

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

**ISO S-¹³⁷Cs (0,662 MeV) DEMET KALİTESİNDE YAKLAŞIK DOKU
EŞDEĞERİ OLAN BC-408 PLASTİK SİNTİLATÖR DEDEKTÖRÜN TEPKİSİ
İLE DOZ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ**

Özgün Emrah TURAN

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

**ANKARA
2016**

Her hakkı saklıdır

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

**ISO S-¹³⁷Cs (0,662 MeV) DEMET KALİTESİNDE YAKLAŞIK DOKU
EŞDEĞERİ OLAN BC-408 PLASTİK SİNTİLATÖR DEDEKTÖRÜN TEPKİSİ
İLE DOZ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ**

Özgün Emrah TURAN

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

**ANKARA
2016**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Özgün Emrah TURAN tarafından hazırlanan ‘‘ISO s-¹³⁷Cs (0,662 MeV) demet kalitesinde yaklaşık doku eşdeğeri olan BC-408 plastik sintilatör dedektörün tepkisi ile doz arasındaki ilişkinin incelenmesi’’ adlı tez çalışması 14 Haziran 2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Medikal Fizik Anabilim Dalı Sağlık Fiziği Yüksek Lisans Programı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Haluk YÜCEL

Jüri Üyeleri:

Prof. Dr. Haluk YÜCEL

(Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü)

İmza

Prof. Dr. Ayşe KAŞKAŞ

(Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü)

İmza

Doç. Dr. Cemil KOCAR

(Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Nükleer Enerji Mühendisliği)

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Niyazi MERİÇ

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ISO S-¹³⁷Cs(0,662 MeV) DEMET KALİTESİNDE YAKLAŞIK DOKU EŞDEĞERİ OLAN BC-408 PLASTİK SİNTİLATÖR DEDEKTÖRÜN TEPKİSİ İLE DOZ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ

ÖZGÜN EMRAH TURAN

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

Danışman: Prof. Dr. Haluk YÜCEL

Organik plastik sintilatörler yaklaşık doku eşdeğeri olmaları nedeniyle iyon odalarına alternatif olarak, medikal alanda MV linaclar kullanılarak yapılan radyoterapi uygulamalarında foton dozimetresi olarak kullanımları yaygınlaşmaktadır. Ayrıca, oldukça küçük boyutlu (<1cm³) yapılabilmeleri nedeniyle yüksek doz brakiterapi uygulamalarında ve büyük boyutlu (<1 m³) olarak sınır kapılarındaki araç taraması gibi sınır güvenliği uygulamalarında kullanımları giderek yaygınlaşmaktadır. Bu tez çalışmasında, ticari olarak elde edilebilir poliviniltoluen (PVT) esaslı BC-408 (Bicron Corp.) plastik sintilatörün bir ¹³⁷Cs kaynaka ışınlanması sonucunda, soğurulma ve saçılmaların hesaba katılmasıyla oluşan sayım ile doz arasındaki ilişkiye ait bir ölçeklendirme faktörünün bulunması amaçlanmıştır. Bunun için öncelikle 3 boyutlu radyometrik beç üzerine konumlandırılan TM 23361 iyon odası (PTW Unidos marka elektrometre ile eşlenik), ISO s-¹³⁷Cs (47 mCi) kaynağıyla belirli mesafelerde ışınlanarak yapılan doz ölçümleri referans değerler olarak alınmıştır. Ardından aynı radyometrik beç üzerine konumlandırılan 7,62 cmx7,62 cm boyutlu BC-408 plastik sintilatörü, aynı gama ISO s-¹³⁷Cs kaynak ışınımıyla belirli mesafelerde ışınlanarak puls yüksekliği spektrumları elde edilmiştir. İyon odası ile elde edilen doz değerleri ve diferansiyel puls yüksekliği gama spektrum verilerinden faydalanılarak, sayım ile doz ilişkisi incelenmiştir. Değerlendirmeler sonucunda, sayım hızlarından yaklaşık olarak tahmin edilen doz değeri ile referans doz arasında ki ölçeklendirme faktörünün 1,99-2,10 arasında olduğu bulunmuştur. Ayrıca düşük aktiviteli (µCi mertebesinde) radyoizotop kaynaklarından yayınlanan 60-1332,5 keV enerji aralığındaki beta ve gama ışınlarıyla ışınlanan Bicron marka 7,62cmx7,62cm boyutlu BC-408 plastik sintilatöründen elde edilen spektrumla, teorik olarak hesaplanan doza ulaşıp ulaşamayacağı amacıyla ölçümler yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda, orta enerji bölgesindeki 662 keV gama ışınlarının doz-sayım ilişkisi için matematiksel bir algoritma uygulanmıştır.

2016, 96 sayfa

Anahtar Kelimeler: BC-408, Plastik Sintilatör, Gama Işını, Medikal Dozimetre, TM 23361, İyon Odası, Kalibrasyon, Işın Spektrumları, Doz, Ölçeklendirme Faktörü

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN DOSE AND RESPONSE OF APPROXIMATE TISSUE EQUIVALENT BC-408 PLASTIC SCINTILLATOR DETECTOR AT ISO S-¹³⁷Cs(0.662MeV) BEAM QUALITY

ÖZGÜN EMRAH TURAN

Ankara University, Institute of Nuclear Sciences
Department of Medical Physics
Health Physics Master Program

Supervisor: Prof. Dr. Haluk YÜCEL

Since the organic plastic scintillators are approximately tissue equivalent, they are an alternative to ionization chamber to use as photon dosimeters in radiotherapy MV linacs applications in the medical field. Also, since they can be made in small size ($<1\text{cm}^3$), their utilization are becoming widespread in the high-dose brachytherapy as well as in the large sized ($<1\text{ m}^3$) radiation panel detector application at border security such as vehicle screening. These PVT or polystyrene based scintillators are becoming increasingly widespread in these new applications. The aim of this thesis is to estimate the scaling factor included the absorption and scattering effect of gamma-rays, and to show the relationship between gamma dose and the count rates (count per second) in a commercially available BC-408 (Bicron Corp.) plastic scintillator detector based polyvinyl toluene (PVT) material. To achieve this, the detector was irradiated by using a standard source ¹³⁷Cs source as being defined by the ISO s-¹³⁷Cs (47 mCi) source. Firstly, air kerma (dose) in free air was measured by use of PTW calibrated- TM 23361 ion chamber associated with a UNIDOS electrometer positioned on the 3D radiometric bench irradiation at the given distances and these measurements are taken as reference dose values. And then, it was obtained pulse height spectra by a 7.62cmx7.62cm size BC-408 plastic scintillator positioned of the same distance 3D radiometric bench as being irradiated by the same ISO s-¹³⁷Cs (47 mCi) source irradiation at given distances. The relationship between dose and count rates is examined owing to dose data measured by ion chamber and count data of a differential pulse height gamma spectrum. As a result, a scaling factor is calculated as a value between 1,99 and 2,10 due to the relationship between reference dose and the dose estimated from the count rate from the BC-408 PS detector. It was also made additional measurements to see whether theoretical dose calculated could be reached or not whereby it is obtained spectrum by a 7.62cmx7.62cm size BC-408 (Bicron Corp.) plastic scintillator irradiated by gamma plus beta particle sources which have low activities (in the order of μCi) but their gamma energies are in the range of 59.6 to 1332.5 keV energy. In conclusion, an mathematical approach is applied for obtaining the scaling factor showing the relationship between gamma dose and count rates of 662 keV gamma ray in a PVT based plastic scintillator.

2016, 96 pages

Key Words: BC-408, Plastic Scintillator, Gamma-ray, Medical Dosemeter, TM 23361, Ion Chamber, Calibration, Beam Spectrums, Dose, Scaling Factor

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőması sűresince bana her konuda yardım eden, kendisinin ğrencisi olmamdan dolayı onur duyduėum danıőmanım Sayın Prof. Dr. Haluk YŪCEL'e teőekkűrlerimi sunarım. Tez çalıőmam sűresince desteklerini gűrdűėum tűm Enstitű çalıőanlarına teőekkűr ederim. Ayrıca yűksek lisans eėitimim boyunca maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan, zor zamanlarımda beni ayaėa kaldıran annem Raziye TURAN, babam Rıfat TURAN ve kız kardeőim İmge TURAN'a sonsuz teőekkűrlerimi bir borç bilirim.



Özgűn Emrah TURAN

Ankara, Mayıs 2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1 GİRİŞ	1
2 KURAMSAL TEMELLER	4
2.1 Tanımlamalar.....	4
2.1.1 Kerma.....	4
2.1.2 Kerma hızı.....	4
2.1.3 Birincil (Primer) radyasyon.....	4
2.1.4 Saçılan radyasyon	4
2.1.5 Soğurulan doz, D.....	5
2.1.6 Soğurulan doz hızı.....	5
2.1.7 Kolimatör	5
2.1.8 Doku eşdeğeri madde.....	5
2.1.9 ICRU küresi	6
2.1.10 ICRU dokusu.....	6
2.1.11 Kişisel doz eşdeğeri, $H_p(d)$	6
2.1.12 Referans standart kaynak.....	6
2.2 Radyasyon Kaynakları	7
2.2.1 Tek enerjili (Monokromatik) radyasyon kaynakları.....	7
2.2.2 Çok enerjili (Polikromatik) radyasyon kaynakları.....	7
2.2.3 Bazı radyoaktif parçacıkların genel özellikleri	7
2.3 Dozimetre	8
2.4 Dedektörlerle İlgili Özet Bilgi.....	10
2.5 Sintilatörlerin Çeşitleri	12
2.5.1 İnorganik sintilatörler.....	12
2.5.2 Gaz sintilatörler	13

2.5.3	Organik sintilatörler	13
2.5.3.1	Organik kristal sintilatörler	13
2.5.3.2	Organik sıvı sintilatörler.....	13
2.5.3.3	Plastik sintilatörler.....	14
2.6	Plastik Sintilatörlerin Çalışma Prensibi.....	15
2.6.1	Işımsız geçişler.....	17
2.6.1.1	Titreşimsel durulma.....	17
2.6.1.2	İç dönüşüm	17
2.6.1.3	Dış dönüşüm.....	18
2.6.1.4	Sistemler arası geçiş	18
2.6.2	Işımalı geçişler.....	19
2.6.2.1	Floresans.....	19
2.6.2.2	Fosforesans.....	19
2.6.3	İnorganik sintilatörde sintilasyon oluşumu.....	19
2.6.4	Sintilasyon oluşumu sonrasında kullanılan sistemin komponentleri	21
2.6.4.1	Fotoçoğaltıcı tüp.....	21
2.6.4.2	Önyükselteçler.....	22
2.6.4.3	Yükselteçler	23
2.6.4.4	Analog-sayısal dönüştürücü (ADC).....	24
2.6.4.5	Çok kanallı analizör (MCA)	24
2.6.5	Plastik sintilatörün floresans ışık verme tepkisi	25
2.7	Plastik Sintilatörlerin Medikal Dozimetre Olarak Kullanılması	31
2.8	BC-408 Plastik Sintilatörün Güvenlik Amaçlı Uygulama Alanında Kullanılan Panel Dedektörü	32
2.8.1	ALPS 2 (Gelişmiş Geniş Alanlı Plastik Sintilatör).....	32
2.8.2	Dedektörün tasarımı	32
2.8.3	Radyasyon panel monitör bileşenleri	33
2.8.4	Dedektörün yapımı	34
2.8.5	PMT montajlaması	35
2.8.6	Alet kaplaması.....	36
2.8.7	Elektronik kaplama	36
2.8.8	ALPS 2 temeli.....	36

3	MATERYAL VE YÖNTEM	37
3.1	Tez Çalışmasında Kullanılan Mekanizmanın Bağlantısı, İşleyişi ve Mekanizmaya Ait Bilgiler	37
3.2	Radyonüklit Kaynaklar	40
3.3	¹³⁷Cs kaynaklı Işınlama Sistemi.....	41
3.4	Doz ve Doz Hızı Ölçümünde Kullanılan İyon Odaları	43
3.5	İyon Odası Elektrometresi.....	44
3.5.1	BC-408 Plastik sintilatörünün yapılan tezde ilişkide olduğu mekanizmalar	45
3.5.2	Gama ışını spektrumu değerlendirme programı	45
3.6	BC-408 Plastik Sintilatörünün Temel Fiziksel Özellikleri ve Yaygın Olarak Kullanılan Diğer Plastik Sintilatörlerin Özellikleri İle Karşılaştırılması ...	46
3.7	¹³⁷Cs Radyoizotop Kaynaklı Işınlama Sisteminde Farklı Mesafelerdeki Spektrumların Toplanması.....	50
3.8	Noktasal Radyonüklit Kaynaklar Kullanılarak Spektrumların Elde Edilmesi	52
3.9	¹³⁷Cs Ölçüm Laboratuvarındaki Işınlama Sistemiyle Alınan Doz ve Doz Hızı Ölçümleri	53
4	BULGULAR.....	55
4.1	TM 23361 İyon Odası ve BC-408 Plastik Sintilatör İle Yapılan Deneylerin Ölçüm Sonuçları.....	55
4.1.1	TM 23361 iyon odasıyla yapılan ölçümlerin doz değerleri	55
4.1.2	Sistem bileşenlerinin ayarları ve dedektörün enerji kalibrasyonu	58
4.1.3	Sayım hızı ile doz hızı arasındaki ilişki	60
4.1.4	Ölçeklendirme faktörüne (scaling factor) ulaşmak için BC-408 PS dedektörü ile toplanan spektrum eğrilerinin fit edilmesi	62
4.1.5	Ölçeklendirme faktörü (scaling factor) hesapları.....	65
4.2	Radyonüklit Kaynaklarda Spektrumdan Toplanan Sayım Değerleriyle Doz Arasında İlişkinin İncelenmesi	68
5	SONUÇ VE TARTIŞMA.....	70
	KAYNAKLAR.....	74
	EKLER.....	77

Ek-1	Ters Kare Metodu.....	77
Ek-2	Sıcaklık-Basınç Düzeltmesi.....	78
Ek-3	Net Spektrumların Bulunmasında Stripping Yöntemi.....	79
Ek-4	BC-408 PS Dedektöründeki Plastik Sintilatör Malzemesinin Ortalama Atom Numarasının Hesaplanması.....	80
Ek-5	BC-408 Plastik Sintilatörün Kütle Hesabı.....	81
Ek-6	Spektrum Verilerinden Hesaplanan (Sigma Yöntemi) Ölçeklendirme (Scaling) Faktörü.....	82
Ek-7	Polivinil Toluen (PVT) Esaslı Plastik Enerjilere Göre Enerji Soğurma Katsayıları (μ_{en}/ρ) ve Kuru Havanın Toplam Kütle Azalım Katsayıları (μ/ρ).....	83
Ek-8	Fit Edilen Eğriden Yararlanılarak Hesaplanan (İntegral Yöntemi) Ölçeklendirme (Scaling) Faktörü.....	84
Ek-9	Radyonüklit Kaynakların Teorik Dozdan ve Spektrum Verilerinden Hesaplanan Doz Değerlerinin Hesaplanması	93
	ÖZGEÇMİŞ	96

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

PVT	Poliviniltoluen
Gy	Gray
PMT	Foto Çoğaltıcı Tüp
PS	Plastik Sintilatör
S	Radyoaktif Kaynak
H _p (10)	Kişisel Eşdeğer Doz
Ø	Radyasyon Akısı
γ	Gama radyasyonu
β	Beta Parçacığı
μ/ρ	Toplam Kütle Azalım Katsayısı
μ _{en} /ρ	Enerji Soğurma Katsayısı
A	Ölçeklendirme Faktörü
D	Doz
k _{TP}	Sıcaklık-Basınç Düzeltme Faktörü
SOF	Fiber Optik Sintilatör
ALPS	Gelişmiş Geniş Alanlı Plastik Sintilatör
LLD	Alt Seviye Sınırı
ULD	Üst Seviye Sınırı
MCA	Çok Kanallı Analizör
cps	Saniyedeki Sayım Sayısı (sayım/s)
NIST	National Institute of Standards and Technology
ICRU	International Commission on Radiation Units
ISO	International Organization for Standardization

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Toluene ve anthracene aromatik bileşiklerinin gösterimi	13
Şekil 2.2 Eklenen çözünenler ile sintilasyonun dalga boyundaki kayma (Anonymous 1992)	14
Şekil 2.3 Bir moleküle ait enerji seviye diyagramı (http://dedocz.com , 2016)	16
Şekil 2.4 Jablonski enerji diyagramı (http://www.expertsmind.com , 2016)	17
Şekil 2.5 İç dönüşümün gösterimi	18
Şekil 2.6 Sistemler arası geçişin gösterimi	18
Şekil 2.7 Uyarılmış elektronların singlet-triplet durumları	19
Şekil 2.8 Aktive edilmiş bir sintilatörün enerji bant yapısı (http://dedocz.com , 2016) ..	20
Şekil 2.9 BC-408 PS dedektörünün fotoçoğaltıcı tüpündeki P-14 gerilim bölücü devre şeması (www.crystals.saint-gobain.com 2003a)	22
Şekil 2.10 Önyükselteç çıkışındaki puls şekli	23
Şekil 2.11 Önyükselteç devre şeması (www.crystals.saint-gobain.com 2003b)	23
Şekil 2.12 Fotoelektrik olay (http://drgstoothpix.com , 2016)	27
Şekil 2.13 Compton Saçılması (http://www.zamandayolculuk.com , 2015)	29
Şekil 2.14 Çift oluşumu olayı (https://www.med-ed.virginia.edu , 2016)	30
Şekil 2.15 SOF dozimetre sisteminin şematik diyagramı (Ishikawa 2009)	31
Şekil 2.16 Temel ALPS 2'nin mekanik konfigürasyonu (Jordan 2007)	32
Şekil 2.17 ALPS 2 dedektör bileşenleri (Jordan 2007)	34
Şekil 2.18 ALPS 2 montaj bölümü (Jordan 2007)	35
Şekil 3.1 BC-408 PS dedektör ölçüm sistemi diyagramı	38
Şekil 3.2 Düşük ve yüksek aktiviteli ¹³⁷ Cs ışınlama sistemi ve bu sistemle alınan ölçümler için kullanılan mobil 3D- radyometrik benç sistemi	42
Şekil 3.3 Üç boyutlu radyometrik benç üzerindeki TM 23361 silindirik iyon odası	43
Şekil 3.4 Kurşun zırhın önündeki mini-1 SmartION iyon odası	44
Şekil 3.5 PTW Unidos Weblin marka elektrometre	44
Şekil 3.6 Tez için 370 cm mesafesinde toplanmış bir spektrum görüntüsü	46
Şekil 3.7 BC-408 PS dedektörü resmi (Saint-Gobain Crystal and Dedectors 2005)	47
Şekil 3.8 Ölçümlerde kullanılan Bicron marka BC-408 plastik sintilatör dedektörü	48
Şekil 3.9 BC-408 PS ışın spektrumu (http://www.dedectors.saint-gobain.com 2005) ..	48

Şekil 3.10 Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Işınlama ve Kalibrasyon Laboratuvarında 300 saniye boyunca farklı mesafelerde toplanan spektrum için kurulan ölçüm geometrisi	51
Şekil 3.11 Radyonüklit kaynaklar kullanılarak alınan spektrumlar için kurulan ölçüm geometrisi	52
Şekil 3.12 Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Işınlama ve Kalibrasyon Laboratuvarında ışınlama sistemiyle alınan doz ve doz hızı ölçümleri için kurulan ölçüm geometrisi	53
Şekil 4.1 ‘‘Mesafe (cm)-Ort. Doz Hızı ($\mu\text{Gy}/\text{dk}$)’’ grafiği	56
Şekil 4.2 ‘‘Mesafe (cm)-Ort. Doz (μGy)’’ grafiği.....	57
Şekil 4.3 Fotopik enerjileriyle oluşturulan kalibrasyon eğrisi grafiği	59
Şekil 4.4 Maksimum Compton Kenarı enerjileriyle oluşturulan kalibrasyon eğrisi grafiği	60
Şekil 4.5 ‘‘Mesafe (cm)-Sayım Hızı (cps)’’ grafiği	62
Şekil 4.6 BC-408 PS dedektör ile 370 cm mesafede deneysel spektruma göre Excel Solver programı ile uyarlanmış ‘‘Sayım Hızı (cps)-Kanal’’ grafiği	65
Şekil Ek-9.1 BC-408 PS geometrisi üzerindeki katı açısı	93

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Plastik sintilatörde çözücüler ve çözünen maddeler	15
Çizelge 3.1 Kullanılan radyonüklit kaynakların bilgileri.....	40
Çizelge 3.2 ¹³⁷ Cs ışınlama sistemi bilgileri.....	42
Çizelge 3.3 BC-408 plastik sintilatör dedektör özellikleri.....	47
Çizelge 3.4 Bazı plastik sintilatörlerin temel fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması	49
Çizelge 4.1 TM 23361 iyon odasının mesafelere karşı doz hızı ölçümleri.....	55
Çizelge 4.2 TM 23361 iyon odasının mesafelere karşı doz ölçümleri	57
Çizelge 4.3 BC-408 PS dedektörünün kalibrasyonu için alınan veriler	59
Çizelge 4.4 Mesafelere karşılık sayım ve cps değerleri.....	61
Çizelge 4.5 BC-408 PS ile her bir kanalda elde edilen toplam sayım ve cps değerleri..	62
Çizelge 4.6 Ölçekleme faktörü 1 hesap tablosu	66
Çizelge 4.7 Ölçekleme faktörü 2 hesap tablosu	67
Çizelge 4.8 Bazı radyonüklit kaynaklar için, BC-408 PS dedektörü ile toplanan sayım değerleri ile mini-1 SmartION iyon odasıyla elde edilen doz hızlarının sonuçları	69
Çizelge Ek-7.1 NIST veri tabanından hesaplanan polivinil toluen (PVT) esaslı plastiğin enerjilere göre enerji soğurma katsayıları (μ_{en}/ρ) ve kuru havanın toplam kütle azalım katsayıları (μ/ρ) (NIST 2015).....	83

1 GİRİŞ

Organik kristaller, 1950’li yıllardan günümüze kadar nükleer alanda alfa, beta, proton, nötron ve foton dedeksiyonunda kullanılmıştır. Bu sintilatörlerin en ilkeli saf anthracene olup, diğer organik sintilatörlerin verimi buna göreceli olarak tanımlanır. (Birks 1950). Saf organik kristal yapıdaki sintilatörlerden anthracene ve stilbene yüksek sintilasyon verimleri nedeniyle uygulamalarda başarı kazanmıştır. Bunlardan anthracene, yüksek sintilasyon verimi (diğer bir ifadeyle, birim enerji başına elde edilen en fazla ışık fotonu sayısı) nedeniyle diğerlerinden ayırt edici bir özelliğe sahiptir. Buna karşılık, stilbene düşük sintilasyon verimine sahip olmakla birlikte, yüklü parçacıklar ve elektronlar tarafından oluşturulan sintilasyonların birbirinden ayırt edilmesinde kullanılan “pulsun şekline göre ayırma” tekniğinin kullanıldığı uygulamalarda tercih edilmektedir (Knoll 2000). Fakat hem anthracene hem de stilbene kristallerinin kırılgenlığı, nem çekiciliği, kararlılık sorunları gibi çeşitli dezavantajları nedeniyle; daha büyük boyutlarda üretilmemeye zorluklarının olması, nükleer uygulamalarda kullanımlarını sınırlandırmıştır. Bu yüzden alternatif organik malzemelerden radyasyon dedeksiyonu için kullanılabilen sintilatör malzemelerinin geliştirilmesi sürekli bir araştırma konusudur. Çünkü katı formdaki organik sintilatörler, plastik şeklinde kolayca kesilebilir, eğilebilir, şekil verilebilir, istenilen boyutlarda (küçük hacimli) veya sanayi uygulamalarında büyük boyutlarda oldukça ucuz fiyatlarla temin edilebilir olması her zaman bir radyasyon dedeksiyon malzemesi olarak ilgi çekmektedir. Bu nedenle günümüzde plastik sintilatörler; medikal, uzay araştırmaları ve sanayide radyasyon ölçümleri için kullanılmaktadır.

Plastik sintilatör (PS) dedektörleri, 200-2500 keV gibi geniş bir enerji aralığında suya eşdeğer ve çok küçük hacimlerde ($< 2 \text{ cm}^3$) yüksek duyarlıklı dedeksiyon ortamı, doz hızı, enerjiden bağımsız tepki ve gerçek-zamanlı çıkış okuması (real-time readout) gibi özelliklerin bir kombinasyonuna sahiptirler. Tüm bu özellikler PS dedektörlerini katı formda, su eşdeğeri veya yaklaşık doku eşdeğeri olarak iki boyutlu veya üç boyutlu dozimetre olarak kullanılmalarını elverişli hale getirmektedir (Lacroix 2009). Bu nedenle, bu tez çalışması da özel özellikleri olan BC-408 plastik sintilatör dedektörünün foton doz ölçümünde kullanılabilirliğine odaklıdır.

PS malzemesi, kullanım açısından sintilasyon dedektörü olarak pratikte bir fotoçoğaltıcı tüpe (PMT-Photomultiplier tube), bir fotodiyota (photodiode) veya yüke duyarlı kuplaj cihazına (CCD-Charge Coupled Device) optik olarak bağlanarak içinde iyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle oluşan sintilasyon ışığının iletilmesine kolayca imkan verdiği için çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Çeşitli biçimlerde kesilen (kare, silindirik, vb) ve istenilen kalınlıklarda kullanılabilen PS tabakalarındaki oluşacak sintilasyon fotonlarının, bir ışık kılavuzu (optical light guide) kullanılmaksızın sadece optik bir fiber kabloya kuplajı yapılarak örneğin hastadan daha uzakta bulunan ışığa duyarlı bir fotodedektöre (yani bir fotodiyot, PMT veya CCD) taşınması mümkündür (Beddar 1992). Plastik sintilatörlerin fiber optik kablo ile kuplajı radyasyon terapisinde, örneğin brakiterapide, çok küçük hacimli PS dozimetleriyle radyasyon dozlarının ölçülmesi ve ilgilenilen organ bölgesindeki doz dağılımlarının belirlenmesi amacıyla kullanılması, güncel araştırma konusudur. Benzer şekilde, radyoterapide hasta konumunda yerleştirilen PS dedektör çıkışına bağlanan fiber kablolarla 8-10 m'ye kadar optik olarak ışığın çok az kayıpla taşınması ve bu ışığın daha sonra PMT'de elektriksel sinyale dönüştürülerek dedekte edilebilir olması (Ishikawa, 2009), medikal alanda PS dedektörlerinin uygulama alanına girmesini sağlamıştır. Ayrıca sınır kapılarında, herhangi bir radyasyon kaynağından ya da kontamine radyoaktif malzemeden yayılan radyasyonun tespiti için araç geçişi ile kantar arasındaki PS esaslı panel dedektörün emniyet kontrolü görevi yapması pratikte önemli bir avantaj sağlamaktadır. Böylece radyasyon yayan malzemelerden oluşan yüklerin naklinin takip edilmesi veya izinsiz kaynakların taşınması, açık ve sahipsiz kaynakların tespiti ve hurda-metal muayenelerinin radyasyon tespiti, PS esaslı dedektörlerin uygulama alanlarını genişletmektedir.

Bu çalışmada, BC-408 plastik sintilatörünün gama fotonlarına karşı tepkisinin ölçülecek olması, radyasyon terapisinde ilgilenilen tedavi ortamlarındaki veya hasta dokusundaki radyasyon doz dağılımlarının belirlenmesi için aktif bir dozimetre olarak kullanılabilmesine ilişkin deneysel bulgular sağlayabilecektir. Tezde, PVT esaslı BC-408 dedektörün radyasyon taramasında; örneğin panel dedektörlerde doza endeksli bir gösterim vermesi için de sayım hızı değeri ile doz arasında bir "ölçeklendirme faktörü (scaling factor)" bulunması amaçlanmaktadır. Çünkü, PS malzemeler en çok güvenlik

denetimi (safeguard) ve nükleer emniyet amaçlı vatan savunmasında (homeland security) kara sınır kapılarında ve limanlarda veya özel alanlara giriş-çıkışlarda hareketli veya duran araçların radyasyon taraması için alarm verici dedektörler olarak yaygınlaşmaktadır. Bu amaçla polistren veya PVT esaslı plastik sintilatörler büyük boyutlu ($<1\text{m}^3$) radyasyon panel dedektörleri olarak araç kontrolü için kurulmaktadır.

Bu tezde, yaklaşık su ve doku eşdeğeri olduğu bilinen BC-408 plastik sintilatör dedektörünün ISO standart demet kalitesindeki (ISO 4037-1'e uygun ISO s- ^{137}Cs kaynak) 662 keV enerjili gama fotonlarına karşı tepkisi ile verilen doz arasındaki ilişkinin bulunması, araştırma konusudur. 7,62cmx7,62cm boyutlarındaki BC-408 PS ile dedektör puls-yüksekliği spektrumundan elde edilen sayım hızının doza dönüştürülmesi için uygun bir algoritma oluşturmak amacıyla ölçümler yapılmıştır. Bunun için Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'nde kurulmuş olan mobil ve üç boyutlu radyometrik benç üzerine yerleştirilerek uygun şekilde zırhlanan ve demet kolimasyonu yapılan ışınlama sistemi kullanılmıştır. Bu tezde özel zırhlanmış bir odada, çift kaynağı (47 mCi ve 8,48 Ci) bulunan ve ayrı ayrı ışınlama konumuna getirebilen pnömatik kontrol sistemi yardımıyla ışınlama konumuna getirilebilen kaynağın karşısındaki radyometrik benç üzerine ölçüm sistemi kurulmuştur. Ancak yüksek sayım hızlarında, sayım sisteminde ölü zamanın yüksek olması nedeniyle belirli mesafelerde ki sayım kayıplarını en azda tutabilmek için sadece düşük aktiviteli (47 mCi) ^{137}Cs kaynağı, ışınlamalarda kullanılmıştır. Ayrıca ISO s- ^{137}Cs ışınlama ünitesi dışında, kBq mertebesindeki noktasal kalibrasyon kaynaklarındaki gama ışınlarının yanı sıra, yayılan pozitron/betalarda sayım hızına etkilerinin incelenmesine yönelik ek deneyler yapılmıştır. Ölçüm sistemi olarak referans iyon odası (elektrometresi dahil), bir puls-yüksekliği analizörü (dedektör, yükselteç ve ADC/MCA dahil) ayrı ayrı kullanılmıştır.

