

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

NaI(Tl) DEDEKTÖRÜNÜN GATE SİMÜLASYON PROGRAMIYLA DEDEKTÖR
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Didem GÜNGÜR

TEMMUZ 2020

FİZİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

NaI(Tl) DEDEKTÖRÜNÜN GATE SİMÜLASYON PROGRAMIYLA DEDEKTÖR
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Hazırlayan
Didem GÜNGÜR

Danışman
Prof. Dr. Sezai Yalçın

Jüri Üyeleri
Prof. Dr. Sezai Yalçın
Prof.Dr. Orhan GÜRLER
Dr.Öğr. Üyesi Zehra Nur KULUÖZTÜRK

TEMMUZ 2020

**BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ YÜKSEK LİSANS
TEZ ÇALIŞMASI ETİK BEYANI**

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre hazırlamış olduğum “**NaI(Tl) Dedektörünün Gate Simülasyon Programıyla Dedektör Özelliklerinin Belirlenmesi**” adlı tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez hazırlanırken tüm aşamalarda bilimsel etik ilkelerine uygun davrandığımı, tez kapsamında sunulan tüm verileri bilimsel etik ilkelerine uygun elde ettiğimi, tezde faydalandığım tüm eserlere atıf yaptığımı ve kaynaklar kısmında bu eserleri gösterdiğimi beyan ederim 17/07/2020.

Didem GÜNGÜR

ÖZET

NAI(Tl) DEDEKTÖRÜNÜN GATE SİMÜLASYON PROGRAMIYLA DEDEKTÖR ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Didem GÜNGÜR

Yüksek Lisans Tezi

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sezai YALÇIN

Temmuz 2020, 101 sayfa

Bu çalışmada Geant4 tabanlı GATE benzetişim programı kullanılarak NaI(Tl) detektörünün dedektör özellikleri belirlenmiştir. Simulasyon, 50-3000 keV foton enerji aralığında çeşitli kaynak-detektör uzaklıklarında izotropik nokta, disk, dar demet ve geniş demet gama ışını kaynakları kullanılarak gerçekleştirildi. Şonuçlar sintilasyon detektörlerinin kullanılmaya başlandığı 1958 yılından günümüze kadar literatürdeki farklı analitik, deneysel ve Monte Carlo sonuçları ile karşılaştırıldı. GATE benzetişim programıyla bulunan sonuçların literatürdeki değerlerle uyumlu olduğu görüldü. Elde edilen sonuçlar GATE benzetişim programının radyasyon detektörü olarak kullanılabilecek yeni sintilatör materyallerinin detektör özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Sözcükler: NaI(Tl) Dedektörü, Dedektör Özellikleri, GATE Simülasyon Programı

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE DETECTOR CHARACTERISTICS OF NaI(Tl) DETECTOR BY GATE SIMULATION PROGRAM

Didem GÜNGÜR

Master Thesis

Bitlis Eren University Graduate Education Institute,

Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Sezai YALÇIN

July 2020, 101 pages

In this study, Geant4 based GATE simulation program was used to determine the detector properties of NaI (Tl) detector. Simulations were carried out using isotropic point, disc, narrow beam and wide beam gamma ray sources, in the 50-3000 keV photon energy range, at various source-detector distances. The results of the simulations were compared with different analytical, experimental and Monte Carlo results, which are available in the literature since 1958, when scintillation detectors were first used. It was observed that the results of GATE simulation program are compatible with the values in the literature. The results showed that the GATE simulation program is a useful tool to determine the detector properties of new scintillator materials that can be used in radiation detectors.

Keywords: NaI(Tl) Detector, Detector Characteristics, GATE Simulation Program

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarımda, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışmanım Sayın Prof. Dr. Sezai YALÇIN'a en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Ayrıca çalışmamda bana yardımcı olan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Nuray YAVUZKANAT'a ilgi ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim. Hayatımın her aşamasında olduğu gibi bu aşamada da beni yalnız bırakmayan maddi ve manevi desteklerini her zaman hissettiğim başta kıymetli annem olmak üzere tüm aileme sonsuz saygılarımı sunar, teşekkür ederim. Bana tez yazma süresi boyunca teknoloji ve simülasyonlar konusunda yardımcı olan, manevi desteğini esirgemeyen kıymetli eşim kimya mühendisi Muhammad Asim MEHMOOD'a teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER DİZİNİ	xii
KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1.GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM	3
2.1. Radyoaktif Bozunma.....	4
2.1.1. Alfa Bozunumu.....	4
2.1.2. Beta Bozunumu.....	4
2.1.3. Gama Bozunumu.....	5
2.2. Radyasyonun Madde ile Etkileşimi.....	6
2.2.1. Alfaların Madde ile Etkileşimi.....	6
2.2.2. Betaların Madde ile Etkileşimi.....	7
2.2.3. Elektronların Madde ile Etkileşmesi.....	7
2.2.3.1. Elastik Çarpışma.....	8
2.2.3.2. İnelastik Çarpışma.....	8
2.2.3.3. Bremsstrahlung (Frenleme Işını) Olayı.....	9
2.2.3. Gamaların Madde ile Etkileşimi.....	9
2.2.3.1. Fotoelektrik Olay.....	9
2.2.3.2. Compton Saçılması.....	11
2.2.3.3. Çift Oluşum Olayı.....	12
2.3. Tesir Kesiti.....	13
2.3.1. Diferansiyel Tesir Kesiti.....	15
2.3.2. Gama Işını Lineer Zayıflama Katsayısı.....	16
2.3. Radyoaktif Bozunma Yasası.....	17
2.3.1. Aktivlik.....	18
2.3.2. Yarı Ömür.....	19

2.3.3. Ortalama Ömür.....	19
2.5. Radyasyon Dedektörleri.....	20
2.5.1. Gaz Dolu Dedektörler.....	22
2.5.2. Yarı İletken Dedektörler.....	23
2.5.3. Sintilasyon Dedektörleri.....	23
2.5.3.1. Sintilasyon Dedektörlerin Çalışma Prensibi.....	24
2.5.3.2. Sintilasyon Malzemeleri.....	25
2.6. Dedektör Özellikleri.....	25
2.6.1. Toplam Verim (Total Efficiency (ϵ)).....	26
2.6.2. Öz Verim (Intrinsic Efficiency (ϵ_i)).....	26
2.6.3. Geometrik Faktör.....	26
2.6.3. Tüm Enerji Pik Verimi (Full Energy Peak Efficiency (ϵ_f)).....	27
2.6.5. Tüm Enerji Pik Ö Verimi (Intrinsic Full Energy Peak Efficiency (ϵ_{inf})).....	27
2.6.6. Pik Değerinin Toplam Sayıya Oranı (Full Energy Peak-to-Total Ratio (R_p)).....	28
2.6.7. Ölü Zaman.....	28
2.6.8. Enerji Çözünürlüğü.....	28
2.7. Monte Carlo Benzetişim Yöntemi.....	30
2.7.1. Temel Monte Carlo İlkesi.....	31
2.7.2. Temel Örnekleme İlkesi.....	32
2.8. Monte Carlo Kodları ve Geant4.....	33
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	36
3.1. Toplam Verim.....	36
3.2. Öz Verim.....	52
3.3. Tüm Enerji Pik Verimi.....	63
3.3. Tüm Enerji Pik Öz Verimi.....	73
3.5. Pik Değerinin Toplam Sayıya Oranı.....	74
3.6. Enerji Çözünürlüğü.....	91
4. SONUÇ.....	93
5. KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	101

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Radyasyon etkisi ve dedektör çeşitleri.....	22
2.2. Bazı İnorganik Sintilatörlerin Özellikleri.....	25
3.1. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=0.001 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için toplam verimi.....	39
3.2. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=0.5 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için toplam verimi.....	41
3.3. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta noktasal gamma kaynağı için toplam verim değerleri.....	43
3.4. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=3 cm uzaklıkta gama disk kaynağı için toplam verimi.....	45
3.5. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta gama disk kaynağı için toplam verimi.....	47
3.6. 2x2 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden farklı uzaklıklarda noktasal gama kaynağı için toplam verimi.....	49
3.7. 2x2 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden farklı mesafelerde noktasal gama kaynağı için öz verim değerleri.....	54
3.8. 2x2 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde dar ışın demeti ve geniş ışın demeti gama kaynakları için öz verim değerleri.....	59
3.9. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden farklı uzaklıklarda noktasal ve disk gama kaynakları için öz verim değerleri.....	60
3.10. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=10cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için tüm enerji pik verimi değerleri.....	64
3.11. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=0.001cm uzaklıktanoktasal gama kaynağı için tüm enerji pik verimi değerleri.....	66
3.12. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=0.5cm uzaklıktanoktasal gama kaynağı için tüm enerji pik verimi değerleri	68
3.13. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=3cm uzaklıkta disk gama kaynağı için tüm enerji pik verimi değerleri.....	70

3.14. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=10cm uzaklıkta disk gama kaynağı için tüm enerji pik verimi değerleri.....	72
3.15. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=10cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için tüm enerji pik öz verimi değerleri.....	73
3.16. 2x2 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde geniş ışın demeti (broad beam) gamma kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri.....	75
3.17. 5x4 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dar ışın(narrow beam) gamma kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri.....	77
3.18. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=3 cm ve D=10 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri.....	78
3.19. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=0.001 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri.....	81
3.20. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=0.5 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri.....	83
3.21. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri.....	85
3.22. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=3 cm uzaklıkta disk gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri.....	87
3.23. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta disk gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri.....	89

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL	Sayfa
2.1. Kobalt-60 (^{60}Co) 'a ait radyoaktif bozunum şeması.....	6
2.2. Fotoelektrik olay.....	10
2.3. X-ışını yayınlanması.....	11
2.4. Compton saçılma olayı.....	12
2.5. Çift Oluşumu Olayı Şeması.....	13
2.6. İnce bir hedef üzerine düşen γ parçacık demeti.....	14
2.7. Sodyum İyodürde fotonların lineer soğurma katsayısı.....	17
2.8. Radyasyon ölçme sistemlerinin şematik gösterimi.....	21
2.9. Bir saf kristalin valans ve iletim bandı arasındaki banttaki enerjilerde aktivatör durumlarının bulunması halinde inorganik sintilatör materyalinin elektronik bant yapısı.....	24
2.10. Noktasal Kaynak Silindirik Dedektör.....	27
2.11. Enerji çözünürlüğü.....	29
2.12. Gelişigüzel sayı ekseninin n tane sonuç bölgesine ayrılması.....	31
2.13. NaI(Tl) dedektörü.....	35
3.1. Simülasyonu çalıştırmak için girişte yazılan bir kısım ana kodlar.....	36
3.2. 3x3 inç'lik NaI(Tl) dedektörü oluşturmak için kullanılan kodlar.....	37
3.3. Oluşturulan 3x3 inç'lik NaI(Tl) dedektörü.....	37
3.4. Gama kaynağından çıkan fotonlar	38
3.5. 3x3 inçlik NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D= 0.001 cm uzaklıkta noktasal gamma kaynağı için toplam verim değerleri.....	40
3.6. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=0.5 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için toplam verimi.....	42
3.7. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta noktasal gamma kaynağı için toplam verim değerleri	44
3.8. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=3 cm uzaklıkta gama disk kaynağı için toplam verimi.....	46
3.9. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta gama disk kaynağı için toplam verimi	48
3.10. 2x2 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=0.001 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için toplam verim değerleri.....	50

3.11. 2x2 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=5 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için toplam verim değerleri.....	50
3.12. 2x2 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için toplam verim değerleri.....	51
3.13. 2x2 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=15 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için toplam verim değerleri.....	52
3.14. Disk kaynağı simülasyon kurulumunun Geant4 görselleştirmesi.....	53
3.15. 2x2 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=0.001 cm uzaklıktanoktasalgama kaynağı için öz verim değerleri	55
3.16. 2x2 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=5cm uzaklıktanoktasalgama kaynağı için öz verim değerleri	55
3.17. 2x2 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=10cm uzaklıktanoktasalgama kaynağı için öz verim değerleri.....	56
3.18. 2x2 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=15 cm uzaklıktanoktasalgama kaynağı için öz verim değerleri	56
3.19. Geniş ışın demeti gama kaynağı (broad beam) oluşturmak için kullanılan kodlar.....	57
3.20. Geniş ışın demeti (broad beam) kaynağından yayınlanan gama fotonları	57
3.21. Dar ışın demeti (narrow beam) gama kaynağı oluşturmak için kullanılan kodlar.....	58
3.22. Dar ışın demeti (narrow beam) kaynağından yayınlanan gama fotonları.....	58
3.23. 2x2 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde dar ışın demeti ve geniş ışın demeti gama kaynakları için öz verim değerleri	59
3.24. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=0.001 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için öz verim değerleri.....	61
3.25. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=0.05 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için öz verim değerleri	61
3.26. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için öz verim değerleri	62
3.27. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=3 cm uzaklıkta disk gama kaynağı için öz verim değerleri	62
3.28. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta disk gama kaynağı için öz verim değerleri	63
3.29. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=10cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için tüm enerji pik verimi değerleri.....	65

3.30. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=0.001cm uzaklıktanoktasal gama kaynağı için tüm enerji pik verimi değerleri.....	67
3.31. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=0.5cm uzaklıktanoktasal gama kaynağı için tüm enerji pik verimi değerleri.....	69
3.32. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=3cm uzaklıkta disk gama kaynağı için tüm enerji pik verimi değerleri.....	71
3.33. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=10cm uzaklıkta disk gama kaynağı için tüm enerji pik verimi değerleri.....	73
3.34. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=10cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için tüm enerji pik öz verimi değerleri.....	74
3.35. 2x2 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde geniş ışın demeti(broad beam) gamma kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri.....	75
3.36. Dar demet ışını kaynak ve dedektörün koordinat sisteminde görüntüsü.....	76
3.37. Dar demet ışını kaynağından yayınlanan gama fotonları	76
3.38. 5x4 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dar ışın(narrow beam) gamma kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri.....	77
3.39. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=3 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri.....	79
3.40. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri.....	80
3.41. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=0.001 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri.....	82
3.42. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=0.5 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri.....	84
3.43. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri.....	86

3.44. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri eksenine dedektör ön yüzeyinden D=3 cm uzaklıkta disk gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri.....	88
3.45. 3x3 inç NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri eksenine dedektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta disk gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri.....	90
3.46. 247 keV-253 keV düşük enerji bölgesinde enerji rezölasyonu.....	91
3.47. 989 keV-1011 keV orta enerji bölgesinde enerji rezölasyonu.....	92
3.48. 2475 keV-2525 keV yüksek enerji bölgesinde enerji rezölasyonu	92



SİMGELER DİZİNİ

θ	Sapma açısı
σ	Tesir kesiti
σ_t	Toplam tesir kesiti
$d\sigma/d\Omega$	Diferansiyel tesir kesiti
$d\Omega$	Birim katı aç
μ	Toplam lineer zayıflama katsayısı
μ_{fe}	Fotoelektrik olay için lineer zayıflama katsayısı
μ_c	Compton saçılması için lineer zayıflama katsayısı
μ_{pp}	Elektron-pozitron çifti oluşumu için lineer zayıflama katsayısı
$\mathcal{E}$	Toplam verim
$\mathcal{E}_i$	Öz verim
$\mathcal{E}_f$	Tüm enerji pik verimi
$\mathcal{E}_{inf}$	Tüm Enerji Pik Öz Verimi
R_p	Pik değerinin sayma sayısına oranı
τ	Ortalama ömür
A	Radyoaktif kaynağın aktivitesi
Z	Atom numarası
G	Geometrik faktör
N_k	Kaynaktan yayınlanan foton sayısı
N_s	Dedektör tarafından sayılan foton sayısı
N_g	Dedektöre giren foton sayısı
R	Enerji çözünürlüğü
D	Dedektör kaynak arası uzaklık
R_d	Dedektör yarıçapı
m_0	Elektronun durgun kütlesi
e	Elektronun yükü
v	Elektronun hızı
c	Işık hızı
I	x kalınlığında soğurucu ortamı geçmiş gama demeti şiddeti
I_0	Soğurucu ortama gelen gama demeti şiddeti
q	0-1 arasında düzgün dağılımlı gelişigüzel sayı

KISALTMALAR DİZİNİ

F.E.P.E	Full energy peak efficiency
NaI(Tl)	Sodyum iyodür dedektörü



1.GİRİŞ

Sintilasyon dedektörleri, birçok alanda kullanım kolaylığı ve maliyetinin düşüklüğü sebebiyle yaygın olarak kullanılan radyasyon dedektörleridir (örneğin, yüksek enerji fiziği, nükleer fizik, nükleer tıp, sanayi, güvenlik, jeoloji, astrofizik, tarım, çevresel örneklerin radyasyon ölçümü vb.) (Gilmore ve Hemingway,1995; Tsoulfanidis,1995).

1948'de Hofstadter, ilk olarak fotoçoğaltıcı tüpler ile birleştirilen talyumla aktive edilmiş sodyum iyodür kristalli dedektörü NaI(Tl) gama ışınlarını ve diğer iyonlaştırıcı radyasyonları ölçerek etkili bir dedektör olduğunu gösterdi. Bu nedenle, 50'li yıllarda NaI(Tl) gama ışını dedektörü olarak kullanılan ilk katı hal dedektörüdür ve bu yıldan sonrada en yaygın kullanılan gama ışını dedektör sistemidir (Pilakouta, 2018). NaI(Tl) iyi verimlilik, geniş çalışma sıcaklık aralığı, düşük tüketim ve düşük maliyetler ile uygun radyoaktivite ölçümleri nedeniyle oldukça popüler bir dedektördür (Zhang, 2015; Duc, 2017). NaI(Tl) bugün nükleer tıbbın mamografi, gama kameraları ve pozitron emisyon tomografisinde kullanılan ve astrofizikte kullanılan en önemli dedektör materyalidir. Günümüzde Fukushima nükleer kazası sonrası deniz ve çevre radyoaktivitesi ölçümünde kullanılması güncelliğini koruduğunu göstermektedir (Wang, 2018).

Radyasyon dedektörünün en önemli özellikleri dedektör cevap fonksiyonu, toplam verimlilik (TE), tüm enerji pik verimliliği (FEPE) ve dedektör çözünürlüğüdür. Geniş bir enerji aralığında gama ışını ölçümleri yapmak için dedektör özelliklerinin belirlenmesi gereklidir. Gama ışını aktivite ölçümünde, dedektör verimliliğinde iki kritik özellik vardır; toplam verimlilik ve tüm enerji pik enerji verimliliği. Geniş bir enerji aralığında gama ışını kaynağından gelen mutlak aktiviteleri ölçmek için toplam verimliliğin bilinmesi gerekir. Dedektör özelliklerini belirlemek için deneysel, ampirik, analitik ve Monte Carlo olmak üzere dört farklı yöntemle belirlenebilir (Hamzawy, 2010). Deneysel yöntemde toplam verimliliği belirlemek için standart kaynakların kullanılması gerekmektedir. Bu standart kaynaklar oldukça pahalıdır ve laboratuvarda hazırlanması zaman gerektirir (Chuong, 2019). İstenilen enerji aralığında standart gama kaynakları bulmak da zordur. Toplam dedektör verimliliğinin deneysel yöntemle belirlenmesi yerine, ölçüm değerlerini analitik fonksiyona göre ayarlamak veya dedektör ile gama ışınları etkileşimlerine dayalı bilgisayar programını kullanmak kolaydır (Zikovsky, 1988). Önemli analitik yöntemlerden biri, Ortalama Kiriş Uzunluğu (MLC) yöntemidir ki bu yöntemde bir dedektörün boyutlarına göre ortalama giriş uzunluğu hesaplanarak dedektörün toplam verimi ortalama olarak hesaplanabilir (Özmutlu, 1976). Dedektör özelliklerini doğrudan analitik olarak hesaplayan yeni yayınlanmış analitik çalışmalar deneysel ve bilgisayar tabanlı hesaplamalar vardır (Hamzawy, 2010; Abbas, 2010; Abbas, 2011; Pomme, 2009).

Monte Carlo (MC) simülasyon yöntemi, sağlık fiziğinden parçacık fiziğine kadar birçok alanda kullanılmaktadır ve popülerliğini korumaktadır. Günümüzde gama ışını spektroskopisinde aktivite ölçümü, dedektör verimliliği, gibi uygulama parametrelerini hesaplamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. İyi bilinen çok amaçlı MC kodları PENELOPE, MCNP, Geant4, GATE, FLUKA, EGS, vb.'dir (Lépy, 2019).

Ele aldığımız dedektörün özellikleri Geant4 tabanlı Gate Simülasyon Programı tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Geant4'ün kullanılan versiyonu ve 10.3'tür. İnceleyeceğimiz dedektörün boyutları ve özellikleri, koordinat sistemindeki konumu, nokta ve disk kaynakların konumları ve özellikleri programa tanıtılıp simülasyon çizilir. Simülasyon programının çıktı dosyası olarak root analiz programında çıktı alınır, analizler C++ kullanılarak rootta yapılır. Simülasyonda optik fotonlar üretilerek, enerjiye bağlı olarak optikfoton özelliklerine bakılıp fizik listesi tanımlanmıştır. Gamanın madde ile etkileşimi olan fotoelektrik olay, compton saçılması, çift oluşumu ve koherent saçılma macro dosyasında tanımlandı. 50-3000 keV arası belli enerji değerindeki ve farklı uzaklıklardadedektör özellikleri hesaplanmıştır. Uzaklığınve kaynak tipinin(nokta, disk, darışın demeti, geniş ışın demeti vb.) verime olan etkisi değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, NaI (Tl) detektörünün toplam verimi, öz verimi, geometrik verim, pik değerinin toplam sayılma oranı, enerji rezülasyonu gibi birçok data Geant4 tabanlı GATE simülasyon programı kullanılarak elde edilmiştir. Simülasyon kodu 3"x3" ve 2"x2" silindirik NaI(Tl) dedektör sistemleri için modellenmiş ve 50 keV'den 3000 keV'e kadar her gama ışını enerjisi için bir root dosyası olarak çıktı elde edilmiştir. Gama kaynağından 1000000 parçacık gönderilerek program çalışılmıştır. Dedektör özelliklerini belirlemek için simüle edilmiş enerji spektrumu kullanılmış literatürdeki deneysel veya analitik olarak hesaplanan verilerle karşılaştırılmıştır. Sonuçların literatürle uyumlu olduğu görülmüştür. Dedektör verimini hesaplamada kullandığımız Gate benzetişim yöntemi ileriki aşamada özellikleri bilinmeyen bir sintilatör materyalinin dedektör özelliklerini belirlemede kullanılması hedeflenmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Radyoaktivite, kararsız olan atom çekirdeklerinin bir ışın yada parçacık yayınlarak başka bir çekirdeğe dönüşmesi olayıdır. Bu dönüşüm sürecinde yayınlanan elektromanyetik dalga yada parçacığın kinetik enerjisi yoluyla enerji yayınlanır. Bu şekilde enerji yayınlanması olayına da radyasyon denir (Jenkins, Harbison vd., 2006). Radyasyon yayınlayan maddeler radyoaktif maddeler olarak sınıflandırılır. 1896 yılında Fransız fizikçi Henry Becquerel tarafından bir rastlantı sonucu keşfedilen radyoaktivite çekirdek fiziğinde önemli gelişmelere öncülük etmiştir (Büget, 1992).

Bir atomun radyoaktif bozunumu ile yayınlanan radyasyon iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir. İyonlaştırıcı radyasyonlar, elektronu atomdan koparmak için yeterli yüksek enerjiye sahip olanlardır, iyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar ise çok düşük enerjiler nedeniyle bu yeteneğe sahip değildir. İyonlaştırıcı radyasyonlar doğal olarak oluşabilir veya fisyon ve füzyon reaksiyonları gibi nükleer reaksiyonlardan yapay olarak oluşturulabilir (Cember, 2009). İyonlaştırıcı radyasyon örnekleri x-ışınları, ultraviyole ışınları, kozmik ışınlar, gama ışınları ve alfa, beta ve nötron parçacıklarıdır. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon örnekleri kızılötesi, mikrodalga fırınlar ve radyo dalgaları vb. Toryum ve uranyum içeren doğal minerallerin radyoaktif bozunmaları sonucunda doğal radyoaktivite meydana gelir. Dünyanın yaşı mertebesinde yarı ömre sahip olan bu bozunumlar geçmişten günümüze uzanarak radyoaktif zincirleri oluştururlar. ^{235}U ve ^{238}U doğal çekirdeklerin son derece uzun yarı ömürleri olmasaydı bugün doğada hiçbir uranyum olmayacak ve büyük olasılıkla hiç nükleer sektör ya da nükleer silah olmayacaktı (Krane, 2001).

Doğal radyoaktivite ile yayınlanan radyasyonlar üç ana tiptedir. Bunlar; alfa, beta ve gama radyasyonlarıdır (Jenkins, Harbison vd., 2006). Bu radyasyonların ana kaynağı radyoaktif elementlerdir. Alfa ve beta parçacıklar, gama ışınları ise elektromanyetik dalgalardır. Alfa radyasyonları iki proton ve iki nötrondan oluşan helyum atomunun çekirdeğidir ve bu da onları güçlü bir pozitif yük haline getirir. Bu parçacıklar, yüksek kütleleri nedeniyle giriciliği az, ancak güçlü pozitif yükleri nedeniyle yüksek iyonize edici güce sahiptirler ve tek enerjilidirler. Beta parçacıkları, sıfır ile belirli bir maksimum enerji (E_m) ile yayınlanan sürekli enerji spektrumuna sahip elektronlardır. Gama radyasyonları yüksek frekanslı ve kısa dalga boylu elektromanyetik dalgalardır, bu nedenle en yüksek giriciliği olan radyasyonlardır. Bu üç tip radyasyon da doğada iyonlaştırıcıdır ve dolayısıyla canlılar için zararlıdır (Jenkins, Harbison vd., 2006).

2.1. Radyoaktif Bozunma

2.1.1 Alfa Bozunumu

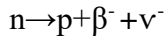
Doğada bulunan atom numarası 82 ile 92 arasında bulunan bir çok ağır çekirdekler ve yapay olarak üretilen uranyum ötesi $Z > 92$ elementler alfa bozunumu yaparak bozunurlar. Alfa parçacıkları, iki elektronu yitirmiş Helyum çekirdekleridir. Alfa parçacıkları α ile gösterilir. Alfa parçacığı yayınlayan bir çekirdek kütle numarasından 4 birim, atom numarasından 2 birim kaybeder. Alfa parçacıkları yüklü ağır parçacıklar oldukları için elektrik alanda ve manyetik alanda saparlar. Alfa parçacıkları gamma ışınları gibi kesikli enerjiyle yayınlanırlar. Alfa parçacıkları bir ortamdan geçerken enerji kaybına uğrarlar. Enerji kaybının en büyük kısmı ortamın atomik elektronları ile oluşan etkileşmeden kaynaklanır (Gardner ve Ely, 1967).

2.1.2. Beta Bozunumu

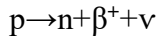
Beta parçacığı, çekirdeğin beta parçalanması işlemi sonucunda çekirdekte oluşur. Radyoaktif atom çekirdeğinden yayınlanan yüksek hızlı bir elektrondur. Pozitif yüklü beta parçacıklarına “pozitron” (β^+), negatif yüklü beta parçacıklarına “negatron” (β^-) denir. Durgun kütlesi $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ve yükü $1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$ ’dur. MeV mertebesinde enerjiye sahip beta parçacıkları, küçük kütleli ve yüksek enerjili olmalarından dolayı ışık hızına yakın hızlara sahiptirler (Altun, 2016).

Beta parçalanması çekirdek içinde bir nötronun protona veya bir protonun nötrona dönüşmesi şeklindedir.

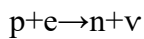
β^- bozunumu;



β^+ bozunumu;



elektron yakalanması;



Protonun nötrona dönüşmesi iki türlü olabilir. Birincisi proton nötrona dönüşür ve β^+ yayınlanır. İkincisi yörünge elektronlarından birisi çekirdek tarafından yakalanır. Bu olaya elektron yakalaması olayı denir. Elektron genellikle K yörüngesinden yakalanır. β^+ parçalanmasında ve elektron yakalanmasında ν (nötrino), β^- parçalanmasında ise $\bar{\nu}$ (antinötrino) yayınlanır.

Beta parçalanmasında parçalanma enerjisi, beta parçacığı, geri tepen ürün çekirdek nötrino veya antinötrino arasında paylaşılır. Geri tepen ürün çekirdeğin enerjisi ihmal edilebilecek kadarküçüktür. Bu nedenle parçalanma enerjisi beta parçacığı ve nötrino arasında gelişigüzel paylaşıldığından beta parçacıkları, sıfır enerji ile belli maksimum enerji E_m arasında sürekli enerji spektrumuna sahiptirler. Beta parçacıklarının enerji dağılımlarını veren bir ifade Fermi tarafından geliştirilmiştir.

2.1.3. Gama Bozunumu

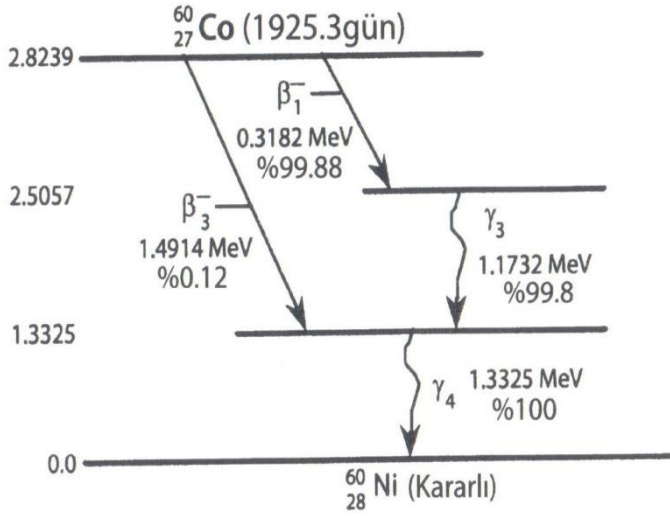
Radyoaktif çekirdekler alfa ve yada beta bozunumu yaptıkları zaman ürün çekirdek genellikle uyarılmış durumda kalır. Uyarılmış bir çekirdek enerjisini bir gama fotonu yayınlamaya kaybedebilir. Gama fotonunun enerjisi ilk ve son nükleer durumlar arasındaki geçiş enerjisine veya enerji farkına eşit olur.

Gama yayınlanması çok kısa bir sürede gerçekleşir genellikle 10^{-9} saniyeden daha küçüktür. Ancak bazı durumlarda bu geçiş saat hatta gün mertebesinde yarı ömürlü gama yayınlanması ile gerçekleşir. Bu geçişlere izomerik geçişler yada metastable durumlar olarak adlandırılır.

Gama yayınlanmasına alternatif bir olay iç dönüşüm olayıdır. Bu olayda çekirdek gama ışını yayınlama yerine uyarılma enerjisini doğrudan bir atomik elektrona aktararak bozunabilir ve bir serbest elektron gözlenir. Fırlatılan elektronun kinetik enerjisi;

$$E_k = E_\gamma - E_B \quad (2.1)$$

Burada E_B fırlatılan elektronun bağlanma enerjisi, E_γ yayınlanan gamanın enerjisidir. Bu elektronlara iç dönüşüm elektronları denir. Hangi iç tabakadan elektron fırlatılmış ise fırlatılan elektron onun adını alır. K, L, M iç dönüşüm elektronu gibi. Bağlanma enerjileride E_K, E_L, E_M değerine sahiptir. Dönüşüm elektronları, iç dönüşümü içeren enerji durumlarının hepsi belli enerji değerlerine sahip olduklarından tek(mono) enerjili olarak yayınlanırlar. Şekilde 2.1. de tipik bir gama bozunum şeması verilmiştir (Lilley, 2018; Krane, 2001; Martin, 2013).



Şekil 2.1.Kobalt-60 (^{60}Co) ‘a aitradyoaktif bozunum şeması(Martin,2013)

2.2. Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi

Radyasyon yaşamın doğal bir parçasıdır. Yaşam faaliyetini sürdüren canlılar doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından yayınlanan radyasyona maruz kalmaktadır. Radyasyon yüksek hızlı parçacıklar ve elektromanyetik dalgalar şeklinde yayınlanır. Radyasyonun giriciliğinden dolayı maddeye, insana ve tüm canlılara kolaylıkla nüfuz etmesine neden olur (Damla,2005). Radyasyonla yayınlanan parçacıkların ve elektromanyetik dalgaların madde ile etkileşmesi farklı yollarla olur.

2.2.1. Alfaların Madde ile Etkileşmesi

Alfa parçacıkları, pozitif yüklü iki proton ve iki nötrondan oluştuklarından dolayı elektrona yaklaştıklarında, kendi aralarında kuvvetli bir elektrostatik çekim kuvveti belirir. Parçacıkların kütlesi elektronun kütlesinin 8000 katı kadardır. Hızları 1.6×10^7 m/s seviyesindedir. Bu parçacıklar enerjilerini esnek olmayan çarpışmalarla kaybederler. Alfa parçacıkları genellikle, içinden geçtikleri atomların elektronlarıyla etkileştikleri için geçtikleri yol üzerinde birden çok iyon çifti oluştururlar (Bilge,1985).

Alfa parçacıkları madde içeresinden geçişleri sırasında iyonizasyona sebep olurlar. Bir hava ortamında bir iyon çifti oluşturabilmek için ortalama 32,5 eV iyonlaşma enerji gerekir. Alfa parçacıkları bir ortamda ilerlerken iyon çiftleri oluşturarak ilerlediklerinden enerjilerini

kaybederler ve böylece ortama enerji aktırırlar. Bu olayla alfa parçacıklarının enerjileri soğurulmuş olur. Alfa parçacıklarının kütlesi ağır olması sebebiyle madde içerisinde düz bir yol boyunca ilerlerler. Durmadan önce menzillerinin sonuna doğru enerjilerinin büyük bir kısmını kaybederler (Bilge,1985).

