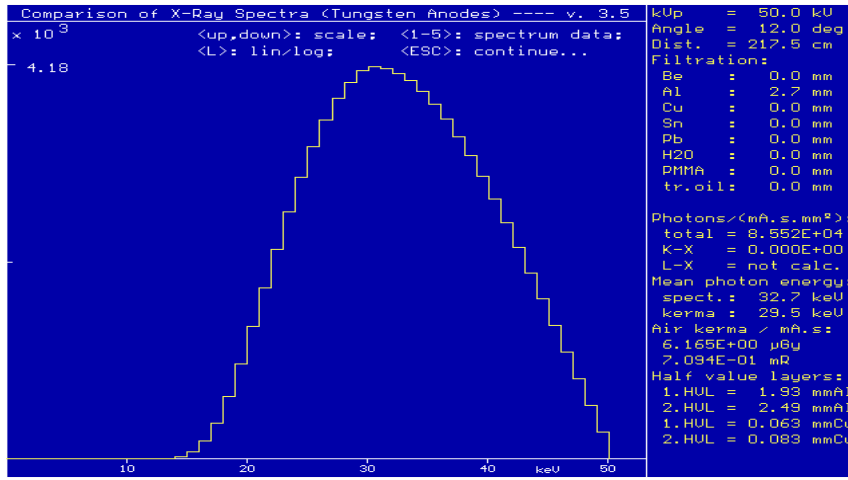
Gerilim (kV <sub>p</sub> )	Toplam Filtrasyon x (mmAl)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Ortalama Ölçülen Doz D (μGy)	Hesaplanan Doz* D (μGy)
50	2,7	1,11	561,64±8,83	525,12
50	4,5	2,40	291,16±7,69	300,02
50	4,6	1,74	280,65±5,77	290,82
50	7,0	1,28	143,38±2,28	137,87
50	7,1	3,09	139,31±4,45	133,64

\*D = 1224,e<sup>-0,30x</sup>, R<sup>2</sup> = 0,993





Şekil 4.3 RQR-3, 50 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için Spectrum GUI programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri



Şekil 4.4 RQR-3, 50 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için Xcomp5r programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri

Çizelge 4.5 RQR-3, 50 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan 1.HVL değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Filtrasyon Kalınlığı (mm Al)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Nominal 1.HVL	Ölçülen 1.HVL	Spectrum GUI Hesaplanan 1.HVL	Xcomp5r Prog. Hesaplanan 1.HVL	Ort. 1.HVL
RQR-3	50	2,7	1,11	1,78	2,07	1,46	1,85	1,79

Çizelge 4.6 RQR-3, 50 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan ortalama enerji değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Filtrasyon Kalınlığı (mm Al)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Spectrum GUI Prog. Hesaplanan Ortalama Enerji(keV)	Xcomp5r Prog. Hesaplanan Ortalama Enerji(keV)	Ortalama Enerji (keV)
RQR-3	50	2,7	1,11	32,53	32,70	32,61

RQR-3, 50 kV<sub>p</sub> demet kalitesinde iyon odasıyla ölçülen ve sırasıyla Spectrum GUI ve Xcomp5r simulasyon programlarından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değerleri sırasıyla Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’de verilmiştir.

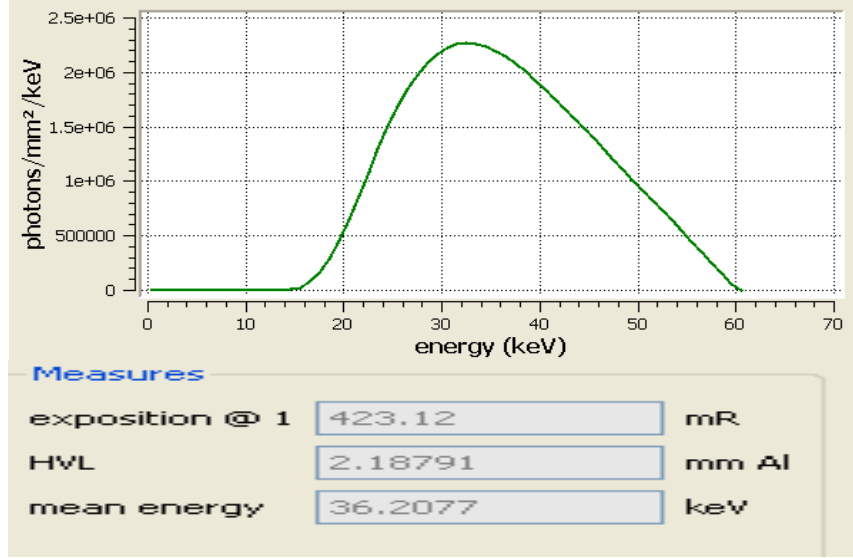
RQR-3, 50 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için 1.HVL, 2.HVL, homojenlik katsayısı verilerinin nominal değerler ile karşılaştırılması Çizelge 4.22 verilmiştir.

### c) 60 kV<sub>p</sub> demet kalitesi karakteristikleri

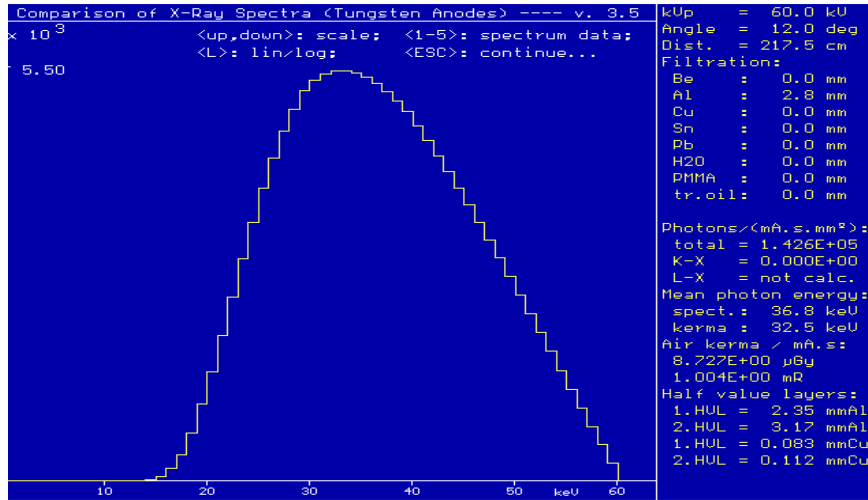
Çizelge 4.7 RQR-4, 60 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için filtrasyon kalınlığına bağlı ölçülen doz değerleri

Gerilim (kV <sub>p</sub> )	Toplam Filtrasyon x (mmAl)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Ortalama Ölçülen Doz D (μGy)	Hesaplanan Doz* D (μGy)
60	2,8	2,50	561,64±8,83	525,12
60	5,0	3,20	291,16±7,69	300,02
60	5,1	3,92	280,65±5,77	290,82
60	8,0	2,50	143,38±2,28	137,87
60	8,1	2,72	139,31±4,45	133,65

\*D = 1613,e<sup>-0,25x</sup>, R<sup>2</sup> = 0,991



Şekil 4.5 RQR-4, 60 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için Spectrum GUI programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri



Şekil 4.6 RQR-4, 60 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için Xcomp5r programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri

Çizelge 4.8 RQR-4, 60 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan 1.HVL değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Filtrasyon Kalınlığı (mm Al)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Nominal 1.HVL	Ölçülen 1.HVL	Spectrum GUI Prog. Hesaplanan 1.HVL	Xcomp5r Prog. Hesaplanan 1.HVL	Ort. 1.HVL
RQR-4	60	2,8	2,50	2,19	2,47	2,18	2,35	2,33

Çizelge 4.9 RQR-4, 60 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan ortalama enerji değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Filtrasyon Kalınlığı (mm Al)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Spectrum GUI Prog. Hesaplanan Ortalama Enerji(keV)	Xcomp5r Prog. Hesaplanan Ortalama Enerji(keV)	Ortalama Enerji (keV)
RQR-4	60	2,8	2,50	36,21	36,80	36,51

RQR-4, 60 kV<sub>p</sub> demet kalitesinde iyon odasıyla ölçülen ve sırasıyla Spectrum GUI ve Xcomp5r simülasyon programlarından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değerleri sırasıyla Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9’de verilmiştir.

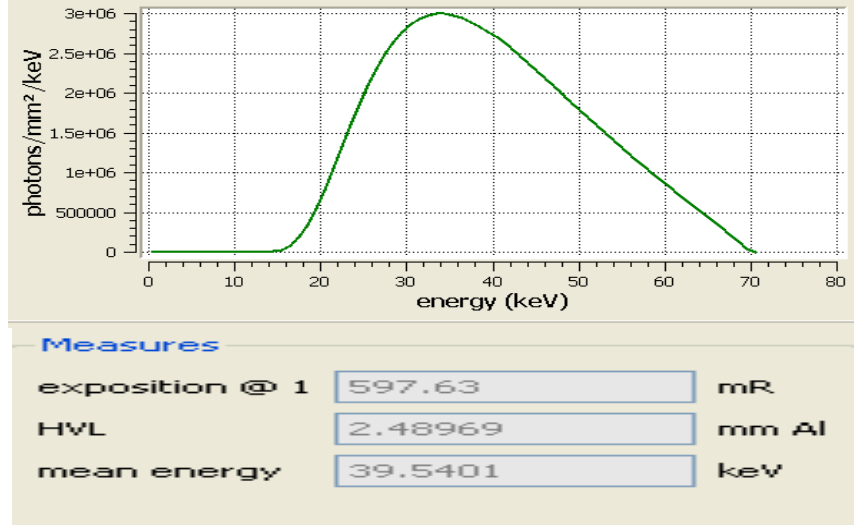
RQR-4, 60 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için 1.HVL, 2.HVL, homojenlik katsayısı verilerinin nominal değerler ile karşılaştırılması Çizelge 4.22 verilmiştir.

#### d) 70 kV<sub>p</sub> demet kalitesi karakteristikleri

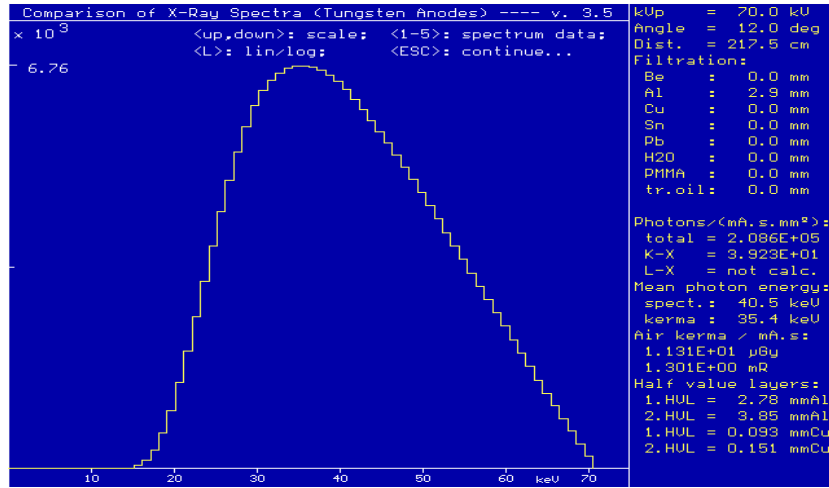
Çizelge 4.10 RQR-5, 70 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için filtrasyon kalınlığına bağlı ölçülen doz değerleri

Gerilim (kV <sub>p</sub> )	Toplam Filtrasyon x (mmAl)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Ortalama Ölçülen Doz D (μGy)	Hesaplanan Doz* D (μGy)
70	2,9	2,41	1096,17±28,12	1000,51
70	5,5	3,27	556,22±18,58	579,71
70	5,6	2,68	544,02±14,91	567,67
70	9,2	3,15	277,60±8,87	266,64
70	9,3	2,47	273,53±7,11	261,10

\*D = 1878,e<sup>-0,21x</sup>, R<sup>2</sup> = 0,989



Şekil 4.7 RQR-5, 70 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için Spectrum GUI programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri



Şekil 4.8 RQR-5, 70 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için Xcomp5r programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri

Çizelge 4.11 RQR-5, 70 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan 1.HVL değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Filtrasyon Kalınlığı (mm Al)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Nominal 1.HVL	Ölçülen 1.HVL	Spectrum GUI Prog. Hesaplanan 1.HVL	Xcomp5r Prog. Hesaplanan 1.HVL	Ort. 1.HVL
RQR-5	70	2,9	2,41	2,58	2,96	2,49	2,78	2,74

Çizelge 4.12 RQR-5, 70 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan ortalama enerji değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Filtrasyon Kalınlığı (mm Al)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	SpectrumGUI Prog. Hesaplanan Ortalama Enerji(keV)	Xcomp5r Prog. Hesaplanan Ortalama Enerji(keV)	Ortalama Enerji (keV)
RQR-5	70	2,9	2,41	39,54	40,50	40,02

RQR-5, 70 kV<sub>p</sub> demet kalitesinde iyon odasıyla ölçülen ve sırasıyla Spectrum GUI ve Xcomp5r simülasyon programlarından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değerleri sırasıyla Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12’de verilmiştir.

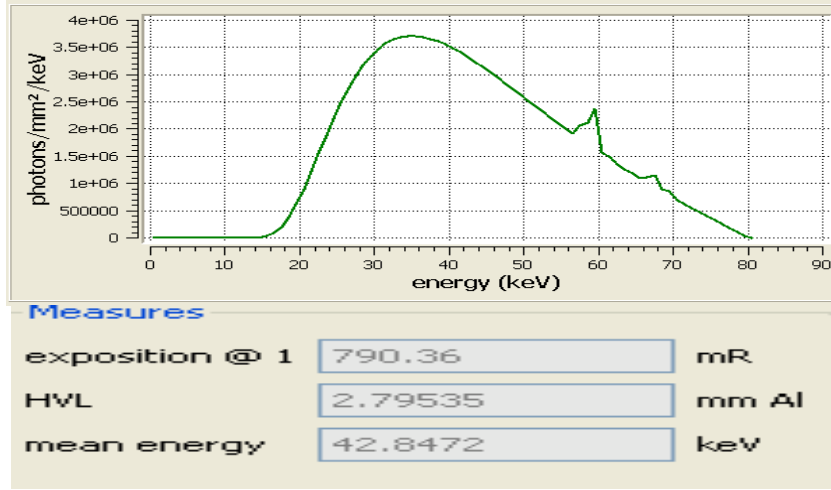
RQR-5, 70 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için 1.HVL, 2.HVL, homojenlik katsayısı verilerinin nominal değerler ile karşılaştırılması Çizelge 4.22 verilmiştir.