Bu tez beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, tezin dayandığı temel prensipler ve tezin amaç ve kapsamı hakkında kısa özet verilmiştir. İkinci bölümde , tanımlarında yer aldığı kuramsal temeller açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, materyal ve yöntem açıklanmıştır. Dördüncü bölümde ise elde edilen bulgular, grafikler ve çizelgeler şeklinde sunulmuş; ölçüm belirsizlikleriyle birlikte verilmiştir. Son bölümde de sonuçlar tartışılmıştır.

2 KURAMSAL TEMELLER

2.1 Tanımlamalar

2.1.1 Kerma

Kerma, ortamdaki kütlenin belirli hacmindeki yüksüz (uncharged) iyonlaştırıcı parçacıkların, serbest bıraktığı tüm yüklü parçacıklardaki başlangıç kinetik enerjilerinin toplamının, ortamın kütlesine bölümüdür. Birimi J/kg'dir. Özel adı ise Gray (Gy)'dir.

$$K_{\text{ortam}} = \frac{E_{K_{\text{toplam}}}}{m_{\text{ortam}}}$$

2.1.2 Kerma hızı

Kerma hızı, ilgilenilen ortamdaki Kerma değerinin birim zamandaki değişimidir.

$$\text{Kerma hızı} = \frac{K_{\text{ortam}}}{t}$$

Bu tanımda, K_{ortam} ; t süresindeki kermadaki değişimdir. Birimi $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 'dir. Özel adı ise $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$ 'dir.

2.1.3 Birincil (Primer) radyasyon

Pencereden, açıklıktan ya da kaynak koruyucu kılıfının kolime edici düzeneğinden geçen radyasyon.

2.1.4 Saçılan radyasyon

Malzemenin içinden geçerken yönü ve enerjisi değişen radyasyon.

2.1.5 Soğurulan doz, D

Soğurulan doz aşağıdaki oran ile tanımlanır.

$$D = \frac{E_{toplam}}{m_{toplam}}$$

Soğurulan doz (D), m kütle miktarına iyonlaştırıcı radyasyon tarafından aktarılan toplam enerjidir. Soğurulan dozun birimi $J \cdot kg^{-1}$ 'dir. Özel adı ise Gy'dir.

2.1.6 Soğurulan doz hızı

Soğurulan doz hızı aşağıdaki oran ile tanımlanır.

$$\text{Soğurulan doz hızı} = \frac{E_{toplam}}{m_{toplam} \cdot t_{toplam}}$$

Bu eşitlikteki soğurulan doz hızı; t zaman aralığında (t_{toplam}), toplam kütle (m_{toplam}) iyonlaştırıcı radyasyon tarafından aktarılan toplam enerjidir (E_{toplam}). Birimi $J \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$ 'dir. Özel adı ise $Gy \cdot s^{-1}$ 'dir.

2.1.7 Kolimatör

Radyasyon ışını demetinin şeklini ve boyutunu belirleyen donanımdır.

2.1.8 Doku eşdeğeri madde

Yağ, kemik, kas gibi biyolojik dokulara verilen radyasyonun soğurulma ve saçılma özellikleri bakımından benzer özellikler gösteren yapay, organik malzemelerdir.

2.1.9 ICRU küresi

Kütlece birleşimi %76,2 O; %10,1 H; %11,1 C ve %2,6 N elementlerinden oluşan ve yoğunluğu 1 g/cm^3 olan doku eşdeğeri malzemedен yapılan 30 cm çapındaki küredir (Anonymous 2007b).

2.1.10 ICRU dokusu

Kütlece birleşimi %76,2 O; %10,1 H; %11,1 C ve %2,6 N elementlerinden oluşan ve yoğunluğu 1 g/cm^3 olan doku eşdeğeri malzemedir (Anonymous 2007a).

2.1.11 Kişisel doz eşdeğeri, $H_p(d)$

Kişisel doz eşdeğeri, vücut üzerinde belirtilen bir noktanın altında uygun d derinliğine sahip yumuşak dokudaki doz eşdeğeri (Anonymous 1993). Birimi J/kg'dır. (Anonymous 1993). Birimi J/kg'dır. Özel adı ise Sievert'tir (Sv).

Düşük enerjili radyasyonun nüfuz ettiği cildin derinliği olarak 0,07 mm kullanılır. Bu derinlik için kişisel doz eşdeğeri $H_p(0,07)$ ile gösterilir. Genellikle yüksek enerjili girici radyasyon için 10 mm derinliğin kişisel doz eşdeğeri $H_p(10)$ şeklinde gösterilir (Anonymous 1993).

2.1.12 Referans standart kaynak

Referans standart bir kaynak, uygun standartlara uyan doğruluğu kabul edilmiş referans laboratuvarlarda ya da ulusal birincil sınıf bir laboratuvar tarafından birincil standartlar kullanılarak kalibre edilmiş "ikincil standart bir kaynak" olmalıdır (Anonymous 2000).

Referans kaynak, gama foton dozu/doz hızı ölçer cihazların kalibrasyonu için kullanılan kalibrasyon sisteminin (ışınlayıcı kaynak, radyometrik benç, güvenlik kilitleyiciler, yazılım, uzaktan kumandalı sistem, elektrometreler, monitör, filtreler, hizalayıcılar vb.)

temel bileşenidir. Foton radyasyonu için referans kaynak olarak s-¹³⁷Cs (0,662 Mev) ve s-⁶⁰Co (ort. 1,25 MeV) kullanılır (Anonymous 1996).

2.2 Radyasyon Kaynakları

2.2.1 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 yayabilir (Örneğin ⁵⁴Mn (834,85 keV), ¹³⁷Cs (661,66 keV)).

2.2.2 Çok enerjili (Polikromatik) radyasyon kaynakları

Bir radyasyon kaynağında farklı enerjilerde parçacıklar salınıyorsa, bu parçacıkların oluşturduğu enerji spektrumu polikromatik enerji spektrumudur. X-ışın tüpünden yayılan X-ışınları ve radyoaktif izotoplardan bazıları çok enerjili radyasyon yayabilir (Örneğin ¹⁹²Ir (295,9keV (%28,72), 316,5keV (%82,75), 468,1keV (%47,81), 612,46keV (%5,34)) gibi) (<http://www.nucleide.org>, 2015).

2.2.3 Bazı radyoaktif parçacıkların genel özellikleri

Gama-ışını veya gamma ışınması (simge: γ), atom altı parçacıkların etkileşiminden kaynaklanan, belirli bir titreşim sayısına sahip elektromıknatıssal ışınımdır; genelde uzayda gerçekleşen çekirdek tepkimelerinin sonucunda üretilirler.

Çekirdek bir alfa veya bir beta parçacığı çıkarttıktan sonra genellikle kararsızdır. Kalan çekirdeğin enerji fazlalığı bir elektromanyetik radyasyon halinde yayılır. Bu yüzden gama ışınları, beta ışınlarından daha girici (nüfuz edici) ışınlardır.

Taşıdıkları yüksek enerji nedeniyle yaşayan hücelere önemli zarar verirler. Gama ve x ışınlarının, alfa ve beta parçacıklarına göre madde içine nüfuz etme kabiliyetleri çok daha fazla, iyonlaşmaya sebep olma etkileri ise çok daha azdır. İyonize etme gücünün daha düşük olması, bu ışınların kalın cisimlerden kolayca geçmesini sağlar. Birkaç

santimetre kalınlığındaki kurşun tuğlalarla gama ışınının sadece belli bir kısmı durdurulabilir. Madde içerisinden geçerken ise üstel bir fonksiyon şeklinde bir şiddet azalmasına uğrarlar. Yüksüz olduklarından elektrik ve manyetik alanda sapma göstermezler.

2.3 Dozimetre

Dozimetri, radyasyon kaynakları ile yapılan çalışmalarda dozun ölçümü ve değerlendirilmesi için uygun araç/cihaz ve algoritma ile yapılan ölçüm sisteminin tamamına denir. Radyasyonu algılayan bileşene ise dozimetre denir. Dozimetreler pasif (Termoluminesans- TLD, Optik Uyarımlı Lüminesans-OSLD) olabileceği gibi, dışarıdan pil/batarya ile elektrik beslemesi olan bir prob ve eşlenik sinyal işleme sistemine sahip aktif dozimetreler de olabilir. Ölçümler, eşdeğer radyasyon bilgisini veren dozimetre cihazlarıyla yapılmaktadır. Dozimetri sisteminde değerlendirmeler, ulusal mevzuatlardaki izin verilen limit doz değerlerine göre yapılmaktadır.

Dozimetrede, ölçüm değerine eşlik eden belirsizlik, doğruluk (accuracy) ve kesinlik (precision) terimleri sıkça kullanılır. Dozimetrik ölçümlerin kesinliği, benzer ölçüm koşulları altında aynı ölçümlerin tekrar elde edilebileceğini (reproducibility) ifade eder. Bu kesinlik değeri, tekrarlanan ölçümlerden elde edilen verilerden hesaplanabilir. Yüksek kesinlik, ölçüm sonuçlarının dağılımındaki standart sapmasının küçük olmasını gerektirir. Dozimetrik ölçümlerin doğruluğu, ölçülen niceliğin “gerçek değerine”, ölçümlerden elde edilen/beklenen değerine yakın olması olarak tanımlanabilir. Ölçüm sonuçlarının, gerçekte mutlak olarak doğru olması beklenemez ve ölçüm sonucundaki bu uyumsuzluk, bir belirsizlik (uncertainty) değeri ile karakterize edilir.

Belirsizlik, bir niceliğin ölçülen değerlerinin dağılımını tanımlayan bir parametredir. İstatistiksel yöntemlerle hesaplanarak ulaşılan belirsizlik değeri tip-A ve diğer yöntemlerle değerlendirilerek elde edilmiş sistematik belirsizlik değeri tip-B olarak adlandırılır. Bu belirsizliğin bir işareti yoktur ve genellikle simetrik olduğu varsayılır.

Tip A standart belirsizliği aşağıdaki ifadelerle tanımlanabilir. Örneğin doz veya doz hızı, ışınlama (exposure) veya ışınlama hızı (exposure rate) gibi bir dozimetrik nicelik X

ile gösterilirse, bunun ölçümü, N kez tekrarlandığında, o zaman X' in en iyi tahmini değeri tüm bu ölçümlerin aritmetik ortalamasıdır.

Her bir ölçüm sonucu hesaplanan σ_x sapması, \sqrt{N} ile bölünerek $\sigma_{\bar{x}}$ hesaplanır (Knoll 2000). Bu sonuç A tipi belirsizliğin sonucudur ve formülü Eşitlik 2.1'de gösterilmiştir.

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N(N-1)}}$$

Eşitlik 2.1

A tipi belirsizlik u_A olarak tanımlanırsa sonuç, $u_A = \sigma_{\bar{x}}$ şeklinde gösterilir.

Tip B standart belirsizliği (u_B) ise, ölçümlerin tekrar edilmesiyle tahmin edilemezler. Ölçüme eşlik edebilecek istatistiksel olmayan bu belirsizlikler deneyim ve bilimsel temeli olan öngörülerle yapılan akıllıca tahminlerle saptanabilir. Bunlar; ölçüm süreçlerini etkileyen tüm nicelikler, literatürden alınan fiziksel veriler veya düzeltme faktörlerinin uygulanmasında ortaya çıkan sistematik hatalardır.

Tip-A ve Tip-B belirsizlikleri ise, $U_C = \sqrt{(U_A^2 + U_B^2)}$ şeklinde birleştirilir ve gerektiğinde $k= 1,648; 1,96; 2,0\dots$ gibi bir güven katsayısıyla çarpılarak $U=k.U_C$, ilgilenilen nicelik için genişletilmiş belirsizlik olarak da ifade edilir. Örneğin, güven faktörü, $k= 1,96$ veya 2 katsayısıyla çarpılarak ifade edilirse, nihai rapor edilen değer %95 güven seviyesindedir. Sonuç olarak, toplam belirsizlik ölçülen bir niceliğin doğruluğunu (accuracy) gösterir. Herhangi bir P noktasında ölçülen nicelik Q ise, sıkça %95 güven seviyesinde ($k=2$), toplam belirsizlik U_C , ölçmenin doğruluk derecesidir. Yani, ölçülen nicelik $Q \pm U_C$ şeklinde ifade edilir.

2.4 Dedektörlerle İlgili Özet Bilgi

Radyasyonun varlığını anlamak için kullanılan cihazlardır. Dedektörler, radyasyonun sebep olduğu iyonlaştırma ve uyarma mekanizmalarının elektrik sinyallerine çevrilmesiyle çalışırlar. Bunlar; gaz dolu dedektörler, sintilasyon dedektörleri, yarı iletken dedektörleri ve nötron dedektörleridir.

Gaz dolu dedektörlerin çalışması, iyonlaştırıcı radyasyonun gaz ortamı içerisinde oluşturduğu iyonlaşmaların ölçülmesiyle olur. Kendi aralarında üçe ayrılır. Bunlar; iyon odası, orantılı sayaç ve Geiger-Müller dedektörüdür.

İyon odası sistemi içerisinde; gaz bulunan kapalı bir ortam ve elektrik alanın uygulanabileceği anot ve katot adlı iki elektrot bulunmaktadır. İyon odasına gelen radyasyon gaz atomları ile etkileşir. Bu etkileşme sonucunda radyasyon enerjisini kaybederek, gaz atomunda uyarılmaları ve iyonizasyona neden olur. İyonizasyon sonucunda oluşan serbest elektronlar ve pozitif iyonlar, elektrotlar arasına uygulanan gerilim sayesinde anot ve katota ulaşırlar. Bu sayede oluşan pulslar ile radyasyon ölçümü yapılır.

Başlangıçtaki elektrik alanın düşük değerlerinde, iyon çiftlerinin tamamı elektrotlara ulaşacak yeterli enerjiye sahip olamadıklarından bir kısmı tekrar birleşir. Bu durumda toplanan yük miktarı, başlangıçta oluşan iyon çifti sayısından daha azdır. Voltaj artırılmaya devam edildikçe elektrik alan artacak ve artık yeterli enerjilere sahip başlangıçta oluşan tüm primer iyon çiftleri elektrotlarda toplanmış olacaktır. Voltajın artırılması artık iyon akımını etkilemez; çünkü meydana gelen tüm iyon çiftleri elektrotlarda toplanmıştır.

İyon odaları, radyasyon dozunun belirlenmesi için özellikle radyoterapide teşhis radyolojisinde (diagnostic radiology) kullanılmaktadır. Referans ışınlama koşullarındaki doz belirleme işlemine “demet kalibrasyonu” adı verilmektedir. İyon odaları spesifik gereksinimlere uygun olarak çeşitli geometrilere ve büyüklüklerde üretilmektedir.

Açık havada iyon odaları ile yapılan ölçümlerde, iyon odası aktif hacmindeki hava kütesinin değişmesine neden olacak sıcaklık ve basınç için düzeltme faktörleri uygulanması gerekir. İyon odalarının en yaygın dört çeşidi şunlardır:

- Silindirik (thimble tipi) iyon odaları
- Paralel plakalı (paralel düzlemlili) iyon odaları
- Brakiterapi iyon odaları
- Ekstrapolasyon iyon odaları

İyon odasıyla elde edilen dozun okunmasına yardımcı olan eleman elektrometredir. 10^{-9} nA ya da daha düşük mertebedeki küçük akımları ölçen elektrometre iyon odasına bağlanarak; iyon odasında radyasyon etkileşimi nedeniyle oluşan akımın ölçülmesini veya belirli bir zaman aralığında toplanan elektriksel yükün ölçülmesini (entegre edici mod) sağlar (Yücel 2016).

Orantılı sayaçlar iyon odalarına benzerler. Aralarındaki en önemli fark, orantılı sayaçlarda iyon odalarına uygulanan gerilimden daha yüksek gerilim uygulanır. Orantılı sayaçlar, dedektöre gelen radyasyonun enerjisi ile ilgili bilgiyi bize verir. Orantılı sayaçlarda, radyasyonun dedektörde oluşturduğu ilk iyonlaşma ve sonrasında elde edilen elektrik akımı orantılıdır. Bu yüzden adını orantılı sayaç olarak almıştır.

Geiger-Müller dedektörleri, gaz dolu dedektörler içerisinde en yüksek gerilimle çalışan iyon odalarıdır. Uygulanan yüksek gerilimden dolayı Geiger-Müller dedektörleri radyasyonun enerjisinden bağımsız olarak bir sinyal üretir. Radyoaktif maddelerin bulunduğu yerlerde, radyasyon kaçığının tespit edilmesi amacıyla kullanılır.

Yarı iletken dedektörlerde, iyonlaştırıcı radyasyonun etkisi ile dedektörün yapısındaki kristal geometrisinde boşluklar oluşur. Bu durum, gaz dolu dedektörlerde iyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle pozitif yüklü gaz moleküllerinin oluşmasına benzer. Bu dedektörde, uygulanan gerilim yardımıyla elektronlar ve boşluklar (hole) hareket ederek, dedektörün anot ve katot uçlarına ulaşırlar. Böylece elektronların hareketi ile bir elektrik akımı

oluşur ve oluşan bu akımın hassas aygıtlar ile saptanmasıyla radyasyon bilgisine ulaşılır.

Nötronlar elektriksel olarak nötr olduklarından maddenin elektronlarıyla etkileşmeye girmezler ve genellikle yön değiştirmeden atomların içinden geçerler. Bu anlamda nötronlar yüksek giricilik özelliği gösterirler. Enerji kaybetmeleri için atomun çekirdeğiyle etkileşmesi gerekir.

Etkileştikleri ortamda direk iyonizasyona neden olmazlar, genelde ikincil iyonize parçacıklar açığa çıkarırlar. Açığa çıkan parçacıkların uygun ölçüm cihazlarıyla dedekte edilebilmesi mümkündür.

Uygun nötron dedektörü tasarlarken hızlı nötronların dedekte edilebilmesi için nötronları yavaşlatıcı malzemeler kullanılmalıdır. Ayrıca dedektör malzemesinin reaksiyonunda etki kesri yüksek olmalıdır ve dedektörün aktif hacmi, nötronun dedektör malzemesiyle etkileşmesi sonucunda meydana gelen ağır yüklü parçacıkları durduracak kadar büyük olmalıdır. BF_3 orantılı sayaçları, gaz çarpışmalı orantılı sayaçları, helyum orantılı sayaçları gibi nötron dedektör çeşitleri vardır.

Sintilasyon dedektörleri, radyasyonun madde ile etkileşmesi sonucu açığa çıkan görünür ışığın radyasyon algılamasında kullanıldığı dedektör sistemleridir. Sintilasyon dedektörleri, diğer radyasyon dedektörlerinden farklı olarak bir kristal, fotokatot ve dynotlar içerir. Bu tezde sintilasyon dedektörü kullanıldığından aşağıda sintilatörlerle ilgili konu ayrıntılarıyla anlatılmıştır.

2.5 Sintilatörlerin Çeşitleri

2.5.1 İnorganik sintilatörler

İnorganik kristaller genellikle alkali metallerin kristalleridir. $Nal(Tl)$, $CsI(Tl)$, $CaI(Na)$, $LiI(Eu)$, $CaF_2(Eu)$ bazı inorganik kristallere örnektir. Parantez içinde yazılı elementler safsızlık (aktivatör) olarak kullanılmıştır. Aktivatör miktarı çok az olsa bile, kristalin

lüminesansından büyük ölçekte aktivatörler sorumludur. Örnek olarak NaI(Tl) sintilatöründe safsızlık olarak kullanılan talyumun oranı $\sim 10^{-3}$ /mol'dür.

2.5.2 Gaz sintilatörler

Gaz sintilatörler soygazların karışımıdır. Gaz sintilatörleri, ağır yüklü parçacıkların (örnek: alfa, fisyon parçaları, vb.) dedeksiyonunda kullanılır.

2.5.3 Organik sintilatörler

Genelde organik sintilatör olarak aromatik bileşikler kullanılır. Bu bileşiklere tipik örnekler toluene, anthracene'dir. Gösterimleri Şekil 2.1 ile gösterildiği gibidir.



Şekil 2.1 Toluene ve anthracene aromatik bileşiklerinin gösterimi

2.5.3.1 Organik kristal sintilatörler

Anthracene ve Trans-stilbene en çok kullanılan iki sintilatördür. Anthracene, $1,25 \times 10^3$ kg/m³ yoğunluğa sahiptir ve organik sintilatörler arasında ışığa dönüşme verimi en yüksek sintilatördür.

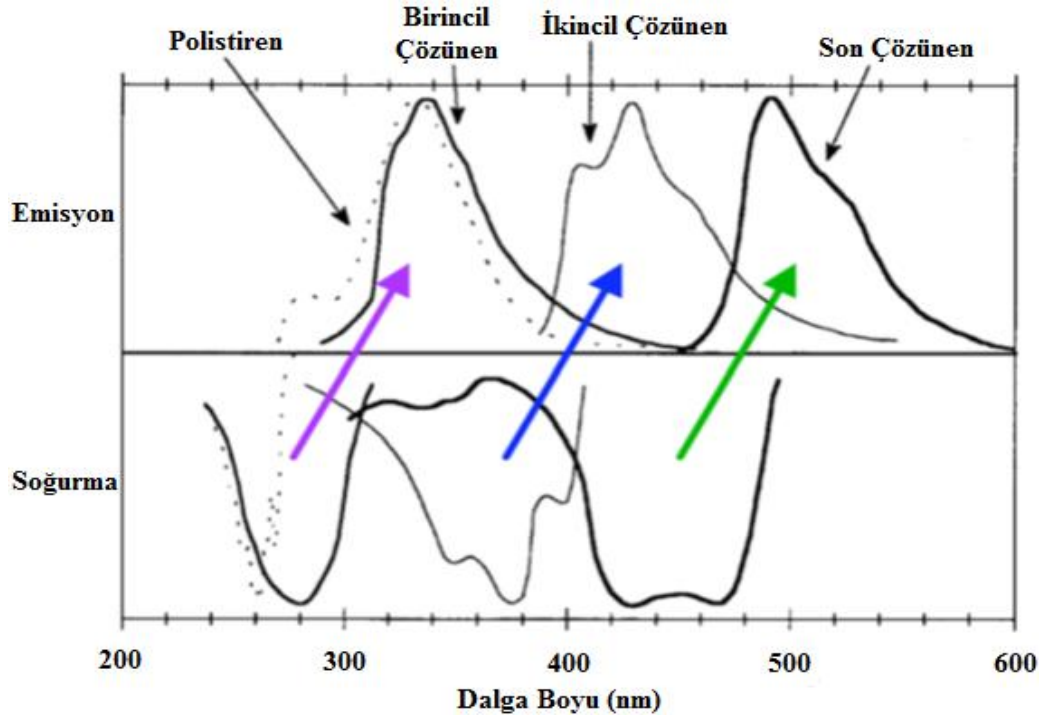
2.5.3.2 Organik sıvı sintilatörler

Sintilatör içinde yüksek konsantrasyona sahip malzemeye çözücü, geri kalan malzemeye ise çözünen (aktivatör) denir. Genelde bir veya daha fazla çözünen, çözücü ile karıştırılır. Radyasyon enerjisinin büyük çoğunluğu çözücüde soğurulur ancak lüminesans çözünende gerçekleşir. Eklenen ikinci bir çözünen, yayınlanan ışığın

dalgaboyunda kaymaya neden olur. Çözücü olarak etkin kullanılan malzemeler; xylene, toluene, hexamethylbenzene'dir. Çözücü olarak ise p-terphenyl, PBD, POPOP malzemeleri tercih edilir. Geniş hacimli (kilolitre) dedektörlerin kullanımının gerektiği durumlarda çok kullanışlıdır. Düşük aktiviteli beta yayınlı için (özellikle ^3H ve ^{14}C) kozmik ışınların dedeksiyonunda, MeV enerjili nötron enerji ölçümlerinde genelde NE 213 sıvı sintilatörü kullanılır.

2.5.3.3 Plastik sintilatörler

Plastik sintilatörler sertleştirilmiş bir polimer içerisinde çözülmüş organik bileşikler içeren katı malzemeler olarak tanımlanabilir. Plastik sintilatörlerde çözücü ile karıştırılan bir veya daha fazla çözünen ile Şekil 2.2'de görüldüğü gibi oluşan sintilasyonun dalga boyu değiştirilmiştir olur. Işık sintilasyonu için en yaygın kullanılan plastikler ve bu plastiklerde kullanılan çözünen maddeler Çizelge 2.1'de gösterildiği gibidir. Plastik sintilatörlerde, ışık verimi, radyasyon direnci, bozunma süresi gibi bir takım özellikler kontrol edilebilir.



Şekil 2.2 Eklenen çözünenler ile sintilasyonun dalga boyundaki kayma (Anonymous 1992)

Plastik sintilatör dedektörler nükleer fizik alanında uzun yıllardır kullanılmaktadır. Plastik sintilatörlerin hızlı tepki vermeleri, kolay üretilmeleri, şekillendirilebilmeleri ve çok fazla çeşidinin olması en önemli avantajlarından. Maliyetlerinin yüksek oluşu ise dezavantajlarından sayılır. Plastik sintilatörler üzerine yapılan çalışmalar genellikle sintilatörün temel özelliklerinin artırılmasına yönelik yapılan çalışmalardır.

Çizelge 2.1 Plastik sintilatörde çözücüler ve çözünen maddeler

	Çözücü	Birincil Çözünen	İkincil Çözünen
Plastik Sintilatör	Poliviniltoluen	p-terphenyl	POPOP
	Polivinilbenzen	DPO	TBP
	Polistiren	PBD	BBO
			DPS

Plastik sintilatörlerin üretimine 1950'li yıllarda başlanmıştır. Plastik sintilatörlerin molekül yapısı aromatik bileşik olan benzen (C_6H_6) halkarından oluşmaktadır. Maliyetinin düşük olması sebebiyle 1975 yılında akrilik bazlı sintilatör Plexipop üretilmiştir. Fakat bu sintilatörün akriliğinin aromatik yapıda olmaması nedeniyle Plexipop'un sintilasyon ışık verimi, aromatik yapılu plastik sintilatörlerin veriminin dörtte biri kadar sonuç vermiştir. Son onbeş yıldır düşük maliyetli yüksek kalitede plastik sintilatör malzemesi hazırlanmasında önemli çalışmalar yapılmaktadır.

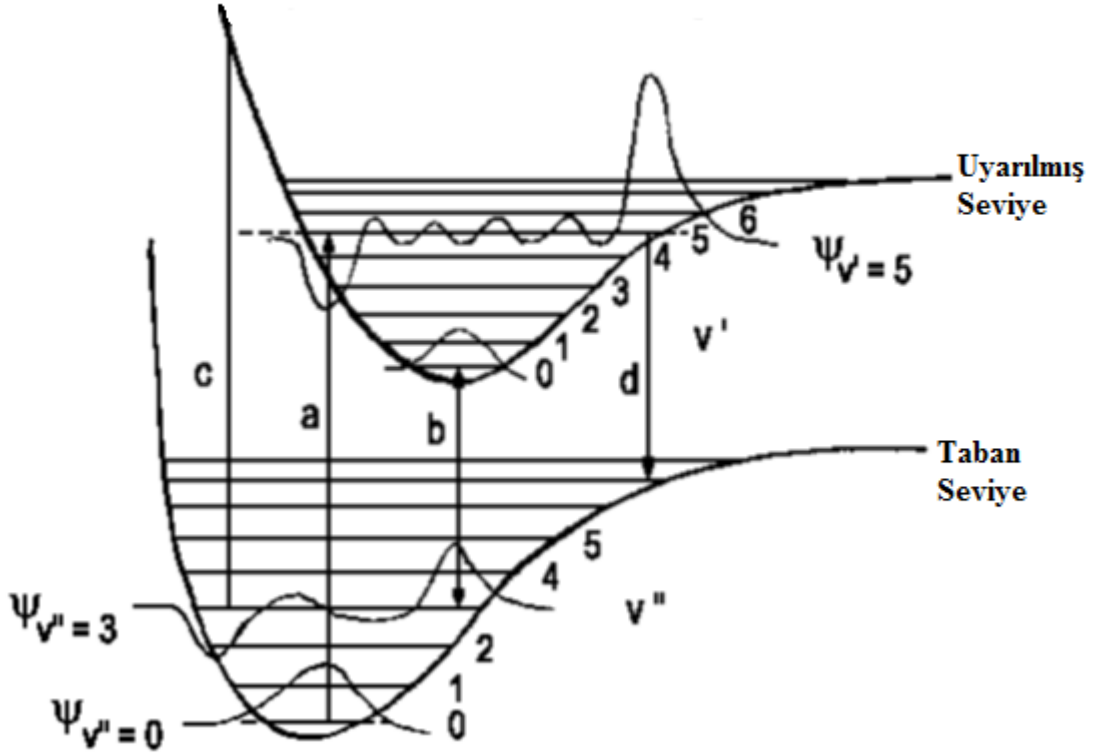
Günümüzde BC-400, BC-404, BC-408, BC-412, BC-416, BC-454 gibi plastik sintilatör dedektörleri vardır. Bu gibi plastik sintilatör dedektörleri, yurt içinde ve sınır kapılarında radyoaktif malzemelerin tespiti amacıyla da kullanılabilir.

2.6 Plastik Sintilatörlerin Çalışma Prensibi

Yüklü bir parçacık bir maddenin içinden geçtiğinde, bu maddenin moleküllerini uyarılmış olur. Moleküller bu enerjinin küçük bir kesrini (~%3) optik fotonlar olarak yayarlar. Sintilasyon (ışıldama) olayı, fotoelektrik olay, Compton Saçılması veya çift oluşumu olarak adlandırılan bu üç farklı olayın herhangi biri tarafından gerçekleştirilir

ve bu ışıltama özellikle aromatik halka içeren poliviniltoluen ve naftalin gibi organik yapılarda belirgindir.

