

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

GATE SİMÜLASYONUNDA DEDEKTÖR
MODELLEMESİ VE DEDEKTÖR VERİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMET KAPLAN

DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ NURAY YAVUZKANAT
İKİNCİ DANIŞMAN
DOÇ. DR. MENEKŞE ŞENYİĞİT

EYLÜL 2023

BİTLİS

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**GATE SİMÜLASYONUNDA DEDEKTÖR
MODELLEMESİ VE DEDEKTÖR VERİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMET KAPLAN
ORCID: 0000-0003-1895-9984

DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ NURAY YAVUZKANAT
İKİNCİ DANIŞMAN
DOÇ. DR. MENEKŞE ŞENYİĞİT

EYLÜL 2023
BİTLİS

T. C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisiyim. Hazırlamış olduğum "GATE Simülasyonunda Dedektör Modellemesi ve Dedektör Verimi" başlıklı tezde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi; tüm bilgi, belge, değerlendirmeye ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu; tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi; kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı; bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.
....../....../2023

İmza

Muhammet KAPLAN

T. C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
TEZ YAZIM KILAVUZU UYGUNLUK BEYANI

"GATE Simülasyonunda Dedektör Modellemesi ve Dedektör Verimi" başlıklı yüksek lisans tezi Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Taz Yazım Kılavuzuna uygun olarak hazırlanmıştır./....../2023

Tezi Hazırlayan

İmza

Muhammet KAPLAN

Danışman

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Nuray YAVUZKANAT

İkinci Danışman

İmza

Doç. Dr. Menekşe ŞENYİĞİT

Fizik Anabilim Dalı Başkanı

İmza

Prof. Dr. Yadigar GÜLSEVEN SIDIR

T. C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY SAYFASI

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı öğrencisi Muhammet KAPLAN tarafından hazırlanan "GATE Simülasyonunda Dedektör Modellemesi ve Dedektör Verimi" adlı Yüksek Lisans Tezi ile ilgili tez savunma sınavı, 07/08/2023 tarihinde yapılmış ve tezin oy birliği ile kabul edilmesine karar verilmiştir.

JÜRİ:

İMZA

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nuray YAVUZKANAT
(Bitlis Eren Üniversitesi)

.....

Üye: Doç. Dr. Şule KARATEPE ÇELİK
(Bitlis Eren Üniversitesi)

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Vakkas BOZKURT
(Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi)

.....

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun.....tarih ve.....sayılı kararıyla jüri tarafından kabul edilmiş bu çalışmanın yüksek lisans tezi olarak kabulü onaylanmıştır.

....../....../2023

Doç. Dr. Mehmet Bakır ŞENGÜL

Enstitü Müdürü

T. C.

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

**GATE SİMÜLASYONUNDA DEDEKTÖR MODELLEMESİ VE DEDEKTÖR
VERİMİ**

Yüksek Lisans Tezi

Muhammet KAPLAN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nuray YAVUZKANAT

İkinci Danışman: Doç. Dr. Menekşe ŞENYİĞİT

Eylül 2023

ÖZET

Sintilasyon dedektörleri, nükleer ve yüksek enerji fiziği çalışmalarında, tıbbi görüntülemede, jeolojik keşiflerde, nükleer korunmada ve önlemlerinde çoğunlukla kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında nükleer fizikte yaygın olarak kullanılan NaI(Tl) sintilasyon dedektör sisteminin kalibrasyon faktörlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Başarılı bir gama spektrumu analizi için ana faktörler; enerji ve enerji çözünürlüğünün kalibrasyonları ile tam enerji pik verimidir. 2"x2" NaI(Tl) için dedektör verimi hem deneysel olarak hem de Geant4 tabanlı çalışan GATE simülasyonu kullanılarak araştırılmıştır. Deneysel ölçümler, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü'nde bulunan farklı enerji aralıklarında (59-1408 keV) gama ışınları yayınlayan radyoaktif kaynaklar ile NaI(Tl) dedektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan noktasal radyoaktif kaynaklar ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{152}Eu iken silindirik şeklinde olanlar ^{241}Am , ^{22}Na 'dur. Deneysel ölçümlerde kullanılan radyoaktif kaynakların şekli ve aktiviteleri ile dedektör sistemi GATE simülasyonunda modellenmiştir. Deneyden ve simülasyondan elde edilen dedektör verimi sonuçları karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda dedektör verim kalibrasyonlarında önemli olan analitik denklemler parametreleriyle birlikte tespit edilmiştir. Deneysel ve simülasyondan elde edilen sonuçlar birbiriyle ve literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğu gözlemlendikten sonra simülasyon modeli $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, $\text{GAGG}(\text{Ce})$ and SrI_2 gibi yeni sintilasyon dedektör sistemlerine uyarlanarak gama radyasyonu için dedektör verim değerleri de bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: GATE, dedektör verimi, NaI(Tl), LaBr_3 , $\text{GAGG}(\text{Ce})$

Republic of Türkiye
Bitlis Eren University Graduate School
Department of Physics
DETECTOR MODELING AND DETECTOR EFFICIENCY IN GATE
SIMULATION
Master's Thesis
Muhammet KAPLAN
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Nuray YAVUZKANAT
Second Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Menekşe ŞENYİĞİT
September 2023

ABSTRACT

Scintillation detectors are mostly used in nuclear, particle and medical physics, geological exploration and homeland security. In this thesis, it is aimed to determine the calibration factors of the NaI(Tl) scintillation detector system, which is widely used in nuclear physics. The main factors for a successful gamma spectrum analysis are calibrations of energy and energy resolution with the full energy peak efficiency. Detector efficiency for 2"x2" NaI(Tl) was investigated both experimentally and using Geant4 based GATE simulation. Experimental measurements were carried out using NaI(Tl) detector with radioactive sources emitting gamma-rays in different energy ranges (59-1408 keV) in Ankara University Faculty of Science Physics Department. The point radioactive sources used in the experiment are ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{152}Eu , while the cylindrical ones are ^{241}Am , ^{22}Na . The shape and activities of the radioactive sources used in the experimental measurements and detector system were modeled in the GATE simulation. The detector efficiency results obtained from the experiment and simulation were compared. As a result, analytical equations, which are very important in detector efficiency calibrations, have been determined with their parameters. After the experimental and simulation results were be compatible with each other and literature, the simulation model was modified to other scintillation detectors such as $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, $\text{GAGG}(\text{Ce})$ and SrI_2 , and the detector efficiency values for gamma radiation were determined.

Keywords: GATE, efficiency, NaI(Tl), LaBr_3 , $\text{GAGG}(\text{Ce})$

TEŞEKKÜR

Her aşamasında desteklerini esirgemeyen sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Nuray YAZVUZKANAT'a ve ikinci danışmanım Doç. Dr. Menekşe ŞENYİĞİT'e en içten duygularıyla teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	V
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
KISALTMALAR.....	VII
SİMGELER.....	VIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Sintilasyon Malzemeleri.....	2
1.2. Sintilasyon Dedektörlerinin Elektronik.....	8
1.3. Dedektör Kalibrasyonları.....	12
1.4. Monte Carlo tekniği ve GATE simülasyon programı.....	18
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	20
2.1. Deneysel Yöntem.....	20
2.2. GATE simülasyon modellemesi.....	23
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	27
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	39
KAYNAKLAR.....	41

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Deneysel ölçümlerde kullanılan ve simulasyonda tanımlanan	22
Çizelge 3.1. Farklı enerji ve mesafelerde elde edilen dedektörün verim tablosu	30
Çizelge 3.2. Analitik denklem kullanılarak elde edilen parametreler	32
Çizelge 3.3. $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ dedektörünün verim değerlerinin karşılaştırması	36
Çizelge 3.4. Yeni nesil dedektörler için elde edilen dedektör veriminin yüzdeleri ..	37

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Organik molekülün π -durumunun şematik gösterimi	5
Şekil 1.2. Saf ve aktivatörlü inorganik sintilasyon molekülünün enerji seviyeleri	6
Şekil 1.3. $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, $\text{NaI}(\text{Tl})$ ve HPGe dedektörleri için enerji spektrumları	7
Şekil 1.4. Sintillasyon dedektör sisteminde sinyal işleme süreçlerinin gösterimi	9
Şekil 1.5. PMT'lerin temel parçalarının gösterimi	10
Şekil 1.6. Bir PIN (p-i-n) fotodiyotunun şematik gösterimi	11
Şekil 1.7. Çığ Fotodiyot (APD) yapısının şematik gösterimi	11
Şekil 1.8. Dedektör veriminde kullanılan fonksiyonun fit edilmiş grafik örnekleri	16
Şekil 1.9. Dedektör veriminde katı açının gösterimi	17
Şekil 2.1. Ön yükselteç ve güç kaynağına sahip Ortec marka ScintiPack	20
Şekil 2.2. Deneysel ölçümün şematik gösterimi ve Cobalt-60 için enerji spektrumu ...	21
Şekil 2.3. ^{152}Eu radyoaktif kaynağının enerji spektrumu	23
Şekil 2.4. Dedektör geometrileri	24
Şekil 2.5. GATE simülasyonunda modellenen $\text{NaI}(\text{Tl})$ dedektörünün geometrisi	24
Şekil 2.6. Makro dosyasında tanımlanan dedektör modellemesi	25
Şekil 2.7. GATE simülasyonunda etkileşime giren gamaların gösterimi	26
Şekil 3.1. 2"x2" $\text{NaI}(\text{Tl})$ detektörü için enerji kalibrasyon grafiği	27
Şekil 3.2. Enerjiye karşın elde edilen enerji çözünürlüğü grafiği	28
Şekil 3.3. Farklı dedektör-kaynak mesafeleri için elde edilen dedektör verimi	31
Şekil 3.4. Farklı dedektör-kaynak mesafeleri için elde edilen tam enerji pik verimi ...	33
Şekil 3.5. Farklı enerjideki fotonlar için dedektör-kaynak mesafesine	34
Şekil 3.6. Deneysel ve simülasyonda elde edilen enerji spektrumlarının	35
Şekil 3.7. $\text{NaI}(\text{Tl})$ dedektörü ile yeni nesil dedektör sistemlerinin karşılaştırması	38
Şekil 3.8. LaBr_3 dedektörü ile diğer yeni nesil dedektör sistemlerinin karşılaştırması ..	38

KISALTMALAR

LaBr ₃ (Ce)	: (Ce) katkılı lantan bromür
NaI(Tl)	: (Tl) katkılı sodyum iyodür
SrI ₂ (Eu)	: (Eu) katkılı stronsiyum iyodür
Gd ₃ Al ₂ Ga ₃ O ₁₂ (Ce)	: (Ce) katkılı gadolinyum alüminyum galyum
GAGG:Ce	: (Ce) katkılı gadolinyum alüminyum galyum garnet
NaI(Tl)	: (Tl) katkılı sodyum iyodür
MC	: Monte Carlo
GATE	: Tomografik Emisyon için Geant4 Uygulaması
Geant4	: Parçacıkların maddeden geçişi ve geometrisinin simülasyonu
MCA	: Çok kanallı analizör (Multi Channel Analyzer)
PMT	: Foto çoğaltıcı tüp
APD	: Çığ fotodiyotu
PET	: Pozitron emisyon tomografisi
PET-MR	: Pozitron emisyon tomografisi entegre edilmiş MR
FWHM	: Tepe pikinin yarısındaki tam genişlik
RADWare	: Gama ışını çakışma verilerinin etkileşimli grafik analiz programı
ROOT	: CERN tarafından oluşturulan veri işleme programı
MCNP	: Monte Carlo'da parçacık transferi
MGO	: Magnezyum oksit
¹³⁷ Cs	: Sezyum-137
⁶⁰ Co	: Kobalt-60
¹⁵² Eu	: Evropiyum-152
²⁴¹ Am	: Amerikyumun-241
²² Na	: Sodyum-22

SİMGELER

E	: Enerji
R	: Enerji çözünürlüğü
ε	: Dedektörün verimi
A	: Radyoaktif çekirdeğin aktivitesi
t	: Datanın alınma süresi
P	: Foton emisyon olasılığı
N	: Fotopik sayım sayısı



1. GİRİŞ

Sintilatörler yüksek ışık verimine, iyi enerji çözünürlüğüne, yüksek gama ışını soğurum katsayısına, hızlı lüminesans bozunma süresine ve kimyasal kararlılığa sahiptir. Sintilasyon dedektörleri; radyasyon tespiti, tıbbi görüntüleme, güvenlik, astrofizik, yeraltı kaynaklarının keşifleri gibi farklı alanlarda kullanılan ve bu alanlarda önemli bir rol oynayan dedektör sistemleridir [1–5]. Tespit edilecek radyasyonun çeşidine bağlı olarak farklı uygulamalar için dizayn edilmiş çeşitli sintillatör malzemeleri mevcuttur. Talyum katkılı sodyum iyodür dedektörleri pek çok alanda kullanılan, yaygın olan ve en iyi bilinen dedektör sistemidir [6]. NaI(Tl) göre daha iyi enerji çözünürlüğüne sahip seryum (Ce) katkılı lantan bromür, LaBr₃(Ce), yeni nesil inorganik sintilatörlerin en iyi örneklerinden biridir. Enerji çözünürlüğü LaBr₃(Ce) için 662 keV’de 2.7% – 3.3% arasında olmasından dolayı sodyum iyodüre iyi bir alternatiftir [7, 8]. Bir diğer yeni nesil sintilatör dedektörü europium katkılı alkaline toprak halojenür olan SrI₂(Eu₂) dür. LaBr₃(Ce) ile karşılaştırılabilir enerji çözünürlüğü ile gama ışınının dedeksiyonunda ve spektrumunda yeni bir seçenek sunar [9, 10]. Son yıllarda piyasaya çıkan nükleer alanında özellikleri bakımından oldukça ilgi çeken yeni nesil gadolinyum alüminyum galyum (Gd₃Al₂Ga₃O₁₂:1%Ce) GAGG:Ce sintillatörü mevcuttur [11, 12]. En ideal performans için dedektör sistemlerinin doğru bir şekilde kalibrasyonlarının yapılması gerekmektedir. Dedektörün enerji kalibrasyonunda kullanılacak radyoaktif kaynakların aktivitelerinin bilinmesi gerekirken, verim kalibrasyonunda ise aktivite miktarının bilinmesi gerekir. Dedektör verimliliğinin kalibrasyonu, bir dedektörün en önemli özelliklerinden biridir ve özellikle karmaşık ve genişletilmiş kaynak geometrileri için bunu belirlemek oldukça zor olabilir [13]. Bu nedenle araştırmalar, dedektör verim kalibrasyonunu gerçekleştirmek için deneysel ölçümlerin yanında ayrıca hesaplamalı tekniklerin geliştirilmesine de odaklanmıştır. Monte Carlo (MC)’da bu hesaplama tekniklerinden biridir. Bu teknik, deneysel olarak istenilen enerji değerinde gama-ışını yayınlayan kaynakların bulunmasının zorluğundan veya imkansızlığından dolayı dedektör verim eğrilerinin bulunmasına olanak sağlar [13, 14].

Bu çalışmanın amacı, radyasyon ölçümünde, nükleer araştırmalarda ve deneysel çalışmalarda önemli olan 2"x2" NaI(Tl) sintilasyonunun kalibrasyon parametrelerini elde etmektir. Dedektör sisteminin kalibrasyon faktörleri deneysel verilerin fit edilmesiyle

elde edilen parametrelerdir. Dedektör verim kalibrasyonunda verim, gama radyasyonunun enerjisine ve dedektör kaynak mesafesine bağılı olarak değişiklik göstereceğinden dolayı tam enerji pik verimi dikkate alınmıştır. Ayrıca Geant4 tabanlı çalışan GATE simülasyonunda yapılan dedektör modellemesi ile de dedektör verim eğrileri araştırılmıştır. Deney-sel ve simülasyondan elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olması, GATE simülasyon kodu aracılığıyla herhangi bir dedektör sistemi için verim hesaplamaları için bize hızlı ve pratik bir yol göstermiştir. Bu sebeple öncelikle simülasyon modeli LaBr_3 , $\text{GAGG}(\text{Ce})$ ve SrI_2 gibi yeni sintilasyon dedektör sistemlerine uyarlanmıştır. Simülasyon modelle-mesinde her farklı sintilasyon malzemesi için karakteristik olan geometri, kimyasal ve optiksel özellikler her malzeme için ayrı ayrı kodda yazılmıştır.

1.1. Sintilasyon Malzemeleri

Sintilasyonlar, nükleer fizik, parçacık ve yüksek enerji fiziğinde radyasyon tespiti, tıbbi görüntüleme (Gama Kamera, PET ve PET-CT) ve çevre izleme gibi çeşitli uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılırlar. Floresans, fosforesans ve sintilasyon, üç farklı optik olaydır ve malzemelerin farklı koşullarda ışık yayma süreçlerini tanımlarlar. Floresans, yüksek enerjili ışık, ultraviyole veya X-ışınları gibi kısa dalga boylu elektromanyetik radyasyon türleriyle uyarılan malzemelerin bu enerjiyi emerek daha yüksek enerji seviyelerine geçmesi ve ardından tekrar düşerek yaydığı düşük enerjili ve daha uzun dalga boylu ışığı ifade eder. Bu süreç, uyarılan elektronların enerji düzeyleri arasındaki geçiş sırasında fazla enerjinin fotonlar (ışık parçacıkları) şeklinde yayılması nedeniyle gerçekleşir. Floresans, uyarımın hemen ardından veya atomik geçişlerin yaklaşık olarak aynı süre içinde gerçekleşmesi durumunda ortaya çıkar. Floresan, uyarılan elektronların enerji kaybederek temel enerji seviyelerine dönmesiyle oluşan ışık yayınlanmasını ifade eder. Ancak floresan süreci, uyarılan elektronların daha uzun süre uyarılmış durumda kalmasına ve ardından geri dönmesine yol açan bir mekanizmayla gerçekleşir. Bu nedenle, floresanın uyarılma süresi sintilasyondan daha uzun olabilir.

Fosforesans, bir malzemenin uyarılmasını takiben, uyarımın sona ermesinden sonra bile enerji yaymaya devam ettiği optik bir olaydır. Bu süreçte, malzeme, kısa bir süre için enerjiyi depolar ve bu enerjiyi daha sonra yavaş yavaş ve uzun bir süre boyunca düşük yoğunluklu ışık olarak yayınlar. Fosforesans süreci, uyarım sona erdikten sonra da bir süre boyunca sürdüğü için floresan sürecinden farklıdır. Floresan süreci, uyarımın he-

men ardından veya kısa bir süre içinde gerçekleşirken, fosforesans süreci, uyarım sona erdikten sonra bile bir gecikme ile gerçekleşebilir.