#### e) 80 kV<sub>p</sub> demet kalitesi karakteristikleri

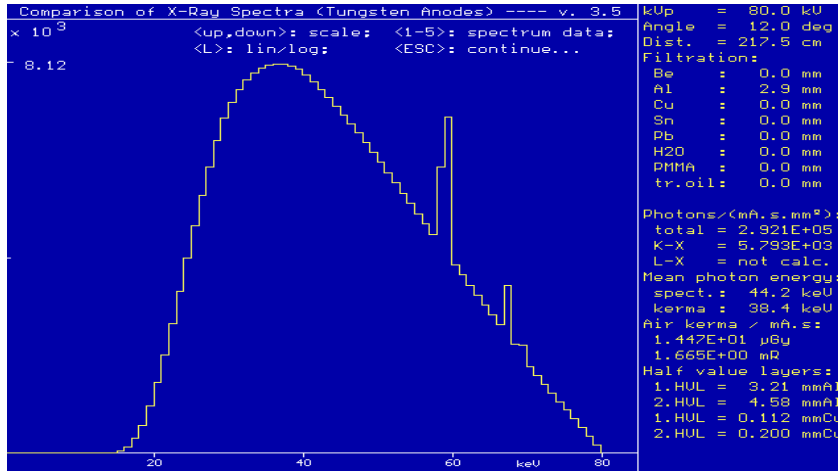
Çizelge 4.13 RQR-6, 80 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için filtrasyon kalınlığına bağlı ölçülen doz değerleri

Gerilim (kV <sub>p</sub> )	Toplam Filtrasyon x (mmAl)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Ortalama Ölçülen Doz D (μGy)	Hesaplanan Doz* D (μGy)
80	2,9	2,41	1453,76±39,35	1363,59
80	5,8	3,45	738,24±27,01	757,08
80	5,9	2,54	724,34±20,51	741,87
80	10,1	2,57	370,13±10,27	316,39
80	10,2	4,01	273,53±11,16	297,71

\*D = 2503.e<sup>-0,20x</sup>, R<sup>2</sup> = 0,979



Şekil 4.9 RQR-6, 80 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için Spectrum GUI programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri



Şekil 4.10 RQR-6, 80 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için Xcomp5r programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri

Çizelge 4.14 RQR-6, 80 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan 1.HVL değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Filt. Kalınlığı (mm Al)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Nominal 1.HVL	Ölçülen 1.HVL	Spectrum GUI Prog. Hesaplanan 1.HVL	Xcomp5r Prog. Hesaplanan 1.HVL	Ort. 1.HVL
RQR-6	80	2,9	2,41	3,01	3,09	2,79	3,21	3,03

Çizelge 4.15 RQR-6, 80 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan ortalama enerji değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Filtrasyon Kalınlığı (mm Al)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Spectrum GUI Prog. Hesaplanan Ortalama Enerji(keV)	Xcomp5r Prog. Hesaplanan Ortalama Enerji(keV)	Ortalama Enerji (keV)
RQR-6	80	2,9	2,41	42,85	44,20	43,56

RQR-6, 80 kV<sub>p</sub> demet kalitesinde iyon odasıyla ölçülen ve sırasıyla Spectrum GUI ve Xcomp5r simülasyon programlarından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değerleri sırasıyla Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.15’de verilmiştir.

RQR-6, 80 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için 1.HVL, 2.HVL, homojenlik katsayısı verilerinin nominal değerler ile karşılaştırılması Çizelge 4.22 verilmiştir

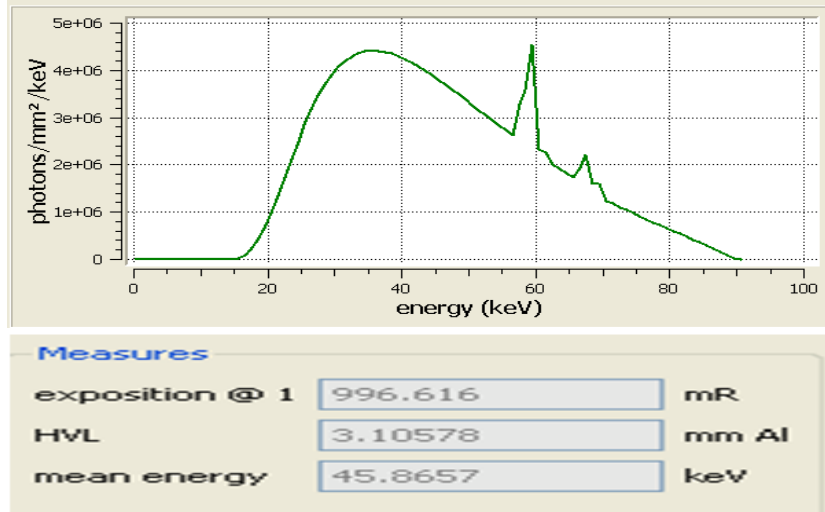
#### f) 90 kV<sub>p</sub> demet kalitesi karakteristikleri

Çizelge 4.16 RQR-7, 90 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için filtrasyon kalınlığına bağlı ölçülen doz değerleri

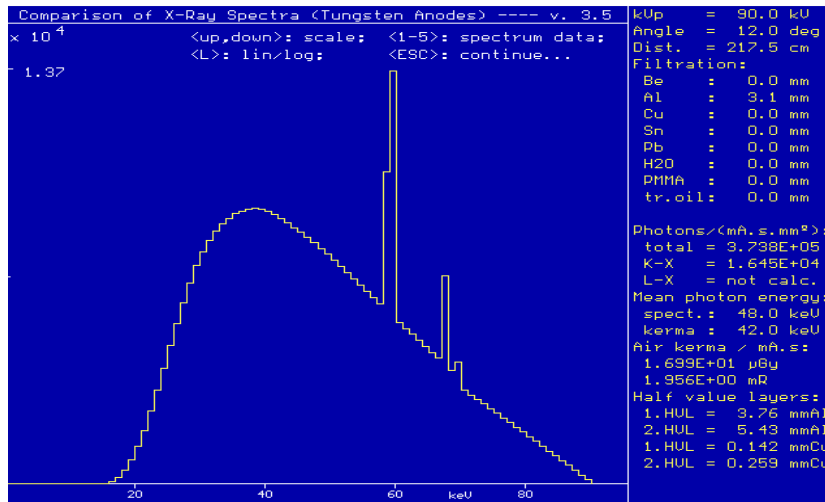
Gerilim (kV <sub>p</sub> )	Toplam Filtrasyon x (mmAl)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Ortalama Ölçülen Doz D (μGy)	Hesaplanan Doz* D (μGy)
90	3,10	1,29	1761,19±25,91	1614,59
90	6,60	2,12	891,78±19,71	928,74
90	6,70	2,98	879,24±26,89	914,19
90	11,50	1,48	443,69±7,60	428,22
90	11,60	0,95	439,96±5,07	421,51

\*D = 2693,e<sup>-0,15x</sup>, R<sup>2</sup> = 0,990





Şekil 4.11 RQR-7, 90 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için Spectrum GUI programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri



Şekil 4.12 RQR-7, 90 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için Xcomp5r programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri

Çizelge 4.17 RQR-7, 90 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan 1.HVL değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Filt. Kalınlığı (mm Al)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Nominal 1.HVL	Ölçülen 1.HVL	Spectrum GUI Prog. Hesaplanan 1.HVL	Xcomp5r Prog. Hesaplanan 1.HVL	Ort. 1.HVL
RQR-7	90	3,1	1,29	3,48	3,93	3,10	3,76	3,59

Çizelge 4.18 RQR-7, 90 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan ortalama enerji değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Filtrasyon Kalınlığı (mm Al)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Spectrum GUI Prog. Hesaplanan Ortalama Enerji(keV)	Xcomp5r Prog. Hesaplanan Ortalama Enerji(keV)	Ortalama Enerji (keV)
RQR-7	90	3,1	1,29	45,87	48,00	46,94

RQR-7, 90 kV<sub>p</sub> demet kalitesinde iyon odasıyla ölçülen ve sırasıyla Spectrum GUI ve Xcomp5r simulasyon programlarından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değerleri sırasıyla Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.18’de verilmiştir.

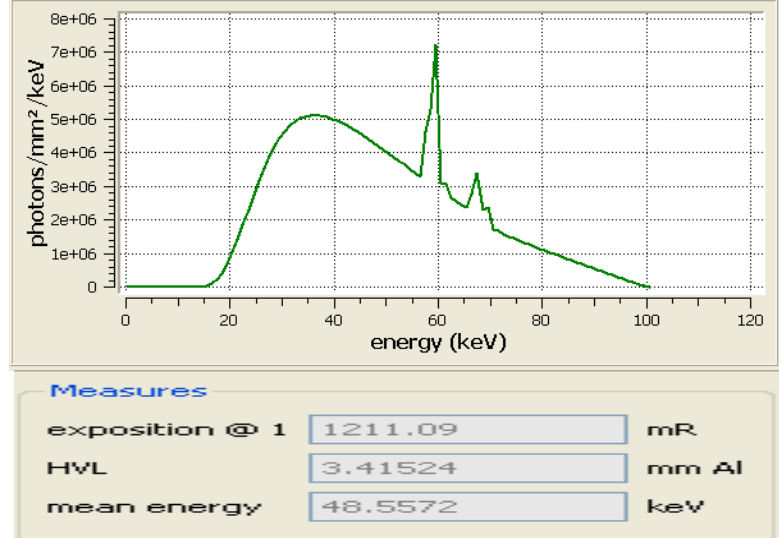
RQR-7, 90 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için 1.HVL, 2.HVL, homojenlik katsayısı verilerinin nominal değerler ile karşılaştırılması Çizelge 4.22 verilmiştir.

#### g) 100 kV<sub>p</sub> demet kalitesi karakteristikleri

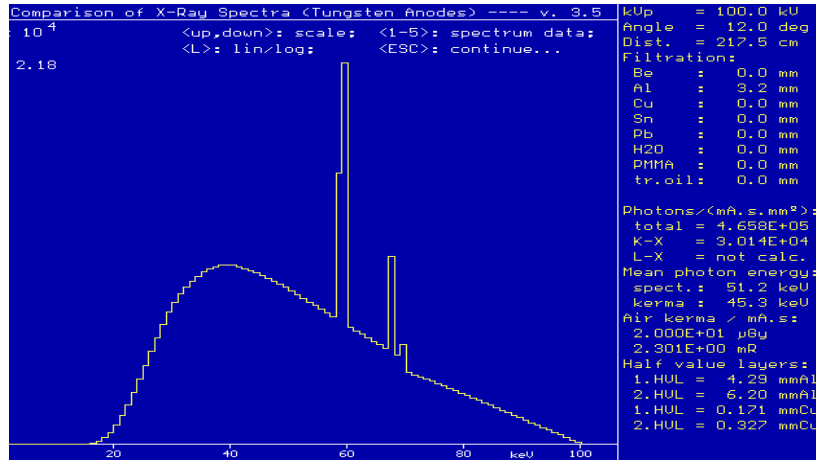
Çizelge 4.19 RQR-8, 100 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için filtrasyon kalınlığına bağlı ölçülen doz değerleri

Gerilim (kV <sub>p</sub> )	Toplam Filtrasyon x (mmAl)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Ortalama Ölçülen Doz D (μGy)	Hesaplanan Doz* D (μGy)
100	3,2	0,62	2144,2±23,2	1938,71
100	7,2	1,80	1076,5±21,8	1127,07
100	7,3	2,46	1061,6±28,4	1111,89
100	12,9	0,62	545,03±6,15	520,33
100	13,0	0,69	535,88±6,06	513,32

\*D = 3067e<sup>-0,13x</sup>, R<sup>2</sup> = 0,987



Şekil 4.13 RQR-8, 100 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için Spectrum GUI programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri



Şekil 4.14 RQR-8, 100 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için Xcomp5r programından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değeri

RQR-8, 100 kV<sub>p</sub> demet kalitesinde iyon odasıyla ölçülen ve sırasıyla Spectrum GUI ve Xcomp5r simulasyon programlarından hesaplanan HVL ve ortalama enerji değerleri sırasıyla Çizelge 4.20 ve Çizelge 4.21’de verilmiştir.

Çizelge 4.20 RQR-8, 100 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan 1.HVL değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Filt. Kalınlığı (mm Al)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Nominal 1.HVL	Ölçülen 1.HVL	Spectrum GUI Prog. Hesaplanan 1.HVL	Xcomp5r Prog. Hesaplanan 1.HVL	Ort. 1.HVL
RQR-8	100	3,2	0,62	3,90	4,53	4,42	4,29	4,41

Çizelge 4.21 RQR-8, 100 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için ölçülen ve Xcomp5r, Spectrum GUI programlarından hesaplanan ortalama enerji değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Filtrasyon Kalınlığı (mm Al)	Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Spectrum GUI Prog. Hesaplanan Ortalama Enerji(keV)	Xcomp5r Prog. Hesaplanan Ortalama Enerji(keV)	Ortalama Enerji (keV)
RQR-8	100	3,2	0,62	48,56	51,20	49,88

RQR-8, 100 kV<sub>p</sub> demet kalitesi için 1.HVL, 2.HVL, homojenlik katsayısı verilerinin nominal değerler ile karşılaştırılması Çizelge 4.22 verilmiştir.