Molekül enerji soğurduğunda elektronlar daha yukarı seviyelere uyarılabilirler. Şekil 2.3'te gösterilen enerji seviye diyagramında bir moleküle ait potansiyel enerjinin atomlar arası mesafe ile nasıl değiştiği gösterilmektedir. İyonize radyasyon organik sintilatöre geldiğinde enerjisini aktararak onu uyarır. Yani Şekil 2.3'te gösterildiği gibi elektron, taban seviyesindeki sıfırıncı titreşim seviyesinden uyarılmış seviyedeki elektronik düzeye geçiş yapar. Enerjisinin bir kısmını örgü titreşimleriyle (ısı enerjisiyle) salarak uyarılmış düzeyin alt titreşim seviyesine geçişini gerçekleştirir. Burada hala uyarılmış seviyede olduğundan, taban seviyeye geçişini yaparak foton salınımını gerçekleştirmiş olur.

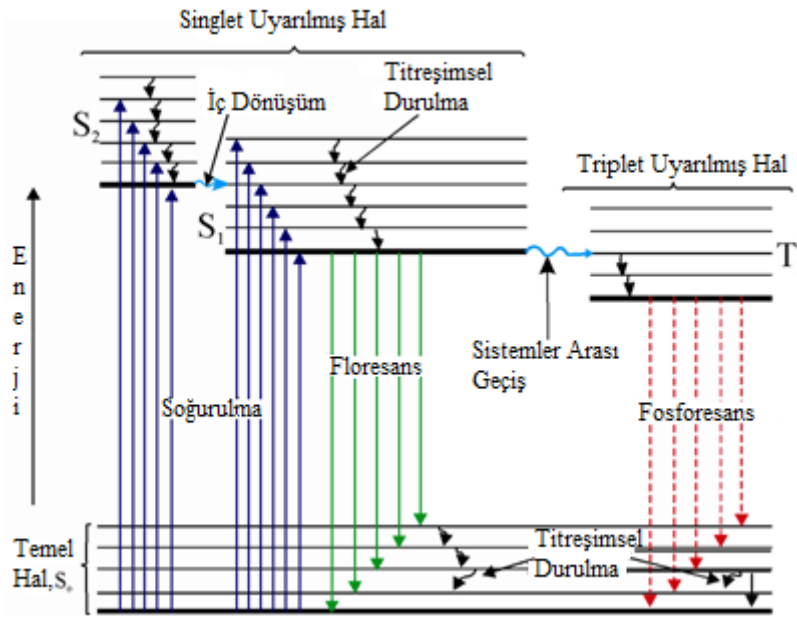


Şekil 2.3 Bir moleküle ait enerji seviye diyagramı (<http://dedocz.com>, 2016)

Elektronların kovalent bağ yapısı sigma (σ) ve pi (π) bağı şeklindedir. Organik kristallerde de bazı elektronlar kuvvetli bağ yaparken bazıları çok daha gevşektir.

Kuvvetli bağ yapanlar sigma (σ) bağıdır, zayıf bağ yapanlar ise pi (π) bağıdır. Sintilasyon işlemini gerçekleştiren, pi (π) bağına bağlı elektrondur.

Şekil 2.4'te görüldüğü gibi organik kristal, gelen radyasyon tarafından uyarıldığında elektron temel haldeki elektronik düzeyden uyarılmış düzeyin titreşim seviyelerinden birine geçiş yapar. Bu enerji seviyelerinde elektron uzun süre bulunamayacağından, temel enerji seviyesine ışımali veya ışımsız geçişler yaparak geri döner.



Şekil 2.4 Jablonski enerji diyagramı (<http://www.expertsmind.com>, 2016)

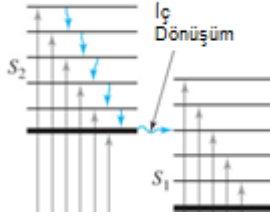
2.6.1 Işımsız geçişler

2.6.1.1 Titreşimsel durulma

Uyarılmış moleküllerin diğer moleküllerle çarpışması sonucu enerjisini kaybederek daha düşük elektronik enerji seviyelerine geçmesidir.

2.6.1.2 İç dönüşüm

İki singlet elektronik halin titreşim enerji seviyelerinin çakışması sonucu elektronun daha düşük elektronik enerji düzeyine geçmesidir.



Şekil 2.5 İç dönüşümün gösterimi

2.6.1.3 Dış dönüşüm

Uyarılmış haldeki moleküllerin diğer moleküllerle çarpışması sonucu molekülün foton emisyonu yapmadan temel hale dönmesidir.

2.6.1.4 Sistemler arası geçiş

Singlet haldeki uyarılmış elektronun triplet hale geçerken elektronun spin değiştirmesidir. Şekil 2.6'da gösterildiği gibi triplet ve singlet hallerin titreşim seviyeleri çakışması durumunda meydana gelir. Ağır atoma sahip moleküllerde gözlenir (Örneğin I veya Br).

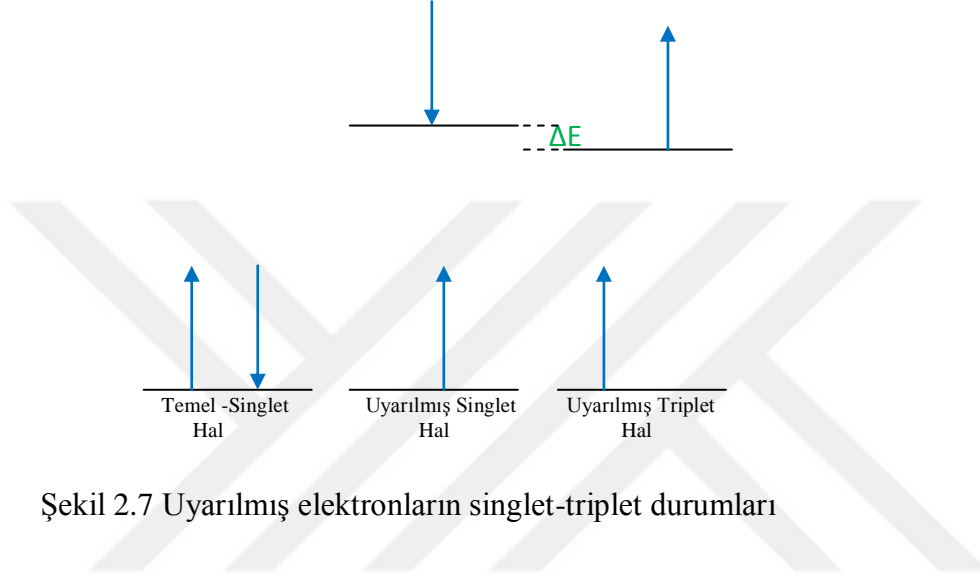


Şekil 2.6 Sistemler arası geçişin gösterimi

2.6.2 Işımalı geçişler

2.6.2.1 Floresans

Pauli dışarlama prensibine göre bir orbitalde ikiden fazla elektron bulunamaz ve bu elektroların spinleri zıt yönlü ($\downarrow\uparrow$) olmalıdır.



Şekil 2.7 Uyarılmış elektronların singlet-triplet durumları

Temel halde bulunan elektronun, foton tarafından soğurulması sonucu Şekil 2.7’de görülen uyarılmış singlet durumundan tekrar temel hale geçiş esnasındaki meydana gelen ışımaya denir. Floresansın uyarılmış halinin ömrü $\sim 10^{-7}-10^{-9}$ saniye arasındadır.

2.6.2.2 Fosforesans

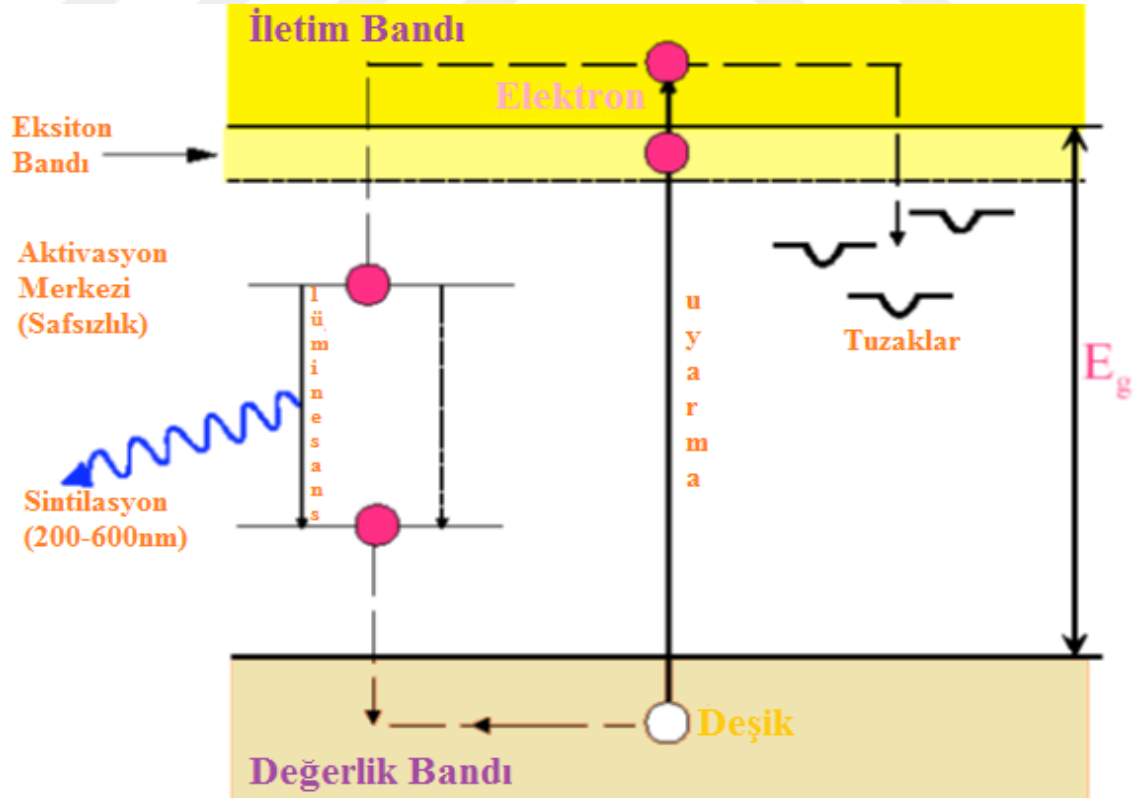
Uyarılmış elektronun, Şekil 2.7’de görülen uyarılmış triplet seviyesinden singlet haldeki taban seviyeye dönüş esnasındaki ışımaya denir. Fosforesansın uyarılmış halinin ömrü $\sim 10^{-4}-10^1$ saniye arasındadır.

2.6.3 İnorganik sintilatörde sintilasyon oluşumu

Değerlik bandı ve iletkenlik bandı arasındaki yasak enerji bandının büyüklüğüne göre yalıtkan, iletken ve yarı iletken madde tanımlaması yapılır. Saf bir kristalde elektronların bulunamayacağı bu bandın genişliği yaklaşık olarak 1,2 eV ise yarı iletken

madde, yaklaşık olarak 0 eV ise iletken madde ve yine yaklaşık olarak 10 eV genişliğinde ise yalıtkan maddedir. Sintilasyonu oluşturan sintilatörler yalıtkan maddedir.

Kristallerde izinli enerji düzeyleri bantlar şeklindedir. Kristal taban enerji durumunda iken değerlik bandı tamamen doludur, iletim bandı ise tamamen boştur. Gelen radyasyonun soğurulması ile bir elektron değerlik bandından iletim bandına geçecek yeterli enerjiyi kazanabilir. Bu esnada değerlik bandında deşik (hole) oluşur. Uyarılmış durumdaki bu elektron değerlik bandına tekrar geçerken salacağı foton görünür bölgede olamayacağından, bu durum sintilasyon oluşumu için uygun değildir. Bu yüzden saf kristallere, bir miktar aktivatör denilen safsızlıklar ilave edilerek yasak enerji bandı içersinde yeni bir enerji seviyeleri oluşturulur. Yeni oluşturulan bu seviyeler yasak bandın içinde Şekil 2.8’de gösterildiği gibidir. Uyarılmış elektron değerlik bandından iletim bandına geçerken bu yeni enerji seviyeleri tarafından tuzaklanır ve elektron bu tuzaklardan değerlik bandına geçerken görünür ışığın oluşması sağlanır. Böylelikle sintilasyon işlemi gerçekleşmiş olur.



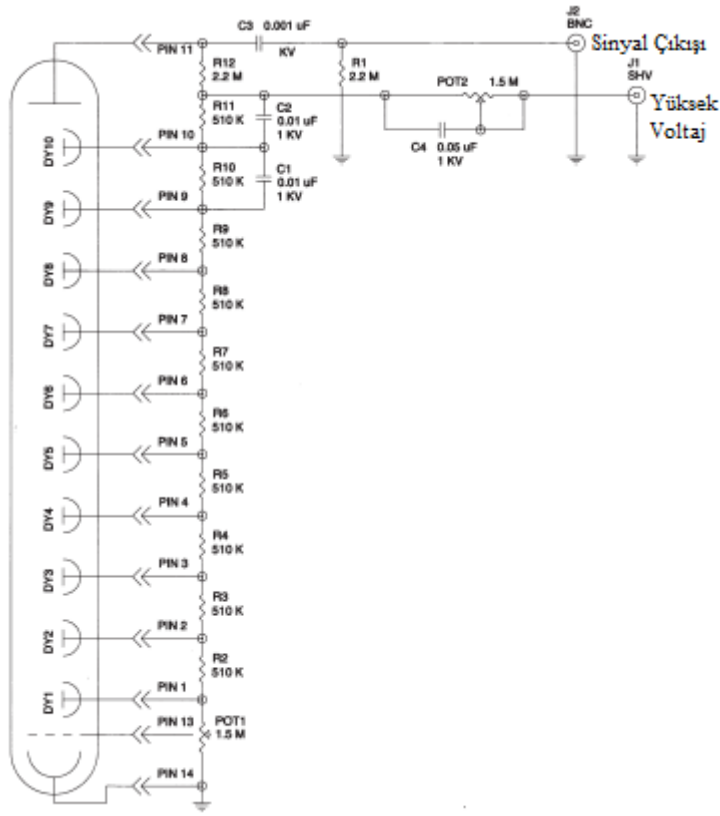
Şekil 2.8 Aktive edilmiş bir sintilatörün enerji bant yapısı (<http://dedocz.com>, 2016)

2.6.4 Sintilasyon oluşumu sonrasında kullanılan sistemin komponentleri

2.6.4.1 Fotoçoğaltıcı tüp

Tipik bir fotoçoğaltıcı, havası boşaltılmış bir cam tüp ile bunun içine yerleştirilmiş, genellikle sezyum–antimon (Cs-Sb) alaşımından oluşan fotokatot malzemeyle kaplanmış metal alaşımından oluşur. Kristalden çıkan sintilasyon fotonu fotokatoda çarparak bir fotoelektron oluşumunu sağlar. Fotokatottan çıkan fotoelektron sayısı elektronik devrede kullanılamayacak kadar düşük olduğundan bu fotoelektronların dynotlar vasıtasıyla çoğaltılması gerekmektedir. Fotoçoğaltıcı tüp içine bir dizi dynot yerleştirildiğinde, birinci dynottan çıkan elektronlar, daha yüksek bir artı gerilimde tutulan bundan sonraki dynota doğru çekilir. Bu süreç, elektronların tüpteki bir dizi dynotu dolaşarak sürmesiyle devam eder. Her dynot, kendinden öncekine göre daha yüksek bir artı gerilimde bulunmalıdır.

Bir dynota çarpan her elektron birinci dynottan 5 elektron çıkmasına neden oluyorsa; ikinci dynottan 5x5 elektron, üçüncü dynottan ise, 5x5x5 elektron oluşacaktır. Bu işlem son dynota kadar böyle devam eder. Son dynottan çıkan fotoelektronlar ise PMT'nin anoduna ulaşır. Tüpte 10 dynot bulunuyorsa, bunlara bağlı bir dış devreden 5^{11} elektronun neden olduğu bir akım geçecektir. Katota çarpan fotonların sayısı artırıldıkça, yükseltme (amplifikasyon) oranı da kuşkusuz artacaktır.

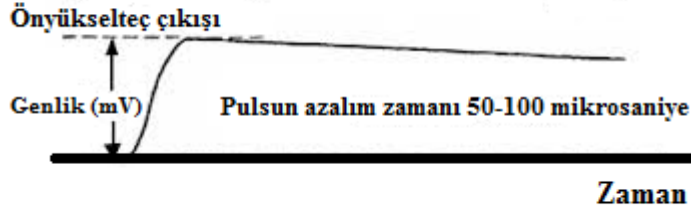


Şekil 2.9 BC-408 PS dedektörünün fotoçoğaltıcı tüpündeki P-14 gerilim bölücü devre şeması (www.crystals.saint-gobain.com 2003a)

2.6.4.2 Önyükselteçler

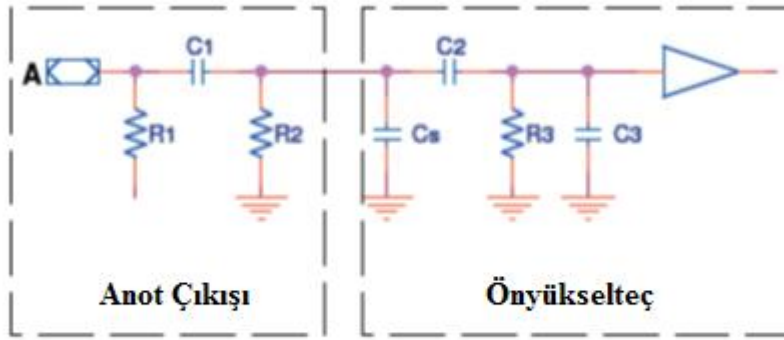
Fotoçoğaltıcı tüpün anodundan çıkan çıkış sinyali, radyasyon tarafından üretilen serbest Q yükü ile orantılıdır. Birçok dedektör için bu Q yükü miktarı oldukça küçüktür ve ara bir yükseltme işlemi yapılması gerekir. Dedektör ve puls işlem elektroniği arasındaki ilk eleman olan önyükselteç ile ilk ara yükseltme gerçekleştirilir.

Önyükselteçler puls şekillendirmesi yapmazlar ve çıkışları lineer kuyruklu bir pulstur ve doğuş zamanı dedektördeki yük toplama zamanı ile uygun olacak şekilde mümkün olduğunca kısa tutulur. Pulsun azalım zamanı ise hayli uzundur (50-100 μ s).



Şekil 2.10 Önyükselteç çıkışındaki puls şekli

Giriş devresi (giriş kapasitör ve direncinin paralel kombinasyonu) zaman sabitinin, yük toplama zamanından büyük olması durumunda giriş pulsunun genliği, $V_{max} = Q/C$ ile gösterilir. Bir çok dedektör için C sabittir ve bu durumda ön yükseltecin çıkış pulsu Q yükü ile orantılıdır. Ancak C'nin değişmesi durumunda istenilen bu orantı özelliği kaybolacaktır (Knoll 2000).



Şekil 2.11 Önyükselteç devre şeması (www.crystals.saint-gobain.com 2003b)

2.6.4.3 Yükselteçler

Önyükselteçten gelen darbenin, darbe yüksekliği analizi yapılabilecek kadar yükseltilmesini ve en iyi enerji ayırımını sağlayacak şekillendirmeyi yapan entegre

ünitedir. Önyükselteçten çıkan kuyruklu pulslar, puls yüksekliğinin ölçülmesi için uygun değildir. Bu kuyruklu pulslar yükselteç tarafından büyütülerek daha kısa doğma zamanlı ve daha da hızlı azalım zamanı olan pulslara dönüştürülürler.

2.6.4.4 Analog-sayısal dönüştürücü (ADC)

Yükselteçten gelen puls analog bir sinyaldir. Bu devre her değeri alabilen analog sinyali, sadece 0 veya 1 ile ifade edilebilen dijital sinyale dönüşümü sağlayabilen entegre devredir. Kısaca, yükselteçten gelen analog elektrik sinyallerini sayısal sinyallere dönüştüren devre elemanıdır.

Analog sinyallerin dijitale dönüştürülmesi; örnekleme, basamaklama ve kodlama olmak üzere üç aşamada yapılır. Analog sinyaller zaman ve genlik olarak sürekli sinyallerdir ve bunları dijitalleştirmek için önce belli aralıklarda örnekler alınması gerekir. Örneklerin genlikleri herhangi bir değerde olabilir. Fakat dijitale çevrilme işleminde kullanılacak seviye sayısı sınırlı sayıda olmalıdır. Bu sayı bit sayısı tarafından belirlenir. Örnek olarak 8-bit'lik bir kodlama yapılacaksa $2^8 = 256$ basamak, 4-bit'lik bir kodlama yapılacaksa sadece $2^4=16$ basamak kullanılabilir. Basamak sayısının artırılması dönüşüm kalitesini belirler. Daha iyi kalite için daha çok bit ve daha çok basamak kullanılması gerekir. Örnekleme yolu ile çevirmede karşılaşılan bazı sorunlar vardır. Bu da belirli bir analog değer aralığına bir dijital değer karşılık gelmesidir. Yani 1.6 volt için 111 dijital çıkışı veren bir çevirici 1.8 volt için de aynı çıkışı verebilir.

2.6.4.5 Çok kanallı analizör (MCA)

Çok kanallı analizörler genellikle darbe yüksekliği yapan cihazlardır. Çok kanallı analizörde analog-dijital (ADC) devresinden çıkan sinyalleri sınıflandıran dönüştürücüdür. Dijital hale dönüştürülen her darbe, genliği ile orantılı olarak bir hafıza kanalına yerleştirilir. Her bir kanal belirli enerjiye karşılık gelir ve böylece sayım süresince gelen darbelerin birikmesiyle pikler oluşmuş olur. Sistemin enerji ve verim kalibrasyonu, aktiviteleri ve yayınladıkları gama enerjileri belirli standart kaynaklar ile yapılır. Bu kaynaklar ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{54}Mn , vb kaynaklardır.

2.6.5 Plastik sintilatörün floresans ışık verme tepkisi

Sintilatörde biriken dozla sintilasyon ışığı arasındaki oran, gelen parçacığın enerjisi ne olursa olsun dozimetri uygulamaları alanı için oldukça önemli bir özelliktir. Organik sintilatör tepkisi 125 keV üzerinde lineer olduğu bilinmektedir ama plastik sintilatörler için mevcut bir ölçüm yoktur.

Yüklü parçacığın kaybettiği kinetik enerjinin bir kısmı floresans enerjiye dönüştürülür. Sintilatörün ışıldaama verimliliği bu kısma karşılık gelir. Ampirik Birk'ün formülü birim yol uzunluğu başına ortaya çıkan floresans enerjisini (dL/dx), yüklü parçacıklar için belli bir enerji kaybını (dE/dx) fonksiyonu olarak tanımlar.

$$\frac{dL}{dx} = \frac{A \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx}} \quad \text{Eşitlik 2.2}$$

Burada A sintilasyon verimini, kB ışık sönmelenme (quenching) parametresini verir.

$$L(E) = \int_0^E \frac{A}{1 + kB \frac{dE}{dx}} dE \quad \text{Eşitlik 2.3}$$

Elektron için toplam ışık çıkışı Eşitlik 2.3'te gösterildiği gibi verilmektedir. E gelen elektronun enerjisini ifade etmektedir.

Fotonları göz önüne aldığımızda, doz; ikincil elektronlar ve özellikle 10 keV'in üzerindeki Compton Saçılmasının geri tepme elektronları tarafından depo edilir. Geri tepme elektronları tarafından üretilen çıkan ortalama ışığın dışında; gelen fotonlar tarafından sintilatörün elektronlarına transfer edilen enerjinin de hesaplanması gerekir. 662 keV'de plastik sintilatörde fotoelektrik soğurumundaki kesit Compton

saçılmasındakinden 2×10^4 kere daha küçüktür. Bu yüzden fotoelektrik soğurma, hesaplamalarda göz ardı edilmiştir.

Saçılmış gama ışınlarının açısal dağılımı Klein-Nishina formülü ile öngörülmekte ve diferansiyel saçılma kesiti için Eşitlik 2.4'te gösterildiği gibi yeniden formüle edilebilir.

$$\frac{d_e \sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \beta^2 \left(\frac{1}{\beta} + \beta - \sin^2 \theta \right) \quad (\text{cm}^2/(\text{sr/e})) \quad \text{Eşitlik 2.4}$$

Burada r_0 elektronun yarıçapı ($r_0 = 2,817938$ fm), θ saçılma açısı ve $\beta = \frac{h\nu'}{h\nu}$ 'dür. $h\nu$ ve $h\nu'$ gelen ve saçılan fotonların enerjisidir.

Böylece, fotonlar tarafından sintilatörün elektronlarına transfer edilen ortalama enerji, saçılımın yayılmasıyla oluşan kinetik enerjinin çoğalması θ ve φ 'nin entegrasyonu üzerinden Eşitlik 2.5'teki gibi verilir.

$$\bar{T}(h\nu) = \frac{2\pi \int_0^\pi \frac{d_e \sigma}{d\Omega} T \sin \theta d\theta}{2\pi \int_0^\pi \frac{d_e \sigma}{d\Omega} \sin \theta d\theta} \quad \text{Eşitlik 2.5}$$

$$\bar{L}(h\nu) = \frac{2\pi \int_0^\pi \frac{d_e \sigma}{d\Omega} L(T) \sin \theta d\theta}{e^\sigma} \quad \text{Eşitlik 2.6}$$

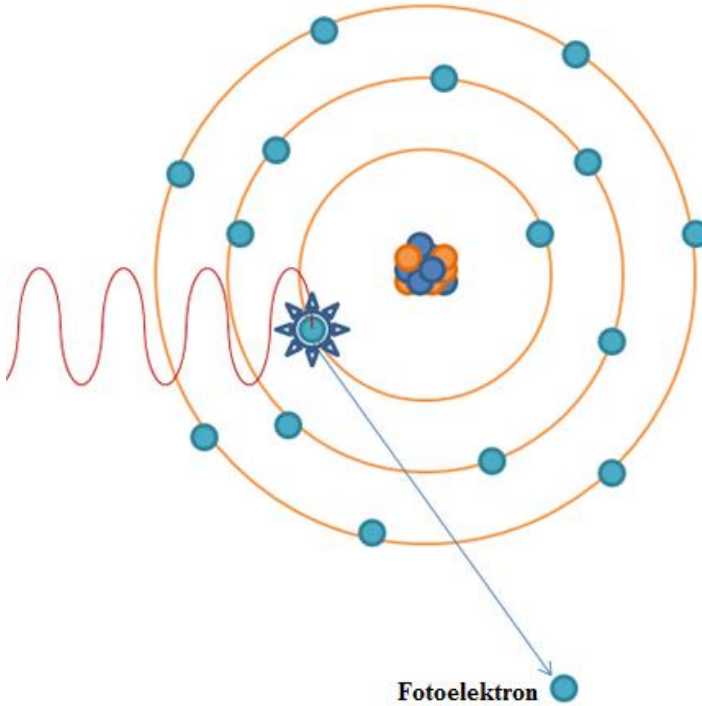
Benzer şekilde, bir foton tarafından üretilen ortalama ışığın çıkışı; Compton elektronları ışık çıkışı ve bu elektronların kinetik enerji dağılımının kombinasyonu ile Eşitlik 2.6'da gösterildiği gibi tahmin edilir (Frelin 2008).

Plastik sintilatör malzemesinin içinde yüklü bir parçacık durdurulduğunda, enerji kaybı ifadesi $dE(x)/dx$ 'tir. α , β , d , t gibi yüklü parçacıklar için spesifik enerji kaybı (veya enerji kayıp hızı) dE/dx , Bethe formülü ile ifade edilir.

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} x N x Z \left[\ln \frac{2m_0 v^2}{I} - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \quad \text{Eşitlik 2.7}$$

Eşitlik 2.7’de gösterilen denklemde, v : parçacığın hızı, z : sintilatör ile etkileşen parçacığın yükü, N : sintilatöre çarpan yüklü parçacığın sayısı ve Z : soğurucu ortam (sintilatörün) atom numarasıdır. Elektronun durgun kütlesi m_0 ve elektronun elektriksel yükü e ’dir. I ise soğurucu ortamın (sintilatörün) ortalama iyonlaşma ve uyarma (ionization and excitation) enerjisini verir ve genelde her element için deneysel olarak belirlenir (Knoll 2000).

X-ışını, gama ışını, Bremsstrahlung (frenleme radyasyonu) vb. elektromanyetik karakteristklere sahip bir fotonun sintilatörle etkileşimi sonucu fotoelektrik olay, Compton Saçılması veya çift oluşumu gerçekleşir. Şekil 2.12’de gösterilen fotoelektrik olayda foton, atoma bağlı olan elektronla etkileşerek enerjisinin tamamını bu elektrona aktarır ve eğer enerjisi $E_\gamma > E_b$ ise atomu iyonlaştırarak atomdan dışarı E_e enerjili bir fotoelektron fırlamasını sağlar. Eğer gelen fotonun enerjisi $E_\gamma < E_b$ ise atomu sadece uyarır ve iyonlaşma gerçekleşmediğinden fotoelektrik olayda gerçekleşmez.



