

**T.C.
MUĞLA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KİMYA ANABİLİM DALI

**MONTE CARLO SİMÜLASYONU KULLANARAK KUYU TİPİ HPGe
DEDEKTÖRDE YARI-AMPİRİK VERİM KALİBRASYONU EŞİTLİĞİNİN
ELDE EDİLMESİ**

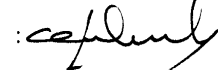
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ezgi EREN BELGİN

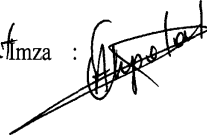
MUĞLA 2010

T.C.
MUĞLA ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Prof. Dr. Gül Asiye AYÇIK danışmanlığında Ezgi EREN BELGİN tarafından hazırlanan 'Monte Carlo simülasyonu kullanarak kuyu tipi HPGe dedektörde yarı-ampirik verim kalibrasyonu eşitliğinin elde edilmesi' başlıklı tez, 31.../.../2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Kimya Anabilim Dalı'nda yüksek lisans olarak oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Gül Asiye Ayçık İmza : 

Üye : Prof. Dr. Sule AYI AŞ İmza : 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ömer Akpolat İmza : 

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasının her safhasında, her türlü önerileriyle bana yön veren, bilgilerini benimle paylaşan çok değerli hocam Prof. Dr. Gül Asiye AYÇIK'a en derin saygı, sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmam boyunca, ilgi ve destekleri ile yanımda olan Yrd. Doç. Dr. Oğuz AKPOLAT'a teşekkürü bir borç bilirim.

Manevi desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen sevgili eşim Ahmet BELGİN ve aileme çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasını, bilime gönül vermemi sağlayıp, beni bu yolda yürümeye teşvik eden sevgili teyzem Av. Celile MELTEM'e ithaf ediyorum.

Ezgi EREN BELGİN
MUĞLA 2010

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	V
ABSTRACT	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
TABLolar DİZİNİ	VIII
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ	IX
1. GİRİŞ	1
1.1. Radyasyon ve Radyasyon Türleri	1
1.2. Radyasyon Kaynakları	2
1.3. Radyoaktif Bozunum	3
1.3.1. Alfa Bozunumu	3
1.3.2. Beta Bozunumu	5
1.3.3. Pozitron Bozunumu	6
1.3.4. Elektron Yakalama	7
1.3.5. Gama Işınması	8
1.4. Elektromanyetik Radyasyonun Madde ile Etkileşimi	9
1.4.1. Fotoelektrik Olay	10
1.4.2. Compton Saçılımı	11
1.4.3. Çift Oluşumu	12
1.5. Radyasyon Tayini	13
1.5.1. Radyasyon Dedektörleri	13
1.5.2. Gama Spektrometresi	16
1.5.2.1 Gama Spektrometresinde Analiz	18
1.5.2.2 Gama Spektrometresinde Verim ve Verim Kalibrasyonu	19
1.5.2.3 Simülasyon Yöntemleri ve Monte Carlo Yöntemi	21
2. KAYNAK ÖZETLERİ	24
3. MATERYAL VE YÖNTEM	30
3.1. Modellenen Gama Spektrometresi	30
3.2. Deneysel Verim	31
3.3. Verim Modellemesi	34
3.3.1. Çakışma Faktörü	35
3.3.2. Geometrik Verim	36
3.3.3. Absorpsiyon Verimi	38
3.3.4. Örnek Verimi	41
3.3.5. Mutlak Verim	42
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	43
4.1. Deneysel Verim Sonuçları	43
4.2. Simülasyon Sonuçları	44
4.2.1. Geometrik Verim	44
4.2.2. Absorpsiyon Verimi	45
4.2.3. Örnek Verimi	51

4.2.4. Mutlak Verim	53
4.2.5. Toplam Verim	55
5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	57
KAYNAKLAR	62
EKLER	65
Ek-1. Toplam Verimin Hesabı İçin Kullanılan Kodlar	64
Ek-2. Geometrik Verimin Hesabı İçin Kullanılan Kodlar	66
Ek-3. Alüminyumun Kütlesel Absorpsiyon Katsayısının Hesabı İçin Kullanılan Kodlar	67
Ek-4. Germanyumun Kütlesel Absorpsiyon Katsayısının Hesabı İçin Kullanılan Kodlar	69
Ek-5. PVC'nin Kütlesel Absorpsiyon Katsayısının Hesabı İçin Kullanılan Kodlar	71
Ek-6. Absorpsiyon Veriminin Hesabı İçin Kullanılan Kodlar	73
Ek-7. Bakalitin Kütlesel Absorpsiyon Katsayısının Hesabı İçin Kullanılan Kodlar	74
Ek-8. Örnek Veriminin Hesabı İçin Kullanılan Kodlar	76
Ek-9. Mutlak Verimin Hesabı İçin Kullanılan Kodlar	77
Ek-10. MATLAB Ürün Tescilleri	78
ÖZGEÇMİŞ	79

**MONTE CARLO SİMÜLASYONU KULLANARAK KUYU TİPİ HPGe
DEDEKTÖRDE YARI-AMPRIK VERİM KALİBRASYONU EŞİTLİĞİNİN
ELDE EDİLMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Ezgi EREN BELGİN

**MUĞLA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

2010

ÖZET

Gama spektrometresi ile aktivite derişimi tayininde en önemli problem verim tayini ve kalibrasyonudur. Deneysel verim kalibrasyonu uzun zaman alan, pahalı ve çoğunlukla yaklaşımlardan ibaret bir yöntemdir. Bu nedenle bu çalışma ‘Muğla Üniversitesi Kimya Bölümü Radyoaktivite Araştırma ve Analiz Laboratuvarı’nda kullanılmakta olan kuyu tipi HPGe dedektörün verim kalibrasyonunun yapılabilmesi için simülasyon yöntemlerinin kullanımına dayandırılmıştır. Laboratuvarımızda yapılan radyoaktivite analizlerinde kaynaklar yetersiz olduğundan analiz edilen örneklerin aktivite derişimi hesaplarında kullanılan verim değerleri yaklaşımlardan öteye gidememektedir. Ancak dedektörün simüle edilmesi ile analizlerde örnek geometrisi ile uyumlu standart kaynak bulundurma veya hazırlama zorlukları ile karşılaşmadan çok farklı geometriler için sadece simülasyon girdilerinin değiştirilmesi ile dedektörün verim kalibrasyonu yapılabilecektir. Çalışmamızda dedektör simülasyonu için matematiksel modelleme ve Monte Carlo yöntemi kullanıldı. Yazılan simülasyon programından elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında %91.84 uyum olduğu bulundu.

Anahtar Kelimeler: Monte Carlo simülasyonu, Gama spektrometresi, Kuyu tipi dedektör, HPGe dedektör, Verim kalibrasyonu

Sayfa adedi: 79

Tez Yöneticisi: Prof. Dr. Gül Asiye AYÇIK

**SEMI-EMPIRICAL EFFICIENCY CALIBRATION EQUATION FOR WELL
TYPE HPGe DEDECTOR BY USING MONTE CARLO SIMULATION****(M. Sc. Thesis)****Ezgi EREN BELGİN****MUĞLA UNIVERSITY****INSTITUTE of SCIENCE and TECHNOLOGY****2010****ABSTRACT**

The most important problem in determination of activity concentration by gamma spectrometry is assigning efficiency and getting efficiency calibration. Experimental efficiency calibration takes much time, is an expensive method, besides that it is an approximation method. In this study, simulation methods are drafted for efficiency calibration of well type HPGe detector used in ‘Muğla University Chemistry Department Radioactivity Research and Analysis Laboratory’. The efficiency parameter used in activity concentration calculations is the weakest point in our experiments because of insufficiency of the standart sources. But, in the henceforth analysis, the efficiency calibration of the detector will be made without getting or preparing standart sources same with the samples physically and chemically. By using this programme the efficiency calibration will be done for various cases by only changing inputs of the simulation program. In this study, both Monte Carlo and mathematical modelling methods were used for detector simulating. As a conclusion, the agreement between the simulation program and experimental results were 91.84 %.

Key Words: Monte Carlo simulation, Gamma spectrometry, Well type dedector, HPGe dedector, Efficiency calibration

Page Number: 79

Adviser: Prof. Dr. Gül Asiye AYÇIK

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No</u>	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Radyasyon türleri	1
Şekil 2. Elektromanyetik spektrum	2
Şekil 3. Alfa bozunumu	4
Şekil 4. Beta bozunumu	5
Şekil 5. Pozitron bozunumu	6
Şekil 6. Elektron yakalama olayı	7
Şekil 7. Gama ışıması	8
Şekil 8. Elektromanyetik radyasyonun alüminyum ile etkileşimi	10
Şekil 9. Fotoelektrik olay	11
Şekil 10. Compton saçılımı	12
Şekil 11. Çift oluşumu	13
Şekil 12. Kuyu tipi HPGe dedektörlü gama spektrometresi	17
Şekil 13. İki farklı geometride sayım açısı	19
Şekil 14. Modellenen dedektör	30
Şekil 15. Net pik alanı bulunması	34
Şekil 16. En küçük kareler yöntemi ile optimizasyon	39
Şekil 17. Deneysel verim grafiği	44
Şekil 18. Örnek yüksekliğine karşı geometrik faktör grafiği	45
Şekil 19. Döngü ve deneme sayısı ile uyum değişimi	46
Şekil 20. Rasgele sayıların normal dağılım eğrisi	47
Şekil 21. Alüminyum için Monte Carlo modeli grafiği	47
Şekil 22. Germanyum için Monte Carlo modeli grafiği	48
Şekil 23. PVC için Monte Carlo modeli grafiği	49
Şekil 24. Enerjiye karşı absorpsiyon verimi grafiği	50
Şekil 25. Bakalit için Monte Carlo modeli grafiği	51
Şekil 26. Enerjiye karşı örnek verimi grafiği	53
Şekil 27. Enerjiye karşı mutlak verim grafiği	54
Şekil 28. Enerjiye karşı toplam verim grafiği	56

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No</u>	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Modellenen dedektörün geometrik parametre değerleri	31
Tablo 2. Standart kaynaklar ve sertifika değerleri	32
Tablo 3. Hesaplarda kullanılan radyoizotoplar	33
Tablo 4. Deneysel verim sonuçları	43
Tablo 5. Çalışmada kullanılan verim değerleri	43
Tablo 6. Örnek yüksekliği-geometrik verim sonuçları	44
Tablo 7. Monte Carlo ile hesaplanan model katsayıları	45
Tablo 8. Modelleme sonucu elde edilen absorpsiyon verimi değerleri	50
Tablo 9. Bakalit için Monte Carlo ile hesaplanan model katsayıları	51
Tablo 10. Örnek verimi değerleri	52
Tablo 11. Mutlak verim model katsayıları	53
Tablo 12. Hesaplanan mutlak verim değerleri	54
Tablo 13. Toplam verim değerleri	55

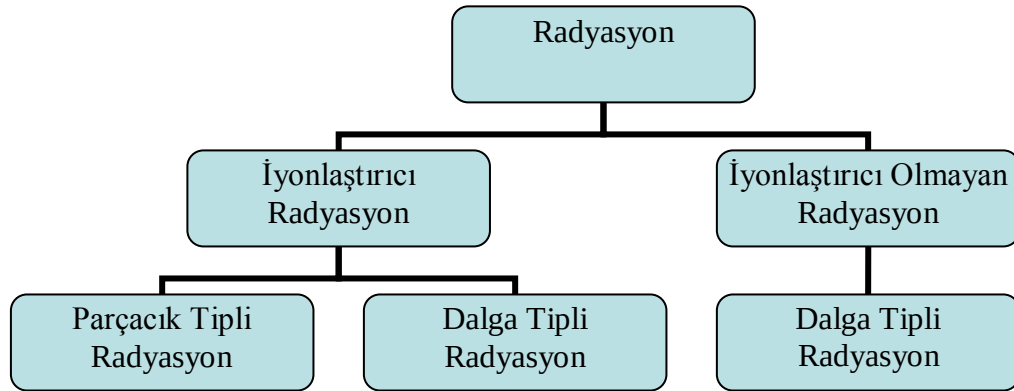
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

$\varepsilon_{\text{absorpsiyon}}$	Absorpsiyon verimi
A	Aktivite
x	Alınan yol
$\bar{\nu}$	Antinötrino
$E_{\text{Bağlanma}}$	Bağlanma enerjisi
D	Bozunma faktörü
$f_{\text{çakisma}}$	Çakışma faktörü
λ	Dalga Boyu
e^{-}	Elektron
E	Enerji
I_0	Fotonun ilk şiddeti
I	Foton şiddeti
ν	Frekans
γ	Gama ışını
E_{γ}	Gama ışının enerjisi
E_0	Gama ışınının ilk enerjisi
$f_{\text{geometrik}}$	Geometrik faktör
c	Işık hızı
Ω	Katı açısı
E_{Kinetik}	Kinetik enerji
μ	Kütleli absorpsiyon katsayısı
$\varepsilon_{\text{mutlak}}$	Mutlak verim
ν	Nötrino
n	Nötron
$\varepsilon_{\text{örnek}}$	Örnek verimi
PA	Pik alanı
h	Planck Sabiti (6.62×10^{-34} J.s)
PVC	Polivinilklorür
e^{+}	Pozitif yüklü elektron
p	Proton
ϕ	Saçılma açısı
t	Sayım süresi
N	Tanecik sayısı
$\varepsilon_{\text{toplam}}$	Toplam verim
ε	Verim
f_{γ}	Yayılma olasılığı
ρ	Yoğunluk
HPGe	Yüksek saflıkta germanyum

1. GİRİŞ

1.1. Radyasyon ve Radyasyon Türleri

Radyasyon, iç dönüşüm geçiren çekirdekler tarafından yayımlanan, boşlukta ve madde içerisinde hareket edebilen enerji olarak tanımlanır. Bu enerji parçacık veya dalga karakterli ışına olabilir. Radyasyon sınıflara ayrılırken enerjisi, türü ve kaynağı olmak üzere 3 faktör göz önüne alınır. Enerjisine göre iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon, türüne göre parçacık ve dalga karakterli radyasyon, kaynağına göre ise doğal ve yapay radyasyon olarak sınıflara ayrılır (Ayçık, 2008), Şekil 1.

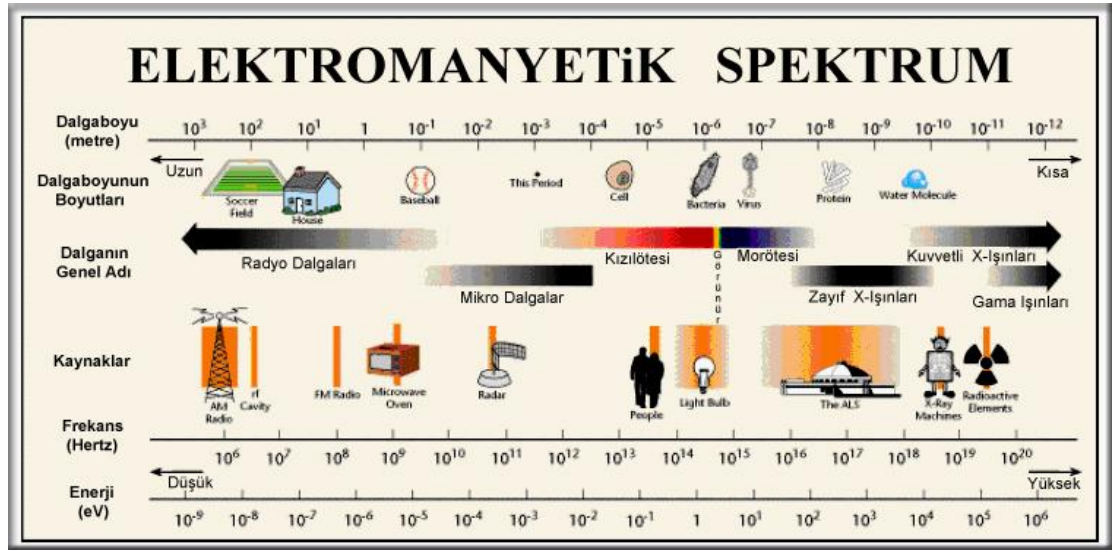


Şekil 1. Radyasyon türleri

İyonlaştırıcı radyasyon yüksek enerjilidir. Yüksek enerjisi sebebiyle etkileştiği atomdan bir elektron kopararak bu atomu iyonlaştırabilir. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonun enerjisi, elektronların bağlanma enerjisinden düşük olduğundan, bu tip ışımının atomdan elektron koparması mümkün değildir. Bu nedenle de atomda sadece uyarılmaya neden olur. İyonlaştırıcı radyasyon alfa parçacıkları gibi parçacık veya gama ışınları gibi dalga karakterli olabilirken, iyonlaştırıcı olmayan radyasyon genellikle elektromanyetik dalga karakterlidir (Ayçık, 2008).

Elektromanyetik radyasyonun enerjisi radyasyonun dalga boyu ile ters orantılı olarak değişir. Düşük dalga boyu elektromanyetik dalgalar, daha yüksek enerjili olduklarından, iyonlaştırıcı özellikte iken; yüksek dalga boyu elektromanyetik

radyasyon iyonlaştırıcı değildir. Şekil 2’de elektromanyetik spektrum verilmiştir (Tüysüz, 2004).



Şekil 2. Elektromanyetik spektrum

1.2. Radyasyon Kaynakları

Dünyanın oluşumuyla birlikte doğada yerini alan çok uzun ömürlü (milyarlarca yıl) radyoaktif elementler yaşadığımız çevrede normal ve kaçınılmaz olarak kabul edilen doğal bir radyasyon düzeyi oluşturur. Geçtiğimiz yüzyılda bu doğal düzey, nükleer denemeler ve bazı teknolojik ürünlerin kullanımı ile bir miktar artış göstermiştir (Ayçık, 2009).

Maruz kalınan radyasyonun %88'ini doğal kaynaklar, %12'sini de yapay kaynaklar oluşturur. Doğal kaynaklar kendi arasında kozmik ve karasal olarak ikiye ayrılırken, yapay kaynaklar da antropojenik ve antropojenik olarak zenginleştirilmiş doğal kaynaklar olarak ikiye ayrılır (Ayçık, 2009).

Doğal radyasyon kaynaklarından karasal radyasyon; evrenin oluşumu sırasında oluşan ve halen yerkürede var olan uzun yarı ömürlü radyoizotoplardan kaynaklanır. Yer kabuğundaki radyoaktif elementlerin yaydıkları radyasyon genellikle uranyum, toryum ve bozunma ürünleri olan radon, radyum, polonyum, plütonyum, talyum, aktinyum gibi yavru radyoaktif element izotoplarından yayılır. İkinci tip doğal

radasyon kaynağı güneş sisteminden kaynaklanan kozmik radyasyondur. Güneş sisteminden gelen yüksek enerjili fotonlar atmosferin üst seviyesinde azot, oksijen ve argon ile tepkimeye girer. Bunun sonucunda H-3, Be-7, C-14, Na-22, Na-24, Mg-28, S-38, Cl-38, Cl-39, Ar-40 gibi çeşitli radyoizotoplar oluşur. Bu izotoplardan kaynaklanan radyoaktif serpintiler doğada birikir. Deniz seviyesinden yükseldikçe kozmik radyasyonun etkisi de artar (Ayçık, 2009).

Son elli yıl içerisinde radyasyondan faydalanılarak yapılan tıbbi ve endüstriyel uygulamalar bir yandan yaşam standartlarımızın gelişmesine önemli katkılarda bulunurken diğer yandan da yapay radyasyon kaynakları oluşumuna neden olmuşlardır. Antropojenik yapay radyasyon kaynakları içinde nükleer silah denemeleri, nükleer santral faaliyetleri, nükleer yakıt üretimi ve kullanımı, nükleer kazalar, radyoizotop üretim tesisleri, radyoaktif atık deşarjı sayılabilir. U-236, Np-237, Pu-239,240, Sr-90, Tc-99, I-129, Cs-137, Am-241 gibi radyoizotoplar antropojenik kaynaklıdır. Bir diğer yapay radyasyon kaynağı antropojenik olarak zenginleştirilmiş radyasyon olarak isimlendirilen aslında nükleer kaynak sayılmayan ancak üretimleri sonucu doğal radyoizotopları zenginleştirilmiş kaynaklardır. Fosfat, petrol, doğal gaz, kömür, ağır metal üretimi gibi nükleer olmayan endüstriler bu tip radyasyon kaynaklarından sayılabilir (Ayçık, 2009).

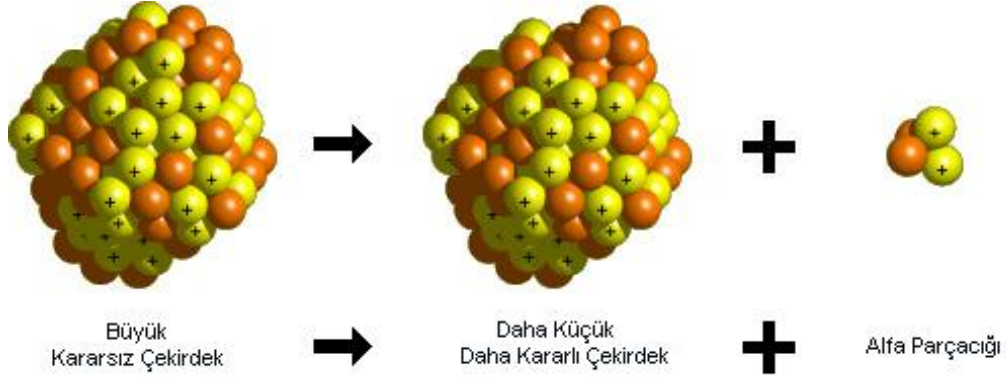
1.3. Radyoaktif Bozunum

Kararsız halde bulunan radyonüklit kararlı hale gelebilmek için bozunur. Bu şekilde proton ve nötron dengesini yakalayarak kararlılık kuşağında yerini almak ister. Radyonüklit parçacık ya da dalga salımı yaparak veya parçacıkları birbirine dönüştürerek en düşük enerjili duruma geçerek kararlı hale gelmeye çalışır. Bunun için bir veya daha fazla, hatta doğal bozunum zincirlerinde olduğu gibi zincir halinde, bozunumlar yaparak kararsız olma sebebine göre farklı ışımlar yapar.

1.3.1. Alfa Bozunumu

Alfa yayan radyonüklitler genellikle atom numarası 83'den, kütle numarası ise 209'dan büyük olan çekirdeklerdir. Alfa parçacığı 2 proton ve 2 nötron içeren

helyum çekirdeğidir. Böylece alfa parçacığı yayan çekirdek hem proton hem de nötron sayısını iki azaltarak daha kararlı hale geçer. Alfa yayımı sonucunda çekirdeğin atom numarası iki, kütle numarası ise dört azalır. Şekil 3’de alfa bozunumu mekanizması gösterilmiştir (Tüysüz, 2004).



Şekil 3. Alfa bozunumu

Mekanizmadan da görüldüğü gibi tüm çekirdek bozunumlarında bozunumdan önce ve sonrasında toplam proton ve nötron sayısı korunur. Ayrıca bozunum esnasında momentum da korunur. Eşitlik 1 ve 2 bu korunum yasaları temel alınarak çıkarılmıştır.

$${}^A_ZX_N \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X'_{N-2} + {}^4_2He \quad (1)$$

$$Q = \Delta mc^2 = [m(X) - m(X') - m(He)] \times c^2 \quad (2)$$

Alfa bozunumuyla ortaya çıkan enerjinin büyük bir kısmı alfa parçacığı ile çekirdekten uzaklaşır. Alfa parçacığı havada birkaç santimetre yol aldıktan sonra çarpışmalar sonucu kinetik enerjisini kaybeder. Yavaşlayan alfa parçacığı elektron olarak nötral helyum atomuna dönüşür. Büyük kütlesi sebebiyle maddeyle yoğun olarak etkileşen ve bu yüzden menzili kısa olan alfa parçacıklarının enerji spektrumu bir çekirdek için kesin, karakteristik, sabit ve kesiklidir (Ayçık, 2008).