Çizelge 4.22 RQR serisi X-ışını demet kalitesi karakteristiği

Demet Kodu	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Top* Tüp Filt. (mm Al)	Ölçülen Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Nominal 1.HVL	Ölç. 1.HVL	1.HVL Farkı	Nominal Hom. Katsayısı	Elde Edilen Hom. Katsayısı	Hom. Katsayısı Farkı
RQR-2	40	2,7	1,11	1,42	1,58	<b>+0,16</b>	0,81	0,95	<b>+0,14</b>
RQR-3	50	2,7	1,11	1,78	2,07	<b>+0,29</b>	0,76	0,92	<b>+0,16</b>
RQR-4	60	2,8	2,50	2,19	2,47	<b>+0,28</b>	0,74	0,91	<b>+ 0 17</b>
RQR-5	70	2,9	2,41	2,58	2,96	<b>+0,38</b>	0 71	0,89	<b>+0,16</b>
RQR-6	80	2,9	2,41	3,01	3,19	<b>+0,18</b>	0,69	0,93	<b>- 0,24</b>
RQR-7	90	3,1	1,29	3,48	3,93	<b>+0,45</b>	0,68	0,90	<b>+0,22</b>
RQR-8	100	3,2	0,62	3,97	4,53	<b>+0,56</b>	0,68	0,88	<b>-0,20</b>

\* 1,2 mm Al tüpün doğal filtrasyonu (inherent filtration) dahildir.

Çizelge 4.22’de ölçülen HVL değerleri ve demet homojenlik katsayıları, IEC-61267 standardında verilen anma (nominal) değerleriyle karşılaştırıldığında %17 ile %29 arasında bir uyumsuzluk sergilemiştir. RQR serisi yedi farklı demet kalitesi HVL değerlerinde ise anma değerlerine %11 ile %15 arasında bir farklılık gözlenmiştir. Oluşan farklılığın nedeni, filtre kalınlıklarındaki düzensizlikler, doz ölçümündeki dalgalanmalar, çevresel saçılmalar ve diğer sistematik hatalardan kaynaklı olabileceği değerlendirilmektedir.

#### **4.2 Dar Demet ve Geniş Demet Karşılaştırması**

Ölçümler Şekil 4.15 kurulan düzeneğe göre alınmıştır. Tüm şartlar aynı tutularak ışınlanan alan daraltılmış ( $3,5 \times 3,5 \text{ cm}^2$ ) ve RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde (40- 100 kV<sub>p</sub>) için ölçümler alınmıştır. Ardından ışınlama alanı genişletilerek aynı seriler için ( $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ) bir alanda ölçüm alınmıştır.

Dar demet yapılarak saçılan ışınlar büyük ölçüde engellenmiştir.

Ölçümler aynı şartlarda, odak noktası – dedektör mesafesi: 217,5 cm’dir.

mAs: 100,

Ölçüm alınırken ortam sıcaklığı: 24,2 °C,

Ölçüm alınırken ortam basıncı: 1015 hPa’da hesaplanan PT düzeltme değeri 1,01’dir.

Her iki ölçümde de saçılan ışınları önlemek için Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü laboratuvarında bulunan 5 cm kalınlığında silindir şeklindeki kurşun zırh kullanılmıştır.



Şekil 4.15 Dar demet, geniş demet karşılaştırma için kurulan düzenek

Çizelge 4.23 RQR X-ışını demet kalitesinde, dar demet, geniş demet karşılaştırmasında ölçülen doz değerleri

Demet Kalitesi	X-ışını Tüpü Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Toplam Tüp Filtrasyonu* (mm Al)	Ölçülen Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Geniş Demette Okunan Doz (µGy)	Dar Demette Okunan Doz (µGy)
RQR-2	40±0,00	2,7	1,11	244±4	139±9
RQR-3	50±0,79	2,7	1,11	469±4	268±3
RQR-4	60±1,33	2,8	2,50	696±4	397±2
RQR-5	70±0,57	2,9	2,41	941±13	500±3
RQR-6	80±1,00	2,9	2,41	1248±12	713±3
RQR-7	90±0,44	3,1	1,29	1535±15	890±11
RQR-8	100±0,80	3,2	0,62	2106±22	120±16

\* 1,2 mm Al tüpün doğal filtrasyonu (inherent filtration) dahildir.

### 4.3 Geniş Demet Koşulunda Kurşun Zırh Kullanmanın Etkisi

RQR serisinin 7 farklı X –ışını demet kalitesinde (40 – 100 kV<sub>p</sub>) ölçüm alınmıştır. Önce kurşun zırh yokken ölçümler alınmış ardından alan aynı tutularak kurşun zırh konularak aynı ölçümler tekrarlanmıştır.

Kurşun zırh konularak yapılan ölçümlerde saçılan ışınlar önemli ölçüde engelleneceğinden okunan doz değerinin düşmesi hedeflenmiştir.

Odak noktası - dedektör mesafesi: 217,5 cm,

Ölçüm alınırken ortam sıcaklığı: 24,2 °C,

Ölçüm alınırken ortam basıncı: 1015 hPa’da hesaplanan PT düzeltme faktörü 1,01 ve mAs: 100 olarak alınmıştır.

Çizelge 4.24 RQR X-ışını demet kalitesinde, geniş demette (10x10 cm<sup>2</sup>) kurşun zırh karşılaştırmasında ölçülen doz değerleri

Demet Kalitesi	X-Işını Tüpü Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Toplam Tüp Filtrasyonu* (mm Al)	Ölçülen Filtre Kalınlık Toleransı (%)	Kurşun Zırh Yokken Okunan Doz (µGy)	Kurşun Zırh Varken Okunan Doz (µGy)
RQR-2	40±0,00	2,7	1,11	288±3	207±4,6
RQR-3	50±0,79	2,7	1,11	552±4	340±5
RQR-4	60±1,33	2,8	2,50	827±3	590±3
RQR-5	70±0,57	2,9	2,41	1078±8	800±1
RQR-6	80±1,00	2,9	2,41	1428±22	1061±11
RQR-7	90±0,44	3,1	1,29	1732±16	1305±9
RQR-8	100±0,80	3,2	0,62	2109±23	1790±19

\* 1,2 mm Al tüpün doğal filtrasyonu (inherent filtration) dahildir.

### 4.4 Normal Cam ile Borosilikat Cam Karşılaştırması

#### 4.4.1 Zayıflatma özelliklerinin karşılaştırılması

Malzemenin zayıflatma özelliğini, lineer zayıflatma katsayısı (µ) veya HVL cinsinden belirlemek mümkündür. Bu amaçla normal cam plaka ve borosilikat cam plaka mukayesesi için ara bir gerilim değeri olan 70 kV<sub>p</sub>’de sadece lineer zayıflatma katsayısı, cam örnekleri üzerinde ölçümler yapıldıktan sonra tüm demet kalitelerinde (40- 100 kV<sub>p</sub>) ise HVL değerleri elde edilmiştir

#### 4.4.1.1 Normal plaka cam

RQR-5, 70 kV<sub>p</sub> X-ışını demet kalitesinde (inh.+1,7) mm Al kalınlığında,

Sıcaklık: 23,8 °C,

Basınç: 1010 hPa' hesaplanan PT faktörü: 1,02

Odak noktası – dedektör mesafesi: 217,5 cm,

100 mAs da ölçümler alınmıştır. Normal cam ile borosilikat cam için elde edilen zayıflatma katsayıları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.25 Normal plaka cam için 70 kV<sub>p</sub>'de cam kalınlığına karşılık ölçülen doz değerleri

Normal Cam Plaka Kalınlığı (mm)	Ölçülen Cam Kalınlık Toleransı (%)	Ölçülen Doz (µGy)
3,9	1,54	224,10±3,92
7,8	2,18	135,39±3,13
11,7	2,65	83,55±2,33
15,6	3,08	54,86±1,75
19,5	3,48	34,62±1,23
23,4	3,80	25,41±0,98

#### 4.4.1.2 Borosilikat plaka cam

RQR-5,70 kV<sub>p</sub> X-ışını demet kalitesinde (inh+1.7) mm Al kalınlığında,

Sıcaklık: 23,8°C,

Basınç: 1010 hPa'da hesaplanan PT faktörü: 1,02

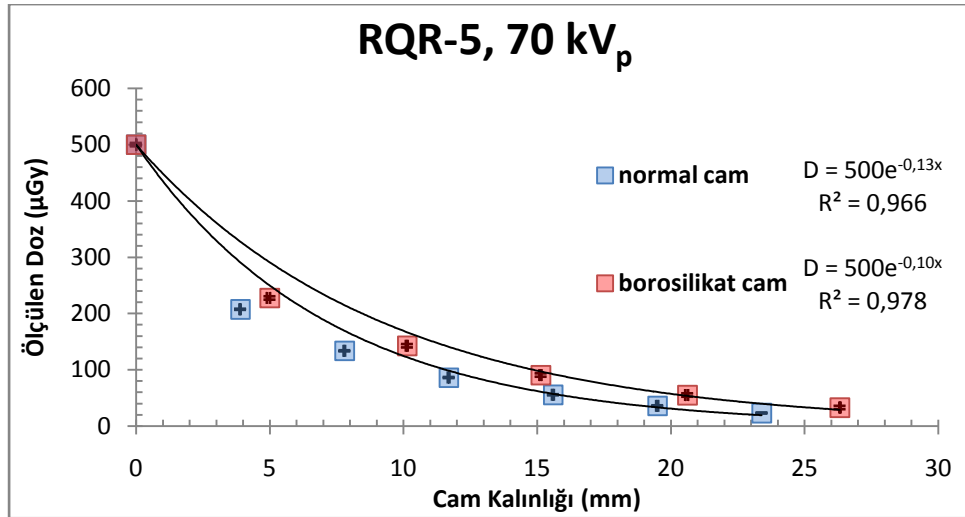
Odak noktası – dedektör mesafesi: 217,5 cm,

100 mAs'da alınan ölçümler



Çizelge 4.26 Borosilikat plaka cam için 70 kV<sub>p</sub>'de cam kalınlığına karşılık ölçülen doz değerleri

Borosilikat Cam Plaka Kalınlığı (mm)	Ölçülen Cam Kalınlık Toleransı (%)	Ölçülen Doz (μGy)
5,00±0,06	1,20	233,63±3,19
10,70±0,01	0,09	139,93±1,05
15,84±0,17	1,07	90,84±1,20
20,84±0,04	0,19	58,02±0,46
26,32±0,27	1,02	32,50±0,41



Şekil 4.16 RQR-5 X-ışını demet kalitesinde normal cam ve borosilikat cam için transmisyon eğrisi

Normal cam ile borosilikat cam arasındaki farkı belirlemek için tüm şartlar eşit yapılarak  $\mu$  değerleri karşılaştırılmıştır.

Normal cam için  $\mu$  değeri:  $0,13 \text{ mm}^{-1}$

Borosilikat cam için  $\mu$  değeri:  $0,10 \text{ mm}^{-1}$  olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.16'dan da görüleceği üzere deneysel ölçülen doz değerlerinden elde edilen uyarlamalar,  $R^2=0,966-0,977$  regresyon katsayıları ile oldukça uyumludur. %3-4 farklılıklar doz ve kalınlık için elde edilen belirsizlik sınırları içindedir.

## 4.4.2 Yarı kalınlık değerlerinin karşılaştırılması

### 4.4.2.1 Normal plaka cam

Odak noktası – dedektör mesafesi: 217,5 cm,

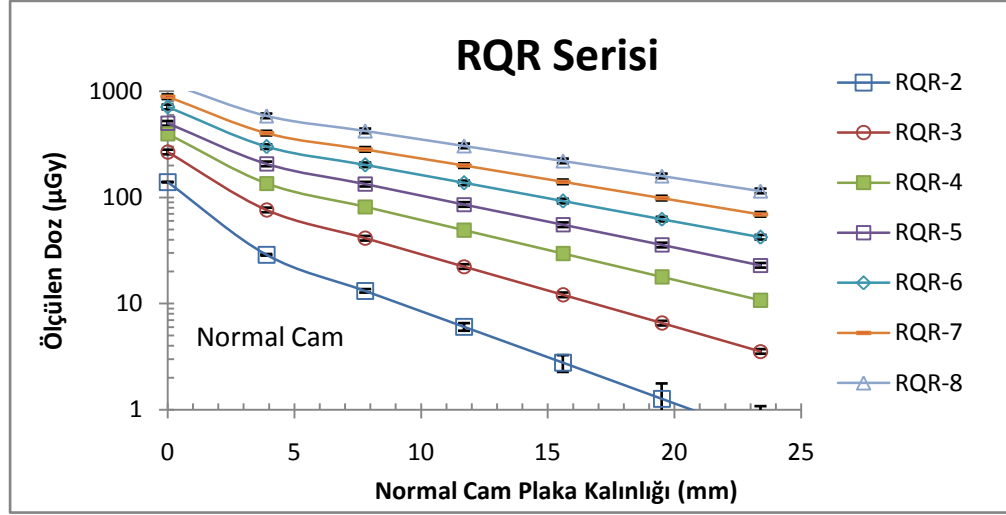
Sıcaklık: 23,8 °C,

Basınç: 1010 hPa’da hesaplanan PT faktörü:1,02

100 mAs’da RQR serisi (40-100 kV<sub>p</sub>) yedi farklı demet kalitesi için normal cam ile borosilikat camın 1. HVL değerleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.27 40 kV<sub>p</sub> ile 100 kV<sub>p</sub> demet kalitelerinde normal plaka cam için cam kalınlığına karşılık ölçülen doz değerleri

Top. Kalınlık (mm cam)	Ölç. Cam Kalınlık Toleransı (%)	Gerilim → (kV <sub>p</sub> ) 40	50	60	70	80	90	100
			Ölçülen Ortalama Doz (µGy)					
3,9	1,54	34,08±0,56	84,34±1,53	148,16±3,12	224,10±3,92	322,90±6,15	430,28±7,30	634,77±11,70
7,8	2,18	13,49±0,31	41,78±0,99	82,94±2,16	135,39±3,13	204,89±5,03	285,20±8,27	425,44±11,81
11,7	2,65	5,58±0,15	21,53±0,61	47,64±1,44	83,55±2,33	134,95±3,92	200,59±5,53	305,19±8,73
15,6	3,08	2,54±0,09	11,77±0,38	29,10±0,99	54,86±1,75	92,30±3,04	142,57±4,51	220,51±7,20
19,5	3,48	1,25±0,08	6,34±0,23	17,37±0,65	34,62±1,23	61,05±2,23	96,35±3,40	160,15±5,77
23,4	3,80	0,65±0,03	4,04±0,16	12,02±0,49	25,41±0,98	46,25±1,83	74,59±2,88	123,70±4,86



Şekil 4.17 RQR serisi X-ışını demet kalitesinde normal plaka cam için transmisyon eğrisi