Şekil 2.12 Fotoelektrik olay (<http://drgstoothpix.com>, 2016)

$$E_e = E_\gamma - E_b$$

Eşitlik 2.8

Eşitlik 2.8'de gösterilen denklemde; E_γ , etkileşen fotonun enerjisi ve E_b , atoma bağlı elektronun (bound electron) bağlanma enerjisidir. Fotoelektrik etkileşmenin olma olasılığı (tesir kesiti) fotonun enerjisine (E_γ) ve etkileştiği ortamın (burada sintilatör malzemesi) atom numarasıyla (Z) arasındaki ilişki Eşitlik 2.9'daki gibidir.

$$\sigma_{ph} = \text{sabit} \times \frac{Z^{4,5}}{E_\gamma^3}$$

Eşitlik 2.9

Yüksek enerjili radyasyon fotonu ile bir elektron çarpıştığı zaman elektron ve fotonun farklı doğrultularda saçılması olayına Compton Saçılması denir. Fotoelektrik etkide olduğu gibi fotonları sadece dalga olarak açıklayamayacağımızı, parçacık olarak da düşünmemiz gerektiğini gösteren olaylardan biridir. Compton Olayının olma olasılığı da yaklaşık olarak Eşitlik 2.10'daki gibidir.

$$\sigma_{comp} = \text{sabit} \times \frac{Z}{E_\gamma}$$

Eşitlik 2.10

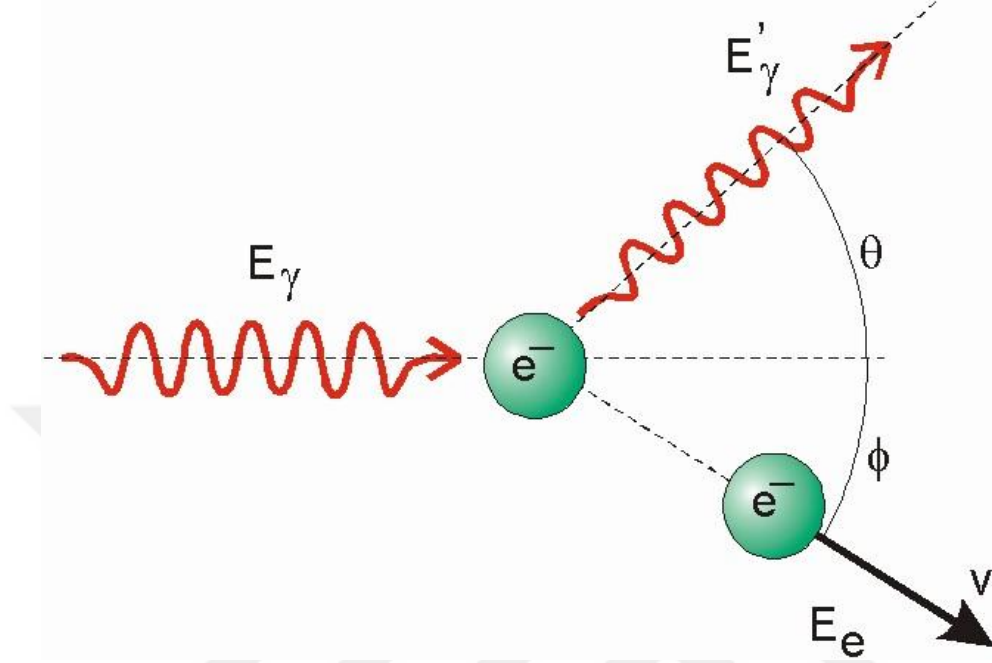
Şekil 2.13'te, gelen ve saçılan fotonlar gösterilmektedir. Yeşil küreler ise fotonun etkileşime gireceği elektronu temsil etmektedir. Yüksek enerjiye sahip foton durgun olan elektrona çarptığı zaman enerjisinin bir kısmı elektrona aktarır ve elektron geri teper. Hızı sabit olmak zorunda olan foton, enerjisinin bir kısmını elektrona geçirdiği için enerjisinin azalmasıyla birlikte dalga boyu artar ve frekansı azalır.

$$E_\gamma' = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad \text{ve} \quad E_e = E_\gamma - E_\gamma'$$

eşitliklerine göre Compton Olayı

gerçekleştiğinde geri tepen elektronun kazanabileceği maksimum enerji (Maximum Compton Edge), $\theta=180^\circ$ (fotonun saçılma açısı) ile gerçekleşir. Minimum Compton enerjisi (Compton Edge) ise $\theta=90^\circ$ (fotonun saçılma açısı) ile gerçekleşir. Burada ifade edilen E_γ plastik sintilatöre gelen fotonun enerjisi, E_γ' ise saçılan fotonun enerjisi, E_e geri

tepen elektronun enerjisidir. 511 keV enerjisine sahip m_0c^2 ise elektronun durgun kütle enerjisidir.



Şekil 2.13 Compton Saçılması (<http://www.zamandayolculuk.com>, 2015)

Yüksek foton enerjilerinde meydana gelen çift oluşumu; gelen fotonun, soğurucu atomun çekirdeğinin yük alanının etkisiyle yok olarak artı ve eksi yüklü iki elektronun meydana gelmesidir. Çift oluşumu olayı genellikle bir fotonun, atom çekirdeğinin yakınından geçerken meydana gelir. Bazen de foton, bir elektronun yakınından geçerken meydana gelebilir. Şekil 2.14'te gösterilen çift oluşumu olayında foton, enerjisinin tamamını aktararak yok olur.

Elektronun durgun kütlesi 0,511 MeV olduğundan çift oluşumunun gerçekleşmesi için gelen fotonun enerjisinin iki elektronun durgun kütle enerjilerinin toplamı olan 1,022 MeV 'den büyük olması gerekir. Başka bir ifadeyle gelen foton enerjisi $h\nu$ ise, $h\nu \geq 2m_0c^2$ olmalıdır. Foton enerjisinin 1,022MeV'lik kısmı elektron ve pozitron (+ yüklü elektron) kütleleri için kullanılırken, Eşitlik 2.11'de görüldüğü gibi kalan kısmı elektron ve pozitron tarafından kinetik enerji olarak kullanılır.

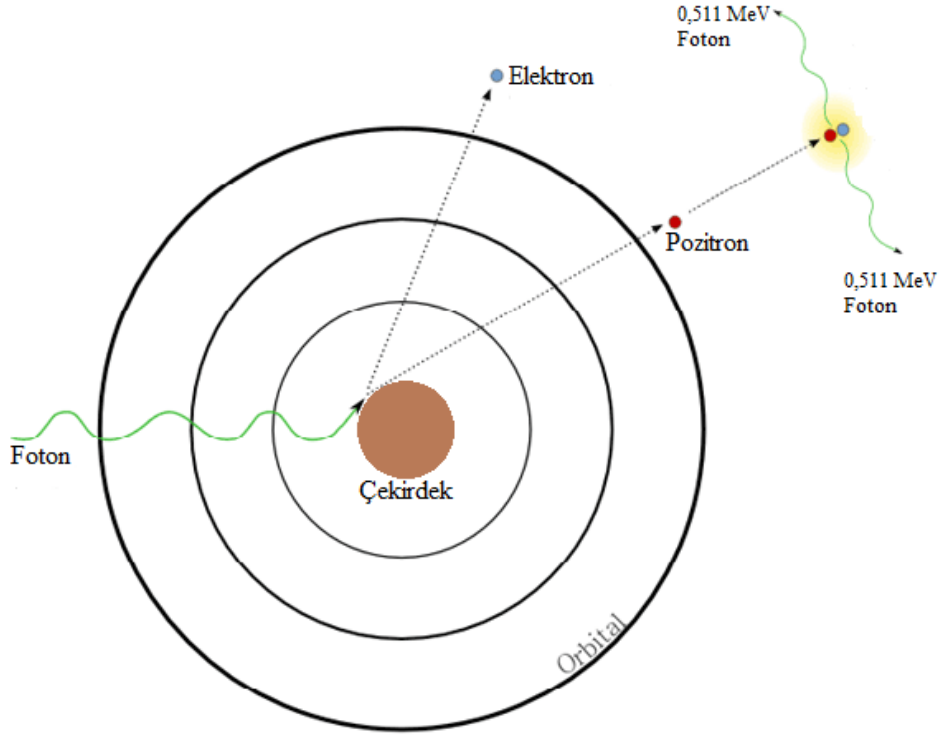
$$h\nu = 2m_0c^2 + T_{e^-} + T_{e^+}$$

Eşitlik 2.11

Çift oluşumunun olma olasılığı Eşitlik 2.12'deki gibidir.

$$\sigma_{pp} = \text{sabit} \times Z^2 \times \ln E_\gamma$$

Eşitlik 2.12



Şekil 2.14 Çift oluşumu olayı (<https://www.med-ed.virginia.edu>, 2016)

Ayrıca fotonların maddeyle etkileşiminden Thomson Saçılması ve Rayleigh Saçılması gerçekleşebilir. Thomson Saçılması fotonun atomdaki tek bir elektrondan saçılması olayıdır. Thomson Saçılmasının olma olasılığı Eşitlik 2.13'deki gibidir.

$$\sigma_{th} = \text{sabit} \times Z$$

Eşitlik 2.13

Rayleigh Saçılması ise fotonların atom veya moleküldeki bütün elektronlardan aynı şekilde meydana gelen saçılmasıdır. Rayleigh Saçılmasının olma olasılığı Eşitlik 2.14'deki gibidir.

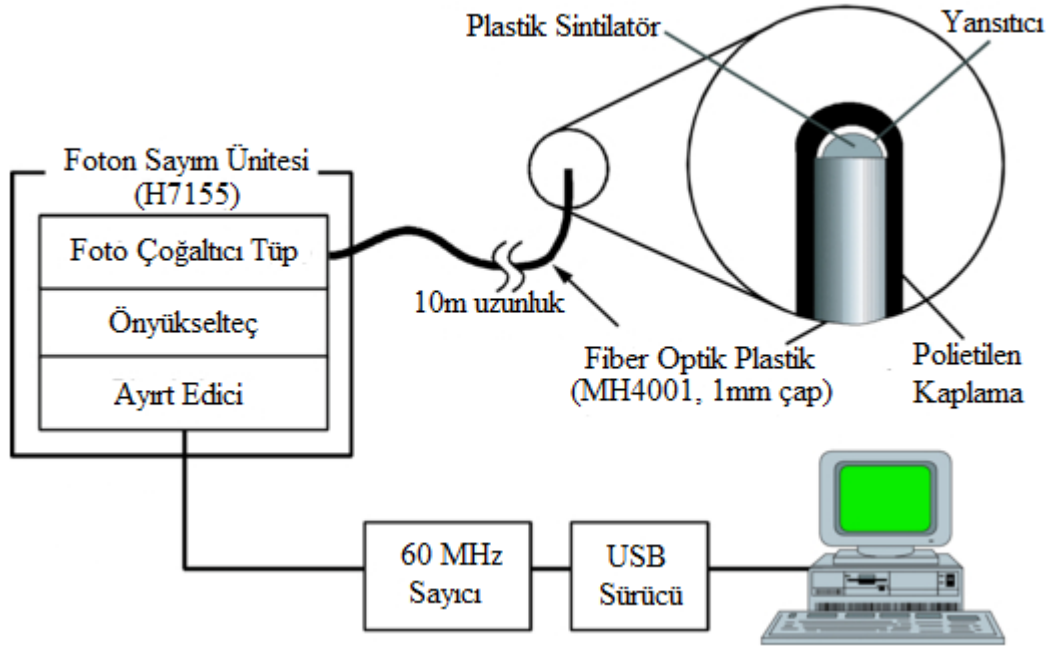
$$\sigma_{rl} = \text{sabit} \times Z^2$$

Eşitlik 2.14

Her iki saçılmada da 10 keV altında gelen fotonlar sadece atomu ya da molekülü uyarrır, iyonizasyon olmaz dolayısıyla enerji transferi gerçekleşmez. Bu saçılmalar elastik saçılmalardır ve sadece gelen fotonun yönü değişeceğinden momentum korunmaz.

2.7 Plastik Sintilatörlerin Medikal Dozimetre Olarak Kullanılması

Plastik sintilatör malzemelerin medikal alanda aktif dozimetre olarak kullanılabilceğini düşündüren etken, yaklaşık olarak 100 keV enerjisinin üstündeki enerjiler için plastik sintilatörün ortalama kütle-enerji soğurma katsayısının (μ_{en}/ρ) suyun ortalama kütle-enerji soğurma katsayısına (μ_{en}/ρ) oldukça yakın olmasındandır. Sintilatör tarafından üretilen ışığın daha uzak mesafelere taşınabilmesi için SOF (fiber optik sintilatör) dozimetre kullanılmaktadır. Bu fiber optik madde, ışını yansıtarak ışının kayıpsız şekilde ilerlemesini sağlayan kablodur. Fiber optik kablo ile iletilen ışığın PMT tarafından elektriksel sinyale dönüştürülüp en son bilgisayarda puls sayımı olarak görülen işlemin şeması Şekil 2.15'te gösterilmektedir (Ishikawa 2009).

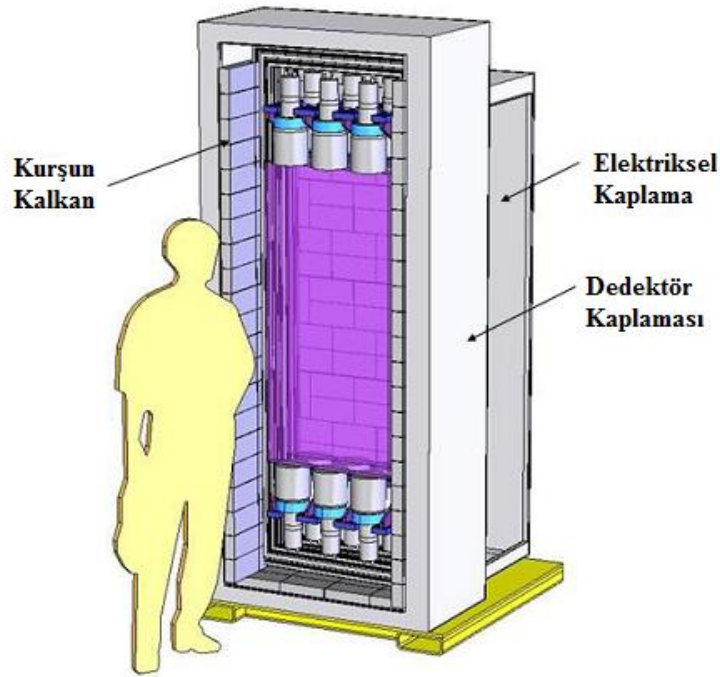


Şekil 2.15 SOF dozimetre sisteminin şematik diyagramı (Ishikawa 2009)

2.8 BC-408 Plastik Sintilatörün Güvenlik Amaçlı Uygulama Alanında Kullanılan Panel Dedektörü

2.8.1 ALPS 2 (Gelişmiş Geniş Alanlı Plastik Sintilatör)

ALPS 2 (Gelişmiş Geniş Alanlı Plastik Sintilatör), orjinal ALPS bench model testinden geliştirilmiş bir prototiptir. Bu yeni dedektör öncekinin aksine yatay olarak değil dikey olarak çalışıyor. Orjinal dizaynın ilk denemeleri sintilasyonu sağlayan plastik, yansıtıcı mylar ile sarıldığında performans açısından daha faydalı olduğu görülmüştür. ALPS 2 de dizayn olarak ilkinden faydalanarak dizayn edilmiştir.



Şekil 2.16 Temel ALPS 2'nin mekanik konfigürasyonu (Jordan 2007)

2.8.2 Dedektörün tasarımı

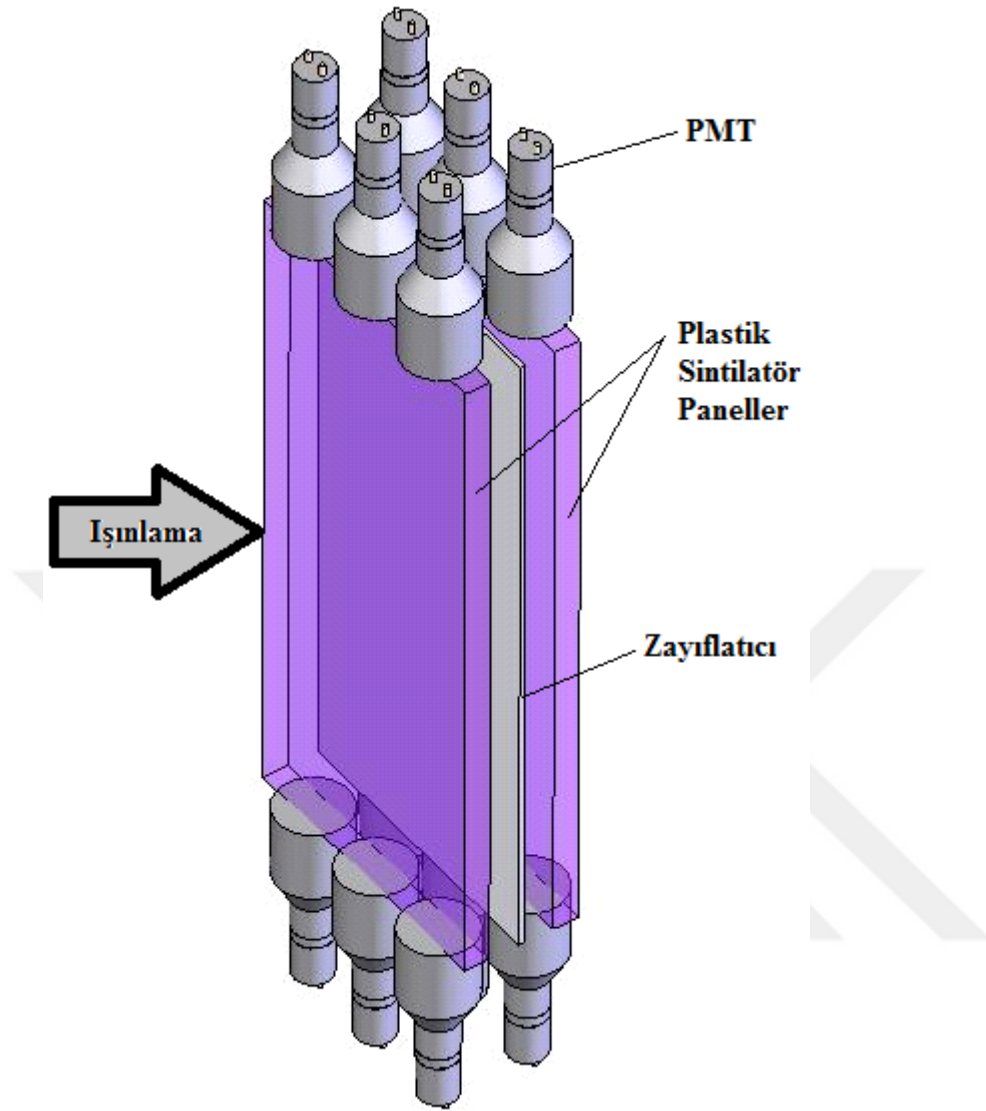
Bu ALPS laboratuvarında, açık alanda kullanılacak şekilde tasarlandı. ALPS 2'nin fonksiyonel tasarımının kriterleri şunlardır:

- Açık alanda uygulanırlığı
- Aletin kaplamasının ışık geçirmemesi
- İç elektronikleri
- Alan savunması
- Çıkarılabilir zayıflatıcı olması
- Üç yanından ve alttan 2'' kalınlığında kurşunla korunması

2.8.3 Radyasyon panel monitör bileşenleri

Radyasyon panel monitör cihazın temel bileşenleri Şekil 2.17'de gösterilmiştir. Sistem, Merkezden merkeze 7'' (17,78 cm) boşluklu 2 plastik sintilasyon panellerinden oluşuyor. Her panel 50'' (127 cm) yükseklik, 22,5'' (57,15 cm) genişlik, 2'' (7,87 cm) kalınlık içerir. Sintilasyon plastiği, 4 tarafı yansıtıcı mylar ile sarılmıştır. Her panelin en üstü ve en altı PMT ile optiksel iletme izin verilmesi için sarılmadan bırakılmıştır.

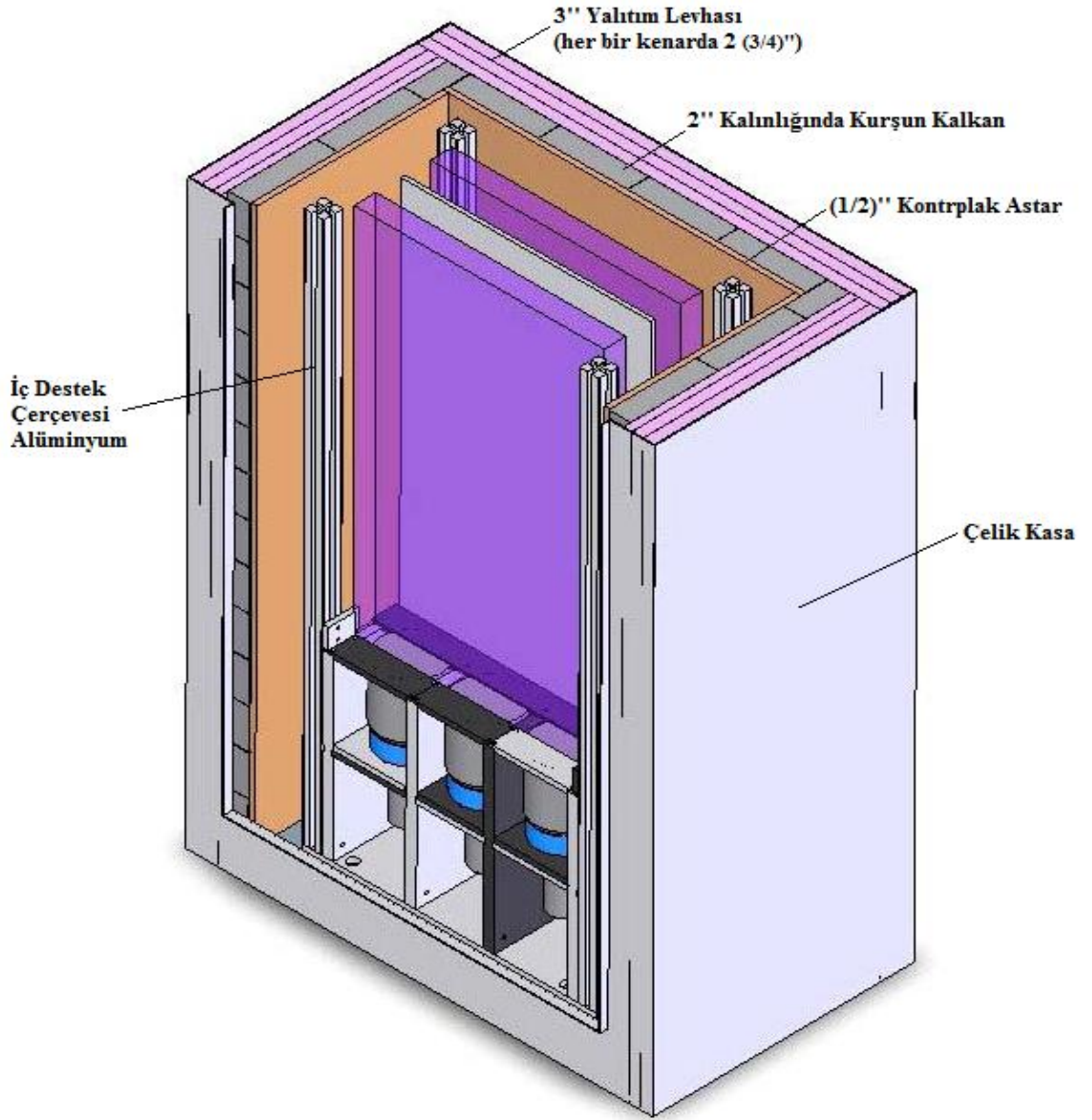
Zayıflatıcı, panellerden biriyle etkileşen radyasyonun diğer panelle etkileşmesini engelleme amaçlı monte edilmiştir ve iki plastik panelin arasının ortasındadır. Zayıflatıcı, mekaniksel sağlamlık için 2 tane 1/4'' lik polikarbonat panel arasına sıkıştırılmış 1/8'' lik kurşun levhadan oluşur. Zayıflatıcı, plastik panellerin alanlarını eşitlemek için 50'' × 22.5'' ebadındadır. Her bir panelin altı PMT'si vardır. Üç PMT her bir panelin sonunda yer alır. Yani toplamda on iki tane PMT vardır. Sintilasyon paneli, aletin en dibinden 22'' ve yerden 27'' ile yerleştirilmiştir.



Şekil 2.17 ALPS 2 dedektör bileşenleri (Jordan 2007)

2.8.4 Dedektörün yapımı

Yalıtımın genişliği yanlardan 3/4'' den 2 tane olacak şekilde, arkadaki 3'' olacak şekilde yerleştirildi. Yalıtım boyu boyunca olacak şekilde yapıldı. Bu yalıtım 2'' kalınlığındaki kalkanla (kurşun tuğla) tamamen çevriliyor. Koruyucu tabaka yukarıdan aşağıya 6 feet yüksekliğindedir ve 1/2'' lik kontrplak tabakası tuğlaları sağlamlaştırmak amacıyla koruyucu tabakanın içine yerleştirilmiştir. Alüminyumlar ise kontrplak tabakasını desteklemek amacıyla kontrplak tabakasının köşelerine vidalanmıştır. Alüminyumlar, zayıflatıcı kalkan ve PMT'ye ulaşmak için forkliftle çıkarılabiliyor.



Şekil 2.18 ALPS 2 montaj bölümü (Jordan 2007)

2.8.5 PMT montajlaması

Alet kaplaması ve elektronik dolap çelik palet ile monte ediliyor. Toplam ağırlık yaklaşık 3150 kg olarak tahmin ediliyor. Aletin genel boyutu 42'' genişliğinde, 51'' derinliğinde ve 122'' yüksekliğindedir.

2.8.6 Alet kaplaması

Kapının içi siyah polikarbon pencereyle evrilmifitir. Pencere işık geçirmesin diye opak bezle sarılmıştır. Bu kaplamanın boyutları 42’’ genişliğinde, 24’’ derinliğinde ve 114’’ yüksekliğindedir. Kapı açıklığı, 103’’ yüksekliğinde ve 34’’genişliğindedir. Yeniden ıkarılabilsin diye kapının kendisi sökülebilir menteşelerle donatılmıştır.

2.8.7 Elektronik kaplama

Kontrol ve yüksek montaj elektroniği, hava direnci olan raf dolaplarına monte edilmiştir. Bu elektronikler ise alet dolabının hemen arkasındadır. Elektronik rafların kolay girişi için arka ve n kapısı vardır. Rafın daha aşağısına ise yüksek montaj modülü monte edilmiştir.

2.8.8 ALPS 2 temeli

İnsanlar, kamyonlar ve trenlerle taşınan radyoaktif materyalleri saptamak için geniş alanlı plastik sintilatörler portal monitör olarak sık sık kullanılmaktadır. İstatistiksel olarak radyasyon olaylarının önemli sayılarını kaydetmek açısından geniş alanlı sintilatörler gereklidir. İlgili radyoaktif kaynakların güvenilir şekilde saptanabilmesi için düşük ortam doğal fon etkisi (background) gereklidir.

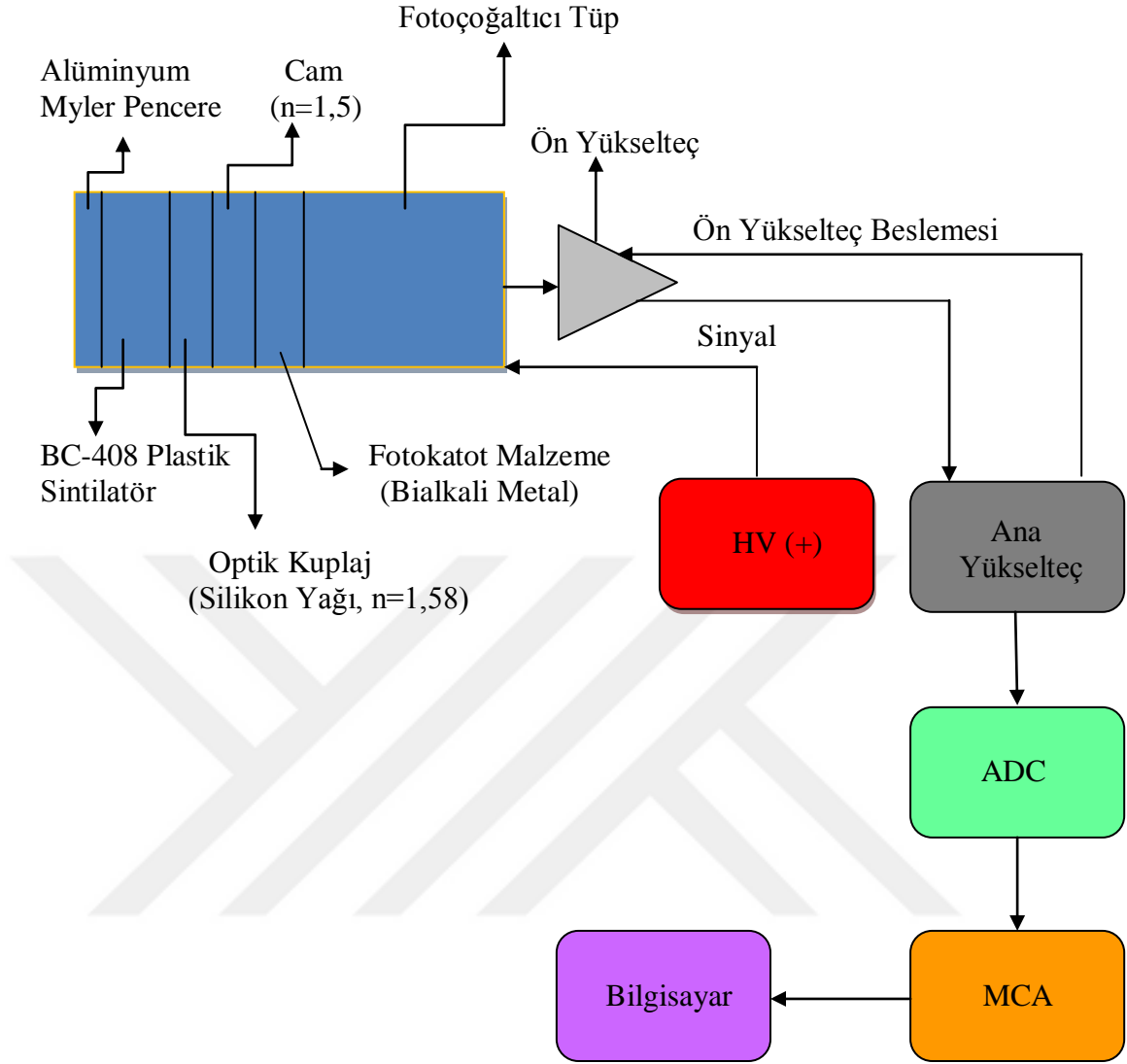
Ortam doğal fon etkisi (background) kaynaklarından biri, 1 MeV’den yüksek enerji içeren kozmik işınlardır. Diğer background kaynakları ise çevrede yer alan doğal radyoaktivitedir. Radyoaktiviteyle ilgili olarak portal monitörler için 400 keV’den kk düşük enerjinin depo edilmesi tercih ediliyor. Böylece portal monitördeki ortam doğal fon etkisini (background) azaltmak için kullanılan tekniklerden biri, sintilatördeki her bir olaya yüksek puls analizini uygulamak ve geniş pulsları reddetmektir (Jordan 2007).