Sintilasyonlar, yüksek enerjili parçacıklar veya iyonlaştırıcı radyasyon gibi belirli malzemelerle etkileştiğinde oluşan ışık flaşları veya parıldamalarıdır. Bu malzemeler, sintilatörler olarak adlandırılır ve luminesans özelliğine sahiptirler, yani gelen radyasyondan enerjiyi emip, görünür ışık olarak yeniden yayabilirler. İyonlaştırıcı radyasyon veya yüksek enerjili parçacıklar bir sintilatörden geçerken, malzemenin içindeki atomlara veya moleküllere enerji aktarılır. Bu süreç, sintilatördeki elektronları uyarır ve onları daha yüksek enerji seviyelerine iter. Bu uyarılmış elektronlar, eski enerji seviyelerine geri dönerken fazla enerjiyi fotonlar şeklinde yayınlarlar. Bu fotonların yayılması sonucu, sintilasyonlar flaşlar veya ışık parlamaları olarak görülür. Fosforesans ve floresans, uyarım sona erdikten sonra ışık yaymayı içerirken, sintilasyon ise uyarım sırasında gerçekleşir ve radyasyonun algılanması ve tespiti için önemli bir rol oynar.

Sintilasyon olayı sonucu malzemeden yayılan ışık, dedektörün içindeki özel bir ışık algılayıcıya (genellikle bir fotodiyot veya fotonçoğaltıcı) yönlendirilir. Işık algılayıcı, gelen ışık parçacıklarını (fotonları) algılar. Işık algılayıcıda, fotonlar fotoelektrik etkiye uğrarlar. Bu süreçte, fotonlar, ışık algılayıcının yüzeyindeki metal yüzeylerden elektron koparır. Bu, fotonların enerjisini elektron enerjisine dönüştüren bir olaydır. Fotoelektrik etkiye uğrayan elektronlar, içinde elektriksel alanlar olan dedektör yapısında çoğaltılır. Dedektörlerin yapısındaki fotoçoğaltıcılar sayesinde fotoelektronlar bir dizi elektrot (katot) arasında çoğaltılır. Bu çoğaltma süreci, bir fotoelektronun bir dizi elektrotta çarparak daha fazla elektron üretmesi ile gerçekleşir. Bu şekilde, bir fotondan çıkan bir fotoelektron, çok daha fazla sayıda elektrona dönüşebilir. Çoğaltılan elektronlar, dedektördeki elektrotlardan (katotlardan) toplanır ve bir anoda doğru yönlendirilir. Anot, toplanan elektronları toplayan ve elektrik sinyallerine dönüştüren bir elektrottur. Elektronlar, anota çarptığında bir elektrik sinyali üretilir. Bu elektrik sinyali, dedektörden çıkan son sinyaldir ve ışık ile başlayan sintilasyon olayının elektrik sinyaline dönüşmüş halidir. Bu elektrik sinyali daha sonra dedektörün çıkışında veya bağlı olduğu elektronik cihazlarda işlenir, ölçülür ve analiz edilir.

Sintilatör malzemeleri organik, inorganik veya organik-inorganik karışımlar olabilir. Özellikleri, ışık verimi, bozunma süresi ve enerji çözünürlüğü gibi belirli uygulama-

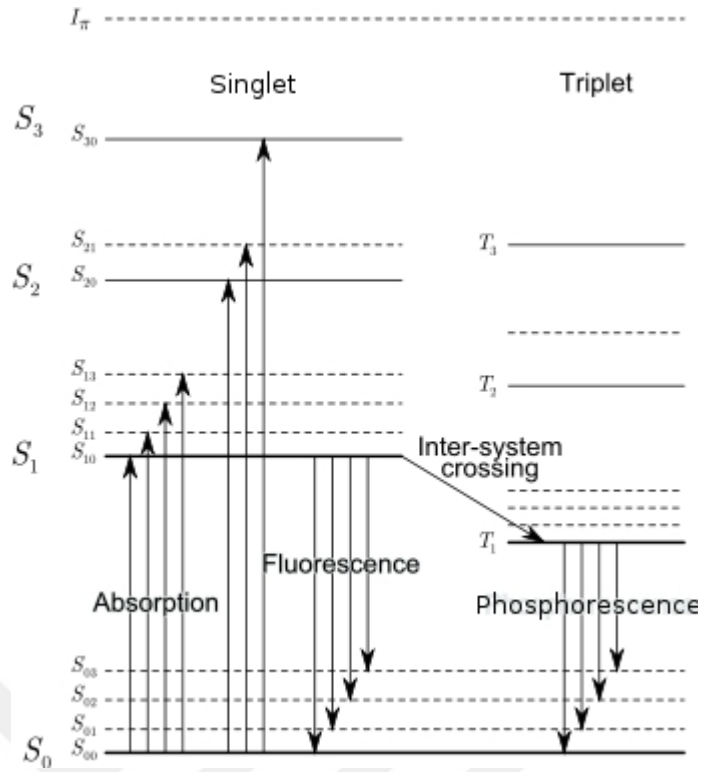
ların gereksinimlerine uygun olarak seçilir. Organik sintilasyon malzemeleri genellikle esneklik, form verilebilirlik ve düşük maliyet gibi avantajlar sunarken, inorganik sintilasyon malzemeleri daha yüksek performans, enerji çözünürlüğü ve radyasyon dayanıklılığı sağlar.

1.1.1. Organik Sintilatörler

Organik sintilasyon malzemeleri, organik bileşiklerden oluşan ve iyonlaştırıcı radyasyona maruz kaldıklarında enerjiyi absorbe ederek ışık emisyonu gerçekleştiren organik bileşiklerdir. Bu bileşikler, yüksek enerjili fotonlar veya parçacıklarla etkileşime girdiklerinde uyarılırlar ve bu etkileşim sonucunda ışık yayarak belirli bir dalga boyunda emisyon gösterirler. Organik sintilatörler; bağlı veya yoğunlaşmış benzen halka yapıları içeren aromatik hidrokarbon bileşiklerdir. Stilben, antrasen, PPO gibi bileşikler organik sintilasyon malzemelerine örnek olarak verilebilir. Organik sintilasyon malzemeleri genellikle düşük yoğunluktadır, daha düşük enerji çözünürlüğüne sahip olabilirler ve daha az parlaklık (luminesans) üretebilirler. Ancak, kolayca şekillendirilebilirler ve daha ekonomik olduklarından dolayı bazı uygulamalarda tercih edilirler. En ayırt edici özellikleri birkaç nano saniye veya daha kısa sürede çok hızlı bir bozunma sürelerinin olmasıdır. Organik kristaller, organik sıvılar, plastikler, ince film sintilatörler, yüklü organik sintilatörlerdir. Organik malzemelerdeki floresans mekanizması, tek bir molekülün enerji seviyelerindeki geçişlerden kaynaklanmaktadır ve bu nedenle floresans fiziksel durumdan bağımsız olarak gözlenebilmektedir. Birçok organik sintilatör, π elektron yapısı olarak bilinen belirli simetri özelliklerine sahip organik moleküllere dayanır ve elektronlar bu orbitalleri işgal ederler. π moleküler orbitaller için tipik enerji diyagramı Şekil 1.1. verilmiştir.

1.1.2. İnorganik Sintilatörler

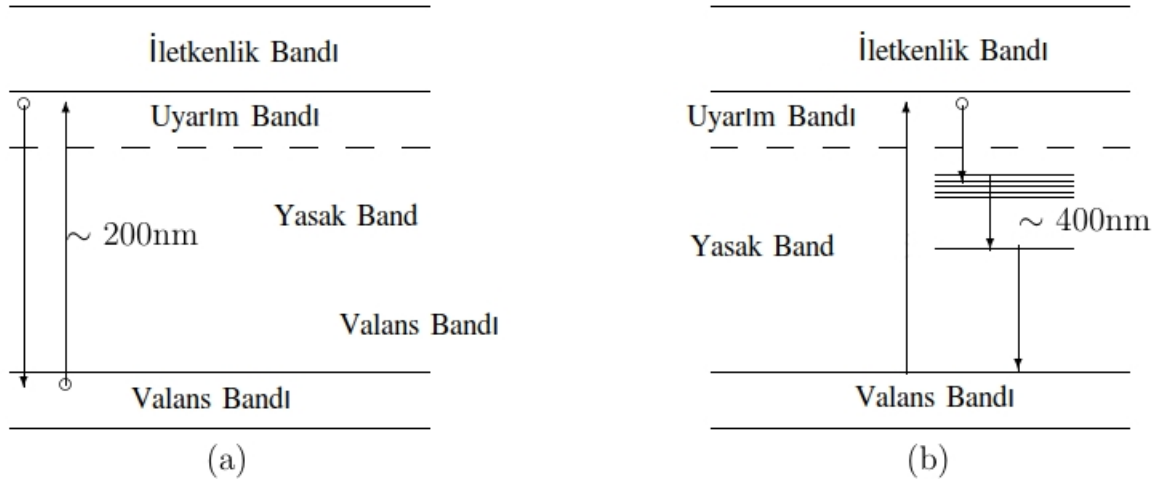
Sintilasyon mekanizması kristal örgü yapısına bağlıdır. NaI gibi saf bir inorganik kristal örgüsünde, elektronların yalnızca seçilen enerji bantlarını işgal etmesine izin verilir. Yasaklanmış bant veya bant aralığı, elektronların saf kristalde asla bulunamadığı enerjilerdir. Saf kristallerdeki bant aralığı genişlikleri, yayılan fotonun görünür aralık içinde uzanamayacak kadar yüksek olacağı şekildedir. Bu nedenle kristale küçük miktarlarda safsızlıklar eklenir. Safsızlıklar aktivatörler olarak adlandırılır ve bant yapısının değişme-



Şekil 1.1. Organik molekülün π -durumunun şematik gösterimi [15, 16]

sine yani uyarılma enerjisinin değişimine neden olur. Toplam kristalin enerji yapısı değişmez, sadece aktivatör bölgelerindeki enerji yapısı değişir. İnorganik sintilatörler, esas olarak küçük bir aktivatör safsızlığına sahip alkali halindedirler. Şu ana kadar en çok kullanılan inorganik sintilatör malzeme NaI(Tl)'dir. NaI'e az miktarda Tl ilave edilerek elde edilen inorganik malzemenin enerji seviyelerinin gösterimi Şekil 1.2. verildiği gibidir. Genel olarak, inorganik sintilatörler fosforesanstan dolayı organik sintilatörlere göre 2-3 kat daha yavaşlardır. Bu gecikme yaklaşık olarak 500ns kadardır. İnorganik sintilatörlerin en önemli avantajlarından bir tanesi ise bu kristallerin durdurma güçlerinin yüksek olmasıdır. Durdurma güçlerinin fazla olması yoğunluklarının ve atom numaralarının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

Bir çekirdek etkileşimi sonucu üretilen ya da radyoaktif bir kaynaktan yayınlanan gama ışınlarının ölçülmesiyle meydana gelen fonksiyon dağılımının incelenmesi olarak tanımlanabilecek gama spektroskopisi, çekirdek yapılarının araştırılmasında önemli bir rol üstlenmektedir. Çekirdek yapılarını anlayabilmek için hem teorik hem de deneysel verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Deneysel verinin analiz edilerek teorik çalışmalara uygun olacak şekilde yorumlanması, yapılan deneyin güvenilirliği ve deney araçlarının nitelik-

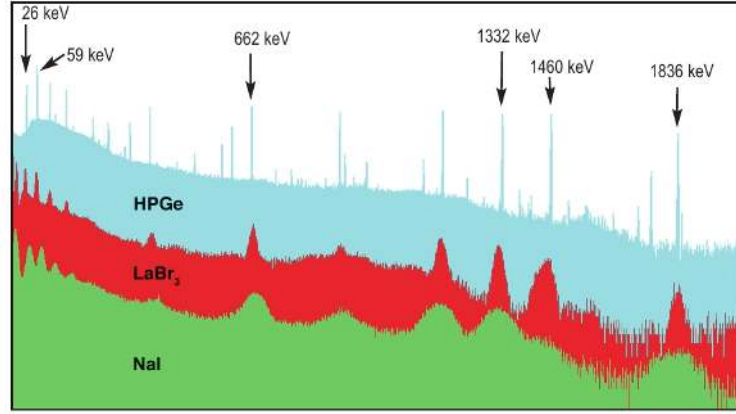


Şekil 1.2. Saf ve aktivatörlü inorganik sintilasyon molekülünün enerji seviyelerinin gösterimi. (a) Saf NaI kristalinin elektron enerji seviyesi yaklaşık olarak 200 nm iken (b) Thalyum malzemesi eklenerek safılaşdırılan NaI kristalinin elektron enerji seviyesi 400 nm çıkarılarak daha fazla optiksel fotonların oluşması sağlanmış olur [15]

lerine bağlıdır. Bu nedenle dedektör karakteristiklerinin belirlenmesi ve geliştirilmesi oldukça önemlidir. Gelen gama ışınlarının enerjisine bağlı olarak, dedektörden elde edilen sinyaller, gama spektrumları olarak gözlenir. Karmaşık bir spektrumun anlam kazanmasını istiyorsak, çok kanallı analizörde (Multi Channel Analyzer-MCA) kanal başına düşen gama enerjilerini belirlemek, başka bir deyişle kanal numarası ve enerji arasındaki ilişkiyi yani enerji kalibrasyonunu ve enerjileri birbirine yakın pikleri ayırt edebilme yeteneği olan enerji çözünürlüğünü bilmek gereklidir. Gama spektroskopisinde sintilatör kristali ve fotodetektörden oluşan sintilatör dedektörleri yaygın şekilde kullanılmaktadır. Şekil 1.3.'de üç farklı $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, $\text{NaI}(\text{Tl})$ ve HPGe dedektörleri için enerji spektrumlarının karşılaştırması verilmiştir. $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 'ın 662 keV enerjisindeki çözünürlüğü %2.8-4'iken $\text{NaI}(\text{Tl})$ için %7 olduğundan dolayı yaklaşık olarak iki katı daha iyi bir enerji çözünürlüğü performansına sahiptir [17]. Fakat yarı iletken dedektör olarak günümüzde kullanılan HPGe dedektörünün enerji çözünürlüğü 662 keV için %0.2 olan en iyi performansa bile yakın olabilen bir sintilasyon malzemesi keşfedilmemiştir.

1.1.3. Yeni Nesil Sintilatörler

Yeni nesil sintilatörler, gelişmiş özelliklere sahip ve farklı uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanan sintilasyon malzemeleridir. Bu sintilatörler, daha yüksek enerji çözünürlüğü, daha yüksek ışık çıkışı, daha iyi zaman çözünürlüğü, daha iyi radyasyon



Şekil 1.3. LaBr₃(Ce), NaI(Tl) ve HPGe dedektörleri için enerji spektrumlarının karşılaştırması [17]

dayanıklılığı gibi gelişmiş performans özelliklerine sahip olabilirler. Yeni nesil sintilatörler, geleneksel sintilasyon malzemelerinin sınırlamalarını aşmayı hedefleyen araştırmalar ve geliştirmeler sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu sintilatörlerin bazı örnekleri şunlardır;

Lütesyum-bazlı sintilatörler; Lütesyum oksit (Lu₂O₃), Lütesyum alüminyum perovskite (LuAlO₃) ve Lütesyum-itriyum alüminyum Perovskite (Lu_{0.9}Y_{0.1}AlO₃) gibi bileşikler, Lütesyum içeren sintilatör malzemeleri için yaygın olarak kullanılan seçenekleridir [18]. Ayrıca, Lütesyum Seryum (Ce) gibi katkı maddeleri ile birleştirildiği seryum katkılı lütesyum tabanlı sintilatörler de geliştirilmiştir. Geliştirilen bu sintilatörler, yüksek enerji çözünürlüğü, yüksek ışık çıkışı ve hızlı zaman çözünürlüğü gibi avantajlara sahiptir [18]. Bu sintilatörler, tıbbi görüntüleme, nükleer tıp ve yüksek enerji fiziği gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Seryum-katkılı sintilatörler; sintilasyon malzemeleri içerisinde Seryum (Ce) elementi ile katkılanmış olan malzemelerdir. Çok sınırlı sayıda aktivatörler arasından, Ce⁺³, d'den f'ye izin verilen interkonfigürasyonlu geçişleri ve 5d durumundaki 30 000 cm⁻¹ altındaki enerji aralığına sahip olmasından dolayı tartışmasız en iyisidir [19]. Seryum, enerji transfer sürecinde yüksek verimlilikle çalışan bir aktivatördür. Bu nedenle, seryum-doped sintilatörler yüksek miktarda ışık üretebilirler [19], bu da daha hassas tespit ve görüntüleme imkanı sağlar. Seryum-katkılı sintilatörler, geniş bir emisyon spektrumu sağlar. Bu, farklı enerjilerdeki radyasyonun tespit edilebilmesi için önemlidir. En önemli özellikleri arasında; (1) açığa çıkan lüminesanslar görünür-yakın UV bölgesindedir ve bu da fotodedektörün yüksek verimliliğindeki spektrumu ile iyi bir şekilde eşleşmesini sağ-

lar, (2) emisyonu izin verilen geçişleri içerdiğinden dolayı zaman çözünürlüğü hızlıdır, (3) lüminesans yoğunluğu ve bozulma süresi kararlı olup oda sıcaklığından etkilenmez, (4) yapısında uzun ömürlü radyoaktif izotopları içermez [20].

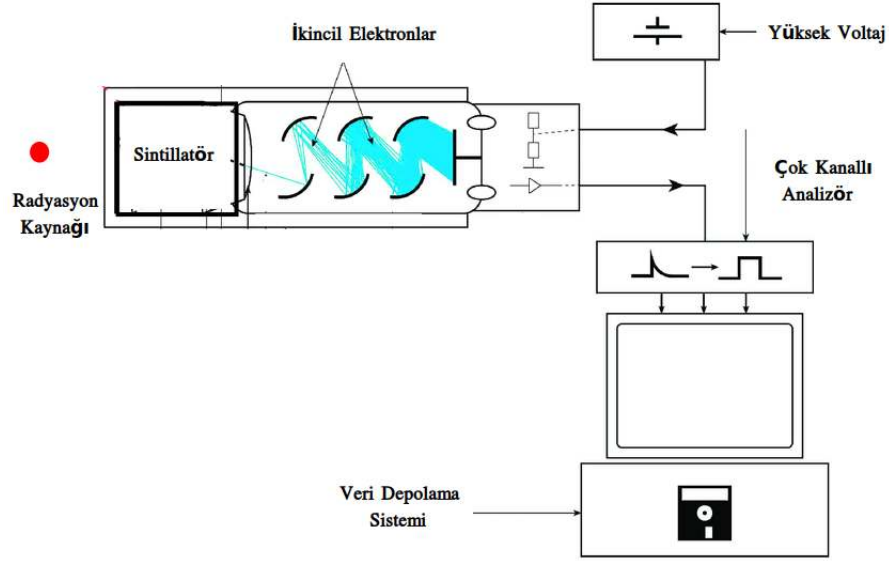
Organik-inorganik Hibrit Sintilatörler: Organik ve inorganik malzemelerin kombinasyonundan oluşan hibrit sintilatörler, organik sintilasyon malzemelerinin form verilebilirlik avantajlarını ve inorganik sintilasyon malzemelerinin yüksek performans özelliklerini bir araya getirebilir. Bu tür sintilatörler, organik bileşenlerin (örneğin, organik polimerler) ışık emisyonu özelliği ile inorganik bileşenlerin (örneğin, inorganik kristaller veya nanopartiküller) enerji transferi ve radyasyon tespit özelliklerini birleştirir. Bu, daha hassas tespit ve görüntüleme sağlar. Organik bileşenlerin geniş spektral tepki özelliği ile inorganik bileşenlerin yüksek enerji çözünürlüğü birleştirilerek, farklı enerjilerdeki radyasyonun tespit edilmesi sağlanır [21].