#### 4.4.2.2 Borosilikat plaka cam

Odak noktası – dedektör mesafesi: 217,5 cm

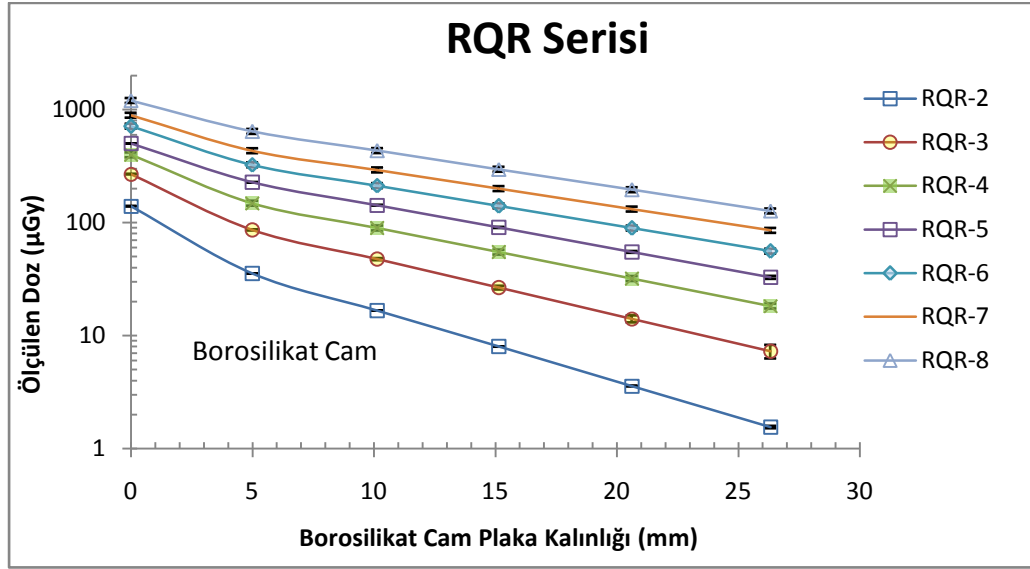
Sıcaklık: 21,8 °C,

Basınç: 1010 hPa’da hesaplanan PT faktörü: 1,01

100 mAs’da alınan ölçümler alınmıştır.

Çizelge 4.28 40 kV<sub>p</sub> ile 100 kV<sub>p</sub> demet kalitelerinde borosilikat plaka cam için cam kalınlığına karşılık ölçülen doz değerleri

Top. Kalınlık (mm cam)	Ölç. Cam Kalınlık Toleransı (%)	Gerilim → (kV <sub>p</sub> ) 40	Ölçülen Ortalama Doz (µGy)						
			50	60	70	80	90	100	
5,00	1,20	37,28±0,64	91,00±1,39	156,68±2,86	233,63±3,19	333,52±5,33	442,52±5,86	641,26±9,53	
10,14	0,09	15,70±0,11	45,58±0,42	87,48±1,28	139,93±1,05	207,58±2,35	285,64±3,53	425,26±4,08	
15,14	1,07	8,44±0,10	26,64±0,38	54,28±0,97	90,84±1,20	140,90±2,21	202,77±2,77	308,89±4,44	
20,62	0,19	3,75±0,04	14,74±0,29	32,45±0,47	58,02±0,46	94,35±1,05	141,20±1,62	213,57±2,09	
26,32	1,02	1,56±0,03	7,40±0,10	18,81±0,33	32,50±0,41	55,45±0,84	84,38±1,05	121,59±1,67	



Şekil 4.18 RQR serisi X-ışını demet kalitesinde borosilikat plaka cam için transmisyon eğrisi

Çizelge 4.29 RQR X-ışını demet kalitesinde normal cam ile borosilikat cam için hesaplanan 1.HVL değerleri ve % fark

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Toplam Filtre Kalınlığı* (mm Al)	Filtre Kalınlığı Toleransı (%)	Elde Edilen 1. HVL (cm normal cam)	Elde Edilen 1. HVL (cm borosilikat cam)	1. HVL'de Oluşan Fark (%)	Elde Edilen 1. HVL (cm kemik**)
RQR-2	40±0,00	2,7	1,11	0,32	0,47	31,63	4,73
RQR-3	50±0,79	2,7	1,11	0,44	0,59	25,96	2,35
RQR-4	60±1,33	2,8	2,50	0,53	0,71	24,61	1,69
RQR-5	70±0,57	2,9	2,41	0,61	0,76	19,55	1,44
RQR-6	80±1,00	2,9	2,41	0,68	0,84	17,85	1,19
RQR-7	90±0,44	3,1	1,29	0,77	0,91	15,38	0,89
RQR-8	100±0,8	3,2	0,62	0,82	0,92	9,54	0,63

\*1,2 mm Al doğal tüp filtrasyonu dahildir.

\*\* Aşağıda verilen ICRU-44 (1989) veri tabanından alınan, verilere göre hesaplanmıştır.

Z/A	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	I (eV)	Atom numarası- Ağırlık kesri		
0,52	1,92	112	H 1- 0,034	O 8- 0,435	P 15-0,103
			C 6- 0,155	Na 11-0,001	S 16-0,003
			N 7- 0,042	Mg 12-0,002	Ca 20-0,225

#### 4.5 Hazırlanan Numuneler için Zayıflatma Özellikleri

Ölçümler RQR-5, 70 kV<sub>p</sub> X-ışını demet kalitesinde (inh.+1,7) mm Al kalınlığında, P-10 beyaz teknik parafin, % 10 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüklemeli parafin, % 20 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüklemeli parafin, % 10 CaSO<sub>4</sub> yüklemeli parafin, % 20 CaSO<sub>4</sub> yüklemeli parafin için Şekil 4.19 da gösterilen düzenek hazırlanarak numunelerin zayıflatma özellikleri belirlenmiştir.



Şekil 4.19 Numuneler için zayıflatma özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan düzenek

##### 4.5.1 P-10 beyaz teknik parafin dilim

RQR-5, 70 kV<sub>p</sub> X-ışını demet kalitesinde 2,9 mm Al kalınlığında,

Odak noktası – dedektör mesafesi: 217,5 cm

Sıcaklık: 23,9 °C,

Basınç: 1010 hPa’da hesaplanan PT faktörü: 1,02

100 mAs’da ölçümler alınmıştır.

Çizelge 4.30 70 kV<sub>p</sub>'de P-10 teknik beyaz parafin dilim için parafin kalınlığına karşılık ölçülen doz değeri

Toplam Kalınlık (mm parafin)	Parafin Kalınlık Toleransı (%)	Yalnız P-10 Parafin için Ölçülen Ortalama Doz (μGy)
9,90	1,31	266,90±3,94
19,50	3,89	231,09±9,21
28,85	2,53	188,60±4,95
38,55	3,78	158,88±6,15
48,01	1,68	125,67±2,33
57,61	5,72	101,37±5,86
67,08	2,89	80,19±2,39
76,73	1,13	67,44±0,93
86,30	2,24	55,14±1,30
95,71	1,99	44,41±0,98
104,85	2,44	36,55±0,93

#### 4.5.2 %10 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüklemeli parafin dilim

RQR-5, 70 kV<sub>p</sub> X Işın demet kalitesinde 2,9 mm Al kalınlığında,

Odak noktası – dedektör mesafesi: 217,5 cm

Sıcaklık: 23,4 °C,

Basınç: 1010 hPa'da hesaplanan PT faktörü:1,01

100 mAs'da ölçümler alınmıştır.

Çizelge 4.31 70 kV<sub>p</sub>'de %10 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüklemeli parafin dilim için parafin kalınlığına karşılık ölçülen doz değerleri

Toplam Kalınlık (mm parafin)	Parafin Kalınlık Toleransı (%)	%10 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Yüklemeli Parafin için Ölçülen Ortalama Doz (μGy)
11,43	1,48	254,92±4,34
23,31	0,51	199,88±1,77
34,64	0,46	157,50±1,36
46,48	0,95	122,49±1,47
58,22	0,49	98,11±0,86
70,02	0,24	76,55±0,62
81,51	1,02	61,15±0,77
92,98	0,48	48,98±0,43
104,27	1,76	39,25±0,75
115,55	2,30	31,48±0,76

#### 4.5.3 %20 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüklemeli parafin dilim

RQR-5, 70 kV<sub>p</sub> X-Işın demet kalitesinde 2,9 mm Al kalınlığında,

Odak noktası – dedektör mesafesi: 217,5 cm

Sıcaklık: 23,4 °C,

Basınç: 1010 hPa’da hesaplanan PT faktörü: 1,01

100 mAs’da alınan ölçümler

Çizelge 4.32 70 kV<sub>p</sub>’de %20 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüklemeli parafin dilim için parafin kalınlığına karşılık ölçülen doz değerleri

Toplam Kalınlık (mm parafin)	Parafin Kalınlık Toleransı (%)	%20 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Yüklemeli Parafin için Ölçülen Ortalama Doz (μGy)
12,20	1,15	252,20±3,66
23,63	0,85	183,47±2,09
35,22	0,96	147,53±1,81
47,11	1,10	102,06±1,38
59,14	0,51	86,17±0,83
70,98	1,07	65,22±0,86
82,64	1,05	50,04±0,64
93,91	0,53	38,13±0,36
105,34	1,78	30,88±0,60
116,51	0,88	25,47±0,29

#### 4.5.4 %10 CaSO<sub>4</sub> yüklemeli parafin dilim

RQR-5, 70 kV<sub>p</sub> X-ışını demet kalitesinde 2,9 mm Al kalınlığında,

Odak noktası – dedektör mesafesi: 217,5 cm

Sıcaklık: 23,4 °C,

Basınç: 1010 hPa’da hesaplanan PT faktörü: 1,01

100 mAs’da alınan ölçümler

Çizelge 4.33 70 kV<sub>p</sub>'de %10 CaSO<sub>4</sub> yüklemeli parafin dilim için parafin kalınlığına karşılık ölçülen doz değerleri

Toplam Kalınlık (mm parafin)	Parafin Kalınlık Toleransı (%)	%10 CaSO <sub>4</sub> Yüklemeli Parafin için Ölçülen Ortalama Doz (μGy)
12,27	0,73	217,42±2,26
23,36	1,62	167,01±2,97
35,06	1,51	121,88±2,05
46,02	1,39	91,87±1,46
57,59	1,82	68,52±1,36
68,80	2,47	51,55±1,35
79,68	1,62	38,07±0,67
92,08	0,39	22,49±0,19
105,23	2,46	20,63±0,54
118,00	1,95	16,09±0,33

#### 4.5.5 %20 CaSO<sub>4</sub> yüklemeli parafin dilim

RQR-5, 70 kV<sub>p</sub> X Işın demet kalitesinde 2,9 mm Al kalınlığında,

Odak noktası – dedektör mesafesi: 217,5 cm

Sıcaklık: 23,0 °C,

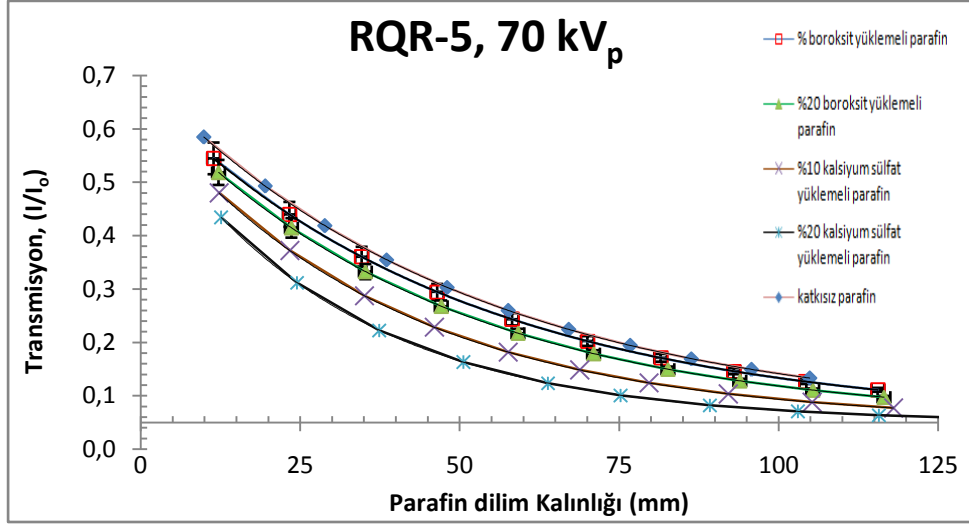
Basınç: 1010 hPa'da hesaplanan PT faktörleri:1,01

100 mAs'da alınan ölçümler

Çizelge 4.34 70 kV<sub>p</sub>'de %20 CaSO<sub>4</sub> yüklemeli parafin dilim için parafin kalınlığına karşılık ölçülen doz değerleri

Toplam Kalınlık (mm parafin)	Parafin Kalınlık Toleransı (%)	%20 CaSO <sub>4</sub> Yüklemeli Parafin için Ölçülen Ortalama Doz (μGy)
12,59±0,09	0,71	192,11±2,00
24,47±0,39	1,59	131,88±2,34
37,39±0,56	1,49	86,37±1,44
50,58±0,71	1,40	56,11±0,88
63,80±1,16	1,81	36,95±0,73
75,21±1,84	2,45	26,55±0,68
89,22±1,43	1,61	17,89±0,31
103,01±0,41	0,39	12,41±0,10
115,71±2,84	2,45	6,13±0,17
128,48±2,50	1,94	4,80±1,45





Şekil 4.20 RQR-5, 70 kV<sub>p</sub> X-ışını demet kalitesinde hazırlanan numuneler için transmisyon eğrisi

Yalnızca P-10 parafin, % 10 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüklemeli parafin, % 20 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüklemeli parafin, 10 CaSO<sub>4</sub> yüklemeli parafin ve % 20 CaSO<sub>4</sub> yüklemeli parafin arasındaki farkı görmek için  $\mu$  değerleri karşılaştırıldı. Buna göre;

Yalnızca P-10 parafin için  $\mu$  değeri: 0,0196 mm<sup>-1</sup>,

% 10 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüklemeli parafin için  $\mu$  değeri: 0,020mm<sup>-1</sup>,

%20 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüklemeli parafin için  $\mu$  değeri: 0,022mm<sup>-1</sup>,

%10 CaSO<sub>4</sub> yüklemeli parafin için  $\mu$  değeri: 0,026mm<sup>-1</sup>,

%20 CaSO<sub>4</sub> yüklemeli parafin için  $\mu$  değeri: 0,032 mm<sup>-1</sup> olarak bulunmuştur.