3 MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Tez Çalışmasında Kullanılan Mekanizmanın Bağlantısı, İşleyişi ve Mekanizmaya Ait Bilgiler

BC-408 plastik sintilatöründe soğurulan X- veya γ -ışınları etkileşmesi sonucunda oluşan sintilasyon (görünür bölgedeki mavi ışığın) çıkışı, sintilatöre gelen iyonlaştırıcı radyasyonun soğurulmuş bir dozu olduğunu gösterir. Plastik sintilatörler X- veya γ -ışınları ile ışınlamaya maruz bırakıldığında, soğurulan dozla orantılı olarak sintilatör içinde Compton Saçılmasıyla üretilen elektronlar (Compton elektronları olarak adlandırılan) sintilatör ışığının (mavi renk, pik dalgaboyu \approx 430 nm) üretilmesini sağlarlar. Oluşan sintilasyon fotonlarının (örneğin UV/mavi ışık), elektriksel yüklere dönüştürülmesi, bir fotoçoğaltıcı tüp (PMT) ile mümkündür. Bu çalışmada, Şekil 3.1’de görüldüğü üzere PMT çıkışında elde edilen sinyalde bir spektroskopi yükseltici (Canberra 2022) işlenip biçimlendirilerek bir ADC/MCA (Canberra Multiport II) ünitesinde elde edilen puls sayımları yardımıyla bir spektrum gözlenmiştir. Bu toplanan spektrum Canberra Genie 2000 spektrum yazılım programı vasıtasıyla bilgisayara kaydedilmiştir.

Şekil 3.1’de sırasıyla ^{137}Cs , ^{22}Na , ^{133}Ba , ^{60}Co , ^{152}Eu noktasal kaynakları dedektör yüzeyindeyken BC-408 plastik sintilatör dedektörle spektrum toplanmıştır. Daha sonra Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Işınlama ve Kalibrasyon Laboratuvarında ölçümler alınmıştır. Bu laboratuvarında yüksek aktiviteli (8,58 Ci) ^{137}Cs ve düşük aktiviteli (47 mCi) ^{137}Cs çift kaynak bulunmaktadır. Ancak bu çalışmada, sayım sisteminin ölçüm kapasitesi dikkate alınarak düşük aktiviteli kaynakla 200 cm’den 370 cm’e kadar 5’er cm aralıklarla ışınlama yapılarak, her 5 cm mesafe artışı için 300 saniye boyunca spektrum toplanmıştır. Spektrumun düşey eksenini enerjiyi, yatay eksenini ise kanal başına sayımı göstermektedir.



Şekil 3.1 BC-408 PS dedektör ölçüm sistemi diyagramı

Düşük aktiviteli (47 mCi) kaynak ile alınan spektrumda her puls yüksekliği spektrumu Excel Solver programı vasıtasıyla fit edilerek yaklaşık olarak

$$y = a \cdot \exp(-bx) + c \cdot \left(\frac{k}{x}\right)^{1/2} \cdot \frac{1}{1 + p \cdot (x - k)^2}$$

biçiminde bir fonksiyon elde edilmiştir. X kanal değeri; a, b, c, p, k ise fonksiyonun sabitleridir. Puls yüksekliği spektrumları 1024 kanal MCA hafızasında biriktirilmiştir. Düşük enerji tarafında elektronik titreşimlerin oluşturduğu pulsarı, yüksek enerji tarafında ise kozmik radyasyonun neden olabileceği pulsarı elemine etmek için bir eşik konulması gerekmektedir. Bu eşikler; düşük enerji bölgesi için (spektrumun solu) 16. kanal, yüksek enerji bölgesi için (spektrumun sağı)

236. kanal olarak belirlenmiştir. Her puls yüksekliği spektrumunda 16. ve 236. kanallar arasındaki toplam net integral sayımı (net toplam sayım değeri) belirlenmiştir. Bu net toplam sayım değeri, doğal fon etkisi çıkarılmış bir net sayıdır. Alınan net toplam sayım değeri ölçüm süresine bölünerek puls yüksekliği spektrumundan ölçülmüş “net toplam sayım hızı (cps)” elde edilmiştir. Bu cps değerinden de doz hızına geçmek hedeflendi. BC-408 plastik sintilatörle elde edilen puls yüksekliği spektrumundan, puls sayımları ile sintilatörde soğurulan doz hızı arasında yazılan ifade Eşitlik 2.15’te gösterildiği gibidir.

$$\dot{D}_s = \frac{1}{m_s} \int_n^l E_{(E)} \cdot \dot{C}_s \cdot dE \quad \text{Eşitlik 3.1}$$

Burada; \dot{D}_s : Sintilatörde soğurulan doz hızı, $E_{(E)}$: Kaynaktan çıkan enerji değeri, \dot{C}_s : sintilatörde E+dE enerji aralığında soğurulan (energy deposition) bir enerjiye karşılık gelen entegre edilmiş puls sayım hızı (cps), m_s : Sintilatörün kütlesi, l ve n ise spektrumdaki enerjilerin başlangıç ve bitiş değerleridir.

$$C_s = \dot{C}_s(E) \cdot \Delta t = [a \cdot \exp(-bE) + c \cdot \left(\frac{k}{E}\right)^{1/2} \cdot \frac{1}{1 + p \cdot (E - k)^2}] \cdot \Delta t \quad \text{Eşitlik 3.2}$$

Eşitlik 3.2’deki Δt : Ölçüm süresi, C_s : Plastik sintilatörde belirlenen kanallar arasındaki Δt_c ölçüm süresinde toplanan toplam (integrated) puls sayısıdır. Doz hızı (\dot{D}_s) yerine sintilatördeki toplam soğurulan doz (D_s) enerjinin (E) bir fonksiyonu şeklinde Eşitlik 3.3’te ve 3.4’te olduğu gibi gösterilir.

$$D_s = \frac{1}{m_s} \int_n^l E \cdot [a \cdot \exp(-bE) + c \cdot \left(\frac{k}{E}\right)^{1/2} \cdot \frac{1}{1 + p \cdot (E - k)^2}] \cdot \Delta t \cdot dE \quad \text{Eşitlik 3.3}$$

$$D_s = \frac{\Delta t}{m_s} \left[a \int_n^l E \cdot \exp(-bE) \cdot dE + c \int_n^l \left(\frac{k}{E}\right)^{1/2} \cdot \frac{1}{1 + p \cdot (E - k)^2} \cdot dE \right] \quad \text{Eşitlik 3.4}$$

Yukarıda görülen a, b, c, p, integrasyon sabitleri Excel Solver programıyla bulunmuştur. K, fonksiyondaki eğrinin tepe noktasıdır. Bu sabitler ile toplam puls sayımı ve ölçme süresi hesaba katılarak, sintilatördeki soğurulan doz belirlenebilir.

3.2 Radyonüklit Kaynaklar

Tezde düşük aktiviteli (μCi biriminde) radyoizotop kaynakları ile spektrum toplamak için çizelge 3.1’de gösterilen kaynaklar kullanılmıştır.

Çizelge 3.1 Kullanılan radyonüklit kaynakların bilgileri

Kaynak Adı *	Referans Tarihi	Beta ve/veya Pozitron Enerjileri (Q_{β^-} , Q_{β^+}) (keV) ve Yayımlama Olasılığı (P_{β^-} , P_{β^+}) (%)	Gama Işını Yayımlama Olasılığı, P_{γ} (%)	Aktivite (μCi)	Yarı Ömür (gün)	Gama Enerjileri (γ) (keV)	Referans Tarihindeki Aktivite (μCi)
^{22}Na	01.12.08	$Q_{\beta^+}=2843,02$ $P_{\beta^+}=100$	99,94	1,064	951	1274,5	0,24 μCi 10.07.14
^{60}Co	01.12.08	$Q_{\beta^-}=2823,07$ $P_{\beta^-}=100$	99,85	1,096	1926	1173,2	0,52 μCi 17.07.14
			99,98			1332,5	
			50,22			1115,5	
^{133}Ba	01.12.08	$Q_{\beta^+}=517,3$ $P_{\beta^+}=100$	0,638	1,019	3861	160,61	0,71 μCi 16.07.14
			0,453			223,24	
			7,16			276,40	
			18,34			302,85	
			62,05			356,01	
			8,94			383,85	
^{137}Cs	01.12.08	$Q_{\beta^-}=1175,63$ $P_{\beta^-}=100$	84,99	1,038	11049	661,66	0,91 μCi 07.07.14

^{152}Eu	04.02.02	$Q_{\beta^+}=1874,3$ $P_{\beta^+}=72,1$	28,41	1,14	4936	121,78	0,60 μCi 21.07.14
			7,55			244,70	
			26,59			344,28	
			2,24			411,12	
			2,80			443,97	
			12,97			778,90	
			4,24			867,38	
			14,50			964,08	
		$Q_{\beta^-}=1818,8$ $P_{\beta^-}=27,9$	10,13			1085,84	
			1,73			1089,74	
			13,41			1112,76	
			1,42			1212,95	
			1,63			1299,14	
			20,85			1408,01	

*Veriler, 2015 Nucléide, (<http://www.nucleide.org>) adresinden alınmıştır.

3.3 ^{137}Cs kaynaklı Işınlama Sistemi

Yatay demet eksen konfigürasyonunda ve dedektör konumunda gösterilen sabit kaynak- hareketli kızak ve ölçme sisteminden oluşan üç boyutlu (3D) radyometrik benç sistemi Şekil 3.2' de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Düşük ve yüksek aktiviteli ^{137}Cs ışınlama sistemi ve bu sistemle alınan ölçümler için kullanılan mobil 3D- radyometrik benç sistemi

Çizelge 3.2 ^{137}Cs ışınlama sistemi bilgileri

Kurulum tarihi	2009
Üretici	Hopwell Designs, Inc. (ABD) , G10 Gamma Beam Irradiator
Kullanılan izotop	^{137}Cs
İzotopun aktivite tarihi	14.05.2009
İzotopun aktivitesi	47 mCi (Düşük aktiviteli) 8,58 Ci (Yüksek aktiviteli)
Radyasyon şiddetini azaltan silindirik levhalar	Her biri 19,4 mm kalınlığına sahip 3 adet kurşun levha

3.4 Doz ve Doz Hızı Ölçümünde Kullanılan İyon Odaları

Doz-doiz hızı ölçümünde PTW marka (Freiburg, Almanya), elektrodu grafit kaplı alüminyumdan yapılmış, duvar malzemesi koruyucu akrilik kapaklı grafit olan 31 mm çapında ve 51 mm yüksekliğindeki silindirik TM 23361 iyon odası kullanılmıştır (<http://www.ptw.de> 2012). Çalışma gerilimi +300 V olan bu iyon odasının doz ve doz hızı ölçüm aralığı 2 µGy-20 mGy ile 12 µGy/dk-56 Gy/dk'dır.



Şekil 3.3 Üç boyutlu radyometrik benç üzerindeki TM 23361 silindirik iyon odası

Düşük doz hızlarının ölçülmesi için daha büyük hacimli (450 cm^3) ve $7 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ incelikteki penceresiyle 70 keV enerjiye kadar düşük enerjilerdeki beta doz hızını ve 17 keV-6 MeV foton enerji aralığındaki gama doz hızını ölçebilen portatif mini-1 SmartION iyon odası (Model 2120 G, Saint-Gobain Crystals&Detectors) kullanılarak hem gama doz hızı hem de gama+beta doz hızı her kaynak için 30 kez ölçülmüştür. Kurşun zırlı bir hücre içinde (5 cm düzenek kullanılarak doğal fon doz hızları en az 30 kez ölçülerek ortalaması elde edilmiştir. Şekil 3.4'te aynı kurşun zırlı hücrede ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{152}Eu , ^{60}Co , ^{22}Na kaynaklar beta ve beta+gama doz hızı ölçümlerinden doğal fon doz hızı değerleri çıkartılarak sonuçlar yorumlanmıştır.



Şekil 3.4 Kurşun zırhın önündeki mini-1 SmartION iyon odası

3.5 İyon Odası Elektrometresi

TM 23361 iyon odasının doz-doiz hızı okumaları için PTW Unidos Webline marka elektrometre kullanılmıştır. Elektrometrenin doz gösterim aralığı μGy - mGy , doz hızı gösterim aralığı $\mu\text{Gy}/\text{min}$ - mGy/min olacak şekilde kalibre edilmiştir.



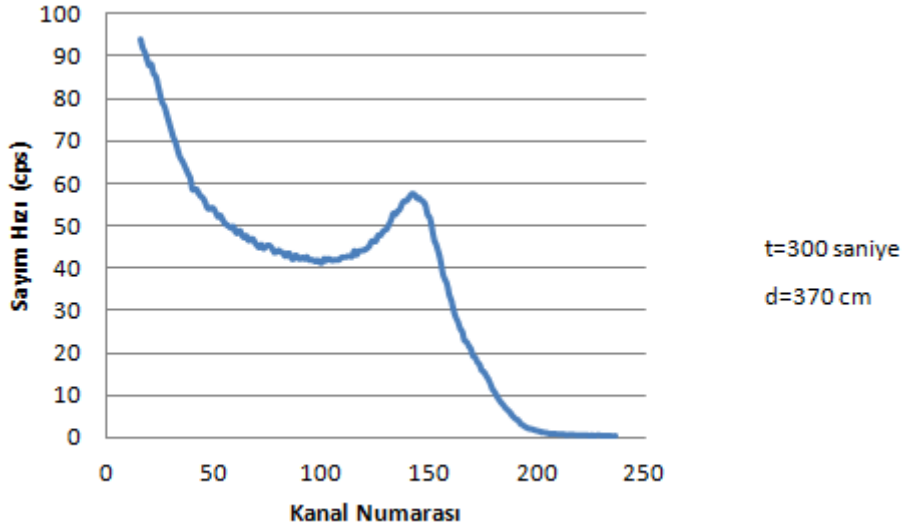
Şekil 3.5 PTW Unidos Webline marka elektrometre

3.5.1 BC-408 Plastik sintilatörünün yapılan tezde ilişkide olduğu mekanizmalar

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Işınlama ve Kalibrasyon Laboratuvarında 47 mCi'lik ^{137}Cs radyoizotop kaynağıyla ve Radyasyon Dedeksiyon Ölçüm laboratuvarında düşük aktiviteli (μCi) noktasal radyonüklit kaynaklarla (^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{22}Na , ^{60}Co ve ^{152}Eu) spektrum toplamak amacıyla BC-408 plastik sintilatör dedektörü kullanılmıştır. Dedektöre, fotoçoğaltıcı tüp gerilimi takmatik (plug-on) standart 14 pinli gerilim bölücüsü vasıtasıyla sağlanmış ve bunlarla entegre yüke duyarlı ön yükselteç çıkışından alınan sinyal, standart Canberra 2022 ana yükselteç girişine verilerek işlendikten sonra dijitale dönüşümü Canberra Multiport-II 8K ADC/MCA çok kanallı analizöründe gerçekleştirilmiştir. Tüm analog NIM modüller, bir NIM kasada birleştirilerek bir spektroskopi sistemi oluşturulmuştur. MCA çıkışının bir bilgisayara bağlanmasıyla toplanan spektrum bilgisayarda gözlenmiş ve kaydedilmiştir. Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Işınlama ve Kalibrasyon Laboratuvarında ölçüm anı bir video kamera vasıtasıyla izlenmiş ve kameranın aldığı görüntüler, kurşun bloklarla koruma altına alınmış odadaki konsolun yanında bulunan monitörde gözlenmiştir. Bu gözlemin yapılmasının sebebi, olası bir olumsuzlukta sisteme anlık olarak müdahale edilebilmesi içindir. Bu laboratuvarındaki 3 boyutlu radyometrik benç üzerine yerleştirilmiş Bicron marka BC-408 plastik sintilatörüne, dışarıdan gelebilecek radyasyon etkilerini en aza indirmek amacıyla ve kullanılan kolimatörü dengede tutmak için 10 cm uzunluğunda ve 5 cm kalınlığında olan iç içe geçmeli kurşun bloklarla zırhlanmıştır. Bu plastik sintilatörün benç üzerinde hizalanması, odaklama amacıyla kullanılan lazer ile yapılmıştır. Ayrıca bu laboratuvarında bulunan Euromaag marka kompresör, ^{137}Cs kaynağının ölçüm sırasında bulunduğu haznedan yukarı çıkmasını sağlaması amacıyla kullanılmıştır.

3.5.2 Gama ışını spektrumu değerlendirme programı

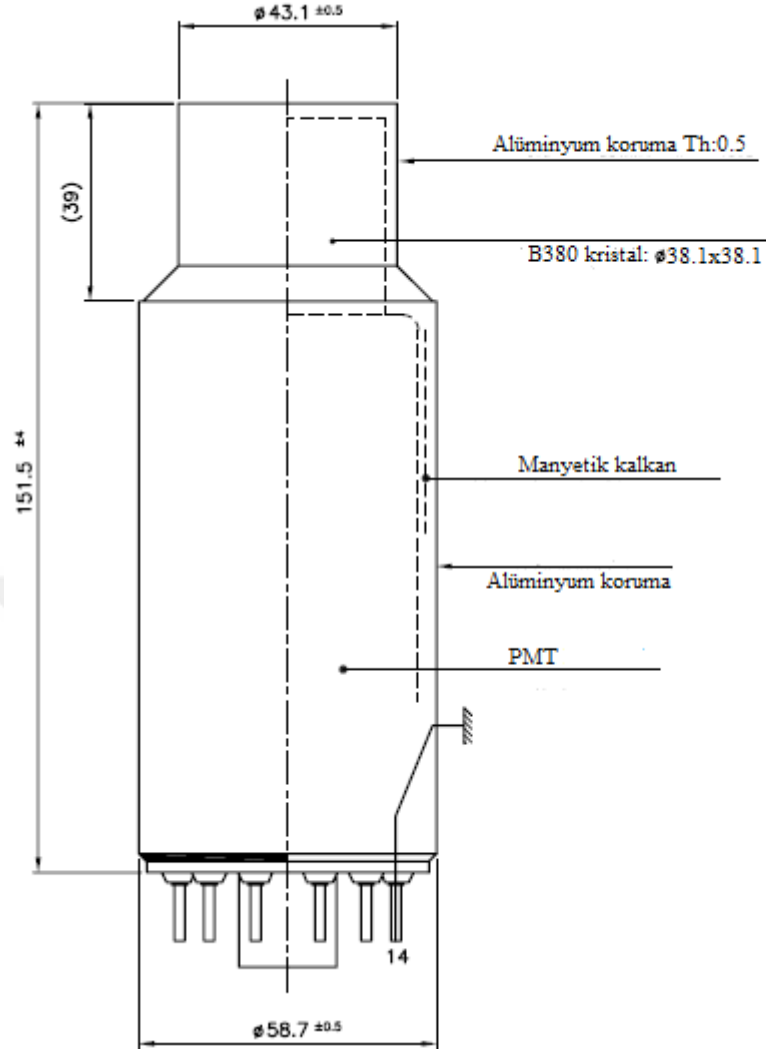
Bu tez çalışmasında 47 mCi'lik ^{137}Cs kaynağıyla ve noktasal radyonüklit kaynaklar (^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{22}Na , ^{60}Co ve ^{152}Eu) ile elde edilmiş spektrumlar, Canberra Genie 2000 spektrum yazılım programı ile toplanmış ve bu program ile analiz edilmiştir.



Şekil 3.6 Tez için 370 cm mesafesinde toplanmış bir spektrum görüntüsü

3.6 BC-408 Plastik Sintilatörünün Temel Fiziksel Özellikleri ve Yaygın Olarak Kullanılan Diğer Plastik Sintilatörlerin Özellikleri İle Karşılaştırılması

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Işınlama ve Kalibrasyon Laboratuvarında ve Radyasyon Dedeksiyon Ölçüm laboratuvarında spektrum toplamak amacıyla çapı 3'' ve yüksekliği 3'' boyutlarında olan silindir şeklinde plastik sintilatör dedektörü kullanılmıştır. Sintilatöre, optik kuplajı yapılmış fotoçoğaltıcı tüp (Electron Tubes Ltd., ETI 9305 tipi PMT) bağlıdır ve sintilatör ön yüzeyi $\sim 10 \text{ mg/cm}^2$ alüminize mylar pencereyle kaplanmıştır.



Şekil 3.7 BC-408 PS dedektörü resmi (Saint-Gobain Crystal and Dedectors 2005)

Çizelge 3.3 BC-408 plastik sintilatör dedektör özellikleri

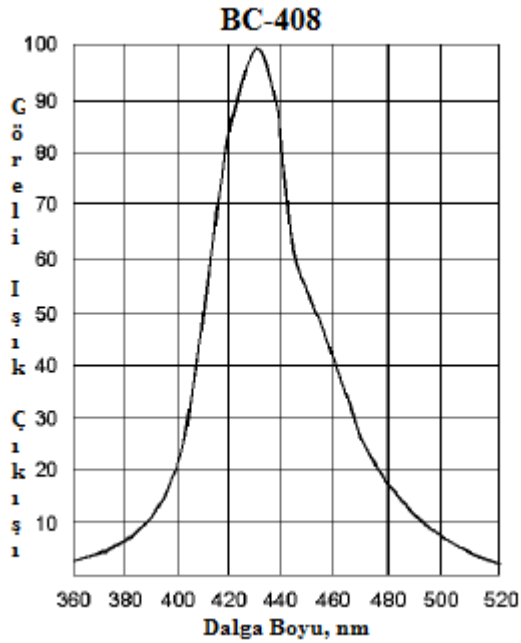
Üretici firma	Saint-Gobain Corp, Paris, Fransa
Marka	Bicron
Model	3M3BC408/3M
Dedektör	BC-408
Fotoçoğaltıcı Tüp (PMT) Tipi	Electron Tubes Ltd., ETI9305KFLB06
Baz malzeme	Poliviniltoluen (PVT) diğer adı polymethylstyrene
Atom numarası	3,3-3,5
Işığın kırma indisi	1,58

Yoğunluk	1,032 g/cm ³
Kristal boyutu	Çapı 3'' ve yüksekliği 3''



Şekil 3.8 Ölçümlerde kullanılan Bicorn marka BC-408 plastik sintilatör dedektörü

BC-408 plastik sintilatöründen yayılan ışığın dalga boyu Şekil 3.9'da gösterildiği gibi 430 nm civarındadır.



Şekil 3.9 BC-408 PS ışımaya spektrumu (<http://www.dedectors.saint-gobain.com> 2005)

BC-408 plastik sintilatörü ve yaygın olarak kullanılan plastik sintilatörlerin temel fiziksel özellikleri Çizelge 3.4’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 Bazı plastik sintilatörlerin temel fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması

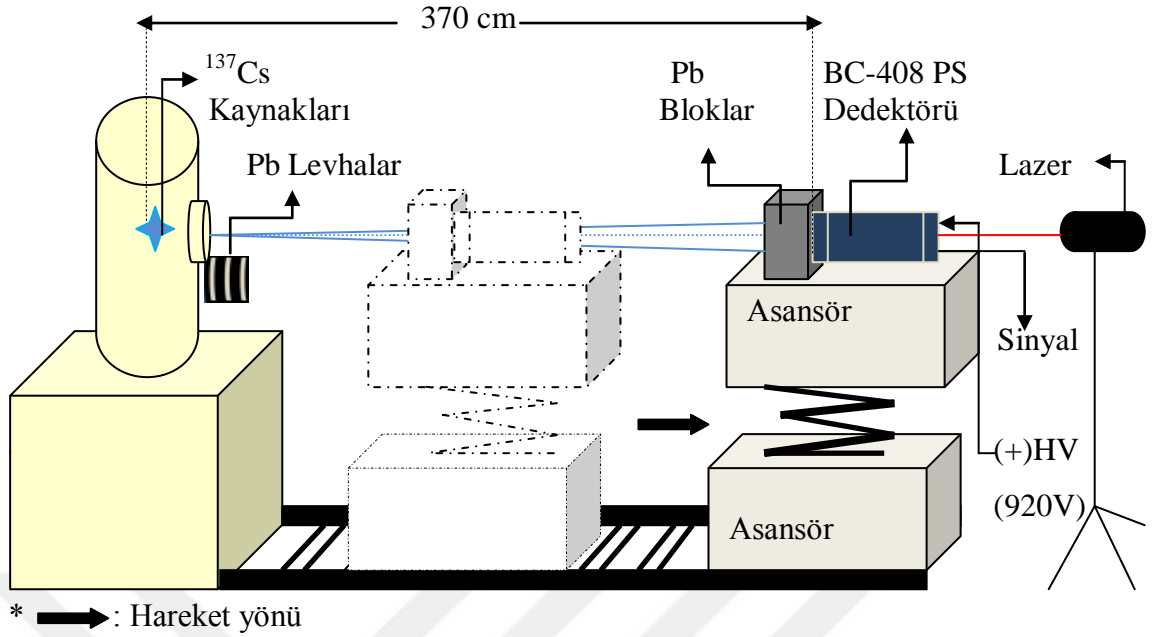
PLASTİK SİNTİLATÖR ÖZELLİKLERİ *	PLASTİK SİNTİLATÖR TÜRLERİ					
	BC-400	BC-404	BC-408	BC-412	BC-416	BC-418
Ayrırt Edici Özelliği	NE-102 eşdeğeri	1,8 ns zaman sabiti	Genel amacı en iyi	En uzun zayıflama uzunluğu	En düşük maliyet	1.4 ns zaman sabiti
Temel Uygulamaları	Genel amaçlı	Hızlı sayım	Geniş alan	Geniş alan	Ucuz, geniş alan	Aşırı hızlı zamanlama
Işık Çıkış Verimi (%)-antrasen kristaline göre	65	68	64	60	38	67
Sintilasyon Fotonlarının Maksimum Dalga Boyu (nm)	423	408	425	434	434	391
Puls Sönüm Zamanı (ns)	2,4	1,8	2,1	3,3	4,0	1,4
Bulk Işığın Zayıflama Mesafesi (cm)	250	160	380	400	400	100

Refractiven dizin	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58
H:C Atom Oranı	1,103	1.107	1.104	1.104	1.110	1.100
Yoğunluk (g/cm ³)	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032
Erime Noktası (°C)	70	70	70	70	70	70

*Veriler, 2015 Saint-Gobain Ceramics & Plastics, Inc. (<http://www.crystals.saint-gobain.com>) adresinden alınmıştır.

3.7 ¹³⁷Cs Radyoizotop Kaynaklı Işınlama Sisteminde Farklı Mesafelerdeki Spektrumların Toplanması

Yüksekliği ayarlanabilir 3 boyutlu radyometrik benç üzerindeki BC-408 plastik sintilatör dedektörü vasıtasıyla; 200 cm'den 370 cm'e kadar 5'er cm aralıklarla, her aralık için 300 saniye boyunca spektrum toplanmıştır. Ölçümlerin gerçekleştirilebilmesi için kurulan sistemin geometrisi Şekil 3.10'da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.10 Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Işınlama ve Kalibrasyon Laboratuvarında 300 saniye boyunca farklı mesafelerde toplanan spektrum için kurulan ölçüm geometrisi

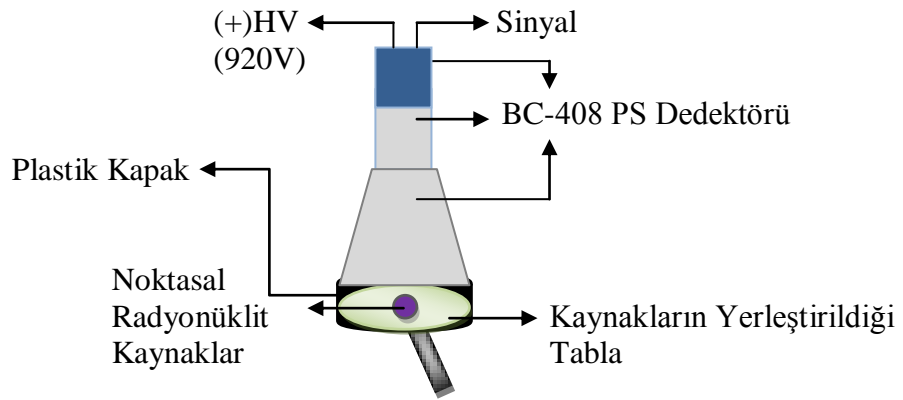
Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Işınlama ve Kalibrasyon Laboratuvarında, aktivitesi 47 mCi (Referans tarihi: 14.05.2009) olan ^{137}Cs kaynağı ile 3 boyutlu radyometrik benç üzerindeki BC-408 plastik sintilatörü 200 cm'den başlayarak 5 cm aralıklarla 370 cm'ye kadar 300 saniye boyunca toplamda 35 tane spektrum ölçümü alınmıştır. Toplanan bu spektrumlardan; ölçüm alınan her mesafede (200 cm'den 370 cm'ye kadar 5 cm aralıklarla olan mesafe) BC-408 plastik sintilatör dedektörünün 1 saat boyunca topladığı ortam doğal fon etkisi (background) spektrumlarının çıkarımı (stripping) sonucu geriye kalan toplam spektrumlar, net spektrumlar adıyla bilgisayara ayrıca kaydedilmiştir.