1.2. Sintilasyon Dedektörlerinin Elektroniği

Sintilasyon dedektörlerinin elektroniği, dedektörün içinde yayılan ışık sinyallerini algılamak, işlemek ve çıktı olarak elektriksel sinyallere dönüştürmek için kullanılan elektronik bileşenler ve devrelerin bir bütünüdür. Bu elektronik bileşenler, dedektörün hassasiyetini, çözünürlüğünü ve performansını belirlemekte önemli bir rol oynar. Bu yüzden sinyalin işleme süreci oldukça önemlidir. Sintilasyon dedektörlerinin elektroniği, temel olarak şu bileşenlerden oluşur; ışık algılayıcılar, elektron çoğaltıcılar, ön elektronik devreler, analog-dijital dönüştürücüler (ADC), veri işleme ve analiz devreleri ile veri depolama sistemleridir. Sintilasyon dedektör sistemlerinden alınan sinyallerin işlenmesi Şekil 1.4.'de gösterildiği gibidir.

1.2.1. PMTs (Foton Çoğaltıcı Tüpler)

Foton çoğaltıcı tüpler (PMTs), elektromanyetik spektrumun ultraviyole, görünür ve yakın kızılötesi bölgelerindeki ışığı son derece duyarlı bir şekilde algılayan optik bir giriş ve elektriksel bir çıkışa sahip olan vakumlu tüplerdir. Foton çoğaltıcı tüpleri, gelen zayıf ışık sinyallerini büyütürken daha güçlü elektrik sinyallerine dönüştürürler. Bu sayede, sintilasyon dedektörlerinin duyarlılığı artar ve daha düşük düzeyde ışık sinyalleri bile algılanabilir hale gelir. Sintilasyon dedektörlerinin önemli elektronik bileşenlerinden biri olan bu tüpler, gelen ışığın ürettiği akımı çoklu diyot aşamasından geçirerek 100 milyon

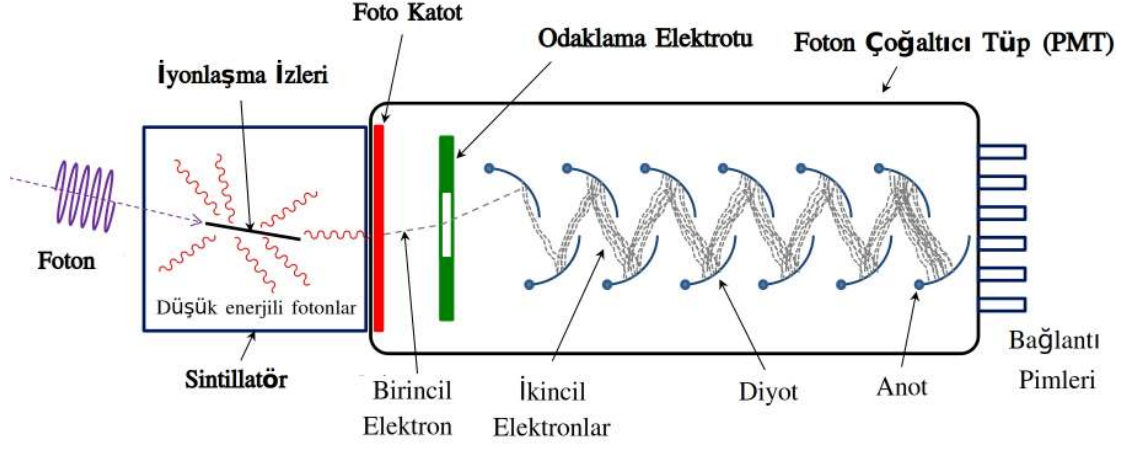


Şekil 1.4. Sintillasyon dedektör sisteminde sinyal işleme süreçlerinin gösterimi [22]

veya 10^8 'e kadar artırırılar [23]. Bu düşük akıda gelen ışıkdaki her bir fotonların bile tespit edilmesini sağlar [23].

Foton çoğaltıcı tüpünün iç yapısı, anot, katot ve çeşitli elektrotlardan oluşur. Öncelikle sintilasyon malzemesinden yayılan ışık parçacıkları (fotonlar), bu tüpün optik giriş kısmına düşer. Işık parçacıkları, fotokatoda çarptığında katottan fotoelektrik etkisiyle elektronlar koparır. Bu elektronlar, elektriksel alanlar arasında hızlandırılarak katotlardan anota doğru yönlendirilir. Elektronlar, fotoelektrik etkinin bir sonucu olarak yüzeyden fırlatılır. Bu elektronlar, odaklama elektrodu tarafından, elektronların ikincil emisyon süreciyle çarpıldığı elektron çoğaltıcıya doğru yönlendirilir. Bu sırada, elektronlar bir seri elektrotlar arasında çarpışarak çoğalma (çoğaltma) sürecini başlatır. Çoğaltılan elektronlar, anot bölgesine toplanır ve bu toplanma sonucunda anot çıkışında bir elektrik sinyali oluşturulur [23].

Foton çoğaltıcı tüpleri, yüksek hassasiyet ve hızlı tepki süreleri nedeniyle radyasyon tespiti ve nükleer fizik alanlarında yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, tıbbi görüntüleme ve bilimsel araştırmalarda da önemli bir rol oynarlar. Basit bir foton çoğaltıcı tüpünün temel parçaları detaylı olarak Şekil 1.5. verilmiştir.

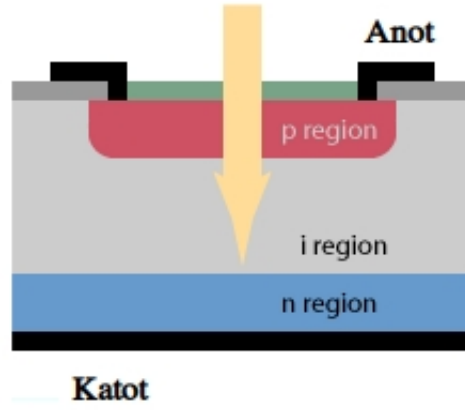


Şekil 1.5. PMT'lerin temel parçalarının gösterimi [23]. Işık akısını elektron akısına dönüştüren bir foto katot, elektron akısını odaklayan ve hızlandıran bir elektron-optik giriş sistemi, bir dizi ikincil emisyon elektrotundan (elektrotlar) oluşan bir elektron çarpanı ve çoklayıcıdan elektron akısını toplayan ve çıkış sinyalini sağlayan bir anot'dan oluşmaktadır

1.2.2. Fotosensörler

PMT'lere alternatif olarak günümüzde fotodiodlar ve çığ fotodiodlar kullanılmaktadır. Şekil 1.6.'de verilen fotodiotun tasarımı ve teknolojik yapısı güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren güneş pillerine benzer yapıdadır.

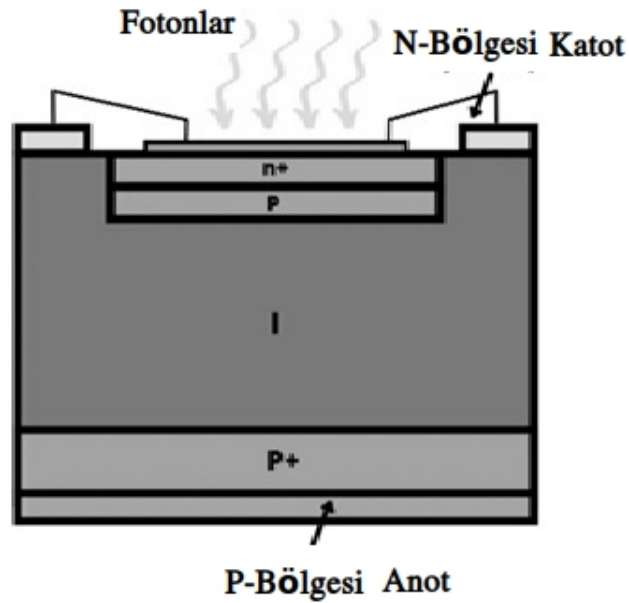
Fotodiyotlar: Işığı elektrik akımına dönüştüren yarıiletken cihazlara fotodiyotlar denir. Gelen fotonların yarı iletken malzeme içinde elektron-boşluk çiftlerini oluşturduğu ve bunun bir akıma (fotoakıma) neden olduğu fotoelektrik olay temeline dayanarak çalışırlar [24]. p-n bağlantılı olanlar genellikle n ve p katmanları arasında içsel (katkısız) bir katman içeren yarı iletken cihazlardır. İç katmanı olan cihazlar p-i-n veya PIN fotodiyotlar denir. İçsel veya katmanla doldurulmuş bölgede emilen ışık elektron-boşluk çiftini üretir ve bunlar fotoakıma katkıda bulunurlar [25]. Fotoakım, geniş bir optik güç aralığında emilen (veya gelen) ışık yoğunluğuyla tam olarak orantılı olabilir [25]. Şekil 1.6., p-i-n tipindeki fotodiyotun tasarımını şematik olarak göstermektedir. PIN tipi fotodiyotunda elektrik yükünün çoğunun üretildiği, n-katkılı ve p-katkılı bölge arasında içsel bir bölge vardır. Elektriksel yüklerden anot ve katot aracılığıyla fotoakım elde edilir. Anot, ışığın delikten içeri girebilmesi için bir halka şekline sahip olabilir. Tasarımda kullanılacak büyük bir halkayla geniş bir aktif alan elde edilebilir, ancak bu, kapasitansı artırmaya sebep olur, böylece algılama bant genişliğini azaltır ve karanlık akımı artırır [25]. Fotodiyotlar,



Şekil 1.6. Bir PIN (p-i-n) fotodiyotunun şematik gösterimi. Yeşil katman, yansımayı engelleyici malzemeden oluşan ince bir tabakadır. Sarı ok yönünde p'den n bölgesine doğru gelen foton veya ışıkların gelme yönünü göstermektedir [25]

optik iletişim, görüntüleme, algılama ve kontrol sistemleri gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [24].

APD (Avalanche Photodiode-Çığ Fotodiyodu): Yapısında çığ çoğalmasını içeren özel bir fotodiyot türüdür (Şekil 1.7.). İlk olarak 1952 yılında "Jun-ichi Nishizawa" adlı bir Japon mühendis tarafından tasarlanmıştır. APD, ışığı elektriğe dönüştürmek için fotoelektrik etkiyi kullanan çok duyarlı bir yarı iletken dedektörüdür [26]. PIN fotodi-



Şekil 1.7. Çığ Fotodiyot (APD) yapısının şematik gösterimi [26]

yotunun yapısı avalanche (çığ) fotodiyotunun yapısı ile benzerdir. İçsel bölgedeki dolum genişliği APD'de PIN photodiyotdakine kıyasla oldukça incedir. Burada p+ bölgesi anot,

n+ bölgesi ise katot gibi çalışır [26]. Ters bias (voltaj) modunda çalışır ve fotoakımları yükseltmek için iyonlaşma olgusunu kullanır [27]. Bu, ışık çarpması veya foton yoluyla oluşan yük taşıyıcılarının çığ gibi çoğalmasına izin verir. Bu çoğaltma etkisi (yada çığ eylemi), APD'lerin normal fotodiyotlara kıyasla daha yüksek verimle ve daha iyi hassasiyet elde etmelerini sağlayarak onları düşük ışık algılama ve yüksek hızlı uygulamalar için daha uygun hale getirir.

SiPM fotodiyotlar: Işık hassasiyetinin olduğu bölgedeki dalgaboyuna sahip olarak fotodiyotlara gelen fotonlar genelde silikon ile doldurulmuş olan p-n bölgesine giriş yaparlar. Böylelikle silikon malzemede iyonlaşmaya sebep olarak elektron-boşluk (e-h) çiftlerini oluştururlar. Teknolojik tasarım olarak fotodiyotların geliştirilmiş hali çığ fotodiyotlardır. Bu elektronik sensörde elektron-boşluk çiftleri ters voltajın (breakdown voltajının) uygulanması sonucunda p bölgesinden (katotdan) n bölgesine (anota) doğru iletilirler. Bu yol boyunca karşılaşılan silikon atomları yeniden iyonize edilerek e-h çiftlerinde çoğalmalara sebep olurlar. Bu süreçte etkili bir artış yani yüzlerce e-h çoğaltılmasıyla artık çığ tipi denilen avalanche fotodiyot üretilmiş olur. Günümüz teknolojisinde hala PMT'lerin performansına özellikle zaman ölçümündeki performansına fotodiyotların ulaşmadığını belirtmek gerekir. Yıllardır gelişimine devam eden fotosensörler günümüzde özellikle medikal uygulamalarda, moleküler görüntüleme cihazlarında özellikler PET'lerde kullanılmaktadırlar. Ayrıca PMT'lerin kullanımının mümkün olmadığı durumlarda, özellikle yeni görüntüleme tekniklerinden birisi olan hibrit görüntüleme tekiğine sahip PET-MR'da, en büyük avantajı bu tarz fotodiyotlar sağlamaktadır. PET-MR pozitron emisyon tomografi ile nükleer manyetik rezonans görüntülemenin iç içe geçtiği PET-MR konseptinde fotosensörler oldukça cazip bir kullanım alanına sahiplerdir. Bu tarz fotosensörler manyetik alandan PMT'lerin elektroniğinin etkilendiği şekilde bir etkiye sahip olmadıklarından yani manyetik alanda kullanılır özelliklerinden dolayı bu alanda kullanımları mevcuttur.

1.3. Dedektör Kalibrasyonları

Enerji Kalibrasyonu: Enerji kalibrasyonu, dedektör sistemlerinde algılanan elektronik sinyallere karşılık gelen fotonların enerjileri arasındaki ilişkidir. Gama ışınları dedektör malzemesiyle etkileşime girdiğinde enerji birikimi oluşur ve elektronik sinyaller üretilir. Enerji kalibrasyonu işlemi, bu elektronik sinyallerin belirli gama ışını enerjileriyle

doğru bir şekilde ilişkilendirilmesini sağlar. Böylelikle araştırmacılar gama spektrumlarını doğru bir şekilde analiz ederek radyasyon kaynaklarını tanımlayabilirler. Enerji kalibrasyonu için referans pikleri sağlamak amacıyla öncelikle belirgin gama enerjileri olan ve iyi bilinen standart gama radyasyonu kaynağı kullanılır. Genellikle kalibrasyon kaynağı olarak kobalt-60 (Co-60) ve sezyum-137 (Cs-137) kaynakları tercih edilir. Kaynağa mağruz kalan gama-ışını dedektörü ile üretilen elektronik sinyaller kaydedilir. Elde edilen veriler analiz edilerek kalibrasyon kaynağının gama enerjilerine karşılık gelen pikler tanımlanır. Referans gama ışını piklerinin enerjilerine karşılık gelen kanal numaraları ile ilişkilendirilen kalibrasyon eğrisi oluşturulur. Bu eğri, gama ışını enerjisi ile elektronik sinyal arasındaki ilişkiyi temsil eder. Kalibrasyon eğrisinden elde edilen bazı parametreler bilinmeyen gama radyasyonlarının elektronik sinyallerini enerjiye dönüştürmek için kullanılır. Denklem 1.1 verilen C kanal numarası, p_0 ve p_1 doğrusal fit fonksiyonunun fit edilmesinden sonra hesaplanan uyum parametreleridir. Bu kalibrasyon, radyoaktif kaynaklardan veya diğer süreçlerden yayılan gama ışınlarının enerjilerinin doğru bir şekilde belirlenmesi için oldukça önemlidir.

$$E = p_0 + p_1 C \quad (1.1)$$

Enerji Çözünürlüğü Kalibrasyonu: Gama spektrometresinin bir diğer önemli parametresi de enerji çözünürlüğüdür ve bu parametre dedektör malzemesinin (sintilasyon malzemesinin) özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu parametre dedektörün farklı enerjilere sahip gama fotonlarının arasındaki küçük enerji farklarını ayırt etme ve ölçme yeteneği olarak tanımlanır. Bu kalibrasyon, dedektörün gama spektrumundaki pikleri çözme ve ayırt etme kabiliyetini karakterize eden önemli bir parametredir. Enerji çözünürlüğü (R) genellikle gama enerji pikinin tepe noktasının yarısındaki tam genişlik (FWHM)'in yüzdesi olarak aşağıda verildiği gibi ifade edilir.

$$R = \frac{\text{FWHM}}{E_0} \times 100 \quad (1.2)$$

Denklem 1.2'de verilen E_0 ilgili pikin özgül enerjisidir. FWHM, enerji biriminde verirken, enerji çözünürlüğü yüzde olarak ifade edilir. FWHM ne kadar küçük olursa, enerji

Çözünürlüğü o kadar iyi demektir. Enerji özünürlüğü Denklem 1.3’de verildiğı gibidir.

$$R = aE^b \quad (1.3)$$

Burada verilen a ve b değeri fit parametreleridir. Bu şekilde enerji çözünürlüğü fonksiyonu elde edilmiş olunur.