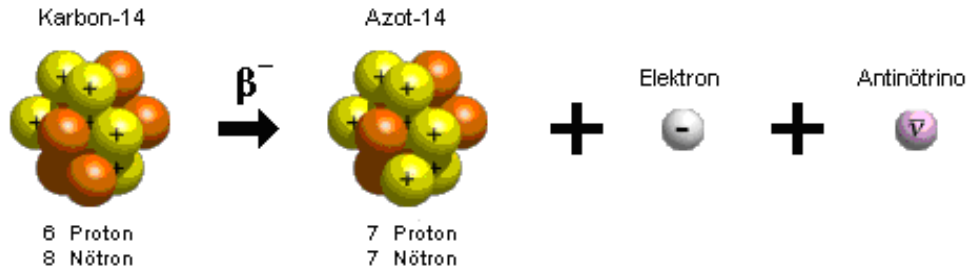
1.3.2. Beta Bozunumu

Çekirdek kararsızlığı nötron fazlalığından ileri geliyorsa çekirdek beta (β^-) bozunması yapar, beta parçacığı yayar. Eşitlik 3 ve 4'de beta bozunumu gösterilmiştir.

$$n \rightarrow p + e^- (\beta^-) + \bar{\nu} \quad (3)$$

$${}_Z^A X_N \rightarrow {}_{Z+1}^A X'_{N-1} + e^- + \bar{\nu} \quad (4)$$

Beta parçacığı yayan çekirdekte bir nötron bir proton ve (-) yüklü bir elektrona (β^-) dönüşür. Oluşan proton çekirdekte kalırken, beta parçacığı çekirdekten dışarı fırlatılır. Böylece atomun kütle numarası sabit kalırken nötron sayısı bir azalır. Çekirdekten yayılan elektron özelliğindeki beta parçacıkları elektrondan çok daha hızlıdır. Beta parçacıklarının kütlesi yaklaşık olarak sıfır akb (1/1837 akb) kabul edilirken yükü de -1'dir. Beta parçacıklarının kütlesi çok küçük olduğundan madde ile etkileşimleri alfa parçacıklarına göre daha az, serbest ulaşma uzaklıkları alfa parçacıklarına göre daha fazladır. Şekil 4'de örnek bir beta bozunması gösterilmiştir (Tüysüz, 2004).



Şekil 4. Beta bozunumu

Beta ışıması bir çekirdekten yayılan kesin ve belli bir enerjiye sahip olmayıp yayılan ışınların bir enerji spektrumu vardır. Bu yüzden çekirdekten, enerjinin korunumunu sağlamak amacı ile elektronla beraber bir de antinötrino yayılır. Antinötrinolar yüksüz ve elektrona göre çok daha küçük kütleli parçacıklardır (Ayçık, 2008).

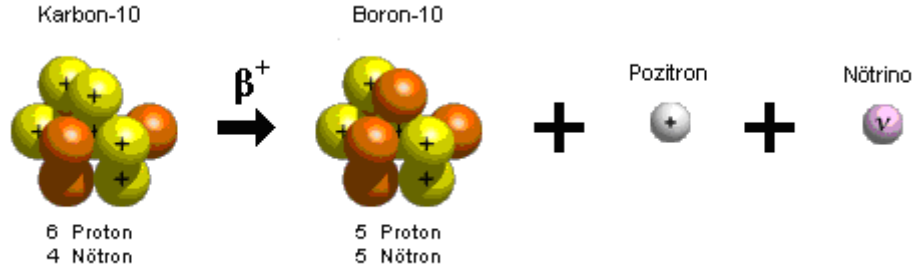
1.3.3. Pozitron Bozunumu

Atomun kararsızlığı nötron azlığından veya proton fazlalığından kaynaklanıyorsa çekirdek pozitron (β^+) ışıması yapar, pozitron parçacığı yayar. Eşitlik 5 ve 6'da pozitron bozunumu gösterilmiştir.

$$p \rightarrow n + e^+ (\beta^+) + \nu \quad (5)$$

$${}_Z^A X_N \rightarrow {}_{Z-1}^A X'_{N+1} + e^+ + \nu \quad (6)$$

Pozitron bozunumu yapan çekirdekte protonlardan biri nötron ve pozitif yüklü elektrona dönüşür. Nötron çekirdekte kalırken pozitif yüklü beta parçacığı çekirdekten fırlatılır. Böylece çekirdeğin kütle numarası sabit kalırken proton sayısı bir azalır. Fırlatılan bu parçacığa pozitron (POZİtif elekTRON) adı verilir. Pozitron parçacığı elektron ile aynı kütlede ancak +1 yüklüdür. Bu yüzden anti elektron adını da alır. Şekil 5'de örnek bir pozitron bozunumu gösterilmiştir (Tüysüz, 2004).



Şekil 5. Pozitron bozunumu

Beta bozunumunda olduğu gibi pozitronların da kesin ve belli bir enerji değeri yerine enerji spektrumları olduğundan enerjinin korunumunun sağlanması için pozitronla beraber çekirdekten bir nötrino da yayılır. Nötrino da, tıpkı antinötrino gibi, yüksüz ve çok küçük kütleli bir parçacıktır (Ayçık, 2008).

Bozunum sonucu yayılan pozitron çok kararlı değildir. Kısa bir zaman içinde kendi karşı parçacığı (β^-) ile birleşir ve Eşitlik 7'de gösterildiği gibi bir nükleer tepkime gerçekleşir.

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma \quad (7)$$

Bu tepkimede bir pozitron ile bir elektron etkileşerek birbirine zıt yönlerde her biri 511 keV enerjili iki gama fotonu yayınlanır (Ayçık, 2008). Bu olaya ‘annihilasyon’ denir.

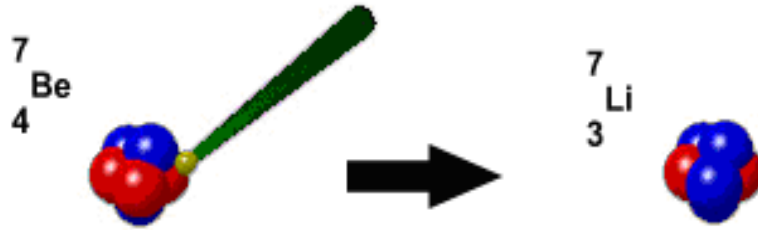
1.3.4. Elektron Yakalama

Çekirdeğin kararsızlığı proton fazlalığından kaynaklanıyorsa elektron yakalama olayı da gerçekleşebilir. Elektron yakalama olayı pozitron bozunmasına benzer ve çekirdeğin hangisini yapacağı önceden bilinemez. Elektron yakalama olayında çekirdeğe yakın olan yörüngede bulunan elektronlardan biri çekirdek tarafından yakalanır. Çekirdekte bulunan bir proton yakalanan elektronla birleşerek nötron ve nötrino haline dönüşür. Eşitlik 8 ve 9’da elektron yakalama olayı verilmiştir.

$$p + e^- \rightarrow n + \nu \quad (8)$$

$${}^A_Z X_N + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1} X'_{N+1} + \nu \quad (9)$$

Böylece elektron yakalama olayı sonucu, pozitron bozunmasında olduğu gibi, çekirdekte proton sayısı bir eksilir ancak kütle numarası aynı kalır. Bu bozunumda çekirdekten nötrino dışında parçacık salınmaz. Şekil 6’da elektron yakalama olayı gösterilmiştir (Tüysüz, 2004).



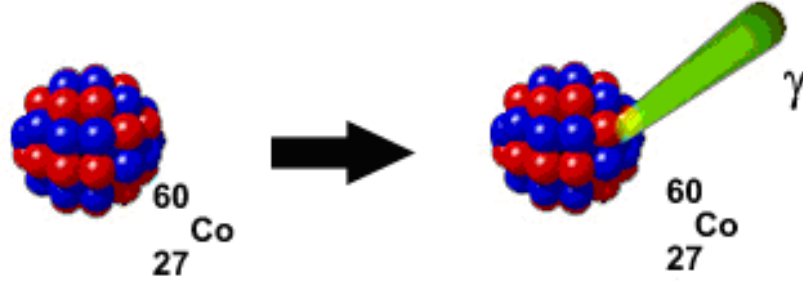
Şekil 6. Elektron yakalama olayı

Elektron yakalama olayında, çekirdeğe yakın yörüngede yakalanan elektronun yörüngesinde bir elektron eksikliği, boşluk oluşur. Bu boşluk daha üst seviyelerden

gelen bir elektron tarafından doldurulur. Üst orbitalden alt orbitale bir elektron inmesi ile açığa çıkan enerji elektromanyetik radyasyon olarak yayınlanır. Atomdaki elektron orbitalleri arasındaki enerji farkından kaynaklanan bu elektromanyetik ışımaya ‘x-ışını’ denir (Ayçık, 2008).

1.3.5. Gama Işınması

Kararsız bir çekirdek bozunma yaptıktan sonra hemen temel enerji seviyesine geçemez. Radyonüklit hala yüksek enerjili yani yarı kararlı durumdadır. Çekirdek, alfa, beta veya elektron yakalama bozunumlarının hemen ardından bünyesinde hala var olan bu fazla enerjiyi elektromanyetik radyasyon halinde yayar. Yayılan bu elektromanyetik radyasyona ‘gama (γ) ışını’ denir. Gama ışıması sonucu çekirdek yüksek enerjili düzeyden temel enerji düzeyine geçer. Gama ışımasında herhangi bir parçacık fırlatılması veya soğurulması söz konusu olmadığından çekirdeğin yük ve kütlelerinde herhangi bir değişiklik olmaz. Şekil 7’de gama ışıması gösterilmiştir (Tüysüz, 2004).



Şekil 7. Gama ışıması

Gama ışınları, x ışınları gibi elektromanyetik dalga karakterindedir ancak çok daha enerjetiktir. Bu ışın yüksüz ve kütesiz olduğundan girişkenliği diğer parçacık karakterli ışımalara göre oldukça fazladır. Gama ışınlarının enerji spektrumları kesiklidir. Her bir çekirdek için karakteristik, sabit ve kesin enerjileri vardır (Ayçık, 2008).

Çekirdeğin kararlı hale gelebilmesi için alfa ve beta bozunumlarını daima bir gama ışınması takip eder. Kararsız çekirdek hangi bozunmayı yaparsa yapsın bunu takiben mutlaka gama ışını da yayacağından bu gama ışını sayesinde radyonüklit nicel ve nitel olarak analiz edilebilir. Bu nedenle aktivite derişimi tayinlerinde gama ışını spektrometresi en çok kullanılan tekniktir (Ayçık, 2008).

1.4. Elektromanyetik Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

İster parçacık ister dalga karakterinde olsun radyasyonun nicel ve nitel olarak tanımlanabilmesi için madde ile etkileşmesi gerekir. Radyasyonun türü ve enerjisine göre madde ile etkileşim şekilleri de farklıdır. Radyasyonun, cinsine bağlı olmaksızın, maddeyle etkileşimi enerjinin madde içinde absorplanmasına ve ışının enerjisini kaybetmesine dayanır. Yüklü parçacıklar enerjilerini kısa mesafede kaybederken, elektromanyetik radyasyon yüksüz ve kütsüz olduğundan madde ile etkileşimi parçacık etkileşimine göre daha az, menzili daha uzun olur (Ayçık, 2008).

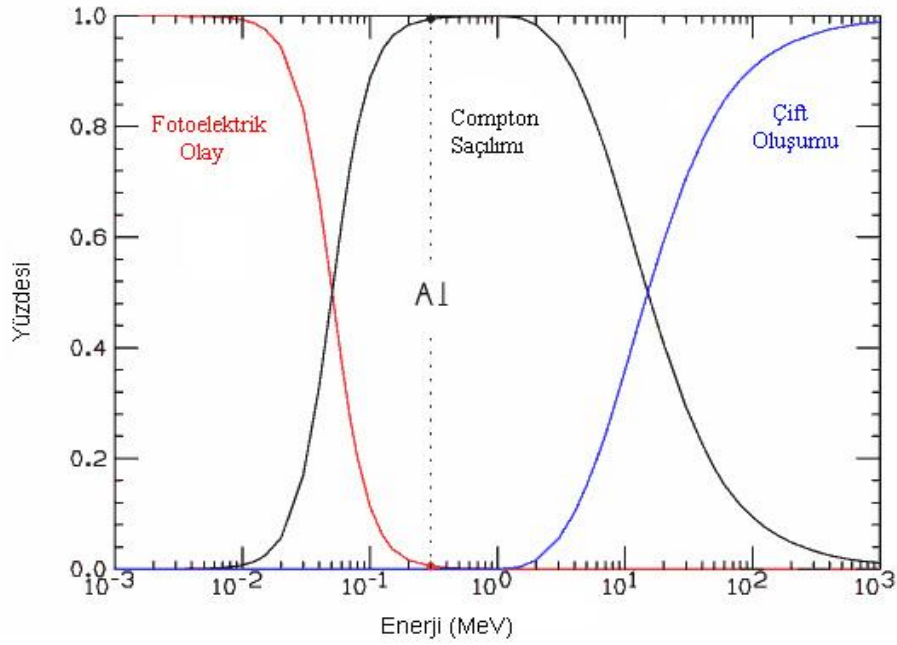
Enerji belli frekansta, sabit paketçikler şeklinde yayıldığından elektromanyetik radyasyonun birim elemanına ‘foton’ adı verilmiştir. Elektromanyetik radyasyonun belli frekansı için paketin taşıdığı sabit enerji Eşitlik 10 ile verilir.

$$E = h\nu \quad (10)$$

Belli enerjideki bir fotonun madde içerisinden geçerken absorplanmasına bağlı olarak yoğunluğundaki azalma da Eşitlik 11 ile verildiği şekilde değişir.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (11)$$

Eşitlik 11’den görüleceği gibi aynı enerjideki fotonların farklı maddeler içinde absorplanmaları da farklı olacaktır. Elektromanyetik radyasyon madde tarafından fotoelektrik olay, Compton saçılımı ve çift oluşumu olmak üzere üç farklı mekanizma üzerinden absorplanır. Hangi olayın etkin olacağı radyasyonun enerjisi, maddenin cinsi ve yoğunluğu gibi parametrelere bağlıdır. Şekil 8’de alüminyum içinde radyasyonun enerjisine bağlı olarak bu üç olayın gerçekleşme yüzdeleri gösterilmiştir (Tüysüz, 2004).



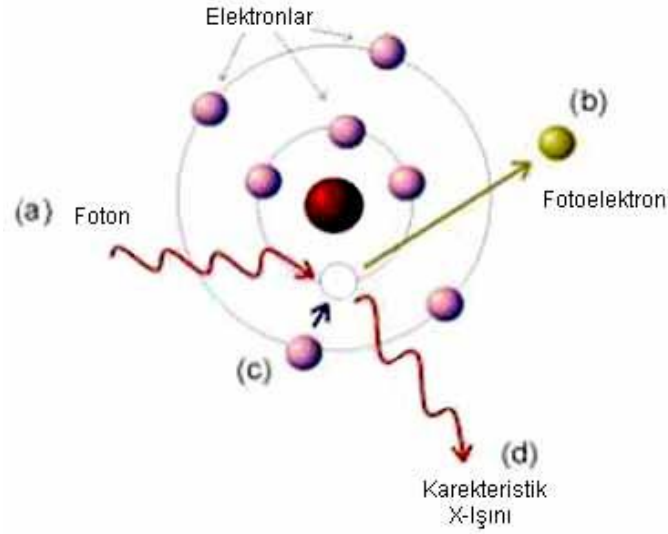
Şekil 8. Elektromanyetik radyasyonun alüminyum ile etkileşimi

1.4.1. Fotoelektrik Olay

Düşük enerjili fotonların absorpsiyonunda fotoelektrik olay etkindir. Bu etkileşimde foton, atomun bir elektronuna çarparak tüm enerjisini bu elektrona vererek elektronun atomdan fırlatılmasına neden olur. Dışarıya fırlatılan bu elektrona 'fotoelektron' denir (Ayçık, 2008). Bu olay sırasında fotonun enerjisinin bir kısmı elektronu bağlı olduğu atomdan koparabilmek için harcanır, geri kalan kısmı ise koparılan elektrona kinetik enerji olarak aktarılır, Eşitlik 12.

$$h\nu = E_{\text{baglanma}} + E_{\text{kinetik}} \quad (12)$$

Düşük enerjili fotonlarda elektronlar gelen fotonun yönünde atomdan uzaklaşır, ancak daha yüksek enerjili fotonlarda elektronlar fotonun geliş yönünden saparak atomdan uzaklaşabilir. Uzaklaşan elektrondan kalan boşluk ise daha üst seviyedeki bir elektron tarafından doldurulur. Bu esnada iki seviye arasındaki enerji farkı x ışını şeklinde atomdan yayılır. Şekil 9'da fotoelektrik olay gösterilmiştir (Tüysüz, 2004).

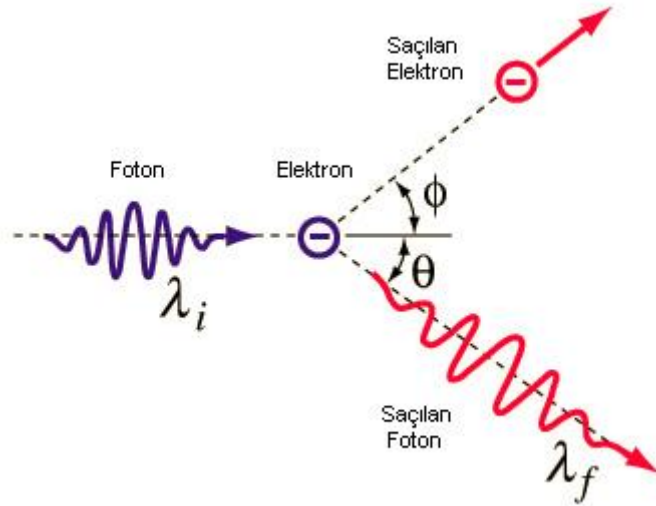


Şekil 9. Fotoelektrik olay

Fotoelektrik olayın hemen sonrasında momentumun korunabilmesi için atom geri tepildiğinden serbest elektronlarda fotoelektrik olay gerçekleşmesi mümkün değildir. Fotoelektrik olayın olma olasılığı düşük foton enerjilerinde ve yüksek atom numaralı çarpışma maddelerinde en yüksektir (Ayçık, 2008).

1.4.2. Compton Saçılımı

Energileri 0.5-2.0 MeV arasındaki fotonlar hafif elementlerden oluşan ortamlarda soğurulurken Compton saçılımı önem kazanır. Compton saçılımı mekanizması da fotoelektrik olaya benzer ancak burada foton, enerjisinin tümünü elektrona aktarmaz. Fotoelektron atomdan saçılarak fırlarken fotonun kendisi de kalan enerjisi ile yolundan sapacak şekilde saçılır. Gelen fotonun enerji ve momentumu saçılan foton ve fırlatılan elektron arasında paylaşılır. Şekil 10'da Compton saçılımı gösterilmiştir (Tüysüz, 2004).



Şekil 10. Compton saçılımı

Burada saçılma açısı (ϕ) önemli bir faktördür. Saçılma açısı küçük ise foton daha az enerji kaybına uğrayarak saçılır. Bu açı büyüdükçe fotonun enerji kaybı da artar. Enerji ve momentumun korunumu kanunları göz önünde tutularak Compton saçılması için saçılan fotonun enerjisi Eşitlik 13 ile ifade edilir.

$$E_{\gamma} = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_0 c^2} \times (1 - \cos \phi)} \quad (13)$$

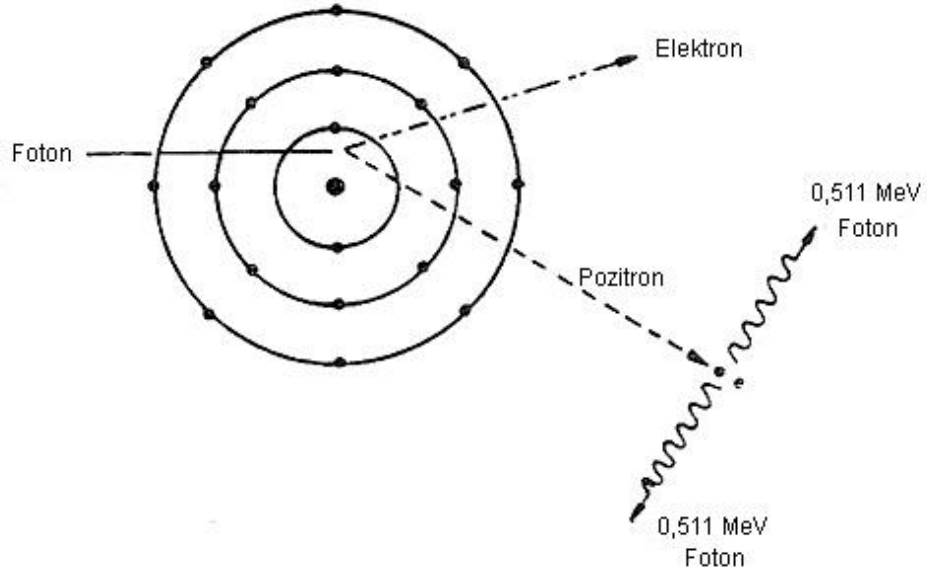
Fırlatılan elektronun enerjisi ise gelen ve yayılan fotonların enerjileri arasındaki farka eşittir. Compton saçılımı ile yüksek enerjili fotonlar tamamen absorplanamaz. Bu fotonlar, enerjileri belli bir seviyeye düşene kadar Compton saçılımına uğrarlar. Enerjisi azalmış olan fotonlar ise fotoelektrik olayla enerjilerinin tümünü kaybederek madde tarafından tamamen absorplanırlar (Ayçık, 2008).

1.4.3. Çift Oluşumu

Foton enerjisinin yüksek olması durumunda (>1.022 MeV), foton atom çekirdeğinin çok yakınından geçerken çift oluşumuna neden olabilir. Bu olayda foton yok olurken bir iyon çifti oluşur (Ayçık, 2008). Bu iyon çiftinden biri negatif yüklü elektron diğeri pozitif yüklü elektrondur (pozitron). Böylece Eşitlik 14’de verilen

Einstein'ın ünlü ifadesinin kanıtı olarak enerji-madde dönüşümü gerçekleşir, Şekil 11 (Tüysüz, 2004).

$$E = mc^2 \quad (14)$$



Şekil 11. Çift oluşumu

Çift oluşumu ile ortaya çıkan iyon çiftinden pozitron, ortamda bulunan bir elektron ile birleşerek 0.511 MeV'lik iki adet gama ışını yayar. Bu olaya bölüm 1.3.3'de de bahsedildiği gibi 'annihilasyon olayı' denir (Ayçık, 2008).

1.5. Radyasyon Tayini

1.5.1. Radyasyon Dedektörleri

Radyasyonun madde içerisinde geçerken yaptığı etkileşimlerden yararlanarak radyasyonun nitel ve nicel olarak tanımlaması yapılır. Bu tanımlama radyasyonun tipi, enerjisi ve şiddeti göz önüne alınarak farklı dedektörler kullanılarak yapılır. Örneğin gazlı bir orantılı sayıcı 14.4 keV'lik gama veya x ışını için uygunken 1 MeV'lik gama ışınını göremez. Bunun sebebi 1 MeV enerjideki gama ışınının gazlı sayıcıda soğurulması olasılığının çok düşük olmasıdır (Ayçık, 2008).

Radyasyon dedektörleri, iyonlaştırıcı olan ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon ölçüm dedektörleri olarak iki genel sınıfa ayrılır. İyonlaştırıcı radyasyon dedektörleri, doğrudan içlerinden geçen radyasyonun oluşturduğu iyonları esas alarak çalışır. Bu dedektörler, radyasyonun iyonlaştırıcı etkisiyle oluşan iyon çiftlerinden gelen elektrik yükünün toplanıp elektronik olarak genişlettiği düzeneklerdir. En çok kullanılan iyonlaştırıcı radyasyon dedektörleri; iyonlaşma odası, orantılı sayıcı, Geiger Müller sayıcılar ve yarı iletken dedektörlerdir. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonun deteksiyonunda ise genellikle sintilasyon dedektörleri kullanılır. Radyasyonun nitel ve nicel analizi için en çok kullanılan bu dedektörler radyasyonun etkileştiği ortamın gaz veya katı-sıvı olmasına göre de sınıflandırılabilir. Bu durumda iyonlaşma odası, orantılı sayıcı ve Geiger Müller sayıcılar gazlı sayıcılar olarak anılırken yarı iletken dedektörler ve sintilasyon dedektörleri katı hal dedektörleri olarak isimlendirilir (Ayçık, 2008).

Gazlı sayıcılar en eski dedektör tipleridir ve halen kullanılmaktadır. Bu sayıcıların hepsi asal gaz doldurulmuş bir odacık ve elektrik alanı uygulanmış anot ve katottan oluşur. İyonlaştırıcı radyasyon gaz dolu odacığa girdiğinde gaz içinde iyonlaşmaya neden olur. Oluşan negatif yüklü iyonlar anoda, pozitif yüklü iyonlar katoda hareket eder ve böylece bir akım darbesi elde edilir. Gazlı sayıcılar birbirlerinden esas olarak uygulanan voltaj bakımından farklıdır. Anot ve katot arasına uygulanan gerilimle bağlantılı olarak, radyasyonun gaz içinde oluşturduğu iyonların dağılımı değiştiğinden gazlı sayıcıların ölçüm alanları da farklı olur. Bu sebeple, bir gazlı sayıcı kendisine uygulanan voltaj değerine göre orantılı, sınırlı orantılı, Geiger Mülser gibi isimler alır (Ayçık, 2008).