Enerji kaybının en önemli kısmı ortamın atomik elektronları ile etkileşmelerden kaynaklanır.

2.2.2. Betaların Madde ile Etkileşmesi

Beta parçacıkları madde içinden geçerken yüklü parçacık olduklarından alfa parçacıkları gibi ortamın atomik elektronlarıyla etkileşim sonucu enerjilerini kaybederler. Bu benzerlik ile beraber aralarında önemli farklılıklar vardır. Beta parçacıklarının kütlesi alfa parçacıklarının kütlesinden küçüktür, bu nedenle ortamda ilerlerken düz bir yol değil zikzaklı bir yol izler. Alfa parçacıklarına göre oluşturdukları özgül iyonizasyon daha küçüktür (hareket eden yüklü parçacığın 1 cm'sinde bıraktığı iyon çifti sayısına özgül iyonizasyon denir). Alfa parçacıkları radyoaktif kaynaktan belli enerjide (tek enerjili) yayınlanırken beta parçacıkları 0 ile E_m maksimum enerji arasında sürekli enerji dağılımına sahiptir.

Beta parçacıkları ortamda 4 farklı şekilde enerji kaybedebilirler. Bunlar; doğrudan iyonizasyon, bremsstrahlung üretimi, Cerenkov radyasyonu ve iyonizasyon nedeniyle yayınlanan elektronların sebep olduğu delta ışınlarıdır (delta ışınları iyonizasyon sonucu oluşan elektronlardır) (Martin,2013).

Yükü ve kütlesi özdeş olan bir β^- parçacığının ve bir elektronun madde ile etkileşmesi aynıdır.

2.2.3. Elektronların Madde İle Etkileşimi

Elektronların madde ile etkileşiminin temeli Coulomb kuvvetlerine dayanır. Bu etkileşme temel olarak;

1-Elastik Çarpışma

- a) Atomik elektronlarla elastik çarpışma
- b) Bir çekirdekle elastik çarpışma

2-İnelastik Çarpışma

- a) Atomik elektronlarla inelastik çarpışma
- b) Bir çekirdekle inelastik çarpışma

3- Bremsstrahlung (Frenleme Işınımı)

şeklinde olur.

2.2.3.1. Elastik Çarpışma

a) Atomik Elektronlarla Elastik Çarpışma

Gelen elektron etkileştiği atomun elektronlarının alanında elastik olarak sapar. Bu çarpışmada enerji ve momentum korunur. Atomik elektronlara aktarılan enerji onun bağlanma enerjisinden daha küçük olduğundan etkileşme aslında bir bütün olarak atomla olur. Bu çarpışmalar çok düşük enerjili (<100 eV) elektronlar için geçerlidir.

b) Bir Çekirdekle Elastik Çarpışma

Çekirdek ile elektron arasındaki kütle farkı nedeniyle kaybedilen enerji ihmal edilebilir düzeyde düşüktür. Bu enerji eV seviyesindedir. Gelen elektron çekirdeği uyarmadan veya radyasyon yayınlamadan elastik olarak çekirdekten sapar.

2.2.3.2. İnelastik Çarpışma

a) Atomik Elektronlarla İnelastik Çarpışma

Ortama gelen atom atomik elektronlarla inelastik çarpışma yaparak sapar. Böylece atomik elektron ya atomdan uzaklaşır yada uyarılmış duruma geçer. Bunun sonucunda atom uyarılmış yada iyonlaşmış olur. Gelen elektron, önceden inelastik çarpışma yapmış iyon halindeki atomları da uyartabilir. Bu iyonlara “uyarılmış iyon” denir. Gelen elektron atomik elektrona enerjisinin bir kısmını aktarabildiği gibi zayıf bir ihtimalle enerjisinin tümünü de aktarabilir.

b) Bir Çekirdekle İnelastik Çarpışma

Ortama gelen elektron çekirdeğe kadar ulaşip yakalanmama durumunda enerjisinin bir kısmını kaybederek sapar. Bu çarpışmada uyarma olasılığı da vardır fakat çok düşük bir ihtimaldir. Yalnız çok büyük enerji ile gelen elektron çekirdeğe kadar ulaşabilir. Ve çekirdeğe kadar gelebilen elektronlar büyük bir olasılıkla Bremsstrahlung olayı sonucu enerji kaybederler.

Bremsstrahlung olayı olasılığı, elektronun çekirdekle inelastik çarpışma olasılığından çok daha büyüktür.

2.2.3.3. Bremsstrahlung (Frenleme Işını) Olayı

Yüklü parçacıkların başka bir yolla enerji kaybetmesi ise Bremsstrahlung Olayı ile olur. Elektronlar çekirdek yakınından geçerkenki sapmalarından dolayı ivme kazanırlar. Ve Bremsstrahlung Olayı ile enerji kaybederler. Gelen elektronun kaybettiği enerji bremsstrahlung fotonuna aktarılan enerji kadardır. Bir beta parçacığının enerjisinin bir kısmını veya hepsini radyasyon yayınlamasına dönüştürüp dönüştürmeyeceği, meydana gelen sapma miktarına ve hedef çekirdeğe doğru aldığı yola bağlıdır. Sapmasına sebep olan kuvvet, hedefin nükleer yükü (veya Z) ile doğrudan orantılıdır (Martin, 2013).

Enerji kaybı için ;

$$-\frac{dE}{dx} \propto \frac{E n Z^2}{M^2}$$

bağıntısı geçerlidir. dE/dx birim uzunluk başına enerji kaybı, E gelen parçacığın enerjisi, M kütlesi, n ortamın birim hacimdeki atom sayısı, Z ortamın birim hacimdeki atom numarasıdır. Bremsstrahlung yoluyla enerji kaybının iyonlaşma yoluyla enerji kaybına oranı;

$$\frac{(dE/dx)_{rad}}{(dE/dx)_{iyon}} \cong \frac{E Z}{1600mc^2}$$

bağıntısı ile verilir (Yalçın,1999).

2.2.4. Gamaların Madde ile Etkileşmesi

2.2.4.1 Fotoelektrik Olay

Bir gama fotonu bir ortamda atomun iç tabakalarındaki bir elektrona tüm enerjisini aktararak soğurulması ve enerji aktarılan elektronun fırlatılması olayına fotoelektrik olay denir(Lilley,2018;Lamarsh ve Baratta,2001).Şekil 2.2. de gösterildiği gibi, gelen foton, etkileşen elektronun bağlanma enerjisine eşit veya daha çok enerjiye sahiptir, bunun sonucunda gelen

foton tamamen soğurulur. Üretilen elektrona fotoelektron denir ve bir ortamla elektronun etkileşmesinde olduğu gibi etkileşir(Cember,2009).

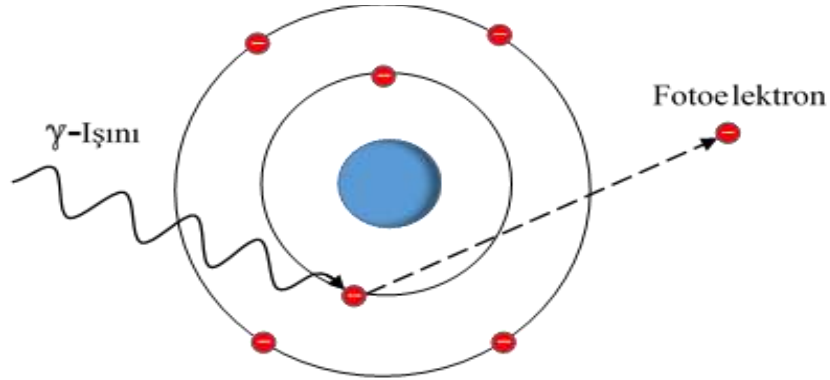
Fotoelektrik olayda, gelen foton sıkı bağlı bir elektron ile çok yüksek ihtimalle K-elektronu ile etkileşir. Yok olan gama fotonunun enerjisi elektronun bağlanma enerjisi ile elektronun kinetik enerjisine dönüşür.

$$E_{\gamma} = h\nu = E_e + E_b \quad (2.2)$$

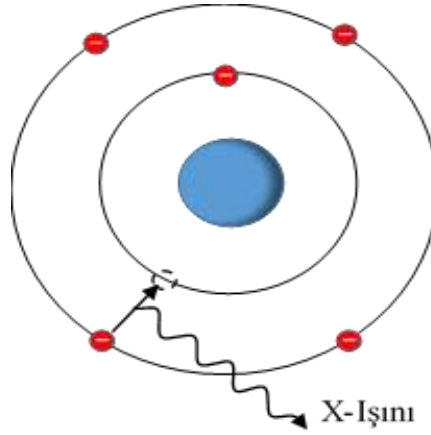
Burada E_{γ} gamanın enerjisi, E_b elektronun bağlanma enerjisi, E_e ise elektronun kinetik enerjisidir. Fotoelektrik olay olma olasılığı enerjiye bağlıdır. Düşük enerjilerde bu olayın olma olasılığı daha fazladır. Gama fotonunun atoma bağlı elektronla etkileşmesinde atom geri tepir. Etkileşmede momentum korunur. Atomun kütlesi büyük olduğundan geri tepme enerjisi küçüktür ve ihmal edilir.

Fotoelektrik olayda fırlatılan elektronun bıraktığı boşluk başka bir yörünge elektronu tarafından doldurulur ve bu geçiş sırasında atomun karakteristik X-ışını yayınlanır. Şekil 2.3.de gösterilmiştir.

Fotoelektrik olayın yüksek atom numaralı(Z) malzemeler ve düşük enerjili fotonlarla(0.5 MeV den daha az) gerçekleşme olasılığı daha yüksektir (Martin 2013; Lilley 2018).



Şekil 2.2. Fotoelektrik olay



Şekil 2.3. X-ışını yayınlanması

2.2.4.2 Compton Saçılması

Compton olayı, bir gama fotonunun bir ortamdaki serbest elektron veya çok zayıf bağlı bir elektronla yaptığı elastik çarpışma olayıdır. Çarpışmadan önce ve sonra momentum ve kinetik enerji korunur. Compton saçılmasında etkileşme sonucunda daha düşük enerjili bir foton ve saçılma açısına bağlı E_e -kinetik enerjili bir elektron saçılır. Şekil 2.4. de süreç gösterilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi elektron ϕ açısıyla, foton ise θ açısıyla saçılır. Compton saçılmasında enerji ve momentumun korunumundan yararlanarak saçılan fotonun ve elektronun enerjisi hesaplanabilir (Martin 2013; Lilley 2018).

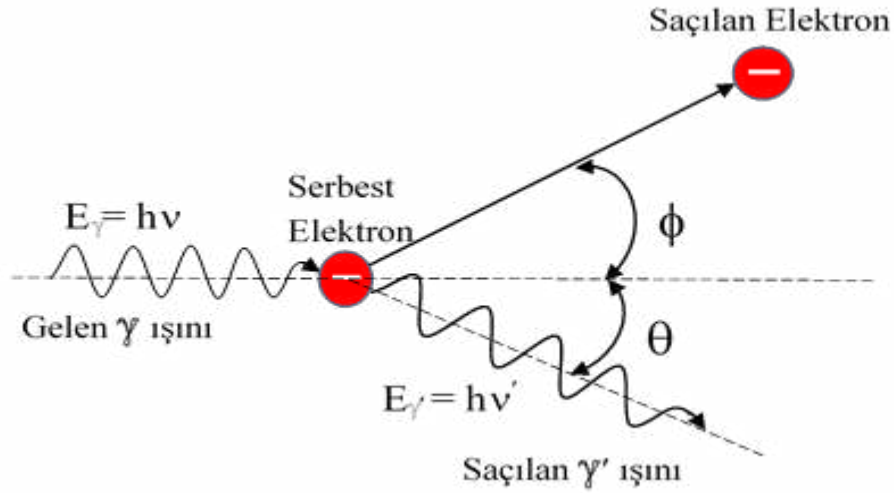
Gelen fotonun enerjisine ve saçılma açısı θ 'ya bağlı olarak saçılan fotonun enerjisi Eşitlik (2.3) ile, saçılan elektronun enerjisi ise Eşitlik (2.4) ile verilir.

$$E' = h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos \theta)} \quad (2.3)$$

Olayda enerji korunduğundan, fırlatılan elektron enerjisi;

$$E_e = h\nu \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos \theta)} \right] \quad (2.4)$$

elde edilir.



Şekil 2.4.Compton saçılma olayı

2.2.4.3Çift Oluşum Olayı

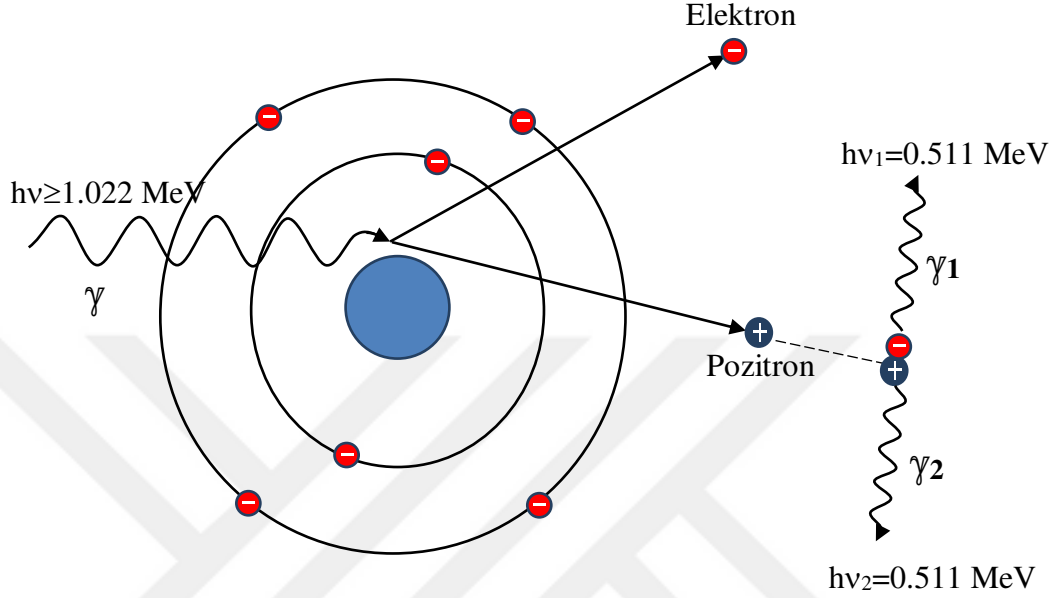
Çift oluşum olayı, Şekil2.5 te gösterildiği gibi enerjisi 1.022 MeV'den daha büyük bir gama fotonu bir çekirdeğin elektromanyetik alanı ile etkileştiğinde bir elektron pozitron çiftine dönüşmesidir. Bu olay gama fotonunun tüm enerjisini kütleleri eşit yükleri farklı elektron pozitron kütlelerine dönüşmesi olayıdır. Bu olay Einstein'in, ($E = mc^2$) kütle-enerji bağıntısının tipik bir örneğidir. Bir elektron ve pozitronun her birinin durgun kütle enerjisi kütleleri eşit olduğundan kütle-enerji bağıntısına göre($E = mc^2$)0.511 MeV'dir. Buna göre toplam durgun kütle enerjisi 1.022 MeV'dir.Bu değer çift oluşum olayının eşik enerjisidir. Bu nedenle çift oluşum olayı meydana gelebilmesi için gama fotonun enerjisi 1.022 MeV den büyük olması gerekir. $E = h\nu$ enerjili bir gama fotonu çift oluşumu yaparak yok olduğunda durgun kütle enerjisi dışındaki enerji $\Delta E = h\nu - 2m_0c^2$ elektron ve pozitron arasında paylaşılır. Ancak bu enerji yük farklarından dolayı eşit miktarda paylaşılmaz (Martin,2013;Cember,2009).

Gama fotonu tamamen yok olur ve bir elektron pozitron çifti meydana gelir. Olayda momentum ve enerji korunur. Arta kalan enerji ise elektron ve pozitronun enerjisi olarak ortaya çıkar. E_{e-} ve E_{e+} ise elektron ve pozitronun kinetik enerjileri olmak üzere aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$h\nu = E_{e+} + E_{e-} + 2m_0c^2 \quad (2.5)$$

Olay sonunda meydana gelen elektron pozitron çifti enerjileri tükeninceye kadar ortamda iyonizasyon ve eksitasyona neden olurlar ve sonunda durgun hale gelirler. Pozitron durgun halde

bir elektronla karşılaştığında yok olur. Ve iki tane 0.511 MeV'lik gama fotonuna dönüşür. Buna “Yok Olma” olayı denir (Acar,1994). Şekil 2.5. de çift oluşum olayı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5.Çift Oluşumu Olayı Şeması

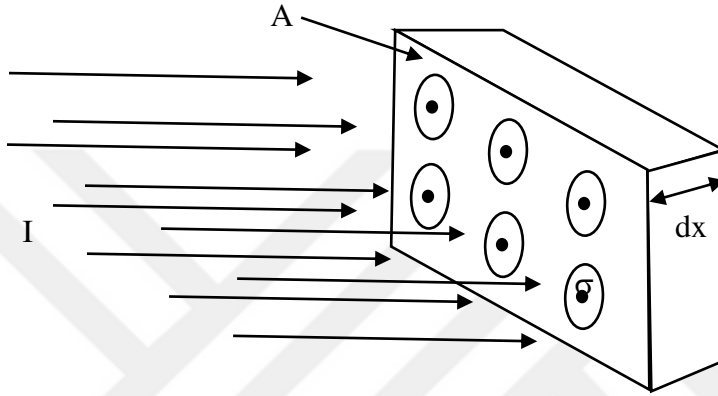
2.3. Tesir Kesiti

Tesir kesiti, iki nükleer yapının etkileşmesinin bir ölçüsüdür. Radyasyon, bir ortamda madde ile etkileşmesi sırasında etkileşebileceği yapıya(genellikle atom) ait aktif bir alan görür. Bu alan söz konusu etkileşmenin tesir kesiti olarak tanımlanır. Örneğin bir gamma ışınının atomik elektronlarla etkileşmesinde elektronlar hareketli olmasına rağmen atomik elektronlarla etkileşimde etkin bir elektron alanı görür. Bu alan, σ_e elektron başına tesir kesiti olarak tanımlanır ve alan birimindedir. Genellikle tesir kesitinin birimi cm^2 olarak verilmesine rağmen, cm^2 'nin büyük ölçü olması nedeniyle barn birimi kullanılır ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$). $Z \cdot \sigma_e$ 'ye atom başına tesir kesiti denir.

$$\sigma = Z \cdot \sigma_e \quad (2.6)$$

Bir madde üzerine düşürülen bir radyasyonun yolu bir atomun etkin alanına rastlarsa etkileşme meydana gelir. Toplam tesir kesiti kavramı atom başına etkileşmelerin (fotoelektrik olay, Compton olayı, çift oluşum olayı vb.) tesir kesitlerinin toplamıdır.

Şekil 2.6. da görüldüğü gibi I şiddetinde bir parçacık demeti yüzey alanı A , kalınlığı dx olan bir hedef üzerilene düştüğünü kabul edelim. Parçacık hedeften geçerken bir atomu çevreleyen etkin alana yeterince yakınsa etkileşme olasılığı yüksektir. Atomu çevreleyen etkin alana σ dersek;



Şekil 2.6. İnce bir hedef üzerine düşen parçacık demeti

Hedefin birim hacmindeki atom sayısı n ise;

$n \cdot dx$: Hedefte olan birim hacimdeki atom sayısı,

$A \cdot n \cdot dx$: Hedefin $A \cdot dx$ hacmindeki toplam atom sayısı

olmak üzere etkileşmenin meydana gelebileceği toplam etkin alan; $A \cdot n \cdot \sigma \cdot dx$ toplam etkin alan olacaktır. Etkin alanın toplam alana oranı f ile gösterilirse;

$$f = \frac{\text{Toplam etkin alan}}{\text{Toplam yüzeysel alan}} = \frac{\sigma \cdot A \cdot (n \cdot dx)}{A} \quad (2.7)$$

olmak üzere, demetin şiddetindeki dI değişimi ise;

$$dI = -fI \quad (2.8)$$

olacaktır. Bu iki bağıntı birleştirildiğinde;

$$\frac{dI}{I} = -n \cdot \sigma \cdot dx \quad (2.9)$$

bağıntısı elde edilir. Negatif işaretin anlamı ise kalınlık ile şiddetin ters orantılı olduğunu gösterir. $x=0$ için $I = I_0$ kabul edersek, eşitliğin her iki tarafının integrali alındığında;

$$I = I_0 e^{-n\sigma x} \quad (2.10)$$

bağıntısı elde edilmiş olur.

2.3.1. Diferansiyel Tesir Kesiti

Birçok nükleer reaksiyonda, açığa çıkan hafif kütleli ürün parçacıkları, gelen demetin doğrultusuna göre izotropik tarzda meydana gelmezler. Nükleer reaksiyon veya saçılma meydana geldikten sonra, dışarı gönderilen parçacıkların dağılımı anizotropik olduğu gibi, farklı açılarda farklı enerjilere sahip olurlar. Diferansiyel tesir kesiti, gelen demet doğrultusuyla bir θ açısı yaparak küçük bir $d\Omega$ atı açısında birim zamanda (bir saniyede) yayınlanan dN tane hafif ürün parçacığının (dışarı çıkan) sayısını göstermek üzere $d\sigma/d\Omega$ ile ifade edilir ve birim katı açı başına tesir kesiti olarak tanımlanıp $\sigma(\theta, \phi)$ ile gösterilirse;

$$\sigma(\theta, \phi) = \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad (2.11)$$

eşitliği ile ifade edilir, eşitliğin integrali alındığında toplam tesir kesiti;

$$\sigma_T = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \quad (2.12)$$

olur.

$$d\Omega = \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (2.13)$$

olarak hesaplanır. Buna göre toplam tesir kesiti;

$$\sigma_T = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{d\sigma}{d\Omega} \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (2.14)$$

olur. ϕ 'ye göre integral alınırsa;

$$\sigma_T = 2\pi \int \frac{d\sigma}{d\Omega} \sin\theta. d\theta \quad (2.15)$$

bağıntısı bulunur.

2.3.2. Gama Işını Lineer Zayıflama Katsayısı

Gama ışınlarının soğurulmasının temel özelliği, homojen bir ışın demetinin ince bir madde tabakasından geçerken ışık şiddetinin üstel olarak azalmasıdır. Kullanılan malzemenin çeşitli kalınlıkları için, gama ışınının soğurulmasının exponansiyel bir şekilde değişir (Knoll, 2010).

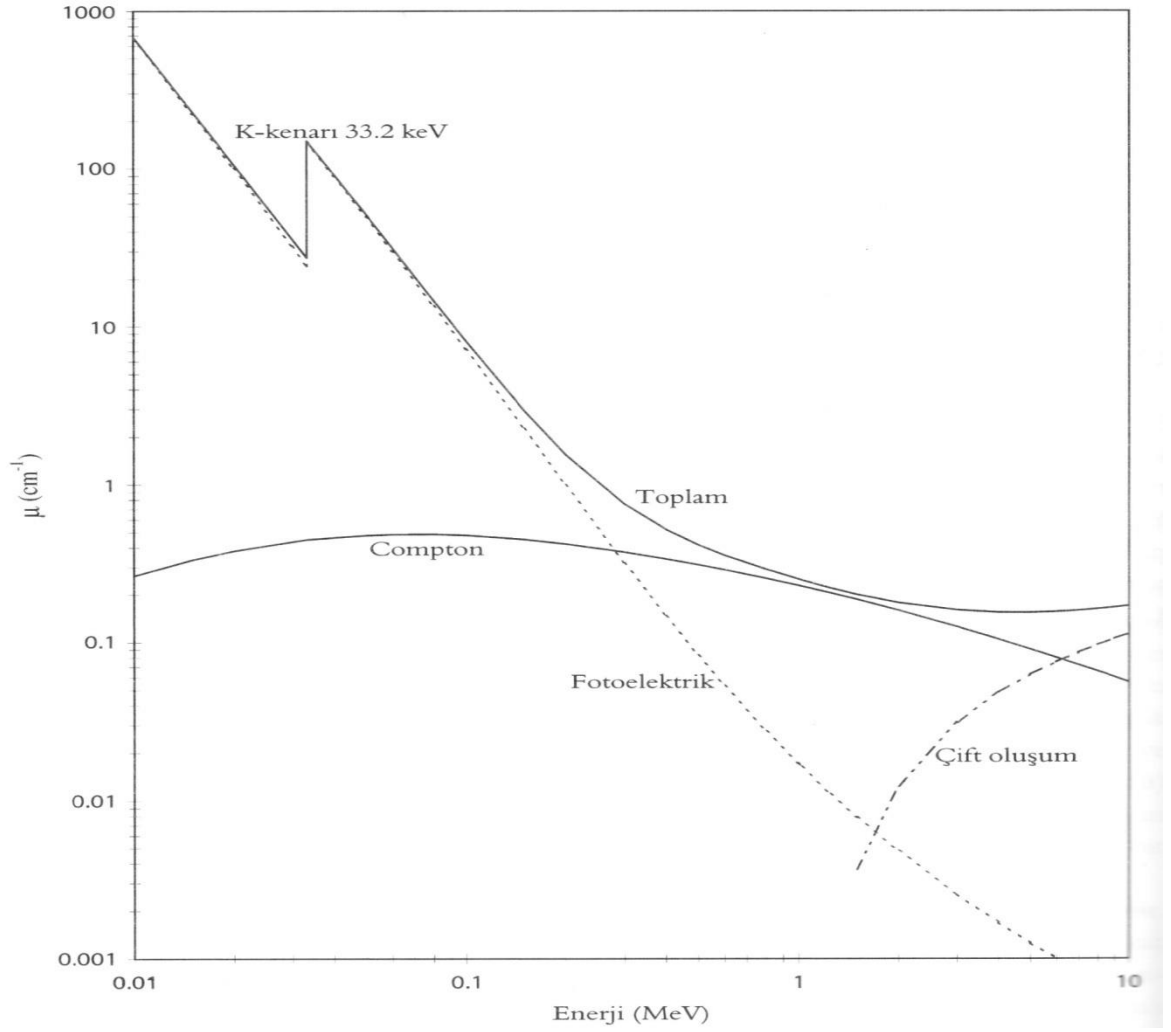
Gama ışınının bir ortamla etkileşme sürecinde, her gama fotonu ortam tarafından soğurulur veya saçılır. Ortam içerisinde birim uzunluk başına soğurulma olasılığı belirlenebilir. Bu olasılık fotoelektrik etki (PE), Compton saçılması (C) ve çift oluşumu (PP) olasılıklarının toplamıdır.

$$\mu = \mu_{PE} + \mu_C + \mu_{PP} \quad (2.16)$$

şeklinde gösterilir ve bu lineer soğurma katsayısıdır. Ortamdan geçen foton sayısı I ve soğurucu ortam olmadan detektöre ulaşan foton sayısı I_0 olmak üzere;

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.17)$$

şeklinde yazılır. Burada x , malzemenin kalınlığıdır. Örnek olarak NaI'ün lineer zayıflama katsayıları Şekil 2.7 de verilmiştir.



Şekil 2.7. Sodyum Iyodürde fotonların lineer soğurma katsayısı(Martin, 2013)

2.4. Radyoaktif Bozunma Yasası

Radyoaktivite istatistiksel bir olay olup bir çekirdeğin ne zaman bozunacağı önceden bilinemez. Ancak, çok sayıda atomun zamanla nasıl bozunacağı istatistiksel olarak bulunabilir (Büget,1992).

Saf bir radyoaktif numunenin zamanla bozunma hızının üstel yasaya uyduğu radyoaktifliğin keşfedildiği 1896 yılını izleyen üçüncü yılda gösterilmiştir. Eğer birt anında N radyoaktif çekirdek varsa ve numuneye yeni çekirdekler ilave edilmiyorsa t anını izleyen dt zamanı içinde bozunan atomların sayısı dN , N ve dt ile orantılıdır.

$$dN = -\lambda N dt \quad (2.18)$$

Burada, eksi (-) işareti atomların sayısının zamanla azaldığını gösterir. λ ise bozunma veya parçalanma sabitidir ve radyoaktif bir atomun birim zamanda bozunma olasılığı olarak tanımlanır. Bir atomun yaşı ne olursa olsun bozunma olasılığının sabit kaldığı kabul edilmektedir ve her radyoaktif atom için de ayrı bir bozunma sabiti değeri vardır. Örneğin; radon için bu değer 0.0075/saat veya 0.000125/dakika'dır (Fişne,2002).

Eşitlik (2.18) ile verilen diferansiyel denklemin çözümü, $t=0$ anındaki atomların sayısı N olmak üzere,

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.19)$$

üstel radyoaktif bozunma yasasını verir. Burada N , t anında var olan radyoaktif atomların sayısıdır. Ancak çoğu kez, verilen bir numunedeki atomların sayısı yerine birim zamanda bozulan atomların sayısını bilmek daha yararlıdır.

2.4.1. Aktiflik

Aktiflik (A), numunede birim zamanda bozunma sayısı yani bozunma hızı olarak tanımlanır ve birimi bozunma/s'dir. Eşitlik (2.18) ve Eşitlik (2.19) bağıntıları yardımıyla bir radyoaktif maddenin aktifliği,

$$A = \frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \quad (2.20)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. $t=0$ anında başlangıç aktifliği $A_0 = -\lambda N_0$ ise bu diferansiyel denklemin çözümü;

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.21)$$

şeklinde olur. Burada aktifliğin de radyoaktif atomların bozunması gibi üstel azalmaya uyduğu görülebilir. Buna göre deneyde atomların zamanla azalması yerine aktifliğin azalmasını gözlemlemek yeterlidir (Gedikoğlu, 1988).

2.4.2. Yarı Ömür

Bir radyoaktif maddede başlangıçta var olan atomların sayısının yarıya inmesi için geçen zamana “yarı ömür” denir. Yarı-ömür (T) ile bozunma sabiti (λ) arasındaki ilişki Eşitlik (2.21) bağıntısı ile bulunabilir. $t = T$ için ve $N(t) = N_0 / 2$ olduğundan,

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \quad (2.22)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntıdan,

$$T = \frac{0,693}{\lambda} \quad (2.23)$$

eşitliği yazılabilir. Buna göre yarı ömür ile bozunma sabiti ters orantılıdır.

2.4.3. Ortalama Ömür

Bozunmanın eksponansiyel ifadesi, radyoaktif atomların sayısının sıfır olması için sonsuz zaman gerektiğini belirtir. Radyoaktivitenin istatistiksel karakteri nedeni ile radyoaktif bir atomun ömrü, sıfır ile sonsuz arasında herhangi bir değerde olabilir. Buna göre bir atomun ne kadar yaşayacağı bilinemez, ancak bir grup atomun ortalama ömründen söz edilebilir (Valkoviç, 2000). Bu nedenle radyoaktif atomlar için yarı ömürden farklı bir tanım verilir. τ “Ortalama Ömür” (bazen yalnızca ömürde denir) radyoaktif atomların tek tek ömürleri toplamının ortalamasıdır. $t_1, t_2 \dots$ ömürlerine sahip atomlarının sayıları sırası ile $dN_1(t), dN_2(t), \dots$ ise ortalama ömür aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\tau = \frac{t_1 dN_1(t) + t_2 dN_2(t) + \dots}{dN_1(t) + dN_2(t) + \dots} = \frac{t dN(t)}{dN(t)} \quad (2.24)$$

Burada ($dN \rightarrow 0$) için

$$\tau = \frac{\int_0^{N_0} t dN(t)}{\int_0^{N_0} dN(t)} = \frac{\int_0^{N_0} t dN(t)}{N_0} \quad (2.25)$$

yazılabilir. Esitlik (2.24) bağıntısı kullanılıp integral alınırsa,

$$\tau = -\lambda \frac{\int_0^{\infty} t N_0 e^{-\lambda t} dt}{N_0} = \int_0^{\infty} \lambda t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2.26)$$

elde edilir. Buna göre ortalama ömür yarı ömürden daha büyüktür ve aralarındaki ilişki;

$$T = \frac{0.693}{\lambda} = 0.693\tau \quad (2.27)$$

şeklindedir. Bu üç kavramdan birinin bilinmesi diğerlerinin bulunması için yeterlidir.

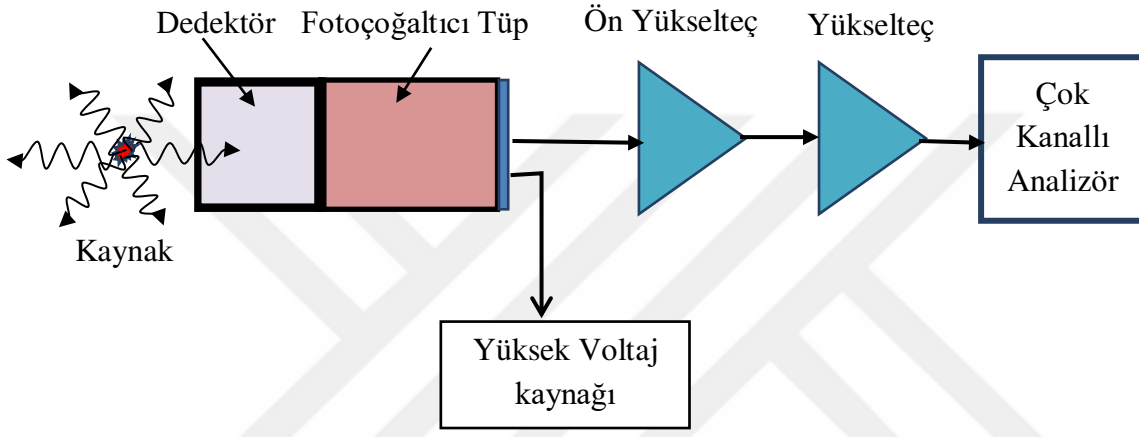
2.5. Radyasyon Dedektörleri

Radyasyon dedektörleri, radyasyonun madde ile etkileşmesi sonucunda kendine özgü bir sinyal üretir. Dedektörlerin çoğu parçacıkların dedektörde meydana getirdiği iyonizasyon ile çalışır. Dedektörler radyasyonun varlığını, enerjisini ve tipini belirler. Bazı dedektörler farklı radyasyon tespitinde kullanılabilirler, fakat çoğu yüklü parçacıklar veya termal nötronların tespiti için tasarlanmaktadır. Gama ışınları ve nötronlar gibi yüksüz parçacık ve radyasyonlar ikincil yüklü parçacıklar yardımı ile iyonizasyon oluştururlar (Lilley,2018;Price,1958).