#### 4.6 Hazırlanan Numuneler için Birinci Yarı Kalınlık Değeri

Şekil 4.19’da ki düzenek uygulanarak her bir numune için ayrı ayrı ölçümler alınmıştır. Birinci yarı kalınlık değeri, mm numune kalınlığı cinsinden numune kalınlığı – doz grafiği, RQR serisinden (40-100 kV<sub>p</sub>) aralığında farklı 7 demet kalitesi için elde edilmiştir.

##### 4.6.1 P-10 beyaz teknik parafin dilim

Odak noktası – dedektör mesafesi: 217,5 cm

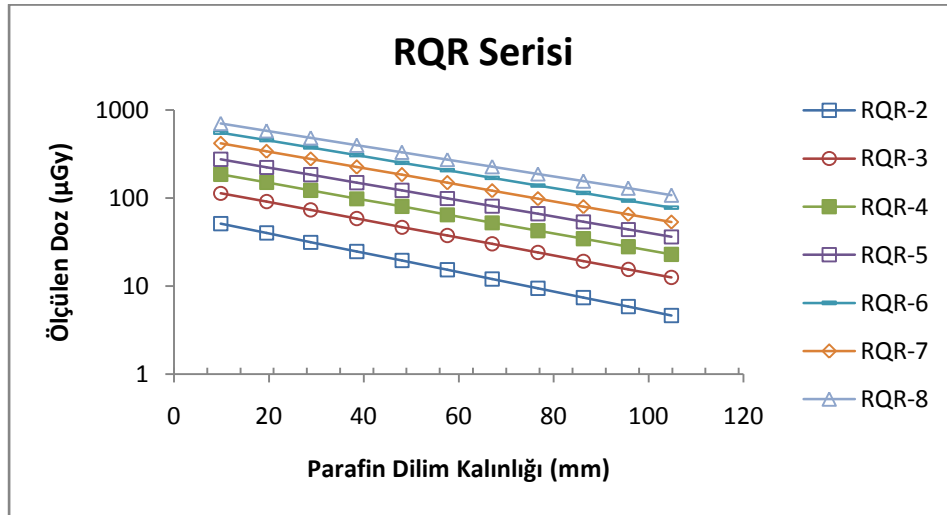
Sıcaklık: 23,9°C,

Basınç: 1013 hPa’da hesaplanan PT faktörü: 1,02

100 mAs’da ölçümler alınmıştır.

Çizelge 4.35 40 kV<sub>p</sub> ile 100 kV<sub>p</sub> demet kalitelerinde P-10 teknik beyaz parafin dilim için ölçülen doz azalım değerleri

Top. Dilim Kalınlığı (mm malzeme)	Ölç. Dilim Kalınlık Toleransı (%)	Gerilim → (kV <sub>p</sub> ) 40	Ölçülen Ortalama Doz (μGy)						
			50	60	70	80	90	100	
9,90	1,31	50,97±0,69	111,65±1,76	181,72±3,47	266,90±3,94	384,82±6,50	535,70±7,73	682,08±11,09	
19,50	3,89	39,98±1,64	94,71±3,80	156,27±6,50	231,09±9,21	358,49±15,79	471,32±18,67	599,74±24,10	
28,85	2,53	31,56±0,83	74,70±2,01	125,40±3,61	188,60±4,95	298,96±8,20	391,70±10,17	504,87±13,75	
38,55	3,78	24,70±0,97	59,33±2,53	101,96±4,13	158,88±6,15	248,03±9,85	325,62±12,55	420,84±16,47	
48,01	1,68	19,44±0,35	47,53±0,93	81,85±1,80	125,67±2,33	201,61±4,07	266,90±5,57	346,87±6,68	
57,61	5,72	15,25±0,89	37,71±2,27	65,97±3,89	101,37±5,86	160,24±9,52	216,72±12,49	279,57±16,26	
67,08	2,89	12,00±0,36	29,77±0,90	52,57±1,69	80,19±2,39	115,71±3,58	156,14±4,70	223,73±6,78	
76,73	1,13	9,40±0,13	25,01±0,37	43,97±0,79	67,44±0,93	97,63±1,54	134,82±1,87	188,77±2,75	
86,30	2,24	7,38±0,18	20,00±0,49	35,64±0,95	55,14±1,30	80,63±2,02	117,95±3,23	159,08±3,87	
95,71	1,99	5,82±0,13	15,37±0,34	27,70±0,68	44,41±0,98	65,72±1,50	99,96±2,09	130,86±2,88	
104,9	2,44	4,72±0,13	12,59±0,33	23,11±0,65	36,55±0,93	54,28±1,46	78,23±2,00	109,95±2,89	



Şekil 4.21 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde parafin dilim malzeme için transmisyon eğrisi

#### 4.6.2 %10 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüklemeli parafin dilim

Odak noktası – Dedektör mesafesi : 217,5 cm

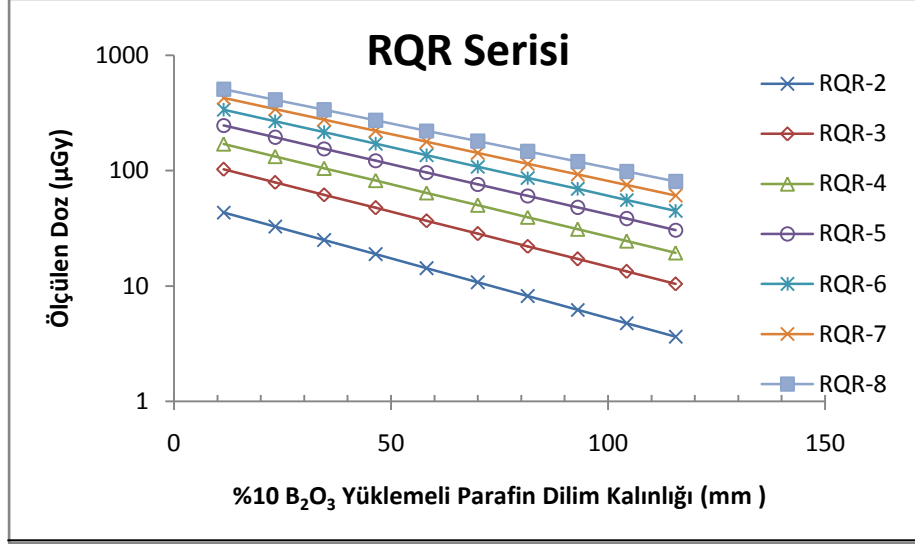
Sıcaklık : 23,4°C,

Basınç : 1010 hPa’da hesaplanan PT faktörü:1,01

100 mAs’da alınan ölçümler

Çizelge 4.36 40 kV<sub>p</sub> ile 100 kV<sub>p</sub> demet kalitelerinde %10 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüklemeli parafin dilim için ölçülen doz azalım değerleri

Top. Dilim Kalınlığı (mm malzeme)	Ölç. Dilim Kalınlık Toleransı (%)	Gerilim → (kV <sub>p</sub> ) 40	Ölçülen Ortalama Doz (µGy)						
			50	60	70	80	90	100	
11,43	1,48	47,22±0,75	108,21±2,21	175,49±3,63	254,92±4,34	351,66±6,49	445,60±7,20	548,80±10,19	
23,31	0,51	33,43±0,27	81,01±0,85	136,69±2,04	199,88±1,77	273,29±3,30	363,37±2,98	423,24±4,61	
34,64	0,46	24,77±0,68	61,54±0,65	104,49±1,56	157,50±1,36	218,22±2,61	276,91±2,18	341,62±3,51	
46,48	0,95	18,83±0,20	47,57±0,64	82,06±1,39	122,49±1,47	170,72±2,50	218,59±2,50	271,63±3,59	
58,22	0,49	14,67±0,10	37,70±0,39	65,53±0,98	98,11±0,86	137,71±1,66	177,32±1,49	220,92±2,31	
70,02	0,24	10,69±0,08	28,43±0,29	50,35±0,72	76,55±0,62	108,31±1,21	140,82±1,10	176,98±1,69	
81,51	1,02	8,41±0,10	22,47±0,35	40,01±0,73	61,15±0,77	86,86±1,32	113,25±1,36	142,78±1,96	
92,98	0,48	6,43±0,06	17,68±0,18	31,93±0,48	48,98±0,43	70,26±0,84	93,08±0,81	118,16±1,25	
104,27	1,76	4,90±0,09	13,78±0,27	25,13±0,57	39,25±0,75	56,46±1,17	75,12±1,41	95,94±1,92	
115,55	2,30	3,76±0,09	10,61±0,26	19,72±0,53	31,48±0,76	46,98±1,20	67,11±1,64	95,17±2,36	



Şekil 4.22 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde % 10 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüklemeli parafin dilim malzeme için transmisyon eğrisi

#### 4.6.3 %20 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüklemeli parafin dilim

Odak noktası – dedektör mesafesi: 217,5 cm

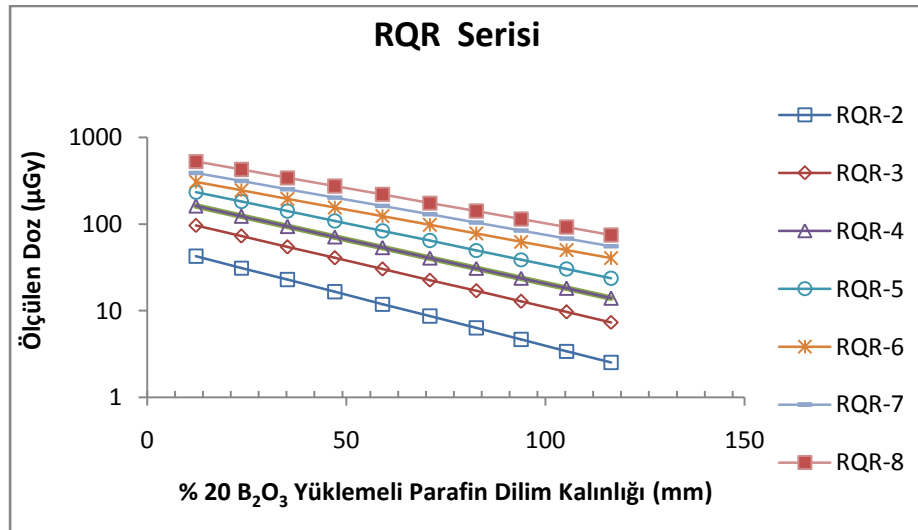
Sıcaklık: 23,4 °C,

Basınç: 1010 hPa’da hesaplanan PT faktörü: 1,01

100 mAs’da alınan ölçümler

Çizelge 4.37 40 kV<sub>p</sub> ile 100 kV<sub>p</sub> demet kalitelerinde %20 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüklemeli parafin dilim için ölçülen doz azalım değerleri

Top. Dilim Kalınlığı (mm malzeme)	Ölç. Dilim Kalınlık Toleransı (%)	Gerilim → (kV <sub>p</sub> ) 40	50	60	70	80	90	100	Ölçülen Ortalama Doz (μGy)	
									40	50
12,20	1,15	43,92±0,55	99,71±1,48	172,95±3,31	252,20±3,66	350,29±5,72	442,60±5,93	532,51±8,04		
23,63	0,85	31,81±0,31	73,50±0,94	122,63±2,02	183,47±2,09	268,78±3,75	347,82±3,76	477,46±6,11		
35,22	0,96	24,08±0,26	57,43±0,78	97,52±1,66	147,53±1,81	181,37±2,71	239,91±2,83	339,73±4,56		
47,11	1,10	15,71±0,19	38,61±0,56	66,99±1,21	102,06±1,38	147,20±2,29	197,61±2,95	273,99±3,99		
59,14	0,51	12,41±0,12	31,30±0,33	55,56±0,84	86,17±0,83	115,76±1,70	153,93±1,25	220,93±2,54		
70,98	1,07	8,82±0,12	23,13±0,33	41,58±0,74	65,22±0,86	106,73±2,01	120,50±1,62	175,65±2,64		
82,64	1,05	6,31±0,08	16,98±0,24	31,09±0,55	50,04±0,64	82,66±1,29	112,78±1,40	138,53±1,97		
93,91	0,53	4,56±0,04	12,65±0,13	23,52±0,36	38,13±0,36	64,11±0,78	88,74±0,74	117,38±1,24		
105,34	1,78	3,52±0,07	10,01±0,20	18,98±0,43	30,88±0,60	51,74±1,13	71,88±1,37	94,59±1,94		
116,51	0,88	2,62±0,03	7,62±0,10	14,57±0,25	25,47±0,29	41,70±0,64	58,25±0,63	78,29±1,00		



Şekil 4.23 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde % 20 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüklemeli parafin dilim malzeme için transmisyon eğrisi

#### 4.6.4 %10 CaSO<sub>4</sub> yüklemeli parafin dilim

Odak noktası – dedektör mesafesi: 217,5 cm

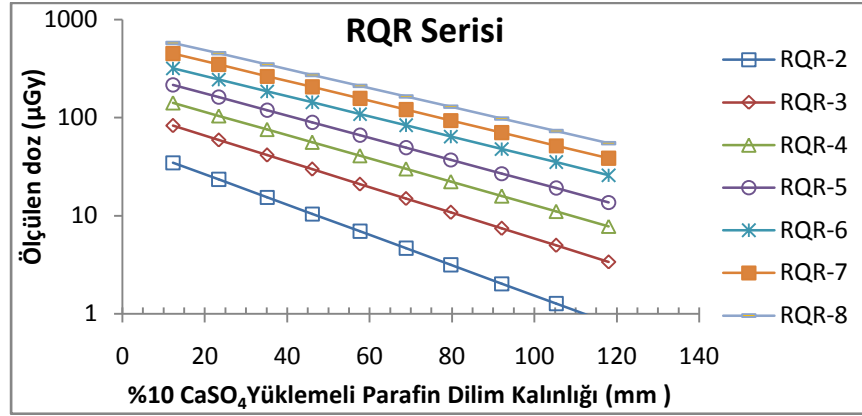
Sıcaklık: 23,4 °C,

Basınç: 1010 hPa’da hesaplanan PT faktörü: 1,01

100 mAs’da alınan ölçümler

Çizelge 4.38 40 kV<sub>p</sub> ile 100 kV<sub>p</sub> demet kalitelerinde % 10 CaSO<sub>4</sub> yüklemeli parafin dilim için ölçülen doz azalım değerleri