Dedektörün Verim Kalibrasyonu: Bir gama spektrometresi için son kalibrasyon prosedürü, gama pikinin tepe noktası altındaki sayımların sayısı ile dedektörün mağruz kaldığı radyoaktif kaynağın aktivitesi arasındaki ilişki anlamına gelen dedektör verim kalibrasyonudur. Dedektör sistemlerinin enerji kalibrasyonları kadar dedektör verimliliği kalibrasyonlarının da yapılması gereklidir. Dedektör verimi, gama ışınının dedektörle etkileşime olasılığının bir ölçüsüdür. Gama spektroskopisinde dedektörün verim kalibrasyonu, dedektörünün farklı enerjilere sahip gama fotonlarını ne kadar etkin bir şekilde tespit ettiğinin belirlenmesidir. Dedektör verimi, dedektöre gelen gama ışınlarına dedektörün ne kadar iyi tepki verdiğini ölçen bir değerdir. Bu gama ışınlarının enerjilerine ve dedektör sisteminin özelliklerine bağlı olarak değışiklik gösterir. Dedektörün verimi enerjiye bağlı olarak değışebileceğinden, gama ışını spektrumu boyunca farklı enerji noktalarında dedektörün yanıtını kalibre etmek deneysel ölçümlerde oldukça önemlidir. Bilinen ve iyi tanımlanmış gama ışını enerjilerine sahip standart gama ışını kaynakları, kalibrasyon için referans gama yayılımlarını sağlamak amacıyla kullanılır. Burada kullanılan kaynaklar, ilgi duyulan enerji spektrumu boyunca geniş bir enerji aralığına sahip olmalıdır. Öncelikle dedektör kalibrasyon için kullanılacak gama kaynaklarına maruz bırakılır ve her kaynak için elde edilen farklı enerjilerdeki spektrumlar kaydedilir. E enerjisindeki bir dedektörün deneysel elde edilen verimi aşağıda verilen denklemle hesaplanır:

$$\varepsilon_{\text{exp}} = \frac{N}{t.P.A} \quad (1.4)$$

burada N, belirtilen enerji için fotopik sayım sayısı, t veri toplama süresi, P ilgili her radyonüklid için foton yayınlanma olasılığı, A radyonüklidin mevcut aktivitesidir. Deneysel alışmalar sırasında tüm gama enerjileri için ayrı bir radyoaktif kaynağın bulunmaması ve sınırlı sayıda tek enerjili gama kaynaklarının olmasından dolayı gama-ışını dedektör sistemlerinin verimlilik tesbiti neredeyse imkansızdır [28, 29]. Bu imkansızlığı ortadan

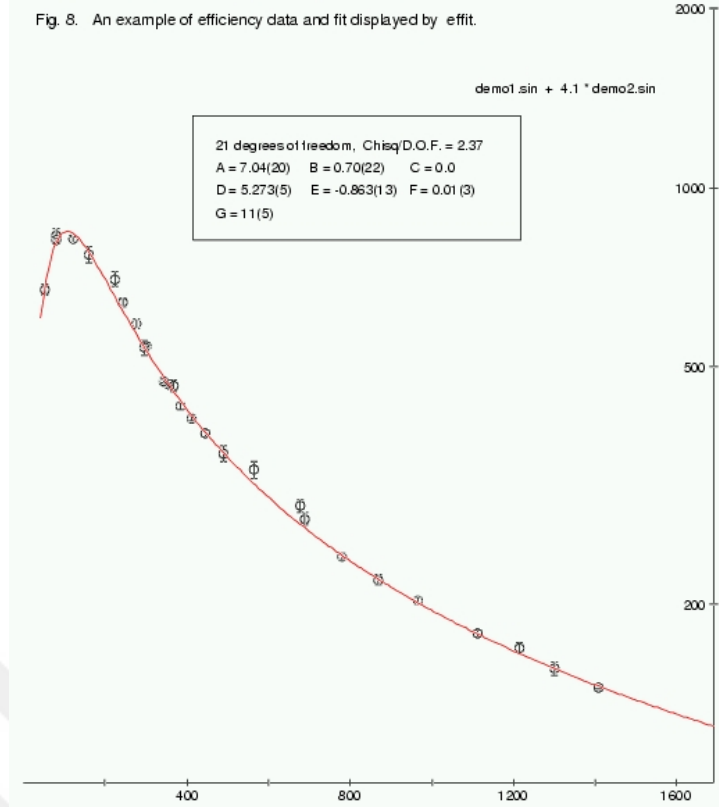
kaldırmak için literatürde bazı yaklaşımlar geliştirilerek çözümler bulunmuştur. Dedektör verimlilik eğrileri, deneysel, ampirik, analitik ve Monte Carlo (M.C) gibi dört farklı yolla tespit edilebilir. Dedektör veriminde, az sayıda ve tek enerjili gama yayınlayan radyoizotopların olmasından dolayı her bir enerji değeri için gama sayım verimliliğini belirlemek imkansızlaşır. Ayrıca bu standart radyoaktif kaynaklar oldukça pahalı ve uzun süren laboratuvar çalışmaları gerektirir. Deneysel olarak tanımlanamayan ara enerjideki gama-ışınlarının veriminin tanımlanması iki yolla mümkündür; ya deneysel olarak elde edilen sınırlı sayıdaki gama sayım verimliliği fit edilerek elde edilen analitik denklem kullanılır, ya da gama ışınının madde ile etkileşim mekanizmaları temelinde oluşturulan bilgisayar algoritmaları kullanılarak tüm gama enerjileri için dedektörün verimi elde edilir. Dedektörün verim eğrisini fit etmek için Denklem 1.5’de verilen fonksiyonun kullanılması gerekmektedir [29–32]. Dedektör verimliliği için verilen bu analitik denklem, x ve y’ye bağlı bir fit fonksiyonunun kullanılmasını içermektedir:

$$\varepsilon = \exp \left[\left(t_0 + t_1 x + t_2 x^2 \right)^{-t_3} + \left(t_4 + t_5 y + t_6 y^2 \right)^{-t_3} \right]^{-\left(\frac{1}{t_3}\right)} \quad (1.5)$$

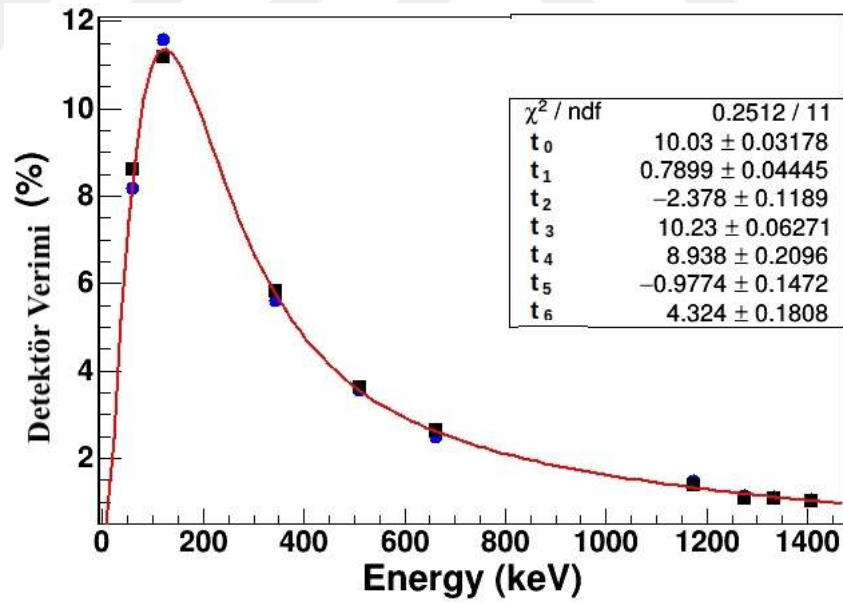
Burada,

$$x = \log \left(\frac{E_\gamma}{E_1} \right) \text{ and } y = \log \left(\frac{E_\gamma}{E_2} \right) \quad (1.6)$$

Denklem 1.6, gama enerjisini E_γ , E_1 düşük enerji sabiti (100 keV) ve E_2 yüksek enerji sabiti (1000 keV) olarak ifade eder. Yüksek enerjide toplam gama sayım verisi t_4 , t_5 ve t_6 ile temsil edilirken; düşük enerjide Denklem 1.5’deki t_0 , t_1 ve t_2 parametreleri tarafından belirlenir. Düşük ve yüksek enerji verimliliği bölgeleri arasındaki geçiş bölgesi tarafından temsil edilen t_2 ve t_3 göz ardı edilebilir. Yüksek t_3 parametresi, iki bölge arasındaki dönüşün keskin olduğunu, düşük olan ise daha yavaş bir dönüş olacağını gösterir [30]. Şekil 1.8.a’da RADware programı ile dedektör verimliliği eğrisinin fit edilmesi sonrası elde edilen parametrelerin gösterildiği bir grafik verilmiştir. Şekil 1.8.b’de ise bu tez çalışmasında dedektörün verim eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan ROOT analiz programıyla fit edilen örnek bir grafik parametreleriyle beraber verilmiştir.



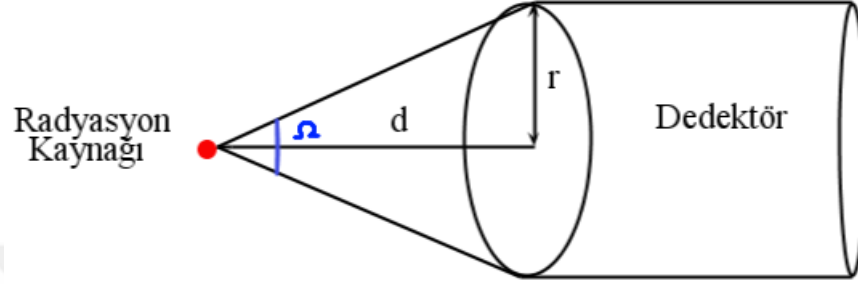
(a) RADware programı ile dedektör verimliliği eğrisinin fit edilmesi sonrası elde edilen parametrelerin gösterildiği grafik [33].



(b) Bu tez çalışmasında dedektör verim eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan ROOT analiz programında fit edilmiş bir örnek grafiğin parametreleriyle beraber verilmesi.

Şekil 1.8. Dedektör veriminde kullanılan fonksiyonun fit edilmiş grafik örnekleri (a) RADware programında dedektörün verim eğrisinin fit edilerek parametreleriyle beraber gösterimi. (b) Bu tez çalışmasında kullanılan ROOT analiz programı ile dedektörün verim datalarının fit edilerek parametreleriyle beraber gösterimi

Dedektörün gama-fotonlarını algılama verimliliğinde sintilasyon malzemesinin özelliklerinin yanında; etkileşim olasılığını artıracağından dolayı dedektör hacmindeki artış, dedektörün boyutları ve şeklide önemli birer etkindir [34]. Ayrıca dedektör-kaynak arası mesafenin değiştirilmesi de dedektör veriminde etkili olacaktır [34]. Bu etkileri geometrik etki olarak söyleyebiliriz ve Şekil 1.9.'de dedektörün veriminde geometrinin etkisinin görsel olarak gösterimi verilmiştir. Denklem 1.7 noktasal kaynağın dedektörü gör-



Şekil 1.9. Dedektör veriminde katı açının gösterimi. Noktasal kaynağın dedektörü gördüğü katı açı Ω 'dır

düğü katı açının (Ω) dedektör-radyoaktif kaynak arasındaki mesafenin (d) ve dedektörün yarıçapına (r) bağlı olarak nasıl değiştiğini vermektedir [34].

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}}\right) \quad (1.7)$$

Dedektör verimi, mutlak ve gerçek verim olmak üzere aşağıda verilen iki denklemle tanımlanabilir;

$$\text{Gerçek verim} = \frac{\text{Dedekte edilen fotonların sayısı}}{\text{Dedektöre gelen fotonların sayısı}} \quad (1.8)$$

$$\text{Mutlak verim} = \frac{\text{Dedekte edilen fotonların sayısı}}{\text{Kaynaktan yayınlanan fotonların sayısı}} \quad (1.9)$$

Mutlak verim; kaynaktan yayınlanan fotonlardan kaç tanesinin dedektör tarafından tespit edilmesiyle ilgili olduğundan dolayı kaynağın dedektörü gördüğü yüzey alanına yani katı açıya bağlı olarak değişecektir. Mutlak verim katı açıdan etkilenirken, gerçek verim ise katı açıdan etkilenmez [34]. İki farklı verim arasındaki ilişki Denklem 1.10'da verildiği

gibidir.

$$\epsilon_{\text{gerçek}} = \epsilon_{\text{mutlak}}(4\pi / \Omega) \quad (1.10)$$

1.4. Monte Carlo tekniği ve GATE simülasyon programı

Simülasyon programları, deney ve teori arasında bir köprü oluşturduğu için hemen hemen tüm bilim dallarında büyük önem kazanmaktadır. Simülasyonların önemli bir avantajı, deneysel olarak gerçekleştirilmesi zor olan farazi senaryolar da dahil olmak üzere herhangi bir soruya cevap aranabilmesini sağlayabilmektedir [35]. Bununla birlikte bilgisayar simülasyonları, sonrasında deneysel doğrulamayı sağlayabilen yeni hipotezler veya tahminler üretilmesi durumunda değerli olan teorik bir yaklaşımdır. Bilgisayarda rastlantısal deneyler tasarlamak istenildiğinde Monte Carlo tekniklerinin uygulanması birçok araştırmanın temel bileşeni olmaktadır [36].

Monte Carlo yaklaşımları, matematiksel bir çözüm mümkün olmadığında veya modeller önemli ölçüde karmaşık hale geldiğinde özellikle yararlıdır. Monte Carlo yöntemi, problemleri çözmek için rastgele sayılar ve olasılık kullanan sayısal bir tekniktir [37]. Monte Carlo yöntemi, rastgele ard arda gelen sayıları ve istatistiksel teknikleri kullanarak bir deneyi veya olayı sayısal olarak taklit etmektir. Benzetişim olarak da adlandırılan bu yöntemle bir deney veya olay bilgisayar ortamında idealize edilir ve istenilen değerler hesaplanır. Monte Carlo yöntemi nükleer mühendislikte radyasyon taşınması, medikal fizik alanında dozimetri, risk analizi, ekonomi gibi birçok alanda rutin olarak kullanılmaktadır. Tüm uygulamalarda, çözümün fiziksel süreci doğrudan ana bileşenlere dayalı olarak simüle edilmektedir. Özellikle son yıllarda uygulama alanlarında sağladığı çok daha doğru hesaplama sonuçları ile daha fazla popüler olmuştur. Monte Carlo, radyasyonun madde ile etkileşim mekanizmalarını benzetim yoluyla taklit ederek bazı önemli kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesini sağlar. Parçacıkların ve radyasyonun taşınmasını içeren tüm nükleer fizik problemlerinde kullanılmak üzere BEAM, EGSnrc, PENLOPE, ETRAN / ITS / MCNP ve Geant4 gibi Monte Carlo kodları mevcuttur [37,38].

Popüler Monte Carlo kodları arasında Geant4, nükleer fizik alanında günümüzde kullanılan en iyi kodlardan biridir [38, 39]. Çünkü pratik olarak tüm parçacık türlerinin taşınmasını analiz etmek için gerekli fiziksel süreçleri içerir. Düşük ve yüksek enerji fi-

ziği, reaktör fiziği, uzay bilimi, dozimetri, radyasyondan korunma ve medikal fizik için donanım olarak temel ve uygulamalı nükleer fiziğin birçok problemde kullanılmaktadır. Geant4, parçacıkların maddeden geçişini simüle etmek için kullanılabilen, uluslararası bir işbirliği ile geliştirilmiş ve herkese açık bir kaynaktır [39]. C ++ dilinde yazılmıştır ve tüm simülasyon sürecini uygulamak için gerekli olan yazılım bileşenlerini sağlar: geometri tanımı, malzemeler, parçacıklar, fiziksel süreçler, birincil parçacıkların kaynakları, olay verilerinin oluşturulması, geometri ve parçacık yörüngelerinin görselleştirilmesi. Kod, parçacıkların malzemelerle etkileşimlerini ele almak için bir dizi fiziksel model içerir. Kullanıcı, her parçacık tipi için simülasyonda hangi fiziksel işlemin etkinleştirilmesi gerektiğini belirtmelidir.

GATE, Geant4 tabanlı çalışan bir arayüz programıdır. GATE, "Geant4 Application for Tomographic Emission" kelimelerinin baş harflerinden oluşan kısaltmadır. GATE, uluslararası OpenGATE işbirliği tarafından geliştirilen ve tıbbi görüntüleme ve radyoterapide sayısal simülasyonlar için geliştirilmiş bir açık kaynaklı yazılımdır [40]. GATE, PET, SPECT, CT, optik görüntüleme, radyoterapi deneyleri, tıbbi görüntüleme cihazları tasarlama gibi nükleer tıp alanında uygulanabilen bir simülasyon kodudur. Geant4 kütüphanesini kullanmaktadır. Geant4 paketlerini çalıştırabilen ve çok fazla C++ dilini bilmeyi gerektirmeyen bir arayüz programıdır. Basit veya son derece karmaşık deneysel ayarları yapılandırmak için öğrenmesi kolay bir makro mekanizması kullanan GATE, yeni tıbbi görüntüleme cihazlarının tasarımında, kalite kontrol protokollerinin optimizasyonunda, görüntünün yeniden yapılandırma algoritmalarında, düzeltme tekniklerinin geliştirilmesi ve değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca radyasyon tedavisi, brakiterapi veya başka herhangi bir uygulamada doz hesaplaması için kullanılabilir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma, nükleer fizikte yaygın olarak kullanılan NaI(Tl) sintilasyon dedektör sisteminin dedektör veriminin deneysel olarak ve GATE simülasyon programı kullanılarak hesaplanmasını içermektedir. Gama ışını verimi, 59 keV'den 1408 keV'e kadar farklı enerjilerde izotropik olarak foton yayımlayan nokta ve silindir şeklindeki radyoaktif kaynaklar için elde edilmiştir. Ankara Üniversitesi'nin bünyesinde bulunan 2" çapında ve 2" uzunluğundaki NaI(Tl) dedektörü kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar ile GATE simülasyonu ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Simülasyonla elde edilen sonuçların deneysel veriler kullanılarak hesaplanan verim değerleri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Elde edilen bu uyum neticesinde simulasyonda LaBr₃(Ce), SrI₂ ve GAGG(Ce) gibi yeni nesil sintilasyon sistemleri için modelleme yapılarak verim değerleri bulunmuştur. Yeni nesil sintilasyon dedektör sistemleri için elde edilen verim değerleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Dedektör verimini elde edebilmek için kullanılan deneysel yöntem ve simülasyon kodu bu bölümde tartışılmıştır.