Radyasyon normal insan duyu organları tarafından tespit edilemediğinden radyasyonun varlığını, radyasyonun özelliklerini ve miktarını ölçmenin bir yolu olmalıdır. Bu amaçla tasarlanan cihazlar radyasyon dedektörleri olarak bilinir. Birçok alet vardır, ancak radyasyon dedektörünün temel şartı, radyasyon ile cihazın tepki büyüklüğü radyasyonun etkisiyle orantılı olacak şekilde etkileşime girmesidir (Jenkins,Harbison vd.,2006).

Nükleer radyasyonları tespit etmek için kullanılan tüm dedektörlerin temel çalışma ilkeleri benzer özelliklere sahiptir. Radyasyon (ışınım) dedektöre girer dedektör materyali atomlar ile etkileşir (enerjisinin bir kısmını veya tamamını kaybeder) ve atom yörüngelerinden nispeten düşük enerjili elektronların salınmasına neden olur. Bu elektronlar toplanır ve analiz edilmek

üzere elektronik devre tarafından ya akım pulsu yada voltaj şeklinde dönüştürülür. Ölçülecek radyasyon tipine göre radyasyon materyali belirlenmektedir. Radyoaktif bozunmalardan salınan α parçacıkları veya düşük enerjili nükleer reaksiyonlardan yayınlanan yüklü parçacıkların katılardaki maximum menzili $100 \mu m$ 'den küçüktür. β bozunumlarında yayınlanan elektronlar için bu kalınlığın 0.1-1 mm arasında olması gerekirken γ 'lar için bu aralık daha fazladır ve hatta 5cm kalınlıklı dedektörler yüksek enerjili fotonları (MeV veya daha fazla) elektronik pulslara çevirmek için yeterli olmayabilir (Krane,2001). Şekil 2.8. de radyasyon ölçme sistemleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Radyasyon ölçme sistemlerinin şematik gösterimi

Dedektörlerin birçok sınıflandırması vardır, ancak ana gruplandırma radyasyon etkilerine dayanmaktadır. Radyasyonların etkileri doğada fiziksel veya kimyasal olabilir. Mevcut dedektörlerin çoğu, elektrik, ışık, termo-lüminesans ve ısı gibi fiziksel etkileri kullanır (Cember,2009). Tablo 1 radyasyonların tespiti ve ölçümü için kullanılan farklı radyasyon etkilerini gösterir.

Radyasyon ölçme sistemleri, dedektör yapısına göre şu şekilde sınıflandırılabilir:

1. Gaz dolu dedektörler
2. Yarı iletken dedektörler
3. Sintilasyon dedektörleri.

En yaygın kullanılan radyasyon dedektörleri, radyasyonları ölçmek ve tespit etmek için elektrik ve ışık efektleri kullanır. Partikül sayım dedektörleri, radyasyonun elektriksel etkilerine dayanan basit çalışma prensibi ile en popüler olanlardır. Partikül sayma dedektörleri ayrıca dört ana tipe ayrılabilir; yani gaz dolu sayaçlar, orantılı sayaç, iyonizasyon odası sayacı ve Geiger-Muller sayacı (Jenkins,Harbison vd., 2006). Çalışmalarının ana ilkesi, alfa, beta veya gama

ışınları gibi iyonlaştırıcı parçacıkların bir dedektörden geçirilmesidir, bu dedektörlerde kullanılan ortamın iyonlaşmasına neden olur, örneğin gaz atomlarının iyonlaşmasına neden olur. Bu iyonizasyon etkisi, radyasyon miktarı ile orantılı olan ve ölçülebilen elektrik sinyali üretmek için kullanılır (Cember,2009).

Çizelge 2.1. Radyasyon etkisi ve dedektör çeşitleri

Etki	Alet Türü
Elektiriksel	Orantılı sayaç
	İyon odası
	Geiger Muller sayacı
	Katı hal dedektörü
Kimyasal	Kimyasal Dozimetre
	Film Rozeti
Işık	Sintilasyon sayacı
	Optik ışıldayan dozimetre
	Cherenkov sayacı
Sıcaklık	Kalorimetre
Termo-ışıldama	Termo-İşıldayan Dozimetre (TLD)

2.5.1. Gaz Dolu Dedektörler

Gaz doldurulmuş dedektörler iyonizasyon dedektörleri olarak da adlandırılırlar. Radyasyonun oluşturduğu iyonizasyon akımını ölçerler. İyonlaştırıcı radyasyonun gaz ortamı içerisinde oluşturduğu iyonlar, elektrik olarak yüklü parçacıklardır. Silindirik bir kap içerisine yüksek basınçta genellikle hava, helyum, argon gibi bir gaz doldurulmuştur. Bu gaz anod (pozitif) ve katod (negatif) olarak bilinen iki elektrot arasına sıkıştırılır. Zıt yüklü olan bu elektrotlar arasında bir elektrik alan yaratılır. İyonlaştırıcı radyasyon gaz molekülleri ile etkileşerek gazı iyonlarına ayırır. Pozitif iyonlar katoda, negatif iyonlar anoda göç eder ve iki zıt kutup arasında bir iyon ya da iyonizasyon akımı meydana gelir. Oluşan bu akımın şiddeti gelen radyasyonun şiddeti ile orantılı olarak değişir. Gaz dolu dedektörler, pozitif ve negatif elektrotlar arasındaki uygulanan gerilim farkına göre; iyon odası, orantılı sayaç ve Geiger-Müller dedektörleri olarak üçe ayrılır.

2.5.2. Yarı İletken Dedektörler

Yarı iletken dedektörler silisyum veya germanyum gibi tek kristalden oluşan yarı iletken materyalden oluşur. Katıların band yapısına göre bir yarı iletkende dolu valans bandı ve yaklaşık 1 eV olan bir yasak enerji aralığının üstünde bir iletkenlik bandı bulunur. Valans bandından bir elektronu uyararak ve iletim bandına geçirmek için yaklaşık 3 eV enerji gerekir. İletim bandına uyarılan elektron valans bandında bir deşik bırakır. Deşik elektronla aynı özellikler sahip pozitif bir yük gibi davranır. Yarı iletken bir elektriksel potansiyel uygulanırsa deşikler katoda elektronlar anoda hareket ederler ve bu iki yükün hareketinden bir akım oluşur. Bir yarı iletken bir radyasyonun oluşturduğu elektron-deşik çiftlerinin hareketinden kaynaklanan bu akım bir elektronik devre ile çözümlenirse radyasyonun özellikleri (enerjisi, aktivitesi gibi) belirlenebilir. Bu şekilde tasarlanan dedektörlere yarı iletken dedektörler denir. Gazlı dedektörlerde bir iyon çifti oluşturmak için yaklaşık 25 eV enerji gerekirken yarı iletkenlerde bir elektron deşik çifti oluşturmak için yaklaşık 3 eV enerji gerekir. Bu nedenle yarı iletken gazlı ortama göre aynı enerji aktarımında yarı iletken daha çok sayıda elektron deşik çifti oluşur ve istatistiksel sapmalar daha küçük olur. Bu tür malzemeler ve bu teknoloji çok iyi foton çözünürlüğünü sağlayan yüksek verimli yarı iletken dedektörlerin üretilmesi avantajını sağlamıştır. Gazlı ve sintilasyon dedektörlerine göre enerji çözünürlüğü çok daha iyidir. Olumsuz tarafları ise düşük sıcaklıkta çalışması (sıvı azot sıcaklığı) maliyetinin diğer tür dedektörlere göre yüksek olmasıdır.

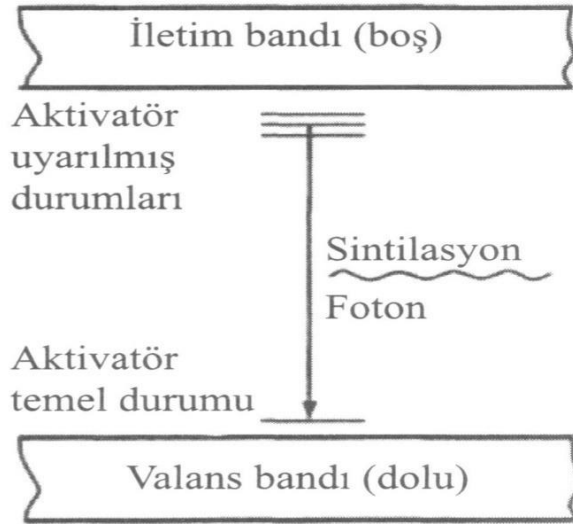
2.5.3. Sintilasyon Dedektörleri

Bir sintilasyon dedektörü, iyonlaştırıcı bir parçacığın kinetik enerjisini, sintilasyon malzemesi tarafından üretilen bir ışık parıltısına veya sintilasyona dönüştüren bir cihazdır (Cember,2009). Sintilasyon dedektörleri, nükleer fizik, nükleer tıp, çevre ve gama ışını spektrometresi vb. gibi birçok uygulamaya sahiptir. Ayrıca radyasyon için yüksek sayım verimleri, geniş enerji spektrumunu ölçme, bir ortamda çalışma kabiliyetleri, yüksek sayım yani 100 sayım/s ve üstün zaman çözünürlüğü ile tanındıklarından da onlara önem verilir(Jenkins,Harbison vd.,2006). Genel olarak, gama ve X-ışınları, nötronlar ve yüklü parçacıklar dahil olmak üzere çeşitli radyasyonları tespit etme yeterliliği, sintilasyonların boyut ve esnekliği nükleer uygulamalar için onları en iyi seçenek haline getirmektedir (Cember,2009).

2.5.3.1. Sintilasyon Dedektörlerinin Çalışma Prensibi

Sintilasyon dedektörlerinin çalışma prensibi, dedektör ortamında foton veya radyasyonun soğurulan enerjisini ışık sinyaline dönüştürmeye dayanır. Fotoçoğaltıcı tüpler veya fotodiyot, ışık sinyalini çıkışı güçlendirilmiş elektrik sinyaline dönüştürmek için kullanılır ve pulsun büyüklüğü, radyasyonun bir ölçüsü olan parılayan malzemenin kristalindeki soğurulmuş enerji ile orantılıdır. Bu dönüşümün ardındaki olay, radyasyonun madde ile etkileşimi, özellikle de gama ışınlarının bahsedilen fotonunun etkileşimi ile ilgilidir. Bahsedilen fotonunun sintilatör kristali ile etkileşimi fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift üretim mekanizmalarıdır (Cember,2009).

Gama ışınları enerjisi kristal tarafından soğurulduğunda, elektronlar uyarılır ve değerlik bandından iletim bandına geçer ve değerlik bandında bir elektron eksikliği bırakır. Bu elektron, bir foton ışığını serbest bırakarak iletim bandına geri döner. Uyarılmış elektronun iletim bandından değerlik bandına geri dönüşü saf NaI kristalinde verimsiz bir işlemdir. Kristaldeki aktivasyon bölgelerini artırarak absorbe edilen enerjiyi ışığa dönüştürme verimliliğini arttırmak için saf NaI saf kristaline talyum safsızlığı eklenir (Cember,2009). Işık sinyalleri daha sonra fotoçoğaltıcı tüp kullanılarak elektrik sinyallerine dönüştürülür (Abbas ve Noureddeen,2011). Şekil 2.9. dainorganik sintilatör materyalinin elektronik bant yapısı verilmiştir.



Şekil 2.9. Bir saf kristalin valans ve iletim bandı arasındaki banttaki enerjilerde aktivatör durumlarının bulunması halinde inorganik sintilatör materyalinin elektronik bant yapısı (Lilley,2018)

2.5.3.2. Sintilasyon Malzemeleri

Sintilasyon sayaçları, uygun sintilasyon maddesini kullanarak radyasyonları tespit eder. Sintilasyon maddesi en iyi sintilatör olmak için aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır (Moszyński, 2005).

- İyi optik kaliteli malzeme ve pratik kullanım için yeterli büyüklük.
- Radyasyon enerjisini ışık sinyaline dönüştürme yüksek verimliliği.
- Enerjinin ışık sinyaline dönüştürülmesi orantılı olmalıdır.
- Hızlı çıkış sinyalinin üretilebilmesi için uyarılmış ışıldamanın kısa bozunma süresi.

Şimdiye kadar mevcut olan parıldayan malzemeler tüm bu özelliklere sahip değildir, bu nedenle dedektör için en iyi malzeme seçimi her zaman bu istenen özellikler arasında bir değiş tokuştur (Moszyński, 2005).

Radyasyon saptama amacıyla kullanılan sintilasyon maddeleri sodyum NaI(Tl), talyum katkılı KI(Tl) ile aktive edilen potasyum iyodür kristalleri, talyum katkılı Cs(Tl) ve antrasen vb. ile aktive edilen sezyum iyodür kristalleridir (Cember,2009).

Çizelge 2.2. Bazı İnorganik Sintilatörlerin Özellikleri

Materyal	Maksimum salınım dalga boyu (nm)	Sintilasyon verimi (%)	Azalm zamanı (µs)	Yoğunluk (10 ³ kg/m ³)
NaI(Tl)	410	100	0.23	3.67
CaF ₂ (Eu)	435	50	0.94	3.18
CsI(Na)	420	80	0.63	4.51
CsI(Tl)	565	45	1.00	4.51
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	480	8	0.30	7.13
CdWO ₄	530	20	0.90	7.90
LiI(Eu)	470	30	0.94	3.49

2.6. Dedektör Özellikleri

Detektör özelliklerinden biri detektörün verimidir. Verim, bir radyoaktif parçacığın dedektör tarafından sayılma olasılığıdır. Dedektöre giren aynı cins parçacıklardan her biri için verim farklıdır. Verim parçacığın geliş doğrultusuna, açısına ve dedektöre girdiği yere bağlıdır. Detektör verimini ölçmek istediğimiz niceliğe bağlı olarak;

1. Toplam verim

2. Öz verim
3. Tüm enerji pik verimi
4. Tüm enerji pik özverimi
5. Geometrik verim
6. Pik sayımının toplam sayıma oranı

olarak sınıflandırabiliriz.

Ayrıca enerji ölçümleri için önemli olan, enerji çözünürlüğü de önemli bir detektör özelliğidir.

2.6.1. Toplam Verim (Total Efficiency ($\mathcal{E}$))

Bir kaynaktan N_k adet parçacık yayınlanıyorsa, dedektöre yönelerek dedektöre giren parçacık sayısı N_g ve dedektörde sayılan parçacık sayısı N_s ise; dedektör tarafından oluşturulan puls sayısının kaynaktan tüm doğrultularda yayınlanan parçacık sayısına oranı toplam verimi verir.

$$\mathcal{E} = N_s / N_k \quad (2.28)$$

2.6.2. Öz Verim (Intrinsic Efficiency ($\mathcal{E}_i$))

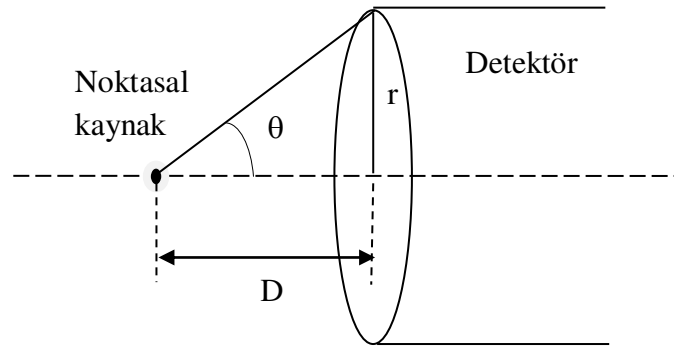
Dedektör tarafından oluşturulan puls sayısının dedektöre yönelip dedektöre giren parçacık sayısına oranı öz verimi verir.

$$\mathcal{E}_i = N_s / N_g \quad (2.29)$$

2.6.3. Geometrik Faktör

Kaynak-dedektör geometrisi için, kaynağın dedektörü gördüğü katı açının kaynağın tüm uzayı gördüğü katı açısına oranı geometrik faktör olarak tanımlanabilir. Şekil 2.10 da gösterildiği gibi kaynak-dedektör uzaklığı D , dedektör yarıçapı r olmak üzere geometrik faktör Eşitlik (2.30) ile hesaplanır.

$$G = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{D}{(r^2 + D^2)^{1/2}} \right] \quad (2.30)$$



Şekil 2.10.Noktasal Kaynak Silindirik Dedektör

Ayrıca geometrik faktör izotropik bir kaynaktan yayınlanan,dedektöre yönelen radyasyon sayısının kaynaktan tüm doğrultularda yayınlanan radyasyon sayısına oranı olarak da tanımlanabilir.

$$G = N_g / N_k \quad (2.31)$$

Topam verim, öz verim ve geometrik faktör arasında,

$$\mathcal{E} = G \cdot \mathcal{E}_i \quad (2.32)$$

bağıntısı elde edilir (Yalçın,1999).

2.6.4. Tüm Enerji Pik Verimi(Full Energy Peak Efficiency($\mathcal{E}_f$))

Toplam gama-ışını enerjisinin soğurulmasıyla meydana gelen fotopiki oluşturan sayma sayılarının(N_{pik}) kaynaktan yayınlanan gama ışınlarının sayısına oranı olarak tanımlanır.

$$\mathcal{E}_f = N_{pik} / N_k \quad (2.33)$$

2.6.5. Tüm Enerji Pik Öz Verimi (İntrinsic Full Energy Peak Efficiency ($\mathcal{E}_{inf}$))

Toplam gama ışını enerjisinin soğurulmasıyla meydana gelen fotopiki oluşturan sayma sayılarının detektöre giren gama ışınları sayısına oranı olarak tanımlanır.

$$\mathcal{E}_{inf} = \mathcal{E}_f / G \quad (2.34)$$

2.6.6. PikDeğerininToplamSayıyaOranı (Full Energy Peak-to-Total Ratio (Rp))

Toplam gama ışını enerjisinin soğurulmasıyla oluşan fotopik sayma sayılarının toplam sayma sayısına oranı olarak tanımlanır.

$$Rp = N_{pik} / N_s \quad (2.35)$$

2.6.7. Ölü Zaman

Ölü zaman dedektörün arka arkaya gelen iki etkileşimi anlamlandırabilmesi için gerekli zamana denir. Ölü zamanı büyük olan cihazlar özellikle yüksek şiddetteki radyasyon alanlarında kullanılmamalıdır.

Hemen hemen tüm dedektör sistemlerinde, iki olayı iki ayrı atım olarak kaydedilebilmeleri için ayırmaları gereken minimum süre vardır. Bazı durumlarda sınırlama süresi dedektörün kendisindeki süreçlerle ayarlanabilir ve diğer durumlarda sınır ilgili elektronik sistemlerde ortaya çıkabilir. Bu minimum zaman ayırımına sayma sisteminin ölü zamanı denir. Radyoaktif bozunumun rastgele doğası nedeniyle, bir önceki olayın ardından çok hızlı gerçekleştiği için gerçek bir olayın kaybedilme olasılığı her zaman vardır. Bu ölü zaman kayıpları, yüksek sayım oranları ile karşılaşıldığında oldukça ciddi hale gelebilir ve bu koşullar altında yapılan herhangi bir doğru sayım ölçümü, bu kayıplar için bir miktar düzeltme içermelidir (Knoll,2010).

2.6.8. Enerji Çözünürlüğü

Birbirine yakın enerji değerlerini ayırt etme özelliğine dedektörün çözünürlüğü denir. FWHM(Full WithHalf Maximum) enerji pikinin yarı yüksekliğindeki genişliği, enerji ayırma gücünü verir. “FWHM” nin küçük olması yakın değerli enerji piklerini ayırmada başarılı bir dedektör kullanıldığı anlamına gelir. FWHM, piklerin kuyruk kısmından kaynaklanacak hataları düzeltmeye yardımcı olur. Çözünürlük kalitesi arttıkça yarı yükseklikteki tam genişlik azalacaktır. 3x3 lük bir NaI(Tl) dedektörü için rezülasyon %7.5’den %8.5’e değişmektedir. Gama ölçüm sistemi olarak NaI(Tl) sintilasyon detektörü kullanılmıştır, enerji rezolüsyonu Co-60; 1332 keV’lik gama enerjisi için %2.1 olup, “Full With Half Maximum” 70.44 dir (Hatipoğlu,2017).

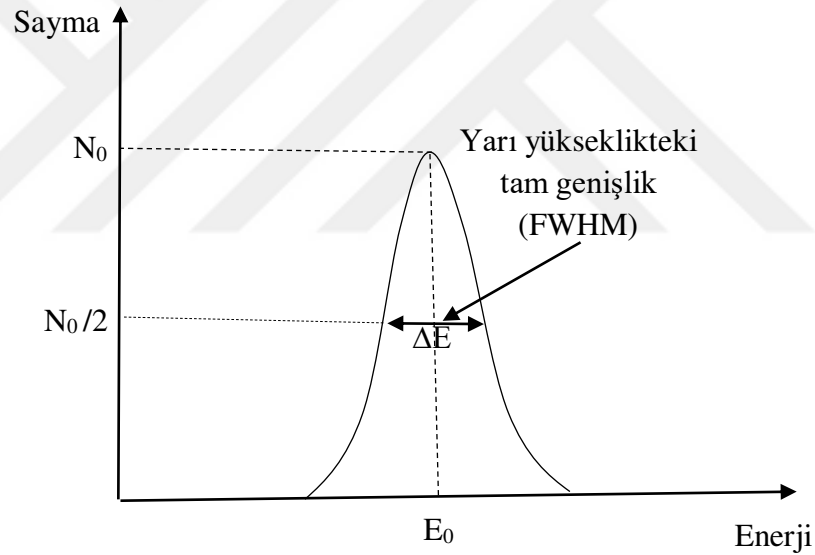
NaI(Tl) sintilasyon dedektörlerinin enerji çözünürlüğünü etkileyen birkaç tane istatistiksel olmayan etken bulunur. Bunların birkaç tanesi; sintilatörde olduğu yer, fotokatoda

bir fotonun ulaşma olasılığıdır. Ve fotokatot verimi yüzey genelinde değişiklik gösterir. Bu istatistiksel etkenler dedektörün enerji çözünürlüğünü azaltır. 660 keV'lik γ ışını için enerji çözünürlüğü yaklaşık 50 keV olarak hesaplanmıştır (Lilley,2018).

Ayrıca fotopikin genişliği, detektörde iyonizasyon oluşturan her bir olayı izleyen her bir adımın istatistiksel dalgalanmalarının bir sonucu olarak belirlenir. Bunlar,

- 1- İlk eletronun kinetik enerjisinin ışığa dönüşümü,
- 2- Fotokatoda fotonların ilşetilmesi ve ışık toplama verimi,
- 3- Fotonların fotoelektrona dönüşümünde fotokatot verimi,
- 4- İlk ikincil dinod üzerinde elektronların odaklanması için fototüp içindeki elektron optiğinin verimi,
- 5- Dinod yapısı içindeki elektron çoğaltma,

Sintilasyon sürecindeki bu adımların hepsi elektron çoğaltıcının anodunda görünen puls genliğinin istatistiksel değişimini büyük ölçüde etkiler (Heath R.L., 1964).



Şekil 2.11. Enerji çözünürlüğü

$$\text{Enerji Çözünürlüğü} \quad R = \frac{\Delta E}{E_0} \quad (2.36)$$

$$\% \text{ Enerji Çözünürlüğü} \quad \% R = \frac{\Delta E}{E_0} \times 100 \quad (2.37)$$

2.7. Monte Carlo Benzetişim Yöntemi

Monte Carlo yönetiminin genel mantığı sayısal olarak bir deneyin modellenmesine dayanır. Ve günümüzde birçok kullanım alanı vardır. Nükleer fizik, yüksek enerji fiziği, katıhal fiziği, atom ve molekül fiziği bu alanlardan sadece birkaç tanesidir. Bir deneyi sayısal olarak modellemek için 0 ile 1 arasında değerler alan düzgün dağılımlı gelişigüzel sayılar kümesi kullanılmaktadır. Ve bunlar “q” ile temsil edilir. Elimizde 0-1 arası sayıların yazılı olduğu bir torba olduğunu farzedelim. Ve bu torbadan gelişigüzel bir sayı çekelim fakat ektiğimiz sayıyı geri torbaya geri atmak koşulu ile. Bu durumda her bir sayının gelme olasılığı eşit olur. Monte Carlo benzetişim yönteminin mantığını bu şekilde kabul edebiliriz. 0-1 arası düzgün dağılımlı gelişigüzel sayılar bir bağıntı yardımı ile üretilebilir (Ergül, 1987). Bu tekniğe hakim bir kullanıcı kendi çalışma alanına göre her alanda modelleme ve benzetme yapabilme yeteneğine sahip olur kendi Input dosyalarını yazar, olay senaryosunu oluşturur, programını aktif şekilde kullanır ve çalışma sonucunda elde edilen verilerin analizini yaparak ortaya bir sonuç getirir.

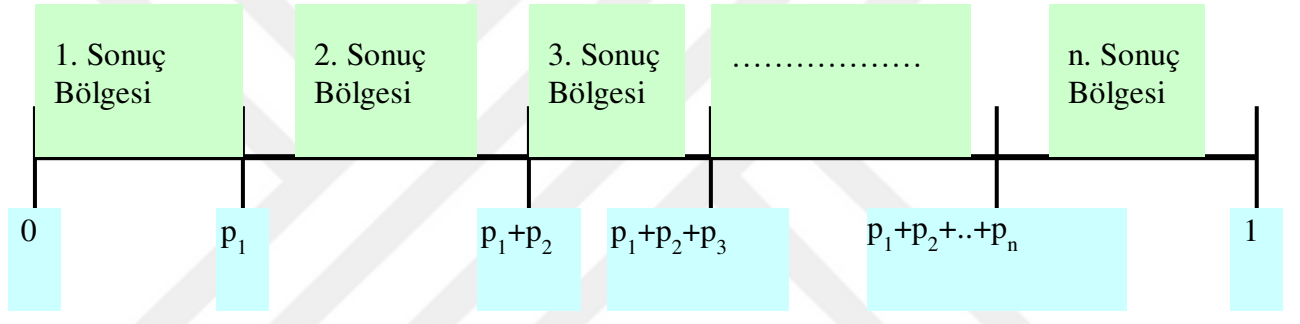
Monte Carlo, rastgele sayıları baz alarak tahmini sistemleri modeller, hücre simülasyonu, borsa modelleri, dağılım fonksiyonları, sayısal analiz, doğal olayların simülasyonu, atom ve molekül fiziği, nükleer fizik ve yüksek enerji fiziği modellerini test eden simülasyonlar. Yukarıdaki modellerde tahminler yapabilmek için; Rastgele sayı üretilir, bunun için programlama bilgisi gerekmektedir.

1. Programlama: Temel düzeyde Monte Carlo programları öğrenildikten sonra, Monte Carlo üreteçlerini oluşturabilmek gerekmektedir. Teorik eğitimin yanında örneğin C, C++ gibi bilimsel çalışmalarda sıklıkla kullanılan programları iyi derecede bilmek gerekmektedir.
2. sistemlerin benzetiminde kullanılır. Genelde raslantısal değişkenlerin sisteme etkisinin incelenmesi için kullanılır. Genelde raslantısal değişkenler için rastgele sayılar üreten bir algoritma ile çalışır. Teorik: Programlama aşamasına geçmeden önce problemi ya da deney sistemimizin teorisini çok iyi oluşturmamız gerekmektedir.

Monte Carlo Benzetimi yapılacak değişkenler belli bir istatistiksel dağılıma uyacak şekilde üretilebilir. Bunun için olasılık dağılım fonksiyonunun tersi kullanılır. Bilgisayar tarafından belirli bir aralıkta [0 - 1] düzenli olarak üretilen rastgele sayılar olasılık dağılım fonksiyonlarının tersi kullanılarak kolaylıkla herhangi bir dağılıma dönüştürülebilir(https://tr.wikipedia.org/wiki/Monte_Carlo_benzetimi).

2.7.1. Temel Monte Carlo İlkesi

Bir deney veya ölçme bir olay olarak tanımlanabilir. Bir olayın belli olasılıklarla ortaya çıkan çeşitli sonuçları vardır. Bu sonuçların her biri de bir olay olarak görülebilir. İnelastik saçılma, bremsstrahlung da birer olaydır. Örnek olarak, elastik Örneğin, elektronun bir ortamla etkileşmesi bir olay, bu olayın sonuçlarından olan elastik saçılma, saçılmada elektronun belli bir θ açısına saçılması elastik saçılma olayının bir sonucudur. Bir olayda n tane sonuç ortaya çıkmış olsun. Sonuçların ortaya çıkma olasılıkları $p_1, p_2, \dots, p_n$ olsun. Gelişigüzel sayılar kullanarak bu olayı taklit etmek isteyelim. 0 ile 1 arasında değer alan gelişigüzel sayı(q) eksenini Şekil 2.12. de görüldüğü gibi n tane bölgeye ayrılabilir. Her bir bölgenin genişliği, o sonucun ortaya çıkma olasılığı kadar olsun.



Şekil 2.12. Gelişigüzel sayı ekseninin n tane sonuç bölgesine ayrılması

Şekilde sonuç bölgelerine ayrılmış gelişigüzel sayı eksenini üzerinde p_1 olasılıkla belirlenen miktarı 1. sonuç, p_2 olasılıkla belirlenen miktarı 2. sonuç, p_n ile belirlenen miktarı n . sonuç olarak ayrılmış olur. Türetilen gelişigüzel bir sayı(q) hangi sonuç bölgesine düşmüşse o sonucun meydana geldiği kabul edilir. Bir başka deyişle,

$0 < q < p_1$ ise 1. sonuç,

$p_1 < q < p_1 + p_2$ ise 2. sonuç,

$p_1 + p_2 + \dots + p_{n-1} < q < p_n$ ise n . sonuç

meydana geldiği kabul edilir.

2.7.2. Temel Örnekleme İlkesi

Belirli bir deneyde(olayda) x sonucunun $a \leq x \leq b$ aralığında sürekli değerler aldığını ve ard arda ölçümlerde çeşitli x değerlerinin ölçülme sıklık fonksiyonunun $F(x)$ olduğunu kabul edelim.Monte Carlo yönteminin temel ilkesi 0-1 aralığında eşit olasılıklarla sürekli değerler alan q sayılarını kullanarak eşit olmayan olasılıklarla a - b arasında değerler alan x sayılarını türetmektir. Olayda sonucun x ile $x+dx$ arasında olma olasılığı;

$$p(x) dx = \frac{F(x)dx}{\int_a^b F(x)dx} \quad (2.38)$$

olur. Burada $p(x)$ fonksiyonuna “Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu” denir. Olasılık yoğunluk fonksiyonu;

$$\int_a^b p(x)dx = 1 \quad (2.39)$$

özellğine sahiptir ve olasılıkların toplamının bire eşit olması koşulunu sağlar.“Toplam olasılık yoğunluk fonksiyonu” veya “olasılık dağılım fonksiyonu”,

$$p(x) = \int_a^x p(x)dx \quad (2.40)$$

şeklinde tanımlanır.Bu “toplam olasılık yoğunluk fonksiyonu” monoton artan bir fonksiyondur ve $P(x)$ fonksiyonu 0-1 aralığında gelişigüzel değerler alır. $P(a)=0$, $P(b)=1$ 'dir. q , 0-1 arasında düzgün dağılımlı gelişigüzel sayı olarak tanımlandığına göre $P(x)$ 'in değerleri q değişkenine eşitlenebilir.

$$P(x) = q \quad (2.41)$$

ifadesinin tersine çözümü

$$x=P^{-1}(q) \quad (2.42)$$

ifadesini verir. Böylece 0-1 arasında düzgün dağılımlı q değerleri kullanılarak a - b arasında $F(x)$ dağılımlı x değerleri elde edilir (Yalçın,1999).

2.8. Monte Carlo Kodları ve Geant4

Bu çalışmada, GATE benzetişim yöntemi kullanılarak veriler elde edildi. Monte Carlo benzetişim yöntemi, yeni tıbbi görüntüleme cihazlarının tasarımına yardımcı olmak, görüntü rekonstrüksiyon algoritmalarının veya saçılma düzeltme tekniklerinin yeni uygulamalarını değerlendirmek ve tarama protokollerini optimize etmek için emisyon tomografisinde önemli bir araçtır. Her ne kadar Pozitron Emisyon Tomografi (PET) ve Tek Foton Emisyon Bilgisayarlı Tomografi (SPECT) için özel Monte Carlo kodları geliştirilmiş olsa da, bu araçlar doğrulama, doğruluk veya destek açısından çeşitli dezavantajlara ve sınırlamalara sahiptir. Öte yandan GEANT3 (G3), EGS4, MCNP ve GEANT4 gibi doğru ve çok yönlü simülasyon kodları yüksek enerji fiziği için yazılmıştır. Hepsi iyi onaylanmış fizik modelleri, geometri modelleme araçları ve verimli görselleştirme yardımcı programlarını içerir.

GATE, emisyon tomografisi için GEANT4 uygulamasıdır (MIC02, Siena02, ITBS02). GATE, nükleer tıp alanına uyarlanmış modüller, çok yönlü, komut dosyası oluşturulmuş bir simülasyon araç seti elde etmek için GEANT4 kitaplıklarını kapsar. Dedektör hareketleri veya kaynak bozulma kinetiği gibi zamana bağlı olgularının, böylece gerçekçi yakalama koşulları altında zaman eğrilerinin simülasyonuna izin verir.