Top. Dilim Kalınlığı (mm malzeme)	Ölç. Dilim Kalınlık Toleransı (%)	Gerilim → (kV <sub>p</sub> ) 40	Ölçülen Ortalama Doz (µGy)						
			50	60	70	80	90	100	
12,27	0,73	36,40±0,40	86,32±1,04	145,36±2,33	217,42±2,26	310,25±4,13	459,42±4,51	584,41±7,20	
23,36	1,62	24,98±0,42	62,38±1,16	109,25±2,34	167,01±2,97	248,29±7,22	352,67±10,30	453,68±8,56	
35,06	1,51	15,82±0,25	42,37±0,75	77,35±1,70	121,88±2,05	202,38±3,76	279,03±4,59	362,81±8,41	
46,02	1,39	10,41±0,16	29,65±0,54	56,31±1,12	91,87±1,46	153,50±2,86	210,49±3,32	279,20±4,72	
57,59	1,82	6,89±0,13	21,10±0,43	40,91±0,94	68,52±1,36	117,39±2,50	164,89±3,18	221,33±4,65	
68,80	2,47	4,38±0,11	14,42±0,40	29,38±0,85	51,55±1,35	88,30±2,37	126,10±3,20	171,68±4,51	
79,68	1,62	3,06±0,05	10,49±0,20	21,84±0,47	38,07±0,67	65,17±1,31	97,48±1,72	133,64±2,48	
92,08	0,39	2,18±0,03	7,85±0,10	16,57±0,28	22,49±0,19	40,10±0,47	58,91±0,46	81,71±0,81	
105,23	2,46	1,28±0,03	5,01±0,14	11,00±0,34	20,63±0,54	37,59±1,01	55,80±1,41	78,42±2,05	
118,00	1,95	0,85±0,03	3,64±0,08	8,49±0,20	16,09±0,33	29,34±0,66	43,98±0,93	62,60±1,36	



Şekil 4.24 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde %10 CaSO<sub>4</sub> yüklemeli parafin dilim malzeme için transmisyona eğrisi

#### 4.6.5 %20 CaSO<sub>4</sub> yüklemeli parafin dilim

Odak noktası – dedektör mesafesi: 217,5 cm

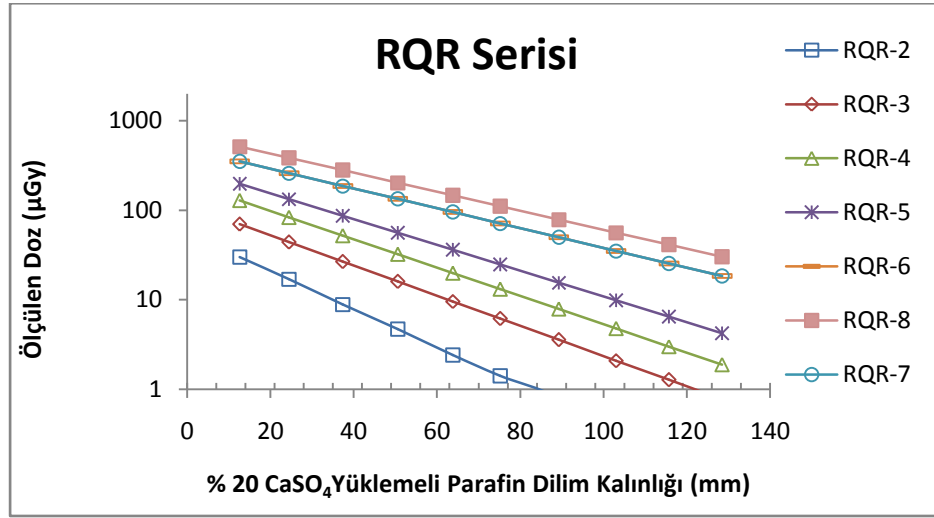
Sıcaklık: 23,0 °C,

Basınç: 1010 hPa’da hesaplanan PT faktörleri: 1,01

100 mAs’da alınan ölçümler

Çizelge 4.39 40 kV<sub>p</sub> ile 100 kV<sub>p</sub> demet kalitelerinde %20 CaSO<sub>4</sub> yüklemeli parafin dilim için ölçülen doz azalım değerleri

Top. Dilim Kalınlığı (mm malzeme)	Ölç. Dilim Kalınlık Toleransı (%)	Gerilim →							
		40	50	60	70	80	90	100	
<b>Ölçülen Ortalama Doz (µGy)</b>									
12,59	0,71	29,87±0,26	73,14±0,89	126,98±2,06	192,11±2,00	274,30±3,65	361,73±3,58	519,89±6,45	
24,47	1,59	17,03±0,29	46,22±0,88	84,16±1,80	131,88±2,34	188,23±7,03	266,06±5,98	377,67±7,17	
37,39	1,49	8,89±0,14	27,12±0,49	51,80±1,63	86,37±1,44	131,92±2,52	196,91±4,22	275,38±4,85	
50,58	1,40	4,69±0,10	15,94±0,27	32,94±0,66	56,11±0,88	88,17±2,26	135,94±2,64	196,23±3,34	
63,80	1,81	2,42±0,05	9,37±0,19	20,77±0,48	36,95±0,73	60,07±1,28	97,92±2,08	137,83±2,85	
75,21	2,45	1,42±0,04	6,11±0,16	14,32±0,42	26,55±0,68	43,86±1,18	73,11±2,31	104,76±2,96	
89,22	1,61	0,79±0,02	3,85±0,07	9,43±0,20	17,89±0,31	30,48±0,59	50,29±0,93	75,23±1,39	
103,01	0,39	0,24±0,06	1,91±0,15	4,61±1,24	12,41±0,10	21,49±0,25	34,70±1,21	53,74±0,54	
115,71	2,45	0,12±0,01	1,43±0,04	3,63±0,26	6,13±0,17	14,60±0,73	25,94±0,67	40,56±1,08	
128,48	1,94	0,01±0,01	0,82±0,03	2,33±0,27	4,80±1,45	11,22±0,27	20,16±0,52	30,61±0,83	



Şekil 4.25 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde %20 CaSO<sub>4</sub> yüklemeli parafin dilim malzeme için transmisyon eğrisi

Çizelge 4.40 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde P-10 beyaz teknik parafin ve farklı yüzdelerdeki boroksit ve kalsiyum sülfat yüklemeli parafin dilimler için hesaplanan 1.HVL değerleri

Demet Kodu	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Toplam Filtre Kalınlığı* (mm Al)	Filtre Kalınlığı Toleransı (%)	P-10 Beyaz Teknik Parafin	%10 Bor oksit Yüklemeli Parafin Dilim	%20 Bor oksit Yüklemeli Parafin Dilim	1.HVL (mm parafin)	
							%10 Kalsiyum sülfat Yüklemeli Parafin Dilim	%20 Kalsiyum sülfat Yüklemeli Parafin Dilim
RQR-2	40±0,00	2,7	1,11	27,72	28,88	25,67	19,25	17,76
RQR-3	50±0,79	2,7	1,11	30,13	31,51	27,72	23,10	17,85
RQR-4	60±1,33	2,8	2,50	31,05	33,00	30,14	25,67	19,03
RQR-5	70±0,57	2,9	2,41	32,51	34,54	31,51	26,65	20,89
RQR-6	80±1,00	2,9	2,41	31,94	36,48	36,48	28,88	24,71
RQR-7	90±0,44	3,1	1,29	31,92	36,98	37,03	30,14	27,21
RQR-8	100±0,80	3,2	0,62	35,13	38,51	36,87	31,51	28,31

\*1,2 mm Al doğal tüp filtrasyonu dahildir.



#### 4.7 Farklı Yüzdelerde Boroksit ve Kalsiyum Sülfat Katkılı Parafin ile Borosilikat Cam (BSC) Tüpün Dikey Konumda Alınan Ölçümleri

Hazırlanan numuneler ile ISO ekstremite (su sütun) fantom karşılaştırması yapmak için, 4,5 cm çap ve 30 cm uzunluktaki bir ucu kapalı silindir borosilikat cam bir boru içerisinde dikey konumdayken ölçümler yapılmıştır. Farklı numuneneler hazırlanmış ve boşluk oluşmaması için tüpün içerisine dökülerek dondurulmuş ölçümler alınmıştır. Kullanılan borosilikat tüp, ISO susütun fantom ile aynı uzunlukta seçilmiştir.

Odak noktası – Dedektör mesafesi: 217,5 cm,

Sıcaklık: 20,4°C,

Basınç: 1010 hPa’da hesaplanan PT faktörü:1,00

100 mAs’da ölçümler alınmıştır.

#### 4.7.1 P-10 beyaz teknik parafin ile borosilikat cam tüp dikey konumda alınan ölçümler

Çizelge 4.41 RQR serisi yedi farklı X–ışını demet kalitesinde P-10 beyaz teknik parafin doldurulan borosilikat cam tüp dikey konumda ölçülen doz değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Toplam Filtre Kalınlığı* (mm Al)	Filtre Kalınlığı Toleransı (%)	Ölçülen Doz (µGy)
RQR-2	40±0,00	2,7	1,11	18,37±0,25
RQR-3	50±0,79	2,7	1,11	45,42±0,71
RQR-4	60±1,33	2,8	2,50	78,35±2,19
RQR-5	70±0,57	2,9	2,41	117,66±3,02
RQR-6	80±1,00	2,9	2,41	168,06±4,52
RQR-7	90±0,44	3,1	1,29	216,18±3,20
RQR-8	100±0,80	3,2	0,62	262,85±2,90

\*1,2 mm Al doğal tüp filtrasyonu dahildir.

#### 4.7.2 Borosilikat cam tüp dikey konumda %10 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %90 parafin karışımı ile alınan ölçümler

Çizelge 4.42 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde % 10 boroksit yüklemeli parafin doldurulan borosilikat cam tüp dikey konumda ölçülen doz değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Toplam Filtre Kalınlığı* (mm Al)	Filtre Kalınlığı Toleransı (%)	Ölçülen Doz (µGy)
RQR-2	40±0,00	2,7	1,11	18,19±0,26
RQR-3	50±0,79	2,7	1,11	44,65±0,96
RQR-4	60±1,33	2,8	2,50	77,08±2,24
RQR-5	70±0,57	2,9	2,41	116,36±3,01
RQR-6	80±1,00	2,9	2,41	165,41±4,48
RQR-7	90±0,44	3,1	1,29	212,96±3,13
RQR-8	100±0,80	3,2	0,62	262,22±2,84

\*1,2 mm Al doğal tüp filtrasyonu dahildir.

#### 4.7.3 Borosilikat cam tüp dikey konumda %20 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %80 parafin karışımı ile alınan ölçümler

Çizelge 4.43 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde % 20 boroksit yüklemeli parafin doldurulan borosilikat cam tüp dikey konumda ölçülen doz değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Toplam Filtre Kalınlığı* (mm Al)	Filtre Kalınlığı Toleransı (%)	Ölçülen Doz (µGy)
RQR-2	40±0,00	2,7	1,11	16,29±0,22
RQR-3	50±0,79	2,7	1,11	43,01±0,67
RQR-4	60±1,33	2,8	2,50	75,48±2,31
RQR-5	70±0,57	2,9	2,41	113,04±3,02
RQR-6	80±1,00	2,9	2,41	162,33±4,37
RQR-7	90±0,44	3,1	1,29	211,72±3,11
RQR-8	100±0,80	3,2	0,62	261,61±2,87

\*1,2 mm Al doğal tüp filtrasyonu dahildir.

#### 4.7.4 Borosilikat cam tüp dikey konumda %10 CaSO<sub>4</sub> + %90 parafin karışımı ile alınan ölçümler

Çizelge 4.44 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde % 10 kalsiyum sülfat yüklemeli parafin doldurulan borosilikat cam tüp dikey konumda ölçülen doz değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Toplam Filtre Kalınlığı* (mm Al)	Filtre Kalınlığı Toleransı (%)	Ölçülen Doz (μGy)
RQR-2	40±0,00	2,7	1,11	12,44±0,17
RQR-3	50±0,79	2,7	1,11	35,86±4,08
RQR-4	60±1,33	2,8	2,50	64,48±1,80
RQR-5	70±0,57	2,9	2,41	99,35±2,55
RQR-6	80±1,00	2,9	2,41	142,54±3,84
RQR-7	90±0,44	3,1	1,29	188,59±2,77
RQR-8	100±0,80	3,2	0,62	242,76±2,80

\*1,2 mm Al doğal tüp filtrasyonu dahildir.

#### 4.7.5 Borosilikat cam tüp dikey konumda %15 CaSO<sub>4</sub> + %85 parafin karışımı ile alınan ölçümler

Çizelge 4.45 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde % 15 kalsiyum sülfat yüklemeli parafin doldurulan borosilikat cam tüp dikey konumda ölçülen doz değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Toplam Filtre Kalınlığı* (mm Al)	Filtre Kalınlığı Toleransı (%)	Ölçülen Doz (μGy)
RQR-2	40±0,00	2,7	1,11	7,68±0,11
RQR-3	50±0,79	2,7	1,11	23,58±0,71
RQR-4	60±1,33	2,8	2,50	46,98±1,32
RQR-5	70±0,57	2,9	2,41	76,79±1,98
RQR-6	80±1,00	2,9	2,41	116,73±3,15
RQR-7	90±0,44	3,1	1,29	163,91±2,41
RQR-8	100±0,80	3,2	0,62	239,28±3,03

\*1,2 mm Al doğal tüp filtrasyonu dahildir.