2.1. Deneysel Yöntem

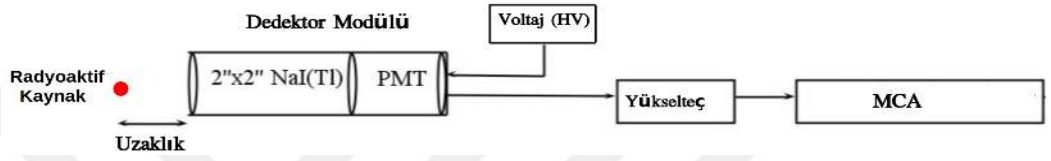
NaI(Tl) sintilatör dedektörünün veriminin elde edilmesi için yapılan deneysel ölçümler Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü'nde bulunan Nükleer Fizik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçümlerde 662 keV'de %7 nominal enerji çözünürlüğüne sahip 2"x2" ORTEC marka NaI(Tl) dedektörü kullanılmıştır. Bu dedektör, standart Alüminyum kutu ile kapsüllenmiştir. Dedektör, ScintiPack Model 296 fotoçoğaltıcı tüpe sahiptir. Scintipack fotoçoğaltıcı taban (ScintiPack Photomultiplier Base (Model 296)) ile sintilasyon dedektörleri için gereken her şey kompakt bir paket halinde bulunmaktadır (Şekil 2.1.). Bu paket dahili, ayarlanabilir yüksek gerilim kaynağı, ön yükselteci



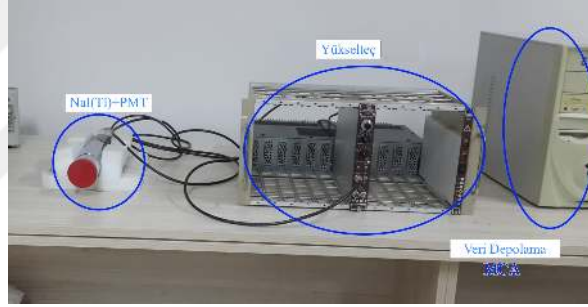
Şekil 2.1. Ön yükselteç ve güç kaynağına sahip Ortec marka ScintiPack Model 296 PMT [41]

ve aktif ön gerilim ağı içermektedir. Böylece yüksek gerilim ve ön yükselteç için gerekli olan kablolar ortadan kalkacaktır, yüksek sayım hızlarında piklerdeki kaymalar en aza indirilmiş olacaktır.

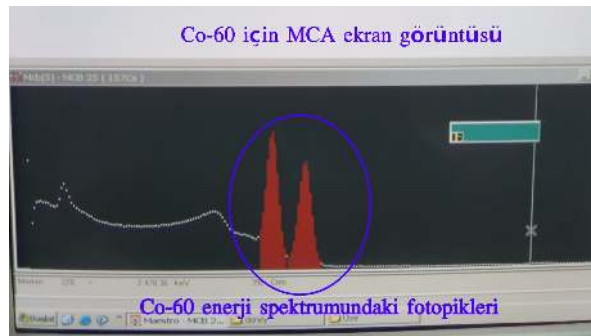
Kompakt haldeki sintilasyon dedektörü, ORTEC marka 572A model yükseltece bağlanmıştır. Yükselteç de DigiBASE (Ortec) çok kanallı analizöre (MCA) bağlanmıştır. MAESTRO 32 çok kanallı analizör yazılımının kullanılmasıyla birlikte γ -ışın spektrumu elde edilmiştir. Deneyde kullanılan NaI(Tl) gama ışını spektrometresinin şematik gösterimi Şekil 2.2.a'de ve Şekil 2.2.b'de verilmiştir. Şekil 2.2.c'de ise Co-60 radyoaktif kaynağı için MCA'de elde edilen enerji spektrumunun görseli verilmiştir.



(a) Dedektör verimi için kullanılan deneysel ölçüm sisteminin şematik gösterimi.



(b) 2"x2" boyutlarında silindirik NaI(Tl) dedektörü, PMT ve elektronik bölümleri ile veri toplama sisteminin resmi.



(c) Çok kanallı analizör (MCA) ile Co-60 kaynağı için elde edilen enerji spektrumu ve iki farklı enerjide olan fotopiklerinin gösterimi.

Şekil 2.2. Deneysel ölçümün şematik gösterimi. (a) Dedektör verimi için kullanılan deneysel ölçüm sisteminin şematik gösterimi, (b) deneysel setup ve (c) Co-60 radyoaktif kaynağı için elde edilen enerji spektrumun ekran görüntüsü

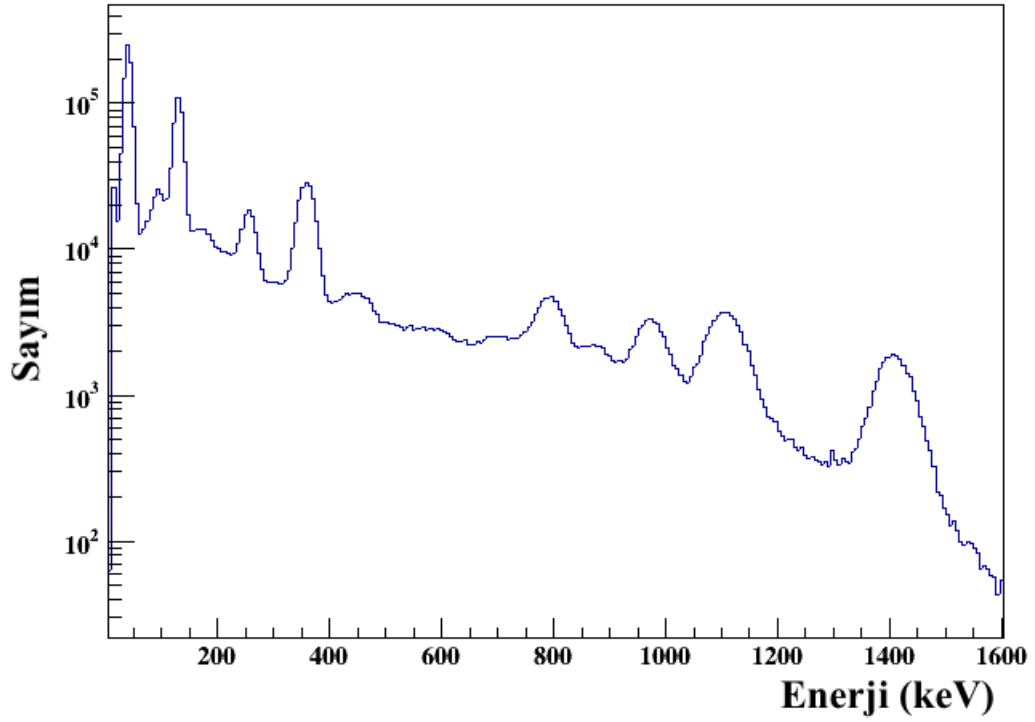
Detektör veriminin elde edilebilmesi için NaI(Tl) sintilasyon detektörü, 59 keV ile 1408 keV arasında farklı enerjilerde izotropik olarak foton yayımlayan radyoaktif kaynaklarla ışınlanmıştır. Bu kaynaklar detektörden seçilen belirli uzaklıklara yerleştirilerek ölçüm alınmıştır. Deneyisel ölçümlerde kullanılan bu radyoaktif kaynaklardan ^{137}Cs , ^{60}Co ve ^{152}Eu radyoaktif kaynakları nokta kaynak, ^{241}Am , ^{22}Na kaynakları ise silindirik hacime sahip radyoaktif kaynaklardır. Ölçümlerde kullanılan ve simülasyonda tanımlanan radyoaktif kaynakların genel özellikleri Çizelge 2.1.'de verilmiştir. Çizelgede verilen

Çizelge 2.1. Deneyisel ölçümlerde kullanılan ve simulasyonda tanımlanan kaynakların özellikleri.

Radyoaktif Kaynak	Foton Enerjisi (keV)	Aktivite (kBq)	Yarı-Ömür (Yıl)	Foton Yayınlanma Olasılığı (%)
^{241}Am	59,54	367,87	432,2	35,92
^{22}Na	511	29,76	2.60	178
	1274.5			99.94
^{137}Cs	661,66	35,10	30,07	85,1
^{60}Co	1173.24	38.49	5.27	99.87
	1332.51			99.97
^{152}Eu	121,78	33,08	13,52	28,58
	344,28			26,50
	1408,01			21,01

radyoaktif kaynakların aktivite değerleri, deneyin yapıldığı tarihteki aktivite değerleridir. ^{152}Eu radyoaktif kaynağı için çizelgede verilen foton enerji değerleri ölçümlerde ve simülasyonda kullanılan enerji değerleridir. Kaynaktan yayınlanan gama-ışınının enerjileri bazen kolayca ayırt edilemeyecek kadar birbirine yakındır ve enerji pikleri üst üste biner (Şekil 2.3.). Bu nedenle, burada sadece gözlenebilir pikler dikkate alınmıştır.

Gama-ışın spektrometresi için kullanılan sintilasyon dedektörlerinin kalibrasyon prosedürü genellikle enerji, enerji çözünürlüğü ve verim kalibrasyonlarından oluşur. Bu prosedür ilgili radyoizotopların etkinliğinin doğru bir şekilde tanımlanmasını ve belirlenmesini sağladığı için önemlidir [8, 13, 42]. Bununla birlikte gerekirse, kalibrasyon süresi, ardışık, geometrik ve kendi kendine soğurma etkisi kalibrasyonları da dikkate alınmalıdır. Bu tez çalışmasında öncelikle enerji ve enerji çözünürlüğü kalibrasyonları daha sonra verim kalibrasyonu incelenmiştir. Bu incelemeyi gerçekleştirmek için yapılan deneylerde,



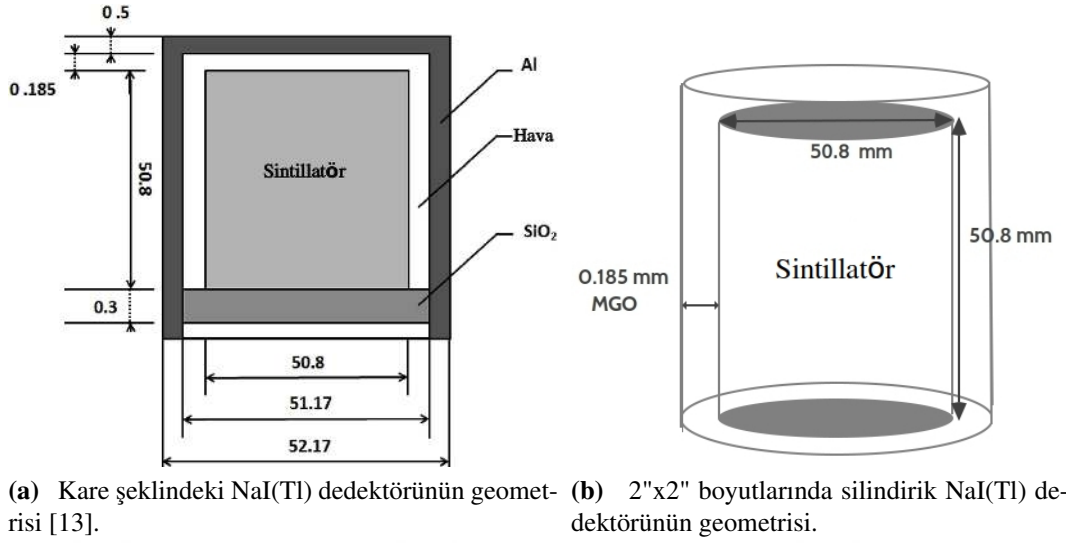
Şekil 2.3. ^{152}Eu radyoaktif kaynağının gama-ışını enerji spektrumu. Kaynak NaI(Tl) dedektörünün önüne yerleştirilerek elde edilen enerjiye karşı sayım sayısını gösteren histogram

elde edilen pik alanlarının istatistiksel hatalarını en aza indirmek için ölçüm süreleri 15 dakika olarak alınmıştır.

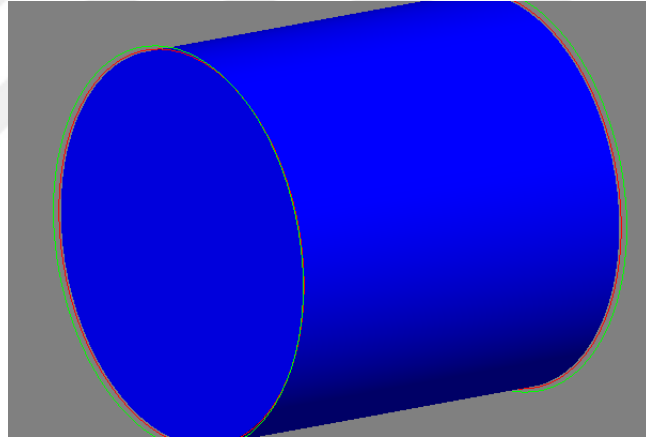
2.2. GATE simülasyon modellemesi

Dedektör geometrisi Şekil 2.4.'de verilen malzeme ve kalınlıklara uygun olarak GATE simülasyonunda tanımlanmıştır. Şekil 2.4.a'de verilen değerler literatürden alınan kare şeklindeki NaI(Tl) dedektörün bileşenlerinin kalınlığı ve malzemelerin geometrisidir. LaBr₃ dedektörü modellenirken, 0,185 mm kalınlığındaki MGO reflektörü hava olarak alınmıştır [13]. Literatürdeki bu değerler kullanılarak ve deneyde kullanılan NaI(Tl) dedektörünün kristal boyutları dikkate alınarak Şekil 2.4.b'de verilen dedektör modellemesi programda tanımlanmıştır. 2"x2" silindirik NaI(Tl) kristali MgO reflektörü ile sarılmış durumdadır. 2"x2" silindirik NaI(Tl) dedektör geometrisi 0,5 mm kalınlığa sahip Alüminyum kapsül içerisinde bulunacak şekilde simülasyonda modellenmiştir. Simulasyonda LaBr₃ dedektörü modellenirken MgO reflektörü yerine hava alınmıştır. Silindirik 2"x2"

boyutlarındaki NaI(Tl) dedektörünün Geant4’da gösterimi Şekil 2.5.’de verildiği gibidir.



Şekil 2.4. Dedektör geometrileri. (a) Kare şeklindeki NaI(Tl) dedektörünün her bir parçasının kalınlığı ve malzemelerin geometrisi. 0,185 mm kalınlığındaki MGO reflektörü, LaBr₃ dedektörü modellenirken hava olarak alınmıştır [13]. (b) 2"x2" boyutlarında silindirik NaI(Tl) dedektörünün Geant4’de geometrisine uygun şekilde modellenmiş biçimi



Şekil 2.5. GATE simülasyonunda modellenen NaI(Tl) dedektörünün gösterimi. Mavi renkle verilen silindirik yapı NaI(Tl) sintilasyon malzemesi iken, 0,185 mm kalınlığındaki MGO reflektör kırmızı renkle gösterilmiştir. Yeşil renkle verilen hacimse 0,5 mm kalınlığındaki Alüminyum malzemeyi temsil etmektedir.

Gate simülasyonunda dedektör modellemesi için makro dosyasına yazılan kod Şekil 2.6.’de verildiği gibidir.

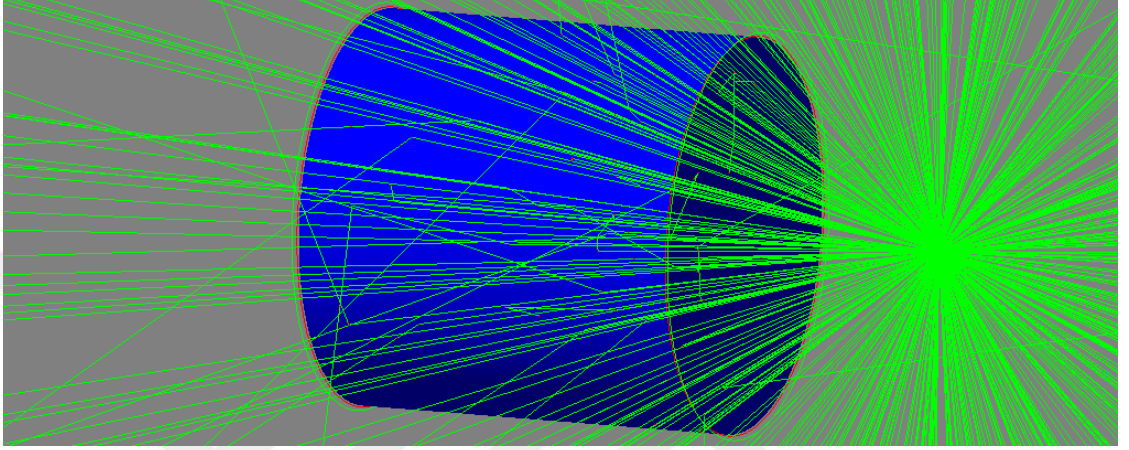
Gate simülasyonunda dedektör modellemesi yapıldıktan sonra, deneye uygun olarak tanımlanması gereken diğer önemli kısımlar da simülasyona eklenmiştir. Bu kısımlar; sistem tanımlaması, radyoaktif kaynakların modellenmesi, fizik listesinin belirtilmesi,



```
/gate/world/daughters/name scanner
/gate/world/daughters/insert cylinder
/gate/scanner/geometry/setRmax 26.085 mm
/gate/scanner/geometry/setRmin 0 mm
/gate/scanner/geometry/setHeight 52.17 mm
/gate/scanner/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/scanner/setMaterial Aluminium
/gate/scanner/vis/setColor green
/gate/scanner/vis/forceWireframe
/gate/scanner/vis/setVisible 1
/gate/scanner/daughters/name level1
/gate/scanner/daughters/insert cylinder
/gate/level1/geometry/setRmax 25.585 mm
/gate/level1/geometry/setRmin 0 cm
/gate/level1/geometry/setHeight 51.17 mm
/gate/level1/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/level1/setMaterial MgO
/gate/level1/vis/setColor red
/gate/level1/vis/forceWireframe
/gate/level1/vis/setVisible 1
/gate/level1/daughters/name level2
/gate/level1/daughters/insert cylinder
/gate/level2/geometry/setRmax 25.4 mm
/gate/level2/geometry/setRmin 0 cm
/gate/level2/geometry/setHeight 50.8 mm
/gate/level2/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/level2/setMaterial NaI
/gate/level2/vis/setColor blue
/gate/level2/vis/forceSolid
/gate/level2/vis/setVisible 1
```

Şekil 2.6. Makro dosyasında tanımlanan dedektör modellemesinin geometri kısmı için yazılan kod

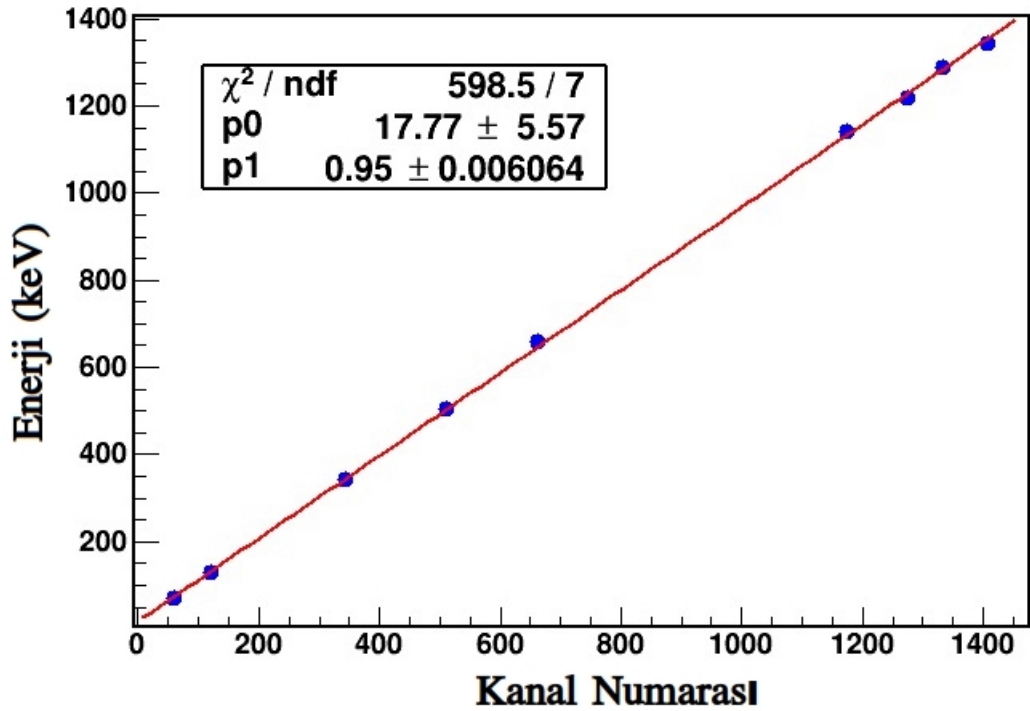
hassas dedektör konsepti, dijitaliser (radyasyonla etkileşime girdikten sonra dedektör tarafından ölçülen sinyaller) ve detektörde ölçülen sinyallerin kaydedilmesi için gerekli olan çıktıların tanımlanması olarak ifade edilebilir. Bu kısımların modellenmesi gerçekleştirildikten sonra simülasyonda etkileşime giren gamalar hakkında bilgiler elde edilebilir hale gelmiştir. Şekil 2.7. noktasal kaynaktan gelen gamalar ve etkileşime giren gamalar yeşil renkle gösterilmiştir. Şekildeki küçük kırmızı renkler elektronları temsil etmektedir.