GATE, akademik topluluğa emisyon tomografisi için genel amaçlı, GEANT4 tabanlı bir simülasyon platformu sağlamak amacıyla geliştirilmiştir.

GATE, GEANT4 simülasyon araç setinin avantajlarını iyi onaylanmış fizik modellerinin, sofistike geometri tanımının, güçlü görselleştirme ve 3D görüntü oluşturma araçlarının avantajlarını, emisyon tomografisine özgü orijinal özelliklerle birleştirir. Birkaç yüz C ++ sınıfından oluşur. Zamanı, geometriyi ve radyoaktif kaynakları yönetmek için kullanılan mekanizmalar, GEANT4 çekirdeğine yakın bir C ++ sınıfı çekirdek katmanı oluşturur. Bir uygulama katmanı, çekirdek katman sınıflarından türetilen kullanıcı sınıflarının uygulanmasına izin verir, örneğin spesifik geometrik hacim şekilleri oluşturmak veya bu birimler üzerinde rotasyonlar veya çeviriler gibi işlemleri belirlemek. Uygulama katmanı tüm uygun özellikleri uyguladığından, GATE kullanımı C ++ programlama gerektirmez. GEANT4'ün yerel komut yorumlayıcısını genişleten özel bir komut dosyası mekanizması Monte Carlo'nun gerçekleştirilmesini ve kontrol edilmesini mümkün kılar (<https://opengate.readthedocs.io/en/latest/introduction.html>).

GATE, uluslararası işbirlikleri tarafından geliştirilen ve tıbbi uygulamalar ve radyoterapiye adanmış gelişmiş bir açık kaynaklı yazılımdır. Son zamanlarda yeni tıbbi cihazların tasarlanması, edinim protokolleri, tıbbi görüntüleme cihazlarının kalite kontrol

sistemleri ve görüntü rekonstrüksiyonları açısından önemli bir rol oynamaktadır. Pozitron emisyon tomografisinin (PET) vb. En önemli parçası olan dedektör sisteminin karakterizasyonunda da kullanılır. GATE, onaylanmış fizik modelleri, karmaşık geometrik hacim açıklaması ve güçlü 3D görselleştirme (Geant4 simülasyon araç takımı) ile çalışır (Qt modu gibi) (Yavuzkanat, Güngör, Yalçın, 2019).

En popüler ve yaygın olarak kullanılan sintilasyon detektörü NaI (Tl) bazlı detektördür (Moszyński, 2005). Temel olarak, Şekil 2.13. de görülebildiği gibi bir fotoçoğaltıcı tüpe bağlanan talyumla aktive edilmiş bir sodyum iyodür kristalidir.

Popülerliğinin nedeni, NaI (Tl) kristalinin mükemmel sintilasyon özellikleri. NaI (Tl) kristalinin en önemli avantajları, özellikle gama ışınları için yüksek tespit verimliliği sağlayan ve gama ışını spektrometrisi için yaygın olarak kullanılan yüksek yoğunluk ve yüksek etkin atom numarasıdır. NaI kristalinin en büyük dezavantajı, nemden uzak tutmak için bu kristallerin ekstra bakım ve koruma gerektiren higroskopik doğasıdır. Ayrıca alfa ve beta partiküllerini ölçme etkinliği oldukça düşüktür ve sadece yüksek enerjili gama ışınları için iyi çalışır (Cember, 2009).

Radyasyonun varlığının anlaşılması duyu organları ile mümkün olmadığından, algılanması ve ölçümleri radyasyona hassas cihazlar ile yapılır. Radyasyonun ölçülmesinin temeli, radyasyon ile maddenin etkileşmesi esasına dayanır. Radyoaktif olarak bilinen atomların çekirdeği kararsız olduklarından radyoaktivite özelliği gösterirler. Yani kararsız çekirdekler parçalanır ve parçalanma sonucu yeni bir çekirdek ve parçalanma ürünleri meydana gelir. Atom çekirdeklerindeki bu değişiklikler sonucu radyasyon yayınlanır (<https://www.taek.gov.tr/ogrenci/sf5.html>).

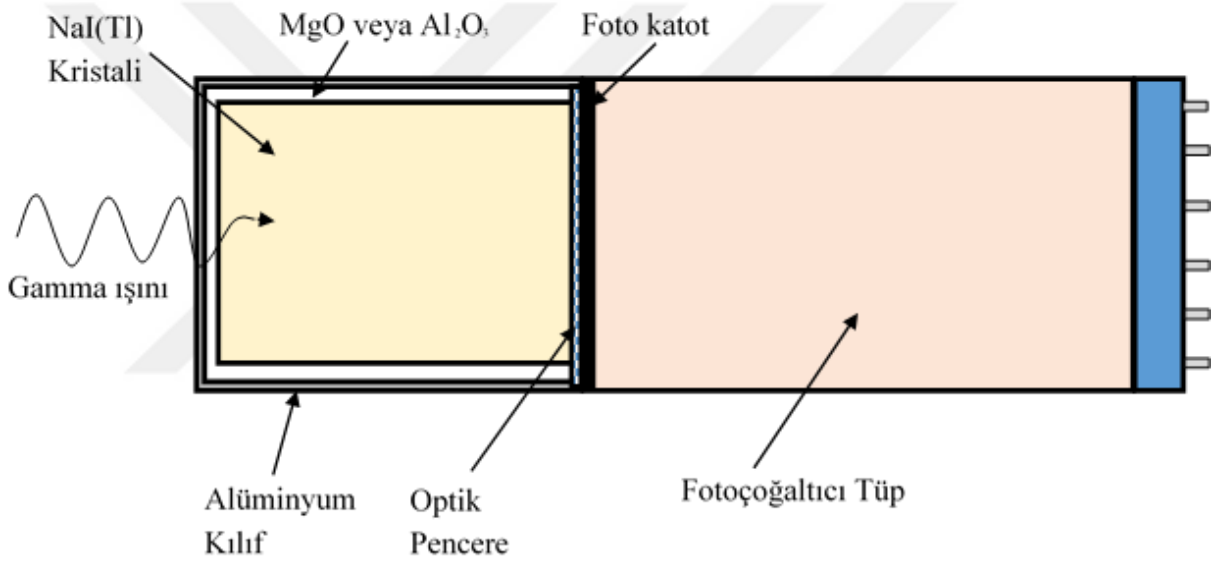
Radyasyon, enerjinin elektromanyetik dalga paketleri veya yüklü ya da yüksüz parçacıklar aracılığıyla uzayda taşınması olarak tanımlanır. Radyasyon, iç dönüşüm geçiren atomlar tarafından yayınlanan, boşlukta ve madde içerisinde hareket edebilen enerji olarak tanımlanır (Kuluöztürk, 2015).

Medikal izlemede ve görüntülemede, insan damarlarına enjekte edilen radyonüklit izleyicilerin yayınladığı gama ışınları, günümüzde en yaygın olarak, foto çoğaltıcı tüplere bağlantılı NaI(Tl) sintilatörlerden oluşan gama kameralar ile dedekte edilmektedir. Bununla birlikte, sintilatörlü gama kameralarının enerji çözünürlüğünün düşük olmasının yanı sıra, bu kameralarla elde edilen görüntü kontrastı, fotoelektrik etkiyle soğurulan gama ışınlarından zor ayrılabilen fotopike yakın Compton platosundan, fotopikin nicel sayım değerlerinin etkilenmesiyle azalır (Yücel, 2008).

Foton yayınlanma olasılığını arttırmak ve ışığın kendisinin soğurulmasını azaltmak için kristale aktivatör denen küçük miktarda safsızlık ilave edilir. En çok kullanılan aktivatörlerden

biri talyumdur ve böyle bir dedektör NaI(Tl) şeklinde gösterilir. Aktivatör, enerji aralığında durumlar meydana getirir ve bu aktivatör durumları arasında ışık yayınımlı oluşur. NaI'de 303 nm dalgaboylu ışık yayınlanırken NaI(Tl)'da 410 nm'lik ışık yayınlanır. NaI(Tl)'da bu enerjide soğurulma olamaz, çünkü aktivatör taban durumları işgal edilmez ve dalgaboyundaki morötesi bölgesinden görünür bölgeye değişim, pek çok fotoçoğaltıcı tüpün maksimum duyarlılığı ile uyuşur (Krane,2001).

Gama ışınları için yüksek verim gerektiğinde NaI(Tl) iyi bir seçimdir. I'nin Z sayısının ($Z=53$) büyük olması, foton soğurulma ihtimalini arttırır. Ancak enerji çözme gücü bakımından NaI(Tl) iyi bir seçim değildir ve nispeten daha düşük verimli plastik sintilatörler daha iyi bir seçim olabilir (Krane,2001).



Şekil 2.13. NaI(Tl) dedektörü

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Toplam Verim

Bir kaynaktan N_k adet parçacık yayınlanlandığını kabul edelim, dedektöre yönelerek dedektöre giren parçacık sayısı N_g ve dedektörde sayılan parçacık sayısı N_s ise; dedektör tarafından oluşturulan puls sayısının kaynaktan tüm doğrultularda yayınlanan parçacık sayısına oranı toplam verimi verir. Toplam verim Eşitlik(2.28) ile ;

$$\varepsilon = \frac{N_s}{N_k} \quad (3.1)$$

hesaplanmıştır. Literatür değerleri ile karşılaştırmak içinsimülasyonda kullanılan dedektörler 3"x3" ve 2"x2" NaI(Tl) sintilasyon dedektörleridir. Programı çalıştırmak için bazı ana kodlar Şekil 3.1 de verildiği gibi ve dedektörü tanımlamak için ise Şekil 3.2 de verildiği sisteme girilmiştir. Toplam verim, 50keV-3000keV enerji aralığında nokta kaynak için 0.001 cm, 0.5 cm ve 10 cm, disk kaynak için 3 cm ve 10 cm dedektör-kaynak uzaklığı için hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 3.1 - 4.6 ile ve Şekil 3.5-3.13 ile verilmiştir.

```
#-----
# VISUALISATION
#-----
#####
/vis/open                                OGLS
#/vis/open                               OGLSQt
/vis/open                                OGL
/vis/viewer/set/viewpointThetaPhi        60 85
/vis/viewer/zoom                          8
#/vis/viewer/set/background              white
#/vis/viewer/set/style                    surface
/vis/drawVolume
/vis/scene/add/trajectories
/vis/scene/add/hits
/tracking/storeTrajectory                 1
/vis/scene/endOfEventAction               accumulate -1
/vis/viewer/update
/vis/disable
/gate/geometry/setMaterialDatabase /home/didem/Masaüstü/Gate/GateMaterial.db
# axes settings
/control/alias                            axesWidth          1
/control/alias                            axesLength          50
/vis/scene/add/axes
/gate/verbose Acquisition                  1
#/tracking/verbose                        1
#/particle/verbose                        2
#-----
# W O R L D
#-----
/gate/world/geometry/setXLength           200 cm
/gate/world/geometry/setYLength           200 cm
/gate/world/geometry/setZLength           200 cm
/gate/world/setMaterial                    Air
```

Şekil 3.1. Simülasyonu çalıştırmak için girişte yazılan bir kısım ana kodlar

```

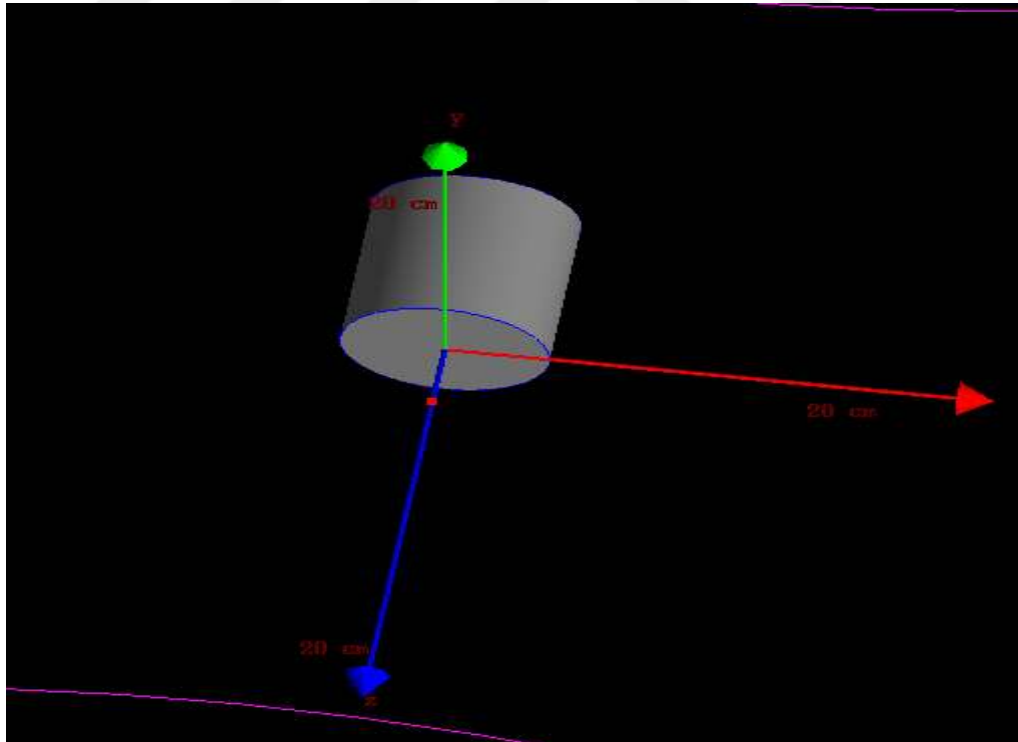
# G E O M E T R Y
#-----
# === scanner =
/gate/world/daughters/name scanner
/gate/world/daughters/insert cylinder
/gate/scanner/geometry/setRmax 50.0 cm
/gate/scanner/geometry/setRmin 0.0 cm
/gate/scanner/geometry/setHeight 100.0 cm
/gate/scanner/geometry/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/scanner/setMaterial Air
/gate/scanner/vis/setColor magenta
/gate/scanner/vis/forceWireframe 1
/gate/scanner/vis/setVisible 1

# === Al housing ===
/gate/scanner/daughters/name level1
/gate/scanner/daughters/insert cylinder
/gate/level1/geometry/setRmax 3.81 cm
/gate/level1/geometry/setRmin 0 cm
/gate/level1/geometry/setHeight 7.62 cm
/gate/level1/geometry/setTranslation 0.0 0.0 -3.81 cm
/gate/level1/setMaterial Aluminium
/gate/level1/vis/setColor blue
/gate/level1/vis/forceWireframe 1
/gate/level1/vis/setVisible 1

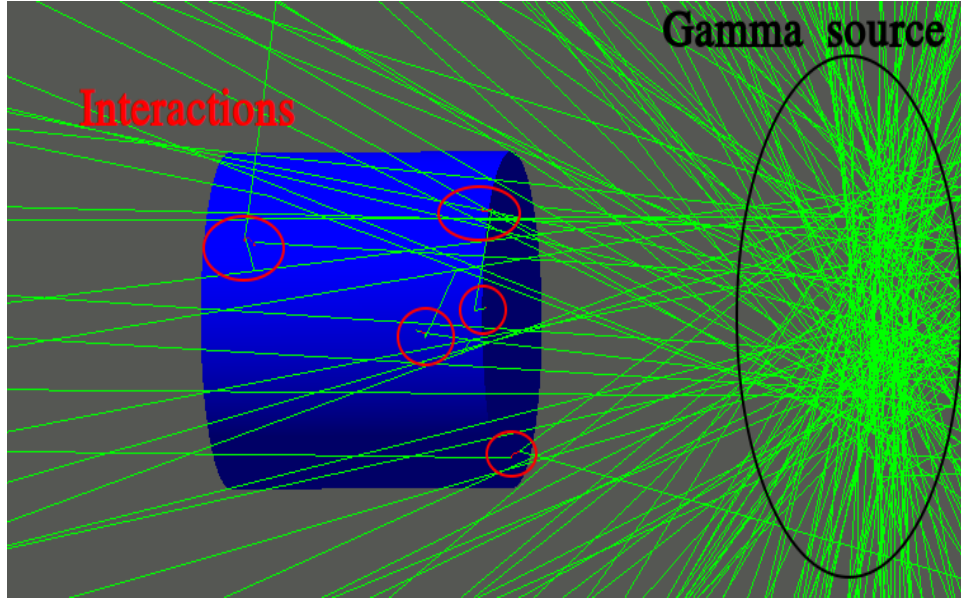
# === crystal NaI ===
/gate/level1/daughters/name level2
/gate/level1/daughters/insert cylinder
/gate/level2/geometry/setRmax 3.81 cm
/gate/level2/geometry/setRmin 0 cm
/gate/level2/geometry/setHeight 7.62 cm
/gate/level2/geometry/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/level2/setMaterial NaI
/gate/level2/vis/setColor grey
/gate/level2/vis/forceSolid 1
/gate/level2/vis/setVisible 1

```

Şekil 3.2. 3"x3" NaI(Tl) dedektörü oluşturmak için kullanılan kodlar



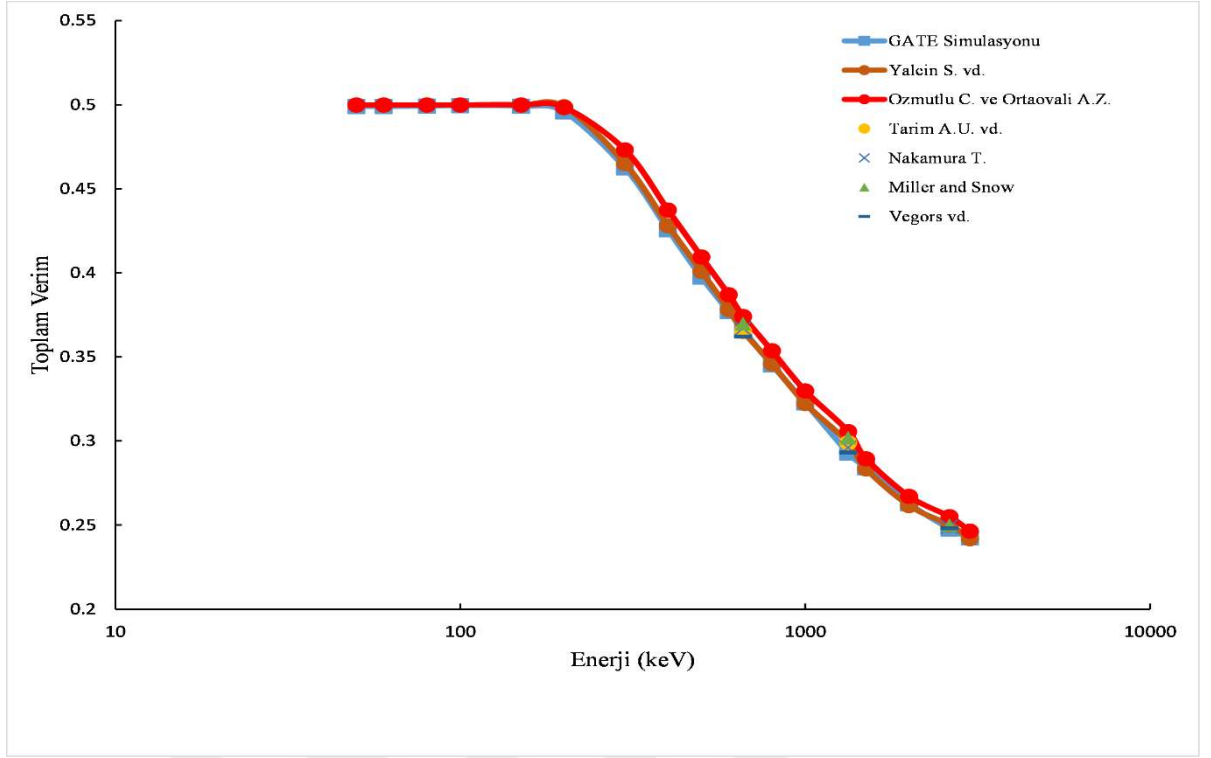
Şekil 3.3. Oluşturulan 3"x3" NaI(Tl) dedektörü



Şekil 3.4. Gama kaynağından çıkan fotonlar (kaynaktan gelen yeşil çizgiler (şekilde siyah daire ile gösterilmiştir) Geant4 simülasyonundaki gama ışınlarını temsil eder. Şekildeki kırmızı daireler sintilasyon ve gama ışınları arasındaki etkileşimleri göstermektedir. Kırmızı çizgiler Geant4 simülasyonundaki elektronları gösterir.)

Çizelge 3.1. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri eksenini üzerinde detektör ön yüzeyinden D=0.001 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için toplam verimi

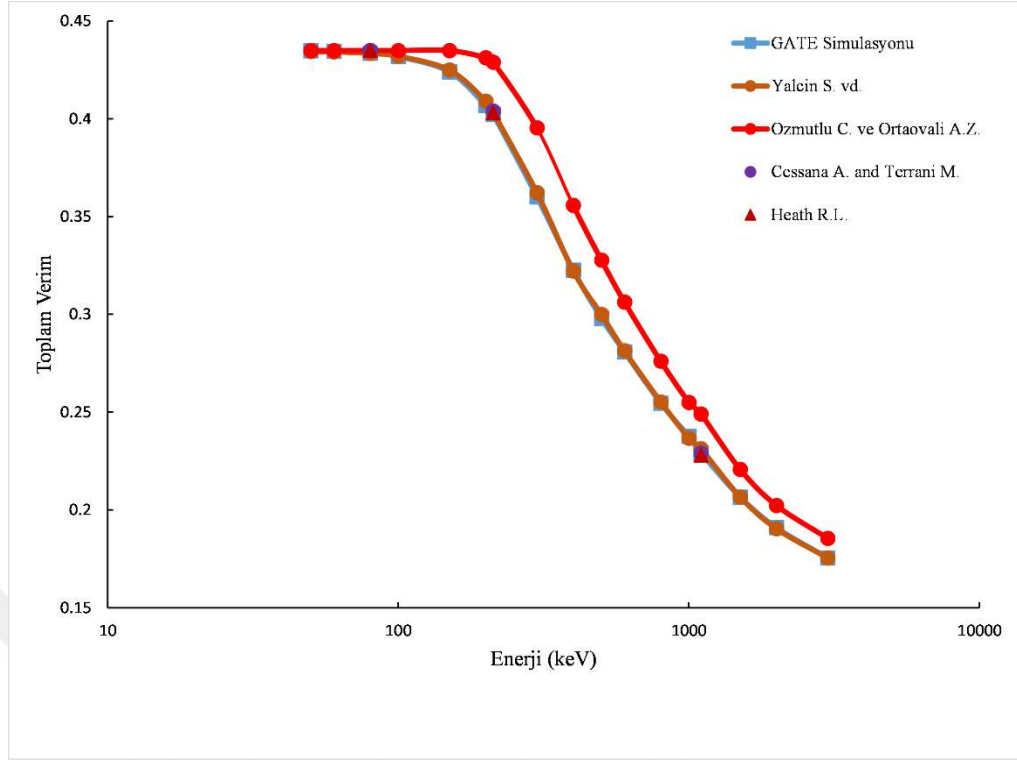
Enerji (keV)	Toplam Verim						
	GATE Simülasyonu	Yalçın S. (1999)	Özmutlu C. ve Ortaovalı A.Z. (1976)	Tarım A.U. vd. (2018)	Nakamura T. (1972)	Miller and Snow (1962)	Vegors vd. (1958)
50	0.4990	0.4999	0.4999				
60	0.4990	0.4999	0.4999				
80	0.4992	0.4999	0.4999				
100	0.4995	0.4999	0.4999				
150	0.4991	0.4999	0.4999				
200	0.4957	0.4989	0.4984				
300	0.4625	0.4651	0.4732				
400	0.4257	0.4281	0.4374				
500	0.3975	0.4008	0.4095				
600	0.3770	0.3782	0.3870				
661	0.3660	0.3652	0.3741	0.3652	0.3670	0.3700	0.3620
800	0.3453	0.3460	0.3537				
1000	0.3227	0.3223	0.3298				
1332	0.2929	0.2991	0.3057	0.2990	0.2960	0.3020	0.2930
1500	0.2841	0.2834	0.2895				
2000	0.2628	0.2616	0.2671				
2620	0.2478	0.2501	0.2550		0.2490	0.2500	0.2480
3000	0.2424	0.2420	0.2464				



Şekil 3.5.3 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri eksenini üzerinde dedektör ön yüzeyinden D= 0.001 cm uzaklıkta noktasal gamma kaynağı için toplam verim değerleri

Çizelge 3.2. 3"x3" inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri eksenı üzerinde detektör ön yüzeyinden D=0.5 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için toplam verimi

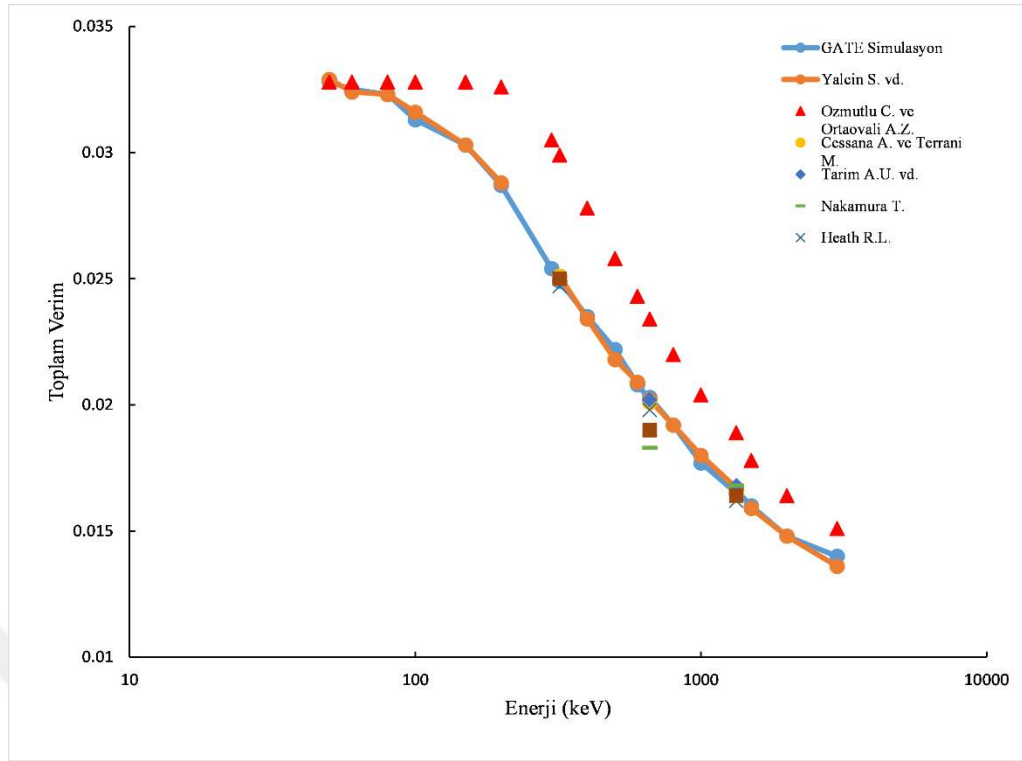
Enerji (keV)	Toplam Verim				
	GATE Simölasyonu	Yalcin vd. (1999)	Özmutlu C. ve Ortaovalı A.Z. (1976)	Cessana A. and Terrani M. (1977)	Heath R.L. (1964)
50	0.4347	0.4344	0.4349		
60	0.4345	0.4342	0.4349		
80	0.4335	0.4334	0.4349	0.435	0.435
100	0.4318	0.4320	0.4349		
150	0.4240	0.4249	0.4349		
200	0.4068	0.4090	0.4312	0.404	0.403
212	0.4022	0.4033	0.4289		
300	0.3601	0.3622	0.3954		
400	0.3226	0.3222	0.3557		
500	0.2980	0.2999	0.3277		
600	0.2808	0.2814	0.3063		
800	0.2546	0.2552	0.276		
1000	0.2376	0.2367	0.255	0.229	0.228
1100	0.2292	0.2313	0.249		
1500	0.2066	0.2067	0.2208		
2000	0.1910	0.1904	0.2023		
3000	0.1755	0.1755	0.1855		



Şekil 3.6. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=0.5 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için toplam verim değerleri

Çizelge 3.3. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta noktasal gamma kaynağı için toplam verim değerleri

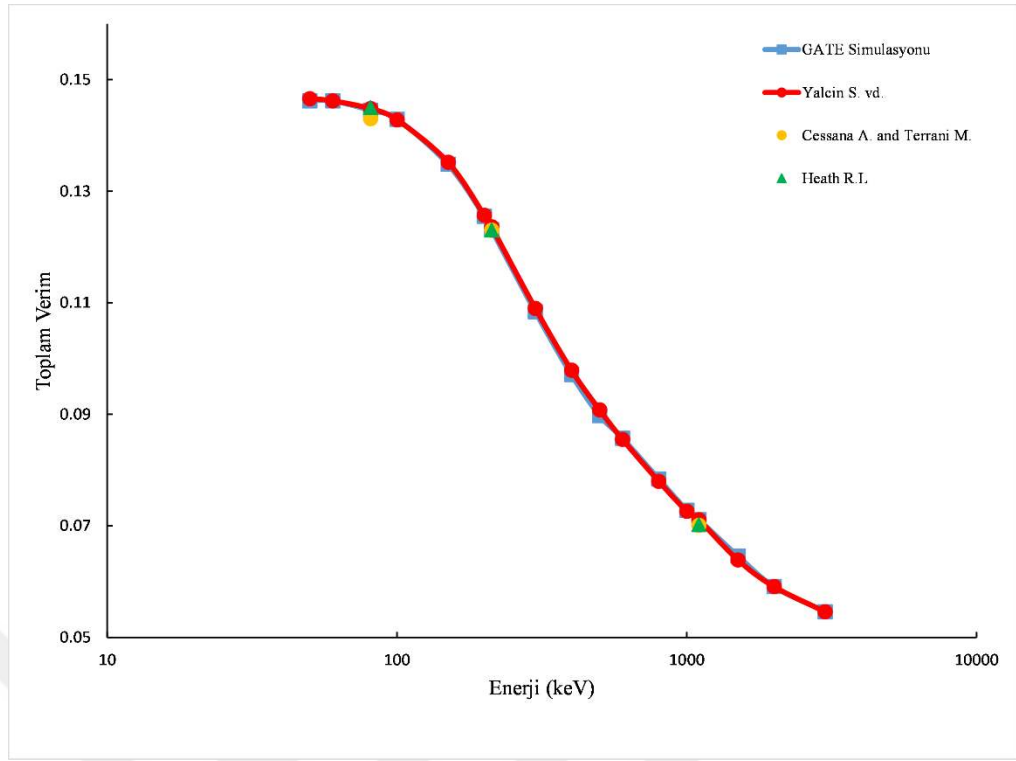
Enerji (keV)	Toplam Verim							
	GATE Simülasyonu	Yalçın (1999)	Özmutlu C. ve Ortaovalı A.Z. (1976)	Cessana A. ve Terrani M. (1977)	Tarım A.U. vd. (2018)	Nakamura T. (1972)	Heath R.L. (1964)	Belluscio vd. (1976)
50	0.0328	0.0329	0.0328					
60	0.0325	0.0324	0.0328					
80	0.0323	0.0323	0.0328					
100	0.0313	0.0316	0.0328					
150	0.0303	0.0303	0.0328					
200	0.0287	0.0288	0.0326					
300	0.0254		0.0305					
320	0.0249	0.0251	0.0299	0.0251			0.0247	0.025
400	0.0235	0.0234	0.0278					
500	0.0222	0.0218	0.0258					
600	0.0208	0.0209	0.0243					
661	0.0202				0.0202			
662	0.0203	0.0202	0.0234	0.0201		0.0183	0.0198	0.019
800	0.0192	0.0192	0.022					
1000	0.0177	0.018	0.0204					
1330	0.0165	0.0167	0.0189	0.0165		0.0168	0.0162	0.0164
1332	0.0166				0.0168			
1500	0.0160	0.0159	0.0178					
2000	0.0148	0.0148	0.0164					
3000	0.0140	0.0136	0.0151					



Şekil 3.7. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta noktasal gamma kaynağı için toplam verim değerleri

Çizelge 3.4. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=3 cm uzaklıkta gama disk kaynağı için toplam verimi (R=3.81cm)