#### 4.7.6 Borosilikat cam tüp dikey konumda %18 CaSO<sub>4</sub> + %82 parafin karışımı ile alınan ölçümler

Çizelge 4.46 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde % 18 kalsiyum sülfat yüklemeli parafin doldurulan borosilikat cam tüp dikey konumda ölçülen doz değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Toplam Filtre Kalınlığı* (mm Al)	Filtre Kalınlığı Toleransı (%)	Ölçülen Doz (μGy)
RQR-2	40±0,00	2,7	1,11	7,00±0,17
RQR-3	50±0,79	2,7	1,11	21,19±0,80
RQR-4	60±1,33	2,8	2,50	42,85±1,24
RQR-5	70±0,57	2,9	2,41	69,47±1,79
RQR-6	80±1,00	2,9	2,41	106,75±2,94
RQR-7	90±0,44	3,1	1,29	154,33±3,99
RQR-8	100±0,80	3,2	0,62	228,36±2,54

\*1,2 mm Al doğal tüp filtrasyonu dahildir.

#### 4.7.7 Borosilikat cam tüp dikey konumda %20 CaSO<sub>4</sub>+ %80 parafin karışımı ile alınan ölçümler

Çizelge 4.47 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde % 20 kalsiyum sülfat yüklemeli parafin doldurulan borosilikat cam tüp dikey konumda ölçülen doz değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Toplam Filtre Kalınlığı* (mm Al)	Filtre Kalınlığı Toleransı (%)	Ölçülen Doz (μGy)
RQR-2	40±0,00	2,7	1,11	3,60±0,05
RQR-3	50±0,79	2,7	1,11	13,75±0,22
RQR-4	60±1,33	2,8	2,50	30,26±0,84
RQR-5	70±0,57	2,9	2,41	52,40±1,35
RQR-6	80±1,00	2,9	2,41	82,33±2,22
RQR-7	90±0,44	3,1	1,29	117,93±1,73
RQR-8	100±0,80	3,2	0,62	160,79±1,75

\*1,2 mm Al doğal tüp filtrasyonu dahildir.

#### 4.7.8 ISO su sütun fantomu (ön kol veya bacak temsili) ile alınan ölçümler

Saf su dolu doldurulan PMMA ekstremite fantomu dikey konumda yerleştirilmiştir.

Odak noktası – Dedektör mesafesi: 217,5 cm,

Sıcaklık: 23,7°C,

Basınç: 1010 hPa’da hesaplanan PT faktörü: 1,02

100 mAs’da alınan ölçümler

Çizelge 4.48 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde ISO su sütun fantomu, ekstremite fantom ile dikey konumunda ölçülen doz değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Toplam Filtre Kalınlığı* (mm Al)	Filtre Kalınlığı Toleransı (%)	Ölçülen Doz (μGy)
RQR-2	40±0,00	2,7	1,11	6,82±0,11
RQR-3	50±0,79	2,7	1,11	19,24±0,38
RQR-4	60±1,33	2,8	2,50	36,48±1,02
RQR-5	70±0,57	2,9	2,41	58,44±1,51
RQR-6	80±1,00	2,9	2,41	86,89±2,35
RQR-7	90±0,44	3,1	1,29	129,28±4,23
RQR-8	100±0,80	3,2	0,62	175,16±2,01

\* 1,2 mm Al tüpün doğal filtrasyonu (inherent filtration) dahil.

#### 4.7.9 ISO su sütun fantomu (ön kol veya bacak temsili) ile hesaplanan farklı yüzdelerdeki parafin malzemelerin borosilikat cam içinde alınan ölçümlerinin karşılaştırılması

Çizelge 4.49 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde su sütun fantomu, ekstremite fantomu ile borosilikat cam tüp+ farklı bor yüzdeleri için karşılaştırmalı ölçülmüş doz değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Top* Filtre Kalınlığı (mm Al)	Filtre Kalınlığı Toleransı (%)	Ekstremitte Fantom ile Ölçülen Doz (μGy)	P-10 Beyaz Teknik Parafin+BSC ile Ölçülen Doz (μGy)	%10 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Yüklemeli Parafin+BSC ile Ölçülen Doz (μGy)	%20 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Yüklemeli Parafin+BSC ile Ölçülen Doz (μGy)
RQR-2	40±0,00	2,7	1,11	6,82±0,11	18,37±0,25	18,19±0,26	16,29±0,22
RQR-3	50±0,79	2,7	1,11	19,24±0,38	45,42±0,71	44,65±0,96	43,01±0,67
RQR-4	60±1,33	2,8	2,50	36,48±1,02	78,35±2,19	77,08±2,24	75,48±2,31
RQR-5	70±0,57	2,9	2,41	58,44±1,51	117,66±3,02	116,36±3,01	113,04±3,02
RQR-6	80±1,00	2,9	2,41	86,89±2,35	168,06±4,52	165,41±4,48	162,33±4,37
RQR-7	90±0,44	3,1	1,29	129,28±4,23	216,18±3,20	212,96±3,13	211,72±3,11
RQR-8	100±0,80	3,2	0,62	175,16±2,01	262,85±2,90	262,22±2,84	261,61±2,87

\* 1,2 mm Al tüpün doğal filtrasyonu (inherent filtration) dahildir.

Çizelge 4.50 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde su sütun fantomu, ekstremite fantomu ile borosilikat cam tüp+ farklı bor yüzdeleri için karşılaştırmalı ölçülmüş doz değerlerindeki % farklar

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kVp)	Toplam Filtre Kalınlığı (mm Al)	Filtre Kalınlığı Toleransı (%)	Ekstremitte Fantom ile Ölçülen Doz ( $\mu\text{Gy}$ )	P-10 Beyaz Teknik Parafin+BSC Arasında Fark* (%)	%10 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Yüklemeli Parafin+BSC Arasında Fark* (%)	%20 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Yüklemeli Parafin+BSC Arasında Fark* (%)
RQR-2	40±0,00	2,7	1,11	6,82±0,11	62,87	62,51	58,13
RQR-3	50±0,79	2,7	1,11	19,24±0,38	57,63	56,91	55,26
RQR-4	60±1,33	2,8	2,50	36,48±1,02	53,44	52,67	51,66
RQR-5	70±0,57	2,9	2,41	58,44±1,51	50,33	49,78	48,30
RQR-6	80±1,00	2,9	2,41	86,89±2,35	48,30	47,47	46,47
RQR-7	90±0,44	3,1	1,29	129,28±4,23	40,21	39,29	38,93
RQR-8	100±0,80	3,2	0,62	175,16±2,01	33,36	32,20	32,00

\*Beşinci kolonda verilen ekstremite fantom ile alınan dozlara göre kıyaslanan.

Çizelge 4.51 RQR serisi yedi farklı X-ışını demet kalitesinde su sütun fantomu, ekstremite fantom ile borosilikat cam tüp+ farklı kalsiyum sülfat yüzdeleri için karşılaştırmalı ölçülmüş doz değerleri

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kVp)	Toplam Filtre Kalınlığı (mm Al)	Filtre Kalınlığı Toleransı (%)	Ekstremitte Fantom ile Ölçülen Doz ( $\mu\text{Gy}$ )	%10 CaSO <sub>4</sub> Yüklemeli Parafin+BSC ile Ölçülen Doz ( $\mu\text{Gy}$ )	%15 CaSO <sub>4</sub> Yüklemeli Parafin+BSC ile Ölçülen Doz ( $\mu\text{Gy}$ )	%18 CaSO <sub>4</sub> Yüklemeli Parafin+BSC ile Ölçülen Doz ( $\mu\text{Gy}$ )	%20 CaSO <sub>4</sub> Yüklemeli Parafin+BSC ile Ölçülen Doz ( $\mu\text{Gy}$ )
RQR-2	40±0,00	2,7	1,11	6,82±0,11	12,44±0,17	7,68±0,11	7,00±0,17	3,60±0,05
RQR-3	50±0,79	2,7	1,11	19,24±0,38	35,86±4,08	23,58±0,71	21,19±0,80	13,75±0,22
RQR-4	60±1,33	2,8	2,50	36,48±1,02	64,48±1,80	46,98±1,32	42,85±1,24	30,26±0,84
RQR-5	70±0,57	2,9	2,41	58,44±1,51	99,35±2,55	76,79±1,98	69,47±1,79	52,40±1,35
RQR-6	80±1,00	2,9	2,41	86,89±2,35	142,54±3,84	116,73±3,15	106,75±2,94	82,33±2,22
RQR-7	90±0,44	3,1	1,29	129,28±4,23	188,59±2,77	163,91±2,41	154,33±3,99	117,93±1,73
RQR-8	100±0,80	3,2	0,62	175,16±2,01	242,76±2,80	239,28±3,03	228,36±2,54	160,79±1,75

Çizelge 4.52 RQR serisi yedi farklı X-ışın demet kalitesinde su sütun fantomu, ekstremite fantomu ile borosilikat cam tüp+farklı kalsiyum sülfat yüzdeleri için karşılaştırmalı ölçülmüş doz değerlerindeki % farklar

Demet Kalitesi	Tüp Gerilimi (kV <sub>p</sub> )	Top. Filtre Kalınlığı (mm Al)	Filtre Kalınlığı Toleransı (%)	Ekstremitte Fantom ile Ölçülen Doz (µGy)	%10 CaSO <sub>4</sub> Yüklemeli Parafin+BSC Arasında Fark* (%)	%15 CaSO <sub>4</sub> Yüklemeli Parafin+BSC Arasında Fark* (%)	%18 CaSO <sub>4</sub> Yüklemeli Parafin+BSC Arasında Fark* (%)	%20 CaSO <sub>4</sub> Yüklemeli Parafin+BSC Arasında Fark* (%)
RQR-2	40±0,00	2,7	1,11	6,82±0,11	45,17	11,19	2,57	-47,21
RQR-3	50±0,79	2,7	1,11	19,24±0,38	46,34	18,40	8,81	-28,53
RQR-4	60±1,33	2,8	2,50	36,48±1,02	43,42	22,21	14,86	-17,05
RQR-5	70±0,57	2,9	2,41	58,44±1,51	41,18	23,89	15,87	-15,95
RQR-6	80±1,00	2,9	2,41	86,89±2,35	39,04	25,56	18,60	-5,53
RQR-7	90±0,44	3,1	1,29	129,28±4,23	31,44	21,12	16,05	-9,62
RQR-8	100±0,80	3,2	0,62	175,16±2,01	27,85	26,79	23,29	-8,93

\*Beşinci kolonda verilen ekstremite fantom ile alınan dozlara göre kıyaslanan.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Tez çalışmasında öncelikle IEC-61267 protokolünde belirlenmiş olan RQR X - ışını demet kalitelerinin elde edilmesi sağlanmıştır. 40 - 100 kV<sub>p</sub> aralığında, farklı kalınlıkta filtreler kullanılarak ölçümler kalibrasyonlu bir iyon odasıyla alınmıştır. Aynı zamanda teorik verilerle kıyaslamak amacıyla Spectrum GUI, Xcomp5r gibi simülasyon programlarıyla hesaplamalar yapılmıştır. Ölçümlerden elde edilen 1. HVL değeri ile simülasyon programlarından elde edilen 1. HVL değerleri, Bulgular Bölümünde Çizelge 4.2, Çizelge 4.5, Çizelge 4.8, Çizelge 4.11, Çizelge 4.14, Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.20'de kıyaslanmıştır. Aynı zamanda ölçümler IEC-61267 protokolünde verilen anma(nominal) 1. HVL ve homojenlik katsayıları ile kıyaslanmış farkları, Bulgular Bölümünde Çizelge 4.22'de verilmiştir. HVL değerleri aynı protokolde verilen değerlere %11 ile %17 arasında bir yakınlıkta elde edilebilmiştir. Etkin enerjiler için nominal değerler ile ölçülen değerleri arasında %5,4-%14 arasında değişen bir fark gözlenmiştir. Ancak demetlerin homojenlik katsayıları %11 ile %29 arasında değişmiştir. Demet homojenliğinde oluşan bu farklılığın çevresel saçılmalar, düşük dozlarda aşırı dalgalanmalar ve ek filtrasyon tabakalarındaki düzensizlikler gibi diğer sistematik hatalar ve eğri uyarlamasındaki uyumsuzluktan ileri geldiği düşünülmektedir.

Çalışmada kullanılan tungsten anotlu X-ışını sisteminde radyometrik beç konfigürasyonunda ve çevresel malzemelerden ileri gelen saçılan ışınları azaltmak için dar demet ve geniş demet karşılaştırması yapılmıştır. Bu amaçla, tüm deney şartları aynı tutularak RQR serisi yedi X-ışını demet kalitesinde (40-100 kV<sub>p</sub>), sadece ışın alanı 3,5x3,5cm<sup>2</sup>'den 10x10cm<sup>2</sup>'ye genişletilerek değiştirilmiştir. Elde edilen veriler, Bölüm 4'de Çizelge 4.23'ünde sunulmuştur. Beklenildiği gibi ışın alanı daraltıldığında saçılan ışınlar önemli ölçüde engelleneceği için ölçülen doz değerleri azalmıştır. Bu nedenle ortalama % 42,29 luk bir azalış gözlenmiştir.

Kurşun zırh konulduğunda saçılan ışınlar baskın olarak engelleneceği için sadece geniş demette kurşun zırh varken ve kurşun zırh yokken alınan ölçümler karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler, Bulgular Bölümünde Çizelge 4.24'de verilmiştir. Beklenildiği gibi geniş demet koşullarında kurşun zırh kullanılarak saçılma etkisi azaltılmıştır. Zırhsız alınan doz değerlerine göre kurşun zırh varken dozlarda ortalama % 26,62 lik bir azalma gözlenmiştir.



Tez çalışmasında temel olarak bir ekstremite (ön kol veya bacak temsili) fantoma yakın ölçüm değerleri verebilecek karışım bir malzemeden bir fantom yapısı oluşturmak amaçlanmıştır. Bunun için öncelikle kemiği temsil edeceği düşüncesiyle ve ISO'nun su sütun fantomunun boyu (30 cm) ile aynı olan borosilikat cam bir tüp kullanılmıştır. Bu amaçla tezin ilk kısmında borosilikat camın normal camdan farklılıkları incelenmiştir.

Bunun için altı adet normal cam plaka numune ve beş adet borosilikat cam plaka numune örnekleri üzerinde transmisyon ölçümleri yapılmıştır.