Gazlı sayıcıların en elverişsiz yönü düşük verimli olmalarıdır. Yüksek yoğunluğa sahip katı hal dedektörler ise uygun kristal boyutlarında radyasyonun menzilinin uzun bile olması durumunda dahi uygun soğurma yapabilir. Ancak iyi çalışabilir bir katı hal dedektör için iki şartın sağlanması gerekir. Bunlardan ilki, elektron ve iyonların yeteri kadar birikip elektronik pulsların oluşabilmesi için yüksek elektrik alanına dayanabilecek dedektör materyalinin olmasıdır. Bu materyal radyasyon olmadığında taban gürültüsünü engellemek için akım geçirmemelidir. İkinci şart ise; elektronların radyasyon etkisi ile atomdan kolayca ve çok sayıda kopabilmesidir.

Ayrıca, elektronlar ve ilk iyonlaşan atomlar materyal boyunca hareket edebilmelidir. Açıkça görüldüğü gibi birinci şart dedektör materyalinin yalıtkan olmasını gerektirirken ikinci şart iletken olmasını gerektirmektedir. Her iki şart birden ise ancak yarı iletken bir materyal kullanılarak sağlanabilir (Krane, 2002).

Bir önceki paragrafta bahsedilen ikilem, sintilasyon dedektörlerinde iyonlaşma sonucu oluşan elektronlarla, elektronik pulslarla oluşan elektronların aynı olmamasıyla giderilmiştir. Bir sintilasyon dedektöründe ışın kristalden geçerken kristaldeki atomları uyarır ve bu uyarma sonucu görünür bölgede bir foton yayımlanır. Bu fotonlar foto duyarlı yüzeye çarparak fotoelektron salınmasına sebep olur. Salınan ikincil fotonlar fotoçoğaltıcı tüpte çoğaltılır, hızlandırılır ve elektriksel pulslara dönüştürülerek iyonlaştırıcı olmayan radyasyonun ölçümü yapılır. Sintilasyon dedektörlerinin yapımında en çok çinko sülfür, sodyum iyodür kristalleri kullanılmaktadır. Katı hal dedektörü olan sintilasyon dedektörleri nispeten yüksek verimli ve uygun çözme gücüne sahiptir (Krane, 2002).

Diğer katı hal dedektörleri ise yarı iletken dedektörlerdir. Bunlar diğer dedektör çeşitleri arasında en yüksek ayırma gücüne sahiptir. Bu dedektörlerde germanyum ve silikon gibi yarı iletken malzeme kullanılır. Germanyum ve silikon dört değerlikli atomların komşu atomlarla dört kovalent bağ oluşturdukları kök kristaller şeklindedir. Yani tüm değerlik elektronları bağa katılmıştır ve bant yapısı bir dolu bant ve bir boş iletim bandı şeklindedir. Dolu bant ile boş iletim bandı arasındaki enerji aralığı bir yalıtkanla göre oldukça düşüktür. Yarı iletken materyalde, az sayıda elektron oda sıcaklığında değerlik bandında deşik adı verilen pozitif (+) bir boşluk bırakarak iletim bandına termal olarak uyarılır. Oluşan boşluk komşu elektronlardan biri ile doldurulur ve yeni bir deşik oluşmuş olur. Böylece, deşikler kristal içinde hareket ediyorlarmış gibi görünürler. Radyasyonun oluşturduğu bu elektronlar ve pozitif boşluklar elektrik alan yardımı ile farklı kutuplara çekilir. Bir kutupta biriken elektronlar elektronik pulslar oluşturur. Oluşan pulsların genliği radyasyonun enerjisi ile doğru orantılı olduğundan radyasyonun enerjisi analiz edilebilir. Bazen elektrik iletimini kontrol etmek için yarı iletken malzemelere katkı maddesi de ilave edilebilir (Krane, 2002). En çok kullanılan yarı iletken dedektör çeşitleri; silisyum-lityum (Si(Li)), silikon diot, germanyum-lityum (Ge(Li)), yüksek

saflıkta (high purity) germanyum (HPGe) ve germanyum-kadmiyum-tellür (Ge-Cd-Te) dedektörlerdir (Ayçık, 2008).

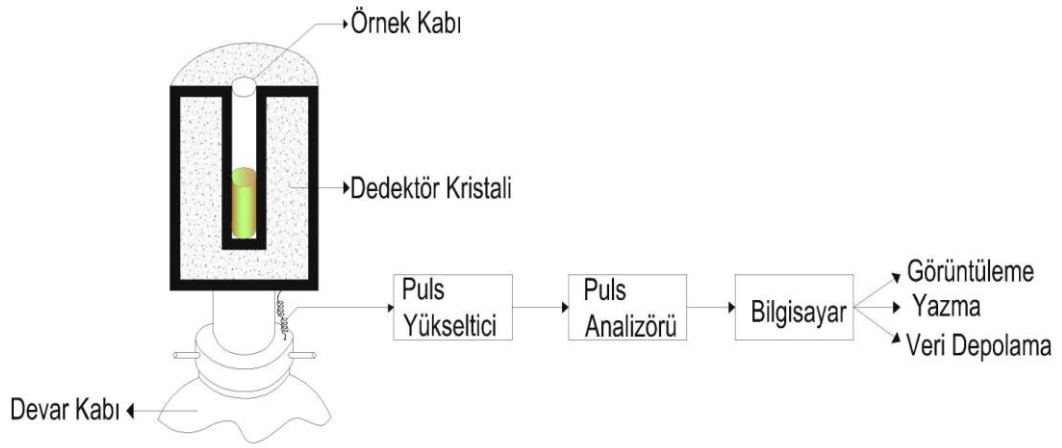
1.5.2. Gama Spektrometresi

Dedektör ve bazı elektronik modüllerin uygun kombinasyonu spektrometre olarak adlandırılır. Çevresel radyoizotopların ölçümünde alfa spektrometresi, gama spektrometresi ve beta sayıcısı kullanılır. Gama spektrometresi, radyoaktivite içeren örneklerdeki radyoizotopların nitel ve nicel olarak tanımlanmasında en çok kullanılan tekniktir. Bunun nedeni Bölüm 1.3.5’de belirtildiği gibi her alfa veya beta bozunmasını genellikle ölçülebilir nitelikte bir gama ışını takip ettiğinden çok sayıda radyoizotopun gama spektrometresi ile tayin edilebilir olmasıdır. Üstünlük sağlayan bir diğer önemli özellik de gama ışınlarının enerjisi her bir çekirdek için kesikli ve karakteristik olduğundan aynı örnekte, farklı radyoaktif çekirdeklerin tek tek ve aynı anda nitel ve nicel olarak analizinin mümkün olmasıdır.

Gama spektrometresinin tercih edilmesinin diğer sebepleri düşük tayin sınırı, ölçümlerdeki yüksek kararlılık, veri işlemedeki doğruluk ve analiz edilen bilgilerin güvenilirlik düzeylerinin yüksek olmasıdır. Gama ışınlarının ulaşma uzaklıkları yüksek olduğundan analiz örnekleri genellikle kimyasal bir ön hazırlık işlemi gerektirmez. Tüm bu sayılan avantajlar gama spektrometresi ile ölçümü diğer ölçüm yöntemlerinden üstün kılar (Ayçık, Demirel, 2003).

Gama spektrometresi çalışma esası gama ışınlarının dedektör materyali ile etkileşmesine dayanır. Spektrometre ile analizde Bölüm 1.4’de anlatılan fotoelektrik olay nedeniyle oluşan fotopikler kullanılır. Gama spektrometresinde gelen radyasyon dedektöre girer ve dedektör kristali ile etkileşir. Bu etkileşim sonucu, enerjisinin bir kısmını-tamamını kaybeder ve daha düşük enerjili elektronlar salınmasına neden olur. Salınan bu elektronlar toplanır ve analiz edilmek için elektronik devre tarafından akım pulsuna dönüştürülür, yükseltgenir ve Çok Kanallı Analizörde (MCA) analiz edilir. Böylece, gelen gama ışınının enerjisine bağlı olarak, dedektörden elde edilen elektrik darbeleri, bir seri elektronik modülden geçirilerek MCA’da enerji dağılımlı gama spektrumu olarak gözlenir. Gama spektrometresi

özellikleri kullanılan dedektör materyaline göre değişir. Yüksek saflıkta germanyum (HPGe) yarı iletken dedektör, gama spektrometresinde yüksek çözme gücü sebebiyle oldukça tercih edilen bir dedektör tipidir. HPGe kristalin radyasyon ile etkileşimi ve bu etkileşimin deteksiyonu Bölüm 1.5.1’de anlatıldığı şekilde gerçekleşir. Şekil 12’de kuyu tipi HPGe dedektörlü bir gama spektrometresinin akım şeması gösterilmiştir.



Şekil 12. Kuyu tipi HPGe dedektörlü gama spektrometresi

Şekilde gösterilen kuyu tipi dedektörlerin avantajı sayım açısının geniş olmasıdır. Ölçümlerde örnek kabı olarak dedektör üzerine bir şapka gibi oturan özel Marinelli kabı veya kuyu içine yerleştirilen tüplerin kullanılması durumunda dedektör ve örnek kabının geometrisi sebebiyle sayım kayıpları düşüktür. Kuyu tipi geometrisi 4π geometrisi kabul edilebilir. Ayrıca dedektör kristali olarak saf germanyum kristali kullanılmasının bir diğer avantajı da devamlı soğutma yapılmasını gerektirmemesidir. İçinde safsızlık barındıran Ge(Li), Si(Li) gibi katı hal dedektörleri, sürüklenmiş olan safsızlık atomlarının dizilişinin bozulmaması için devamlı soğutma gerektirirken saf germanyum kristal dedektörlerinde sadece yüksek voltaj uygulanması durumunda soğutma işlemi gerekir. Bu da HPGe dedektörlerin Ge(Li) ve/veya Si(Li) dedektörlere göre çok önemli bir üstünlüğüdür.

1.5.2.1. Gama Spektrometresinde Analiz

Bölüm 1.5.2’de bahsedildiği gibi, gama ışınlarının enerjisinin her bir çekirdek için kesikli ve karakteristik olması nedeniyle gama spektrometresi kullanılarak aynı örnekte, farklı radyoaktif çekirdeklerin aynı anda ayrı ayrı nitel ve nicel olarak analiz etme imkanı vardır. Nitel analizde spektrumdaki pik tepe noktası enerjileri belirlenir. Gama ışınlarının yayılma olasılığı ve yarılanma ömürleri göz önünde tutularak bu enerjilerin hangi izotoplara ait olduğu belirlenir.

Gama spektrumunda ilgilenilen pikin net alanı kullanılarak örnekteki herhangi bir radyonüklitin özgül aktivitesi bulunarak nicel analiz de yapılır. Özgül aktivite ile radyoaktif tanecik sayısı arasındaki ilişki Eşitlik 15’de verilmiştir.

$$A = N \times \lambda \quad (15)$$

Örneğin özgül aktivitesi ilgilenilen pik alanı ve bazı diğer parametreler kullanılarak Eşitlik 16’dan yararlanılarak bulunur.(Ayçık, Demirel, 2003).

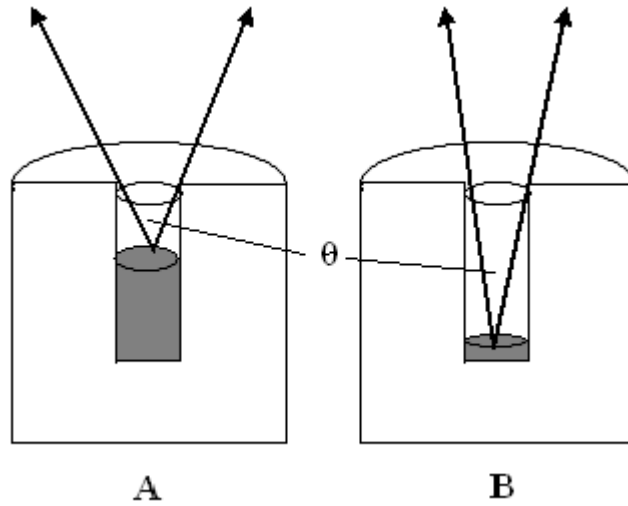
$$A(Bq / kg) = \frac{PA}{t \times \varepsilon \times f_{\gamma} \times D \times m} \quad (16)$$

Net pik alanı elde edilen spektrumda ilgilenilen pikin sınırlarının kullanıcı tarafından belirlenmesi sonrası spektrometreye bağlı yazılımın, bu pikin altında kalan alandan Compton fon alanını çıkarması ile elde edilir. Daha sonra çevrede doğal olarak bir fon oluşturan radyoizotopların etkisi bertaraf etmek, sadece seçilen radyoizotoptan gelen sayımları göz önüne almak için çevresel fon alanı da çıkarılarak net pik alanı bulunur. Eşitlik 16’da geçen diğer faktörlerden olan yayılma olasılığı ve bozunma faktörünün değerleri, literatürlerde yayınlanmış veri tablolarından ilgilenilen radyoizotop için kesin olarak bulunabilir. Bu durumda örneğimizde kilogram başına Bequerel (saniyedeki bozunum) cinsinden aktivite hesaplanmasında nicel analizi tamamlamak için bilinmesi gereken tek parametre verim parametresi kalmaktadır.

Burada bahsi geçen verim değeri spektrometrenin zırhlaması, dedektör kristal cinsi ve hacmi, kullanılan elektronik donanımın özellikleri gibi birçok parametreye bağlı olarak her spektrometre için farklıdır. Ayrıca örneğin geometrisi, dedektöre göre konumlandığı yer, örneğin cinsi ve matrisi gibi faktörler de verimi etkiler. Bu kadar çok parametrenin etkilediği bir değişkenin tam olarak belirlenebilmesi de oldukça güçtür.

1.5.2.2. Gama Spektrometresinde Verim ve Verim Kalibrasyonu

Bölüm 1.5.2.1’de bahsedildiği gibi, gama spektrometresi ile aktivite derişimi tayininde en önemli problem verim tayini ve kalibrasyonudur. Nicel analiz yapabilmek için, HPGe dedektör sisteminin veriminin gama enerjisinin bir fonksiyonu olarak tayin edilmesi şarttır ancak verim kalibrasyonu yapılırken birçok faktörün de göz önünde tutulması gereklidir (Ayçık, Demirel, 2003). Örneğin verim, örnek ve dedektörün geometrisinden oldukça etkilenir. Çünkü oranı bu geometrilere bağlı olarak, kaynaktan salınan fotonlar ile dedektörle etkileşebilen fotonlar aynı sayıda olmaz. Şekil 13’de iki farklı sayım geometrisindeki örnekler gösterilmiştir.



Şekil 13. İki farklı geometride sayım açısı

Şekilde iki kuyu tipi dedektör de aynı tüp geometrisinde olduğu halde örnek yüksekliklerinin farklı olması sayım alınabilen açıyı (sayım açısını) oldukça

değiştirmektedir. Şekil 13-A'da θ ile belirtilen açıda kaynaktan çıkan fotonlar dedektörle hiç etkileşmeden dedektörden uzaklaşmaktadır. Öte yandan geri kalan $(4\pi-\theta)$ kadar açı sayım alınabilen açıdır. Şekil 13-B'de ise örnek yüksekliğinin azalması ile θ açısı daralmakta ve sayım açısı artmaktadır. Sayım alınamayan açının değişmesi dedektör verimini de değiştirmektedir. Görüldüğü gibi örneklerin sadece yüksekliklerinin farklı olması bile verim değerine etki etmektedir. Bunun yanında, örnek kabının cinsi, kabın dedektöre olan mesafesi, örnek hacmi gibi birçok faktör de verime etki etmektedir. Ancak bu geometrik faktörlerden başka verimi etkileyen faktörler de vardır. Örneğin, foton dedektöre ulaşmadan önce fotonun yolu üzerinde etkileştiği diğer materyaller tarafından absorplanması nedeniyle de dedektör veriminde bir düşüş olur. Bir foton dedektöre ulaşmadan önce ilk olarak örnek kabı, daha sonra ise dedektör zırhlama malzemeleri tarafından soğurulmakta ve daha sonra dedektöre ulaşmaktadır. Bu soğurulma miktarı da, malzemelerin cinsine, kalınlığına ve fotonun enerjisine bağlı olarak değişmektedir. Sonuç olarak, dedektör ve örnek kombinasyonu değiştikçe verim eğrisinin davranışı da değişmektedir. Öte yandan foton sadece bu malzemeler tarafından değil örneğin kendisi tarafından da absorplanır. Fotonun enerjisi yeterince yüksekse örnek kabı çeperine daha düşük bir enerji ile ulaşır, yeterince yüksek değilse tüm enerjisini örnek içinde de bitirebilir ve sayımı alınamaz. Bu etkinin kuvveti ise örneğin cinsine, yoğunluğuna, tanecik boyutlarına ve fotonun enerjisine bağlı olarak değişir.

Gama spektrometresinde her bir enerji için bulunan verim değerleri ait oldukları enerjiye karşı grafiğe geçirilerek verim kalibrasyon eğrileri elde edilir. Eğer kalibrasyon eğrileri uygun bir matematiksel fonksiyona uydurulabilirse (fit edilirse) verim kalibrasyon eşitlikleri elde edilir. Ancak gama spektrometresinin toplam verimi bu kadar çok parametreye bağlı iken verim kalibrasyonu yapmak ve verimi tayin ederek herhangi bir örneğin aktivite derişimini hesaplamak oldukça güç bir iştir. Verim kalibrasyonu yaygın olarak deneysel yöntemle yapılır. Bu yöntem, ilgilenilen enerjide örneğin pik alanı ile aynı radyoaktif izotopa sahip standart kaynağın aynı enerjideki pik alanının karşılaştırılması esasına dayanır. Bu amaçla ölçümü yapılacak örnek ile aynı geometri, yoğunluk, partikül büyüklüğü ve matriste bir standart kaynak hazırlanır. Standart kaynağın aktivite derişimi bilindiğinden standardın deneysel olarak ölçülen ve teorik olarak hesaplanan aktivite oranı

hesaplanır. Bu oran yayılan fotonların ne kadarının dedektöre ulaşabildiğini, yani dedektör verimini verir. Ancak, deneysel verim kalibrasyonu yapmak zaman alıcı, pahalı ve çoğu zaman sadece yaklaşımlardan ibaret kalan bir yöntemdir. Çünkü özellikleri örneklerle tamamen aynı olan standartlar hazırlamak neredeyse imkansızdır. Aynı bölgeden alınmış iki toprak örneği bile içerikleri, partikül büyüklükleri, barındırdığı safsızlıklar, yoğunlukları gibi birçok özelliği bakımından birbirinden farklı olacaktır. Öte yandan standartlar yüksek aktiviteye sahip olduklarından, bu kadar çok standart hazırlanmış olsa bile, bir süre sonra aktiviteleri azalacağından hesaplamalarda devamlı düzeltmeler yapılması ve belli bir süre sonunda standartların yenilenmesi gerekir. Bunun dışında, standartlar radyoaktif kaynaklar olduğundan temininde karşılaşılan ulusal ve uluslararası zorlukların yanı sıra maliyetleri de yüksek olmaktadır. Sonuçta deneysel olarak verim kalibrasyonunun doğru olarak yapılabilmesi için çok fazla ölçüm, farklı özelliklerde standart ve çok vakit gerekir. Tüm bu zorluklar sebebiyle deneysel yöntemle verim kalibrasyonu yapılırken ihmaller ve varsayımlar yapılır. Bu da beraberinde hatalar getirir.

Günümüzde deneysel verim kalibrasyonu yöntemine alternatif olarak analitik ve matematiksel modelleme yöntemleri geliştirilmekte ve çoğunlukla piyasada hazır paketler halinde bulunan simülasyon programları kullanılmaktadır. Oldukça pahalı olan bu hazır programlar yerine iyi bir matematik ve bilgisayar programlama bilgisi gerektiren çeşitli modelleme yöntemleri de kullanılabilmektedir.

1.5.2.3. Simülasyon Yöntemleri ve Monte Carlo Yöntemi

Günümüzde karmaşık sistemlerin deneysel olarak incelenmesinin zor veya pahalı olduğu durumlarda simülasyon yöntemlerine sıklıkla başvurulmaktadır. Simülasyon gerçek bir sistemin girdi ve çıktılarının kullanılarak sayısal olarak modellenmesi ve bu modelin bilgisayar ortamına aktarılarak çok çeşitli durumlar için incelenebilmesidir. Deneysel yöntemlere kıyasla simülasyonlar doğru tasarlandıkları takdirde çok daha çabuk, doğru ve ucuz şekilde sistem performansı ile ilgili bilgiler vermektedir. Böylece gerçek sistemde değişiklikler yapmaya gerek kalmadan sistem değişkenlerinin arasındaki etkileşim daha kolay gözlenebilmekte, sistem incelenebilmekte ve sayısal sonuçlara ulaşılabilir (Şaşer, Hançerlioğulları,

Übeyli, 2008). Bölüm 1.5.4’de bahsedildiği gibi son zamanlarda, deneysel yöntemlerin dezavantajlarından dolayı gama spektrometresinin verim kalibrasyonu için de deneysel yöntemlere kıyasla simülasyon yöntemleri daha çok kullanılmaya başlanmıştır.

Monte Carlo yöntemi de olasılık teorisi üzerine kurulu bir simülasyon sistemidir. Bu yöntemde, istatistiki teknikler kullanarak bir deney sayısal olarak taklit edilir. Problem tesadüfi sayıları kullanarak defalarca simüle edilip hesap edilecek parametre simülasyon sonuçlarına bakılarak yaklaşık olarak hesaplanır (Hançerlioğulları, 2006). Nükleer uygulamalar için de birçok araştırmacı Monte Carlo yöntemi ile oluşturulmuş ticari hazır paket programlar kullanmaktadır. Örneğin; MCNP (Monte Carlo N-Particle Program) çeşitli kaynak-dedektör geometrileri için verim hesabında kullanılan bir programdır. GEANT Monte Carlo kodu ise kuyu tipi dedektörler için verim hesaplarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu programların kullanılabilmesi için dedektör ve örnek özellikleri programa ayrıntılı bir biçimde tanıtılmalıdır.

Bu çalışmamızda ‘Muğla Üniversitesi Kimya Bölümü Radyoaktivite Araştırma ve Analiz Laboratuvarı’nda kullanılmakta olan kuyu tipi HPGe dedektörünün verim kalibrasyonunun yapılabilmesi için simülasyon yöntemlerinden faydalandı. Standart kaynakların yetersizliğinden dolayı analiz örneklerinin aktivite derişimi hesaplamalarında kullanılan verim parametresi yaklaşımlardan öteye gidememekteydi. HPGe dedektörünün simüle edilerek modellenmesi ile bundan sonraki analizlerde standart kaynak bulundurma ve hazırlama zorlukları ile karşılaşılmadan çok çeşitli durumlar halinde bile sadece simülasyon girdileri değiştirilerek dedektörün verim kalibrasyonu yapılabilecektir. Çalışmamızda dedektör simülasyonun yapılabilmesi için hem matematiksel modelleme yöntemlerinden hem de Monte Carlo yönteminden faydalandı. Kodların yazılmasında programlama dili olarak MATLAB programı kullanıldı.

MATLAB, teknik hesaplamalar ve matematiksel problemlerin çözümü ve analizi için tasarlanmış bir yazılım geliştirme aracıdır. “MATrix LABoratory” kelimesinin kısaltması olan MATLAB, adında da anlaşılacağı üzere matrisler yani diğer bir deyişle diziler ile çalışır. MATLAB’de yazılan programlar, MATLAB’in kendine

özgü dili kullanılarak yazılır ve MATLAB içinden çalıştırılır. MATLAB ile veri elde etme, veri analizi ve inceleme, görsellik ve görüntü işleme, algoritma prototipi oluşturma ve geliştirme, modelleme, programlama ve uygulama geliştirme yapılabilmektedir (Uysal, 2004).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu tez çalışmasında ‘Muğla Üniversitesi Radyoaktivite Araştırma ve Analiz Laboratuvarı’nda kullanılmakta olan kuyu tipi HPGe dedektörlü gama spektrometresinin enerjiye bağlı verim grafiği ve eşitliği simülasyon yöntemi ile elde edildi. Elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılarak yöntemin doğruluğu tartışıldı. Literatürde Bölüm 1.5.4’de anlatılan gama spektrometresinin verim kalibrasyonu ile ilgili çeşitli simülasyon yöntemleri kullanılarak yapılmış bir çok çalışma vardır. Bu çalışmalar, simülasyonun uygulandığı dedektör tipi ve özellikleri, kullanılan simülasyon yöntemi, bilgisayar programları ve bunun gibi yönlerden birbirlerinden ayrılmaktadır. Ayrıca literatürde verim kalibrasyonu yapılırken göz önüne alınması gereken çakışma faktörü ve self-absorpsiyon düzeltmeleri üzerine yapılmış, değişik yöntemler önerilmiş çalışmalar da bulunmaktadır.