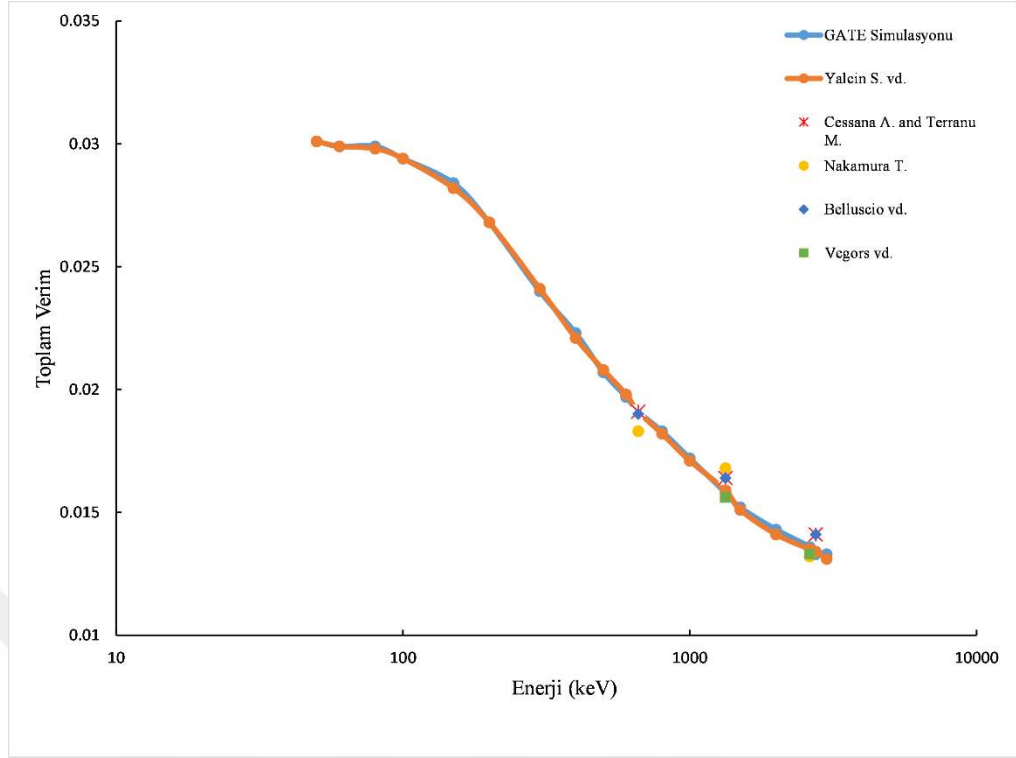
Enerji (keV)	Toplam Verim			
	GATE Simülasyonu	Yalcin (1999)	Cessana A. and Terrani M. (1977)	Heath R.L. (1964)
50	0.1462	0.1466		
60	0.1462	0.1462		
81	0.1445	0.1448	0.143	0.145
100	0.1429	0.1428		
150	0.1348	0.1352		
200	0.1255	0.1257		
212	0.1231	0.1236	0.123	0.123
300	0.1084	0.1090		
400	0.0971	0.0979		
500	0.0898	0.0908		
600	0.0857	0.0855		
800	0.0784	0.078		
1000	0.0728	0.0726		
1100	0.0711	0.0711	0.0701	0.0702
1500	0.0646	0.0639		
2000	0.0591	0.0591		
3000	0.0546	0.0546		



Şekil 3.8. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=3 cm uzaklıkta gamma disk kaynağı için toplam verim değerleri (R=3.81cm)

Çizelge 3.5. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta gama disk kaynağı için toplam verimi (R=3.81cm)

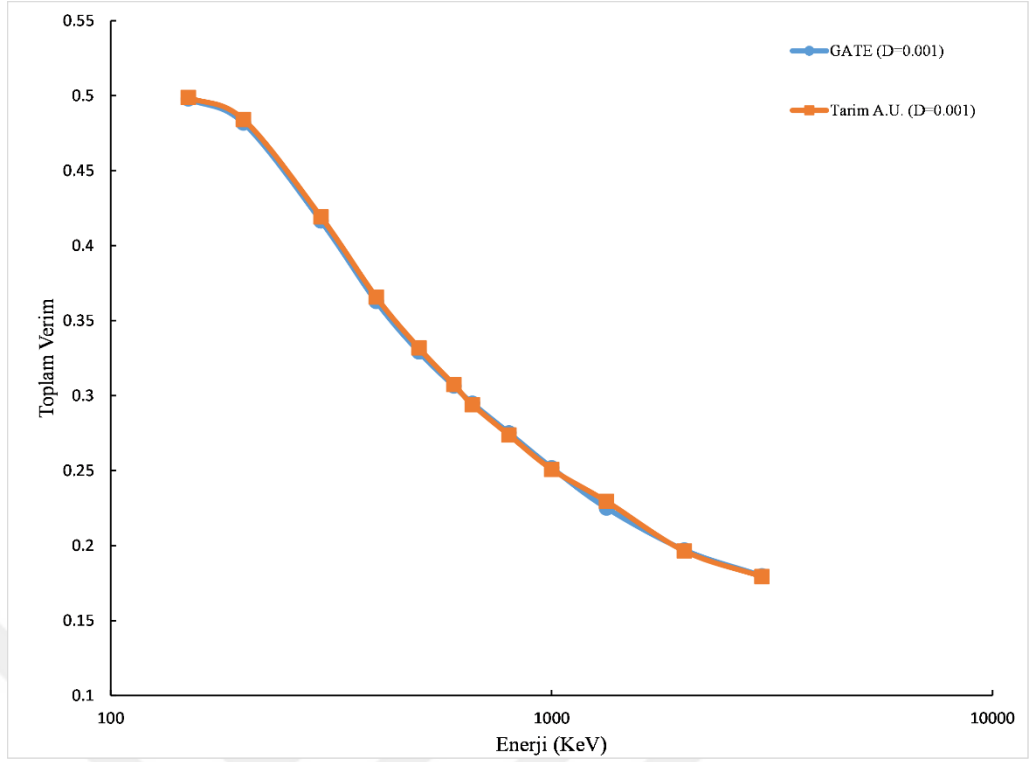
Enerji (keV)	Toplam Verim					
	GATE Simülasyonu	Yalcin (1999)	Cessana A. and Terrani M. (1977)	Nakamura T. (1972)	Belluscio vd. (1974)	Vegors vd. (1958)
50	0.0301	0.0301				
60	0.0299	0.0299				
80	0.0299	0.0298				
100	0.0294	0.0294				
150	0.0284	0.0282				
200	0.0268	0.0268				
300	0.0240	0.0241				
400	0.0223	0.0221				
500	0.0207	0.0208				
600	0.0197	0.0198				
661	0.0191	0.0191	0.0191	0.0183	0.019	
800	0.0183	0.0182				
1000	0.0172	0.0171				
1332	0.0158	0.0159	0.0164	0.0168	0.0164	0.0156
1500	0.0152	0.0151				
2000	0.0143	0.0141				
2620	0.0136	0.0135		0.0132		0.0133
2750	0.0133	0.0134	0.0141		0.0141	
3000	0.0133	0.0131				



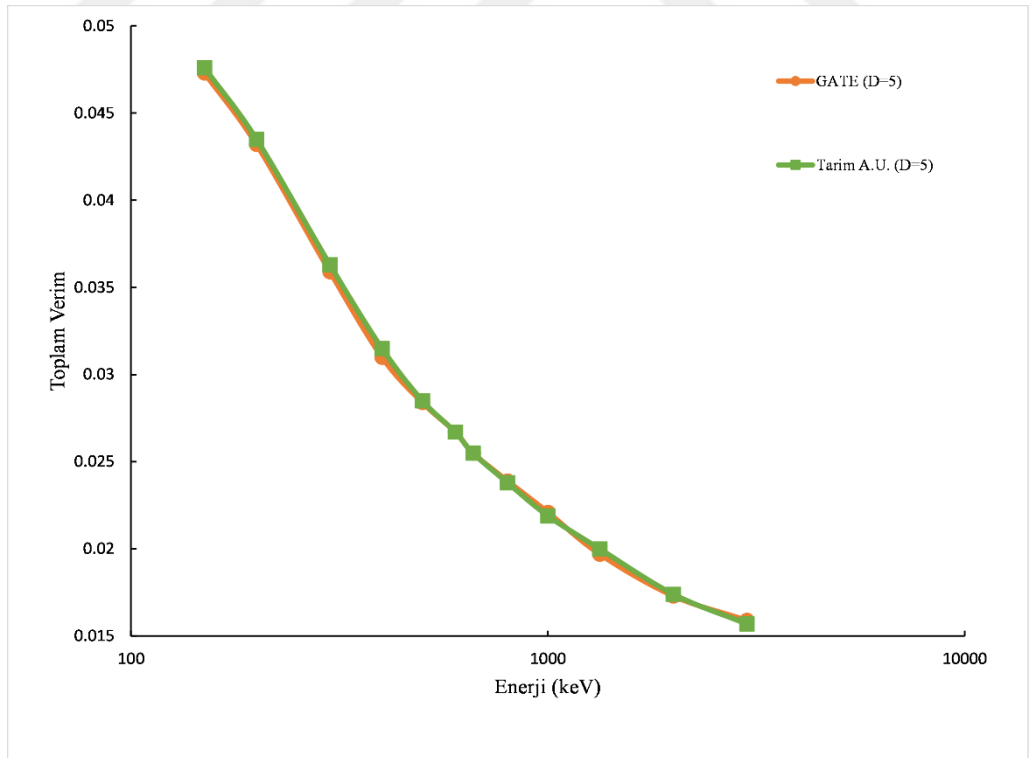
Şekil 3.9. 3''x3'' NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta gama disk kaynağı için toplam verim değerleri (R=3.81cm)

Çizelge 3.6. 2"x2" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden farklı uzaklıklarda noktasal gama kaynağı için toplam verimi

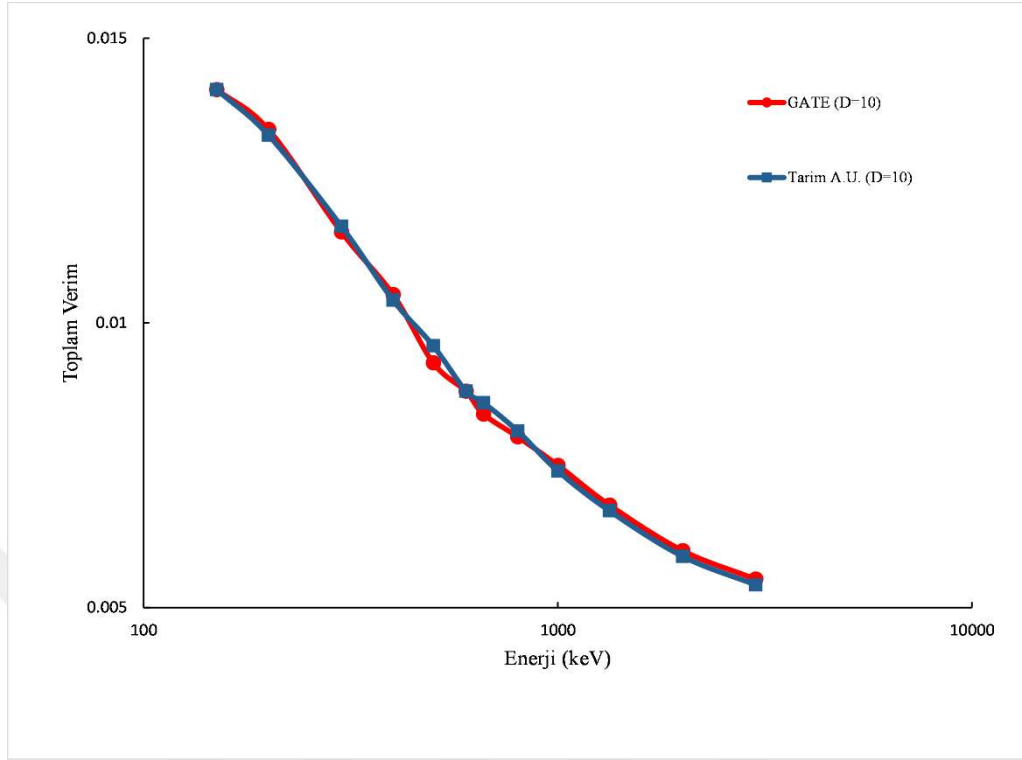
Enerji (keV)	Toplam Verim							
	GATE Simülasyonu				Tarım A.U. vd. (2018)			
	D (cm)				D(cm)			
	0.001	5	10	15	0.001	5	10	15
150	0.4978	0.0473	0.0141	0.0066	0.4988	0.0476	0.0141	0.0065
200	0.4818	0.0432	0.0134	0.0063	0.4842	0.0435	0.0133	0.0064
300	0.4164	0.0359	0.0116	0.0056	0.4192	0.0363	0.0117	0.0056
400	0.3628	0.0310	0.0105	0.0052	0.3658	0.0315	0.0104	0.0051
500	0.3292	0.0284	0.0093	0.0047	0.3318	0.0285	0.0096	0.0046
600	0.3064	0.0267	0.0088	0.0043	0.3074	0.0267	0.0088	0.0044
661	0.2949	0.0255	0.0084	0.0043	0.2940	0.0255	0.0086	0.0042
800	0.2752	0.0239	0.0080	0.0040	0.2738	0.0238	0.0081	0.0040
1000	0.2520	0.0221	0.0075	0.0037	0.2509	0.0219	0.0074	0.0037
1332	0.2251	0.0197	0.0068	0.0033	0.2295	0.0200	0.0067	0.0033
2000	0.1971	0.0173	0.0060	0.0029	0.1964	0.0174	0.0059	0.0029
3000	0.1799	0.0159	0.0055	0.0027	0.1793	0.0157	0.0054	0.0027



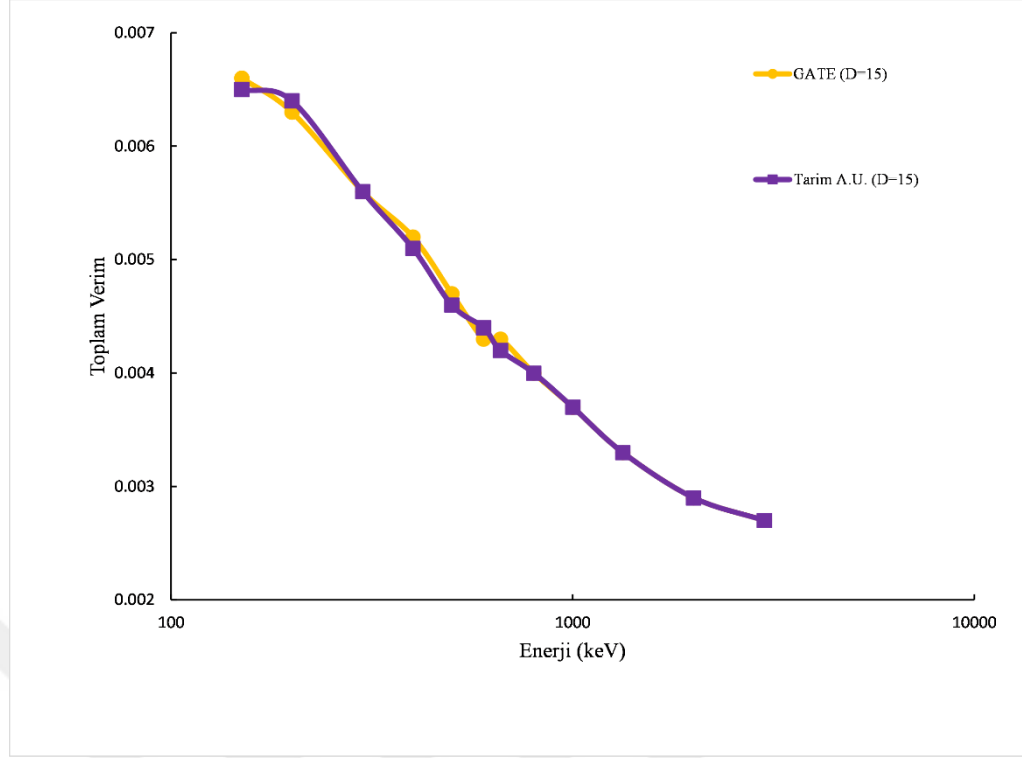
Şekil 3.10. 2"x2"NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=0.001 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için toplam verim değerleri



Şekil 3.11. 2"x2"NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=5 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için toplam verim değerleri



Şekil 3.12. 2"x2"NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta noktasal gamma kaynağı için toplam verim değerleri



Şekil 3.13.2 2"x2" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=15 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için toplam verim değerleri

3.2. Öz Verim

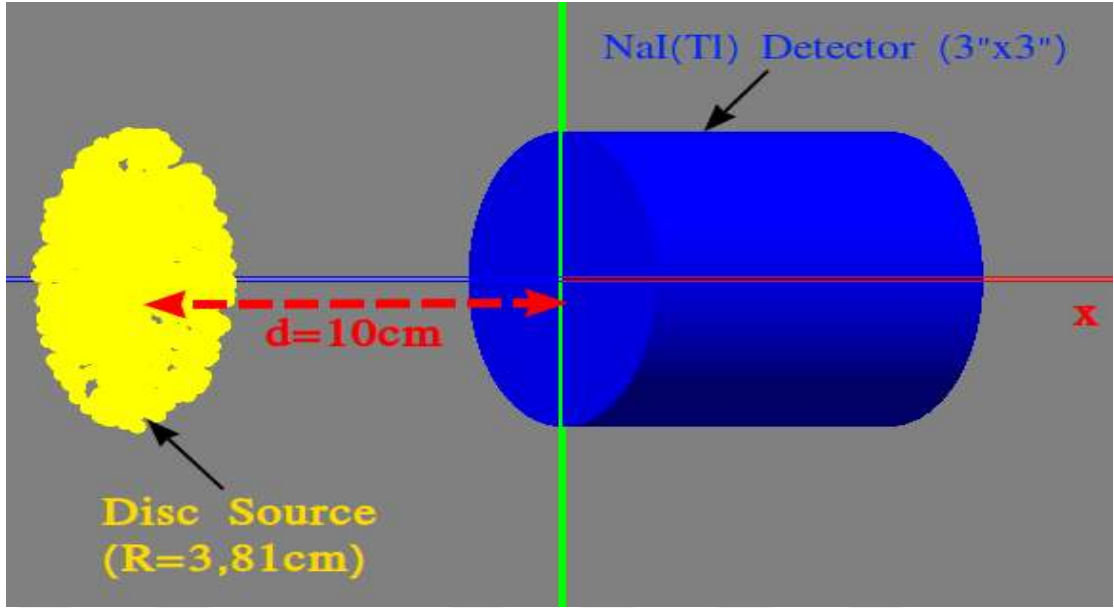
Dedektör tarafından oluşturulan puls sayısının dedektöre yönelip dedektöre giren parçacık sayısına oranı öz verimi verir. Özverim Eşitlik (2.28) ile;

$$\varepsilon_i = \frac{N_s}{N_g} \quad (3.2)$$

hesaplanmıştır. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün hesaplanan öz verim değerleri nokta kaynak için dedektör kaynak uzaklığı 0.001 cm, 0.5 cm, 10 cm , disk kaynak için 3 cm ve 10 cm için 50 keV- 3000 keV enerji aralığında hesaplanmış ve Çizelge 3.7 de verilmiştir. Çizelge 3.7 de verilen öz verim değerlerinin enerjiye bağlı değişimi Şekil 3.15-4.19 ile verilmiştir.

2"x2" NaI(Tl) dedektörünün öz verim değerleri nokta kaynak için dedektör kaynak uzaklığı 0.001 cm, 5 cm, 10 cm için hesaplanmıştır. Literatürdeki, deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır.

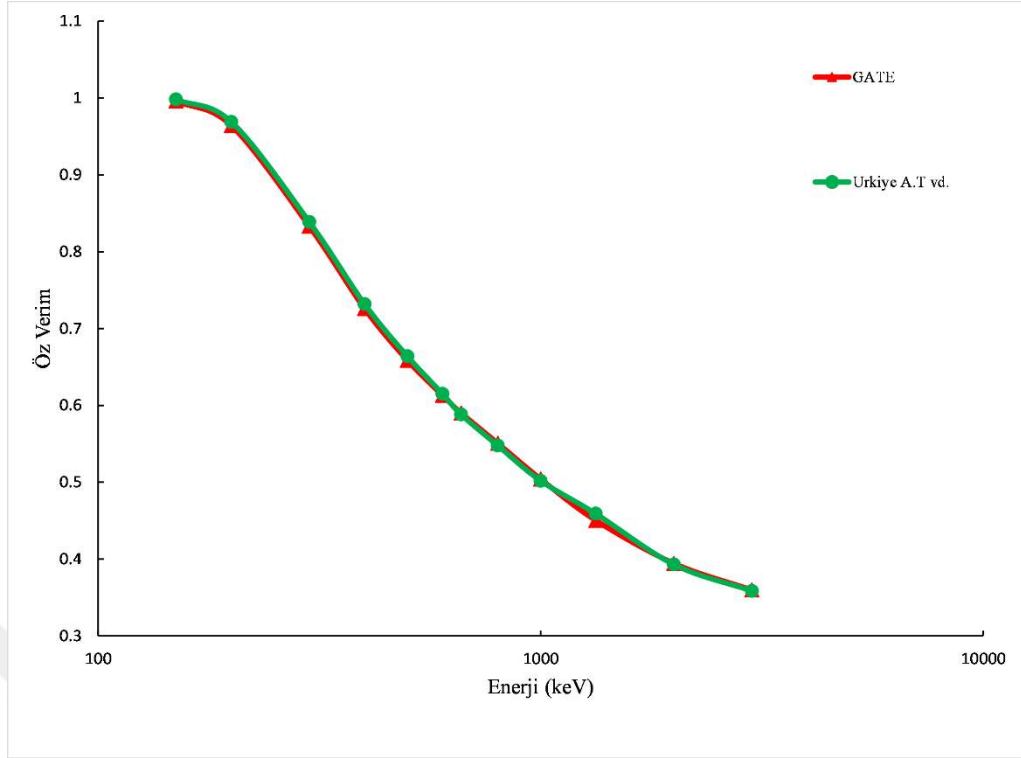
Ayrıca dar ve geniş gama ışını demeti tanımlayarak öz verim değerleri hesaplanmış sonuçlar Çizelge 3.8. de ve Şekil 3.23. de verilmiştir.



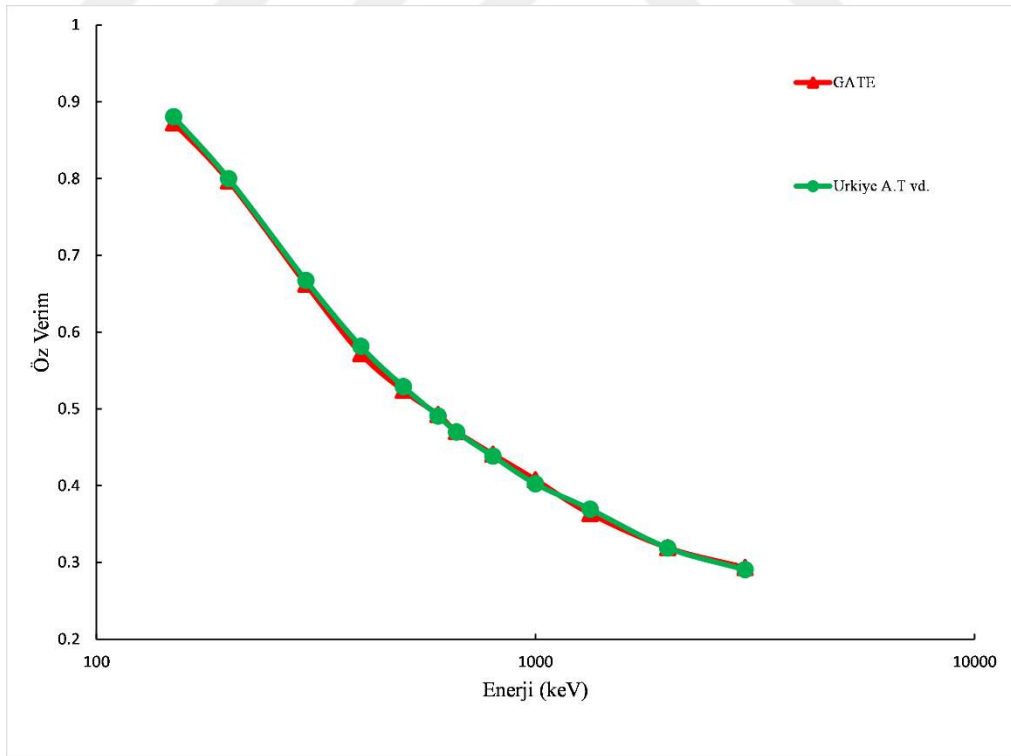
Şekil 3.14. Disk kaynağı simülasyon kurulumunun Geant4 görselleştirmesi ($3'' \times 3''$ ebatındaki NaI(Tl) sintilasyon malzemesi için mavi silindir hacmi tanımlandı. Sarı noktalar, $R = 3.81\text{ cm}$ yarıçaplı disk kaynağını temsil eder).

Çizelge 3.7. 2"x2"NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden farklı uzaklıklarda noktasal gama kaynağı için öz verim değerleri

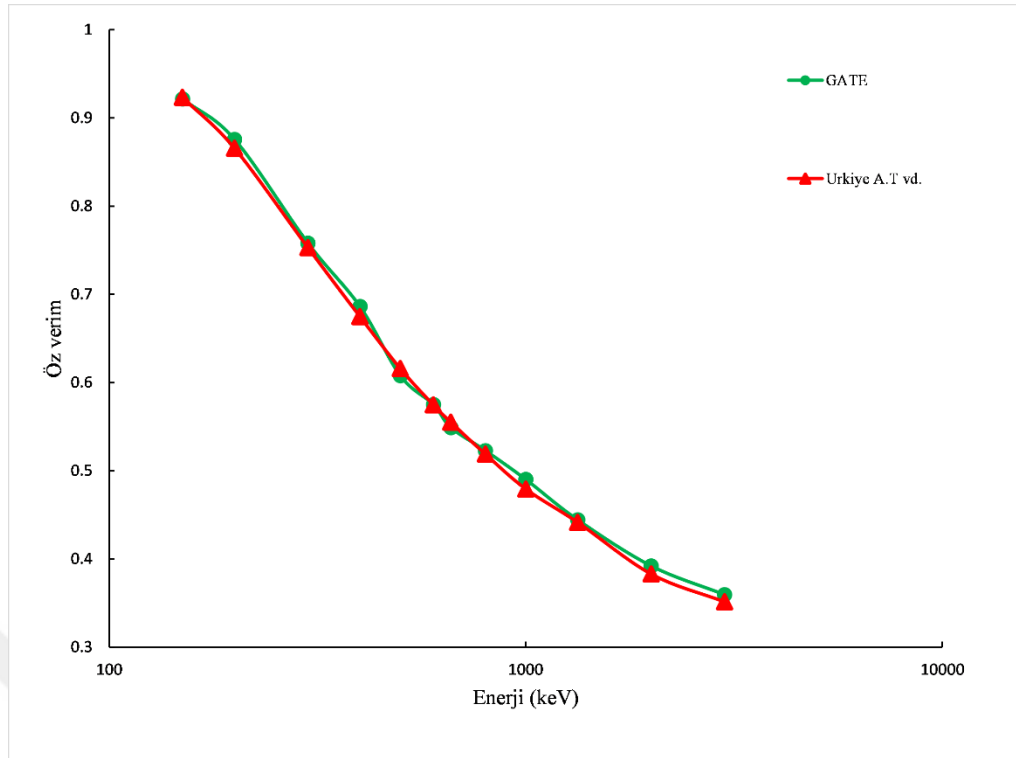
Enerji (keV)	Öz Verim							
	GATE Simülasyonu				Tarım A.U. vd. (2018) (Noktasal Kaynak)			
	D (cm)				D(cm)			
	0.001	5	10	15	0.001	5	10	15
150	0.996	0.8727	0.9216	0.9428	0.998	0.8805	0.9233	0.9451
200	0.964	0.797	0.8758	0.9	0.9688	0.7999	0.8656	0.904
300	0.8331	0.6624	0.7582	0.8	0.8387	0.6673	0.753	0.8056
400	0.7259	0.572	0.6863	0.7428	0.7318	0.5816	0.6747	0.7228
500	0.6586	0.524	0.6078	0.6713	0.6639	0.529	0.6158	0.6638
600	0.6131	0.4926	0.5752	0.6143	0.615	0.4908	0.5747	0.627
661	0.5901	0.4705	0.549	0.6143	0.5882	0.4699	0.555	0.5995
800	0.5506	0.4409	0.5229	0.5713	0.5477	0.4384	0.5189	0.5662
1000	0.5042	0.4077	0.4902	0.5285	0.5019	0.4024	0.4793	0.5219
1332	0.4504	0.3635	0.4444	0.4713	0.4591	0.3693	0.4415	0.4803
2000	0.3944	0.3192	0.3921	0.4143	0.393	0.3189	0.3829	0.4174
3000	0.3599	0.2933	0.3595	0.3856	0.3587	0.2905	0.3514	0.3843



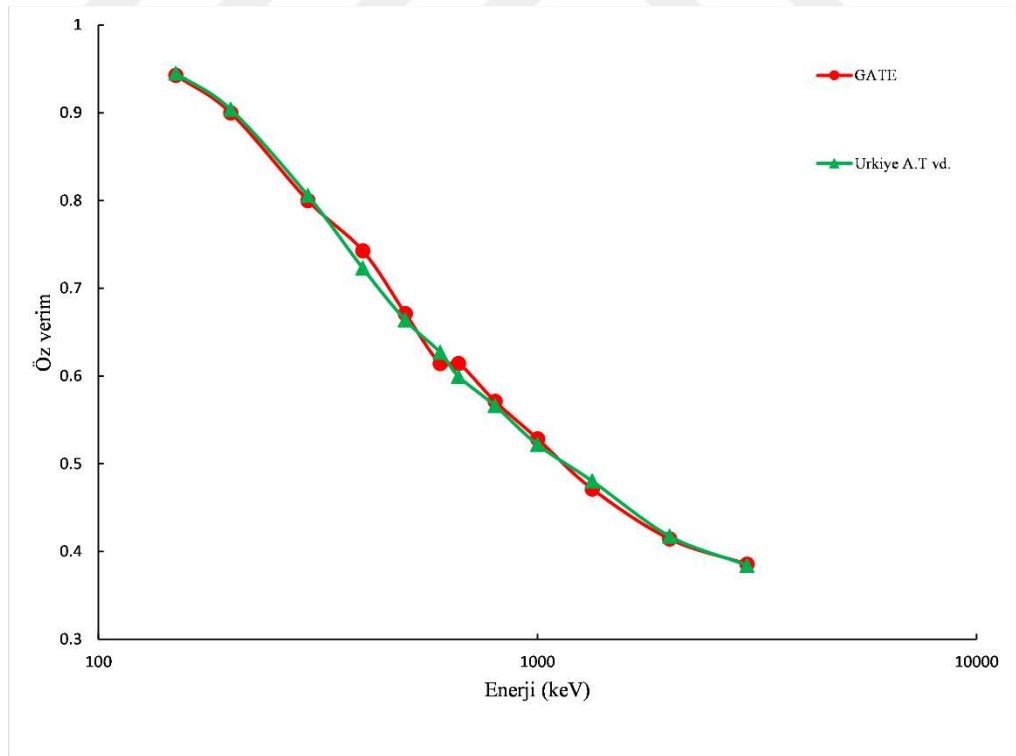
Şekil 3.15. 2"x2" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=0.001 cm uzaklıktanoktasalgama kaynağı için öz verim değerleri



Şekil 3.16. 2"x2" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=5cm uzaklıktanoktasalgama kaynağı için öz verim değerleri



Şekil 3.17. 2"x2" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=10cm uzaklıktanoktasalgama kaynağı için öz verim değerleri



Şekil 3.18. 2"x2" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=15 cm uzaklıktanoktasalgama kaynağı için öz verim değerleri

Bu çalışmada farklı kaynak olarak dar ışın demeti ve geniş ışın demeti gama kaynakları kullanılmıştır. Bu tür kaynaklardan yayınlanan fotonlar doğrusal bir şekilde sapmaya uğramadan dedektöre girdiğinden verimi etkilemediği için belirli bir kaynak-dedektör uzaklığında program çalıştırılıp gözlemlenmiştir.