BC-408 plastik sintilatörü, saçılmaları önlemek için iç içe yerleşmeli kurşun bloklarla uygun şekilde zırhlanmıştır. Zırhın ön kısmına 5 cm çapında silindirik kurşun kolimatör yerleştirilmiştir. Dedektörün, ışın demeti alanının merkezinde hizalanması için lazer cihazı kullanılarak hassas ayar yapıp geometrisi oluşturulmuştur. Lazer cihazı kullanılarak yapılan hassas ayar, asansörün yatay ekseninde sol-sağ ve düşey ekseninde aşağı-yukarı hareket mekanizmasından yararlanılarak yapılmıştır. Bütün bu ölçümler,

toplanan spektrumu gösteren ve ölçüm odasında bulunan bilgisayar ekranı üzerine kadraji yapılmış video kamerayla kontrol edilmiştir. Video kameranın aldığı görüntüler, kurşun tuğlalarla zırhlanmış konsol odasında bulunan ve video kamerayla bağlantısı yapılmış monitör üzerinden gözlenmiştir. Ölçüm anında yapılan tüm bu kontroller, olası bir olumsuzluk anında anlık olarak müdahale edebilmek ve ölçüm sonuçlarının düzgün olarak ilerleyebildiğini görebilmek amacıyla yapılmıştır.

3.8 Noktasal Radyonüklit Kaynaklar Kullanılarak Spektrumların Elde Edilmesi

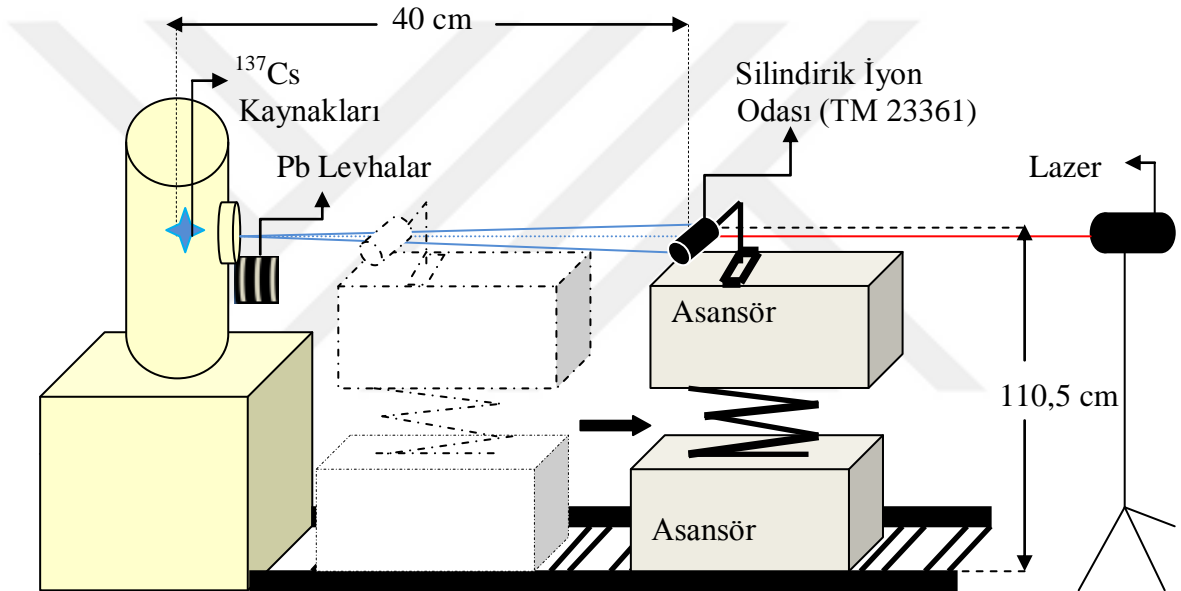
Farklı enerjilerdeki gama ışınları kullanılarak BC-408 plastik sintilatör dedektörünün BC-408 plastik sintilatörün, farklı enerjilerdeki gama ışınlarına karşı gösterdiği hassasiyetin belirlenebilmesi için ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{22}Na , ^{60}Co ve ^{152}Eu noktasal radyonüklit kaynaklarıyla spektrum toplanmıştır. A.Ü Nükleer Bilimler Enstitüsü Radyasyon Dedeksiyon Ölçüm Laboratuvarında Şekil 3.11’de gösterildiği şekilde toplanan bu spektrumlardan; aynı BC-408 plastik sintilatör dedektörü tarafından yaklaşık bir gün boyunca toplanan ortam doğal fon etkisi (background) spektrumunun çıkarımı (stripping) sonucu geriye kalan toplam spektrumlar, net spektrumlar adıyla bilgisayara ayrıca kaydedilmiştir.



Şekil 3.11 Radyonüklit kaynaklar kullanılarak alınan spektrumlar için kurulan ölçüm geometrisi

3.9 ^{137}Cs Ölçüm Laboratuvarındaki Işınlama Sistemiyle Alınan Doz ve Doz Hızı Ölçümleri

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Işınlama ve Kalibrasyon Laboratuvarında alınan doz ve doz hızı ölçümlerinde, referans dedektör olarak silindirik iyon odası (TM 23361) kullanılmıştır. Bu iyon odası tarafından ölçülen doz ve doz hızları, kurşun tuğlalarla zırhlanmış konsol odasında bulunan PTW Unidos Webline marka elektrometre vasıtasıyla elektrometrenin kütüphanesinden TM 23361 başlığı seçilerek okunmuştur.



Şekil 3.12 Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Işınlama ve Kalibrasyon Laboratuvarında ışınlama sistemiyle alınan doz ve doz hızı ölçümleri için kurulan ölçüm geometrisi

Yarı çapı 1,5 cm ve uzunluğu 6,2 cm olan silindirik iyon odasının (TM 23361) tam olarak ışın demeti alanının merkezinde hizalanması, lazerden çıkan kırmızı renkli monokromatik ışın ile sağlanmıştır. Şekil 3.12’de gösterildiği gibi kurulan sistemde iyon odasının, 47 mCi aktivitesindeki (Referans tarihi: 14.05.2009) ^{137}Cs kaynağıyla olan mesafesi 30 cm’den 80 cm’ye kadar (80 cm dahil) 5’er cm aralıklarla ve her aralık için 300 saniye boyunca 5’er defa doz ve doz hızı değerleri okunup aritmetik ortalamaları alınarak kaydedilmiştir. Böylelikle herhangi bir mesafede istenen doz

değeri; iyon odasıyla ölçümü alınan herhangi bir uzaklıktaki doz değerinin, ters kare metoduyla hesaplanması sonucu yapılmıştır (Bkz. Ek-1).



4 BULGULAR

4.1 TM 23361 İyon Odası ve BC-408 Plastik Sintilatör İle Yapılan Deneilerin Ölçüm Sonuçları

4.1.1 TM 23361 İyon Odasıyla Yapılan Ölçümlerin Doz Değerleri

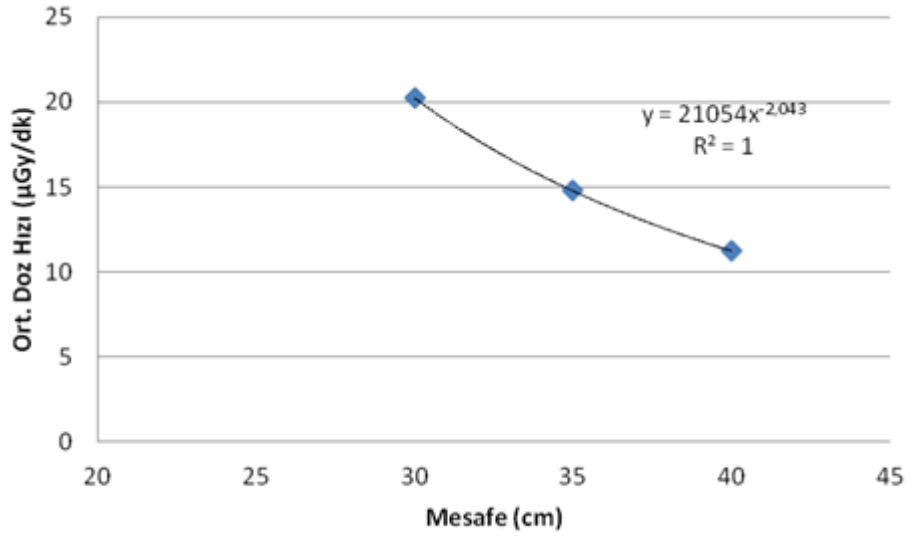
Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Işınlama ve Kalibrasyon Laboratuvarında, 3D radyometrik benç üzerine hizalanarak ^{137}Cs kaynağından 30 cm uzaklığından 80 cm uzaklığına kadar 5'er cm aralıklarla, mesafelere karşı doz ve doz hızları her mesafe için 5'er defa ölçülmüştür. Çalışma gerilimi +300V olan bu İyon Odasının doz ve doz hızı ölçüm aralığı 2 μGy -20 mGy ile 12 $\mu\text{Gy/dk}$ -56 Gy/dk olduğundan, 40 cm mesafesinden itibaren ölçüm sonuçları bu belirtilen aralıkta olmadığı için elektrometre tarafından düşük sinyal uyarısı vermiştir. Bu yüzden aşağıda gösterilen tablolarda 40 cm mesafesinden sonraki sonuçlar değerlendirilmeye alınmamıştır. 30 cm'den 40 cm'ye kadar olan mesafelerdeki doz-doz hızı ölçüm sonuçlarının tabloları Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de standart sapmaları ve değişim katsayıları ile gösterilmiştir. Mesafeye karşılık çizilen doz/doz hızı eğrileri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de görüldüğü gibi üstel azalım davranış sergilemiştir. Ayrıca kişisel eşdeğer doz ölçümü yapılabilen $H_p(10)$ dedektörüyle de, TM 23361 İyon Odasıyla yapılan işlemlerin aynısı yapılmıştır. Aynı mesafeler için alınan sonuçlar, dedektörün ölçüm aralığının dışında sonuç verdiğinden bu dedektörden elde edilen veriler tezde değerlendirmeye alınmamıştır.

Çizelge 4.1 TM 23361 İyon Odasının Mesafelere Karşı Doz Hızı Ölçümleri

Her Mesafedeki TM 23361 İyon Odasının Işınlama Süresi: 300 saniye			
Mesafe (cm)	Doz hızı ($\mu\text{Gy/dk}$)	Ort. Doz Hızı ($\mu\text{Gy/dk}$)	Değişim katsayısı, COV* (%)
30	20,30	20,23±0,06	0,282
	20,25		
	20,25		
	20,15		
	20,20		

Mesafe (cm)	Doz hızı (μGy/dk)	Ort. Doz Hızı (μGy/dk)	Değişim katsayısı, COV* (%)
35	14,85	14,79±0,04	0,283
	14,75		
	14,80		
	14,75		
	14,80		
40	11,20	11,24±0,04	0,372
	11,30		
	11,25		
	11,25		
	11,20		

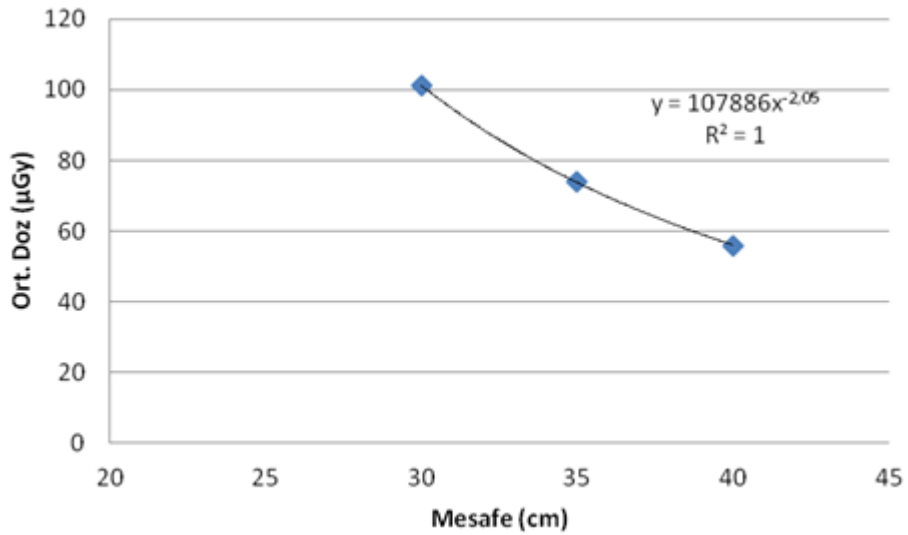
*COV: Değişim katsayısı (Coefficient of variation), %COV=100·σ/X_{ort}



Şekil 4.1 ‘‘Mesafe (cm)-Ort. Doz Hızı (μGy/dk)’’ grafiği

Çizelge 4.2 TM 23361 iyon odasının mesafelere karşı doz ölçümleri

Her Mesafedeki TM 23361 İyon Odasının Işınlanma Süresi: 300 saniye				
Mesafe (cm)	Doz (μGy)	P-T Düzeltmeli Doz (μGy)	Ort. Doz (μGy)	Değişim katsayısı, COV* (%)
30	101,60	101,29	101,07±0,277	0,274
	101,40	101,09		
	101,50	101,19		
	100,90	100,59		
	101,50	101,19		
35	74,39	74,16	73,87±0,215	0,291
	73,81	73,58		
	74,04	73,81		
	74,05	73,82		
	74,21	73,98		
40	56,02	55,85	56,03±0,239	0,427
	56,39	56,22		
	56,34	56,17		
	56,40	56,23		
	55,88	55,71		



Şekil 4.2 ‘‘Mesafe (cm)-Ort. Doz (μGy)’’ grafiği

Ölçüm esnalarındaki odanın ortalama hava basıncı 1010 hPa, ortalama sıcaklığı 21 °C'dir. Çizelge 4.3'te ki doz değerleri P-T (sıcaklık-basınç) düzeltmesi faktörüyle çarpılarak P-T düzeltmeli doz değerleri ayrıca gösterilmiştir. P-T düzeltmesi hesabı Ek-2'de anlatılmıştır.

4.1.2 Sistem bileşenlerinin ayarları ve dedektörün enerji kalibrasyonu

BC-408 plastik sintilatör ölçüm sisteminde dedektör çıkış sinyalleri, ana yükselteçte 0,5 µs puls şekillenim zamanıyla (shaping time) işlenmiştir. Ardından ADC dönüşüm kazancı (conversion gain) 2048 kanal olarak ayarlanmış ADC bölümünde analog sinyaller dijitalle çevrilerek, kanal değeri 1024 kanal olarak ayarlanmış çok kanallı analizörün hafızasında kaydedilmiştir. Fotoçoğaltıcı tüp üzerindeki ayar vidaları vasıtasıyla kazanç (gain) ve odak (focus) ayarları yapılarak PMT'deki fotoelektronların çoğaltılması işleminin ayarları yapılmıştır. Kazanç ayarının oranı ve odak ayarının oranı 6/3 olarak gerçekleştirilmiştir. Bu kurulama özgü olarak kullanılan Canberra 2022 yükseltecinin kaba kazanç (coarse gain) ayarı 10, ince kazanç (fine gain) ayarı 5/0 ve voltaj değeri dedektörün çalışma gerilimi olan 920 V şeklinde ayarlanmıştır. Sayım sistemindeki ölü zaman (dead time) değerini düşük tutmak için elektronik gürültülerden kaynaklanan pulsların işlenmesine izin vermemek için bir nevi filtreleme görevi sağlayan LLD (alt seviye değeri) %0,7 ve ULD (üst seviye değeri) %110 olarak bilgisayardaki Canberra Genie 2000 spektrum yazılım programı ile ayarlanmıştır. Böylece örneğin 16ncı kanaldan itibaren puls sayım işlemi gerçekleşmiştir. Daha sonra alınan tüm ölçümler bu bahsedilen ayarlara göre yapılmıştır.

Enerji kalibrasyonu bir veya iki enerjili referans radyonüklit kaynaklar kullanılarak yapıldı. BC-408 PS ile elde edilen spektrumlarda Compton Olayı gerçekleştiğinden herhangi bir fotopik gözlenmemiştir. Çünkü plastik sintilatör etkin atom numarası $Z_{\text{eff}}=3,4$ (Bkz. Ek-4) olan oldukça düşük bir değere sahiptir. Maksimum Compton Kenarının oluştuğu yerler, işlem kolaylığı açısından fotopik olarak değerlendirilip Çizelge 4.3'te gösterilen fotopik enerjilerinin MCA'da hangi kanala denk geldiği not alınarak Canberra Genie 2000 spektrum yazılım programındaki ilgili yere kaydedilmiştir. Böylece fotopik enerjilerinin denk geldiği kanal numaralarına karşı

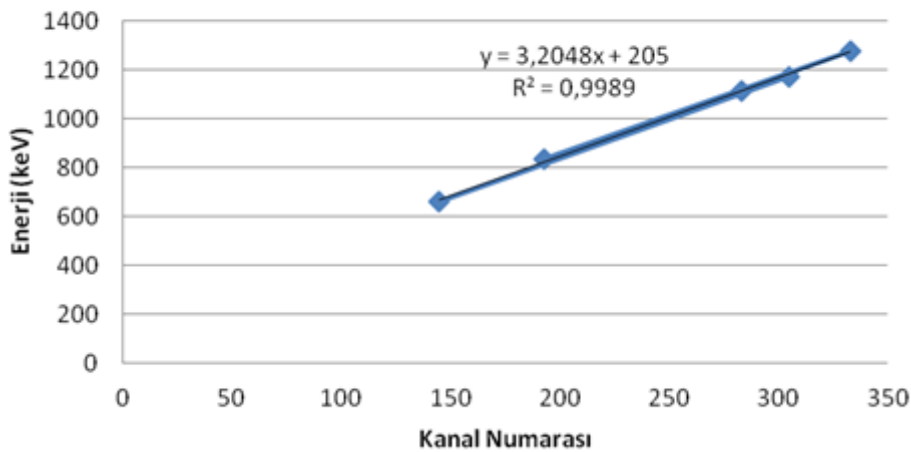
çizdirilen kalibrasyon eğrisi Şekil 4.3'te görüldüğü gibi doğrusal bir biçimde oluşmuştur. Bundan sonraki BC-408 PS ile yapılan tüm ölçümler bu kalibrasyona göre elde edilmiştir. Ama bu spektrumlar fotopik değerleriyle kalibre edildiği için BC-408 PS ile yapılan ölçümler sonucunda elde edilen spektrumların doğru analizi için maksimum Compton Kenarı enerjilerinden faydalanılarak çizilen kalibrasyon eğrisiyle işlem yapılmıştır.

Çizelge 4.3 BC-408 PS dedektörünün kalibrasyonu için alınan veriler

Referans İzotoplar	Gama Işını Enerjisi (Fotopik Enerjisi), E_γ (keV)	Maksimum Compton Kenarı Enerjisi, E_{Cmax} (keV)*	Kanal Numarası
^{137}Cs	661,66	477,34	145
^{54}Mn	834,88	639,25	193
^{65}Zn	1115,546	907,66	283
^{60}Co	1173,2	963,39	305
^{22}Na	1274,54	1061,71	333

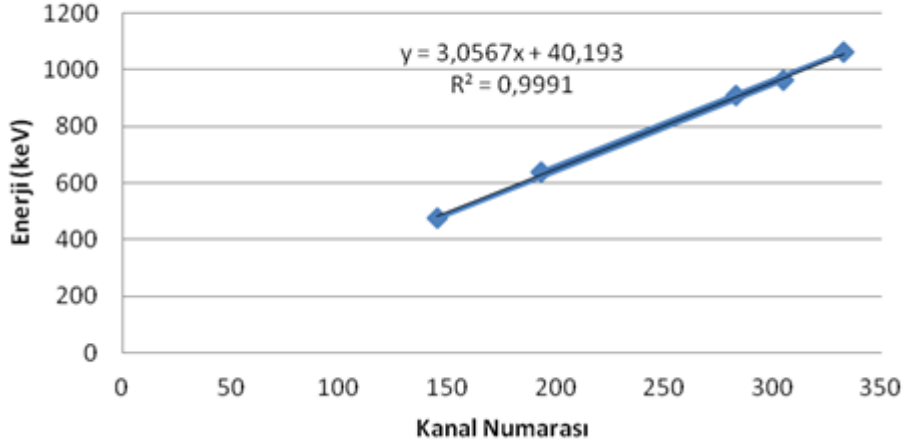
$$* E_{Cmax} = \frac{2E_\gamma^2}{511 + 2E_\gamma}$$

Kalibrasyon Eğrisi



Şekil 4.3 Fotopik enerjileriyle oluşturulan kalibrasyon eğrisi grafiği

Kalibrasyon Eğrisi



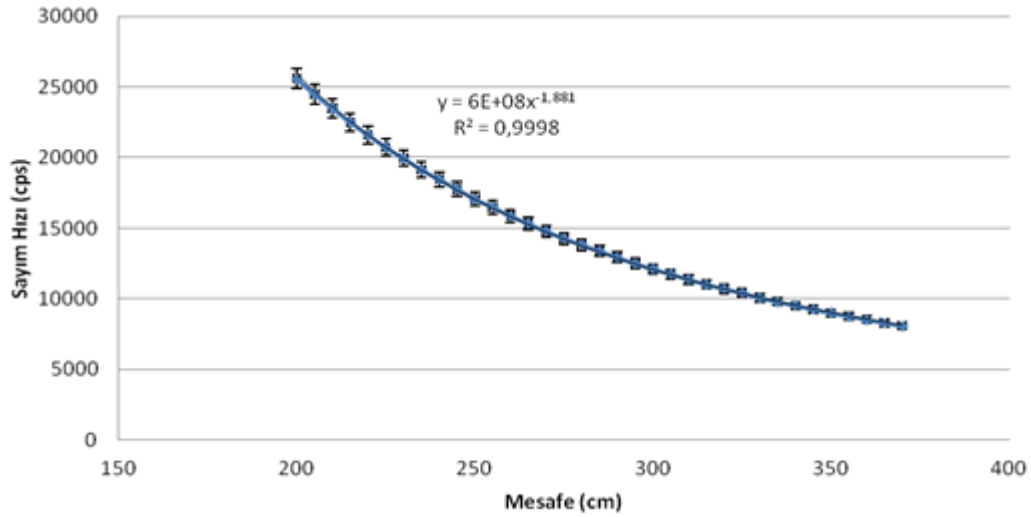
Şekil 4.4 Maksimum Compton Kenarı enerjileriyle oluşturulan kalibrasyon eğrisi grafiği

4.1.3 Sayım hızı ile doz hızı arasındaki ilişki

TM 23361 iyon odasıyla alınan doz/doz hızı ölçümleri, uzak mesafeli konumlar için düşük sinyal uyarısı verdiği için 30cm, 35cm ve 40 cm mesafeleri için alınmıştır ve BC-408 PS ile toplanan sayımların mesafeleri ölü zamanın fazlalığından dolayı 200 cm'den başlamıştır. Mesafelerdeki sayım ve sayım hızı (cps) değerlerinin tablosu Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Mesafeye karşılık çizilen sayım hızı (cps) grafiği Şekil 4.5'te gösterildiği gibidir. Bu eğri tıpkı Şekil 4.1'deki gibi üstel azalım davranış sergilemiştir. Bu da sayım hızı (cps) ile okunan doz hızı arasında güçlü bir bağıntı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.4 Mesafelere karşılık sayım ve cps değerleri

Ölçüm Mesafesi (cm)	Sayım	Sayım Hızı (cps) ±Belirsizliği
200	7674975	25583±727
205	7345714	24485±695
210	7047701	23492±667
215	6751374	22504±639
220	6479098	21596±613
225	6215861	20719±588
230	5984104	19947±567
235	5741602	19138±544
240	5537070	18456±524
245	5333909	17779±505
250	5120660	17068±485
255	4944614	16482±468
260	4760372	15867±451
265	4594836	15316±435
270	4434209	14780±420
275	4283106	14277±405
280	4144209	13814±392
285	4011926	13373±380
290	3879276	12930±367
295	3750470	12501±355
300	3632165	12107±344
305	3526103	11753±334
310	3409569	11365±323
315	3308748	11029±313
320	3207845	10692±304
325	3129318	10431±296
330	3021309	10071±286
335	2940173	9800±278
340	2853054	9510±270
345	2777429	9258±263
350	2700976	9003±256
355	2629276	8764±249
360	2559481	8531±242
365	2488140	8293±236
370	2424798	8082±230



Şekil 4.5 ‘‘Mesafe (cm)-Sayım Hızı (cps)’’ grafiği

4.1.4 Ölçeklendirme faktörüne (scaling factor) ulaşmak için BC-408 PS dedektörü ile toplanan spektrum eğrilerinin fit edilmesi

Bölüm 3.7’de anlatılan düzenekte 200 cm’den 3D radyometrik bencin gidebildiği son mesafe olan 370 cm’ye kadar her 5 cm mesafe artışı için 300 saniye boyunca spektrumlar toplanmıştır. Bu spektrum eğrilerinde ifade edilen her bir kanaldaki toplanan toplam sayım değerleri matematiksel işlem kolaylığı açısından sayım hızına (CPS) çevrildi ve bu eğriler CPS-Kanal eğrileri olacak şekilde yeniden oluşturulmuştur. CPS-Kanal eğrilerinin her biri fit edilerek bu eğrilerin fonksiyonları bulundu. Bu fit işlemleri için Excel Solver programı kullanılmıştır. Uyarlanmış bir eğrideki fonksiyonun nasıl bulunduğunu göstermek için aşağıda örnek amaçlı 370 cm mesafesindeki ölçümler gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 BC-408 PS ile her bir kanalda elde edilen toplam sayım ve cps değerleri

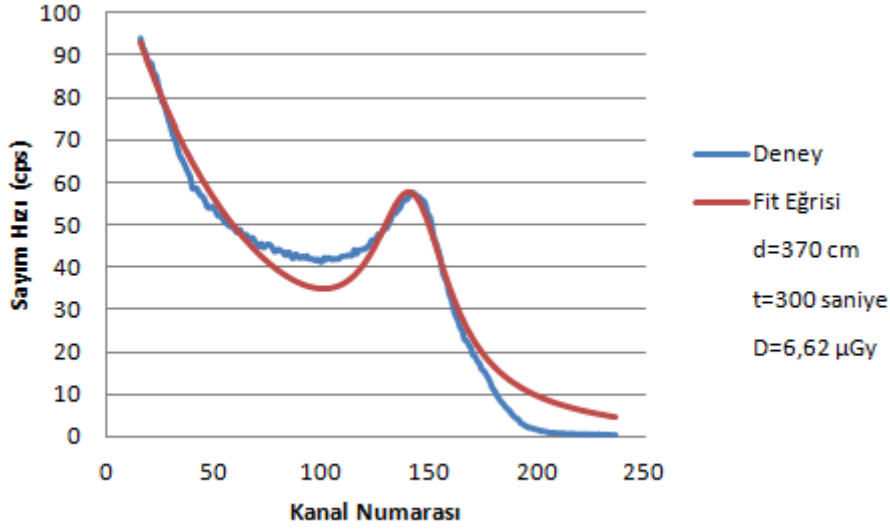
Kanal	Toplam Sayım	cps	Kanal	Toplam Sayım	cps	Kanal	Toplam Sayım	cps
16	28256	94,2	35	19690	65,6	54	15445	51,5
17	27636	92,1	36	19402	64,7	55	15193	50,6
18	27335	91,1	37	19084	63,6	56	15076	50,3
19	26822	89,4	38	18705	62,4	57	14959	49,9
20	26388	88,0	39	18432	61,4	58	14859	49,5
21	26490	88,3	40	17584	58,6	59	14961	49,9

Kanal	Toplam Sayım	cps	Kanal	Toplam Sayım	cps	Kanal	Toplam Sayım	cps
22	25829	86,1	41	17577	58,6	60	14565	48,6
23	25674	85,6	42	17604	58,7	61	14483	48,3
24	25057	83,5	43	17294	57,6	62	14681	48,9
25	24362	81,2	44	17092	57,0	63	14352	47,8
26	23779	79,3	45	16983	56,6	64	14178	47,3
27	23515	78,4	46	16645	55,5	65	14310	47,7
28	23002	76,7	47	16258	54,2	66	13963	46,5
29	22442	74,8	48	16207	54,0	67	14062	46,9
30	21931	73,1	49	16316	54,4	68	14078	46,9
31	21372	71,2	50	16201	54,0	69	13801	46,0
32	21024	70,1	51	15896	53,0	70	13620	45,4
33	20537	68,5	52	15641	52,1	71	13470	44,9
34	19980	66,6	53	15745	52,5	72	13678	45,6

Kanal	Toplam Sayım	cps	Kanal	Toplam Sayım	cps	Kanal	Toplam Sayım	cps
73	13391	44,6	113	12854	42,8	154	13151	43,8
74	13533	45,1	114	12826	42,8	155	12491	41,6
75	13634	45,4	115	13250	44,2	156	11594	38,6
76	13589	45,3	116	12955	43,2	157	11203	37,3
77	13397	44,7	117	13199	44,0	158	10831	36,1
78	13115	43,7	118	13244	44,1	159	10099	33,7
79	13173	43,9	119	13262	44,2	160	9673	32,2
80	13274	44,2	120	13326	44,4	161	9022	30,1
81	13124	43,7	121	13412	44,7	162	8509	28,4
82	13103	43,7	122	13587	45,3	163	8201	27,3
83	12856	42,9	123	13923	46,4	164	7720	25,7
84	13047	43,5	124	13924	46,4	165	7488	25,0
85	13060	43,5	125	13916	46,4	166	6869	22,9
86	12668	42,2	126	14332	47,8	167	6774	22,6
87	12684	42,3	127	14312	47,7	168	6483	21,6
88	12923	43,1	128	14538	48,5	169	6250	20,8
89	12712	42,4	129	14721	49,1	170	5747	19,2
90	12648	42,2	130	14770	49,2	171	5677	18,9
91	12795	42,7	131	15100	50,3	172	5318	17,7
92	12649	42,2	132	15416	51,4	173	5171	17,2
93	12812	42,7	133	15891	53,0	174	4722	15,7
94	12583	41,9	134	15818	52,7	175	4643	15,5