Pomme (2009) kuyu tipi radyasyon dedektörleri için analitik bir model geliştirmiştir. Model kuyu içinde rasgele bir pozisyonda bulunan kaynaktan yayılan elektronlar, fotonlar ve pozitronlar için kullanılabilir. Model hem noktasal hem de silindirik kaynaklar için çalışmıştır. Bu çalışmanın diğer çalışmalardan farkı 511 keV’de zıt yönlerde yayınlanan iki yok olma fotonunu, elastik ve inelastik etkileşimleri göz önüne almasıdır. Analitik model ortaya çıkarıldıktan sonra elde edilen sonuçlar simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve Monte Carlo sonuçları ile uyum içinde olduğu görülmüştür.

Abbas (2006) tarafından yapılan çalışmada, verim kalibrasyonunun analitik olarak yapılabilmesi için kuyu tipi gama dedektörünün geometrik verimi üzerine odaklanılmıştır. Bunun için kuyu içindeki eksen üzerinde olan ve olmayan nokta kaynakların, ayrıca dairesel disk ve silindirik kaynakların katı açısı hesabı için analitik yöntemler önerilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucu katı açıdan faydalanarak geometrik verim bulunmuş ve elde edilen sonuçların daha önce yayınlanmış verilerle %96’dan fazla bir uyum gösterdiği bulunmuştur.

Appleby ve Philiposian (2004) çalışmalarında kuyu tipi dedektörlerin kalibrasyonlarının genellikle örneğin kuyu yüksekliğine eş yükseklikte olduğu

durumlar için verilmesi problemini ele almıştır. Çalışmada örnek yüksekliği ve verim arasındaki ilişkiyi incelemek için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Model, bir UO_3 diskin dedektörden farklı uzaklıklara yerleştirilip ölçümler yapılması ile test edilmiştir. Sonuçlar, kuyunun üzerine yerleştiren diskin veriminin, dibine yerleştiren diskin veriminin %36'sı kadar olduğunu göstermiştir. Ayrıca disk kuyu dibi ve üzerine yakın yerleştirildiğinde enerjiye bağlı verim değişiminin az olduğu da rapor edilmiştir.

Abbas (2001) bir çalışmada NaI(Tl) ve HPGe kuyu tipi dedektörlerin tam enerji pik verimlerinin belirlenmesi için analitik formüller geliştirmiştir. Bu formüllerde, örnek kabı ve dedektör zırlaması tarafından absorplanan fotonlar da dikkate alınmıştır. Formüller, simetri ekseninde bulunan ve bulunmayan nokta kaynaklar ile dairesel diskler için çeşitlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar daha önceki çalışmalarla kıyaslanmıştır. Çalışmada hesaplanan değerler ile daha önce yayınlanmış değerler arasında nokta kaynaklar için %99'dan daha yüksek bir uyum olduğu ileri sürülmüştür.

Wang, Hou ve Tseng (1999) HPGe dedektör için katı açısı hesaplamalarında kullanılmak üzere kişisel bilgisayar tabanlı 'SWELL' isimli bir program geliştirmiştir. Program kullanılarak farklı örnek geometrileri için gama enerjisine karşı pik verimi eğrisi önceden belirlenmiş referans bir geometri yardımıyla çıkarılmıştır. Çalışmada, yazılan programın 20 keV ile 1.5 MeV enerji aralığı için başarılı bir şekilde çalıştığı belirtilmiştir. Ayrıca çakışma faktörü düzeltmesi için de %3 toplam belirsizlik ile yarı ampirik bir yöntem geliştirilmiştir. Co-60, Ce-139, Ba-133 ve Fe-59 ile yapılan çalışmaların hesaplanan düzeltme faktörünün deneysel verilerle uyum içinde bulunduğu rapor edilmiştir.

Wang, Kang ve Chen (1993)'in çalışmasında da yine HPGe dedektör için farklı geometrilerde pik verimi kalibrasyonu için 'ESOLAN' isimli bir program yazılmıştır. Program farklı geometriler için katı açısı hesaplayarak buradan geometrik verimi bulmaktadır. Bu programın özelliği bir önceki çalışmada olduğu gibi kişisel bilgisayarlarda kullanılabilmesidir. Yapılan denemeler programın 80 keV

ile 3 MeV enerji aralığında toplam belirsizliği %3'ün altında tutarak başarılı bir şekilde çalıştığını göstermiştir.

Şimdiye dek sözkonusu çalışmalarda, gama dedektörlerinin verim tayininin yapılabilmesi için analitik ve matematiksel modeller geliştirilmiş ve bu modeller çeşitli bilgisayar programları yardımıyla çözümlenerek sonuçlara ulaşılmıştır. Bir diğer grup olarak nitelendirilebilecek çalışmalarda ise bu modellerin araştırmacılar tarafından geliştirilip, uygulanması yerine hazır kodlar veya programlar kullanılarak verim tayini yapılmıştır.

Nedjadi, Spring, Bailat, Decombaz, Triscone, Gostely, Laedermann ve Bochud (2007) bir çalışmada kuyu tipi NaI(Tl) dedektörü için sayım istatistiği simülasyonu yapabilmek için Monte Carlo kodlarını kullanmışlardır. Çalışmada simülasyon için 'GEANT' isimli hazır kodlar kullanılmış ve radyoaktivite derişimi belirlenmek istenen radyoizotopların bozunma şeması ile ilgili parametreler programa tanıtılmıştır. Bu metotla F-18, Y-88, Eu-152 ve Rn-222 radyonüklitlerinin radyoaktivite derişimleri simüle edilmiştir.

Bochud, Bailat, Buchillier, Byrde, Schmid ve Laedermann (2006) çalışmalarında kuyu tipi HPGe dedektörün kalibrasyonu için de Monte Carlo yöntemini kullanmışlardır. Monte Carlo kodlarının uygulanması için gerekli ilk şart geometrik parametrelerin tam olarak bilinmesi olduğundan, çalışmada kalibrasyonu yapılacak olan dedektörün ilk önce deneysel olarak geometrik parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra elde edilen veriler hazır Monte Carlo kodlarına uygulanmış ve sonuçların validasyonu için yine deneysel yöntemler kullanılmıştır. I-131 ve Co-60 ile yapılan validasyon çalışmaları, simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle %94 ve üstünde bir uygunluk gösterdiğini kanıtlamıştır.

Helmer, Nica, Hardy ve Iacob (2004) çalışmalarında ilk önce bağıl ve gerçek verim ölçümlerini Monte Carlo hesaplamalarıyla kombine ederek HPGe gama dedektörü için verim değerlerini %0.2 hata ile bulmuşlardır. Monte Carlo hesaplamalarında 'CYLTRAN' kodları kullanılmış ve hesaplar 50 keV ile 1400 keV enerji aralığı için yapılmıştır. Daha sonra enerji aralığı Na-24, Co-56 ve Ga-66 radyonüklitleri kullanılarak bağıl verimlerinin ölçülmesi ile 4.8 MeV'e kadar

geniştirilmiştir. Böylece, deney ve hesaplama sonuçları kombinlenerek %0.4 hata ile verim eğrisi elde edilmiştir.

Vargas, Diaz ve Sanchez (2003) p-tipi HPGe dedektör için 60-2000 keV enerji aralığında verim transferi üzerine çalışmışlardır. Pik verimi kaynağın dedektörden farklı uzaklıklarda olduğu durumlar için incelenmiştir. Verim değerleri iki farklı yol ile bulunmuştur. Bunlardan birincisi, dedektör için üretici tarafından sağlanan fiziksel boyutlar kullanılarak doğrudan hesaplama yolu, ikincisi ise verimi bilinen referans bir kaynak kullanıp bağıl ölçümler yapma yoludur. Doğrudan hesaplama yönteminde kendileri tarafından geliştirilmiş olan ‘DETEFF’ isimli Monte Carlo kodları kullanılmıştır. Sonuçta, verim transferi ismini verdikleri kodlar ile hesaplanan değerler ile deneysel değerler arasında birtakım farklılıklar çıkmıştır. İkinci yöntem olan bağıl hesaplamalarda ise deneysel verilerden sapma %5’in altındadır.

Helmer (2003) de çalışmasında gama spektrometrelerinin enerji ve verim kalibrasyonu yöntemlerinden bahsetmiştir. Sonuçta, son zamanlarda kullanılmakta olan Monte Carlo kodlarının geniş bir enerji aralığı için %0.1 kadar bir hata ile sonuç verebildiği belirtilmiştir.

Helmer, Hardy, Iacob, Vega, Neilson ve Nelson (2003)’un çalışmasında germanyum dedektörün verim eğrisinin eldesi için Monte Carlo hesaplamaları kullanılmıştır. Modellenen dedektör 280 cm³ hacminde n-tipi bir dedektördür. Dedektör pozisyonu ve kristal uzunluğu bir seri ölçümle belirlendikten sonra dedektör çapı, iç ölü tabaka kalınlığı ve dış ölü tabaka kalınlığının belirlenmesi için Monte Carlo foton ve elektron transport kodları kullanılmıştır. Kullanılan kodlar hazır ‘MCNP’ ve ‘CYLTRAN’ kodlarıdır. Sonuçta Monte Carlo kodları kullanılarak germanyum dedektörün veriminin 50-1400 keV enerji aralığı için %0.2 hata ile bulunduğu belirtilmiştir.

Hernandez ve Daoushy (2003) çalışmalarında tamamlanmamış yük toplamının kuyu tipi HPGe dedektörlerin performans özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Bunun için Monte Carlo fotopik verimi ile kombinlenen yüklerin toplanma zamanı ölçümleri yöntemi üzerinde çalışılmıştır. Monte Carlo simülasyonlarında hazır ‘MCNP’ kodları kullanılmıştır. Yöntemlerinin özellikle 40 keV üzeri enerjilerde

deneysel verilerle uyum içinde belirtilmiştir. Sonuçta 1460 keV için deneysel verim ve simülasyon sonuçları arasındaki oranın bu yöntemle 0.73'den 0.96'ya yükseltildiğini rapor edilmiştir.

Vargas, Timon, Diaz ve Sanchez (2002) çalışmalarında silindirik geometriler için self-absorpsiyon düzeltme faktörünü belirleyebilmek amacıyla Monte Carlo hesaplamalarını kullanmışlardır. Hesaplamalar için daha önce germanyum dedektörlerin verim tayini için geliştirilmiş olan 'DETEFF' kodları kullanmışlardır. Kodlar hazır olduğundan dedektör parametrelerinin iyi bir analizi yapılarak simülasyona tanıtılmış ve simülasyonlar 60-1500 keV enerji aralığı için uygulanmıştır. Sonuçlar üç farklı dedektör için değerlendirilmiş ve deneysel verilerle % 2 ve altında bir farkla doğru sonuçlar bulunduğu belirtilmiştir.

Ewa, Bodizs, Czifrus ve Molnar (2001) da kuyu tipi HPGe dedektörün verim tayinini için Monte Carlo kodlarını kullanmışlardır. Tayin, 50-2000 keV enerji aralığı için dedektör parametrelerinin simülasyona tanıtılması ile gerçekleştirilmiş ve sonuçların deneysel verilerle %88 ve üstünde uyum içinde olduğu görülmüştür.

Talavera, Neder, Daza ve Quintana (2000) çalışmalarında çeşitli kaynak konfigürasyonlarının Monte Carlo simülasyonlar üzerine etkilerini incelemişlerdir. Monte Carlo hesaplamaları için hazır 'GEANT' kodu kullanılmıştır. Bunun için hesaplanan pik verimleri 46-1800 keV enerji aralığı için deneysel verilerle kıyaslanmıştır. Çalışmada nokta kaynaklı örneklerden, hacimli örnekler kadar değişik geometriler incelenmiştir. Kullanılan örnekler petri kabında veya marinelli kabında bulunan, genellikle çözelti veya sedimentlerdir. Hesaplamalar sedimentler için %3.3 hata ile diğer örnekler için ise % 1.5 hata ile doğru sonuçlar elde edildiğini göstermiştir.

Laborie, Petit, Abt ve Girard (2000) Modane'deki yer altı laboratuvarında bulunan kuyu tipi HPGe dedektörün verim eğrisinin elde edilmesi için simülasyon yöntemlerinden faydalanmışlardır. Dedektör ve kaynak parametrelerinin ayrıntılı olarak incelenip belirlenmesinden sonra 'GEANT' Monte Carlo kodunu kullanarak çeşitli örnek yükseklikleri için çalışmışlardır. Çalışmalarında, çakışma faktörünün belirlenmesi için U-238, Th-232 ve Cs-134 radyonüklitlerinin bozunma şemalarını

göz önünde bulundurarak bu radyonüklitleri içeren örneklerin ölçümlemlerini modellemişlerdir. Sonuçta verim tayininde, simülasyon sonuçları ile deneysel verilerin uyumlarının 5-8 cm³ lük örnekler için %90, 8 cm³ lük örnekler için %85 olarak rapor etmişlerdir.

Gama dedektörlerinin verim tayini için literatürde bahsedilen çalışmalarda analitiksel-matematiksel yöntemler ile modelleme ve çeşitli simülasyon yöntemleri oldukça yaygın şekilde kullanılmıştır. Bu çalışmada laboratuvarımızda kullanılan dedektör için simülasyon yöntemi kullanılarak verim kalibrasyonu elde edilmesi amaçlanmıştır. Her dedektörün kristal ve elektronik aksam özellikleri kendine özgü olduğundan her dedektör için verim değerleri de değişmektedir. Bu yüzden kullanılan verim değerlerinin ilgili dedektöre ait olması önemlidir.

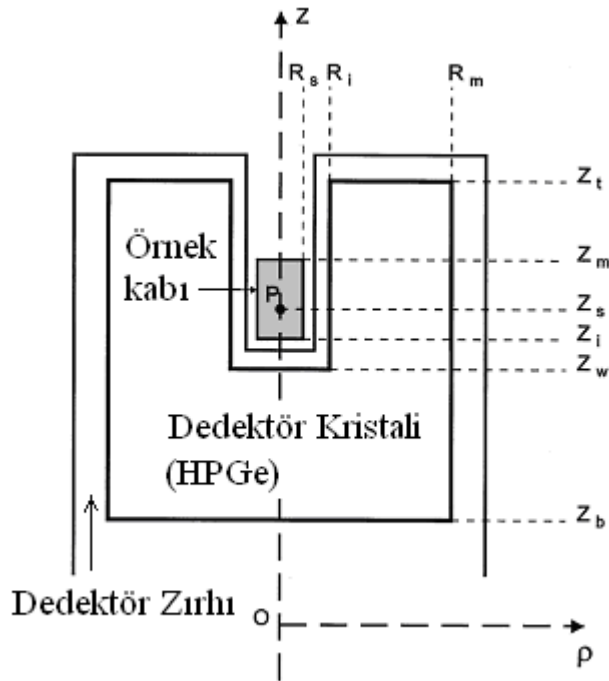
Çalışmamızın özgün olan yönü ise, matematiksel modelleme yöntemlerini diğer bazı simülasyon yöntemleri ile birleştiren bir çalışma olmasıdır. Çalışmamızda matematiksel olarak modellenen dedektörümüzün bazı hesaplamalarında Monte Carlo simülasyon yöntemi kullanılmıştır. Ancak Monte Carlo kodları için, piyasada ticari olarak bulunan ve araştırmacılar tarafından yaygın şekilde kullanılan hazır paket programlar kullanılmamıştır. Monte Carlo mantığına ve prensiplerine uygun olarak laboratuvarımızdaki HPGe dedektör için bizim tarafımızdan bir program yazılmıştır. Oldukça pahalı olan hazır programların satın alınmasını gerektirmeyen bu simülasyon programı özgün olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan programımızda tüm kodlar tarafımızca yazıldığından hazır programların aksine çalışma parametreleri istenildiği gibi değiştirilebilmektedir.

Ek olarak, çalışmamızın bir diğer özgün yanı da programlama dili olarak MATLAB kullanılmış olmasıdır. Daha önce MATLAB programlama dili kullanılarak gama dedektörleri verim kalibrasyonu için hazırlanmış herhangi bir çalışma literatürde bulunamamıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Modellenen Gama Spektrometresi

Gama spektrometrelerinde kullanılan dedektörler kristal hacmi, dedektör materyali ve tipi, dedektör zırhlama özellikleri, kullanılan elektronik aksam gibi birçok farklı parametreye bağlı olarak birbirinden farklı özellikler gösterir. Tüm özellikleri aynı gibi görünen iki spektrometrenin dahi verim değerleri birbirinden farklı olur. Bu nedenle, her spektrometrenin verim değeri kendine özgüdür. Bu çalışmada ‘Muğla Üniversitesi Radyoaktivite Araştırma ve Analiz Laboratuvarı’nda kullanılmakta olan gama spektrometresi için verim tayini çalışmaları yapıldı. Verim tayini yapılan spektrometre dedektörü kuyu tipi 110 cm^3 HPGe’dur. Co-60’ın 1.33 MeV’deki çözünürlüğü 3.78 keV’dir. Dedektöre bağlı olan 64 k çok kanallı analizörden alınan gama spektrumu ‘ORTEC-Omnigam B-30’ bilgisayar yazılımı kullanılarak analiz edilir. Şekil 14’de verim tayini yapılan dedektör gösterilmektedir.



Şekil 14. Modellenen dedektör

Dedektör en içte aktif olmayan germanyum ile daha dışta alüminyum ile zırhlanmıştır. Şekil 14’de R_m dedektör kristali aktif hacminin dış yarıçapını, R_i ise iç yarıçapını gösterirken, R_s örnek kabının iç yarıçapını göstermektedir. Ayrıca Z_b ve Z_t dedektör kristalinin, Z_i ve Z_m ise örnek kabının alt ve üst sınırlarının yükseklerini göstermektedir. Z_w dedektör kuyusunun alt taban yüksekliğini belirtirken, Z_s ise örnek içindeki herhangi bir nokta kaynağın yüksekliğini temsil etmektedir. Tablo 1’de dedektör, zırhlama malzemeleri ve örnek kabının geometrik parametre değerleri verilmiştir.

Tablo 1.Modellenen dedektörün geometrik parametre değerleri

Parametre	Değeri(mm)	Parametre	Değeri(mm)
Örnek kabı et kalınlığı	1	R_m	27.4
Al zırh kalınlığı	0.5	Z_t	61.1
Aktif olmayan Ge kalınlığı	0.003	Z_m	47.1
R_s	5	Z_i	22.1
R_i	8.503	Z_w	20.597

3.2. Deneysel Verim

HPGe gama spektrometresi veriminin deneysel yolla tayini için standart kalibrasyon kaynakları kullanıldı. Kullanılan spektrometre tüp geometrisine göre modellendiğinden tüp geometrisi standart kaynaklar kullanıldı. Kullanılan standart kaynaklar, içerdiği radyoizotoplar ve aktiviteleri belli karışık standartlar (mixed standart) olup 2.5 ve 0.5 cm yükseklik; 1.7 ve 0.8 g/cm³ yoğunluktadır. Tablo 2’de kullanılan birincil standart kalibrasyon kaynaklarının sertifika değerleri verilmektedir.

Tablo 2. Standart kaynaklar ve sertifika değerleri

Standart tüp-1(d=1.7 g/cc h=2.5 cm)			Standart tüp-2(d=0.8 g/cc h=2.5 cm)		
Radyonüklit	Yarı ömür	Aktivite(μ Ci)	Radyonüklit	Yarı ömür	Aktivite(μ Ci)
Cd-109	462.6 gün	öldü	Cd-109	462.6 gün	öldü
Co-57	271.79 gün	öldü	Co-57	271.79 gün	öldü
Te-123m	119.7 gün	öldü	Te-123m	119.7 gün	öldü
Cr-51	27.706 gün	öldü	Cr-51	27.706 gün	öldü
Sn-113	115.09 gün	öldü	Sn-113	115.09 gün	öldü
Sr-85	64.849 gün	öldü	Sr-85	64.849 gün	öldü
Cs-137	30.17 yıl	0.2447(01.10. 98)	Cs-137	30.17 yıl	0.2399(01.10. 98)
Y-88	106.63 gün	öldü	Y-88	106.63 gün	öldü
Co-60	5.272 yıl	0.2996(01.10. 98)	Co-60	5.272 yıl	0.2923(01.10. 98)
Standart tüp-3(d=1.7 g/cc h=0.5 cm)			Standart tüp-4(d=0.8 g/cc h=0.5 cm)		
Radyonüklit	Yarı ömür	Aktivite(μ Ci)	Radyonüklit	Yarı ömür	Aktivite(μ Ci)
Cd-109	462.6 gün	öldü	Cd-109	462.6 gün	öldü
Co-57	271.79 gün	öldü	Co-57	271.79 gün	öldü
Te-123m	119.7 gün	öldü	Te-123m	119.7 gün	öldü
Cr-51	27.706 gün	öldü	Cr-51	27.706 gün	öldü
Sn-113	115.09 gün	öldü	Sn-113	115.09 gün	öldü
Sr-85	64.849 gün	öldü	Sr-85	64.849 gün	öldü
Cs-137	30.17 yıl	0.2076(01.10. 98)	Cs-137	30.17 yıl	0.2082(01.10. 98)
Y-88	106.63 gün	öldü	Y-88	106.63 gün	öldü
Co-60	5.272 yıl	0.2508(01.10. 98)	Co-60	5.272 yıl	0.2568(01.10. 98)

Tabloda görülen radyoizotopların aktiviteleri 01.10.1998 tarihi itibarıyla verilmiştir. Bu durumda Cs-137 ve Co-60 dışındaki tüm radyonüklitler kısa yarı ömürleri sebebiyle aktivitelerini yitirmiş yani ölmüş olduklarından, çalışmalarımızda daha önce bu standartlarla elde edilen verim değerleri kullanıldı. Yarı ömürleri uzun olan Cs-137 ve Co-60 radyonüklitlerine ait üç enerji (661.6 keV, 1173.2 keV ve 1332.5 keV) için elde edilen verim değerleri de doğrulama amacı ile kullanıldı. Deneysel verim tayini, aktivitesi bilinen standart kaynağın teorik aktivitesi ile ölçülen aktivitesinin karşılaştırılmasına dayandığından, hesaplamalarda Eşitlik 17 kullanıldı.

$$\varepsilon = \frac{cps_{net}}{dps} \quad (17)$$

Eşitlik 17'nin uygulanabilmesi için öncelikle Cs-137 ve Co-60'ın aktivitelerinin (saniyedeki bozunma sayısı, dps) bilinmesi gereklidir. Standartların birim zamandaki bozunma sayıları standart kalibrasyon sertifikalarında 01.10.1998 tarihi itibarıyla

verildiğinden Eşitlik 18 kullanılarak standartların sayım tarihlerindeki aktiviteleri bulundu.

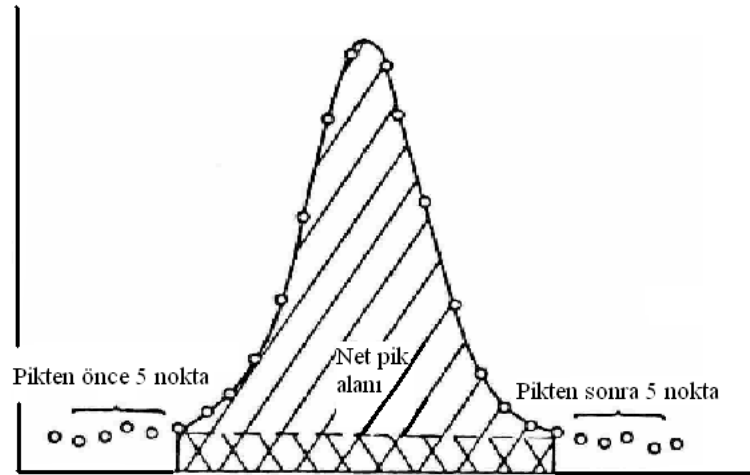
$$\frac{A}{A_0} = e^{-\lambda t} \quad (18)$$

Böylece, her iki izotop için, sayım yapılan tarih ile sertifika tarihi arasında geçen sürede azalan aktiviteler hesaplandı. Hesaplamalarda Cs-137 ve Co-60'ın yayılma olasılığı en yüksek, girişim yapmayan fotopik enerjilerindeki (661.6 keV, 1173.2 keV ve 1332.5 keV) fotopikler kullanıldı. Bu enerjiler ve yayılma olasılıkları Tablo 3'de verildi.