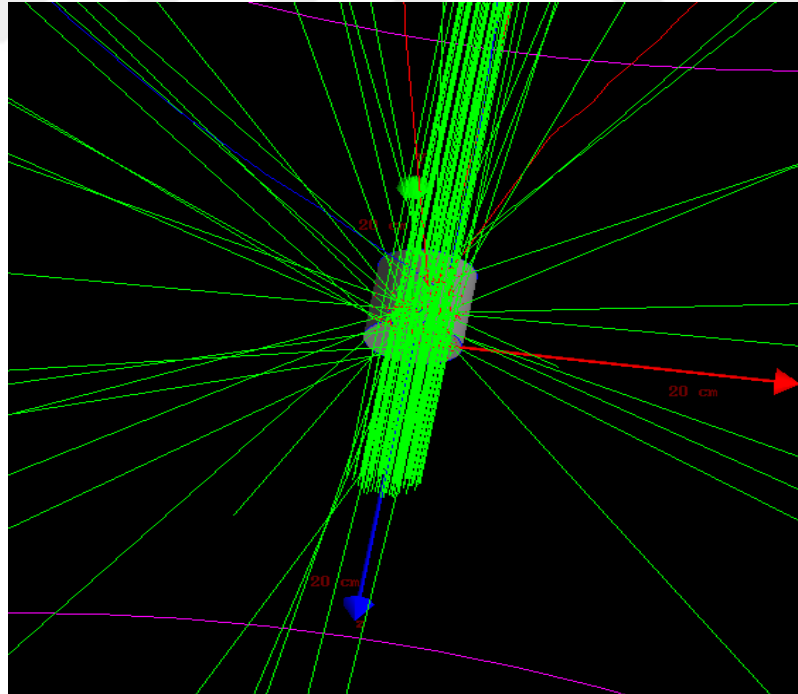
```
# BROAD BEAM #

/gate/source/addSource
/gate/source/Source2/gps/particle      Source2
/gate/source/Source2/gps/energytype    gamma
/gate/source/Source2/gps/monoenergy     Mono
/gate/source/Source2/gps/angtype        2000 keV
/gate/source/Source2/gps/mintheta       iso
/gate/source/Source2/gps/maxtheta       0.01 deg
/gate/source/Source2/gps/minphi         0.01 deg
/gate/source/Source2/gps/maxphi         0. deg
/gate/source/Source2/gps/type           360. deg
/gate/source/Source2/gps/shape          Volume
/gate/source/Source2/gps/radius          Cylinder
/gate/source/Source2/gps/halfz          2.0 cm
/gate/source/Source2/gps/center         0. mm
/gate/source/Source2/visualize          0. 0. 10.0 cm
/gate/source/list                       1000 yellow 10

# DATA OUTPUT #

/gate/output/root/enable
/gate/output/root/setFileName          Broad
/gate/output/root/setRootHitFlag       1
/gate/output/root/setRootSinglesFlag   1
/gate/output/root/setRootOpticalFlag   0
/gate/output/root/setRootNtupleFlag    0
```

Şekil 3.19. Geniş ışın demeti gama kaynağı (broad beam) oluşturmak için kullanılan kodlar



Şekil 3.20. Geniş ışın demeti (broad beam) kaynağından yayınlanan gama fotonları

```

# NARROW BEAM #

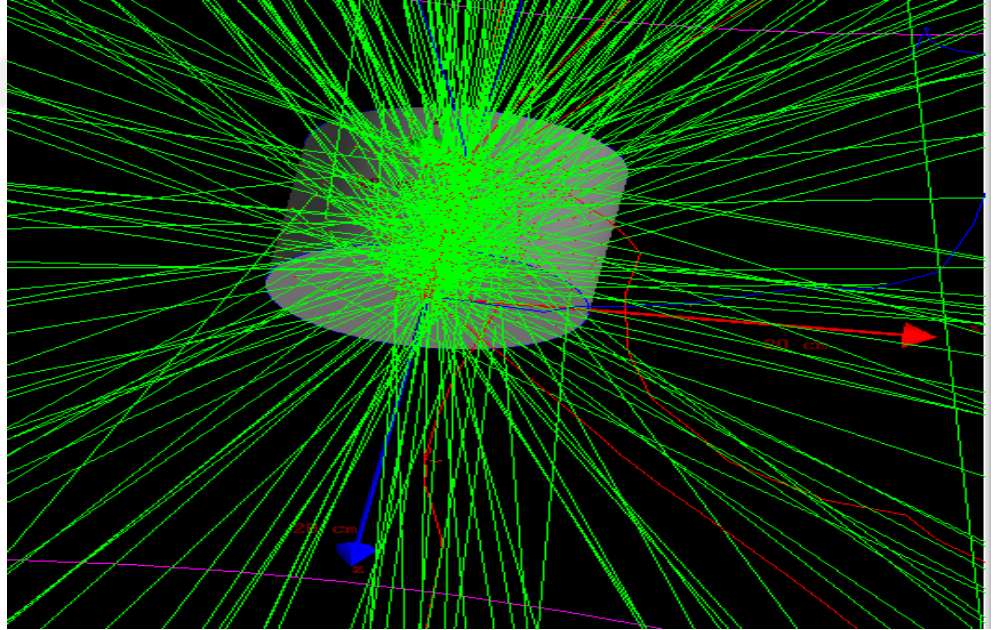
/gate/source/addSource                               Source1
/gate/source/Source1/gps/particle                    gamma
/gate/source/Source1/gps/energytype                  Mono
/gate/source/Source1/gps/monoenergy                  661    keV
/gate/source/Source1/gps/angtype                     iso
/gate/source/Source1/gps/mintheta                    0.01 deg
/gate/source/Source1/gps/maxtheta                    0.01 deg
/gate/source/Source1/gps/minphi                      0. deg
/gate/source/Source1/gps/maxphi                      360. deg
/gate/source/Source1/gps/type                        Volume
/gate/source/Source1/gps/centre                      0. 0. 12.0 cm
/gate/source/Source1/visualize                      1000 red 5

# DATA OUTPUT #

/gate/output/root/enable
/gate/output/root/setFileName                        Narrow
/gate/output/root/setRootHitFlag                     1
/gate/output/root/setRootSinglesFlag                 1
#/gate/output/root/setRootOpticalFlag                 0
#/gate/output/root/setRootNtupleFlag                 0

```

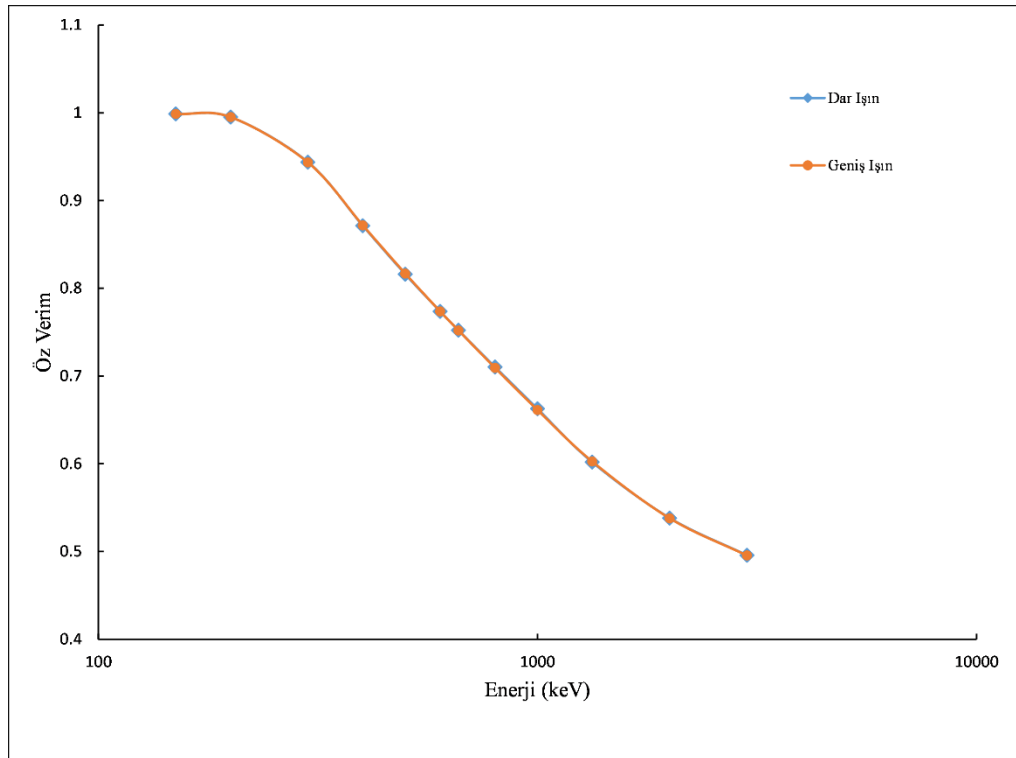
Şekil 3.21. Dar ışın demeti (narrow beam) gama kaynağı oluşturmak için kullanılan kodlar



Şekil 3.22. Dar ışın demeti (narrow beam) kaynağından yayınlanan gama fotonları

Çizelge 3.8. 2"x2" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde dar ışın demeti ve geniş ışın demeti gama kaynakları için öz verim değerleri

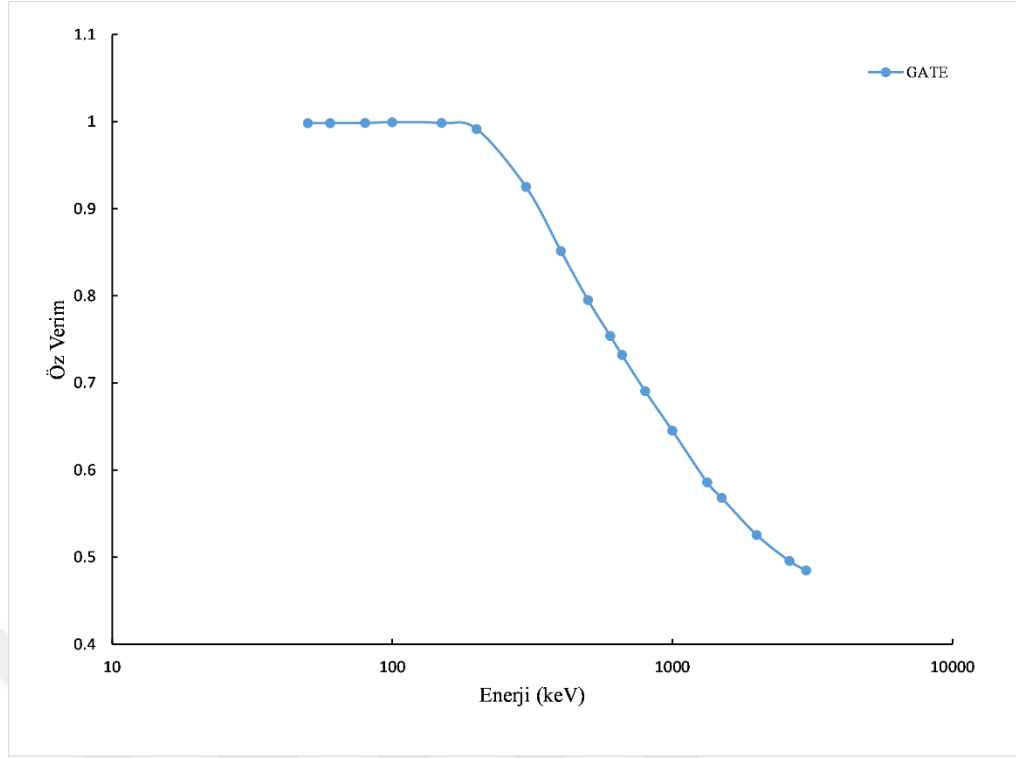
Enerji (keV)	Öz Verim	
	Dar Işın Demet Kaynağı	Geniş Işın Demet Kaynağı
150	0.9987	0.9986
200	0.9951	0.9951
300	0.9438	0.9435
400	0.8713	0.8718
500	0.816	0.8167
600	0.7737	0.7737
661	0.752	0.7519
800	0.7103	0.7094
1000	0.6626	0.6613
1332	0.6019	0.6026
2000	0.5381	0.5378
3000	0.4957	0.4954



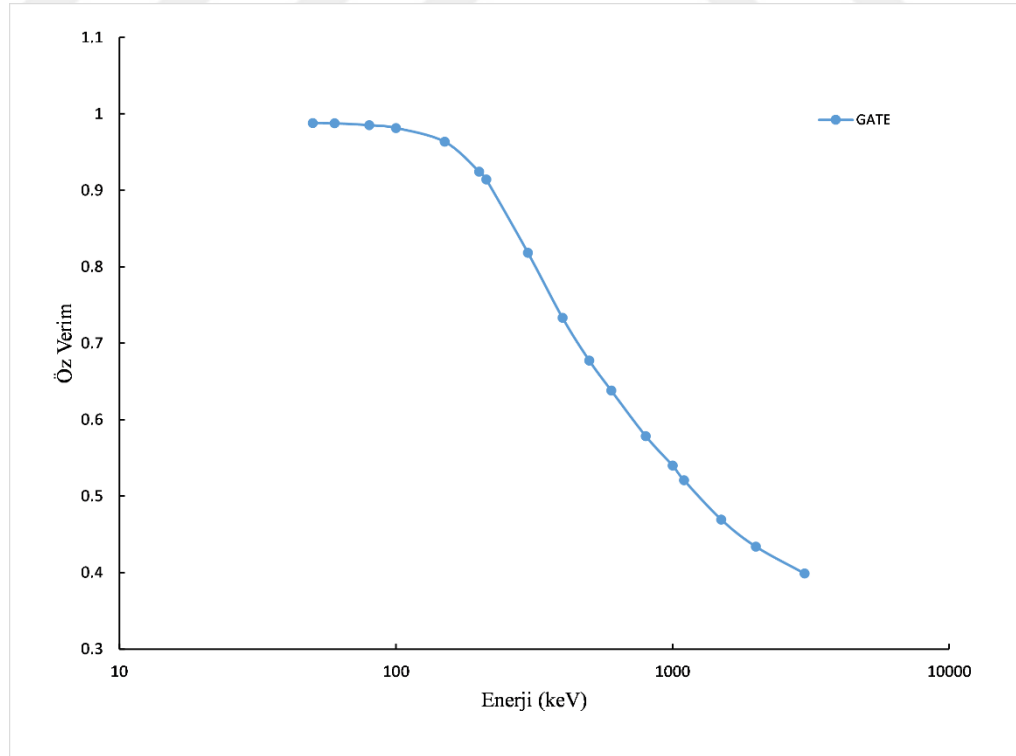
Şekil 3.23. 2"x2" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde dar ışın demeti ve geniş ışın demeti gama kaynakları için öz verim değerleri

Çizelge 3.9. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden farklı uzaklıklarda noktasal ve disk gama kaynakları için öz verim değerleri

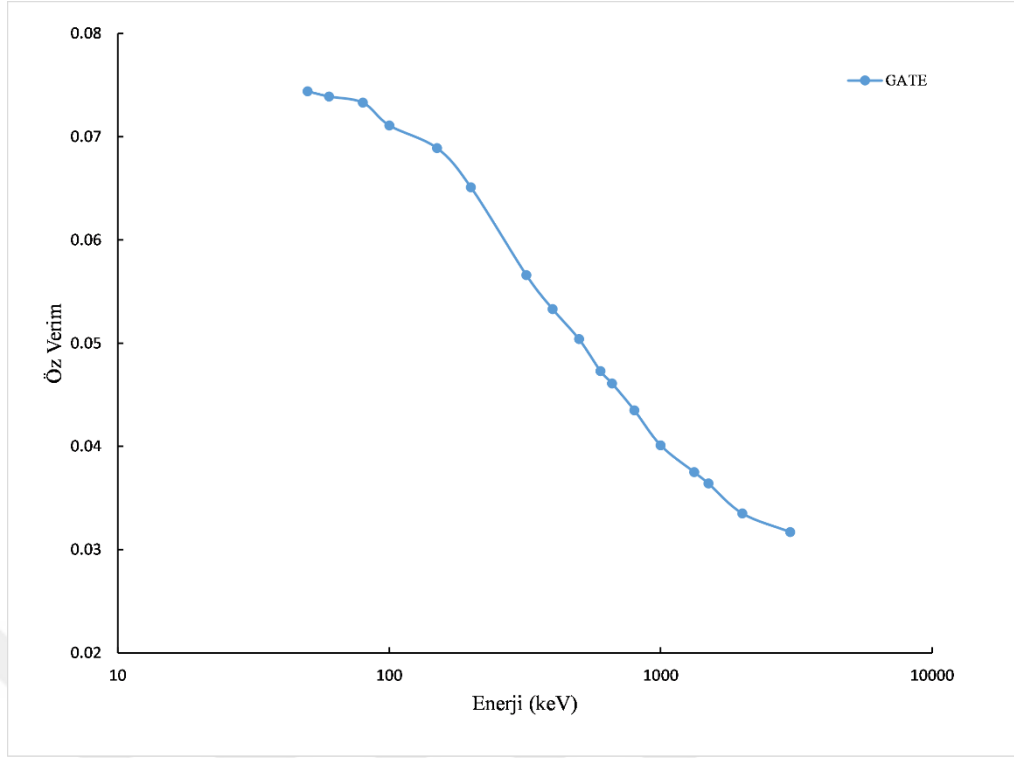
Enerji(keV)	Öz Verim				
	Nokta Kaynak			Disk Kaynak	
	D=0.001cm	D=0.5cm	D=10cm	D=3cm	D=10cm
50	0.9982	0.9879	0.0744	0.395	0.0683
60	0.9982	0.9875	0.0739	0.395	0.0679
80	0.9986	0.9851	0.0733	0.3904	0.0679
100	0.9992	0.9814	0.0711	0.3861	0.0667
150	0.9984	0.9635	0.0689	0.3642	0.0644
200	0.9916	0.9244	0.0651	0.3392	0.0608
212		0.9141		0.3326	
300	0.9252	0.8183	0.0566	0.293	0.0545
400	0.8516	0.7332	0.0533	0.2623	0.0507
500	0.7951	0.6773	0.0504	0.2426	0.047
600	0.7541	0.6382	0.0473	0.2315	0.0448
662	0.7321		0.0461		0.0433
800	0.6906	0.5785	0.0435	0.2119	0.0416
1000	0.6454	0.54	0.0401	0.1967	0.0391
1100		0.5208		0.1922	
1330	0.5858		0.0375		0.0358
1500	0.5682	0.4694	0.0364	0.1746	0.0344
2000	0.5256	0.4341	0.0335	0.1596	0.0325
2620	0.4957				0.0308
2750					0.0301
3000	0.4849	0.3989	0.0317	0.1476	0.0301



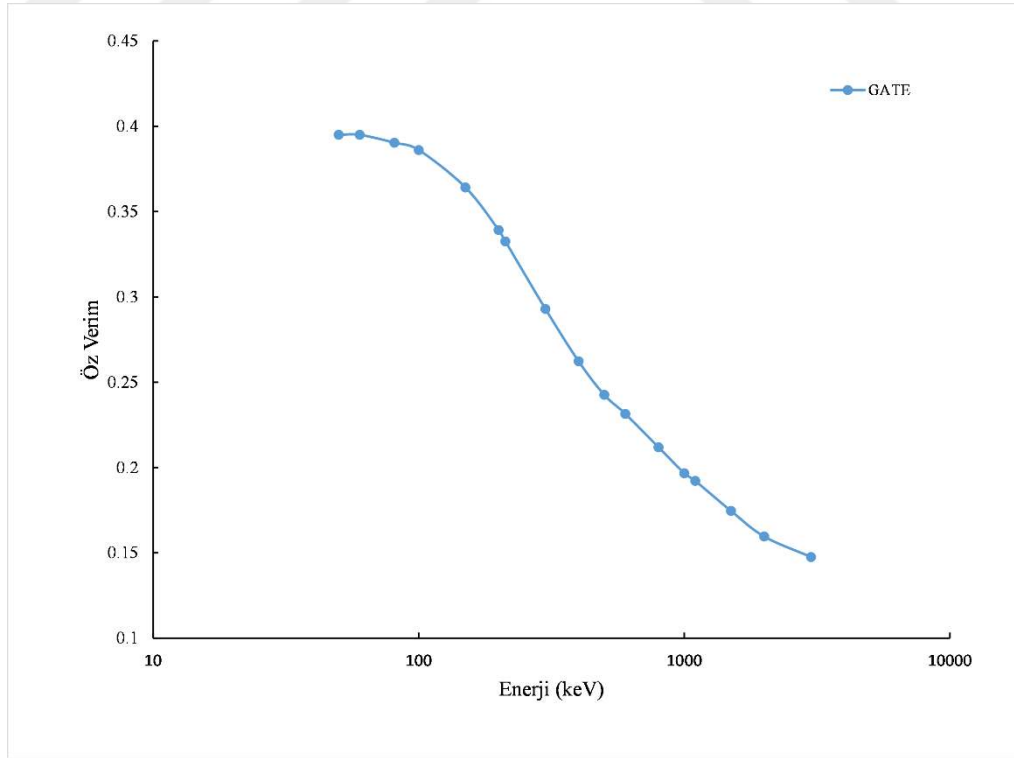
Şekil 3.24. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=0.001 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için öz verim değerleri



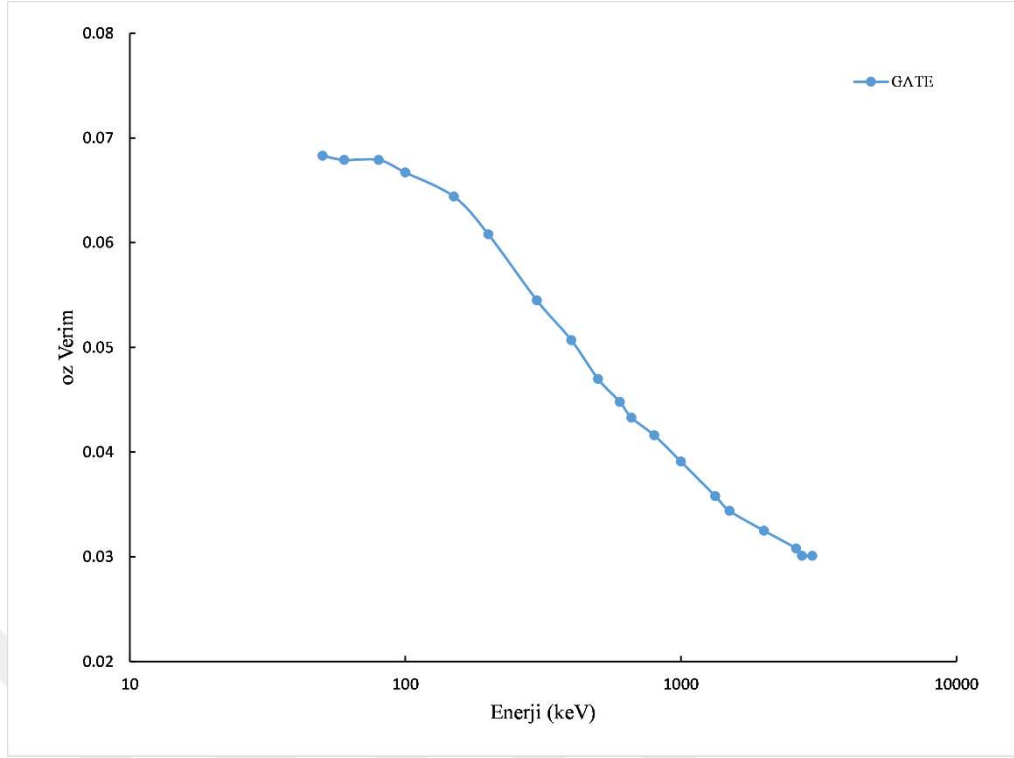
Şekil 3.25. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=0.05 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için öz verim değerleri



Şekil 3.26. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için öz verim değerleri



Şekil 3.27. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=3 cm uzaklıkta disk gama kaynağı için öz verim değerleri



Şekil 3.28. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta disk gama kaynağı için öz verim değerleri

3.3. Tüm Enerji Pik Verimi

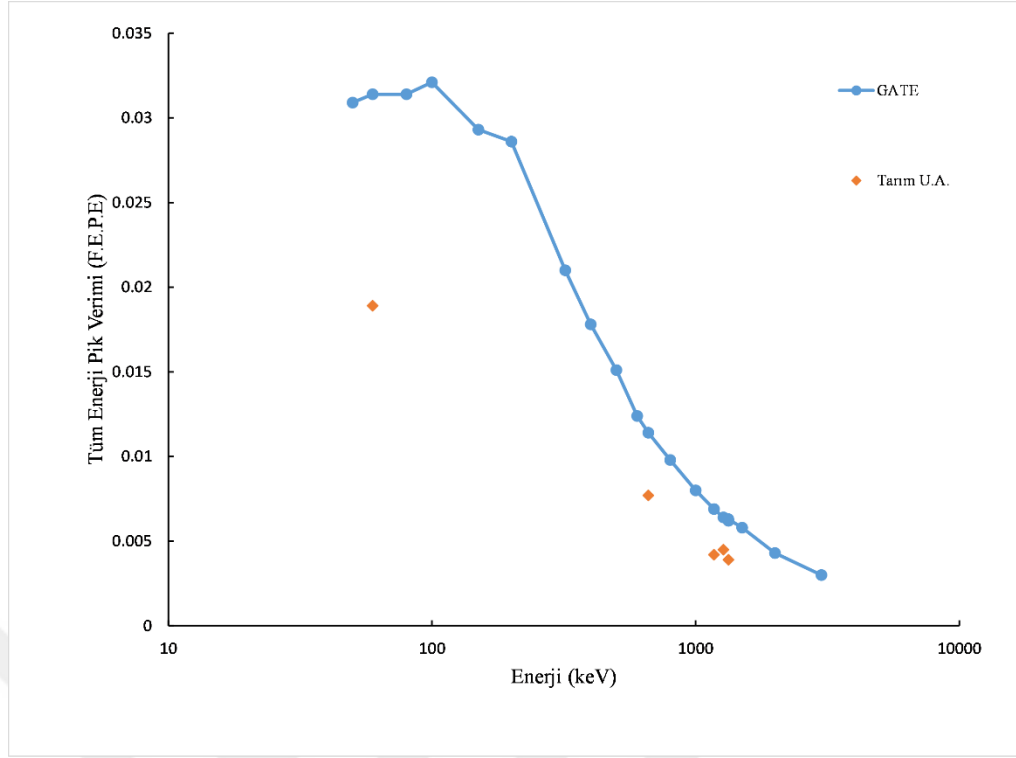
Toplam gama ışını enerjisinin soğurulmasıyla meydana gelen sayma sayılarının kaynaktan yayınlanan gama ışınlarının sayısına oranı olarak tanımlanır.

$$\mathcal{E}_f = N_{pik} / N_k$$

eşitliği kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Gate simülasyon programı ile elde edilen bazı tüm enerji pik verim verileri aşağıdaki tablolarda ve grafiklerde verilmiştir. Kullanılan kaynaklar enerjileri 50 keV-3000 keV arası, dedektörden farklı uzaklıklarda konulan disk ve nokta gama kaynaklarıdır.

Çizelge 3.10. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri eksenini üzerinde detektör ön yüzeyinden D=10cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için tüm enerji pik verimi değerleri

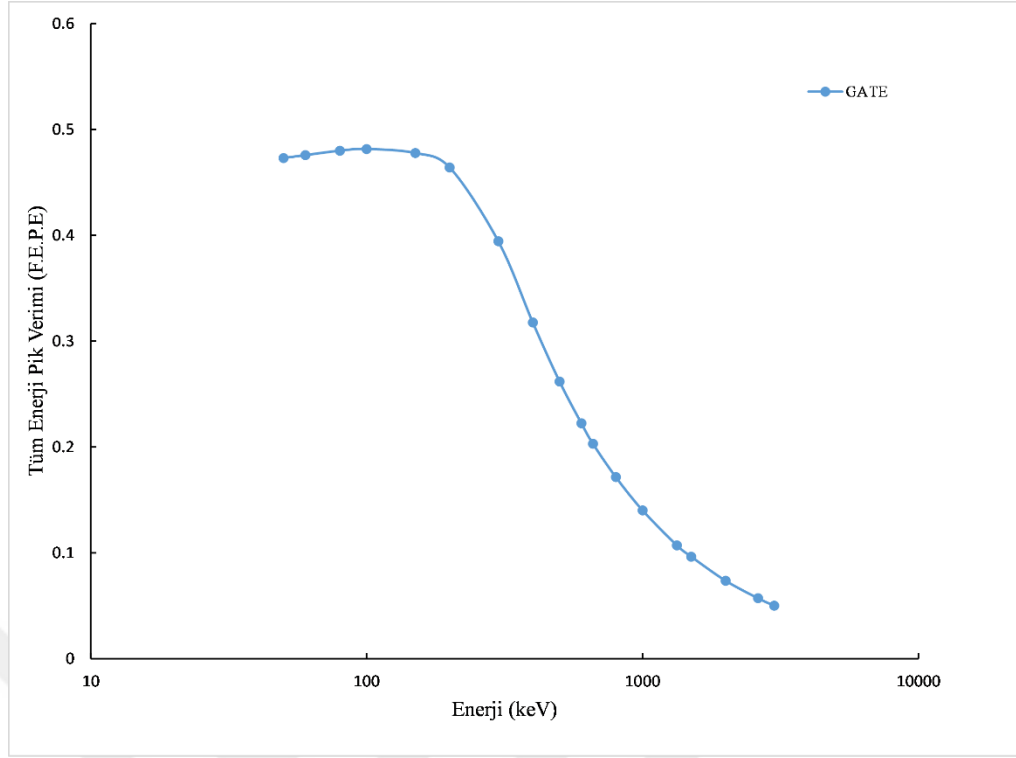
Enerji(keV)	Tüm Enerji Pik Verimi (F.E.P.E)	
	GATE Simülasyonu	Tarım U.A. (2018)
50	0.0309	
59.5	0.0314	0.0189
80	0.0314	
100	0.0321	
150	0.0293	
200	0.0286	
320	0.0210	
400	0.0178	
500	0.0151	
600	0.0124	
661.6	0.0114	0.0077
800	0.0098	
1000	0.0080	
1173.5	0.0069	0.0042
1274.5	0.0064	0.0045
1332.5	0.0062	0.0039
1330	0.0063	
1500	0.0058	
2000	0.0043	
3000	0.0030	



Şekil 3.29. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=10cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için tüm enerji pik verimi değerleri

Çizelge 3.11. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=0.001cm uzaklıktanoktasal gama kaynağı için tüm enerji pik verimi değerleri

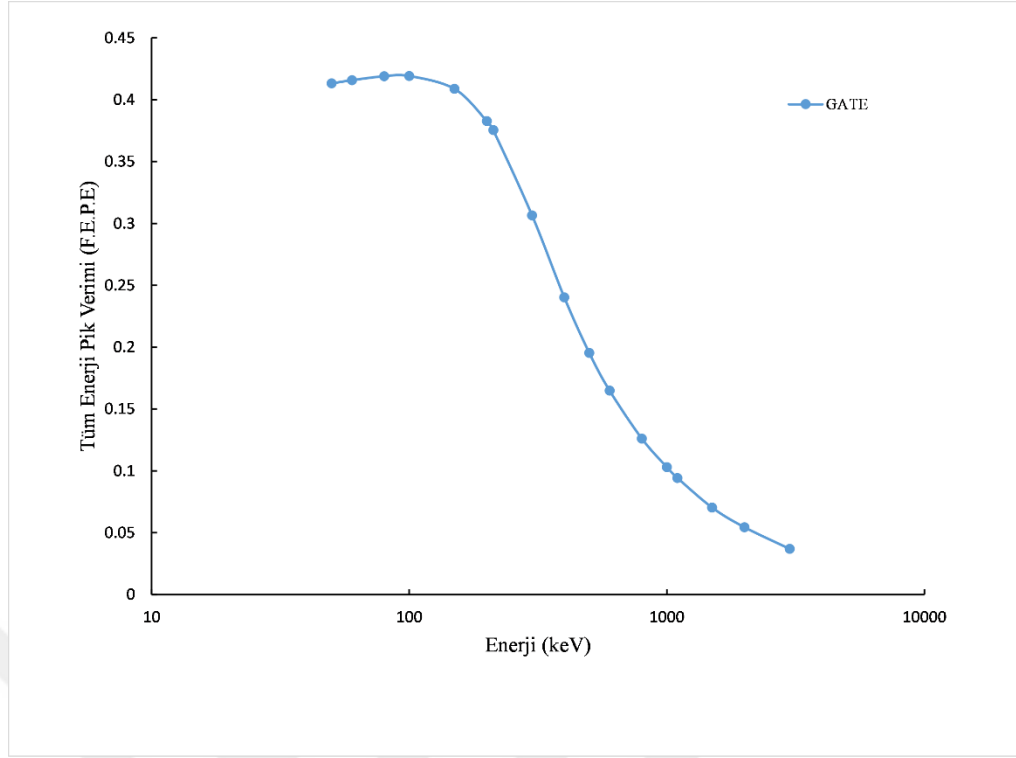
Enerji(keV)	Tüm Enerji Pik Verimi (F.E.P.E)
	GATE Simülasyonu
50	0.4730
60	0.4758
80	0.4800
100	0.4816
150	0.4778
200	0.4640
300	0.3944
400	0.3177
500	0.2619
600	0.2224
661	0.2030
800	0.1715
1000	0.1401
1332	0.1070
1500	0.0964
2000	0.0736
2620	0.0571
3000	0.0500



Şekil 3.30. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri eksenı üzerinde detektör ön yüzeyinden D=0.001cm uzaklıktanoktasal gama kaynağı için tüm enerji pık verimi değeri

Çizelge 3.12. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=0.5cm uzaklıktanoktasal gama kaynağı için tüm enerji pik verimi değerleri

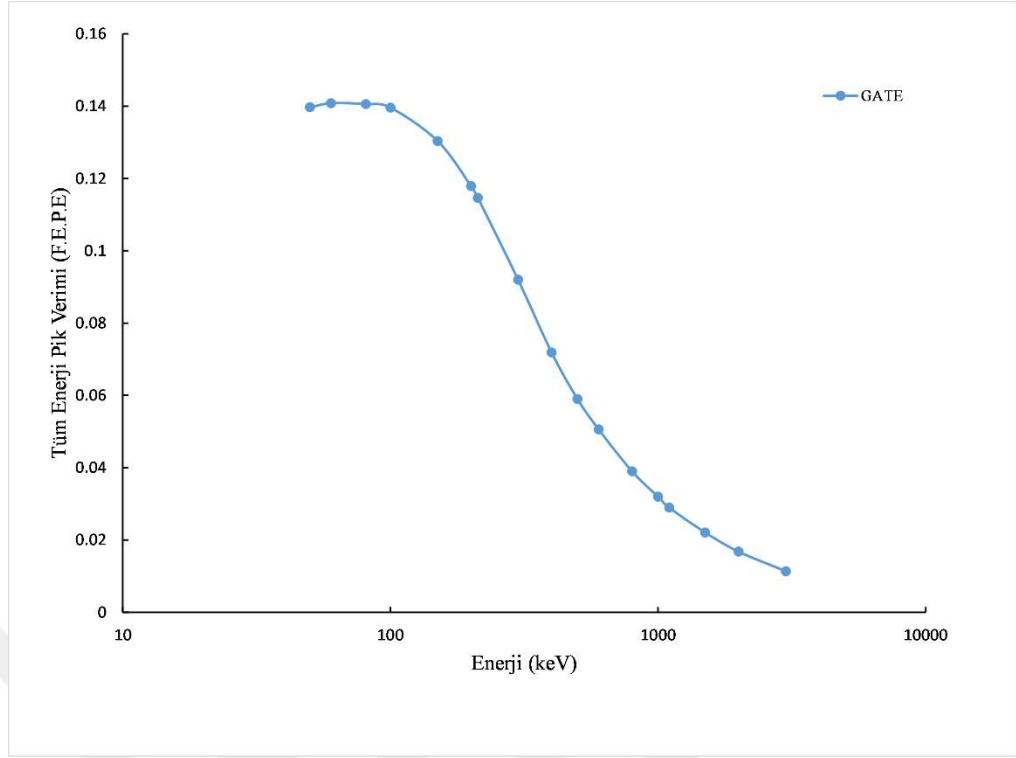
Enerji(keV)	Tüm Enerji Pik Verimi (F.E.P.E)
	GATE Simülasyonu
50	0.4132
60	0.4158
80	0.4190
100	0.4192
150	0.4088
200	0.3828
212	0.3754
300	0.3065
400	0.2403
500	0.1954
600	0.1648
800	0.1261
1000	0.1031
1100	0.0943
1500	0.0703
2000	0.0545
3000	0.0369