Normal cam malzemeyi diğer borosilikat cam malzemeden ayıran zayıflatma özellikleri karşılaştırılmıştır. Şekil 4.16'da RQR X-ışını demet kalitelerinden sadece RQR-5 (70 kVp) demet kalitesi örnek ölçüm olarak kullanılmış ve toplam lineer azalım katsayıları ( $\mu$ ) değerleri karşılaştırılmıştır. Normal cam için  $\mu$  değeri:  $0,13 \text{ mm}^{-1}$  ve Borosilikat cam için  $\mu$  değeri:  $0,10 \text{ mm}^{-1}$  olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, RQR serisinin diğer demet kalitelerinde, lineer zayıflatma katsayısı ( $\mu$ ), normal cama göre daha küçük olan borosilikat camın HVL değerleri beklenildiği gibi daha büyük olduğu belirlenmiştir.

RQR X-ışını demet kalitelerinden yedisi ile (40 - 100 kV<sub>p</sub>) ölçümler alınarak her iki malzeme için (normal cam, borosilikat cam) transmisyon eğrileri (Şekil 4.17 ve Şekil 4.18) elde edilmiştir. Normal cam ile borosilikat cam için hesaplanan 1.HVL değerleri Çizelge 4.29 verilmiştir. Aralarındaki yüzde fark düşük enerjilerde (40 kV<sub>p</sub>) % 31,6 iken, daha yüksek enerjilerde %9,5 civarındadır. Bunun anlamı, borosilikat cam X-ışınlarını normal cama göre daha az zayıflatmaktadır.

Ayrıca Çizelge 4.29'da ICRU - 44 kemik dokusu için NIST veri tabanından X-ışını kütle zayıflatma katsayıları hesaplanmıştır (ICRU-44 1989, NIST 2014). Buna göre kemik dokusu için elde edilen 1. HVL değerleri ile bu cam malzemelerin 1. HVL değerleri karşılaştırılmıştır. HVL değerlerinde oluşan yüzde farklara göre, borosilikat camın kemik dokusuna daha yakın zayıflatma özelliği olduğu tespit edilmiştir. Ancak yine de borosilikat camın başka malzemelerinde birlikte kullanılması halinde bir kemik eşdeğerliği veya yaklaşımı bir durum sağlanacağını göstermiştir.

Bunun nedeni, borosilikat camın içerisindeki düşük atom numaralı bor (Z=5) nedeniyle elektron yoğunluğunun düşmesine ve dolayısıyla borosilikat camın etkin atom numarasının normal cama göre daha küçük olması şeklinde açıklanabilir. Buna bağlı olarak kemiği temsil

edecek bir fantom tasarımılandığında borosilikat camın alternatif bir malzeme olacağı değerlendirilebilir. Çizelge 4.29 görüldüğü gibi, borosilikat camın HVL değerleri normal cama göre örneğin 40 kV<sub>p</sub>'de % 31,56 ve 100 kV<sub>p</sub>'de % 9,48 oranında daha yüksek olması kemik dokuya yaklaşmak için uygun bir seçenek gibi görünmektedir.

Borosilikat camla birlikte aynı zamanda kemik yapısını daha iyi temsil edecek ek malzemelerin de karşısında kullanılmasına her zaman ihtiyaç vardır. Bunu sınamak için parafine farklı yüzdelerde (%10, %20) boroksit ve kalsiyum sülfat gibi malzemeler katkılanarak her birinden 10'ar adet Şekil 3.5 te görülen numuneler hazırlanmıştır.

Bu malzemelerin hangisinin bir ekstremitte (ön kol veya bacak) fantomuna daha yakın olduğunu bulmak için RQR X-ışını demet kalitelerinden RQR-5 (70 kV<sub>p</sub>) demet kalitesi örnek ölçüm olarak kullanılmış ve toplam lineer azalım katsayısı ( $\mu$ ) değerleri karşılaştırılmıştır. Ardından RQR serisinin yedi farklı X-ışını demet kalitesinde (40-100 kV<sub>p</sub>) ölçümler alınmış ve hazırlanan numunelerin 1.HVL değerleri Çizelge 4.40'da karşılaştırılmıştır.

40-100 kV<sub>p</sub> arasındaki RQR demet kalitelerinde yapılan azalım ölçümlerine göre B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüklemeli parafinin HVL değerleri, yüklemesiz parafine göre artmaktadır. Bu sonuçlar Çizelge 4.40'te gösterilmektedir. Yani Boroksitin X-ışını azalımına önemli bir artırıcı katkısı yoktur. Bunun nedeni Bor elementinin parafine göre elektron yoğunluğunun daha düşük olmasıdır. Aşağıda eşitlikten hesaplanacağı gibi, malzemede X-ışınlarıyla etkileşen elektron açısından bor elementinin ciddi bir etkisi olmayacağı anlaşılmaktadır.

$$\rho_{elektron} = N_A \rho (Z / A)_{eff}$$

N<sub>A</sub>=Avogadro sayısı,  $\rho$ =malzemenin fiziksel yoğunluğu,

$\rho_e$ = elektron sayısı/cm<sup>3</sup>

CaSO<sub>4</sub> yüklemeli parafinin HVL değerleri yüklemesiz parafinin HVL'sine göre azalmaktadır. Bunun nedeni ise kalsiyum ve kükürt içeriğinin elektron yoğunluğunun yüksek olmasından kaynaklıdır. Dolayısıyla malzemedeki elektron yoğunluğu artacağından daha çok sayıda gelen foton etkileşecektir.

Sonuç olarak parafin karışımını kemiğe yaklaştırmak için  $\text{CaSO}_4$ , buna karşılık dokuya yaklaştırmak için ise  $\text{B}_2\text{O}_3$  yüklemeli parafin kullanmak deneysel verilerden elde edilen sonuca uygunluk gösterir.

Tezin son kısmında hazır bir ekstremite (PMMA+su) sütun fantomuna kıyasla en uygun karışım değerlerinin bir optimizasyonu yapılmıştır. Bunun için borosilikat tüp dikey konumdayken numuneneler hazırlanmış (P-10 beyaz teknik parafin, % 10 boroksit yüklemeli parafin, %20 boroksit yüklemeli parafin, % 10 kalsiyum sülfat yüklemeli parafin, % 15 kalsiyum sülfat yüklemeli parafin,% 18 kalsiyum sülfat yüklemeli parafin, %20 kalsiyum sülfat yüklemeli parafin) sırayla boşluk oluşmaması için tüpün içerisine direk dökülerek dondurulmuştur ve her bir borosilikat cam içinde karışım katılaştıktan sonra ölçümler alınmıştır.

Tez çalışmasının tamamında bir ekstremite (PMMA+su) sütun fantomuna benzerlik sağlanması için deneysel verilerden elde edilen sonuca göre parafin karışımını kemiğe yaklaştırmada, Çizelge 4.52'de görüldüğü gibi  $\text{CaSO}_4$ , (%18 kalsiyum sülfat yüklemeli parafin için en düşük ve en yüksek farklar % 2,57 ile % 23,29) buna karşılık dokuya yaklaştırmak için ise Çizelge 4.50'de görüldüğü gibi  $\text{B}_2\text{O}_3$  yüklemeli parafin kullanmak uygundur.

Bu çalışmanın nihai sonucunda, 4,5 cm çapında ve 30 cm boyunda borosilikat cam tüp, %18  $\text{CaSO}_4$  yüklemeli parafin ile radyolojik enerji aralığında standart bir ekstremite fantomuna, HVL cinsinden önemli derecede bir yakınlık sağlanmıştır. İnsan dokusuna eşdeğer bir ön kol veya bacağı temsil eden 7,3 cm çapında ve 30 cm uzunlukta dik PMMA su sütun fantomuna daha iyi bir uyum sağlanması için farklı elementler düşünülerek bu eşdeğerlik daha iyi sağlanabilir. Borosilikat camın kemiğe yakınlığı için başka esas malzemelerle birlikte diğer kompozisyonlar sınanabilir. Böylelikle su fantomundaki doldurulan su yerine kabından akmaz, buharlaşmaz ve dokuya eşdeğer katı bir ekstremite fantomu yapılabilir ve kemik doku eşdeğerliği sağlanabilir.

## KAYNAKLAR

- Bor D. 2002. Diagnostik Radyoloji Fiziği Ders Notları. Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, Ankara.
- Bor D. 2009. Radyasyon Dedeksiyon ve Ölçüm Yöntemleri Ders Notları. Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü, Ankara. (176).
- BOREN Araştırma Merkezi “Bor ve Kullanım Alanları”, Web sitesi. ([www.boren.gov.tr](http://www.boren.gov.tr)) Erişim Tarihi: 20.04.2014.
- Cullity B.D. (1996). X ışınlarının Difraksiyonu, (Çev. A. Sümer), İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul.
- GiCi 2014. Greenwich Instrument Web sitesi. Inc. (<http://giciman.com/ourpçubukucts/dynalyzer.shtml>). Erişim Tarihi: 12.05.2014.
- Duruer K. 2010. Foton Dedektörleri ve Kişisel Dozimetrelerin X-ışınları ve Cs-137 Işınlayıcı ile Yapılan Kalibrasyonlarına Yönelik Protokollerin Hazırlanması. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- European Commission. 1980. Council Directive of 15 July 1980 amending the directives laying down the basic safety standards for the health protection of the general public and workers against the dangers of ionising radiation. 80/836/Euratom, Brussels, EC.
- Eti maden işletmeciliği genel müdürlüğü, Web sitesi. ([www.eti.maden.gov.tr](http://www.eti.maden.gov.tr)) Erişim Tarihi: 12.5.2014.
- Ferreira C.C. Ximenes, R. E., Garcia, C. A. B., Vieira, J. W., Maia A. F. 2010. Total mass attenuation coefficient evaluation of ten materials commonly used to simulate human tissue. Journal of Physics Conference Series 11/2010; 249(1):012029. DOI:10.1088/1742-6596/249/1/012029
- Firestone R.B. 1996. Table of Isotopes, Ver. 1.0, CD Rom Edition, Wiley Interscience.
- IAEA (International Atomic Energy Agency) TRS (Technical Report Series) 457, 2007. Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice. IAEA, (359) Vienna
- ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements) Report 44, 1989. Tissue substitutes in radiation dosimetry and measurement.
- ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements) Report 51, 1993. Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry.
- ICRU Report 74, Patient dosimetry for X rays used in medical imaging ... Publication, Bethesda, MD : ICRU, 2005. - 113 p, <http://www.icru.org/home/reports/patient-dosimetry-for-x-rays-used-in-medical-imaging-report-74>
- ICRU (International Commission on Radiation Units) Report 85, 2011. Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation (Revised). Oxford University Press, 35, Maryland.
- ICRP 26, 1977. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1 (3)
- ICRP 60, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).
- ICRP 103, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).

- IEC (International Electrotechnical Commission) 61267, 2005. Medical Diagnostic Ray Equipment-Radiation Conditions for Use in The Determination of Characteristics. IEC, 85, Geneva.
- IPEM(Institute of Physics and Engineering in Medicine) Report 32 part II. The Performance Characteristics of Diagnostic X-Ray Systems Used in Medicine: X-Ray Image Intensifier Television System 2nd Edition. Institute of Physics and Engineering in Medicine and Biology.
- Knoll F.G. 2000. Radiation Detection and Measurement Third Edition. Wiley, 816, New York.
- Lombardi, Max H., 2007. Radiation safety in nuclear medicine: Second Edition (32).
- Ma, C.M., Coffey, C.W., DeWerd, L.A., Liu, C., Nath, R., Seltzer, S.M., Seuntjens, J.P. 2001. AAPM Protocol for 40-300 kV X-Ray Dosimetry in Radiotherapy and Radiobiology. Medical Physics, 28(6), 870. p.
- Mayles P. Nahum A, Rosenwald JC. 2007.Handbook of radiotherapy physics, theory and practice. New York London, Taylor and Francis group, CRC Press, (57-70).
- Martin JE, 2006. Physics for radiation protection: A handbook. Second Edition. Weinheim, Wiley-VCH, (149-153).
- NIST(National Institute of Standards and Technology), 2009. Web sitesi (<http://www.nist.gov.tr>)Erişim Tarihi: 03.06.2014.
- Podgorsak E.B., 2005. (Technical Editor), Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students, IAEA Publications. (127-162)
- PTW 2014. Web sitesi[http://www.ptw.de/iso\\_calibration\\_fantoms.html](http://www.ptw.de/iso_calibration_fantoms.html), Erişim Tarihi:23.06.2014
- Çubukçu, Ş. ,SoygüdenA., GüllüoğluE., YücelH. 2014.Measurement of attenuation properties of paraffin wax loaded with boron oxide and calcium sulphate in the radiologic energy range of 40–100 kV<sub>p</sub> X-ray beam qualities. Humbolt Kolleg, 3.7.2014 Poster)
- TS 3399 ISO 3585, 2005.Borosilikat cam 3.3 – Özellikler(Borosilicate Glass 3.3 Properties), Türk Standardları Enstitüsü.
- TS 13594, 2014. Borosilikat cam tüpten imal edilen vakumlu güneş kolektörleri – Su ısıtma uygulamalarında kullanılan (Evacuated tube solar collectors manufactured from borosilicate glass - used in suheating applications), Türk Standardları Enstitüsü.
- Tsoufanidis N. 1995.Measurement and detection of radiation (564-596).
- White, D. R., R. J. Martin, and R. Darlison. "Epoxy resin based tissue substitutes." The British journal of radiology 50.599 (1977): 814-821.

## ÖZGEÇMİŞ

### **Kişisel Bilgileri:**

Adı Soyadı : Arife İNCİ  
Doğum Yeri : KAYSERİ  
Doğum Tarihi : 24.07.1988  
Medeni Hali: Evli  
Yabancı Dili : İngilizce

### **Eğitim Durumu:**

Lise : Behice Yazgan Anadolu Lisesi (2003-2006)  
Lisans : Mersin Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü (2007-2011)  
Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Medikal Fizik Anabilim  
Dalı Sağlık Fiziği Yüksek Lisans Programı (Eylül 2012-...)

### **Yayımları :**

Ş.Çubukçu, A.Soygüden, E.Güllüoğlu, H.Yücel. Measurement of attenuation properties of paraffin wax loaded with boron oxide and calcium sulphate in the radiologic energy range of 40–100 kV<sub>p</sub> X-ray beam qualities. Humbelt Kolleg, 3.7.2014 Poster)