Kanal	Toplam Sayım	cps	Kanal	Toplam Sayım	cps	Kanal	Toplam Sayım	cps
95	12591	42,0	135	16057	53,5	176	4373	14,6
96	12575	41,9	136	16167	53,9	177	4136	13,8
97	12460	41,5	137	16535	55,1	178	3796	12,7
98	12570	41,9	138	16765	55,9	179	3399	11,3
99	12423	41,4	139	16766	55,9	180	3213	10,7
100	12379	41,3	140	16942	56,5	181	2915	9,7
101	12682	42,3	141	17184	57,3	182	2662	8,9
102	12542	41,8	142	17297	57,7	183	2453	8,2
103	12682	42,3	143	17217	57,4	184	2283	7,6
104	12604	42,0	144	16971	56,6	185	2074	6,9
105	12544	41,8	145	17005	56,7	186	1929	6,4
106	12621	42,1	146	16820	56,1	187	1790	6,0
107	12568	41,9	147	16743	55,8	188	1560	5,2
108	12597	42,0	148	16441	54,8	189	1399	4,7
109	12762	42,5	149	157763	52,6	190	1267	4,2
110	12793	42,6	150	15585	52,0	191	1189	4,0
110	12793	42,6	151	14840	49,5	192	935	3,1
111	12782	42,6	152	13991	46,6	193	874	2,9
112	12862	42,9	153	13656	45,5	194	744	2,5

Kanal	Toplam Sayım	cps	Kanal	Toplam Sayım	cps	Kanal	Toplam Sayım	cps
195	670	2,2	209	221	0,7	223	134	0,4
196	599	2,0	210	202	0,7	224	99	0,3
197	588	2,0	211	204	0,7	225	139	0,5
198	532	1,8	212	217	0,7	226	104	0,3
199	479	1,6	213	142	0,5	227	115	0,4
200	437	1,5	214	170	0,6	228	147	0,5
201	408	1,4	215	159	0,5	229	117	0,4
202	332	1,1	216	172	0,6	230	104	0,3
203	332	1,1	217	156	0,5	231	108	0,4
204	314	1,0	218	135	0,5	232	93	0,3
205	256	0,9	219	147	0,5	233	108	0,4
206	237	0,8	220	121	0,4	234	86	0,3
207	248	0,8	221	133	0,4	235	77	0,3
208	236	0,8	222	137	0,5	236	94	0,3



Şekil 4.6 BC-408 PS dedektör ile 370 cm mesafede deneysel spektruma göre Excel Solver programı ile uyarlanmış ‘‘Sayım Hızı (cps)-Kanal’’ grafiği

Çizelge 4.5’te gösterilen verilerle Şekil 4.6’daki mavi renkli eğri elde edildi. Şekil 4.6’daki kırmızı renkli eğri ise mavi renkli eğri baz alınarak Excel Solver programıyla uyarlanan eğridir. Fit işlemi sonucu elde edilen eğrinin fonksiyonu ise Eşitlik 4.1’deki gibi olur.

$$y \cong 114e^{-0,0155 \cdot x} + 44,996 \cdot \sqrt{\frac{142}{x}} \cdot \frac{1}{1+0,0022(x-142)^2} \quad \text{Eşitlik 4.1}$$

4.1.5 Ölçeklendirme faktörü (scaling factor) hesapları

Tezin asıl amacı olan ölçeklendirme faktörünün (scaling factor), BC-408 plastik sintilatöründen toplanan spektrum ile TM 23361 iyon odasıyla ölçülen doz arasında bir ilişki kurularak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.6 Ölçekleme faktörü 1 hesap tablosu

Ölçüm Mesafesi (cm)	Soğurulan Enerji (İntegral Hesabıyla) keV/kg	Soğurulan Doz (İntegral Hesabıyla) J/kg (Gy)*	Doz (Ölçülen) (Gy) (İyon Odası)*	Doz (İntegral Hesabıyla) / Doz (Ölçülen) (Ölçeklendirme Faktörü) A ₁
200	7289526518	1,17x10 ⁻⁶	2,27x10 ⁻⁶	1,94
205	6956533378	1,11x10 ⁻⁶	2,16x10 ⁻⁶	1,94
210	6681755061	1,07x10 ⁻⁶	2,06x10 ⁻⁶	1,92
215	6371356868	1,02x10 ⁻⁶	1,96x10 ⁻⁶	1,92
220	6154040489	9,86x10 ⁻⁶	1,87x10 ⁻⁶	1,90
225	5876643801	9,41x10 ⁻⁶	1,79x10 ⁻⁶	1,90
230	5644344989	9,04x10 ⁻⁶	1,71x10 ⁻⁶	1,90
235	5418663209	8,68x10 ⁻⁶	1,64x10 ⁻⁶	1,89
240	5208298477	8,34x10 ⁻⁶	1,57x10 ⁻⁶	1,89
245	5002877698	8,01x10 ⁻⁶	1,51x10 ⁻⁶	1,89
250	4825547934	7,73x10 ⁻⁶	1,45x10 ⁻⁶	1,88
255	4625046010	7,41x10 ⁻⁶	1,39x10 ⁻⁶	1,88
260	4458064246	7,14x10 ⁻⁶	1,34x10 ⁻⁶	1,88
265	4295616530	6,88x10 ⁻⁶	1,29x10 ⁻⁶	1,88
270	4155228375	6,66x10 ⁻⁶	1,24x10 ⁻⁶	1,87
275	4018085996	6,44x10 ⁻⁶	1,20x10 ⁻⁶	1,86
280	3874083989	6,21x10 ⁻⁶	1,16x10 ⁻⁶	1,86
285	3740480174	5,99x10 ⁻⁶	1,12x10 ⁻⁶	1,86
290	3639175171	5,83x10 ⁻⁶	1,08x10 ⁻⁶	1,85
295	3518211477	5,64x10 ⁻⁶	1,04x10 ⁻⁶	1,85
300	3407888573	5,46x10 ⁻⁶	1,01x10 ⁻⁶	1,85
305	3290597290	5,27x10 ⁻⁶	9,75x10 ⁻⁶	1,85
310	3191709888	5,11x10 ⁻⁶	9,44x10 ⁻⁶	1,85
315	3088029112	4,95x10 ⁻⁶	9,14x10 ⁻⁶	1,85
320	2987794880	4,79x10 ⁻⁶	8,86x10 ⁻⁶	1,85
325	2903003179	4,65x10 ⁻⁶	8,59x10 ⁻⁶	1,85
330	2825288606	4,53x10 ⁻⁶	8,33x10 ⁻⁶	1,84
335	2748218170	4,40x10 ⁻⁶	8,08x10 ⁻⁶	1,84
340	2665810607	4,27x10 ⁻⁶	7,85x10 ⁻⁶	1,84
345	2579956500	4,13x10 ⁻⁶	7,62x10 ⁻⁶	1,84
350	2514614355	4,03x10 ⁻⁶	7,40x10 ⁻⁶	1,84
355	2447356533	3,92x10 ⁻⁶	7,20x10 ⁻⁶	1,84
360	2382683621	3,82x10 ⁻⁶	7,00x10 ⁻⁶	1,83
365	2318085996	3,71x10 ⁻⁶	6,81x10 ⁻⁶	1,83
370	2257194245	3,62x10 ⁻⁶	6,62x10 ⁻⁶	1,83

Ölçeklendirme Faktörü A₁ Ortalaması	1,87
Ölçeklendirme Faktörü A₁ Standart Sapması	0,031

*Bu dönüştürme işleminde $\mu\text{Gy} = 10^{-6} \text{ Gy}$ ve $1 \text{ keV} = 1,602 \times 10^{-16} \text{ J}$

Çizelge 4.6'daki doz (hesaplanan)/doz (ölçülen) oranlarından oluşan ölçeklendirme faktörü, A₁ olarak adlandırılmıştır ve bu oranların aritmetik ortalaması 1,87 çıkmıştır. Ölçeklendirme faktörü olan A₁ değerlerinin hesapları için yapılan matematiksel işlemler Ek-8'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 Ölçkleme faktörü 2 hesap tablosu

Ölçüm Mesafe (cm)	Soğurulan Doz (Sigma Hesabıyla) J/kg (Gy)	Doz (Ölçülen) (Gy) (İyon Odası)*	Doz (Sigma Hesabıyla) / Doz (Ölçülen) (Ölçeklendirme Faktörü) A₂
200	1,08 x10 ⁻⁶	2,27x10 ⁻⁶	2,10
205	1,03 x10 ⁻⁶	2,16x10 ⁻⁶	2,10
210	9,87 x10 ⁻⁶	2,06x10 ⁻⁶	2,08
215	9,45 x10 ⁻⁶	1,96x10 ⁻⁶	2,08
220	9,05 x10 ⁻⁶	1,87x10 ⁻⁶	2,07
225	8,68 x10 ⁻⁶	1,79x10 ⁻⁶	2,06
230	8,34 x10 ⁻⁶	1,71x10 ⁻⁶	2,05
235	8,00 x10 ⁻⁶	1,64x10 ⁻⁶	2,05
240	7,71 x10 ⁻⁶	1,57x10 ⁻⁶	2,04
245	7,42 x10 ⁻⁶	1,51x10 ⁻⁶	2,04
250	7,10 x10 ⁻⁶	1,45x10 ⁻⁶	2,04
255	6,84 x10 ⁻⁶	1,39x10 ⁻⁶	2,04
260	6,58 x10 ⁻⁶	1,34x10 ⁻⁶	2,04
265	6,36 x10 ⁻⁶	1,29x10 ⁻⁶	2,03
270	6,13 x10 ⁻⁶	1,24x10 ⁻⁶	2,03
275	5,92 x10 ⁻⁶	1,20x10 ⁻⁶	2,03
280	5,73 x10 ⁻⁶	1,16x10 ⁻⁶	2,02
285	5,54 x10 ⁻⁶	1,12x10 ⁻⁶	2,02
290	5,35 x10 ⁻⁶	1,08x10 ⁻⁶	2,01
295	5,17 x10 ⁻⁶	1,04x10 ⁻⁶	2,01
300	5,01 x10 ⁻⁶	1,01x10 ⁻⁶	2,01
305	4,86 x10 ⁻⁶	9,75x10 ⁻⁶	2,01
310	4,70x10 ⁻⁶	9,44x10 ⁻⁶	2,01

Ölçüm Mesafe (cm)	Soğurulan Doz (Sigma Hesabıyla) J/kg (Gy)	Doz (Ölçülen) (Gy) (İyon Odası)*	Doz (Sigma Hesabıyla) / Doz (Ölçülen) (Ölçeklendirme Faktörü) A ₂
315	4,56x10 ⁻⁶	9,14x10 ⁻⁶	2,01
320	4,41x10 ⁻⁶	8,86x10 ⁻⁶	2,01
325	4,29x10 ⁻⁶	8,59x10 ⁻⁶	2,00
330	4,17x10 ⁻⁶	8,33x10 ⁻⁶	2,00
335	4,04x10 ⁻⁶	8,08x10 ⁻⁶	2,00
340	3,92x10 ⁻⁶	7,85x10 ⁻⁶	2,00
345	3,81x10 ⁻⁶	7,62x10 ⁻⁶	2,00
350	3,71x10 ⁻⁶	7,40x10 ⁻⁶	2,00
355	3,61x10 ⁻⁶	7,20x10 ⁻⁶	1,99
360	3,51x10 ⁻⁶	7,00x10 ⁻⁶	1,99
365	3,42x10 ⁻⁶	6,81x10 ⁻⁶	1,99
370	3,33x10 ⁻⁶	6,62x10 ⁻⁶	1,99
Ölçeklendirme Faktörü A₂ Ortalaması			2,03
Ölçeklendirme Faktörü A₂ Standart Sapması			0,032

*Bu dönüştürme işleminde $\mu\text{Gy} = 10^{-6} \text{ Gy}$

Çizelge 4.7'deki doz (hesaplanan)/doz (ölçülen) oranlarından oluşan ölçeklendirme faktörü, A₂ olarak adlandırılmıştır ve bu oranların aritmetik ortalaması 2,03 çıkmıştır. Ölçeklendirme faktörü olan A₂ değerlerinin hesapları için yapılan matematiksel işlemler Ek-6'da gösterilmiştir.

4.2 Radyonüklit Kaynaklarda Spektrumdan Toplanan Sayım Değerleriyle Doz Arasında İlişkinin İncelenmesi

¹³⁷Cs, ²⁴¹Am, ¹³³Ba, ⁶⁰Co, ²²Na, radyonüklit kaynaklarının spektrumlarındaki sayım değerleriyle, o sayım değerlerine karşılık gelen enerjilerin çarpımı BC-408 plastik sintilatörünün soğurduğu toplam enerjiyi verir. Bu enerji değerlerinin ölçüm süreleriyle çarpılıp sintilatörün kütlesine bölümünden BC-408 plastik sintilatörünün soğurduğu doz değerleri hesaplanır (Bkz. Ek-9). Hesaplanan bu doz değerlerinin, Ek-9'da hesabı gösterilen teorik doz değerleriyle karşılaştırılması sonucunda betaların etkisi yüzünden

herhangi bir ilişki oluşturulamamıştır. Betaların etkileri Çizelge 4.8'de doz hızları olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.8 Bazı tadyonüklit kaynaklar için, BC-408 PS dedektörü ile toplanan sayım değerleri ile mini-1 SmartION iyon odasıyla elde edilen doz hızlarının sonuçları

	BC-408 PS dedektörüyle elde edilen sayım hızı (cps) değerleri	mini-1 SmartION iyon odasıyla elde edilen doz hızı değerleri (ortam doğal fon etkisi çıkarılmış)	
		Kaynak kurşun zırhın içinde ve pencere açık ($\beta + \gamma$), doz hızı ($\mu\text{Gy/saat}$)	Kaynak kurşun zırhın içinde ve pencere kapalı (γ), doz hızı ($\mu\text{Gy/saat}$)
^{137}Cs	5938,13	26,17 \pm 0,28	0,35 \pm 0,11
^{133}Ba	3148,30	1,49 \pm 0,10	0,25 \pm 0,05
^{152}Eu	2992,05	2,09 \pm 0,13	0,59 \pm 0,08
^{60}Co	3443,82	1,61 \pm 0,09	0,60 \pm 0,05
^{22}Na	2855,77	4,31 \pm 0,20	0,24 \pm 0,05

5 SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, yaklaşık doku eşdeğeri olan BC-408 plastik sintilatör dedektörün tepkisi ISO s-Cs(0,662MeV) demet kalitesinde incelenmiştir. Dedektör materyaline verilen doz ile sayım hızı arasındaki ilişkinin bir ölçeklendirme faktörüyle temsil edilebilmesi için sayım sisteminin ölü zaman kayıplarının en az olduğu bir kurulum sağlamak amacıyla çeşitli sınamalar yapılmıştır. BC-408 PS dedektörü, düşük sayım hızlı bir elektronik sayım sistemine bağlı olduğundan (16 K ADC, 1 μ s sabit dönüştürme zamanlı) dolayı, sistemin ölü zamanının yüksek olmaması için radyometrik benç karşısındaki iki kaynaktan sadece düşük aktiviteteli (47 mCi) ^{137}Cs kaynağı kullanılmıştır ve belirli mesafeler için BC-408 plastik sintilatör dedektörüyle spektrum ölçümleri yapılmıştır. Verilen dozlar, PTW dan kalibrasyonlu TM 23361 iyon odasıyla hava kerma (doz) olarak değişik mesafelerde alınmıştır. Daha düşük aktiviteli (μCi mertebesinde) başka radyonüklit kaynakların kullanıldığı düşük aktiviteli radyonüklit kaynakların kullanıldığı durumda ise noktasal ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{65}Zn , ^{60}Co , ^{22}Na , referans radyonüklit kaynakları, sırasıyla bu radyonüklit kaynaklar için hazırlanmış özel bir tablaya yerleştirilerek belirli süreler için gama spektrumları toplanmıştır. Toplanan bu spektrumda etkin atom numarası $Z_{\text{eff}}=3,4$ gibi düşük bir değerde olduğundan sintilatörde fotopik gözlenmeyip Compton Olayının gözlenmesiyle bir ölçüm yapılmıştır. Spektrumlardaki sayım değerlerinin hafızaya kaydedildiği çok kanallı analizörde (MCA) enerji ayırımı söz konusu olmadığından toplam MCA kanal sayısı 2048 yerine 1024 olarak ayarlanmıştır. Spektrumda oluşan maksimum Compton yerinin tam olarak kestirilebilmesi için, iki kanaldaki verilerin tek bir kanala sığdırılarak keskin bir pik elde edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca yapılan çeşitli denemeler sonucu LLD (alt seviye değeri) %0,7 yapılarak ilk 15 kanalda elektronik gürültünün toplanan spektrumlardan ayırt edilmesi sağlanmıştır. Yapılan bu işlemlerle elde edilen enerji kalibrasyonunun eğrileri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de gösterilmiştir.

Üç boyutlu ^{137}Cs kaynak radyometrik benci üzerinde hizalanmış TM 23361 iyon odasıyla alınan doz/doz hızı ölçümleri için ayarlanan mesafeler 40 cm'nin üzerine çıkılamamıştır. Çünkü bu mesafeden itibaren doz/doz hızı ölçüm sonuçları, ölçüm

aralığı 2 μGy -20 mGy ile 12 $\mu\text{Gy/dk}$ -56 Gy/dk olan iyon odasının bu değerleri arasında olmamasındandır.

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Işınlama ve Kalibrasyon Laboratuvarında yüksek aktiviteli 8,58 Ci ve 47 mCi iki radyoaktif ^{137}Cs kaynağı bulunmaktadır. Deneylerde kullanılan kaynak ise 47 mCi aktiviteli ^{137}Cs kaynağı olmuştur. Bunun sebebi BC-408 PS ile spektrum toplarken ölü zamanın (dead time) her mesafede %15 altında kalmasına dikkat edilmiştir. Çünkü sinyallerin rastgele çakışmaları (random coincidence) ve üst üste binmeleri ölü zamanı artırdığından, sinyal kayıpları sonucu spektrumda okunan sayım değerinin olması gereken sayım değerinden daha az çıkmasına neden olur. Bu sebeple 200 cm'den daha küçük uzaklıklarda ölü zaman %15'in üzerinde olduğundan, 47 mCi aktiviteli kaynakla ölçüm alınırken 200 cm ve daha büyük uzaklıklarda spektrum toplanmıştır.

Tezin asıl amacı olan ölçeklendirme faktörünü (scaling factor) bulmak için yapılan işlem basamaklarının tümünün ayrıntıları bölüm Ek-6'da ve Ek-8'de açıklanmıştır. Elde edilen sonuçlar ise Çizelge 4.6'da ve Çizelge 4.7'de gösterilmiştir. Ölçümler sonucu elde edilen spektrum verileri kullanılarak "toplam sigma" olarak adlandırdığımız yöntemle hesaplanan ölçeklendirme (scaling) faktörü (A_2) sonuçları 1,99-2,10 aralığında bulunmuştur. Eğri uyarlama ile bir fonksiyon üzerinden "integral alma" yöntemiyle hesaplanan ölçeklendirme faktörü (A_1) sonuçları ise 1,83-1,94 aralığında bulunmuştur. Bu iki yöntem arasındaki uyumsuzluk %7,6 civarındadır. Bu uyumsuzluğun nedeni Şekil 4.6'da kullanılan fonksiyonun, ölçümlerden elde edilen sayım hızı (cps)-kanal eğrisiyle yeterli derecede uyuşmamasıdır. Ayrıca kolimatör kurşundaki saçılmalardan ve deney esnasındaki ölü zamandan (dead time) kaynaklanan sayımların kayıplarının etkisi olduğunda değerlendirilmektedir. Radyonüklit kaynaklar için Ek-9'da gösterilen matematiksel işlemlerle doz (spektrumdan hesaplanan) ve doz (teorik) değerlerinin karşılaştırılmaları yapılması için beta doz etkisinin dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle beta bozunmasını takiben gama ışını yayınlayan radyonüklit kaynaklar (^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{152}Eu , ^{60}Co ve ^{22}Na) ile yapılan deneylerde, beta geçişine de izin verecek incelikte (70keV'e kadar 7 mg/cm² Alüminize polyester) pencere kullanılarak beta+gama doz hızı ölçülmüştür. Sadece gama doz hızı ise bu pencereye

eşlenik ikinci pencere (250 mg/cm^2) kapatılarak büyük hacimli (450 cm^3) iyon odasıyla ölçülmüştür. Nokta kaynaklarda betaların geçişi engellenmediğinden betaların etkisi, gama kaynağı olarak tasarımlanan bu radyonüklit kaynakların verdiği doz hızlarını önemli derecede değiştirmektedir. Bunun nedeni, plastik sintilatörün yüklü parçacıklara (örneğin, beta/pozitron) karşı hassasiyeti daha yüksektir. Diğer bir ifadeyle aynı enerjideki betalar, fotonlardan daha fazla lüminesans ışığı oluşturarak fotokatottan daha çok elektron sökümüne yol açmaktadır. Bunun sonucunda, kaynaktan çıkan betalar/pozitronlar dedektör sayım hızını önemli ölçüde artırarak, lineer bir doz hızı davranışını bozmaktadır. 450 cm^3 mini-1 SmartION iyon odasıyla yapılan ölçümler sonucunda, üretici firmanın bu radyonüklit kaynaklarından betaların çıkmasını engelleyecek kalınlıkta kılıfı (kapsülsüz) koymadığı ortaya çıkmış ve gama ışınlarından yayılan dozdan daha fazla β parçacıklarının yaydığı doz görülmüştür. Bu ölçümler sonucunda, PS dedektörü sadece gama yayımlayıcılar dışında beta/alfa gibi yüklü parçacıkların etkisinde olması durumunda, PS dedektörüyle elde edilen sayımla gama dozu arasındaki ilişki doğru bir biçimde ifade edilemez.

Alınan tüm spektrumlardan ortam doğal fon spektrumu çıkarılarak net spektrumlar sayılmıştır ve bu spektrumların elde edilmesi için öncelikle Çizelge 4.7’de gösterilen mesafelerde kapsüllenmiş 47 mCi aktiviteli ^{137}Cs radyoaktif kaynağıyla, Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Işınlama ve Kalibrasyon Laboratuvarında spektrumlar toplanmıştır. Ardından aynı mesafeler için ortam doğal fon (background) spektrumları toplanmış ve her mesafe için 47 mCi aktiviteli ^{137}Cs kaynağı ile toplanan spektrumlardan ortam doğal fon (background) spektrumları çıkarılarak net spektrumlar elde edilmiştir. Benzer şekilde, radyonüklit kaynaklar içinde net spektrumlar elde etmek için öncelikle Bölüm 4.2’de bahsedilen her bir radyonüklit kaynak tablaya yerleştirilerek spektrumları toplanmış, daha sonra kaynak yokken bir ortam doğal fon (background) spektrumu toplanmış ve kaynaklardan gelen spektrumlardan ortam doğal fon (background) spektrumu çıkarılarak net spektrumlar elde edilmiştir.

Doz için standart sapma 30 cm’den 40 cm’ye kadar (40 cm dahil) alınan ölçümler sonucunda %0,27-%0,43 aralığında hesaplanmıştır. Ölçümlerdeki belirsizlik kaynaklarının belirsizlik değerleri; 200 cm’den 370 cm’ye kadar alınan sayım değerleri

için %0,036-%0,064 aralığında ve konumlama hatalarından kaynaklı mesafeler için ise %2,01 olarak hesaplanmıştır. Toplam belirsizlik hesabı ise %2,84 civarında bulunmuştur.

Gelecekteki başka çalışmalarda, bu deneysel kurulumla daha ince plastik sintilatörlerden elde edilecek veriler Monte Carlo simülasyonu ile da desteklenerek kullanılabilir. Böylelikle, plastik sintilatörlerin standart kapı geçiş monitörlerinde doğrudan doz gösterimi için ve medikal sahada aktif dozimetre olarak kullanılabilirliğine ilişkin çalışmalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

- Anonymous. 1992. Instrumentation in High Energy Physics. World Scientific
- Anonymous. 1993. Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry. ICRU, Report 51
- Anonymous. 2000. Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments. IAEA, Safety Reports Series No.16
- Anonymous. 2000. X and Gamma Reference Radiation for Calibrating Dosemeters and Doserate Meters and for Determining Their Response As a Function of Photon Energy. ISO;4037
- Anonymous. 2007a. Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice. IAEA, Technical Reports Series No.457
- Anonymous. 2007b. Terminology Used in Nuclear Safety And Radiation Protection. IAEA, Safety Glossary
- Birks, J. B. 1950. Scintillation Efficiency of Anthracene Crystals. Proceedings of the Physical Society. Proc. Phys. Soc., 63(11); 1294-1295.
- Beddar, A. S. Mackie, T. R. Attix, F. H. 1992. Water-Equivalent Plastic Scintillation Detectors for High-Energy Beam Dosimetry: I Physical Characteristics and Theoretical Consideration. Phys. Med. Biol., 37(10); 1883–1900.
- Bicron Corp., 2005. Saint-Gobain Crystal and Dedectors (Erişim tarihi: 24.03.2016)
- Bicron Corp., 2001. Web Sitesi <<http://www.crystals.saint-gobain.com>> Physical Constants of Saint-Gobain Crystals Plastic Scintillators (Erişim tarihi: 12.10.2015)

Bicron Corp., 2003a. Web Sitesi <<http://www.crystals.saint-gobain.com>>, Bases, Voltage Dividers, and Preamplifiers. Accessories for Scintillation Detectors (Erişim Tarihi: 21.03.2016)

Bicron Corp., 2003b. Web Sitesi <<http://www.crystals.saint-gobain.com>>, Introduction. Bases, Voltage Dividers, and Preamplifiers. Accessories for Scintillation Detectors (Erişim Tarihi: 21.03.2016)

Bicron Corp., 2005. Web Sitesi <<http://www.dedectors.saint-gobain.com>> BC-400, BC-404, BC-408, BC-412, BC-416 Premium Plastic Scintillators (Erişim Tarihi: 06.07.2015)

Frelin, A. M. Fontbonne, J. M. Ban, G. Colin, J. Labalme, M. 2008. Comparative Study of Plastic Scintillators for Dosimetric Applications. IEEE Transactions on Nuclear Science, 55(5); 2749-2756.

Ishikawa, M. Bengua, G. Sutherland, K. L. Hiratsuka, J. Katoh, N. Shimizu, S. Aoyama, H. Fujita, K. Yamazaki, R. Horita, K. Shirato, H. 2009. A Feasibility Study of Novel Plastic Scintillation Dosimetry with Pulse-Counting Mode. Phys. Med. Biol., 54(2009); 2079-2092.

Jordan, D. V. Reeder, P. L. Todd, L. C. Warren, G. A. McCormick, K. R. Stephens, D. L. Geelhood, B. D. Alzheimer, J. M. Crowell, S. L. Sliger, W. A. 2007. Advanced Large-Area Plastic Scintillator Project (ALPS): Final Report

Knoll, G. F. 2000. Radiation Detectibn and Measurement Third Edition. John Wiley & Sons, 802, New York.

Lacroix, F. Beddar, A. S. Guillot, M. Beaulieu, L. Gingras, L. 2009. A Design Methodology Using Signal-to-Noise Ratio for Plastic Scintillation Detectors Design and Performance Optimization. AAPM, Med. Phys. 36(11); 5214-5220

Nucléide, Web Sitesi <<http://www.nucleide.org>> (Erişim Tarihi: 17.08.2015)

NIST, Web Sitesi <<http://physics.nist.gov>> X-Ray Mass Attenuation Coefficients
(Erişim tarihi: 20.12.2015)

PTW, 2012. Web Sitesi <<http://www.ptw.de>> (Erişim Tarihi: 29.03.2016)

University of Virginia, 2013. <<https://www.med-ed.virginia.edu>> (Erişim Tarihi:
22.05.2016)

Web Sitesi <<http://dedocz.com>> (Erişim Tarihi: 23.03.2016)

Web Sitesi <<http://drgstoothpix.com>> (Erişim Tarihi: 22.05.2016)

Web Sitesi <<http://www.expertsmind.com>> (Erişim Tarihi: 22.05.2016)

Web Sitesi <<http://www.zamandayolculuk.com>> 1998. (Erişim Tarihi: 27.07.2015)

Yücel, H. 2016. Haluk Yücel Radyasyon Dedeksiyonu ve Ölçümü Ders Notları. Ankara
Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü

EKLER

Ek-1

Ters Kare Metodu

Herhangi bir mesafedeyken TM 23361 iyon odasıyla ölçülen dozdan yararlanarak ters kare metodu ile başka mesafelerdeki dozlar hesaplanabilir.

$$D' = D \cdot \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 \quad (1)$$

Burada R_1 : dozun ölçüldüğü mesafe, R_2 : dozun hesaplanacak olan mesafesi, D : R_1 mesafesinde ölçülen doz, D' : R_2 mesafesinde hesaplanan dozdur.

Ek-2

Sıcaklık-Basınç Düzeltmesi

$$k_{TP} = \frac{(273,2 + T) \cdot P_0}{(273,2 + T_0) \cdot P} \quad (2)$$

Burada k_{TP} : sıcaklık-basınç düzeltme faktörü, normal şartlar altındaki sıcaklık T_0 : 22⁰C, normal şartlar altındaki basınç P_0 = 101,33 kPa, P: iyon odasıyla doz ölçümü anındaki basınç, T: iyon odasıyla doz ölçümü anındaki sıcaklıktır.

Bu faktör, iyon odasıyla ölçülen doz değerleriyle çarpılarak olması gereken doz sonuçları bulunur.

Ek-3

Net Spektrumların Bulunmasında Stripping Yöntemi

BC-408 PS dedektörüyle ^{137}Cs kaynağından gelen radyasyonla toplanan spektrumların, ortam doğal fon etkisi (background) spektrumunun çıkarımı sonucu geriye kalan net spektrumların bulunmasında kullanılan yöntem stripping (sıyırma) yöntemi denir ve aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$Net = S - \frac{t_S}{t_B} \times B \quad (3)$$

Burada Net: sayımın son değeri, S: kaynağın oluşturduğu sayım, B: ortam doğal fon etkisinden gelen sayım, t_S : kaynaktan gelen radyasyonla toplanan spektrumun oluşma süresi, t_B : ortam doğal fon etkisiyle toplanan spektrumun oluşma süresidir.