Tablo 3. Hesaplarda kullanılan radyoizotoplar

Radyoizotop	Enerji(keV)	Yayılma olasılığı
Cs-137	661,6	0,851
Co-60	1173,2	0,9986
Co-60	1332,5	0,9998

Eşitlik 17'deki diğer terim olan saniyedeki net sayım (cps_{net}) değerinin bulunması için, standartlar HPGe dedektörde 1000'er saniye sayıldı. cps değerlerinin bulunmasında aynı fotopik enerjileri kullanıldı. Standartların net sayım değeri 'Ortec omnigam B30' bilgisayar yazılımı kullanılarak bulundu. Net sayım değerinin bulunması için belirtilen enerjideki fotopiklerin toplam sayımından, Compton olayından gelecek fon sayımı çıkarıldı. Doğal fondan gelebilecek sayımlar standart aktivitesinin yüksek ve sayım süresinin kısa olmasından dolayı ihmal edildi. Şekil 15'de bir fotopikin net sayımının bulunabilmesi işlemi ifade edilmiştir.



Şekil 15. Net pik alanı bulunması

Şekilde ifade edildiği gibi bilgisayar yazılımının pikin net alanını belirleyebilmesi için pik ile pikten önce ve sonraki 5'er nokta daha seçilir ve yazılım otomatik olarak çarpı (X) işaretleri ile gösterilen Compton fon alanını toplam pik alanından çıkararak, net pik alanını bulur. Birim zamandaki net sayım ise bulunan net sayım değerinin sayım süresine bölünmesi ile bulunur.

Birim zamandaki bozunma ve sayım (dps ve cps) değerlerinin bulunmasından sonra ilgilenilen enerjilerdeki verim değerleri Eşitlik 17 kullanılarak bulundu. Verim değerleri bulunduktan sonra enerjiye karşı verim değerleri grafiğe geçirilerek verim kalibrasyon eğrisi elde edildi. Verim kalibrasyon denkleminin bulunması için ise veriler 'Curve Expert' programı kullanılarak en uygun denkleme uyduruldu.

3.3. Toplam Verim Modellemesi

Çalışmamızda, kuyu tipi HPGe dedektörün verimi 150-2000 keV enerji aralığı için modellendi ve verim kalibrasyon eğrisi elde edildi. Dedektör verimi, Bölüm 1.5.4'de anlatıldığı gibi, birçok farklı parametreye bağlı olduğundan her bir parametre önce tek tek ele alındı ve bu parametreler ayrı ayrı modellendi. Elde edilen sonuçlar daha sonra dedektörün toplam veriminin modellenmesinde kullanıldı. Dedektörün toplam verimi Eşitlik 19 ile ifade edilmiştir (Palacios, Alfonso, Barros, LaBrecque, Perez ve Lasoda, 2008).

$$\varepsilon_{toplam}(E_i) = f_{\text{çakışma}}(E_i) \times \varepsilon_{\text{geometrik}} \times \varepsilon_{\text{absorpsiyon}}(E_i) \times \varepsilon_{\text{örnek}}(E_i) \times \varepsilon_{\text{mutlak}}(E_i) \quad (19)$$

Burada toplam verimi oluşturan parametreler çakışma faktörü, geometrik verim, absorpsiyon verimi, örnek verimi ve mutlak verimdir. Eşitlikte de görüldüğü gibi geometrik verim hariç diğer tüm parametreler enerjinin birer fonksiyonudur. Bu bağımlılık, toplam verimi de enerjinin bir fonksiyonu haline getirir. Toplam verimi modelleyebilmek için bağımlı olduğu beş fonksiyonu da ayrıntılı bir şekilde modellemek gerekir. Çalışmamızda bu beş fonksiyon incelendi ve modellendi. Daha sonra bu modellerin sonuçlarından Eşitlik 19'a göre toplam verim modeli elde edildi. Elde edilen model ve gerekli parametre değerleri MATLAB programında yazılan programa tanıtıldı ve programa enerji ile değişen toplam verim değerleri hesaplatıldı. Toplam verim değerleri enerjiye karşı grafiğe geçirilerek verim eğrisi elde edildi. Ek-1'de toplam verim için yazılan kodlar verilmiştir. Toplam verimi oluşturan bu modeller aşağıda tek tek incelenip açıklanacaktır.

3.3.1. Çakışma Faktörü

Eşitlik 19'da geçen ilk terim olan çakışma faktörü, aynı bozunma olayında ardı ardına oluşan iki veya daha fazla fotonun dedektör kristali ile etkileşiminin, sistemin ayrı sinyaller üretmesi için gereksinim duyduğundan daha kısa bir zaman aralığında gerçekleşmesinden kaynaklanır. Sonuç olarak birkaç farklı sinyal yerine tek bir büyük sinyal oluşur. Bu durumda bu enerjiye karşı gelen piklerde sinyal eklenmesi veya sinyal kaybı olur. Literatürde sinyal eklenmesi 'iç çakışma' etkisi, sinyal kaybı ise 'dış çakışma' etkisi olarak tanımlanır. Dış çakışma etkisi, ilgilenilen fotona başka fotonların eşlik etmesi ihtimali ile buna karşı gelen toplam deteksiyon veriminin çarpımına bağlıdır. İç çakışma etkisi ise bu etkiye katılan tüm fotonların eşzamanlı yayılma ihtimalinin, karşı gelen tam-enerji pik verimiyle çarpımı ile orantılıdır.

Gama spektrometrik analizi yapılan örneğin aktivitesinin yüksek olmaması durumunda örnekten birim zamanda yayımlanan gama ışını sayısı da az olacağından elektronik sistem bu sayımların her biri için sinyal üretebilecek zamana sahip olur. Ayrıca dedektörün verimi çok yüksek değilse birim zamanda dedektörden elde edilebilecek sayım sayısı da düşük olacağından yine elektronik sistem bu sayımların

her biri için sinyal üretebilecek zamana sahip olur. Böylece iç çakışma ve dış çakışma etkilerinin ortaya çıkma ihtimali düşer. Bu yüzden, marinelli geometrisi gibi, tüp geometrisine nazaran sayım açısı daha düşük geometriler veya aktivitesi düşük örnekler için bu etkinin çok düşük olduğu kabul edilir. Bizim analizini yaptığımız örnekler genellikle aktiviteleri düşük çevresel örnekler olduğundan çakışma faktörünün toplam verim üzerine etkisinin olmadığı kabul edildi. Bu nedenle genel verim eşitliğimizdeki bu faktör ihmal edildi ve bir (=1=) olarak alındı.

3.3.2. Geometrik Verim

Eşitlik 19'da geçen diğer tüm parametreler enerjiye bağlı fonksiyonlar iken geometrik verim enerjiye bağlı değildir. Bu faktör sayımı yapılacak örneğin ve dedektörün geometrisine bağlı olarak değişir. Laboratuvarımızda kuyu tipi dedektör kullanıldığından sayım alınamayan açı nispeten küçüktür ve sayım geometrisi 4π geometrisine yakındır. Kullanılan örnek kabı ise 0.1 cm etkalınlığına sahip, 0.5 cm çapında polivinilklorür (PVC) tüptür. Bu tüp 4.0503 cm derinliğindeki dedektör kuyusu olarak adlandırılan yuva içine oturur. Şekil 14'de de görüldüğü gibi tüpün içine konulan örnek yüksekliği dedektör yüksekliğini aşmaz. Geometrik verim genel olarak katı açı denilen bir parametrenin fonksiyonudur. Katı açı, örneğin ve dedektörün geometrisine bağlı olarak değişen ve ışınların dedektöre ulaşp dedektör kristali ile etkileşebildiği açı olarak tanımlanabilir. 4π geometrisi, yani küresel geometri, ışınların kaynaktan çıkabileceği her açıyı kapsadığından sayım alınabilen katı açının 4π 'ye oranı geometrik verimi verir, Eşitlik 20.

$$\varepsilon_{\text{geometrik}} = \frac{\Omega}{4\pi} \quad (20)$$

Geometrik verim modellenmesinde, en basit yaklaşım radyoaktif kaynağı hacimsiz noktasal bir kaynak olarak düşünmektir. Bu yaklaşımla kuyu sınırları içinde kalan kaynak için katı açı modeli Sima (2000) tarafından önerilmiştir, Eşitlik 21.

$$\Omega = 2\pi \left(1 + \frac{H_t}{\sqrt{H_t^2 + R_i^2}} \right) \quad (21)$$

Eşitlikte geçen H_t ifadesi Z_t ile Z_s parametrelerinin farkına eşittir. H_t ile R_i parametreleri bir dik üçgenin iki kenarını, paydada bulunan değer ise hipotenüsü temsil eder. Böylece sayım alınamayan açı trigonometrik olarak hesaplanır daha sonra bu açı 4π 'den çıkarıldığında katı açı bulunur. Eşitlik 21, toplam verim üzerinde etkisi büyük olan geometrik verim için önerilmiş en basit analitik formüldür.

Kuyu tipi dedektörlerde tüp geometrisi ile genellikle $0.5-3 \text{ cm}^3$ aralığındaki küçük hacimli örneklerin ölçümleri yapılır. Hacim küçük bile olsa kaynağı noktasal kaynak olarak düşünmek yerine kaynağı uzaysal olarak genişletmek daha doğru bir yaklaşım olur. Çünkü verim, dedektör kuyusu içindeki kaynağın pozisyonuna bağlı olarak değişir. Sima (2000), bu pozisyonun simetri eksenine dik olarak değişmesinin toplam verimi etkilemediğini ancak simetri eksenini boyunca pozisyonun değişmesinin toplam verimi önemli ölçüde etkilediğini söylemiştir. Böylece uzaysal genişleme modeli ile geometrik verim için ortalama değer Eşitlik 22 ve 23 ile ifade edilmiştir.

$$\varepsilon_{\text{geometrik}} = \frac{1}{Z_m - Z_i} \int_{Z_i}^{Z_m} \frac{\Omega(z)}{4\pi} dz = \frac{1}{2} [1 + g(Z_i) - g(Z_m)] \quad (22)$$

$$g(z) = \frac{\sqrt{(Z_t - z)^2 + \rho^2} - \rho}{Z_m - Z_i} \quad (23)$$

Burada geçen ρ parametresi $z < Z_t$ ise yani tüp içerisindeki örnek kuyunun boyunu geçmiyor ise R_i 'ye eşittir. Çalışma modelimizde örnek yüksekliğinin kuyu yüksekliğini geçmediğini varsaydığımızdan modelimizde $\rho = R_i$ olarak kullanıldı.

Bu çalışmada kuyu-örnek tüpü geometrisinin geometrik verimini belirlemek için MATLAB bilgisayar programı kullanıldı. Modelleme programımızda geometrik verimi belirlemek için ilk önce Eşitlik 22 ve 23'de yer alan parametreler programa tek tek tanıtıldı. Daha sonra bu eşitliklerin de programa tanıtılması ile farklı örnek yükseklikleri için geometrik verim hesaplatıldı. Geometrik verimin hesaplanılmasında kullanılan kodlar Ek-2'de verilmiştir.

3.3.3. Absorpsiyon Verimi

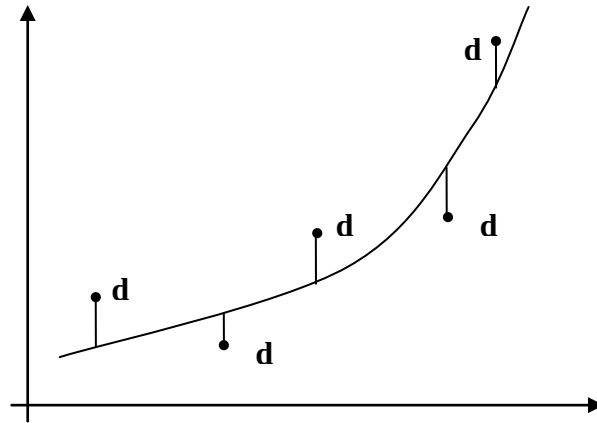
Bir foton kaynaktan çıktığında dedektör kristali ile etkileşmeden önce ilk olarak örnek içinde, örneğin kendisi tarafından daha sonra ise içinden geçtiği tüm tabakalar tarafından absorplanır. Böylece, foton dedektör kristaline ulaşp belli enerjide sinyal verdiğinde enerjisinin bir kısmını kendi içinde kaybettiğinden gerçek enerjisinden daha düşük bir enerjide sinyal vermiş olur. Enerjisinin düşme sebebi, fotonların bu tabakalardan geçerken tabakaların yapıldığı maddeler tarafından Bölüm 1.4’de anlatılan mekanizmalarla enerjilerinin absorplanmasıdır. Böylece dedektör verimi belli oranda düşmüş olur. Enerjinin örneğin kendisi tarafından absorplanması örnek verimi terimi içinde yer alırken, dedektör zırhlaması ve örnek kabı tarafından absorplanması absorpsiyon verimi terimi vasıtası ile toplam verim denklemi içinde yerini bulur. Bizim dedektörümüzde bir foton dedektör kristaline ulaşmak için, örnek hacminden çıktıktan sonra, önce 0.1 cm kalınlığındaki PVC örnek tüpünü, daha sonra ise sırasıyla dedektör zırhlama malzemeleri olan 0.5 mm kalınlığındaki alüminyum tabakası ile 0.3 μm kalınlığındaki aktif olmayan germanyum tabakasını geçer. Bu durumda absorpsiyon verimi bu üç absorplama tabakasının yapıldığı malzemelere ve tabakaların kalınlıklarına bağlı olur. Bir maddenin fotonları absorplama miktarı fotonun enerjisine, maddenin absorplama yeteneğine ve madde içinde ilerlenen yola bağlıdır. Maddenin fotonun enerjisini absorplama yeteneği absorpsiyon katsayısı olarak isimlendirilen bir parametre ile ifade edilir. Her element belli enerjideki foton için sabit ve kendine özgü bir kütleli absorpsiyon katsayısına sahiptir. Bu yüzden bu terim incelenirken hem tabakayı oluşturan maddenin cinsi-yapısı hem de foton enerjisi göz önüne alınır. Bu da absorpsiyon veriminin enerjiye bağlı olması durumunu doğurur. Absorpsiyon verimi hesaplamaları için en uygun eşitlik Eşitlik 24’de verilmiştir (Palacios, Alfonso, Barros, LaBrecque, Perez ve Lasoda, 2008).

$$\varepsilon_{\text{absorpsiyon}}(E_i) = e^{-\left\{ \mu(E_i) \rho_{\text{alüminyum}} + [\mu(E_i) \rho_{\text{germanyum}}] + [\mu(E_i) \rho_{\text{tüp}}] \right\}} \quad (24)$$

Eşitlikte de görüldüğü gibi enerjiye bağlı olarak değişen parametre kütleli absorpsiyon katsayısı olduğundan, çalışmamızda absorpsiyon verimini hesaplamak için, her üç absorpsiyon tabakası için de olasılık teorisi üzerine kurulu bir simülasyon

sistemi olan Monte Carlo yöntemi kullanılarak absorpsiyon katsayısı modeli elde edildi.

Çalışmalarımız, üç absorpsiyon tabakasını oluşturan her bir maddenin kütleli absorpsiyon katsayılarının enerji ile değişimi Monte Carlo metodu ile modellendi. Model programında amaçlanan; önerilen modelin katsayılarının yerine, rastgele seçilmiş çok fazla sayı konularak bu sayıların içinden, model sonuçları ile deneysel verilerin arasındaki farkı minimum yapan sayıları bulmak idi. Burada unutulmaması gereken koşul; çözüm için rastgele seçilmiş sayıların bir Gauss Eğrisi'ne uygun dağılımlı olması gerekliliğiydi. Yöntemin uygulanması için en küçük kareler yöntemi kullanıldı. En küçük kareler yöntemi, birbirine bağlı olarak değişen iki fiziksel büyüklük arasındaki matematiksel bağlantıyı, mümkün olduğunca gerçeğe uygun bir denklem olarak yazmak için kullanılan, standart bir regresyon yöntemidir. Bir başka deyişle bu yöntem, ölçüm sonucu elde edilmiş veri noktalarına, mümkün olduğu kadar yakın geçecek bir fonksiyon eğrisi bulmaya yarar. Modele eğri uydurmadaki temel yaklaşım model değerleri ile deneysel değerler arasındaki farkı en aza indiren bir optimizasyon işlemidir, Şekil 16.



Şekil 16. En küçük kareler yöntemi ile optimizasyon

Aralarında doğrusal olmayan bir bağlantı olan fiziksel büyüklükler için en küçük kareler yönteminin uygulanması denklem modelinin bilinmesini gerektirir. Çalışmamızda ilk olarak bu üç absorplama tabakası malzemesi için elde edilmiş ve veri tablolarında yayınlanmış olan enerjiye karşı kütleli absorpsiyon verileri programa tanıtıldı. Daha sonra uygun model formunun tahmin edilmesi için 'Curve

Expert' eğri uydurma programı kullanıldı. Bu programın deneysel veriler için önerdiği ilk üç model, yazılan programa tek tek tanıtılarak Monte Carlo yöntemi uygulandığında deneysel verilerle en çok yakınlık gösteren model nihai programda kullanıldı. Curve Expert programına göre veriler için önerilen en uygun model 'buhar basıncı modeli' olarak belirlendi, Eşitlik 25.

$$\mu(E_i) = e^{a + \frac{b}{E_i} + c \ln E_i} \quad (25)$$

Uygun modelin belirlenmesinden sonra, modele eğri uydurmak için optimizasyon işlemi uygulandı. Eşitlik 26'de optimizasyon işlemi genel olarak tanımlayan denklik verilmiştir.

$$J = \sum_{i=1}^n (x_{\text{mod el},i} - x_{\text{deneysel},i}) \quad (26)$$

Teorik olarak incelendiğinde bu optimizasyon işlemi J fonksiyonunun minimizasyonudur. Yani; $\left(\frac{dj}{dx}\right)_{\text{mod el}-deneysel} = 0$ ve $\left(\frac{dj}{dx}\right)_{\text{mod el}-deneysel} > 0$ olmasına dayanır. Ancak burada yapılan işlem; klasik türev alma işlemi yerine sayısal olmasıdır.

Optimizasyon işlemi için model denklemi ile deneysel buhar basıncı modeli MATLAB'da Monte Carlo yöntemi ile yazılan program kodlarına tanıtıldı, Ek-3, 4, 5. Programda en küçük kareler yöntemi ile Eşitlik 25'de yer alan a, b ve c katsayıları için deneysel verilere en yakın sonuçları veren değerleri bulmak hedeflendi. Tüm örnek sonuçlarına bakılarak hata terimlerinin karelerini en düşük yapan katsayılar türev yardımıyla bulundu. Burada türevin sıfır olduğu noktanın en küçük değer olması kuralından faydalanıldı. Monte Carlo yönteminin yapısına uygun olarak tamamen rastlantısal sayılar tek tek katsayılar yerine atanarak en uygun olanlar bulundu ve bunlar modelimizin katsayıları olarak kabul edildi.

Katsayılar her üç madde için de bulununca, bulunan katsayılar ve daha önce belirlenen model absorpsiyon verimini hesaplayacak olan programa tanıtıldı. Gerekli

sabitlerin de tanıtılmasından sonra, absorpsiyon veriminin program tarafından enerjiye bağlı olarak hesaplanabilmesi için Eşitlik 24 kullanıldı. Ek-6'da programda kullanılan kodlar verilmektedir.

3.3.4. Örnek Verimi

Bölüm 3.3.3'de de bahsedildiği gibi bir foton, kaynaktan çıktığında ilk karşılaştığı ortam örneğin kendi matrisidir. Böylece foton enerjisi örnek kabı çeperine ulaşana dek ilk önce örneğin kendisi tarafından absorplanır. Sonuçta foton kaynaktan çıktığı anda daha yüksek enerjili iken henüz dedektör materyali ile etkileşmeden örneğin kendisi tarafından da enerjisi düşürülür. Hatta foton enerjisi çok düşük ise fotonun tüm enerjisi örneğin kendisi içinde absorplanarak dedektöre hiç ulaşamayabilir. Bu durum verimde belli bir düşüşe sebep olur. Bu verim düşüşü toplam verime, örnek verimi terimi ile yansır. Örnek verimi, absorpsiyon verimi gibi, enerjinin bir fonksiyonu olarak değişir, Eşitlik 27 (Palacios, Alfonso, Barros, LaBrecque, Perez ve Lasoda, 2008).

$$\varepsilon_{\text{örnek}}(E_i) = \frac{1 - e^{-[\mu(E_i)\rho x]_{\text{örnek}}}}{[\mu(E_i)\rho x]_{\text{örnek}}} \quad (27)$$

Eşitlikten de görüldüğü gibi enerjiye bağımlılığa, absorpsiyon veriminde olduğu gibi, örneğin kütleli absorpsiyon katsayısı yol açmaktadır. Bu katsayı örnek cinsine göre değiştiğinden model için örnek matrisi olarak seçilecek olan madde önem kazanır. Çalışma modelimizde örnek materyali seçilirken verim kalibrasyonunun deneysel tayininde kullanılan standart kaynakların matrisine yakın bir madde seçilmesi hedeflendi. Böylece deneysel veriler ile model sonuçları karşılaştırılırken iki maddenin kütleli absorpsiyon katsayılarının farklı olmasından kaynaklanacak farklılıkların en aza indirilmesi amaçlandı. Laboratuvarımızda kullanılan standart kaynaklar epoksi matrisi içine dağıtılmış kaynaklardan oluşmaktadır. Epoksi çapraz bağlı, düşük yoğunluklu bir polimerdir. Programda kullanılmak üzere seçilen örnek, özellikleri açısından epoksi matrisine en yakın özellikte ve kütleli absorpsiyon katsayıları literatürde yayınlanmış olan bakalit, örnek olarak seçildi.

Bakalitin enerjiye bağı olan kütleli absorpsiyon katsayısı Bölüm 3.3.3’de anlatıldığı gibi Monte Carlo yöntemi ile modellendi. Model olarak yine Eşitlik 25 ile verilen buhar basıncı modeli kullanıldı ve deneysel verilere en uygun model sonuçlarını veren a, b, c katsayıları en küçük kareler yöntemi için yazılan Monte Carlo programı ile bulundu, Ek-7. Daha sonra Eşitlik 27 ile verilen model ve örneğimizin özellikleri de programa tanıtıldı. Sonuç olarak örnek verimi enerjiye bağı olarak modellenmiş oldu. Ek-8’de programda kullanılan kodlar verilmektedir.

3.3.5. Mutlak Verim

Mutlak verim dedektörün elektronik aksamının ve dedektör kristalinin özelliklerine bağı olarak her dedektör için farklı ve değiştirilemezdir. Mutlak verim değerleri spektrometre ile birlikte üretici firma tarafından kullanıcılara gönderilir. Laboratuvarında kullandığımız dedektör için de üretici firma tarafından enerjiye bağı mutlak verim değerleri bilinmektedir. Her kuyu tipi HPGe dedektör için mutlak verimin enerjiye bağı değişiminin genel eğilimi, belli bir enerjide diz veren yani önce enerji ile artan ve bu diz enerjisinden sonra ise azalan bir eğri şeklindedir. Bu durumda mutlak verim eğrisini dizden önce ve dizden sonra olmak üzere iki parça halinde incelemek modelleme açısından daha kolaydır. Diz enerjisi genellikle 130 keV civarındadır. Bu çalışmada çalışılacak enerji aralığı olarak 150-2000 keV arasını belirlediğimizden modelimizde sadece dizden sonraki bölge göz önüne alındı. Firma tarafından gönderilen deneysel mutlak verim verilerinin modellenmesi için yine ‘Curve Expert’ programı kullanıldı. Program sonuçları incelenerek deneysel verilere en yakın sonuçları veren ‘kuadratik eğri modeli’ programımızda kullanılmak için uygun model görüldü, Eşitlik 28.

$$\varepsilon_{mutlak}(E_i) = a + bE_i + cE_i^2 \quad (28)$$

Bu model için ‘Curve Expert’ programına hesaplatılan a, b ve c katsayıları ve Eşitlik 28 MATLAB’da yazılan programa tanıtıldı. Sonuç olarak mutlak verim değerleri enerjiye bağı olarak modellendi. Yazılan programda kullanılan kodlar Ek-9’da verilmektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Deneysel Verim Sonuçları

Enerjiye bağlı deneysel verim değerleri Bölüm 3.2’ de anlatıldığı gibi bulundu. Dört standart tüp kaynak için elde edilen sonuçlar Tablo 4’de verilmektedir.