Şekil 2.7. GATE simülasyonunda etkileşime giren gamaların gösterimi. Yeşil renkle gösterilen gama-ışınlarını temsil ederken dedektör üzerindeki küçük kırmızı noktalar ise elektronları temsil etmektedir

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

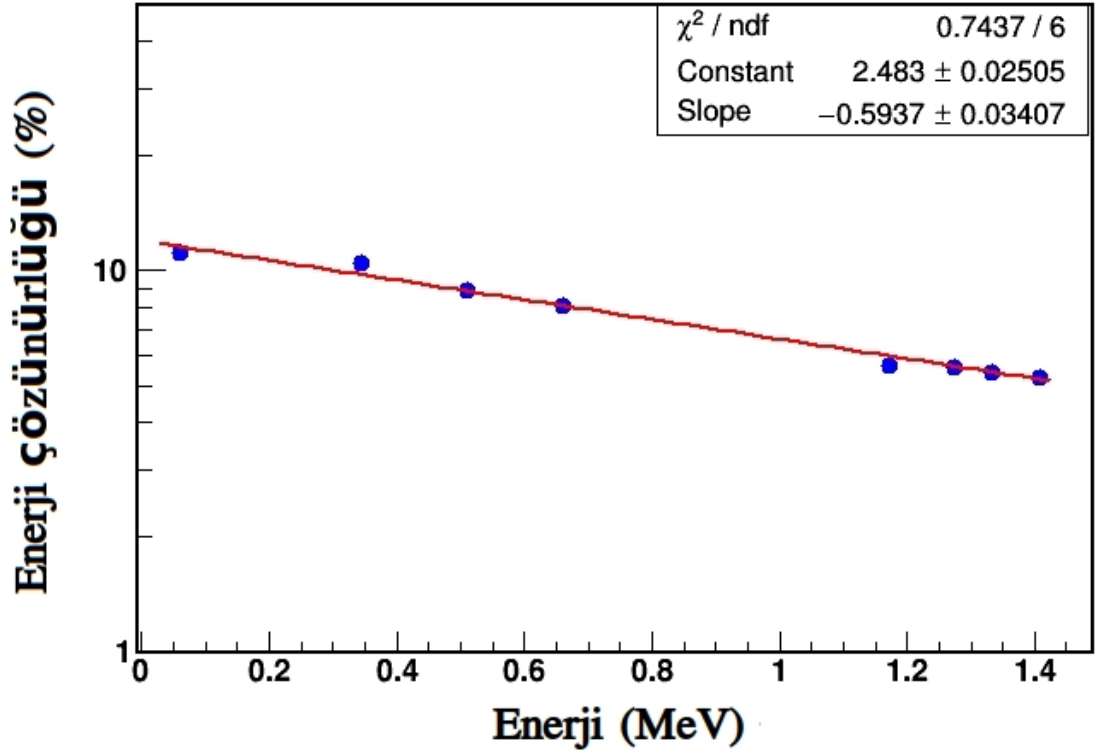
Gama spektrometresi için enerji kalibrasyonu, çözünürlük kalibrasyonu ve verim kalibrasyonu önemlidir. Bu kalibrasyonlar, ilgili izotopların etkinliğinin doğru bir şekilde tanımlanmasını ve belirlenmesini sağlamaktadır. Öncelikle enerji ve enerji çözünürlüğü kalibrasyonları yapılmıştır. Enerji kalibrasyonu; MCA sisteminin kanal numarası ile radyoaktif kaynağın enerjisi arasındaki ilişkinin kurulmasıdır. Deneyde, belirli foto pikleri elde etmek ve kanal numarasını belirlemek için Çizelge 2.1.'de verilen radyoaktif kaynaklar kullanılmıştır. İstatistiksel hatayı düşürmek için her bir ölçüm için kullanılan zaman aralığı 15 dakika olarak belirlenmiştir. Bu kaynakların kullanılmasıyla elde edilen enerji kalibrasyon parametrelerinin bulunduğu grafik Şekil 3.1. verilmiştir. Grafikte, mavi ile verilen noktalar deneysel verilerden elde edilen noktalardır. Kırmızı ile çizilmiş doğru ise mavi noktaların üzerinden geçen en uygun birinci dereceden polinoma fit edilmiş eğriyi vermektedir. Denklem 1.1'de verilen bağıntıya uygun olacak şekilde fit edilen polinomu sağlayan parametreler $p_0 = 17.77$, $p_1 = 0.95$ 'dir.



Şekil 3.1. 2"x2" NaI(Tl) detektörü için enerji kalibrasyon grafiği [43]. Kaynak ile dedektör arasındaki mesafe 2 cm'dir. Mavi noktalar deneysel verileri ve kırmızı çizgi de birinci dereceden polinoma fit edilen doğruyu göstermektedir

Gama spektrometresinin diğ er bir önemli parametresi enerji çözünürlüğüdür ve esas olarak dedektör malzemesine bağlıdır. Enerji   z n rl ğ  bir dedektörün birbirine yakın olan gama-ışını piklerini ne kadar iyi ayırt edebildiğinin ölçüsüdür. Deney sonucunda elde edilen dedektörün enerji çözünürlüğü  ekil 3.2.'de verilmiştir. Mavi ile işaretlenen noktalar deneyden elde edilen verileri göstermektedir. Kırmızı renkle verilen çizgi ise enerji çözünürlüğünü veren ve deneysel verilerle uyumlu olan en iyi eğriye karşılık gelmektedir. Şekil 3.2.'den elde edilen, deneysel verilerle uyumlu en iyi fonksiyon aşağıdaki Denklem 3.1'de verilmiştir:

$$R = 2.483E^{-0.5937} \quad (3.1)$$



Şekil 3.2. Enerjiye karşın elde edilen enerji çözünürlüğü grafiği. Dedektör-kaynak arası mesafenin 2 cm olduğu durumda 2"x2" NaI(Tl) dedektör sisteminden elde edilen enerji çözünürlüğü grafiği [43]. Mavi noktalar deneysel verilere karşılık gelmektedir ve kırmızı çizgi deneysel verilere uyan fit edilmiş enerji çözünürlüğü eğrisini göstermektedir.

Bir diğ er önemli kalibrasyon ise, radyasyonun aktivitesi ile tam enerji pikinin altındaki sayım arasındaki bağlantıyı veren dedektörün verim kalibrasyonudur. Silindirik

2"x2" 'lik NaI(Tl) dedektörünün verim değerleri, 59 keV ile 1408 keV foton enerjisi aralığında deneysel olarak ölçülmüştür ve GATE simülasyonu ile de elde edilmiştir. Çizelge 2.1.'de verilen farklı tiplerdeki radyoaktif kaynakların dedektör yüzeyinden 2, 4, 6, 8 ve 10 cm uzaklığa yerleştirilmesiyle elde edilen dedektör verimi değerleri Çizelge 3.1.'de listelenmiştir. Çizelgede, simülasyondan elde edilen dedektör verimi değerleri de verilmiştir. Aynı zamanda bu değerler literatürde ([44]) Monte Carlo tekniğiyle elde edilen verilerle de karşılaştırılmıştır. Simülasyon ve deneysel verilerden oluşturulan dedektör verimleri arasındaki bağıl fark olarak bilinen RD terimi aşağıdaki formülle ifade edilmiştir;

$$R = \frac{|\varepsilon_{\text{GATE}} - \varepsilon_{\text{deney}}|}{\varepsilon_{\text{deney}}} \quad (3.2)$$

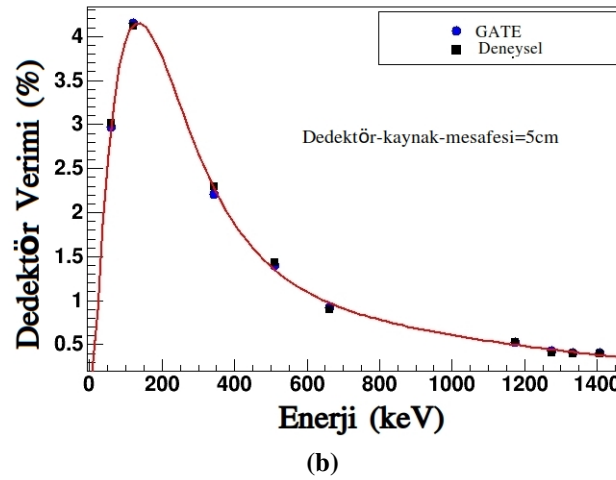
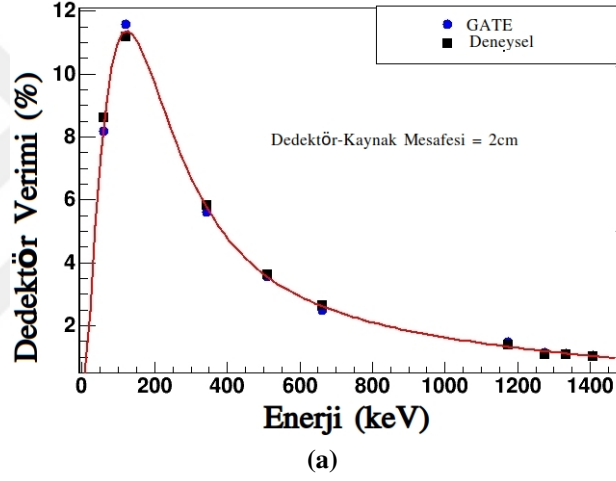
Çizelge 3.1. Farklı enerji ve mesafelerde elde edilen dedektörün verim tablosu. 59 keV ile 1408 keV arasındaki foton enerjileri için çeşitli kaynak-dedektör arası mesafelerde deney ve simülasyondan elde edilen silindirik NaI(Tl) dedektörünün verim değerleri ve literatür ile karşılaştırılması [43].

Fotonun Enerjisi (keV)	Dedektör-Kaynak Arası Mesafe (cm) ($\pm \Delta$) ¹	$\varepsilon_{\text{GATE}}$ (%) ²	ε_{exp} (%)	$\varepsilon_{\text{MCNP}}$ (%) [44]	RD (%)
59.54	2	8.656	8.608	13.04	0.554
	4	4.226	4.259	-	0.791
	5	3.137	3.878	-	0.464
	6	2.404	2.263	-	6.229
	8	1.523	1.411	-	7.937
	10	1.071	1.012	-	5.828
121.8	2	11.577	11.175	4.79	3.597
	4	5.708	-	-	-
	5	4.153	4.117	-	0.874
	6	3.144	-	-	-
	8	1.969	-	-	-
	10	1.341	-	-	-
344.3	2	5.626	5.832	-	3.532
	4	2.849	-	-	-
	5	2.206	2.222	-	0.720
	6	1.656	-	-	-
	8	1.091	-	-	-
	10	0.758	-	-	-
511	2	3.556	3.617	-	1.686
	5	1.399	1.431	-	2.236
661.6	2	2.474	2.639	3.05	6.252
	4	1.214	1.201	-	1.082
	5	0.918	0.896	-	2.455
	6	0.719	0.699	-	2.861
	8	0.475	0.473	-	0.423
	10	0.338	0.328	-	3.059
1173.2	2	1.319	1.376	1.44	4.142
	4	0.726	0.669	-	8.520
	5	0.529	0.526	-	0.570
	6	0.433	0.405	-	6.914
	8	0.269	0.271	-	0.738
	10	0.192	0.181	-	6.077
1274.5	2	1.129	1.084	-	4.151
	5	0.433	0.406	-	6.650
1332.5	2	1.139	1.065	1.27	6.948
	4	0.560	0.533	-	5.066
	5	0.412	0.400	-	3.000
	6	0.334	0.316	-	5.696
	8	0.223	0.210	-	6.190
	10	0.154	0.142	-	8.451
1408	2	1.063	1.026	-	3.606
	4	0.531	-	-	-
	5	0.404	0.393	-	2.799
	6	0.317	-	-	-
	8	0.209	-	-	-
	10	0.148	-	-	-

¹Dedektör-kaynak arası mesafenin belirsizliği simülasyonda nokta kaynak için 0,3 cm, silindirik kaynak için 0,7 cm olarak bulunmuştur.

²Simülasyonda, pik altında kalan alanın istatistiksel hatası %0,2'den küçük olduğu bulunmuştur.

Dedektör verimi kalibrasyonu, kaynaktan dedektöre olan mesafeye, kaynağın boyutuna ve şekline, kaynağı çevreleyen malzemelere bağlıdır. Bu nedenle, enerjiye bağlı verimin değişimi ve dedektör ile kaynak arası mesafeye bağlı tam enerji pikinin veriminin değişimi anlamlıdır. Şekil 3.3.a ve Şekil 3.3.b’de, sırasıyla, dedektör-kaynak arası mesafenin 2 cm ve 5 cm olması durumunda 2"x2" 'lik silindirik NaI(Tl) dedektörü için tam enerji piki verimleri verilmiştir. Şekillerdeki mavi noktalar deneysel verileri ve siyah noktalar GATE simülasyonundan elde edilen verileri göstermektedir. Kırmızı ile çizilen eğriler ise, deneysel ve simülasyondan elde edilen verilere uyacak şekilde çizdirilmiştir. NaI(Tl) dedektörü için, Denklem 1.5’de verilen verim eğrisini fit etmek için kullanılacak fonksiyonun parametreleri, Şekil 3.3.’den elde edilmiştir. Çizelge 3.2., dedektör-kaynak arası mesafenin 2 cm ve 5 cm olması durumunda bu parametreleri göstermektedir.

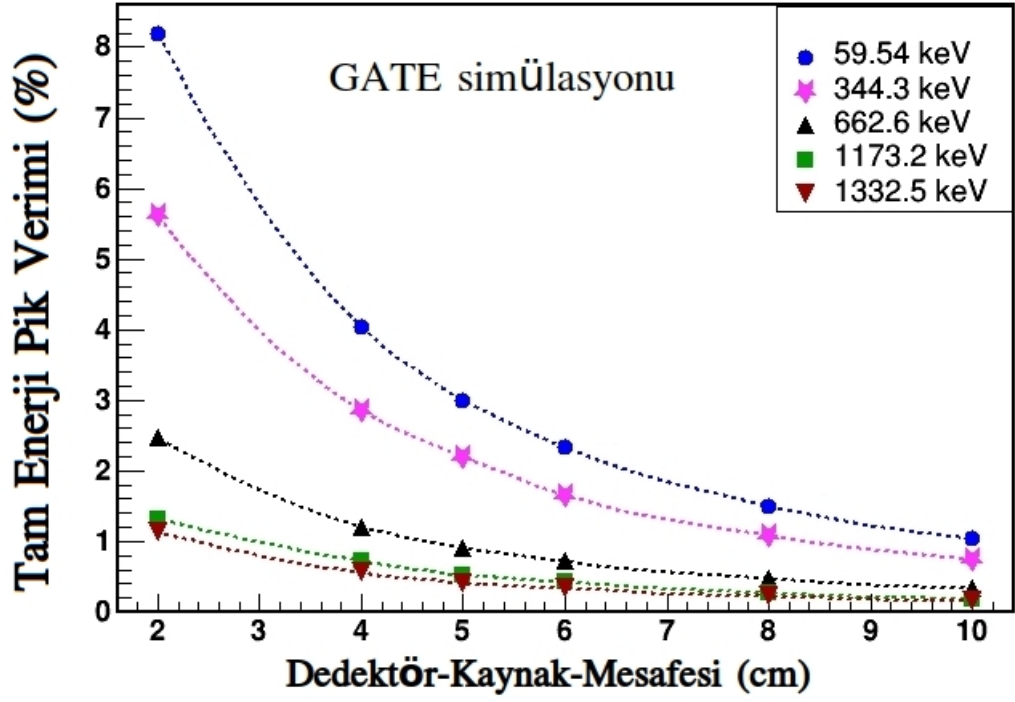


Şekil 3.3. Farklı dedektör-kaynak mesafeleri için elde edilen dedektör verimi. 2"x2" NaI(Tl) dedektörü için kaynak-dedektör arası mesafe (a) 2 cm ve (b) 5 cm olduğu durumda deneysel ve simülasyondan elde edilen dedektörün verim eğrileri [43]

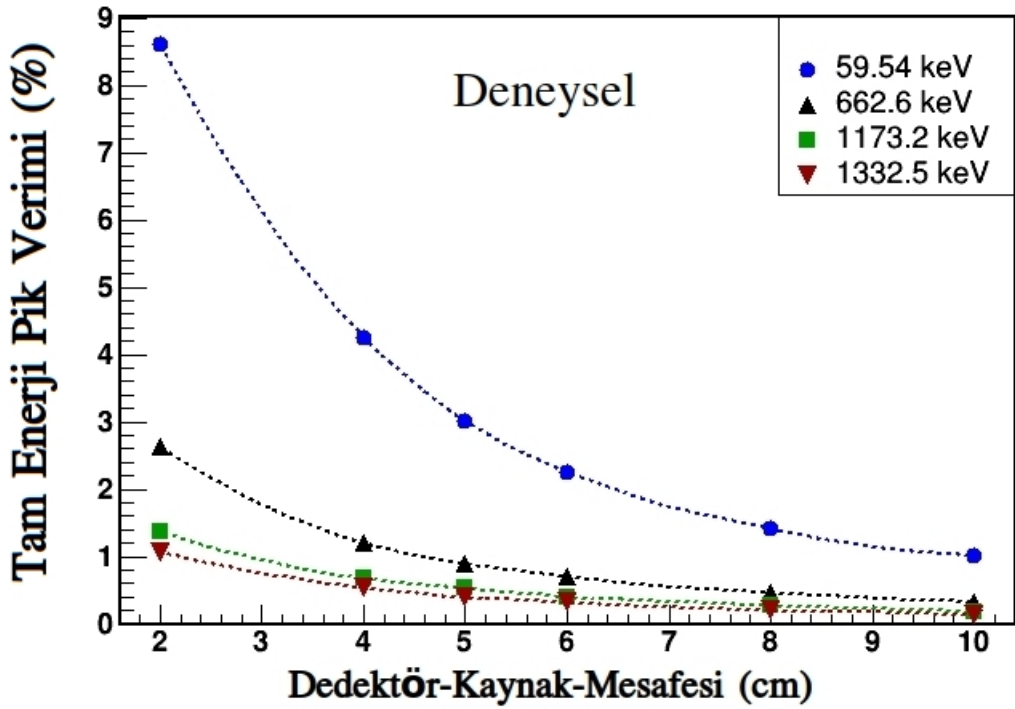
Çizelge 3.2. Analitik denklem kullanılarak elde edilen parametreler. Denklem 1.5’de verilen analitik denklem yardımıyla Şekil 3.3.’da verilen tam enerji pikinin verim eğrilerini sağlayan fit parametreleri [43]

		Analitik Denklemdaki Parametreler						
		t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
2 cm	GATE	10.06	0.97	-2.49	10.02	8.84	-0.99	4.04
	Deney	10.01	0.62	-2.26	10.58	9.02	-0.99	4.62
5 cm	GATE	9.34	0.94	-2.59	10.59	8.00	-0.99	3.00
	Deney	9.00	0.75	-2.39	10.00	8.00	-0.99	4.99

GATE simülasyonundan ve deneysel olarak elde edilen çeşitli kaynak-dedektör arası mesafeler için 2"x2" NaI(Tl) dedektörünün tam enerji pik verimi sırasıyla Şekil 3.4.a ve Şekil 3.4.b’de verilmiştir. Literatürle uyumlu olarak dedektör-kaynak arası mesafenin artan değerleriyle verimlerin üstel olarak azaldığı görülmektedir [2, 45].