Ek-4

BC-408 PS Dedektöründeki Plastik Sintilatör Malzemesinin Ortalama Atom Numarasının Hesaplanması

Çözünümlü polivinil toulen ve çözücüsü p-terphenyl olan bu organik bileşiğin tam sayıya karşılık gelen bir atom numarası (Z) değeri yoktur. Bu yüzden imalatçı firmadan alınan hidrojen sayılarından, karbon sayılarından ve elektron yoğunluğundan atom numarası değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$H: 5,23 \times 10^{22} \text{ atom} \cdot \text{cm}^3$$

$$C: 4,74 \times 10^{22} \text{ atom} \cdot \text{cm}^3$$

$$\text{Birim hacimdeki elektron sayısı: } 3,37 \times 10^{23} \text{ elektron} \cdot \text{cm}^3$$

$$1 \text{ cm}^3 \text{ de ki hidrojen ve karbon atomlarının toplam sayısı (H+C): } 9,97 \times 10^{22} \text{ atom} \cdot \text{cm}^{-3}$$

(4) numaralı eşitlikte gösterilen elektronların toplam atom başına sayısı, BC-408 PS malzemesinin atom numarasını verir.

$$(Z_{PS})_{ortalama} = \frac{3,37 \times 10^{23}}{9,97 \times 10^{22}} = 3,4 \quad (4)$$

Ek-5

BC-408 Plastik Sintilatörün Kütle Hesabı

BC-408 Plastik sintilatörü silindir şeklinde ve 3"x3" boyutlarındadır.

1 inç=2,54 cm ise 3 inç=7,62 cm olduğundan plastik sintilatörün yüksekliği 7,62cm ve yarıçapı $7,62 / 2 = 3,81$ cm olur.

$$A_{PS} = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 3,81^2 = 45,60367 \text{ cm}^2 \quad (5)$$

$$V_{PS} = A_{PS} \cdot h = 45,60367 \cdot 7,62 = 347,49997 \text{ cm}^3 \quad (6)$$

$$\rho_{PS} = 1,032 \text{ g/cm}^3 \quad (7)$$

$$m_{PS} = V_{PS} \cdot \rho_{PS} = 0,35862 \text{ kg} \quad (8)$$

Burada; A_{PS} : plastik sintilatörün yüzey alanı, V_{PS} : plastik sintilatörün hacmi, ρ_{PS} : plastik sintilatörün yoğunluğu, m_{PS} : plastik sintilatörün kütlesi, r: plastik sintilatörün yarıçapı, h: plastik sintilatörün yüksekliğidir.

Ek-6

Spektrum Verilerinden Hesaplanan (Sigma Yöntemi) Ölçeklendirme (Scaling) Faktörü

Spektrumdan elde edilen kanal başına sayım ile TM 23361 iyon odasıyla ölçülen doz arasındaki ilişki bir ölçeklendirme faktörüyle tanımlanmıştır. Ölçeklendirme faktörünün matematiksel hesabı aşağıda gösterilmiştir.

$$Doz = A_2 \frac{\Delta t}{m} \sum_i^j \left(\frac{cps}{kanal} \right)_i \cdot E_i \quad (9)$$

Burada; A_2 : ölçeklendirme (scaling) faktörü, m : BC-408 plastik sintilatörün kütlesi, Δt : ölçüm süresi ve E_i : i . kanaldaki enerji değeridir. Spektrumda değerlendirmeye alınan başlangıç kanalı $i= 16$ ve bitiş kanalı $j= 236$, BC-408 PS kütlesi $m= 0,35862$ kilogram (Bkz. Ek-5), ölçüm süresi $\Delta t= 300$ saniyedir.

200 cm mesafesinden 370 cm mesafesine kadar 5'er cm aralıklarla toplanan her mesafede spektrum toplanmıştır. Ayrıca 30 cm'de iyon odasıyla ölçülen doz değerinden ters kare metoduyla (Bkz. Ek-1), spektrum toplanan tüm mesafelerdeki doz değerleri bulunmuştur. Hangi mesafedeki toplanan spektrumdan hesap yapılacaksa o mesafenin spektrumundaki 16-236 numaralı kanalları arasındaki cps değerleri, enerji bilgileri ve ters kare metoduyla hesaplanan doz değerleri (10) numaralı eşitlikte yerine konmuştur. İlgili mesafeler için ters kare metoduyla hesaplanan doz değerleri ve (10) numaralı eşitliğin çözümü sonunda bulunan ölçeklendirme faktörü (A_2) değerleri çizelge 4.8'deki tabloda gösterilmiştir.

$$Doz = A_2 \frac{300(s)}{0,35862(kg)} \sum_{16}^{236} \left(\frac{cps}{kanal} \right)_i \cdot E_i (keV) \quad (10)$$

Ek-7**Polivinil Toluen (PVT) Esaslı Plastikın Enerjilere Göre Enerji Soğurma Katsayıları (μ_{en}/ρ) ve Kuru Havanın Toplam Kütle Azalım Katsayıları (μ/ρ)**

Çizelge Ek-7.1 NIST veri tabanından hesaplanan polivinil toluen (PVT) esaslı plastikın enerjilere göre enerji soğurma katsayıları (μ_{en}/ρ) ve kuru havanın toplam kütle azalım katsayıları (μ/ρ) (NIST 2015)

Enerji (keV)	PVT μ_{en}/ρ (m^2/kg)	Kuru Hava μ/ρ (m^2/kg)	Enerji (keV)	PVT μ_{en}/ρ (m^2/kg)	Kuru Hava μ/ρ (m^2/kg)
14,41	0,06795	0,20277	511,00	0,00297	0,00864
26,34	0,01147	0,05090	661,66	0,00318	0,00775
59,54	0,00219	0,01884	778,90	0,00314	0,00718
88,33	0,00223	0,01612	834,80	0,00311	0,00695
121,78	0,00246	0,01460	867,38	0,00309	0,00683
122,06	0,00246	0,01459	964,08	0,00305	0,00649
136,47	0,00256	0,01406	1085,84	0,00298	0,00613
160,61	0,00270	0,01330	1089,74	0,00298	0,00612
223,24	0,00293	0,01194	1112,76	0,00297	0,00606
244,70	0,00298	0,01159	1115,50	0,00322	0,00605
276,40	0,00305	0,01106	1173,20	0,00285	0,00589
302,85	0,00311	0,01064	1212,95	0,00291	0,00579
344,28	0,00315	0,01017	1274,50	0,00288	0,00564
356,01	0,00316	0,01004	1299,14	0,00287	0,00559
383,85	0,00318	0,00973	1332,50	0,00293	0,00552
411,12	0,00320	0,00946	1408,01	0,00281	0,00536
443,97	0,00321	0,00918			

Ek-8

Fit Edilen Eğriden Yararlanılarak Hesaplanan (İntegral Yöntemi) Ölçeklendirme (Scaling) Faktörü

$$Doz = A_1 \cdot \frac{\Delta t}{m} \int_i^j y(x) \cdot E(x) \cdot dx \quad (11)$$

Burada; A_1 : ölçeklendirme (scaling) faktörü, m : BC-408 plastik sintilatörün kütlesi, Δt : ölçüm süresi, x : şekil 4.4'de gösterilen enerji kalibrasyon eğrisindeki kanal numarası eksenini, $y(x)$: cps olarak fit edilmiş fonksiyon, $E(x)$: x değişkenindeki enerji (keV). Spektrumda değerlendirmeye alınan başlangıç kanalı $i=16$ ve bitiş kanalı $j=236$, BC-408 PS kütlesi $m=0,35862$ kilogram (Bkz. Ek-5), ölçüm süresi $\Delta t=300$ saniyedir.

200 cm mesafesinden 370 cm mesafesine kadar 5'er cm aralıklarla toplanan her mesafedeki spektrum eğrileri fit edilmiştir. Ayrıca 30 cm'de iyon odasıyla ölçülen doz değerinden ters kare metoduyla (Bkz. Ek-1), spektrum toplanan tüm mesafelerdeki doz değerleri bulunmuştur. Hangi mesafedeki toplanan spektrum eğrisinden fit edilmiş fonksiyonla hesap yapılacaksa o mesafedeki fit edilmiş $y(x)$ fonksiyonu, yine o mesafe için ters kare metoduyla hesaplanan doz değeri ve kalibrasyon eğrisiyle bulunmuş $E(x)$ fonksiyonu (12) numaralı eşitlikte yerine konmuştur. İlgili mesafeler için ters kare metoduyla hesaplanan tüm doz değerleri ve (12) numaralı eşitliğin çözümü sonunda bulunan ölçeklendirme faktörü (A_1) değerleri çizelge 4.6'daki tabloda gösterilmiştir.

$$Doz = A_1 \cdot \frac{300(s)}{0,35862(kg)} \int_{16}^{236} y(x) \cdot E(x) \cdot dx \quad (12)$$

Örnek olarak göstermek amacıyla 370 cm mesafesi için yapılan matematiksel işlemler aşağıda gösterilmiştir.

370 cm mesafesinde BC-408 PS dedektörüyle toplanmış şekil 4.6'da gösterilen mavi renkli spektrum eğrisinin, kırmızı renkle gösterilen fit edilmiş şeklinin fonksiyonu (13) numaralı eşitlikte gösterilmiştir.

$$y \cong 114e^{-0,0155 \cdot x} + 44,996 \cdot \sqrt{\frac{142}{x}} \cdot \frac{1}{1+0,0022(x-142)^2} \quad (13)$$

Şekil 4.4'de gösterilen enerji kalibrasyon eğrisinin fonksiyonu (14) numaralı eşitlikte gösterilmiştir.

$$E(x) = 3,057x + 40,19 \quad (14)$$

$$x = \frac{E - 40,193}{3,057} \quad \text{ise} \quad dx = \frac{dE}{3,057} \quad (15)$$

O halde, yukarıdaki eşitliklerle oluşan (16) numaralı eşitliğin çözümü ölçekleme faktörünün (A_1) sonucunu verir.

$$6,62 \cdot 10^{-7} (Gy) = A_1 \cdot \frac{300(s)}{0,35862(kg)} \cdot \int_{89,1}^{761,6} \left(114e^{-0,0155 \left(\frac{E-40,19}{3,057} \right)} + \frac{44,996 \sqrt{\frac{142}{\left(\frac{E-40,19}{3,057} \right)}}}{1+0,0022 \left(\frac{E-40,19}{3,057} - 142 \right)^2} \right) \cdot E \cdot \frac{dE}{3,057} \quad (16)$$

$$\frac{300(s)}{0,35862(kg)} \cdot \int_{89,1}^{761,6} \left(114e^{-0,0155 \left(\frac{E-40,19}{3,057} \right)} + \frac{44,996 \sqrt{\frac{142}{\left(\frac{E-40,19}{3,057} \right)}}}{1+0,0022 \left(\frac{E-40,19}{3,057} - 142 \right)^2} \right) \cdot E \cdot \frac{dE}{3,057} = ? \quad (17)$$

(17) numaralı integralin çözümü aşağıda gösterilmiştir.

$$= \frac{114 \cdot 300(s)}{3,057 \cdot 0,35862(kg)}$$

$$\int_{89,1}^{761,6} e^{-0,0155\left(\frac{E-40,19}{3,057}\right)} \cdot E \cdot dE + \frac{44,996 \cdot 300(s)}{3,057 \cdot 0,35862(kg)} \int_{89,1}^{761,6} \frac{\frac{142}{\left(\frac{E-40,19}{3,057}\right)}}{1 + 0,0022\left(\frac{E-40,19}{3,057} - 142\right)^2} \cdot E \cdot dE \quad (18)$$

$$\int_{89,1}^{761,6} \frac{\frac{142}{\left(\frac{E-40,19}{3,057}\right)}}{1 + 0,0022\left(\frac{E-40,19}{3,057} - 142\right)^2} \cdot E \cdot dE = ? \quad (19)$$

$$\int_{89,1}^{761,6} \frac{\frac{142}{\left(\frac{E-40,19}{3,057}\right)}}{1 + 0,0022\left(\frac{E-40,19}{3,057} - 142\right)^2} \cdot E \cdot dE = 20,8349 \cdot \quad (20)$$

$$\int_{89,1}^{761,6} \frac{\sqrt{\frac{1}{E - \frac{4019}{100}}}}{11(0,327118\left(E - \frac{4019}{100}\right) - 142)^2 + 1} \cdot E \cdot dE$$

İntegral şu aşamadan sonra belirsiz integral olarak çözümlenip, işlem basamaklarının en sonunda tekrar belirli integral haline getirilecektir.

$$u = \sqrt{\frac{E - 4019}{100}} \quad \text{ise} \quad du = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{E - \frac{4019}{100}}} \quad (21)$$

$$= 41,6698 \int \frac{4247,84(u^2 + 40,19)}{u^4 - 868,188u^2 + 192685} du \quad (22)$$

$$=177007 \int \frac{u^2 + 40,19}{u^4 - 868,188u^2 + 192685} du \quad (23)$$

$$=177007 \int \frac{0,0457787 - 0,0108701}{u^2 + 41,7864u + 438,959} du + 177007 \int \frac{0,0108701u + 0,0457787}{u^2 - 41,7864u + 438,959} du \quad (24)$$

$$=177007 \int \left(\frac{0,272889}{u^2 + 41,7864u + 438,959} - \frac{0,00543503(2u + 41,7864)}{u^2 + 41,7864u + 438,959} \right) du +$$

$$177007 \int \frac{0,0108701u + 0,0457787}{u^2 - 41,7864u + 438,959} du \quad (25)$$

$$= -962,038 \int \frac{2u + 41,7864}{u^2 + 41,7864u + 438,959} du + 48303,3 \int \frac{1}{u^2 + 41,7864u + 438,959} du +$$

$$177007 \int \frac{0,0108701u + 0,0457787}{u^2 - 41,7864u + 438,959} du \quad (26)$$

$$s = u^2 + 41,7864u + 438,959 \quad \text{ise} \quad ds = (2u + 41,7864)du \quad (27)$$

$$= -962,038 \int \frac{1}{s} ds + 48303,3 \int \frac{1}{u^2 + 41,7864u + 438,959} du +$$

$$177007 \int \frac{0,0108701u + 0,0457787}{u^2 - 41,7864u + 438,959} du \quad (28)$$

$$= -962,038 \log(s) + 48303,3 \int \frac{1}{(u + 20,8932)^2 + 2,43275} du +$$

$$117007 \int \frac{0,0108701u + 0,0457787}{u^2 - 41,7864u + 438,959} du \quad (29)$$

$$p = u + 20,8932 \quad \text{ise} \quad dp = du \quad (30)$$

$$= -962,038 \log(s) +$$

$$48303,3 \int \frac{1}{p^2 + 2,43275} dp + 177007 \int \frac{0,0108701u + 0,0457787}{u^2 - 41,7864u + 438,959} du \quad (31)$$

$$= -962,038 \log(s) + 48303,3 \int \frac{0,411058}{0,411058p^2 + 1} dp + 177007 \int \frac{0,0108701u + 0,0457787}{u^2 - 41,7864u + 438,959} du \quad (32)$$

$$= -962,038 \log(s) + 19855,4 \int \frac{1}{0,411058p^2 + 1} dp + 177007 \int \frac{0,0108701u + 0,0457787}{u^2 - 41,7864u + 438,959} du \quad (33)$$

$$w = 0,641138p \quad \text{ise} \quad dw = 0,641138dp \quad (34)$$

$$= -962,038 \log(s) + 30969,1 \int \frac{1}{w^2 + 1} dw + 177007 \int \frac{0,0108701u + 0,0457787}{u^2 - 41,7864u + 438,959} du \quad (35)$$

$$= -962,038 \log(s) + 30969,1 \tan^{-1}(w) + 177007 \int \frac{0,0108701u + 0,0457787}{u^2 - 41,7864u + 438,959} du \quad (36)$$

$$= -962,038 \log(s) + 30969,1 \tan^{-1}(w) + 177007 \int \left(\frac{0,00543503(2u - 41,7864)}{u^2 - 41,7864u + 438,959} + \frac{0,272889}{u^2 - 41,7864u + 438,959} \right) du \quad (37)$$

$$= -962,038 \log(s) + 30969,1 \tan^{-1}(w) + 962,038 \int \frac{2u - 41,7864}{u^2 - 41,7864u + 438,959} du + 48303,3 \int \frac{1}{u^2 - 41,7864u + 438,959} du \quad (38)$$

$$v = u^2 - 41,7864u + 438,959 \quad \text{ise} \quad dv = (2u - 41,7864)du \quad (39)$$

$$= -962,038 \log(s) + 30969,1 \tan^{-1}(w) + 962,038 \int \frac{1}{v} dv + 48303,3 \int \frac{1}{u^2 - 41,7864u + 438,959} du \quad (40)$$

$$= -962,038 \log(s) + 30969,1 \tan^{-1}(w) + 962,038 \log(v) + 48303,3 \int \frac{1}{(u - 20,8932)^2 + 2,43275} du \quad (41)$$

$$z = u - 20,8932 \quad \text{ise} \quad dz = du \quad (42)$$

$$= -962,038 \log(s) + 30969,1 \tan^{-1}(w) + 962,038 \log(v) + 48303,3 \int \frac{1}{z^2 + 2,43275} dz \quad (43)$$

$$= -962,038 \log(s) + 30969,1 \tan^{-1}(w) + 962,038 \log(v) + 48303,3 \int \frac{0,411058}{0,411058z^2 + 1} dz \quad (44)$$

$$= -962,038 \log(s) + 30969,1 \tan^{-1}(w) + 962,038 \log(v) + 19855,4 \int \frac{1}{0,411058z^2 + 1} dz \quad (45)$$

$$l = 0,641138z \quad \text{ise} \quad dl = 0,641138dz \quad (46)$$

$$= -962,038 \log(s) + 30969,1 \tan^{-1}(w) + 962,038 \log(v) + 30969,1 \int \frac{1}{l^2 + 1} dl \quad (47)$$

$$= -962,038 \log(s) + 30969,1 \tan^{-1}(w) + 962,038 \log(v) + 30969,1 \tan^{-1}(l) + C \quad (48)$$

$$= -962,038 \log(s) + 30969,1 \tan^{-1}(w) + 962,038 \log(v) + 30969,1 \tan^{-1}(0,641138z) + c \quad (49)$$

$$= -962,038 \log(s) + 30969,1 \tan^{-1}(w) + 962,038 \log(v) - 30969,1 \tan^{-1}(13,3954 - 0,641138u) + C \quad (50)$$

$$= -962,038 \log(s) + 30969,1 \tan^{-1}(0,641138p) + 962,038 \log(v) - 30969,1 \tan^{-1}(13,3954 - 0,641138u) + C \quad (51)$$

$$= -962,038 \log(s) + 30969,1 \tan^{-1}(13,3954 + 0,641138u) + 962,038 \log(v) - 30969,1 \tan^{-1}(13,3954 - 0,641138u) + C \quad (52)$$

$$= -962,038 \log(s) + 30969,1 \tan^{-1}(13,3954 + 0,641138u) + 962,038 \log(u^2 - 41,7864u + 438,959) - 30969,1 \tan^{-1}(13,3954 - 0,641138u) + C \quad (53)$$

$$= -962,038 \log(u^2 + 41,7864u + 438,959) + 30969,1 \tan^{-1}(13,3954 + 0,641138u) + 962,038 \log(u^2 - 41,7864u + 438,959) - 30969,1 \tan^{-1}(13,3954 - 0,641138u) + C \quad (54)$$

$$= 962,038 \log \left(\frac{E - 4,17864\sqrt{100E - 4019} + 398,769}{E + 4,17864\sqrt{100E - 4019} + 398,769} \right) + 30969,1 \tan^{-1} \left(13,3954 + 0,0641138\sqrt{100E - 4019} \right) - 30969,1 \tan^{-1} \left(13,3954 - 0,0641138\sqrt{100E - 4019} \right) + C \quad (55)$$

$$\int_{89,1}^{761,6} \frac{\frac{142}{\left(\frac{E - 40,19}{3,057}\right)}}{1 + 0,0022\left(\frac{E - 40,19}{3,057} - 142\right)^2} \cdot E \cdot dE = \left(\begin{aligned} &962,038 \log \left(\frac{E - 4,17864\sqrt{100E - 4019} + 398,769}{E + 4,17864\sqrt{100E - 4019} + 398,769} \right) + \\ &30969,1 \tan^{-1} \left(13,3954 + 0,0641138\sqrt{100E - 4019} \right) - \\ &30969,1 \tan^{-1} \left(13,3954 - 0,0641138\sqrt{100E - 4019} \right) \end{aligned} \right)_{89,1}^{761,6} \quad (56)$$

$$\int_{89,1}^{761,6} e^{-0,0155\left(\frac{E-40,19}{3,057}\right)} \cdot E \cdot dE = 1,22602 \int_{89,1}^{761,6} e^{-0,00507E} \cdot E \cdot dE \quad (57)$$

İntegral şu aşamadan sonra belirsiz integral olarak çözümlenip, işlem basamaklarının en sonunda tekrar belirli integral haline getirilecektir.

$$\text{Kısmi integral alma işlemini } \int f \cdot dg = f \cdot g - \int g \cdot df \text{ eşitliğinde gösterilirse} \quad (58)$$

$$f = E \quad \text{ve} \quad dg = e^{\frac{-507E}{100000}} dE \quad \text{ise} \quad (59)$$

$$df = dE \quad \text{ve} \quad g = -\frac{100000}{507} \int e^{\frac{507E}{100000}} dE \quad \text{olur.} \quad (60)$$

$$\int e^{-0,00507E} \cdot E \cdot dE = -\frac{100000}{507} e^{\frac{-507E}{100000}} E + \frac{100000}{507} \int e^{\frac{-507E}{100000}} dE \quad (61)$$

$$u = -\frac{507E}{100000} \quad \text{ise} \quad du = -\frac{507}{100000} dE \quad (62)$$

$$= -\frac{100000}{507} e^{\frac{-507E}{100000}} E - \frac{10^{10}}{257049} \int e^u du \quad (63)$$

$$= -\frac{100000}{507} e^{\frac{-507E}{100000}} E - \frac{10^{10}}{257049} e^u + C \quad (64)$$

$$= -\frac{100000}{507} e^{\frac{-507E}{100000}} E - \frac{10^{10}}{257049} e^{\frac{-507E}{100000}} + C \quad (65)$$

$$= -\frac{10^5 e^{\frac{-507E}{100000}} (507E + 10^5)}{257049} + C \quad (66)$$

$$\int_{89,1}^{761,6} e^{-0,0155\left(\frac{E-40,19}{3,057}\right)} \cdot E \cdot dE = \left(-1,22602 \frac{10^5 e^{\frac{-507E}{100000}} (507E + 10^5)}{257049} \right)_{89,1}^{761,6} \quad (67)$$

$$\int_{89,1}^{761,6} \left(114e^{-0,0155\left(\frac{E-40,19}{3,057}\right)} + \frac{44,996 \sqrt{\frac{142}{\left(\frac{E-40,19}{3,057}\right)}}}{1+0,0022\left(\frac{E-40,19}{3,057}-142\right)^2} \right) \cdot E \cdot \frac{dE}{3,057} \cdot \frac{300(s)}{0,35862(kg)} \quad (68)$$

$$= 2257194245 keV / kg$$

$$1keV = 1,602 \times 10^{-16} J \quad \text{ise} \quad 2257194245 keV / kg = 3,33 \times 10^{-7} Gy \quad (69)$$

$$6,62 \cdot 10^{-7} (Gy) = A_1 \cdot 3,33 \cdot 10^{-7} (Gy) \quad \text{ise} \quad A_1 = 1,99 \text{ olur.} \quad (70)$$

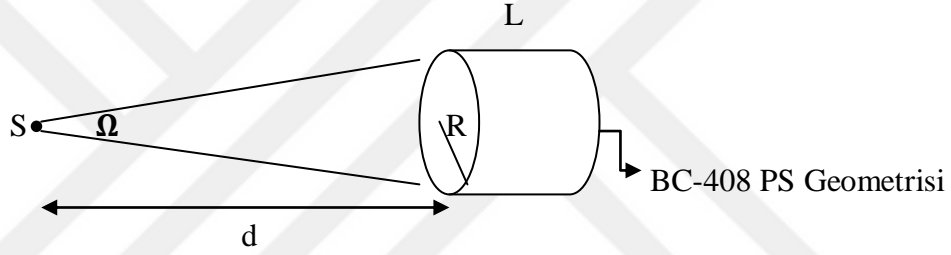
Aynı işlem basamakları geriye kalan 34 mesafe içinde yapılmıştır.

Ek-9

Radyonüklit Kaynakların Teorik Dozdan ve Spektrum Verilerinden Hesaplanan Doz Değerlerinin Hesaplanması

$$A = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot t} \quad (71)$$

Burada A: radyasyon kaynağının ölçüm anındaki aktivitesi, A_0 : radyasyon kaynağının referans tarihindeki aktivitesi, $t_{1/2}$: radyasyon kaynağının yarı ömrü, t: radyasyon kaynağının referans tarihi ile ölçüm tarihi arasındaki süredir.



Şekil Ek-9.1 BC-408 PS geometrisi üzerindeki katı açı

$$\text{Katı Açının Sintilatör Yüzeyinde Gördüğü Alan} = 2\pi(d^2 + R^2) \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + R^2}}\right) \quad (72)$$

$$\emptyset = \frac{1}{2\pi(d^2 + R^2) \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + R^2}}\right)} \cdot A \cdot e^{-\rho_{PVT} \cdot L \cdot \mu/\rho - \rho_{mylar} \cdot h \cdot (\mu/\rho)_{mylar}} \quad (73)$$

Burada \emptyset : radyasyon akısı, d: BC-408 PS dedektörü ile radyasyon kaynağı arasındaki mesafe, R: PS yüzeyinin yarıçapı, $(\mu/\rho)_{mylar}$: alüminize mylar pencerenin toplam kütle azalım katsayısı, h: alüminize mylar pencerenin kalınlığı, L: plastik sintilatörün kalınlığı, μ/ρ : PVT'nin toplam kütle azalım katsayısı, ρ_{mylar} : mylar'ın yoğunluğu, ρ_{PVT} : PVT'nin yoğunluğudur.

Hesaplanan radyasyon akısından teorik doz hesabına geçiş (74) numaralı eşitlikte verilmiştir.

$$D = \phi \cdot E_R \cdot P_R \cdot \Delta t \cdot \mu_{en} / \rho \quad (74)$$

Burada D: teorik olarak hesaplanan doz, E_R : yayılan radyasyon ışını enerjisi, P_R : radyasyon ışını yayılma olasılığı, μ_{en}/ρ : enerji soğurma katsayısı (Bkz. Çizelge Ek-7.1), Δt : spektrum ölçüm süresidir.

Çok enerjili gama radyasyon kaynakları için toplam doz hesabı (75) numaralı eşitlikte gösterilmiştir.

$$D_T = D_1 + D_2 + \dots \quad (75)$$

Burada, D_1 : gama radyasyon kaynağının birinci gama enerjisinden yayılan radyasyon enerjisinin değeriyle hesaplanan doz, D_2 : gama radyasyon kaynağının ikinci gama enerjisinden yayılan radyasyon enerjisinin değeriyle hesaplanan doz, D_T : birden fazla gama enerjisi bulunan kaynak için toplam doz değeridir.

Çizelge Ek-9.1’de sabit değerlerin karşılıkları ve birimler arası eşitlikler gösterilmiştir.

Çizelge Ek-9.1 Teorik doz hesabında kullanılan bazı eşitlikler

L	7,62 cm
R	3,81 cm
d	4,59 mm
1 keV	$1,6 \times 10^{-16}$ J
1 μ Ci	37000 parçalanma/s
1 Gy	1 J/kg

Spektrumdan hesaplanan doz hesabı ise (76) numaralı eşitlikte gösterilmiştir.

$$Doz = \frac{\Delta t}{m} \sum_i^j \left(\frac{cps}{kanal} \right)_i \cdot E_i \quad (76)$$

Burada; m BC-408 plastik sintilatörün kütesidir ve m= 0,35862 kilogramdır (Bkz. Ek-5), Δt ise spektrumun toplama süresidir. \dot{I} : spektrumun değerlendirmeye alınan başlangıç kanalı ve j: spektrumun değerlendirmeye alınan bitiş kanalıdır. E_i : i. kanaldaki enerji değeridir.

Ayrıca mini-1 SmartION iyon odasıyla yapılan ölçümler sonucunda, üretici firmanın Çizelge 3.1'de gösterilen kapsülsüz (unsealed) radyonüklit gama kaynaklarından beta veya pozitron parçacıklarının yayınımlarını engelleyecek malzeme kullanılmadığının tespiti neticesinde bu parçacıklarında doza büyük etkisi olacağı görülmüştür. Bu etkinin matematiksel ifadesi (77) numaralı eşitlikte gösterilmiştir.

$$D = \emptyset \cdot \frac{E_{\beta_{max}}}{3} \cdot P_{\beta} \cdot Q_{\beta} \cdot \Delta t \cdot (\mu_{en}/\rho)_{\beta_{PVT}} \quad (77)$$

Burada D: β parçacıklarından gelen etkiyle hesaplanan teorik doz, \emptyset : radyasyon akısı E_{β} : β parçacıklarından yayılan enerji, P_{β} : β parçacığının yayınlanma olasılığı, $(\mu_{en}/\rho)_{\beta_{PVT}}$: β parçacığının PVT için enerji soğurma katsayısı, $Q_{\beta}=1$: β parçacığı için kalite faktörü, Δt : spektrum ölçüm süresidir.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Özgün Emrah TURAN

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Tarihi : 19.03.1985

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu:

Lise : Yıldırım Beyazıt Anadolu Lisesi/Ankara, (1999-2003)

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü, (2004-2011)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Medikal Fizik Anabilim Dalı Sağlık Fiziği Yüksek Lisans Programı, (2012-2016)