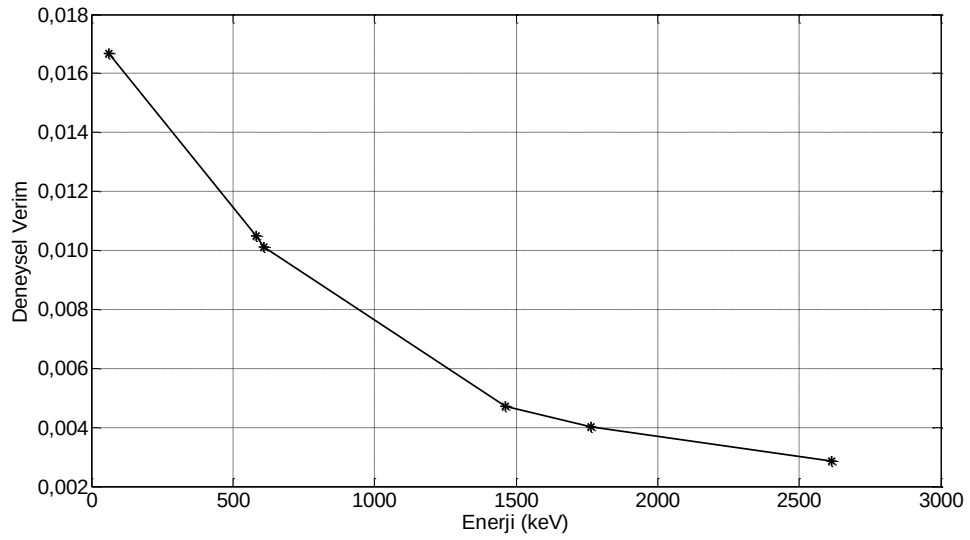
Tablo 4. Deneysel verim sonuçları

Standart 1 (d=0.8 g/cc, h=2.5)		Standart 3 (d=1.7 g/cc, h=2.5)	
Enerji(keV)	Verim	Enerji(keV)	Verim
661.6	0.113684	661.6	0.106198
1173.2	0.040511	1173.2	0.037552
1332.5	0.034499	1332.5	0.032242
Standart 2 (d=0.8 g/cc, h=0.5)		Standart 3 (d=1.7 g/cc, h=0.5)	
Enerji(keV)	Verim	Enerji(keV)	Verim
661.6	0.117929	661.6	1.009181
1173.2	0.040584	1173.2	0.040754
1332.5	0.034367	1332.5	0.034891

Daha sonra her bir standart için bu üç verim değeri kullanılarak verim kalibrasyon eğrisi çizildi. Ancak, üç değer kullanılarak verim grafiğinin elde edilmesi doğru bir yaklaşım olmadığından Tablo 5’de verilen kaynaklar kullanılarak deneysel verim değerleri bulundu. Çalışmamızda kullanılan bu verim değerleri Tablo 5’de, verim grafiği de Şekil 17’de verilmiştir.

Tablo 5. Çalışmada kullanılan verim değerleri

Radyoizotop	Fotopik enerjisi(keV)	Verim
U-238	63.3	0.016681
Th-232	583.1	0.010501
Th-232	2614.6	0.002846
Ra-226	609.3	0.010107
Ra-226	1764.5	0.004007
K-40	1460.8	0.004723



Şekil 17. Deneysel verim grafiği

4.2. Simülasyon Sonuçları

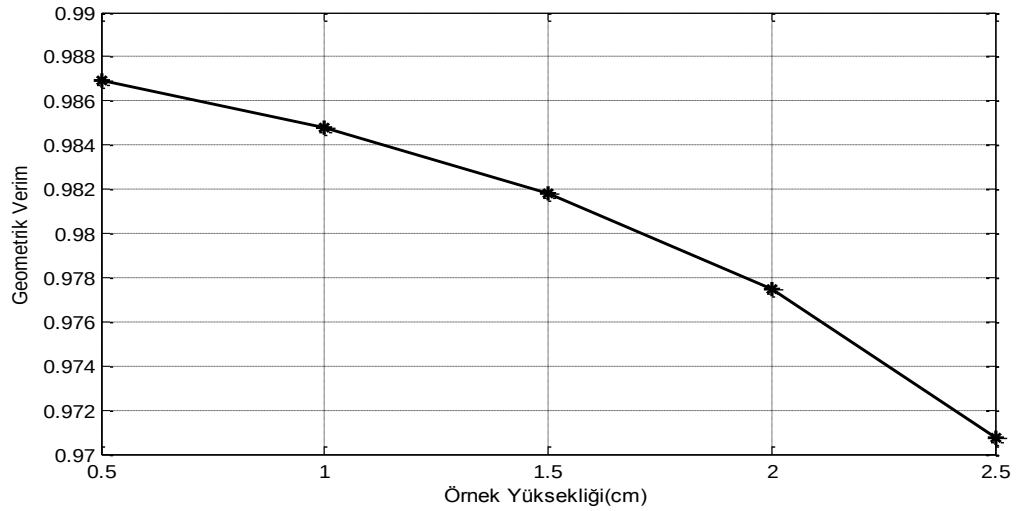
4.2.1. Geometrik Verim

Kuyu tipi HPGe gama dedektörümüz ve örnek kabı tüp geometrisi için örnek yüksekliğine bağlı olarak değişen geometrik verim Bölüm 3.3.2’de anlatıldığı gibi modellendi. Modelleme hesaplamaları tüp içindeki örnek yüksekliğinin 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 ve 2.5 cm olduğu durumlar için yapıldı. Elde edilen sonuçlar Tablo 6’da verilmektedir.

Tablo 6. Örnek yüksekliği-geometrik verim sonuçları

Örnek Yüksekliği (cm)	Geometrik Verim
0.5	0.9869
1	0.9848
1.5	0.9818
2	0.9775
2.5	0.9707

Daha sonra örnek yüksekliğine karşı geometrik verim grafiği çizdirildi, Şekil 18.



Şekil 18. Örnek yüksekliğine karşı geometrik verim grafiği

Grafikten görüleceği gibi geometrik verim örnek yüksekliğinin artması ile artmaktadır. İlgilenilen yükseklikler arasında geometrik verimin 0.9869-0.9707 değeri arasında değiştiği görülmektedir.

4.2.2. Absorpsiyon Verimi

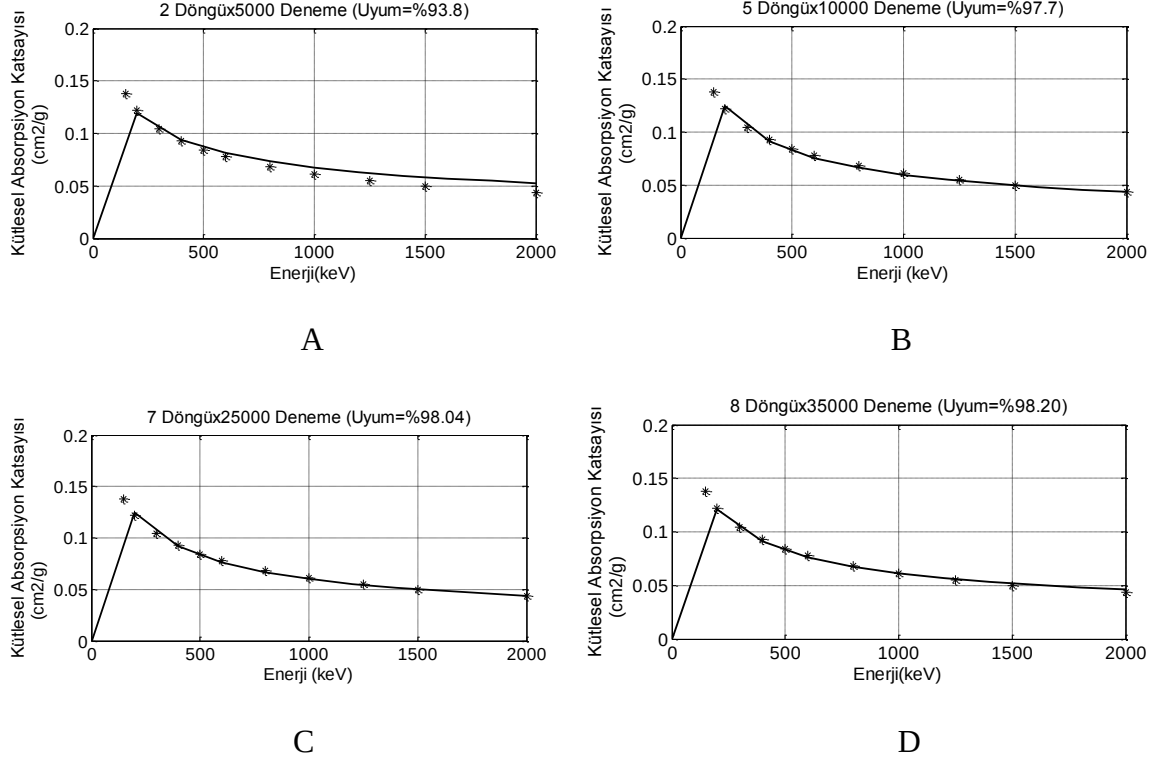
Bölüm 3.3.3’de anlatıldığı gibi absorpsiyon veriminin modellenmesi için ilk önce dedektör zırhlama malzemeleri olan alüminyum ve germanyumun daha sonra ise örnek kabının malzemesi olan PVC’nin kütleli absorpsiyon katsayıları Monte Carlo metodu ile modellendi. Programa önerilen model buhar basıncı modeli idi, Eşitlik 25.

Çalışmanın bu aşamasında Monte Carlo programının amacı Eşitlik 25’de geçen a, b ve c katsayılarını her bir malzeme için model verileri ile deneysel veriler arasındaki uyumu en fazla yapacak şekilde hesaplayabilmektir, Bölüm 3.3.3. Tablo 7’de her bir malzeme için bu katsayıların program tarafından hesaplanan değerleri verilmektedir.

Tablo 7. Monte Carlo ile hesaplanan model katsayıları

Malzeme	a	b	c
Alüminyum	0.22215	-2.99028	-0.43411
Germanyum	2.66428	1.337994	-0.82605
PVC	0.41796	-5.69244	-0.45526

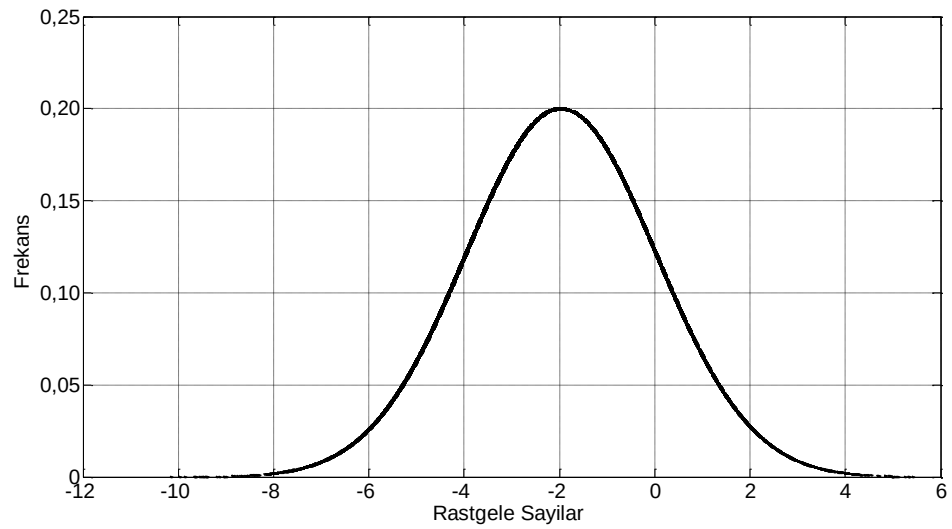
Model katsayıları programda yaratılan 10 döngü ve her döngüde 50000 rasgele sayının denenmesi ile oluşturulan 500000 katsayı kombinasyonundan en küçük kareler yöntemi ile deneysel verilerle en iyi uyumu yakalayan katsayıların çözüm olarak kabul edilmesi ile hesaplandı. En iyi sonuçları verecek rastgele sayı ve döngü sayısına deneme-yanılma yolu ile karar verildi. Şekil 19’da yapılan denemelerden bazıları gösterilmiştir.



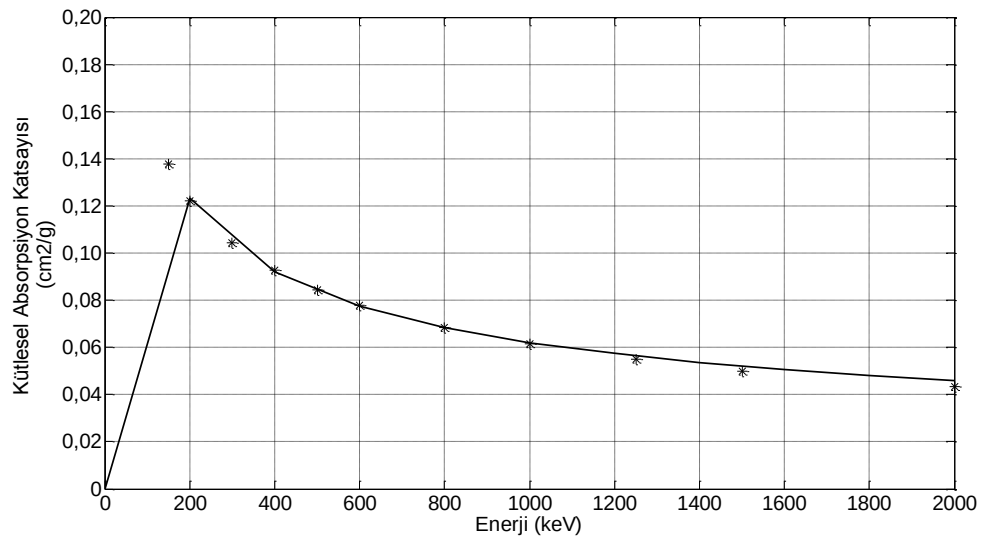
Şekil 19. Döngü ve deneme sayısı ile uyum değişimi

Şekilde alüminyumun kütleli absorpsiyon katsayılarının hesaplanmasında döngü ve rastgele sayı denemesi sayılarının değişmesi ile Monte Carlo sonuçlarının değişimi gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi döngü ve deneme sayısı arttıkça Monte Carlo sonuçları ile literatürde yayınlanmış deneysel veriler arasındaki uyum artmaktaydı. Şekil 19-A’da 2 döngü ve 5000 deneme sonucu modelin deneysel verilerle uyumu % 93.8 iken, Şekil 19-B’de 5 döngü ve 10000 deneme sonucu bu uyum % 97.7 olarak bulundu. Şekil 19-C’de 7 döngü ve 25000 deneme sonucu uyum % 98.04’e çıktı ancak 8 döngü ve 35000 denemeden sonra bulunan %98.2’lik uyumda çok fazla değişim olmadı. Bu sebeple 10 döngü ve 50000 katsayı

denemesinin programımız için yeterli olduğu düşünüldü ve tüm Monte Carlo hesaplamalarında bu kombinasyon sayıları kullanıldı. Ayrıca, hesaplamalarımızda her bir simülasyon işlemi için seçilen rasgele sayılar Gauss dağılımına Şekil 20'deki gibi uyum göstermiştir. Bu da bize programımızca tayin edilen sayıların sonsuz veri takımının ortalaması etrafında simetrik bir dağılım göstererek gerçekten rastgele kabul edilebileceğini ispatlamıştır.

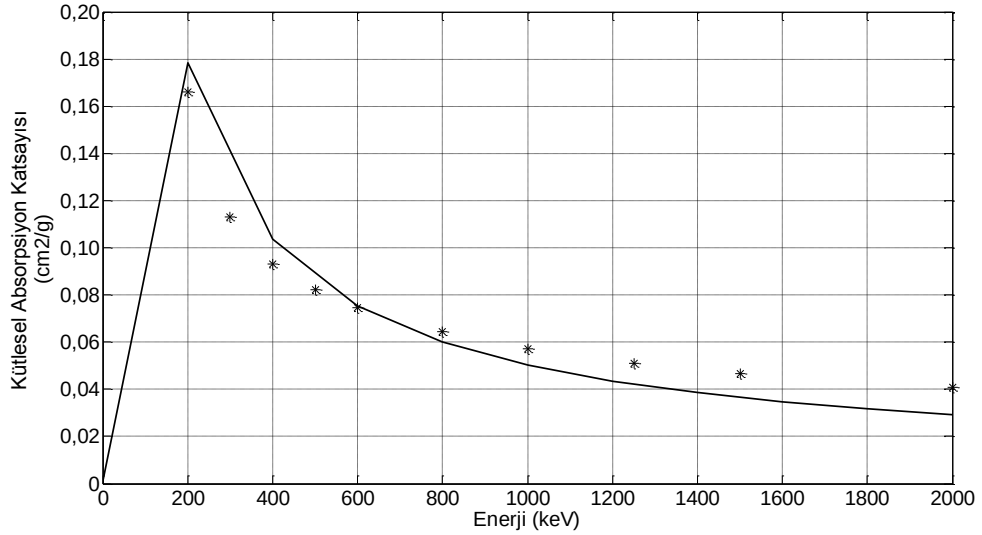


Şekil 20. Rasgele sayıların normal dağılım eğrisi



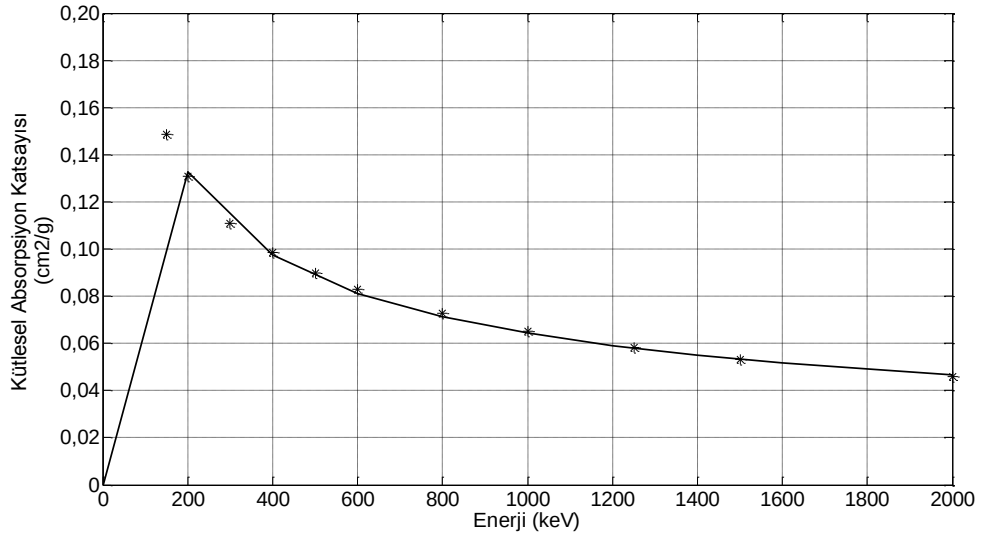
Şekil 21. Alüminyum için Monte Carlo modeli grafiği

Şekil 21’de alüminyum için, modelden elde edilen sonuçlar ve deneysel verilerin uyumunu gösteren grafik verilmektedir. Alüminyum için uyum değeri %98.50 olarak bulundu. Grafikte ‘*’ ile gösterilen noktalar literatürden alınan deneysel kütleli absorpsiyon katsayılarıdır. Çizgi ile gösterilen değerler ise modelimizden elde edilen sonuçlardan oluşmuştur.



Şekil 22. Germanyum için Monte Carlo modeli grafiği

Şekil 22’de germanyum için modelden elde edilen sonuçlar ve deneysel verilerin uyumunu gösteren grafik verilmektedir. Germanyum için uyum değeri %89.31 olarak bulundu. Grafikte ‘*’ ile gösterilen noktalar literatürden alınan deneysel kütleli absorpsiyon katsayılarıdır. Çizgi ile gösterilen değerler ise modelimizin elde ettiği sonuçlardan oluşmuştur.



Şekil 23. PVC için Monte Carlo modeli grafiği

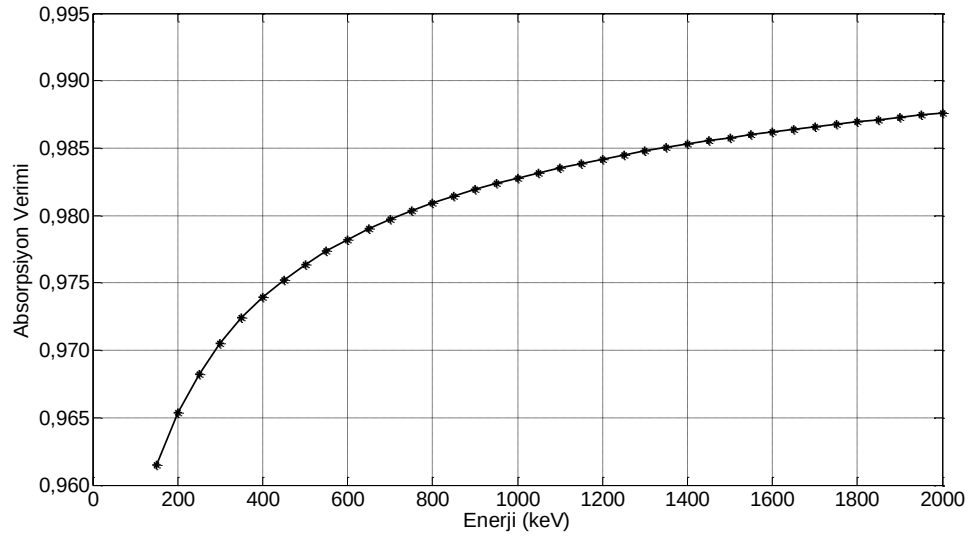
Şekil 23’de PVC için modelden elde edilen sonuçlar ve deneysel verilerin uyumunu gösteren grafik verilmektedir. PVC için uyum değeri %98.92 olarak bulundu. Grafikte ‘*’ ile gösterilen noktalar literatürden alınan deneysel kütleli absorpsiyon katsayılarıdır. Çizgi ile gösterilen değerler ise modelimizin elde ettiği sonuçlardan oluşmuştur.

Absorpsiyon tabakaları için her bir tabakanın kütleli absorpsiyon katsayısının enerjiye bağlı olarak modellenmesinden sonra absorpsiyon verimi Bölüm 3.3.3’de anlatıldığı gibi, Eşitlik 24 kullanılarak modellendi. Modelden elde edilen sonuçlar Tablo 8’de verilmektedir.

Tablo 8. Modelleme sonucu elde edilen absorpsiyon verimi değerleri

Enerji(keV)	Absorpsiyon Verimi	Enerji(keV)	Absorpsiyon Verimi
150	0.96149	1100	0.98353
200	0.96534	1150	0.98387
250	0.96825	1200	0.98419
300	0.97053	1250	0.98449
350	0.97239	1300	0.98478
400	0.97393	1350	0.98504
450	0.97524	1400	0.98530
500	0.97637	1450	0.98554
550	0.97735	1500	0.98577
600	0.97822	1550	0.98599
650	0.97900	1600	0.98620
700	0.97970	1650	0.98640
750	0.98033	1700	0.98659
800	0.98090	1750	0.98678
850	0.98143	1800	0.98695
900	0.98192	1850	0.98712
950	0.98236	1900	0.98728
1000	0.98278	1950	0.98744
1050	0.98317	2000	0.98759

Model sonuçlarının hesaplatılmasından sonra enerjiye karşı absorpsiyon verimi grafiği çizdirildi, şekil 24.