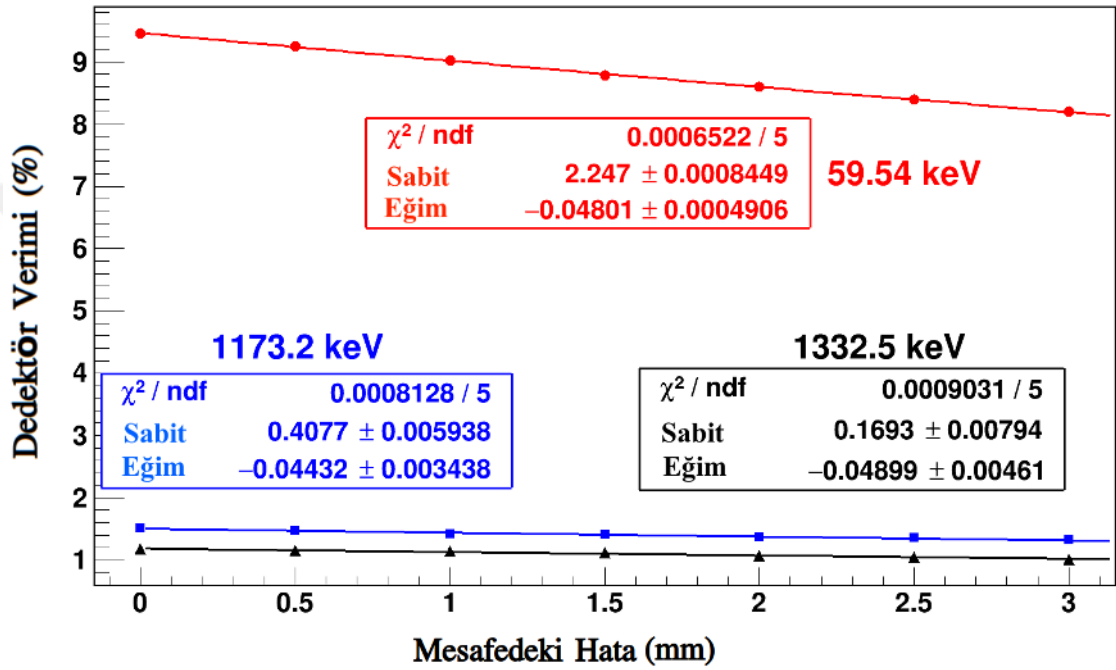
(a) GATE simülasyonu



(b) Deneyssel ölçümler

Şekil 3.4. Farklı dedektör-kaynak mesafeleri için elde edilen tam enerji pik verimi. 59.5 keV ile 1332.5 keV foton enerji aralığında (a)GATE simülasyonundan ve (b) deneyssel ölçümlerden elde edilen farklı kaynak ile dedektör arası mesafelere göre tam enerji piki verim değerleri [43]

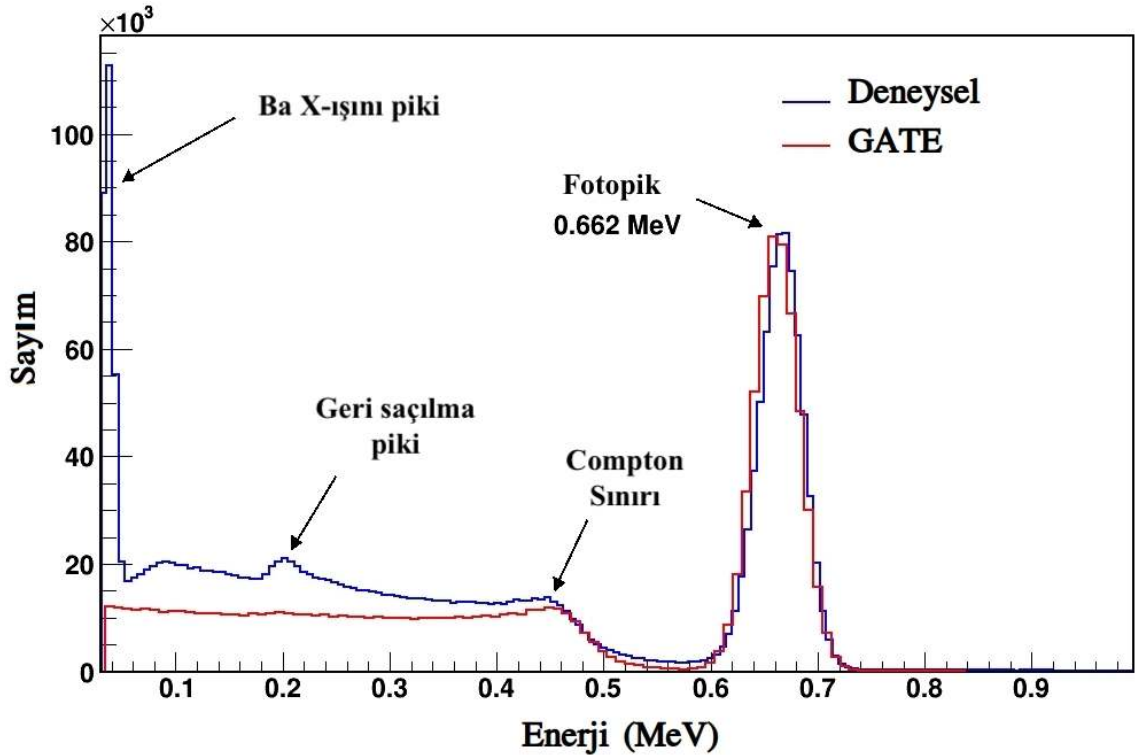
Literatüre bakıldığında dedektör yüzeyine olan mesafe arttıkça verimlerin üstel olarak azaldığı görülmektedir [2, 45]. Gelen gama radyasyonunun enerjisine bağlı olan üstel fonksiyon değişmektedir. Şekil 3.5.'de de gösterildiği gibi 59 keV için 2,25 olan katsayı değeri, 1332 keV için 0,17 olarak hesaplanmıştır. Bu, literatürde simülasyonla neden düşük enerjilerde yüksek dedektör verim değerlerinin bulunmuş olduğunu açıklayabilir. Çünkü dedektör-kaynak arasında milimetrik düzeyde bir kaymanın olması düşük enerjiye göre yüksek enerjide verim hesabının 13,3 daha az olacağı anlamına gelmektedir.



Şekil 3.5. Farklı enerjideki fotonlar için dedektör-kaynak mesafesine dayalı azalım katsayıları. 59, 1173 ve 1332 keV enerjili fotonlar için milimetrik düzeyde dedektör-kaynak arası mesafelere dayalı üstel azalma katsayıları bulunmuştur [43]. Bu sonuçlar, simülasyonda kaynağın dedektöre olan uzaklığını milimetrik ölçekte değiştirilmesiyle elde edilmiştir

Deneyde ^{137}Cs kaynağının kullanılmasıyla 2"x2" NaI(Tl) dedektöründen elde edilen spektrum, GATE simülasyonundan elde edilen spektrum ile karşılaştırılmıştır (Şekil 3.6.). Spektrumda fotopike odaklanıldığında hem deneysel hem simülasyondan elde edilen spektrumların kabul edilebilir bir uyum içinde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, 450 keV'nin altındaki Compton sürekliliğinde bazı farklılıklar gözlenmiştir, bu düşük enerjili fotonlarda NaI(Tl) kristalinin orantısız sintilasyon veriminden kaynaklanabilir. [44, 46]. Farkın ikinci nedeni, sabit olmayan ve simülasyon kodunda dikkate alın-

mayan, birim depolanan enerji başına ışık veriminin değişimi ile ilgili olabilir [44]. 0,15 ve 0,25 MeV arasındaki enerji bölgesinde, geri saçılma piki Monte Carlo simülasyonu tarafından yeniden üretilmez. Bu pike, deney alanındaki malzemelerden Compton gama-ışınlarının saçılması neden olur. MC modeli, tüm deney düzeneği ve ortamı yerine yalnızca dedektör-kaynak sistemini simüle eder [44, 47, 48]. Deneysel ölçümde ^{137}Cs 'nin iç dönüşümünü takiben ~ 30 keV'de yayılan Ba X-ışını piki görülmektedir. Ancak Monte Carlo simülasyon kodunda dikkate alınmadığı için bu pik, simülasyonda görülmemektedir.



Şekil 3.6. Deneysel ve simülasyonda elde edilen enerji spektrumlarının karşılaştırması. ^{137}Cs kaynağı ve 2"x2" NaI(Tl) dedektörünün kullanılmasıyla deneysel ölçümden ve GATE simülasyonundan elde edilen enerji spektrumlarının karşılaştırılmıştır [43]

Yukarıda verilen veriler incelendiğinde, NaI(Tl) sintilasyon detektörü için deney sonucunda elde edilen veriler ile GATE simülasyonu kullanılmasıyla elde edilen verilerin uyumlu olduğu görülmüştür. Bu sebeple, GATE simülasyonunda NaI(Tl) için yazılan modelleme kodu, yeni nesil sintilasyon malzemelerine uyarlanmıştır. İlk olarak 2"x2" silindirik LaBr₃ dedektör sistemi simülasyonda tanımlanmıştır ve farklı foton enerjileri için kaynak-dedektör arası mesafenin 2 cm ve 5 cm olduğu durumda verim değerleri hesap-

lanmıştır (Çizelge 3.3.). GATE simülasyonundan elde edilen sonuçlar, MCNP-X [8], MC ve başka bir çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar [13] ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.3. LaBr₃(Ce) dedektörünün farklı enerjiler için verim değerlerinin literatürle karşılaştırılması [43]

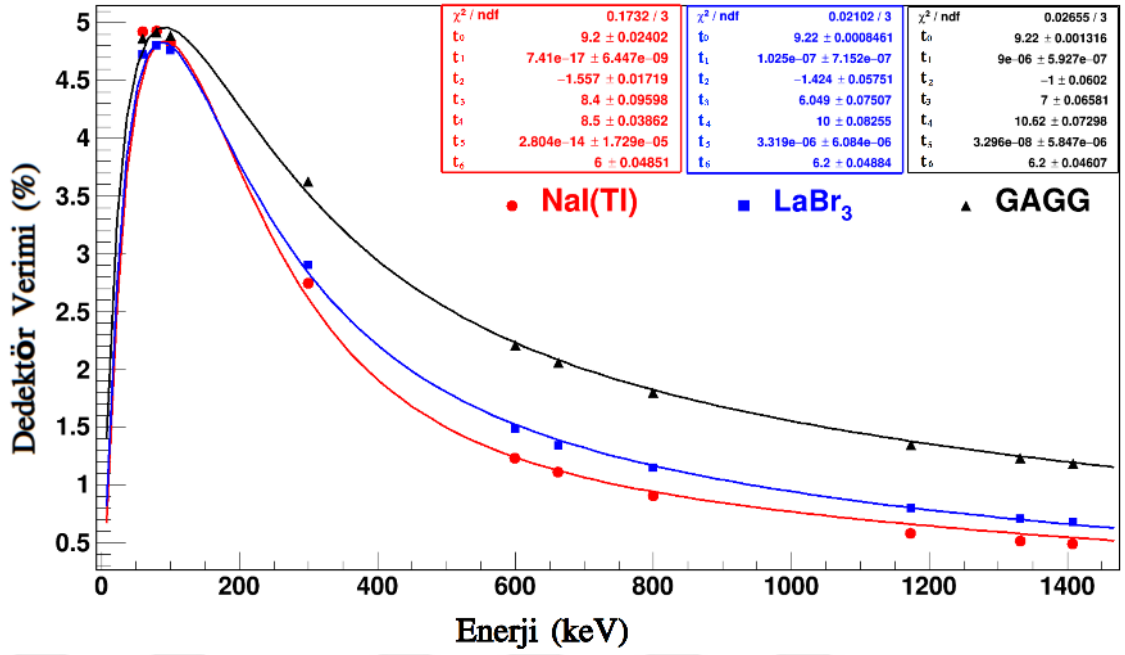
Radyoaktif Kaynak	Foton Enerjisi (keV)	Kaynak-Dedektör Mesafesi (cm)	$\varepsilon_{\text{GATE}}$ Şimdiki Çalışma	$\varepsilon_{\text{MCNP-X}}$ [8]	ε_{MC} [13]	$\varepsilon_{\text{exp.}}$ [13]
²⁴¹ Am	59,54	5	3,93	3,95	3,09	3,00
¹³³ Ba	302,85	5	2,29	2,34	2,01	2,00
	356,01	5	1,98	2,05	2,01	1,8
¹³⁷ Cs	661,66	5	1,34	1,45	1,31	1,3
⁶⁰ Co	1173,24	2	2,22	2,48	2,15	2,1
	1332,51	2	2,06	2,20	1,90	2,0

LaBr₃ detektörüne ek olarak, yeni nesil dedektör sistemleri de GATE simülasyonu yardımıyla modellenmiştir. NaI(Tl) dedektör sistemi ile yeni nesil dedektör sistemlerinin tam enerji piklerinin yüzde verimlerinin karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Simülasyonda 4000 Bq aktiviteye sahip izotropik nokta gama-ışın kaynağı tanımlanarak elde edilen tam enerji piklerinin yüzde verim değerleri Çizelge 3.4.'de verilmiştir. Bu değerler, dedektör-kaynak arası mesafenin 5 cm olması durumunda 60-1408 keV arasına kadar olan farklı foton enerjileri için elde edilmiştir.

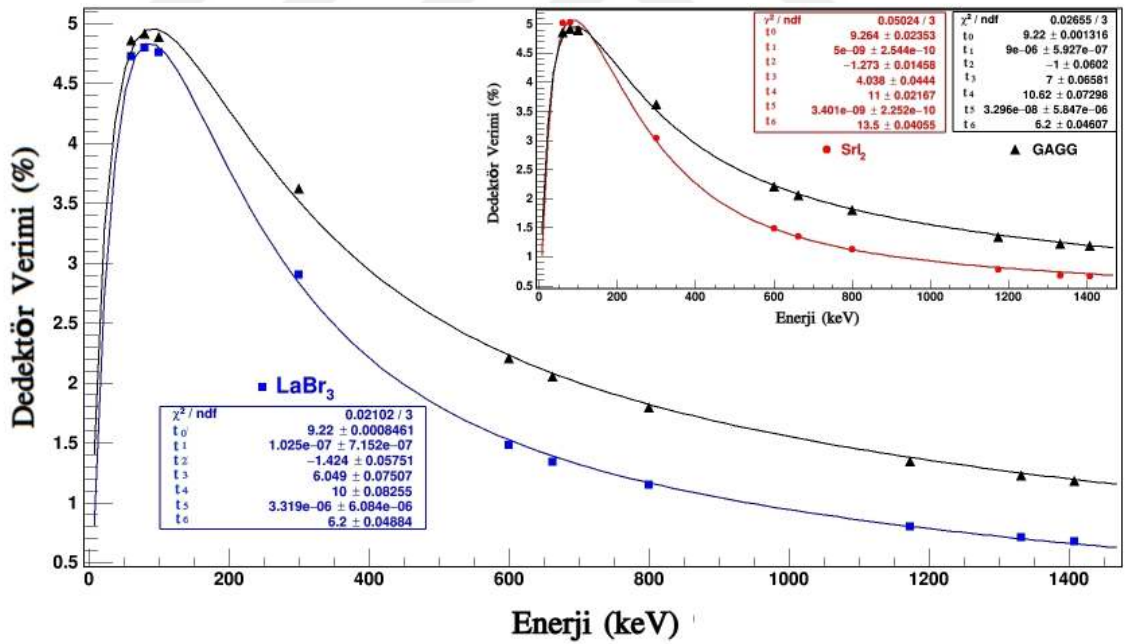
Çizelge 3.4. Yeni nesil dedektörler için elde edilen dedektör verim değerlerinin yüzdesi [43]

Foton Enerjisi (keV)	$\varepsilon_{\text{GATE}}$			
	NaI(Tl)	LaBr ₃	SrI ₂	GAGG
60	4.9190	4.7230	5.0255	4.8611
80	4.9277	4.8011	5.0301	4.9154
100	4.8314	4.7613	4.9133	4.8904
300	2.7453	2.9013	3.0422	3.6252
600	1.2307	1.4827	1.4951	2.2081
662	1.1069	1.3406	1.3501	2.0559
800	0.9035	1.1498	1.1278	1.7981
1173	0.5782	0.8001	0.7888	1.3459
1332	0.5147	0.7087	0.6823	1.2290
1408	0.4854	0.6777	0.6663	1.1849

Şekil 3.7.'de NaI(Tl) dedektörünün tam enerji pikinin veriminin yüzdesi, LaBr₃ ve GAGG dedektör sistemlerinin yüzdesi ile karşılaştırılmıştır. Verim eğrilerini sağlayan parametreler şekil üzerinde verilmiştir. GAGG dedektörünün tam enerji pikinin veriminin yüzde değerleri, özellikle, yüksek enerjili fotonlar için diğer sintilasyonlardan çok daha iyidir. Çizelge 3.4.'de verilen değerler incelendiğinde, LaBr₃ ve SrI₂ dedektörleri için tam enerji pikinin veriminin yüzde değerleri birbirine çok yakın olduğu gözlenmektedir. Bu sebeple Şekil 3.8.'da, LaBr₃ ve SrI₂ dedektörleri için tam enerji pikinin veriminin yüzdesi GAGG dedektörü için olan yüzdeyle ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Her bir dedektör için verim eğrilerini sağlayan parametreler şekil üzerinde verilmiştir. Şekil 3.7. ve Şekil 3.8. incelendiğinde en yüksek gama-ışını verimi GAGG sintilatörü için bulunmuştur. Bu durum, laboratuvar ölçümlerinde ve tıbbi görüntüleme gibi sintilasyon dedektör sistemlerinin yaygın olarak kullanıldığı alanlarda etkili sonuçlar sağlayacaktır.