**şekil 24.** Enerjiye karşı absorpsiyon verimi grafiği

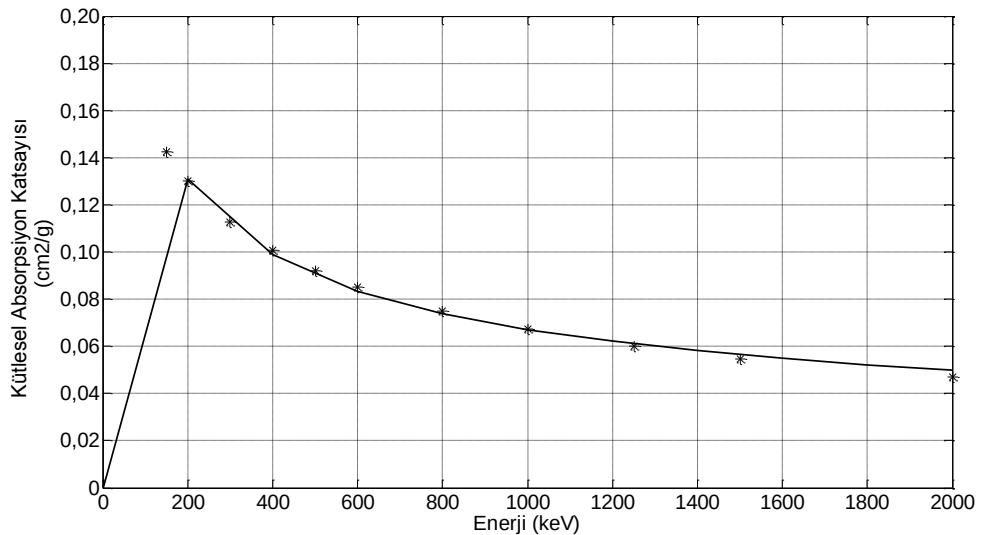
4.2.3. Örnek Verimi

Bölüm 3.3.4’de anlatıldığı üzere örneğin self-absorpsiyonunun verime etkisini incelemek amacı ile örnek malzemesi olarak bakalit seçildi. Örnek verimi terimini enerjiye bağlı hale getiren, bakalitin kütleli absorpsiyon katsayısı Bölüm 3.3.3’de anlatıldığı şekilde Monte Carlo yöntemi ile modellendi. Modelleme çalışmalarında buhar basıncı modeli kullanıldı. Programda 10 döngü ve her döngü içinde 50000 rastgele sayı denemesi ile deneysel verilere en yakın sonucu veren katsayı kombinasyonu bulunarak çözüm olarak kabul edildi. Bulunan a, b, c katsayıları Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Bakalit için Monte Carlo ile hesaplanan model katsayıları

a katsayısı	b katsayısı	c katsayısı
0.22215	-2.99029	-0.43411

Şekil 25’de bakalit için modelden elde edilen sonuçlar ve deneysel verilerin uyumunu gösteren grafik görülmektedir. Bakalit için uyum değeri %97.72 olarak hesaplatıldı. Grafikte ‘*’ ile gösterilen noktalar literatürden alınan deneysel kütleli absorpsiyon katsayılarıdır. Çizgi ile gösterilen değerler ise modelimizden elde edilen sonuçları vermektedir.



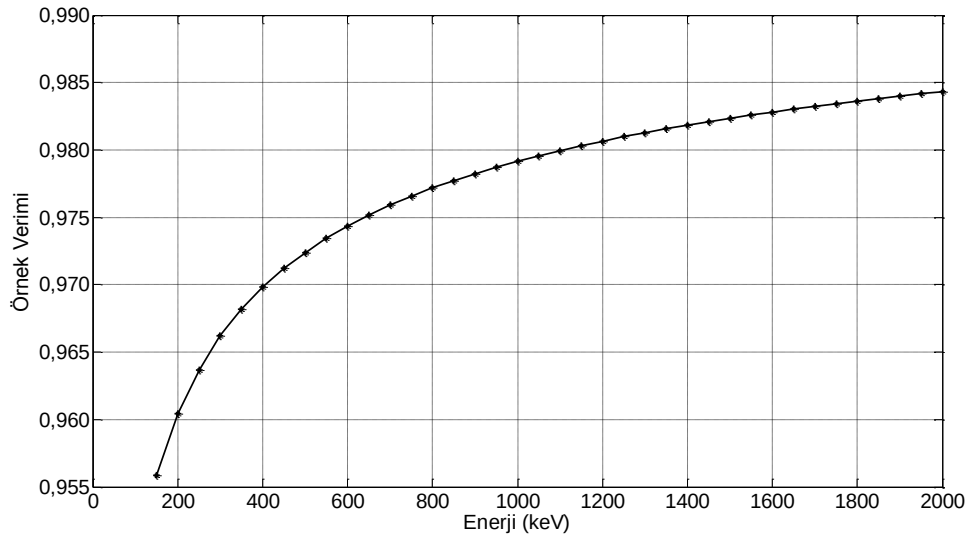
Şekil 25. Bakalit için Monte Carlo modeli grafiği

Daha sonra Eşitlik 25 ve Monte Carlo metodu ile bulunan katsayılar ana programa tanıtıldı ve Bölüm 3.3.4’ de anlatıldığı gibi örnek verimi Eşitlik 27 kullanılarak modellenip, enerjiye bağlı olarak hesaplatıldı, Tablo 10.

Tablo 10. Örnek verimi değerleri

Enerji(keV)	Absorpsiyon Verimi	Enerji(keV)	Absorpsiyon Verimi
150	0.9559	1100	0.9800
200	0.9604	1150	0.9803
250	0.9637	1200	0.9807
300	0.9662	1250	0.9810
350	0.9682	1300	0.9813
400	0.9698	1350	0.9816
450	0.9712	1400	0.9818
500	0.9724	1450	0.9821
550	0.9734	1500	0.9824
600	0.9744	1550	0.9826
650	0.9752	1600	0.9828
700	0.9759	1650	0.9830
750	0.9766	1700	0.9832
800	0.9772	1750	0.9834
850	0.9777	1800	0.9836
900	0.9782	1850	0.9838
950	0.9787	1900	0.9840
1000	0.9792	1950	0.9842
1050	0.9796	2000	0.9843

Program ile örnek verimi değerlerinin hesaplatılmasından sonra enerjiye karşı örnek verimi grafiği elde edildi, Şekil 26.



Şekil 26. Enerjiye karşı örnek verimi grafiği

4.2.4. Mutlak Verim

Mutlak verim değerleri bölüm 3.3.5’de anlatıldığı gibi bulundu. Ana programa, Eşitlik 28 ile verilen model ve ‘Curve Expert’ programı ile hesaplatılan a, b, c model katsayıları tanıtıldıktan sonra mutlak verim değerleri enerjiye bağlı olarak bulundu, Tablo 11, Tablo 12.

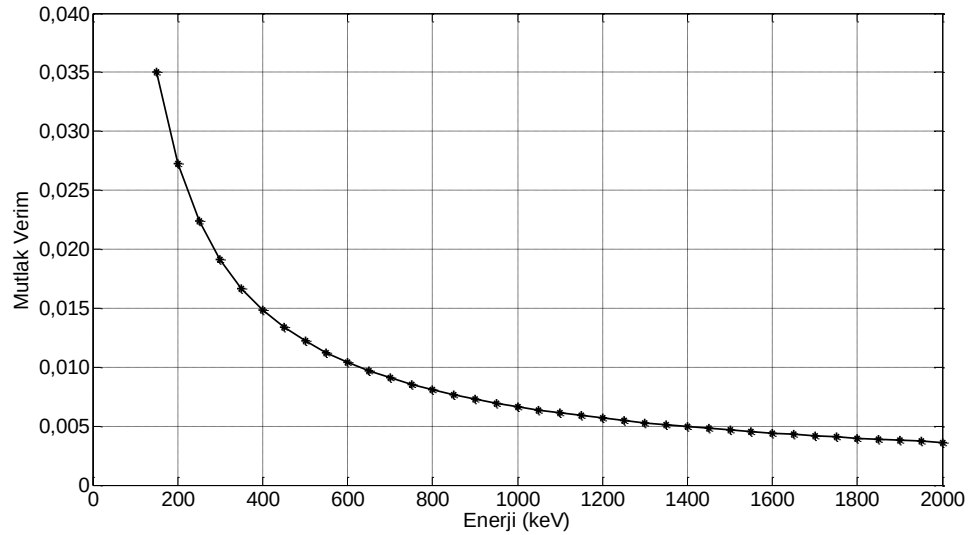
Tablo 11. Mutlak verim model katsayıları

a katsayısı	b katsayısı	c katsayısı
0.02374	-0.02803	0.01085

Tablo12. Hesaplanan mutlak verim değerleri

Enerji(keV)	Mutlak Verim	Enerji(keV)	Mutlak Verim
150	0.0351	1100	0.0061
200	0.0272	1150	0.0059
250	0.0224	1200	0.0057
300	0.0191	1250	0.0055
350	0.0167	1300	0.0053
400	0.0148	1350	0.0051
450	0.0134	1400	0.0050
500	0.0122	1450	0.0048
550	0.0112	1500	0.0047
600	0.0104	1550	0.0045
650	0.0097	1600	0.0044
700	0.0091	1650	0.0043
750	0.0086	1700	0.0042
800	0.0081	1750	0.0041
850	0.0077	1800	0.0040
900	0.0073	1850	0.0039
950	0.0070	1900	0.0038
1000	0.0067	1950	0.0037
1050	0.0064	2000	0.0036

Yazılan program ile mutlak verim değerlerinin hesaplatılmasından sonra enerjiye karşı mutlak verim grafiği elde edildi, Şekil 27.

**Şekil 27.** Enerjiye karşı mutlak verim grafiği

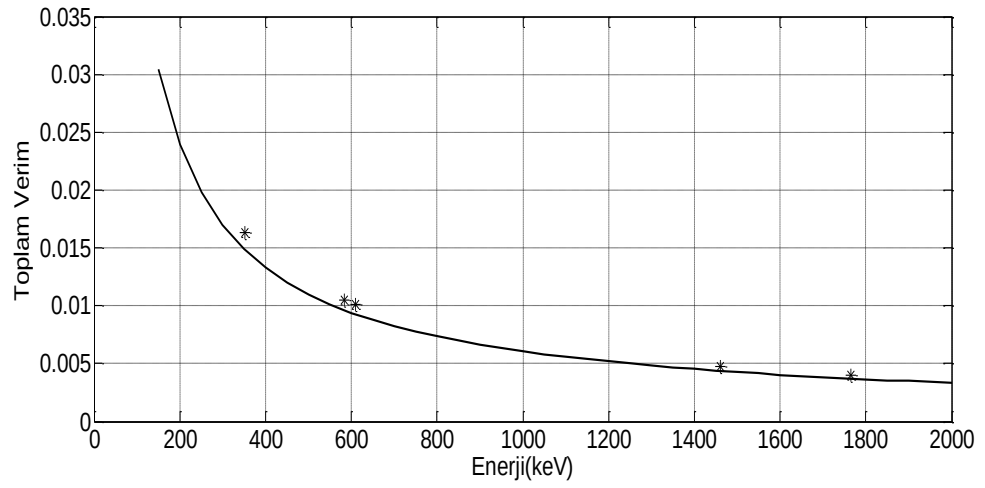
4.2.5. Toplam Verim

Dedektörümüzün toplam verimi Eşitlik 19 kullanılarak modellendi. Eşitlikte görüldüğü gibi, toplam verim modeli geometrik, absorpsiyon, örnek ve mutlak verim değerlerinin çarpımından oluşmaktadır. Bu nedenle, Bölüm 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3. ve 4.2.4’de bulunan parametreler kullanılarak Eşitlik 19 yardımıyla toplam verim değerleri hesaplandı. Hesaplanan toplam verim değerleri Tablo 13’de verildi.

Tablo 13. Toplam verim değerleri

Enerji(keV)	Toplam Verim	Enerji(keV)	Toplam Verim
150	0.0305	1100	0.0056
200	0.0239	1150	0.0054
250	0.0198	1200	0.0052
300	0.0170	1250	0.0050
350	0.0149	1300	0.0048
400	0.0133	1350	0.0047
450	0.0120	1400	0.0045
500	0.0110	1450	0.0044
550	0.0101	1500	0.0043
600	0.0094	1550	0.0042
650	0.0088	1600	0.0040
700	0.0082	1650	0.0039
750	0.0078	1700	0.0038
800	0.0073	1750	0.0037
850	0.0070	1800	0.0037
900	0.0066	1850	0.0036
950	0.0063	1900	0.0035
1000	0.0061	1950	0.0034
1050	0.0058	2000	0.0033

Daha sonra bu sonuçlar kullanılarak enerjiye karşı toplam verim değerleri grafiği elde edildi. Modelin doğrulaması modellenen dedektörün deneysel olarak bulunmuş olan verim değerleri kullanılarak yapıldı, Şekil 28.



Şekil 28. Enerjiye karşı toplam verim grafiği

Şekilde görülen grafikte ‘*’ ile gösterilen noktalar dedektörümüzün deneysel olarak belirlenmiş belli enerjilerdeki verim değerleridir. Çizgi ile gösterilen değerler ise modelimizin elde ettiği sonuçlardan elde edilmiştir. Deneysel değerler ile model değerlerinin arasındaki uyum da, program hesaplamalarına göre %91.84 olarak bulunmuştur.

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada ‘Muğla Üniversitesi Kimya Bölümü Radyoaktivite Araştırma ve Analiz Laboratuvarı’nda kullanılmakta olan kuyu tipi HPGe dedektörün verim modellemesi yapıldı ve elde edilen sonuçlar Bölüm 4’de rapor edildi.

Kullanılan dedektörün toplam verimi, öncelikle verime etki eden faktörlerin tek tek modellenmesi, daha sonra bu modellerin tek bir modelde birleştirilerek toplam verim modelinin elde edilmesi şeklinde yapıldı. Elde edilen sonuçların hem kısım kısım hem de toplam olarak ele alındığında beklenen eğilimi verdiği görüldü.

Tablo 6 ve Şekil 18’de verildiği gibi geometrik verim modelinde örnek yüksekliği için 0.5-2.5 cm aralığı kullanıldı. Geometrik verimin, artan örnek yüksekliği ile arttığı bulundu. Geometrik kurallar göz önüne alındığında artan örnek yüksekliği ile verimin azalması beklenen bir durumdur. Şekil 13’de gösterildiği gibi, örnek yüksekliği arttıkça dedektör kristali ile hiç etkileşmeden dedektörü terk eden gama ışınlarının sayısı artacağından sayım açısı daralır ve toplam verimde bir düşüş gözlenir.

Bölüm 3.3.3’de bahsedildiği gibi, absorpsiyon veriminin hesaplanması için ilk önce enerjiye bağlı bir değişken olan kütleli absorpsiyon katsayılarının model denklemlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Modelimizde; PVC örnek tüpü, dedektörde aktif olmayan germanyum ve dedektör zırhlama malzemesi olan alüminyum olmak üzere farklı kalınlıklarda üç adet absorpsiyon tabakası bulunmaktadır. Monte Carlo yöntemi uygulamasında bu üç tabaka için de kütleli absorpsiyon katsayısı modeli olarak denenilen diğer modeller arasında en az hata ile çalışan ‘buhar basıncı modeli’ kullanıldı. Monte Carlo mantığına uygun MATLAB programının yazılması ile elde edilen Monte Carlo yöntemi sonuçları literatürde yayınlanmış verilerle, alüminyum tabakası için %98.50, germanyum tabakası için %89.31 ve PVC tabakası için %98.92 uyum gösterdi. Üç tabaka birden göz önüne alındığında ortalama %95.58 uyum olduğu, %4.42 hata payı olduğu bulundu. Bu hata değeri literatürde raporlanmış sonuçlar ile karşılaştırıldığında kabul edilebilecek bir

hata değeridir. Bölüm 2’de bahsedildiği gibi, literatürde Monte Carlo yöntemi ile yapılan simülasyonlar %1-15 hata aralığında çalışmaktadır.

Daha sonra, elde edilen bu üç Monte Carlo modeli, absorpsiyon verimi modeli için yazılan MATLAB programına tanıtıldı ve absorpsiyon verimi programa hesaplatıldı. Elde edilen sonuçlar Tablo 8 ve Şekil 24’de gösterilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü gibi 150 keV’de absorpsiyon verimi 0.98353 iken 2000 keV’de 0.98759 idi. Yani enerji arttıkça absorpsiyon verimi de artmakta ve gittikçe bir değerine yaklaşmaktadır. Düşük enerjili gama ışınları bu üç tabakadan geçerken orantısız olarak daha fazla soğurulacağından bu beklenen bir eğilimdir. Enerjisi yeterince yüksek olmayan fotonlar dedektör kristaline hiç ulaşmadan bu tabakalar içinde tamamen soğurulacaktır. Fotonların gama enerjisi yükseldikçe dedektör kristaline ulaşma olasılığı da yükselecektir. Bu da gama enerjisi yükseldikçe absorpsiyonun toplam verime etkisinin düşeceğini gösterir. Absorpsiyon verimi terimi toplam verim modeline bir çarpım olarak katıldığından, toplam verime etkisinin olmaması için değerinin bir olması gerekir. Bu eğilim Şekil 24’de de gösterilmiştir. Enerji yükseldikçe absorpsiyon verimi teriminin değeri bire yaklaşmaktadır. Enerji aralığının daha da genişletilmiş olması durumunda bu değer belli bir gama enerjisinden sonra bir değerinde sabit kaldığı varsayılabilir.

Bir sonraki terim olan örnek veriminde absorpsiyon verimi için sözkonusu olan genel eğilimler geçerlidir. Bu terimin hesaplanmasında da yine Monte Carlo yönteminden faydalanılmış ve elde edilen simülasyon sonuçlarının % 97.72 uyum ile literatürde yayınlanmış deneysel verilere uyduğu görülmüştür, Şekil 25. Bu da bu uygulamada sadece % 3’ün altında bir hata olduğunu gösterir ki bu literatürle karşılaştırıldığında kabul edilebilir bir hata seviyesidir. Bölüm 2’de bahsedildiği gibi, literatürde Monte Carlo yöntemi ile yapılan simülasyonlar %1-15 hata aralığında çalışmaktadır. Absorpsiyon verimi teriminde olduğu gibi Monte Carlo uygulamasında da, kütleli absorpsiyon katsayısı modeli olarak diğer modeller arasında en az hata ile çalışan ‘buhar basıncı modeli’ kullanıldı. Daha sonra örneğin kütleli absorpsiyon katsayısı modeli örnek verimi modeli programına tanıtıldı ve örnek verimi hesaplatıldı. Elde edilen sonuçlar Tablo 10 ve Şekil 26’da gösterilmiştir. Sonuç olarak örnek verimi 150 keV’de 0.9559 iken 2000 keV’de

0.9843 olarak bulunmuştur. Yani enerji arttıkça örnek verimi değerinin de arttığı ve gittikçe bir değerine yaklaştığı bulunmuştur. Düşük enerjili gama ışınları örnek içinden geçerken örnek matrisi tarafından orantısal olarak daha fazla soğurulacağından bu durum beklenen bir eğilimdir. Enerjisi yeterince yüksek olmayan ışınlar dedektör kristaline hiç ulaşmadan örnek içinde tamamen soğurulacaktır. Ancak gama enerjisi yükseklikçe dedektör kristaline ulaşma olasılığı da yükselecek, hatta oldukça yüksek enerjili gama ışınlarında yine orantısal olarak düşünüldüğünde sanki ışının hiç soğurulmadığı varsayılabilecektir. Bu da gama ışınlarının enerjisi yükseldikçe toplam verime etkisinin de düşeceğini gösterir. Toplam verime etkinin olmaması için absorpsiyon verimi teriminde olduğu gibi örnek verimi teriminin de bir değerinde olması gerekmektedir. Bu eğilim Şekil 26’da da gösterilmiştir. Enerji yükseldikçe örnek verimi teriminin değeri bire yaklaşmakta, belli bir gama enerjisinden sonra bir değerinde sabit kalmaktadır.

Toplam verime etki eden son terim olan mutlak verim terimi her dedektör için sabit ve değiştirilemezdir. Bu terimin hesaplanmasında Bölüm 3.3.5’de anlatıldığı gibi üretici firmadan tedarik edilen veriler kullanılmıştır. ‘Curve Expert’ programına tanıtılan veriler için ‘kuadratik eğri modeli’ en uygun model olarak belirlenmiş ve programa model katsayıları hesaplatılmıştır. Bu modelin ana programa tanıtılması ile mutlak verim değeri 150 keV’de 0.0351 iken 2000 keV’de 0.0036 olarak bulunmuştur. Yani enerji arttıkça mutlak verim değeri azalmıştır. Elde edilen sonuçlar, gama spektrometrelerinin ilk önce artan ve bir dirsek değerinden sonra azalan genel verim kalibrasyon eğrisinin dirsekten sonraki 2. bölgesinin eğilimine uymuştur. Çalışma aralığımız da 150-2000 keV olan bu bölgedir.

Son olarak yukarıda bahsi geçen tüm terimlerin çarpımı ile toplam verim değerleri enerjinin bir fonksiyonu olarak bulunmuştur. Toplam verim değerleri için modelimizden elde edilen sonuçlar Tablo 13 ve Şekil 28’de gösterilmiştir. Toplam verim 150 keV’de 0.0327 iken 2000 keV’de 0.0036 olarak bulunmuştur. Gama spektrometrelerinin genel verim kalibrasyon eğrisi yukarıda bahsedildiği gibi enerji artışı ile bir dirsek değerine kadar önce artan bu dirsek değerinden sonra ise enerji artışı ile azalan eğrilerdir. Bu çalışmada ikinci bölge olarak isimlendirebileceğimiz yaklaşık 130 keV enerjisinden (dirsek değeri) sonra enerji ile azalan 150-2000 keV

aralığında çalışılmıştır. Çalışma bölgesi olarak bu aralığın seçilmesinin nedeni spektrumda dirseğin altında kalan kısmın x-ışınları enerji bölgesi de olmasıdır. Üst sınır olarak 2000 keV'in seçilmesinin nedeni de bu enerji değerinden itibaren çok fazla fotopik olmamasıdır. Bu durumda ikinci bölge için elde edilen sonuçlar enerji artışı ile azalan bir eğilimdedir. Şekil 28'de model sonuçlarının deneysel verim değerleri ile uyumu görülmektedir. Deneysel değerler ve model sonuçları arasındaki uyum yine programımızda hesaplatılmış ve aralarında % 91.84 uyum olduğu görülmüştür. Yani model programımız % 8.16 hata ile çalışmıştır. Literatürde modelleme ile elde edilen sonuçlar için hata oranı genellikle % 1-15 civarında verilmektedir. Bu da bizim programımızın oldukça düşük bir hata payı ile çalıştığını göstermektedir.

Daha önce bahsedildiği gibi bu çalışmadan önce laboratuvarımızda yapılan çalışmalarımızda nicel analiz yapabilmek için verim tayini deneysel olarak yapılmaktaydı. Ancak laboratuvarımızda yeterli çeşitlilikte ve miktarda standart kaynak bulunmamaktaydı. Elimizde bulunan az sayıda kaynak ise Bölüm 3.2'de anlatıldığı gibi içerdikleri radyoizotopların çok büyük bir kısmının yarılanma ömürlerinin kısa olması sebebi ile kullanılamaz veya doğru sonuçlar veremez halde idi. Bu çalışma sonuçlarına göre nicel analiz yaparken verim teriminin belirlenmesinde karşılaşılan pek çok zorluk giderilecektir.

Çalışmamızda yazılan program hazır paket program olmayıp dedektör ve örnek geometrisine uygun olarak tarafımızdan yazıldığı için istenilen parametreler değiştirilebilmektedir. Örneğin farklı örnek yükseklikleri veya yoğunlukları için program kodlarında sadece birkaç girdi değiştirilerek enerjiye bağlı verim değerleri elde edilebilecektir. Bu da laboratuvarımızda yapmakta olduğumuz analizlere çok büyük bir kolaylık, hız ve ucuzluk olarak yansımaktadır.

KAYNAKLAR

Abbas M.I, 2001, Analytical Formulae for Well-type NaI(Tl) and HPGe Detectors Efficiency Computation, Applied Radiation and Isotopes, 55, 245-252

Abbas M.I, 2006, Analytical Calculations of the Solid Angles Subtended by a Well-type Detector at point and Extended Circular Sources, Applied Radiation and Isotopes, 64, 1048-1056

Appleby P.G, Philiposian G.T, 2004, Efficiency Corrections for Variable Sample Height in Well-type Germanium Gamma Detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B 225, 423-433

Ayçık G. A, 2009, Overview of the Radioactive and Nuclear Agents in the Environment, NATO Advanced Training Course-New Techniques for the Detection of Nuclear and Radioactive Agents, Springer, Muğla, Turkey, 1-15

Ayçık G.A, 2008, Çekirdek Kimyası Ders Notları, Muğla Üniversitesi Kimya Bölümü Yüksek Lisans Dersi

Ayçık G.A, Demirel H, 2000, Eğitim Notları, TAEK, Ankara Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi

Bochud F, Bailat C, Buchillier T, Byrde F, Schmid E, Laedermann J, 2006, Simple Monte Carlo Method to Calibrate Well-type HPGe Detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 569, 790-795

Ewa I.O.B, Bodizs D, Czifrus Sz, Molnar Zs, 2001, Monte Carlo Determination of Full Energy Peak Efficiency for a HPGe Detector, Applied Radiation and Isotopes, 55, 103-108

Hançerlioğulları A, 2006, Monte Carlo Simülasyon Metodu ve MCNP Kod Sistemi, Kastamonu Eğitim Dergisi, 14-2, 545-556

Helmer R.G, 2003, Modern Tools for Precise γ -ray Spectrometry With Ge Detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 505, 297-305

Helmer R.G, Hardy J.C, Iacob V.E, Vega M.S, Neilson R.G, Nelson J, 2003, The Use of Monte Carlo Calculations in the Determination of Ge Detector efficiency Curve, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 511, 30-381

Helmer R.G, Nica N, Hardy J.C, Iacob V.E, 2004, Precise Efficiency Calibration of an HPGe Detector up to 3.5 MeV, with Measurements and Monte Carlo Calculations, Applied Radiation and Isotopes, 60, 173-177

Hernandez F, Daoushy F, 2003, Accounting for Incomplete Charge Collection in Monte Carlo Simulations of the Efficiency of Well-type Ge-Detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A498, 340-351

Krane K.S, 2002, Nükleer Fizik-2. Cilt, Palme Yayıncılık, Ankara, Türkiye

Laborie J.M, Petit G, Abt D, Girard M, 2000, Monte Carlo Calculation of the Efficiency Calibration Curve and Coincidence-Summing Corrections in Low Level Gamma-ray Spectrometry Using Well-type HPGe detectors, Applied Radiation and Isotopes, 53, 57-62

Nedjadi Y, Spring P, Bailat C, Decombaz M, Triscone G, Gostely J, Laedermann J, Bochud F, 2007, Primary Activity Measurements With 4π γ NaI(Tl) Counting and Monte Carlo Calculated Efficiencies, Applied Radiation and Isotopes, 65, 534-538

Palacios D.F, Alfonso J, Barros H, LaBrecque J, Perez K, Lasoda M.R, 2008, A Semi-empirical Approach to Determine Gamma Activities in Environmental Cylindrical Samples, Radiation Measurements, 43, 77 – 84

Pomme S, 2009, Detection Efficiency Calculation for Photons, Electrons and Positrons in a Well Detector. Part I: Analytical Model, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 604, 584-591

Sima O, 2000, Accurate Calculation of Total Efficiency of Ge Well-type Detectors Suitable for Efficiency Calibration Using Common Standard Sources, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 450, 98–108

Şaşer B, Hançerlioğulları A, Übeyli M, 2003, 8.Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi, Kayseri, Türkiye

Talavera M.G, Neder H, Daza M.J, Quintana B, 2000, Towards a Proper Modelling of Detector and Source Characteristics in Monte Carlo Simulations, Applied Radiation and Isotopes, 52, 777-783

Tüysüz M. Z, 2004, Co-60 Teleterapi Kaynağı İçin Monte Carlo Yöntemiyle Uygun Zırh Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi

Uysal M, 2004, MATLAB ile Matematiksel Uygulamalar ve Mühendislik Uygulamaları, Beta Basın Yayın Dağıtım A.Ş, Kırklareli, Türkiye, 697

Vargas M.J, Diaz N.C, Sanchez D.P, 2003, Efficiency Transfer in the Calibration of Coaxial p-type HPGe Detector Using the Monte Carlo Method, Applied Radiation and Isotopes, 58, 707-712

Vargas M.J, Timon A.F, Diaz N.C, Sanchez D.P, 2002, Monte Carlo Simulation of the Self-Absorption Corrections for Natural Samples in Gamma-ray Spectrometry, Applied Radiation and Isotopes, 57, 893-898

Wang T, Hou I, Tseng C, 1999, Well-type HPGe-detector Absolute-peak-efficiency Calibration and True Coincidence Correction, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 425, 504-515

Wang T, Kang L, Chen T, 1993, A Simplified Computer Program for HPGe Detector Absolute Peak Efficiency Calibration, Radiation Physics Chemistry, 42, 1039-1042

EKLER

Ek-1. Toplam Verimin Hesabı İçin Kullanılan Kodlar

```
%ABSORPTION EFFICIENCY
clear,clc
E=[150:50:2000];

% n noktadaki y=f(x) için optimizsyon denklemi
% J=TOPLAM(i=1:n) (yden-ymod)^2 ---> Min
% n noktadaki y=f(x) için uyum denklemi
% U=1-J^0.5

a_al=0.222149960967400; b_al=-2.990282749330096; c_al=-
0.434107229451506;
mu_al=exp(a_al+E.\b_al+log(E).*c_al);

a_ge=2.6642755369840872; b_ge=1.337993758687472; c_ge=-
0.826050608235158;
mu_ge=exp(a_ge+E.\b_ge+log(E).*c_ge);

a_tup=0.417955581987066; b_tup=-5.692442596792048; c_tup=-
0.455256150136268;
mu_tup=exp(a_tup+E.\b_tup+log(E).*c_tup);

ro_al=2.699; ro_ge=5.323; ro_tup=1.406;
x_al=0.05; x_ge=0.00003; x_tup=0.1;
eff_abs=exp(-
((mu_al.*ro_al*x_al)+(mu_ge.*ro_ge*x_ge)+(mu_tup.*ro_tup*x_tup)));

%INTRINSIC EFFICIENCY
a_int=2.8211973; b_int=-0.87574758;
eff_int=a_int*E.^b_int;

%SAMPLE EFFICIENCY
a_bakelite=0.209060493661944; b_bakelite=-5.138349814306265;
c_bakelite=-0.419484481455500;
mu_bakelite=exp(a_bakelite+E.\b_bakelite+log(E).*c_bakelite);
x=0.5; A=x*mu_bakelite*1.25;
eff_sample=(1-exp(-A))./A;

%GEOMETRIC FACTOR
Zt=6.11; Zm=5.525; Zi=2.21; Ri=0.8503; Rm=2.74;
g_Zi=(sqrt((Zt-Zi)^2+Ri^2)-Ri)/(Zm-Zi);
g_Zm=(sqrt((Zt-Zm)^2+Ri^2)-Ri)/(Zm-Zi);
fG=0.5*(1+g_Zi-g_Zm);

%TOTAL EFFICIENCY
eff_total=eff_abs.*eff_int.*eff_sample.*fG;
plot(E,eff_total)
hold on

%EXPERIMENTAL EFFICIENCY
```

```

E=[351.9 583.1 609.3 1460.8 1764.5];
efficiency=[0.016295 0.010501 0.010107 0.004723 0.004007];
plot(E,efficiency,'*'), xlabel('E(keV)'),ylabel('Verim
%)'),title('Enerji-Verim Grafigi')

% Uyum Hesaplatma
Eexp=[351.9 583.1 609.3 1460.8 1764.5];
mu_al=exp(a_al+Eexp.\b_al+log(Eexp).*c_al);
mu_ge=exp(a_ge+Eexp.\b_ge+log(Eexp).*c_ge);
mu_tup=exp(a_tup+Eexp.\b_tup+log(Eexp).*c_tup);
eff_abs=exp(-
(mu_al.*ro_al*x_al)+(mu_ge.*ro_ge*x_ge)+(mu_tup.*ro_tup*x_tup));
eff_int=a_int*Eexp.^b_int;
mu_bakelite=exp(a_bakelite+Eexp.\b_bakelite+log(Eexp).*c_bakelite);
A=x*mu_bakelite;
eff_sample=(1-exp(-A))./A;
g_Zi=(sqrt((Zt-Zi)^2+Ri^2)-Ri)/(Zm-Zi);
g_Zm=(sqrt((Zt-Zm)^2+Ri^2)-Ri)/(Zm-Zi);
fG=0.5*(1+g_Zi-g_Zm);
eff_total_u=eff_abs.*eff_int.*eff_sample.*fG;
ne=length(Eexp);

fMinmod1=0;fMinmod2=0;i=0; % Uyum
for i=1:1:ne
    fMinmod1=fMinmod1+efficiency(i)^2;
    fMinexp_mod2(i)=(efficiency(i)-eff_total_u(i));
    fMinmod2=fMinmod2+(( fMinexp_mod2(i))^2);
end
Uyum=1-(fMinmod2/fMinmod1)^0.5;

% SONUCLAR
'Enerji (keV):', E
'Deneyisel Verim:', efficiency
'Modelsel Verim:', eff_total_u
'Uyum:', Uyum

```

Ek-2. Geometrik Verimin Hesabı İçin Kullanılan Kodlar

```

clc,clf
Zt=6.11; Zi=2.21; Ri=0.8503; Rm=2.74;
Zm1=2.71;
g_Zi1=(sqrt((Zt-Zi)^2+Ri^2)-Ri)/(Zm1-Zi);
g_Zm1=(sqrt((Zt-Zm1)^2+Ri^2)-Ri)/(Zm1-Zi);
fG1=0.5*(1+g_Zi1-g_Zm1);
Zm2=Zm1+0.5;
g_Zi2=(sqrt((Zt-Zi)^2+Ri^2)-Ri)/(Zm2-Zi);
g_Zm2=(sqrt((Zt-Zm2)^2+Ri^2)-Ri)/(Zm2-Zi);
fG2=0.5*(1+g_Zi2-g_Zm2);
Zm3=Zm2+0.5;
g_Zi3=(sqrt((Zt-Zi)^2+Ri^2)-Ri)/(Zm3-Zi);
g_Zm3=(sqrt((Zt-Zm3)^2+Ri^2)-Ri)/(Zm3-Zi);
fG3=0.5*(1+g_Zi3-g_Zm3);
Zm4=Zm3+0.5;
g_Zi4=(sqrt((Zt-Zi)^2+Ri^2)-Ri)/(Zm4-Zi);
g_Zm4=(sqrt((Zt-Zm4)^2+Ri^2)-Ri)/(Zm4-Zi);
fG4=0.5*(1+g_Zi4-g_Zm4);
Zm5=Zm4+0.5;
g_Zi5=(sqrt((Zt-Zi)^2+Ri^2)-Ri)/(Zm5-Zi);
g_Zm5=(sqrt((Zt-Zm5)^2+Ri^2)-Ri)/(Zm5-Zi);
fG5=0.5*(1+g_Zi5-g_Zm5);
h=[0.5 1.0 1.5 2.0 2.5]
fG=[fG1 fG2 fG3 fG4 fG5]
plot(h,fG)

```

Ek-3. Alüminyumun Kütlesel Absorpsiyon Katsayısının Hesabı İçin Kullanılan Kodlar

```
% Monte_mu_al_keV_VPM.m
clc, clear, clf, format long
EEExp= ...
[ 150 200 300 400 500 600 800 1000 1250 ...
 1500 2000]; ne=length(EEExp);
%ne E
fExp= ...
[ 0.13780 0.12230 0.10420 0.09276 0.08445 0.07802 0.06841 ...
 0.06146 0.05496 0.05006 0.04324]; nf=ne;
% nf mu

a=0; b=2000; nemodel=ne-1; Demodel=(b-a)/nemodel;

Dongu=10; Deneme=50000 ; %
fMin<=Err
for Don=1:Dongu % Dongu

    for Den=1:Deneme

        P=random('normal', -2, 2, 1, 3);
        for pden=1:3
            PMin(Den,pden+1)=P(pden);
        end;
        fMin2=0; i=0;
        for ie=1:1:ne
            i=i+1; E(i)=EEExp(i); e=E(i);
            fEmn(i)=exp ( P(1) + (P(2)/e) + (P(3)*log
(e)) );
            fMin2=fMin2+ ((fExp(i)-fEmn(i))^2);
        end
        fMin=fMin2^0.5; PMin(Den,1)=fMin;

    end % Deneme
        Pmin=sortrows(PMin,1);
        for pden=1:3
            P(pden)=Pmin(1,pden+1);
        end
        PMinMin(Don,1)=Pmin(1,1); PMinMin(Don,2)=Pmin(1,2);
        PMinMin(Don,3)=Pmin(1,3); PMinMin(Don,4)=Pmin(1,4);
        PMinMin(Don,5)=Don; % Pmin

end % Dongu

Pminmin=sortrows(PMinMin,1); % PMinMin
for pden=1:3
    PP(pden)=Pminmin(1,pden+1);
end

i=0;
for e=a+0.1:Demodel:b+0.1
    i=i+1; E(i)=e;
    fE(i)= exp ( PP(1) + (PP(2)/e) + (PP(3)*log (e)) );
end
```

```

'Monte Carlo Minimum Hata Optimum Cozum',
'Model: mu=exp(a+b/E+c*lnE)';          DonguCARPIDeneme=Don*Den
'Hata          P(1)=a          P(2)=b          P(3)=c
Dongu'
'-----          -----          -----          -----          --
---'
Pminmin, % figure(1)
        plot(EExp,fExp,'+', E, fE ), axis([a b a b/10000])
                                xlabel('E(MeV)'),ylabel('mu_Al'),title('E-
mu_Al')

fMinexp_mod2=0;fMinmod2=0;i=0;    % Uyum
for ie=1:1:ne
    i=i+1; E(i)=EExp(i); e=E(i);
    fEmod(i)= exp ( PP(1) + (PP(2)/e) + (PP(3)*log (e)) );
    fMinexp_mod2=fMinexp_mod2+((fExp(i)-fEmod(i))^2);
    fMinmod2=fMinmod2+((fEmod(i))^2);
end
Uyum=1-(fMinexp_mod2/fMinmod2)^0.5

```

Ek-4. Germanyumun Kütlesel Absorpsiyon Katsayısının Hesabı İçin Kullanılan Kodlar

```
% Monte_mu_ge_keV_VPM.m
clc, clear, clf, format long
EEExp= [ 150 200 300 400 500 600 800 1000 ...
1250 1500 2000]; ne=length(EEExp);
%ne E
fExp= [ 0.2491 0.1661 0.1131 0.09327 0.08212 0.07452 0.06426
0.05727...
0.05101 0.04657 0.04086
]; nf=ne; % nf mu

a=0; b=2000; nemodel=ne-1; Demodel=(b-a)/nemodel;

Dongu=10; Deneme=50000 ; %
fMin<=Err
for Don=1:Dongu % Dongu

    for Den=1:Deneme

        P=random('normal', -2, 2, 1, 3);
        for pden=1:3
            PMin(Den,pden+1)=P(pden);
        end; fMin2=0;i=0;
        for ie=1:1:ne
            i=i+1; E(i)=EEExp(i); e=E(i);
            fEmn(i)=exp ( P(1) + (P(2)/e) + (P(3)*log
(e)) );
            fMin2=fMin2+ ((fExp(i)-fEmn(i))^2);
        end
        fMin=fMin2^0.5; PMin(Den,1)=fMin;

    end % Deneme
        Pmin=sortrows(PMin,1);
        for pden=1:3
            P(pden)=Pmin(1,pden+1);
        end
        PMinMin(Don,1)=Pmin(1,1); PMinMin(Don,2)=Pmin(1,2);
        PMinMin(Don,3)=Pmin(1,3); PMinMin(Don,4)=Pmin(1,4);
        PMinMin(Don,5)=Don; % Pmin

end % Dongu

Pminmin=sortrows(PMinMin,1); % PMinMin
for pden=1:3
    PP(pden)=Pminmin(1,pden+1);
end

i=0;
for e=a+0.1:Demodel:b+0.1
    i=i+1; E(i)=e;
    fE(i)= exp ( PP(1) + (PP(2)/e) + (PP(3)*log (e)) );
end

'Monte Carlo Minimum Hata Optimum Cozum',
```

```

'Model: mu=exp(a+b/E+c*lnE)';          DonguCARPIDeneme=Don*Den
'Hata          P(1)=a          P(2)=b          P(3)=c
Dongu'
'-----          -----          -----          -----          --
---'
Pminmin, % figure(1)
        plot(EExp,fExp,'+', E, fE ), axis([a b a b/10000])
        xlabel('E(MeV)'),ylabel('mu_Al'),title('E-
mu_Al')

fMinexp_mod2=0;fMinmod2=0;i=0;    % Uyum
for ie=1:1:ne
    i=i+1; E(i)=EExp(i); e=E(i);
    fEmod(i)= exp ( PP(1) + (PP(2)/e) + (PP(3)*log (e)) );
    fMinexp_mod2=fMinexp_mod2+((fExp(i)-fEmod(i))^2);
    fMinmod2=fMinmod2+((fEmod(i))^2);
end
Uyum=1-(fMinexp_mod2/fMinmod2)^0.5

```

Ek-5. PVC'nin Kütlesel Absorpsiyon Katsayısının Hesabı İçin Kullanılan Kodlar

```
% Monte_mu_tup_keV_VPM.m
clc, clear, clf, format long
EExp= ...
[ 150 200 300 400 500 600 800 1000 1250 1500 2000 ];
ne=length(EExp); %ne E
fExp= ...
[ 0.1486 0.1308 0.111 0.09867 0.08981 0.08293 0.07271 0.06532
0.0584...
0.0532 0.04587 ]; nf=ne; % nf mu

a=0; b=2000; nemodel=ne-1; Demodel=(b-a)/nemodel;

Dongu=10; Deneme=50000 ; %
fMin<=Err
for Don=1:Dongu % Dongu

    for Den=1:Deneme

        P=random('normal', -2, 2, 1, 3);
        for pden=1:3
            PMin(Den,pden+1)=P(pden);
        end; fMin2=0;i=0;
        for ie=1:1:ne
            i=i+1; E(i)=EExp(i); e=E(i);
            fEmn(i)=exp ( P(1) + (P(2)/e) + (P(3)*log
(e)) );
            fMin2=fMin2+((fExp(i)-fEmn(i))^2);
        end
        fMin=fMin2^0.5; PMin(Den,1)=fMin;

    end % Deneme
        Pmin=sortrows(PMin,1);
        for pden=1:3
            P(pden)=Pmin(1,pden+1);
        end
        PMinMin(Don,1)=Pmin(1,1); PMinMin(Don,2)=Pmin(1,2);
        PMinMin(Don,3)=Pmin(1,3); PMinMin(Don,4)=Pmin(1,4);
        PMinMin(Don,5)=Don; % Pmin

end % Dongu

Pminmin=sortrows(PMinMin,1); % PMinMin
for pden=1:3
    PP(pden)=Pminmin(1,pden+1);
end

i=0;
for e=a+0.1:Demodel:b+0.1
    i=i+1; E(i)=e;
    fE(i)= exp ( PP(1) + (PP(2)/e) + (PP(3)*log (e)) );
end

'Monte Carlo Minimum Hata Optimum Cozum',
```

```

'Model: mu=exp(a+b/E+c*lnE)';          DonguCARPIDeneme=Don*Den
'Hata          P(1)=a          P(2)=b          P(3)=c
Dongu'
'-----          -----          -----          -----          --
---'
Pminmin, % figure(1)
        plot(EExp,fExp,'+', E, fE ), axis([a b a b/10000])
        xlabel('E(MeV)'),ylabel('mu_Al'),title('E-
mu_Al')

fMinexp_mod2=0;fMinmod2=0;i=0;    % Uyum
for ie=1:1:ne
    i=i+1; E(i)=EExp(i); e=E(i);
    fEmod(i)= exp ( PP(1) + (PP(2)/e) + (PP(3)*log (e)) );
    fMinexp_mod2=fMinexp_mod2+((fExp(i)-fEmod(i))^2);
    fMinmod2=fMinmod2+((fEmod(i))^2);
end
Uyum=1-(fMinexp_mod2/fMinmod2)^0.5

```

Ek-6. Absorpsiyon Veriminin Hesabı İçin Kullanılan Kodlar

```

clear,clc
E=[150:50:2000];
a_al=0.67446128;
b_al=-24.512812;
c_al=-0.49894236;
mu_al=exp(a_al+E.\b_al+log(E).*c_al);
a_ge=-1.4122741;
b_ge=180.9571;
c_ge=-0.23795679;
mu_ge=exp(a_ge+E.\b_ge+log(E).*c_ge);
a_tup=0.62697422;
b_tup=-17.033408;
c_tup=-0.48420514;
mu_tup=exp(a_tup+E.\b_tup+log(E).*c_tup);
ro_al=2.699;
ro_ge=5.323;
ro_tup=1.406;
x_al=0.05;
x_ge=0.00003;
x_tup=0.1;
eff_abs=exp(-
((mu_al.*ro_al*x_al)+(mu_ge.*ro_ge*x_ge)+(mu_tup.*ro_tup*x_tup)))
plot(E,eff_abs)

```

Ek-7. Bakalitin Kütlesel Absorpsiyon Katsayısının Hesabı İçin Kullanılan Kodlar

```
% Monte_mu_bakelite_keV_VPM.m
clc, clear, clf, format long
EEExp= ...
[150 200 300 400 500 600 800 1000 1250 1500 2000 ]; ne=length(EEExp);
%ne E
fExp= ...
[ 0.14240 0.13000 0.11270 0.10090 0.09210 0.08516 0.07478 0.06723...
0.06013 0.05472 0.04694 ]; nf=ne; % nf mu

a=0; b=2000; nemodel=ne-1; Demodel=(b-a)/nemodel;

Dongu=10; Deneme=50000 ; %
fMin<=Err
for Don=1:Dongu % Dongu

    for Den=1:Deneme

        P=random('normal', -2, 2, 1, 3);
        for pden=1:3
            PMin(Den,pden+1)=P(pden);
        end; fMin2=0;i=0;
        for ie=1:1:ne
            i=i+1; E(i)=EEExp(i); e=E(i);
            fEmn(i)=exp ( P(1) + (P(2)/e) + (P(3)*log
(e)) );
            fMin2=fMin2+((fExp(i)-fEmn(i))^2);
        end
        fMin=fMin2^0.5; PMin(Den,1)=fMin;

    end % Deneme
        Pmin=sortrows(PMin,1);
        for pden=1:3
            P(pden)=Pmin(1,pden+1);
        end
        PMinMin(Don,1)=Pmin(1,1); PMinMin(Don,2)=Pmin(1,2);
        PMinMin(Don,3)=Pmin(1,3); PMinMin(Don,4)=Pmin(1,4);
        PMinMin(Don,5)=Don; % Pmin

end % Dongu

Pminmin=sortrows(PMinMin,1); % PMinMin
for pden=1:3
    PP(pden)=Pminmin(1,pden+1);
end

i=0;
for e=a+0.1:Demodel:b+0.1
    i=i+1; E(i)=e;
    fE(i)= exp ( PP(1) + (PP(2)/e) + (PP(3)*log (e)) );
end

'Monte Carlo Minimum Hata Optimum Cozum',
'Model: mu=exp(a+b/E+c*lnE)'; DonguCARPIDeneme=Don*Den
```

```

'Hata          P(1)=a          P(2)=b          P(3)=c
Dongu'
'-----      -----      -----      -----      --
---'
Pminmin, % figure(1)
        plot(EExp,fExp,'+', E, fE ), axis([a b a b/10000])
                                xlabel('E(MeV)'),ylabel('mu_Al'),title('E-
mu_Al')

fMinexp_mod2=0;fMinmod2=0;i=0;    % Uyum
for ie=1:1:ne
    i=i+1; E(i)=EExp(i); e=E(i);
    fEmod(i)= exp ( PP(1) + (PP(2)/e) + (PP(3)*log (e)) );
    fMinexp_mod2=fMinexp_mod2+( (fExp(i)-fEmod(i))^2);
    fMinmod2=fMinmod2+( (fEmod(i))^2);
end
Uyum=1-(fMinexp_mod2/fMinmod2)^0.5

```

Ek-8. Örnek Veriminin Hesabı İçin Kullanılan Kodlar

```
clear,clc
E=[150:50:2000];
a_bakelite=0.209060493661944; b_bakelite=-5.138349814306265;
c_bakelite=-0.419484481455500;
mu_bakelite=exp(a_bakelite+E.\b_bakelite+log(E).*c_bakelite);
x=0.5; A=x*mu_bakelite*1.25;
eff_sample=(1-exp(-A))./A;
plot(E,eff_sample)
```

Ek-9. Mutlak Verimin Hesabı İçin Kullanılan Kodlar

```
clear,clc
E=[150:50:2000];
a_int=2.8211973;
b_int=-0.87574758;
eff_int=a_int*E.^b_int;
plot(E,eff_int)
```

Ek-10. MATLAB Ürün Tescilleri

MATLAB ve tezde kullanılan MATLAB Toolbox'ları The MathWorks Incorporated firmasının tescilli ürünüdür.

The MathWorks Inc. İletişim bilgileri:

The MathWorks Inc.
3 Apple Hill Drive
Natick, MA,-1760-2098 USA
Tel: 508-647-7000
Faks: 508-647-7001
e-posta: info@mathworks.com
web: www.mathworks.com

The The MathWorks Inc. Türkiye Temsilcisi Figes Ltd. Şti. iletişim bilgileri:

Figes Ltd. Şti.
Petek-Bozyaka İş Merkezi C/301-311
Celal Bayar Cad. No.6
16620 Bursa
Tel: 0 224-250 8454
Faks: 0 224-250 8457
e-posta: info@figes.com.tr
web: www.figes.com.tr

ÖZGEÇMİŞ

04.03.1983 tarihinde Muğla’da doğdu. Orta öğrenimini Muğla Anadolu Lisesi’nde, lise öğrenimini Muğla 75. Yıl Fen Lisesi’nde tamamladı. 2006 yılında İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2008 yılında Muğla Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2009 yılından bu yana Muğla Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü’nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Evlidir.