Şekil 3.7. NaI(Tl) dedektörü ile yeni nesil dedektör sistemlerinin dedektör verimlerinin karşılaştırması. NaI(Tl) dedektörü ve yeni nesil dedektör sistemi için elde edilen tam enerji piklerinin veriminin yüzde değerleri ve verim eğrilerini sağlayan parametreler [43]



Şekil 3.8. LaBr₃ dedektörü ile diğer yeni nesil dedektör sistemlerinin dedektör verimlerinin karşılaştırması. Yeni nesil dedektör sistemleri için simülasyondan elde edilmiş tam enerji pikinin veriminin yüzde değerleri ve verim eğrilerini sağlayan parametreler [43]

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, radyasyon ölçümüne dayalı deneysel çalışmalar ve nükleer araştırmalar için önemli olan 2"x 2" NaI(Tl) kristaline sahip sintillatör dedektörünün enerji kalibrasyonu, enerji çözünürlüğü ve dedektör verimi incelenmiştir. Enerji kalibrasyonu, enerji çözünürlüğü ve dedektör verimi ilk önce deneysel olarak elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar Ankara Üniversitesi Fizik Bölümü bünyesinde bulunan Nükleer Fizik Laboratuvarındaki, 2"x 2" ORTEC ScintiPack Model 296 NaI(Tl) dedektörü, nokta ve silindirik biçimli radyoaktif kaynaklar kullanılarak elde edilmiştir. Enerji kalibrasyonu MCA'deki kanal numarası ile kullanılan kaynağın gama ışınının enerjisi arasındaki ilişkinin kurulmasıdır. Bilinen foton enerjisinin kanal numarasına göre elde edilen grafiğine bakıldığında; beklenildiği gibi referans radyoaktif kaynağın enerjisinin kanal numarasıyla orantılı olduğu bulunmuştur. Grafikteki eğriyi en iyi tanımlayan ikinci dereceden polinomla fit edilmesiyle parametre değerleri bulunmuştur. Gama ışını spektrometresinin diğer bir önemli özelliği olan enerji çözünürlüğüne yani benzer enerjilere sahip gama fotonlarını ne kadar iyi ayırt edebileceğine de bakılmıştır. Enerji çözünürlüğünün referans radyoaktif kaynağın enerjisine göre grafiği deneysel olarak elde edilmiştir ve grafikteki eğriyi en iyi tanımlayan polinomun parametreleri bulunmuştur. Bir gama ışını spektrometresinin son önemli kalibrasyon yöntemi olan verim kalibrasyonu, radyoaktif kaynağın belirli enerji pikinin altındaki sayım sayısı ile radyoaktif kaynağın aktivitesi arasındaki ilişkidir. Bu çalışma, esas olarak, nükleer fizikte yaygın olarak kullanılan NaI(Tl) sintilasyon dedektör sisteminin dedektör veriminin hesaplamasını içermektedir. Bu hesaplama, hem deneysel olarak ve hem de Geant4 tabanlı GATE simülasyonunda geliştirilen kod kullanılarak yapılmıştır. Gama ışını verimi 59 keV'den 1408 keV'e kadar farklı enerjilerde izotropik olarak foton yayımlayan nokta ve silindir şeklindeki radyoaktif kaynaklar kullanılarak hem deneysel olarak hem de simülasyon programından elde edilmiştir. Hesaplanan deneysel sonuçlarla simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde deneysel sonuçlar ile GATE simülasyonundan elde edilen sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. Karşılaştırma aynı zamanda başka bir çalışmada kullanılan MCNP kodu ile bulunan sonuçlarla da yapılmıştır. GATE simülasyonundan elde edilen sonuçların dedektör-kaynak arası mesafenin ± 3 mm'lik farkla MCNP simülasyonundan elde edilen sonuçlarla aynı

olduğu bulunmuştur. Bu fark, deneysel hata sebebiyle veya deneyde kullanılan radyoaktif kaynakların etrafında bulunan malzemeden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Tam enerji piki veriminin referans radyoaktif kaynağın enerjisine göre grafiği çizilmiş olup deneysel ve simülasyondan elde edilen eğrinin birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Farklı radyoaktif kaynak ile dedektör mesafeleri için dedektörün tam enerji pik verimi, simülasyon ve deneysel olarak belirlenmiştir. Literatürle uyumlu olacak şekilde dedektör-kaynak arası mesafenin artan değerleriyle verimin üstel olarak azaldığı görülmüştür. Bu sonuç, literatürde 59 keV değeri için simülasyon hesaplarında neden çok yüksek verim olduğunu açıklayabilir. Milimetrik düzeyde bir dedektör-kaynak arasındaki mesafe sapmasının düşük enerjide dedektör verimi üzerindeki etkisi yüksek enerjide olduğundan 13.3 kat daha fazladır [43].

Çeşitli uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılan NaI(Tl) dedektörü artık yerini yeni sintilasyon dedektörlerine bırakmaya başlamıştır. Bu sebeple yeni nesil sintilatörlerin de dedektör verimi eğrileri elde edilmiştir. NaI(Tl) sintilatörü için simülasyonla bulunan sonuçların deneysel olarak elde edilen verim değerleri ile uyumlu olması sebebiyle, GATE simülasyonunda yazılan kod diğer sintilatörler için de düzenlenerek kullanılmıştır. LaBr₃ için elde edilen GATE simülasyon sonuçları literatürdeki diğer simülasyon ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. NaI(Tl), LaBr₃(Ce), SrI₂ ve GAGG dedektörleri için elde edilen tam enerji pikinin verim yüzdeleri karşılaştırıldığında, özellikle, yüksek enerjili fotonlar için GAGG dedektörünün verimi diğer sintilasyon dedektörlerinden daha iyi olduğu bulunmuştur [43]. Enerji ve eşzaman ölçümlerindeki iyi sonuçlarından dolayı GAGG gelecekte yaygın olarak kullanım alanı bulacak olan sintilasyon malzemelerinden biridir. Yapılan bu tez ve tezden üretilen makalenin [43] basımına kadar, GAGG sintilatörünün gama ışını verimi ile ilgili bir literatür çalışması bulunamamıştır. En yüksek gama ışını veriminin GAGG için bulunması, laboratuvar ölçümlerinde ve tıbbi görüntüleme sistemlerinde olduğu gibi sintilasyon dedektör sistemlerinin yaygın olarak kullanıldığı alanlarda etkili sonuçlar sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] J. Chen et al., "Investigation of LaBr₃:Ce scintillator with excellent property," in *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 488, 142013, 2014, doi: 10.1088/1742- 6596/488/14/142013.
- [2] U. Akar Tarim and O. Gürlü, "Source-to-detector Distance Dependence of Efficiency and Energy Resolution of a 3×3 NaI(Tl) Detector," *Eur. J. Sci. Technol.*, vol. 13, pp. 103-107, 2018, doi: 10.31590/ejosat.443565.
- [3] Z. Wang et al., "Performance study of GAGG:Ce scintillator for gamma and neutron detection," *J. Instrum.*, vol. 15, C06031, 2020, doi: 10.1088/1748-0221/15/06/C06031.
- [4] T. Yanagida, K. Kamada, Y. Fujimoto, H. Yagi, and T. Yanagitani, "Comparative study of ceramic and single crystal Ce:GAGG scintillator," *Opt. Mater.*, vol. 35, pp. 2480-2485, 2013, doi: 10.1016/j.optmat.2013.07.002.
- [5] A. K. Berdnikova et al., "Miniature gamma detector based on inorganic scintillator and SiPM," in *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 675, 042048, 2016, doi: 10.1088/1742-6596/675/4/042048.
- [6] M. Moszynski, "Inorganic scintillation detectors in γ -ray spectrometry," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, vol. 505, pp. 101-110, 2003, doi: 10.1016/S0168-9002(03)01030-1.
- [7] A. K. Berdnikova et al., "Miniature gamma detector based on inorganic scintillator and SiPM," in *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 675, 042048, 2016, doi: 10.1088/1742-6596/675/4/042048.
- [8] I. Mouhti, A. Elanique, M. Y. Messous, B. Belhorma, and A. Benahmed, "Validation of a NaI(Tl) and LaBr₃(Ce) detector's models via measurements and Monte Carlo simulations," *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, vol. 11, pp. 355-339, 2018, doi: 10.1016/j.jrras.2018.06.003.

- [9] B. W. Sturm, "Evaluation of large volume $\text{SrI}_2(\text{Eu})$ scintillator detectors," in *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, Knoxville, TN, USA, 2010, pp. 1607-1611, doi: 10.1109/NSSMIC.2010.5874047.
- [10] N. J. Cherepy et al., " SrI_2 scintillator for gamma ray spectroscopy," in *Proceedings of SPIE.*, vol. 7449, San Diego, California, United States, 2009, doi: 10.1117/12.830016.
- [11] W. Drozdowski et al., "Scintillation properties of $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (GAGG:Ce): a comparison between monocrystalline and nanoceramic samples," *Opt. Mater.*, vol. 79, pp. 227-231, 2018, doi: 10.1016/j.optmat.2018.03.042.
- [12] J. Iwanowska et al., "Performance of cerium doped $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (GAGG:Ce) scintillator in gamma-ray spectrometry," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, vol. 712, pp. 34-40, 2013, doi: 10.1016/j.nima.2013.01.064.
- [13] R. Casanovas, J. J. Morant, and M. Salvadó, "Energy and resolution calibration of $\text{NaI}(\text{Tl})$ and $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ scintillators and validation of and EGS5 Monte Carlo user code for efficiency calculations," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, vol. 675, pp. 78-83, 2012, doi: 10.1016/j.nima.2012.02.006.
- [14] U. Akar Tarim, O. Gürler and S. Yalçın, "A Quick Method to Calculate $\text{NaI}(\text{Tl})$ Detector Efficiency Depending on Gamma ray Energy and Source-to detector Distance," *Celal Bayar Univ. J. Sci.*, vol. 14, pp. 195-199, 2018, doi: 10.18466/cbayarfbe.396704.
- [15] N. Yavuzkanat, "Development of Novel scintillation Detection Techniques for Use in Nuclear Physics and Medical Applications," Doctor of Philosophy, The University of York, UK, 2015.
- [16] "Sintilasyon Fiziği." [https://en.wikipedia.org/wiki/Scintillation_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Scintillation_(physics)), (accessed June 10, 2023).
- [17] "ORTEC Lanthanum Bromide Scintillation Detectors Data Sheet." <https://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/brochures/l/lanthanum.pdf?la=en&revision=579b9677-37fa-4cb4-b0f2-fb5212569b38> (accessed June 21, 2023).

- [18] T. Kimble, M. Chou, and B. H.T. Chai, "Scintillation Properties of LYSO Crystals," in *2002 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, Norfolk, VA, USA, vol. 3, 2002, pp. 1434-1437, doi: 10.1109/NSSMIC.2002.1239590.
- [19] A. Lempicki and J. Glodo, "Ce-doped scintillators: LSO and LuAP," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 416(2), pp. 333-344, 1998, doi: 10.1016/S0168-9002(98)00689-5.
- [20] M. Weber, B. Mary, R.A. Craig, and D. Sunberg, "Scintillators and applications: Cerium-doped materials," *Radiation Effects and Defects in Solids*, vol. 134, pp. 23-29, 1995, doi: 10.1080/10420159508227178.
- [21] X. Mengling, N. Guangda, L. Linyue, G. Runlong, J. Tong, W. Pengying, P. Weicheng, Z. Xianpeng, X. Zuoxiang, T. Sam, C. Zenghua, L. Jiajun, Z. Shan, W. Haodi, C. Shiyong, Z. Zhiping, X. Qingguo, O. Xiaoping, S. H. Edward and T. Jiang, "Organic-inorganic hybrid perovskite scintillators for mixed field radiation detection," *InfoMat*, vol. 4(9), pp. 1-12, 2022, doi: 10.1002/inf2.12325.
- [22] S. Abhinay, A. Subramaniam, I. Ng, N. Shugo, K. John and A. Hiroshi, "Vertical GaN-on-GaN Schottky Diodes as α Particle Radiation Sensors," *Micromachines*, vol. 11(5), pp. 519, 2020, doi:10.3390/mi11050519.
- [23] "Fotoçoğaltıcı tüp." https://tr.wikipedia.org/wiki/Fotomultipier_t%C3%BCp, (accessed June 14, 2023).
- [24] "Photodiodes." <https://byjus.com/physics/photodiodes-applications/> (accessed July 5, 2023).
- [25] "Fotodiyotlar." <https://www.rp-photonics.com/photodiodes.html> (accessed July 10, 2023).
- [26] "APD Çığ Fotodiyotlar." <https://www.elprocus.com/avalanche-photodiode/> (accessed July 12, 2023).

- [27] J. Miao and C. Wang, "Avalanche photodetectors based on two-dimensional layered materials," *Nano Research*, vol. 14, no. 6, pp. 1878-1888, 2021, doi: 10.1007/s12274-020-3001-8.
- [28] H. D. Chuong et al., "Validation of gamma scanning method for optimizing NaI(Tl) detector model in Monte Carlo Simulation," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 149, pp. 1-8, 2019, doi: 10.1016/j.apradiso.2019.04.009.
- [29] N. Yavuzkanat, "Modeling Geant4 based GATE simulation for total gamma efficiency of phoswich type detector system," *ALKU J. Sci.*, vol. 2, pp. 150-162, 2020, doi: 10.46740/alku.804473.
- [30] D. C. Radford, "Notes on the use of the program gf3," <https://radware.phy.ornl.gov/gf3/#5.3>. (accessed July 23, 2023).
- [31] T. D. Singo, "Search for non-YRAST states in ^{160}Yb ," M.Sc. Thesis, University of Cape Town, 2008.
- [32] L. Hallberg, "Analysis of triple gamma coincidences for studies of the level structure of nuclei in the 100-Sn region," M.Sc. Thesis, Uppsala University, Sweden, 2017.
- [33] D. C. Radford. "5.3. EFFIT-to fit an efficiency calibration" <https://radware.phy.ornl.gov/gf3/#Fig.7> (accessed July 23, 2023).
- [34] T. Arıcı, "Gama ışını spektroskopisi için bir hibrid dedektör sisteminin kurulumu ve karakterizasyonu," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2012.
- [35] M. Feig, G. Nawrocki, I. Yu, P. H. Wang, Y. Sugita, "Challenges and opportunities in connecting simulations with experiments via molecular dynamics of cellular environments," in *J Phys Conf Ser.*, 1036:012010, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1036/1/012010.
- [36] D. P. Kroese, T. Brereton, T. Taimre and Z. I. Botev, "Why the Monte Carlo method is so important today," *WIREs Comput Stat*, vol. 6, pp. 386-392, 2014, doi: 10.1002/wics.1314.

- [37] P. Saidi, M. Sadeghi, and C. Tenreiro, "Variance Reduction of Monte Carlo Simulation in Nuclear Engineering Field," *Theory and Applications of Monte Carlo Simulations*, InTech., 2013, doi:10.5772/53384.
- [38] M. Morales, C. C. Guimaraes, D. A. B. Bonifacio, E. Okuno, H. M. Murata, M. Bottaro, M. Menezes, V. Guimaraes, "Applications of the Monte Carlo method in nuclear physics using the GEANT4 toolkit," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1139, 2009, pp. 51-56, doi:10.1063/1.3157829.
- [39] S. Agostinelli, et. al., "GEANT4-a simulation toolkit," *Nucl. Instr. Meth. A*, vol. 506, pp. 250-303, 2003, doi: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
- [40] "GATE." <http://www.opengatecollaboration.org> (accessed April 14, 2023).
- [41] "Ortec." <https://www.ortec-online.com/products/electronics/photomultiplier-tube-bases/296> (accessed June 10, 2023).
- [42] G. Gilmore, *Practical Gamma-Ray Spectrometry*. 2nd ed. John Wiley and Sons, Chichester, USA, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/9780470861981>.
- [43] N. Yavuzkanat, M. Şenyiğit, and M. Kaplan, "Investigation of the gamma-ray efficiency for various scintillation detector systems," *Revista Mexicana de Fisica*, vol. 68, no. 4, pp. 1-9, 2022, doi: 10.31349/RevMexFis.68.041201.
- [44] I. Mouhti, A. Elanique, and M. Y. Messous, "Monte Carlo modelling of a NaI(Tl) scintillator detectors using MCNP simulation code," *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 8, pp. 4560-4565, 2017, doi: 10.26872/jmes.2017.8.12.481.
- [45] I. Akkurt, K. Gunoglu, and S. S. Arda, "Detection Efficiency of NaI(Tl) Detector in 511-1332 keV Energy Range," *Sci. Technol. Nucl. Install.*, 2014, 186798, 2014, doi: 10.1155/2014/186798.
- [46] C. D. Zerby and H. S. Moran, "Calculation of the pulse-height response of NaI(Tl) scintillation counters," *Nucl. Instrum. Methods*, vol. 14, pp. 115-124, 1961, doi: 10.1016/0029-554X(61)90062-3.

- [47] C. M. Salgado, L. E. B. Brandão, R. Schirru, C. M. N. A. Pereira, and C. C. Conti, "Validation of a NaI(Tl) detector's model developed with MCNP-X code," *Prog. Nucl. Energy*, vol. 59, pp. 19-25, 2012, doi: 10.1016/j.pnucene.2012.03.006.
- [48] M. J. Berger and S. M. Seltzer, "Response functions for sodium iodide scintillation detectors," *Nucl. Instrum. Methods*, vol. 104, pp. 317-332, 1972, doi: 10.1016/0029-554X(72)90543-5.