Şekil 3.31. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri eksenı üzerinde detektör ön yüzeyinden D=0.5cm uzaklıktanoktasal gama kaynağı için tüm enerji pık verimi değeri

Çizelge 3.13.3”x3” NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=3cm uzaklıkta disk gama kaynağı için tüm enerji pik verimi değerleri

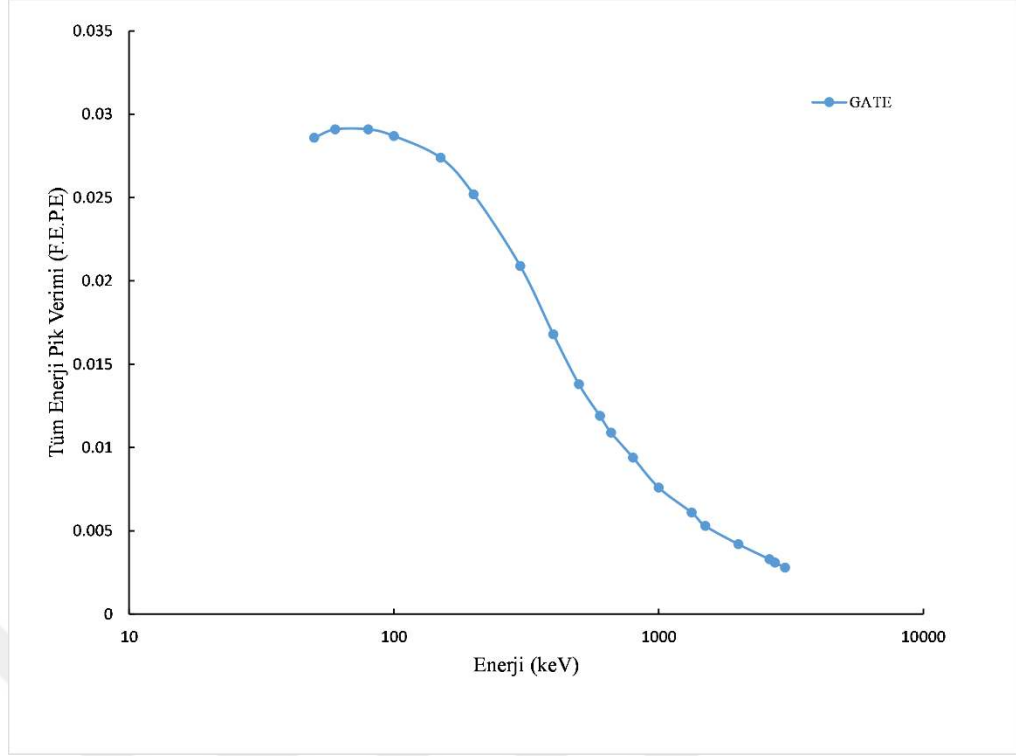
Enerji (keV)	Tüm Enerji Pik Verimi (F.E.P.E)
	GATE Simülasyonu
50	0.1397
60	0.1408
81	0.1406
100	0.1396
150	0.1304
200	0.1179
212	0.1147
300	0.0920
400	0.0719
500	0.0590
600	0.0506
800	0.0390
1000	0.0320
1100	0.0290
1500	0.0221
2000	0.0168
3000	0.0114



Şekil 3.32. 3"x3" inç NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=3cm uzaklıkta disk gama kaynağı için tüm enerji pik verimi değerleri

Çizelge 3.14. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri eksenı üzerinde detektör ön yüzeyinden D=10cm uzaklıkta disk gama kaynağı için tüm enerji pik verimi değeri

Enerji(keV)	Tüm Enerji Pik Verimi (F.E.P.E)
	GATE Simülasyonu
50	0.0286
60	0.0291
80	0.0291
100	0.0287
150	0.0274
200	0.0252
300	0.0209
400	0.0168
500	0.0138
600	0.0119
661	0.0109
800	0.0094
1000	0.0076
1332	0.0061
1500	0.0053
2000	0.0042
2620	0.0033
2750	0.0031
3000	0.0028



Şekil 3.33. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=10cm uzaklıkta disk gama kaynağı için tüm enerji pik verimi değerleri

3.4. Tüm Enerji Pik Öz Verimi

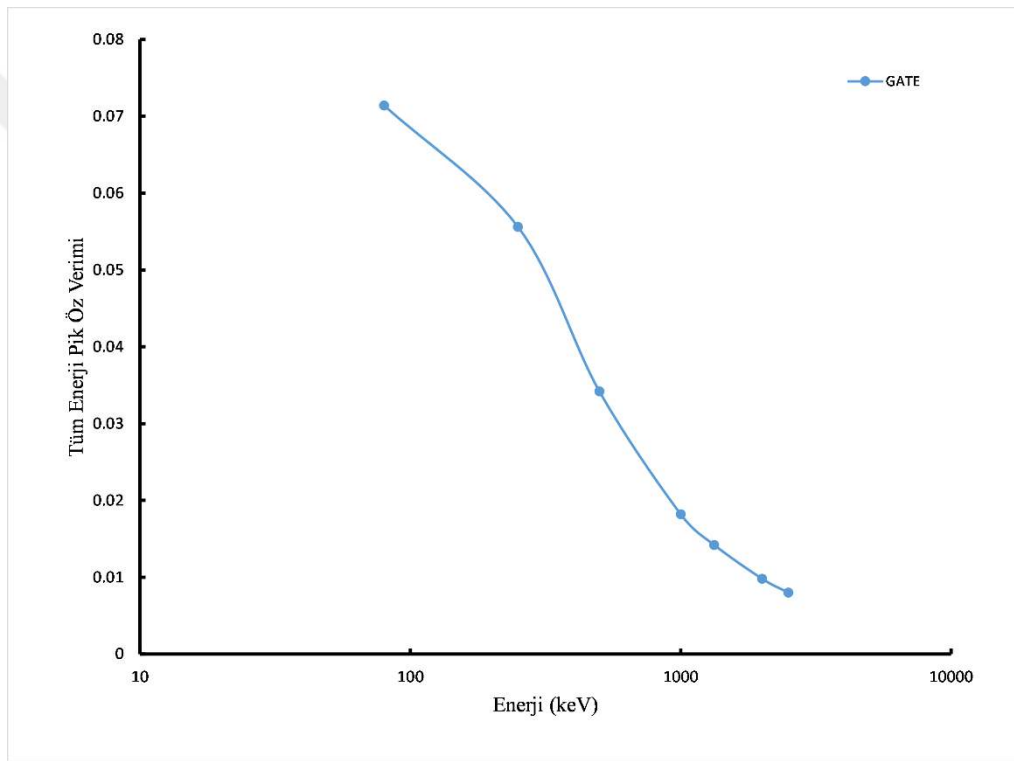
Toplam gama ışını enerjisinin absorplanmasıyla meydana gelen sayma sayılarının detektöre giren gama ışınları sayısına oranı olarak tanımlanır. Tüm enerji pik veriminin geometrik faktöre oranı ile aynı sonuçları verir. Hesaplamalar,

$$\mathcal{E}_{inf} = \mathcal{E}_f / G$$

eşitliği kullanılarak yapılmıştır. Gate simülasyon programı ile elde edilen bazı tüm enerji pik öz verimi verileri aşağıdaki tabloda ve grafikte verilmiştir. Programda oluşturulan dedektör 3"x3" (yükseklik: 3", çap: 3") Tl ile aktive edilmiş NaI(Tl) sintilasyon dedektörleridir. Kullanılan kaynak ise 80keV-2500 keV arası D=10cm uzaklığa konulan noktasal gama kaynağıdır.

Çizelge 3.15. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=10cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için tüm enerji pik öz verimi değerleri

Enerji(keV)	Tüm Enerji Pik Öz Verimi
80	0.0714
250	0.0556
500	0.0342
1000	0.0182
1330	0.0142
2000	0.0098
2500	0.0080



Şekil 3.34. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün detektör simetri ekseninde detektör ön yüzeyinden D=10cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için tüm enerji pik öz verimi değerleri

3.5. Pik Değerinin Toplam Sayıya Oranı

Toplam gama ışını enerjisinin soğurulmasıyla oluşan sayma sayılarının toplam sayma sayısına oranı olarak tanımlanır.

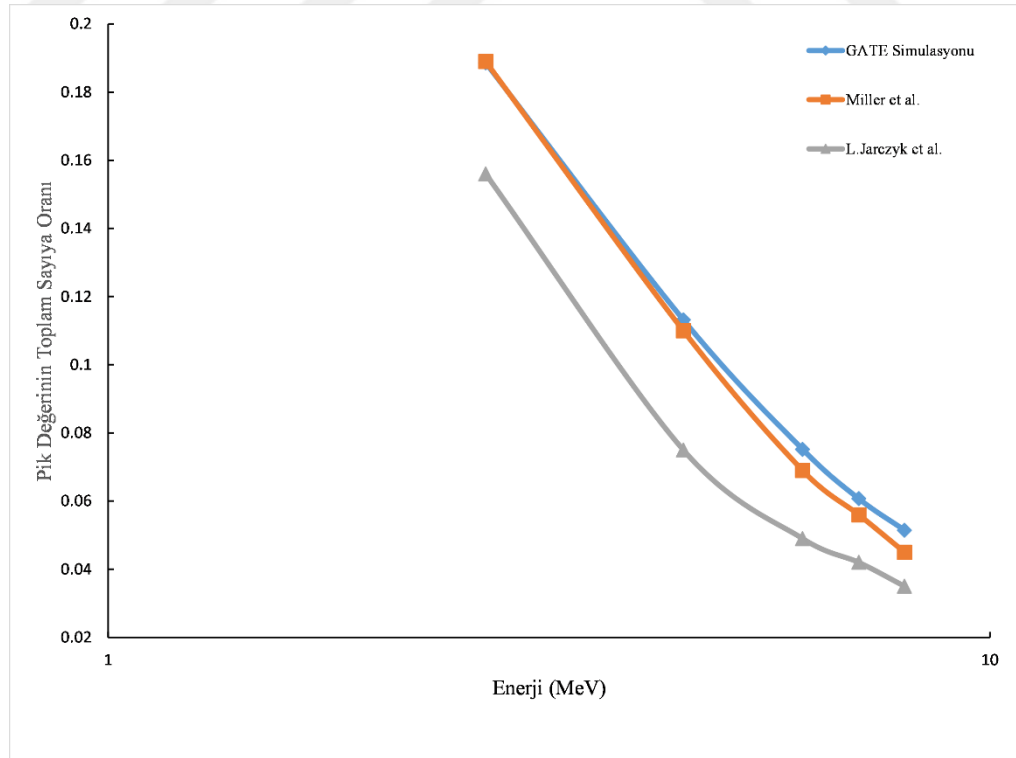
$$R_p = N_{pik} / N_s$$

Eşitliği ile hesaplamalar elde edilmiştir. Veriler 3"x3" NaI(Tl) dedektörü ile 50 keV-3000 keV arası enerjilerde; 2"x2" dedektör ile 2.68 MeV 8.00 MeV arası enerjilerde ve 5"x4" lik dedektör ile 0.661 MeV- 4.45 MeV arası enerjilerde çalıştırılıp elde edilmiştir. Kullanılan kaynaklar ise farklı uzaklıklarakonulan disk, geniş demet ışını, dar demet ışını ve noktasal gama kaynaklardır.

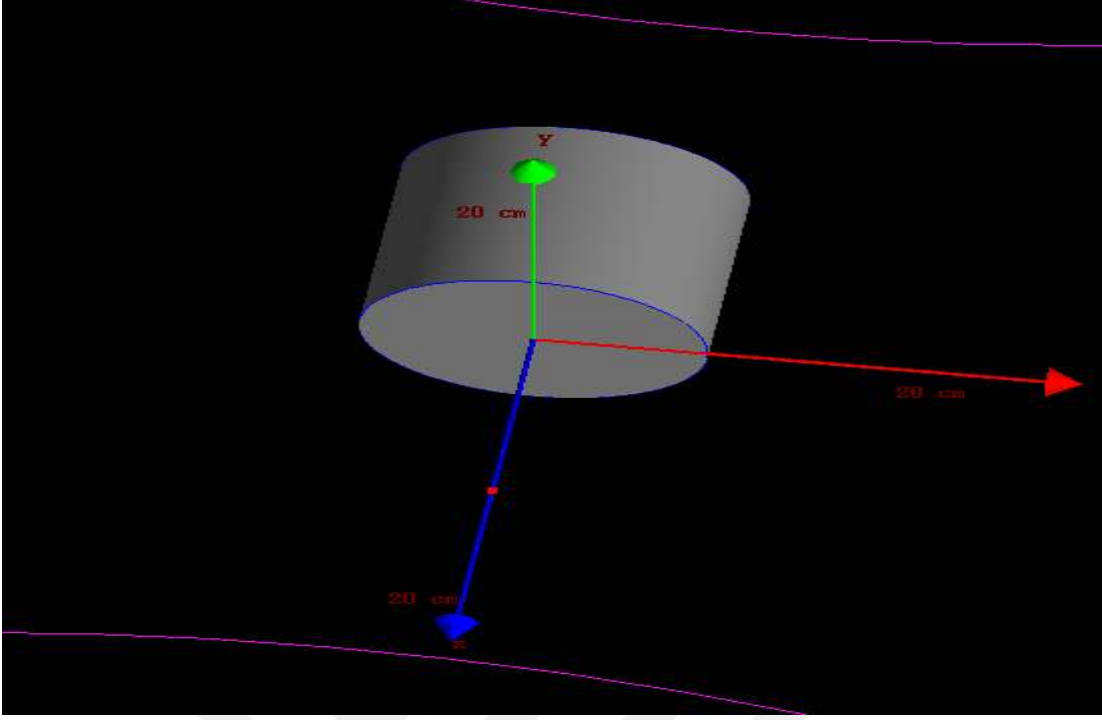
Bu çalışmada dedektör kaynak uzaklığı belirtilmemiştir çünkü gama fotonları doğrusal olarak sapmaya uğramadan kaynağa girdiği için herhangi bir uzaklığıkonulabilir.

Çizelge 3.16. 2"x2" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde geniş ışın demeti(broad beam) gamma kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri

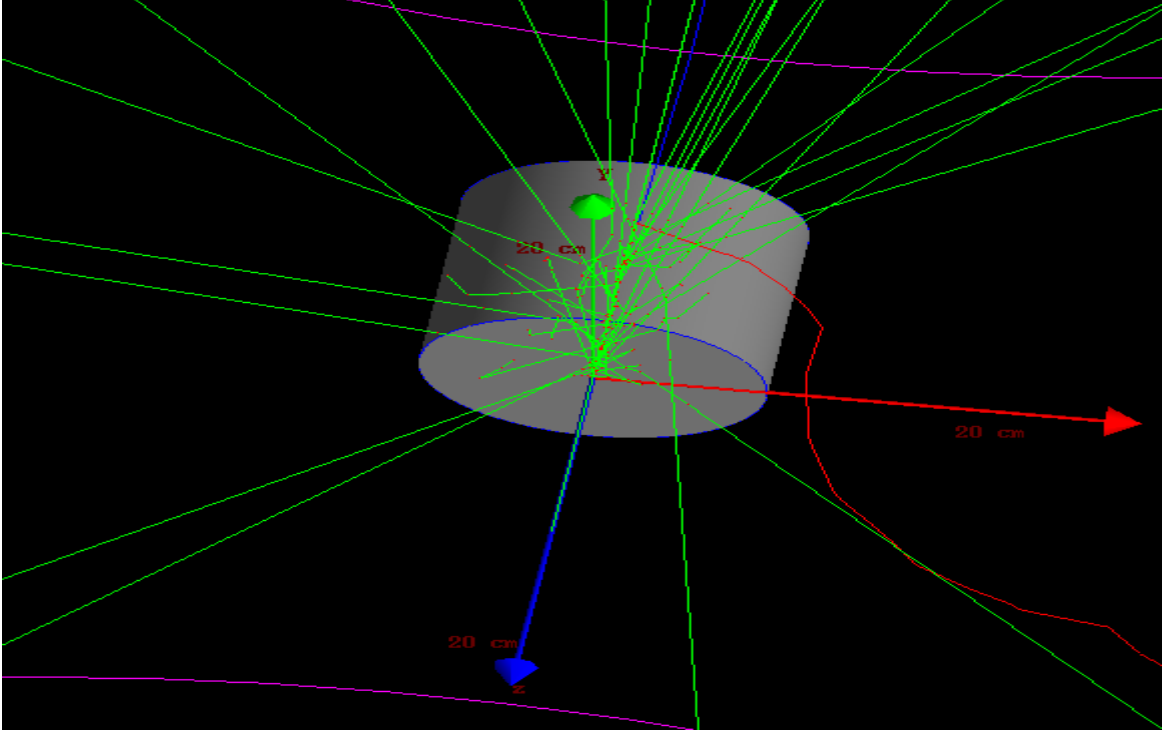
Energy (MeV)	GATE Simülasyon	Miller W. F. vd. (1960)	Jarczyk L. vd. (1962)
2.68	0.1886	0.189	0.156
4.49	0.1132	0.110	0.075
6.13	0.0752	0.069	0.049
7.10	0.0607	0.056	0.042
8.00	0.0514	0.045	0.035



Şekil 3.35. 2"x2" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde geniş ışın demeti(broad beam) gamma kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri



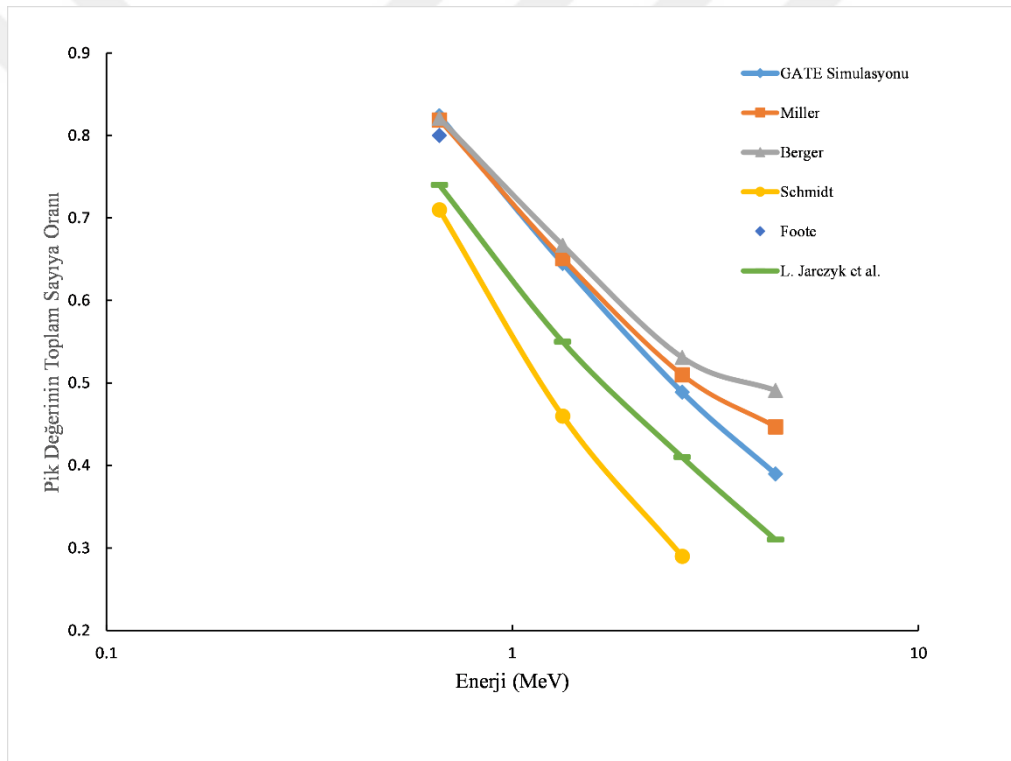
Şekil 3.36. Dar demet ışını kaynak ve dedektörün koordinat sisteminde görüntüsü



Şekil 3.37. Dar demet ışını kaynağından yayınlanan gama fotonları

Çizelge 3.17. 5"x4" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dar ışın(narrow beam) gamma kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri

Enerji (MeV)	GATE Simülasyonu	Miller W. F. vd. (1960)	Berger M.J. vd. (1956)	Schmidt C.T. (1960)	Foot R.S. v.d. (1954)	Jarczyk L. vd. (1962)
0.661	0.8241	0.819	0.821	0.71	0.8	0.74
1.33	0.6449	0.651	0.667	0.46		0.55
2.62	0.4889	0.510	0.531	0.29		0.41
4.45	0.3897	0.447	0.491			0.31

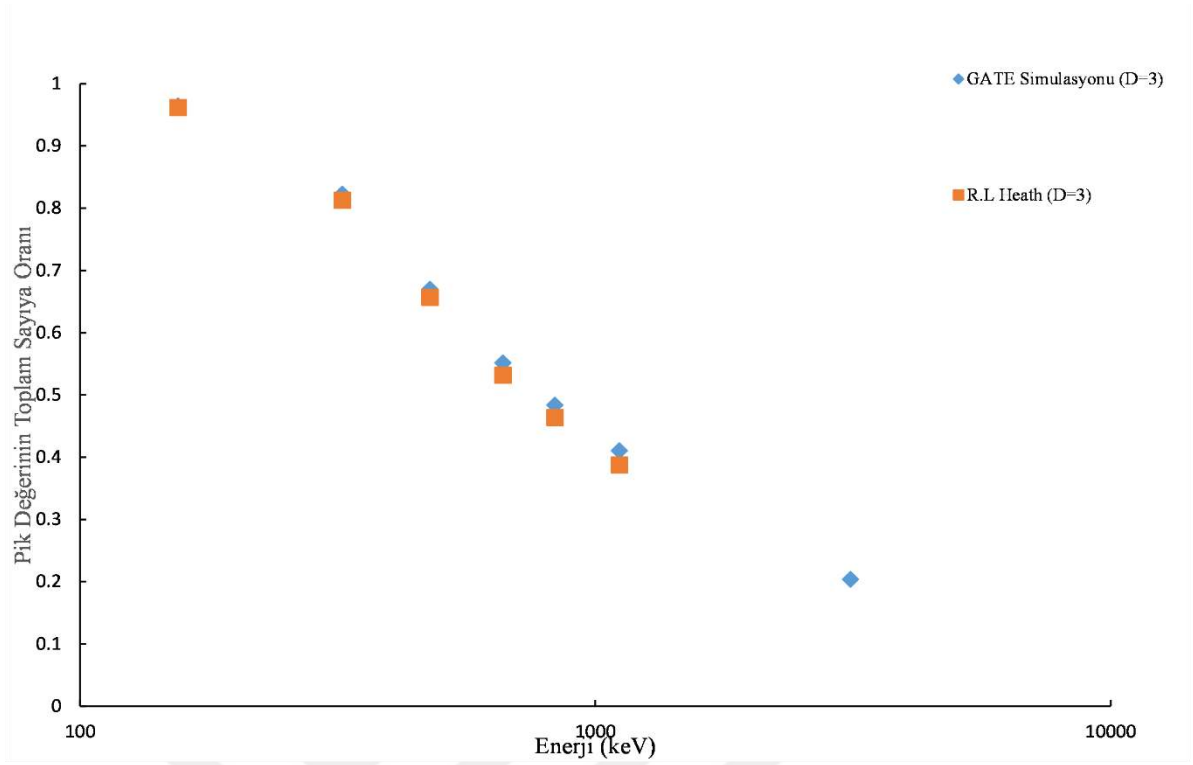


Şekil 3.38. 5"x4" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dar ışın(narrow beam) gamma kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri

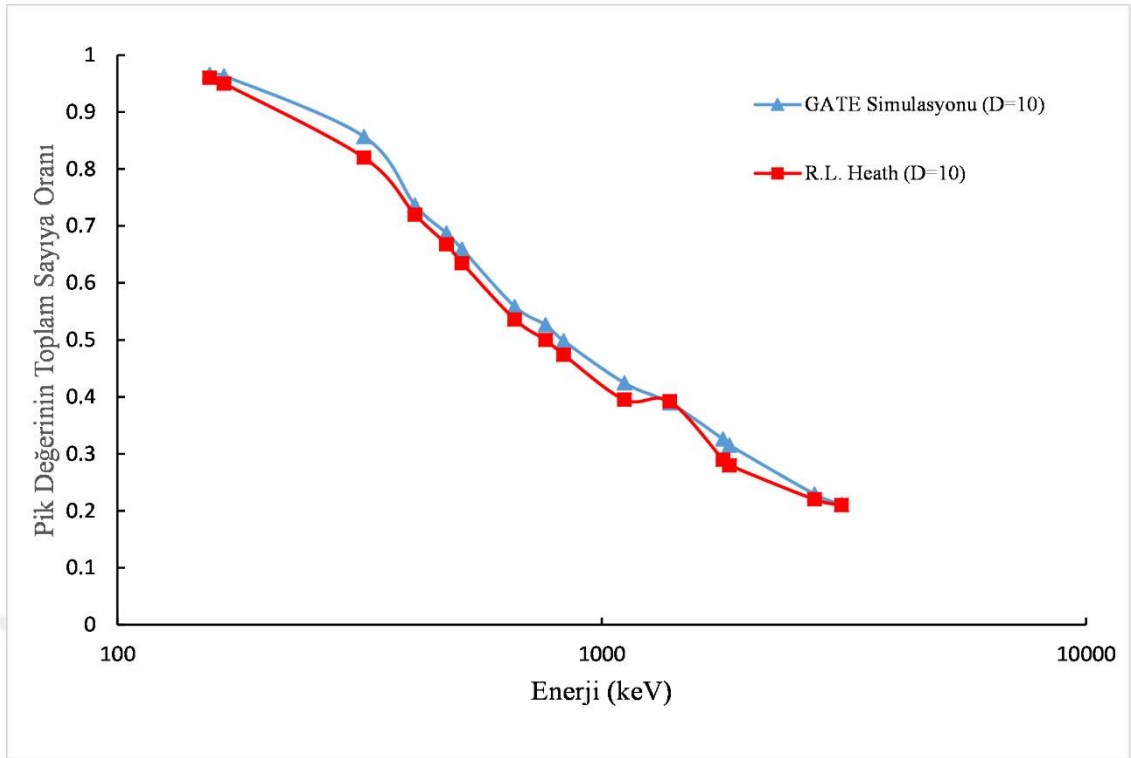
Çizelge 3.18. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri eksenine dedektör ön yüzeyinden D=3 cm ve D=10 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri

Enerji(keV)	Pik Değerinin Toplam Sayıya Oranı			
	D=3cm		D=10cm	
	Çalışma (GATE Simülasyonu)	Heath R.L. (1964)	Çalışma (GATE Simülasyonu)	Heath R.L. (1964)
155	0.9645	0.962	0.9665	0.960
166			0.9636	0.950
323	0.8230	0.813	0.8570	0.820
411.7			0.7366	0.720
478	0.6698	0.657	0.6875	0.668
515			0.6593	0.635
661.66	0.5516	0.532	0.5584	0.536
766			0.5266	0.500
835	0.4837	0.464	0.4982	0.474
1114	0.4106	0.388	0.4244	0.395
1382			0.3894	0.392
1780			0.3259	0.290
1837			0.3152	0.280
2753			0.2292	0.220
3130	0.2041		0.2110	0.210

(Heath R.L. sonuçları, *Photopeak Efficiency and Response Function of Various NaI(Tl) and CsI(Tl) Crystals in the Energy Range up to 11MeV* makalesinde grafikten okunmuştur.)



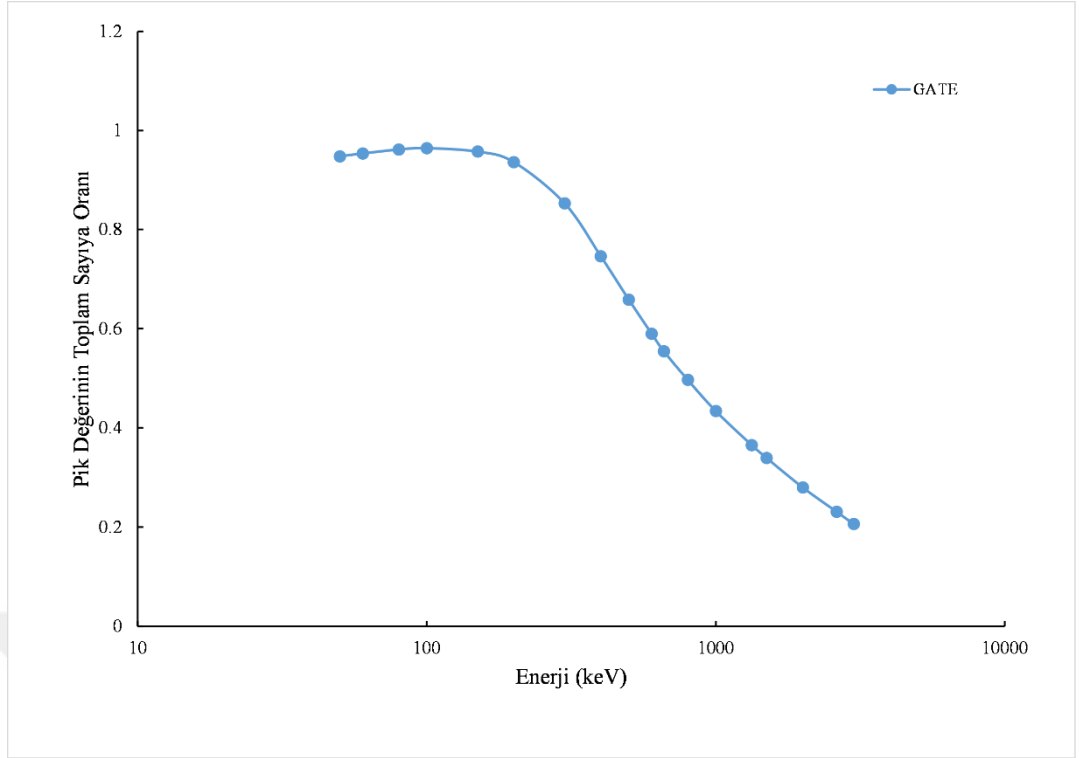
Şekil 3.39. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri eksenine dedektör ön yüzeyinden D=3 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri



Şekil 3.40. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri eksenine dedektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri

Çizelge 3.19. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri eksenine dedektör ön yüzeyinden D=0.001 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri

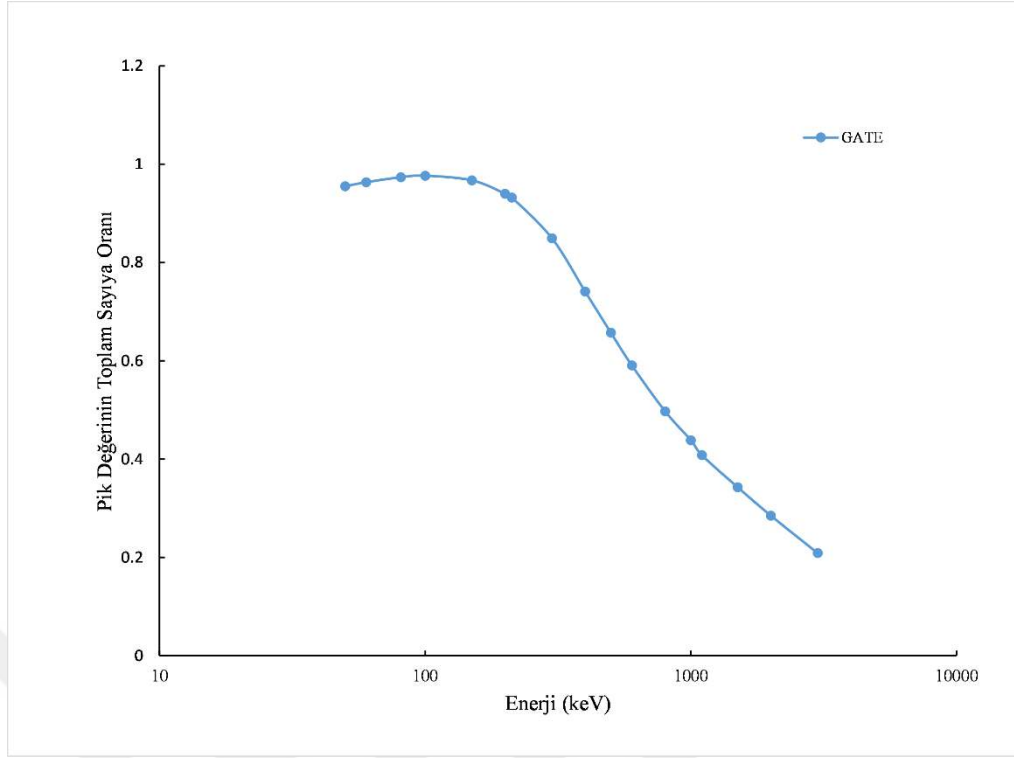
Enerji (keV)	Pik Değerinin Toplam Sayıya Oranı
50	0.9477
60	0.9535
80	0.9615
100	0.9642
150	0.9572
200	0.9361
300	0.8528
400	0.7463
500	0.6588
600	0.5899
661	0.5547
800	0.4968
1000	0.434
1332	0.3652
1500	0.3393
2000	0.2799
2620	0.2308
3000	0.2061



Şekil 3.41. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri eksenine dedektör ön yüzeyinden D=0.001 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri

Çizelge 3.20. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri eksenine dedektör ön yüzeyinden D=0.5 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri

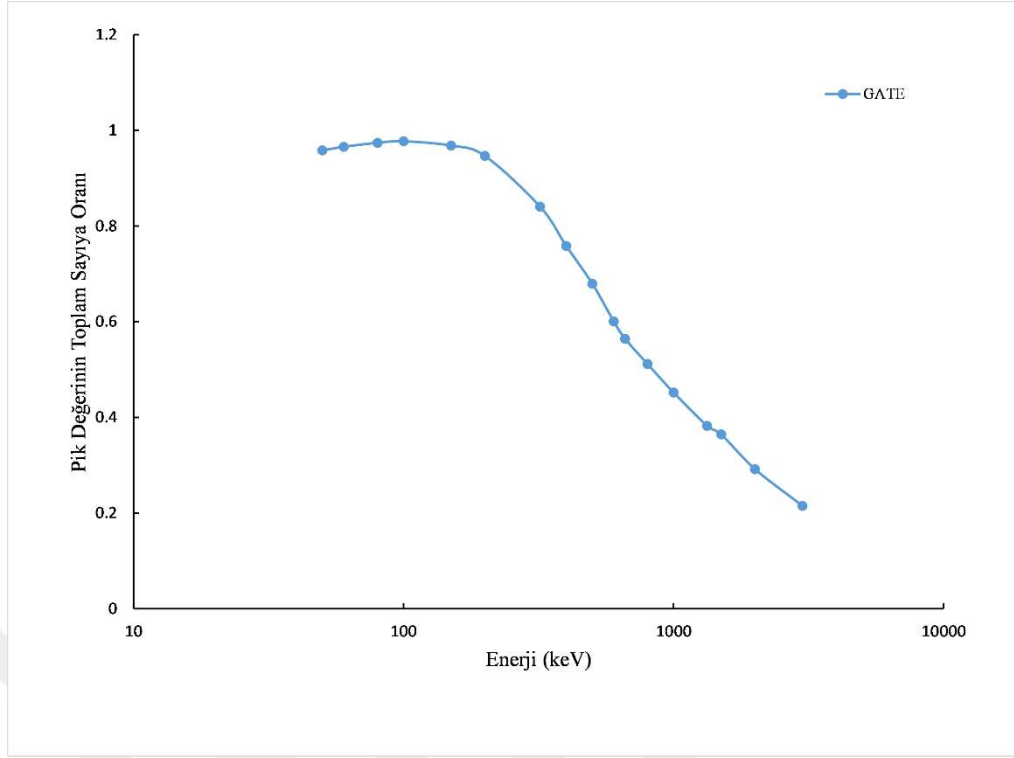
Enerji (keV)	Pik Değerinin Toplam Sayıya Oranı
50	0.9506
60	0.9571
80	0.9666
100	0.9706
150	0.9643
200	0.941
212	0.9334
300	0.8513
400	0.7451
500	0.6558
600	0.5871
800	0.4957
1000	0.4341
1100	0.4118
1500	0.3403
2000	0.2856
3000	0.2102



Şekil 3.42. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri eksenine dedektör ön yüzeyinden D=0.5 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri

Çizelge 3.21. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri eksenine dedektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri

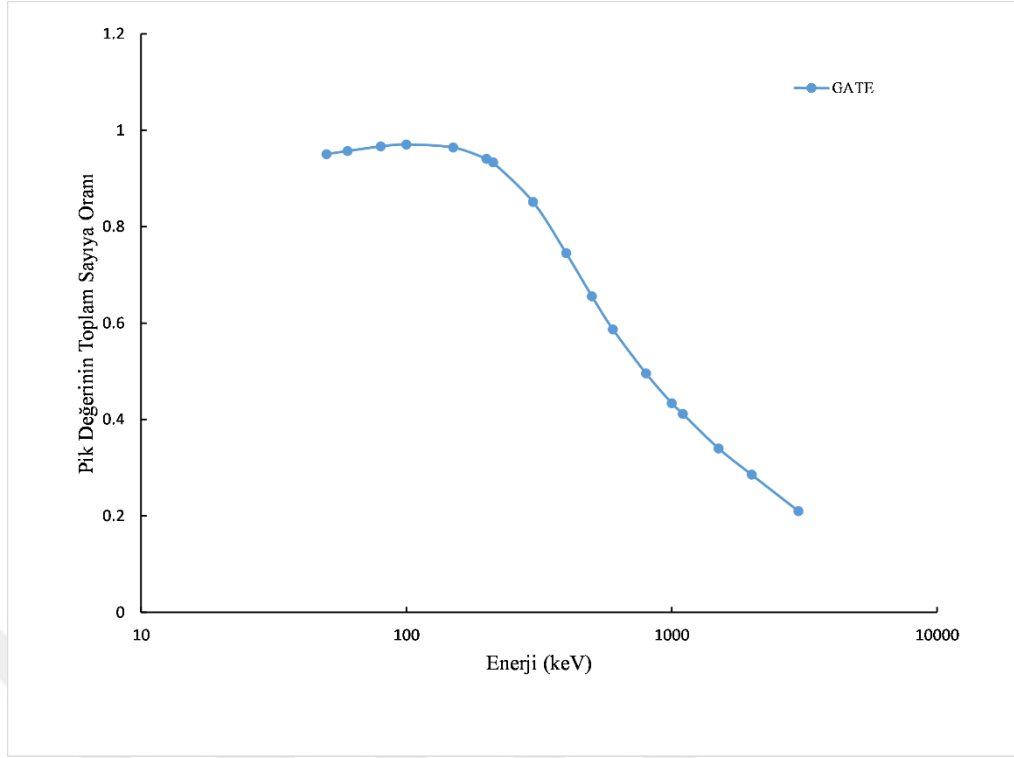
Enerji (keV)	Pik Değerinin Toplam Sayıya Oranı
50	0.9581
60	0.9657
80	0.974
100	0.9772
150	0.9682
200	0.9466
320	0.8406
400	0.7585
500	0.6794
600	0.6008
661	0.5643
800	0.5117
1000	0.4519
1330	0.3826
1500	0.3645
2000	0.2919
3000	0.2151



Şekil 3.43. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri eksenine dedektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta noktasal gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri

Çizelge 3.22. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri eksenine dedektör ön yüzeyinden D=3 cm uzaklıkta disk gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri

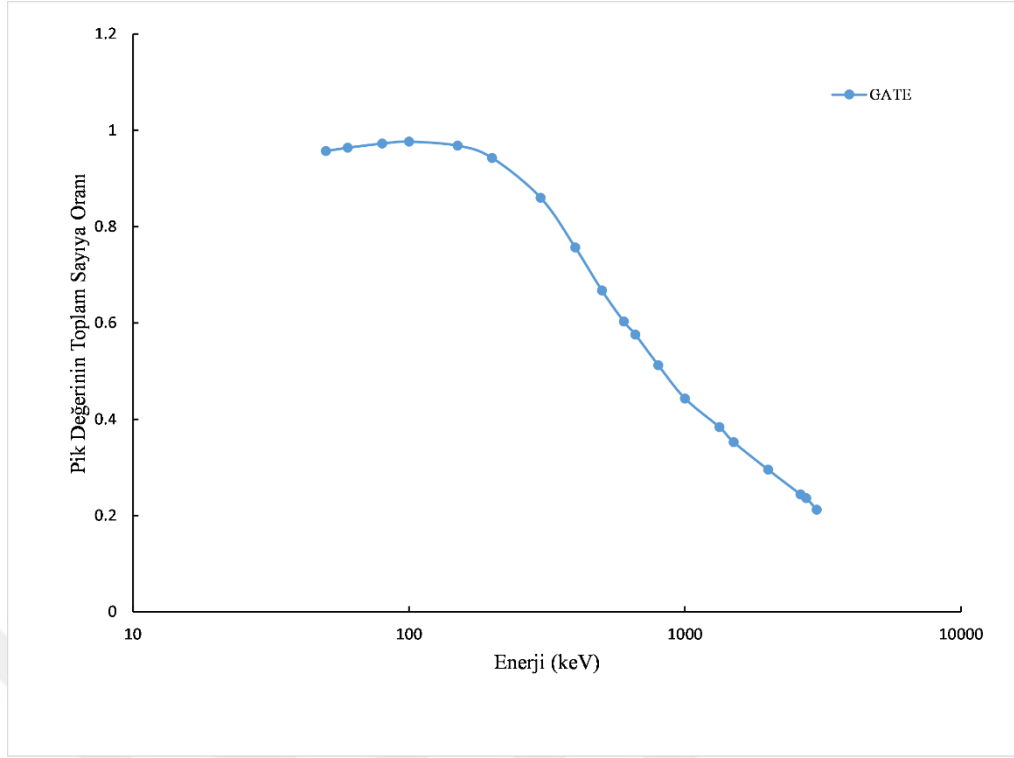
Enerji (keV)	Pik Değerinin Toplam Sayıya Oranı
50	0.9552
60	0.9634
81	0.9735
100	0.9766
150	0.9672
200	0.9399
212	0.9321
300	0.8494
400	0.7409
500	0.657
600	0.5903
800	0.4971
1000	0.4384
1100	0.4079
1500	0.3427
2000	0.2849
3000	0.2086



Şekil 3.44. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri eksenine dedektör ön yüzeyinden D=3 cm uzaklıkta disk gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri

Çizelge 3.23. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri ekseninde dedektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta disk gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri

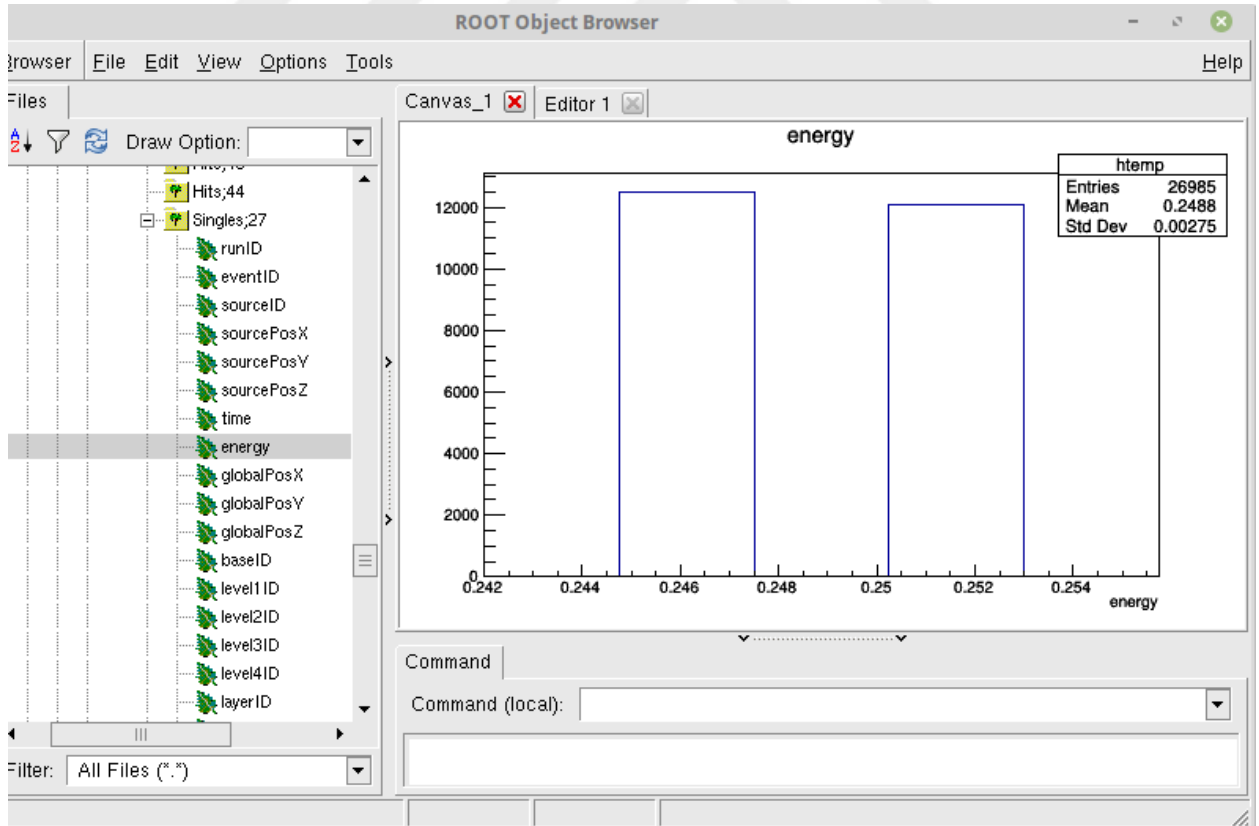
Enerji (keV)	Pik Değerinin Toplam Sayıya Oranı
50	0.9569
60	0.9638
80	0.9725
100	0.9764
150	0.9682
200	0.9427
300	0.8599
400	0.7569
500	0.6673
600	0.603
661	0.5757
800	0.5123
1000	0.443
1332	0.3837
1500	0.3525
2000	0.2952
2620	0.2441
2750	0.2362
3000	0.2122



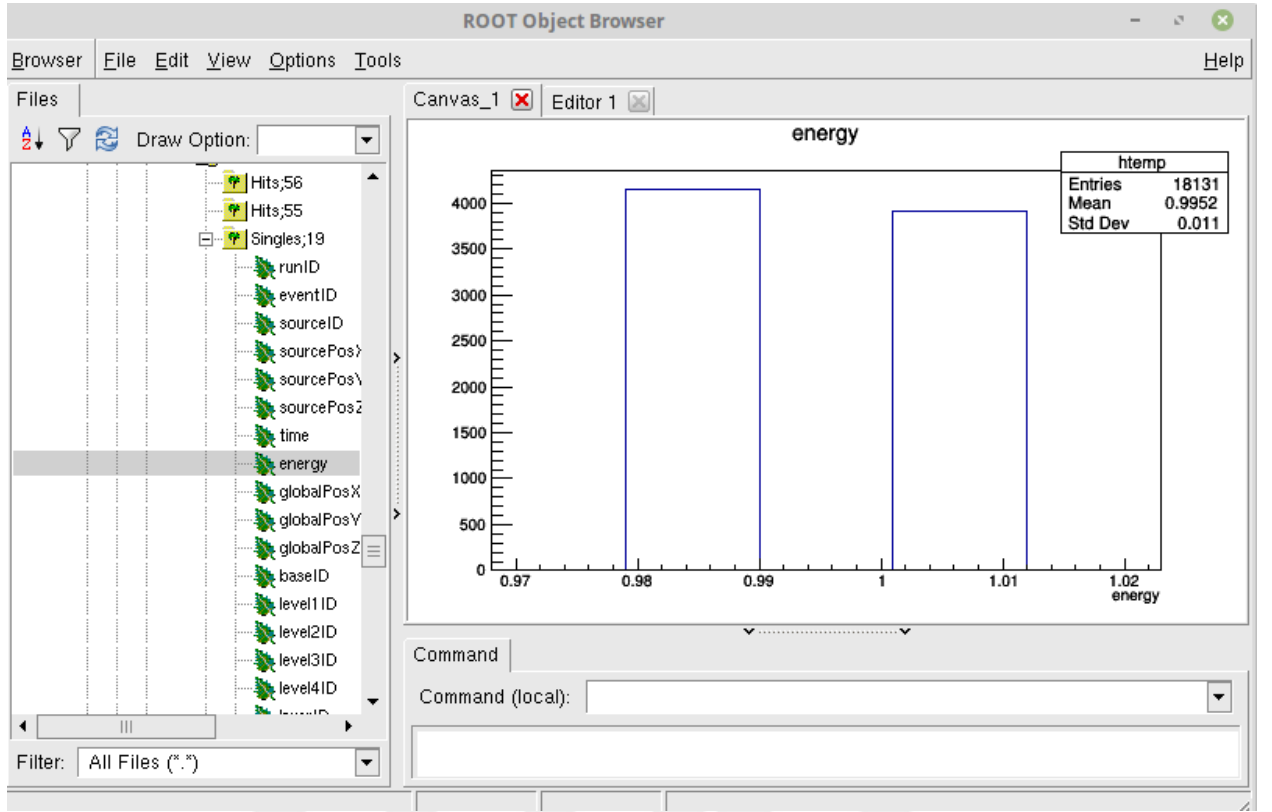
Şekil 3.45. 3"x3" NaI(Tl) dedektörünün dedektör simetri eksenine dedektör ön yüzeyinden D=10 cm uzaklıkta disk gama kaynağı için elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı değerleri

3.6. Enerji Çözünürlüğü

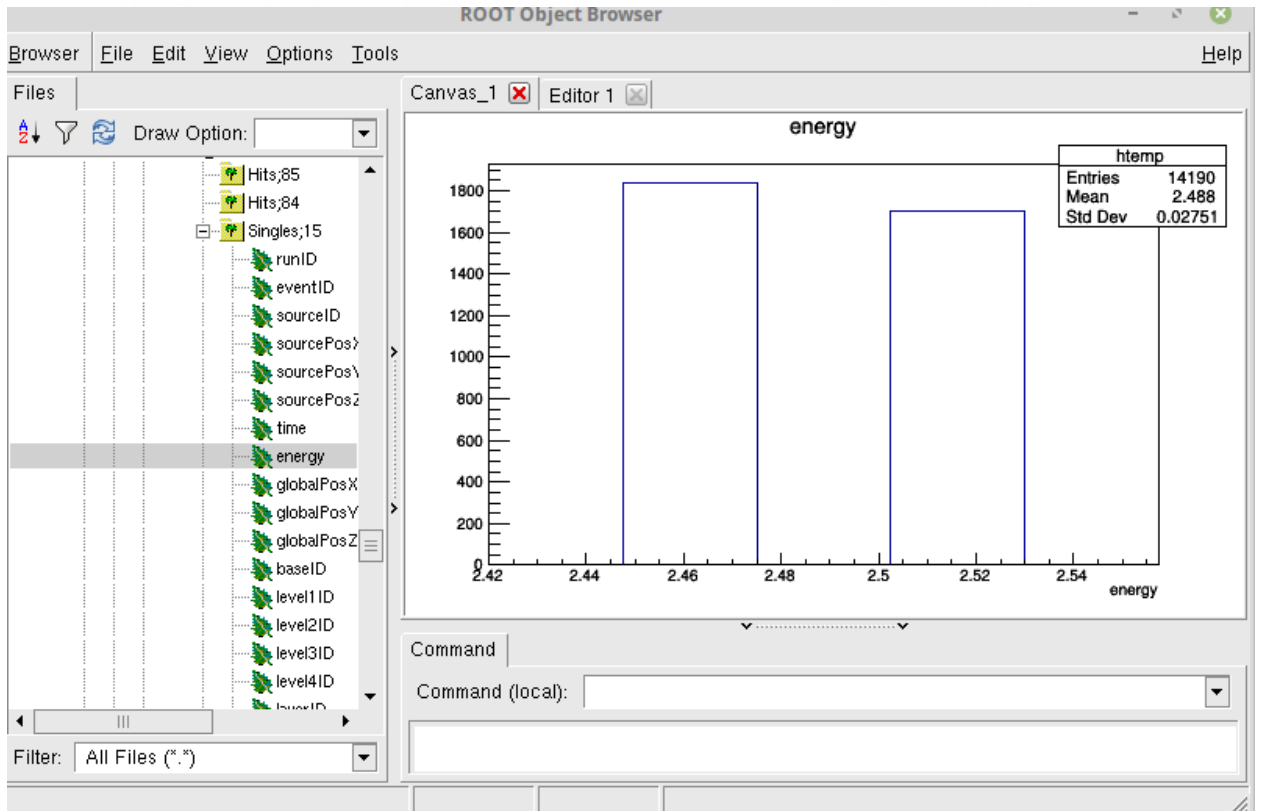
3"x3" lik detektörde kaynak detektör uzaklığı D=10 cm için enerji çözünürlüğü birbirine yakın enerjide iki gama ışını detektöre gönderilerek GATE simülasyon programı ile araştırıldı. Enerji çözünürlüğü düşük enerji, orta enerji ve yüksek enerji bölgesinde ayrı ayrı iki pik elde edecek şekilde denenerek belirlendi. Düşük enerji bölgesinde aralarında en az 6 keV'lik bir enerji farkı olduğunda, 247 keV ve 253 keV için iki ayrı enerji pikinin elde edilebildiği görüldü Şekil 3.46. da verildi. Orta enerji bölgesi için 22 keV'lik bir enerji farkı ile 989 keV 1011 keV enerji için iki ayrı pik elde edilebildi Şekil 3.47. Yüksek enerji bölgesinde 50 keV'lik enerji farkı ile 2475 keV ve 2525 keV de iki ayrı pik elde edilebildi Şekil. 3.48. Literatürde 3"x3" lik NaI(Tl) detektörü için verilen enerji çözünürlüğü %7,5-%8,5 arasında değiştiği belirtilmişse de bulduğumuz değer yaklaşık %2-%2.5 arasındadır. Gerçek değeri elde edebilmek için Bölüm 2.6.8. belirtilen tüm istatistiksel etkenlerin hesaba katıldığı ayrı bir simülasyon çalışmasının yapılmasının gerekli olduğu anlaşılmıştır. Bu çalışma ilerideki bir çalışma olarak değerlendirilecektir.



Şekil 3.46. 247 keV-253 keV düşük enerji bölgesinde enerji rezülasyonu



Şekil 3.47. 989 keV-1011 keV orta enerji bölgesinde enerji rezülasyonu



Şekil 3.48. 2475 keV-2525 keV yüksek enerji bölgesinde enerji rezülasyonu

4. SONUÇ

Bu çalışmada Geant4 tabanlı GATE benzetişim programı kullanılarak 3"x3", 2"x2" ve 5"x4" lik NaI(Tl) dedektörünün dedektör özellikleri elde edilmiştir. Simulasyon, 50-3000 keV foton enerji aralığında çeşitli kaynak-dedektör uzaklıklarında izotropik nokta, disk, dar demet ve geniş demet gama ışını kaynakları kullanılarak gerçekleştirildi. 1.000.000 gama fotonu takip edildi. Program arka arkaya randomlu olarak 10 defa çalıştırılıp ortalama alındı ve ortalama değerin hata payı;

$\Delta x=0.00003$ olarak hesaplanmıştır.

$$\Delta X = \sqrt{\frac{\sum_i^n (X_{ort} - X_i)^2}{n(n-1)}} \quad (4.1)$$

Hata hesabında (4.1) eşitliği kullanıldı.

Elde edilen toplam verim değerleri 2"x2" ve 3"x3" lik NaI(Tl) dedektörleri, 50 keV-3000 keV arası enerjilerde ve dedektör-kaynak arası 0.001 cm, 0.5 cm, 3 cm ve 10 cm noktasal ve disk gama kaynakları kullanılarak elde edilmiştir. 3"x3" lik NaI(Tl) dedektörü ve D=0.001 cm, noktasal gama kaynağı için toplam verim 50 keV de 0.4990, 1500 keV de 0.2841, 3000 keV de 0.2424 olarak hesaplanmıştır. D=0.5 cm, noktasal gama kaynağı için toplam verim, 50 keV de 0.4347, 1500 keV de 0.2066, 3000 keV de 0.1755 olarak hesaplanmıştır. D=10 cm dedektör kaynak arası uzaklıkta noktasal gama kaynağı için toplam verim, 50 keV de 0.0328, 1500 keV de 0.0160, 3000 keV de 0.0140 olarak hesaplanmıştır. 3"x3" lik dedektör ve D=3 cm uzaklıkta disk gama kaynağı için toplam verim 50 keV'de 0.1462, 1500 keV de 0.0646, 3000 keV de 0.0546 olarak hesaplanmıştır. D=10 cm, disk kaynak için toplam verim, 50 keV de 0.0301, 1500 keV de 0.0152, 3000 keV de 0.0133 olarak hesaplanmıştır. 2"x2" lik NaI(Tl) dedektörü ve D=0.001 cm, noktasal gama kaynağı için toplam verim 150 keV'de 0.4978, 1332 keV de 0.2251, 3000 keV de 0.1799 olarak hesaplanmıştır. D=5 cm, noktasal gama kaynağı için toplam verim 150 keV'de 0.0473, 1332 keV de 0.0197, 3000 keV de 0.0159 olarak hesaplanmıştır. D=10 cm, noktasal gama kaynağı için toplam verim 150 keV'de 0.0141, 1332 keV de 0.0068, 3000 keV de 0.0055 olarak hesaplanmıştır. D=15 cm, noktasal gama kaynağı için toplam verim 150 keV'de 0.0066, 1332 keV de 0.0033, 3000 keV de 0.0027 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre; dedektör kaynak arası mesafe arttıkça toplam verim azalır, dedektör boyutu arttıkça dedektöre

girecek parçacık sayısında fazla olacağından verim artar. Veriler çizelgeler ve grafikler halinde detaylı şekilde verilmiştir. Düşük enerjide yüksek verim, yüksek enerjide daha düşük verim olduğu görülmüştür, enerji değeri arttıkça toplam verim değeri azalmıştır. Bu çalışmada elde edilen veriler ile literatür verileri karşılaştırıldığında uyumlu olduğu görülmektedir.

Öz verim hesaplamasında 3"x3" lik ve 2"x2" lik olmak üzere farklı boyutlarda iki NaI(Tl) dedektörleri kullanıldı. 50 keV-3000 keV arası enerjilerde dedektör kaynak arası 0.001 cm, 0.5 cm, 3 cm, 5 cm, 10 cm ve 15 cm olmak üzere noktasal, disk, geniş demet ışını ve dar demet ışını gama kaynakları kullanıldı. Geniş demet gama ışını gama kaynağı, belli bir genişlikte doğrusal olarak foton yayınlayan kaynak olarak simülasyon programına tanımlandı. Dar demet ışını gama kaynağı ise; bir noktadan doğrusal olarak kalem şeklinde foton yayınlayan gama kaynağı olarak programa tanımlanmıştır. 3"x3" lik NaI(Tl) dedektörü ve D=0.001 cm, noktasal gama kaynağı için öz verim 50 keV de 0.9982, 1500 keV de 0.5682, 3000 keV de 0.4849 olarak hesaplanmıştır. D=0.5 cm, noktasal gama kaynağı için öz verim 50 keV de 0.9879, 1500 keV de 0.4694, 3000 keV de 0.3989 olarak hesaplanmıştır. D=10 cm, noktasal gama kaynağı için öz verim 50 keV de 0.0744, 1500 keV de 0.0364, 3000 keV de 0.0317 olarak hesaplanmıştır. D=3 cm, disk gama kaynağı için öz verim 50 keV'de 0.395, 1500 keV de 0.1746, 3000 keV de 0.1476 olarak hesaplanmıştır. D=10 cm, disk gama kaynağı için öz verim 50 keV de 0.0683, 1500 keV de 0.0344, 3000 keV de 0.0301 olarak hesaplanmıştır. 2"x2" lik NaI(Tl) dedektörü ve D=0.001 cm, noktasal gama kaynağı için öz verim 150 keV'de 0.996, 1332 keV de 0.4504, 3000 keV de 0.3599 olarak hesaplanmıştır. D=5 cm, noktasal gama kaynağı için öz verim 150 keV de 0.8727, 1332 keV de 0.3635, 3000 keV de 0.2933 olarak hesaplanmıştır. D=10 cm, noktasal gama kaynağı için öz verim 150 keV de 0.9216, 1332 keV de 0.444, 3000 keV de 0.3595 olarak hesaplanmıştır. D=15 cm, noktasal gama kaynağı için öz verim 150 keV de 0.9428, 1332 keV de 0.4713, 3000 keV de 0.3856 olarak hesaplanmıştır. 2"x2" lik NaI(Tl) dedektörü ve dar demet (narrow beam) gama kaynağı için öz verim 150 keV'de 0.9987, 1332 keV de 0.6019, 3000 keV de 0.4957 olarak hesaplanmıştır. Geniş demet (broad beam) gama kaynağı için öz verim 150 keV'de 0.9986, 1332 keV de 0.6026, 3000 keV de 0.4954 olarak hesaplanmıştır. Bu verilere göre düşük enerjide yüksek öz verim yüksek enerjide daha düşük öz verim hesaplanmıştır. Dedektör kaynak arası mesafe arttıkça öz verimde düşüş olmuştur. Bu çalışmada elde edilen veriler ile literatür verileri karşılaştırıldığında uyumlu olduğu görülmektedir.

Dedektör özelliklerinden bir diğeri olan tüm enerji pik verimi verileride de 3"x3" lik NaI(Tl) dedektörü kullanılarak elde edildi. 50 keV-3000 keV arası farklı enerjilerde, dedektör-kaynak arası 0.001 cm, 3 cm, 5 cm ve 10 cm olmak üzere, noktasal ve disk gama kaynakları kullanılarak program çalıştırılıp veriler elde edilmiştir. 3"x3" lik NaI(Tl) dedektörü ve D=0.001

cm, noktasal gama kaynağı için tüm enerji pik verimi 50 keV de 0.473, 1500 keV de 0.0964, 3000 keV de 0.05 olarak hesaplanmıştır. D=0.05 cm, noktasal gama kaynağı için tüm enerji pik verimi 50 keV de 0.4132, 1500 keV de 0.0703, 3000 keV de 0.0369 olarak hesaplanmıştır. D=10 cm, noktasal gama kaynağı için tüm enerji pik verimi 50 keV de 0.0309, 1500 keV de 0.0058, 3000 keV de 0.003 olarak hesaplanmıştır. D=3 cm, disk gama kaynağı için tüm enerji pik verimi 50 keV de 0.1397, 1500 keV de 0.0221, 3000 keV de 0.0114 olarak hesaplanmıştır. . D=10 cm, disk gama kaynağı için tüm enerji pik verimi 50 keV de 0.0286, 1500 keV de 0.0053, 3000 keV de 0.0028 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen verilere göre; dedektör kaynak arası mesafe arttıkça tüm enerji pik verimi azalır. Düşük enerjide yüksek, yüksek enerjide daha düşük tüm enerji pik verimi olduğu görülmüştür. Enerji arttıkça tüm enerji pik verim azalmıştır. Bu çalışmada elde edilen veriler ile literatür verileri karşılaştırıldığında uyumlu olduğu görülmektedir.

Dedektöre giren gama fotonlarının tüm enerjiye (full energy) katkısı olan tüm enerji pik öz verimi de 3"x3" lik NaI(Tl) dedektörü kullanılarak elde edilmiştir. Noktasal gama kaynağı 80-2500 keV arası enerjilerde, dedektör kaynak arası mesafe D=10 cm olarak alınıp hesaplama yapılmıştır. D=10 cm, noktasal gama kaynağı için tüm enerji pik öz verimi 80 keV de 0.0714, 1330 keV de 0.0142, 2500 keV de 0.008 olarak hesaplanmıştır. Veriler çizelgeler ve grafikler halinde detaylı şekilde verilmiştir.

Dedektörlerin bir diğer karakteristik özelliği olan pik değerinin toplam sayıya oranı (peak to total), 2"x2", 3"x3" ve 5"x4" olmak üzere farklı boyutlarda NaI(Tl) dedektörü kullanıldı. Noktasal, disk, geniş demet ve dar demet gama kaynakları 50 keV-3000 keV arası enerjilerde, kaynak dedektör arası 0.001 cm, 0.5 cm, 3 cm, 10 cm olmak üzere farklı uzaklıklarda program çalıştırılıp veriler alınmıştır. 2"x2" lik NaI(Tl) dedektörü ve geniş demet (broad beam) gama kaynağı kullanılarak elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı 2.68 MeV de 0.1886, 6.13 MeV de 0.0752, 8.00 MeV de 0.0514 olarak hesaplanmıştır. 5"x4" lik NaI(Tl) dedektörü ve dar demet (narrow beam) gama kaynağı kullanılarak elde edilen pik değerinin toplam sayıya oranı 0.661 MeV de 0.8241, 2.62 MeV de 0.4889, 4.45 MeV de 0.3897 olarak hesaplanmıştır. 3"x3" lik NaI(Tl) dedektörü ve D=0.001 cm, noktasal gama kaynağı için pik değerinin toplam sayıya oranı 50 keV de 0.9477, 1500 keV de 0.3393, 3000 keV de 0.2061 olarak hesaplanmıştır. D=0.5 cm, noktasal gama kaynağı için pik değerinin toplam sayıya oranı 50 keV de 0.9506, 1500 keV de 0.3403, 3000 keV de 0.2102 olarak elde edilmiştir. D=3 cm, noktasal gama kaynağı için pik değerinin toplam sayıya oranı 155 keV de 0.9645, 1114 keV de 0.4106, 3130 keV de 0.2041 olarak elde edilmiştir. D=10 cm, noktasal gama kaynağı için pik değerinin toplam sayıya oranı 50 keV de 0.9581, 1500 keV de 0.3645, 3000 keV de 0.2151 olarak elde edilmiştir. D=3 cm, disk gama kaynağı için pik değerinin toplam sayıya oranı 50 keV de 0.9552, 1500 keV de

0.3427, 3000 keV de 0.2086 olarak elde edilmiştir. D=10 cm, disk gama kaynağı için pik değerinin toplam sayıya oranı 50 keV de 0.9568, 1500 keV de 0.3225, 3000 keV de 0.2122 olarak elde edilmiştir. Veriler çizelgeler ve grafikler halinde detaylı şekilde verilmiştir. Verilerin literatür verileri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Elde edilen verim değerleri kaynak dedektör uzaklığı arttıkça, enerji yükseldikçe verim düşük olacaktır. Dedektör kaynak arası uzaklık artması geometrik verimi düşürür. Geometrik verimin düşmesi kaynaktan yayınlanan fotonların dedektöre daha az sayıda girmesine sebep olur. Yüksek enerjilerde (1 MeV'den büyük) Şekil 2.7.de görüldüğü gibi fotoelektrik lineer zayıflama katsayısı ve compton lineer zayıflama katsayısının azalması, buna karşın çift oluşum lineer zayıflama katsayısı artar. Buda enerji yükseldikçe fotonun dedektör ortamıyla etkileşme olasılığını azaltır. Buna ek olarak dedektör boyutu da verime etki eder. Küçük boyutlu dedektörlerde fotonun dedektör ortamında etkileşmeden kaçma olasılığı yükselir. Elde edilen sonuçlar bu fiziksel verilerle uyumludur. Kabaca bir fotonun etkileşme yapma olasılığı $\epsilon=1-e^{-\mu x}$, x fotonun karşılaştığı ortam uzaklığı, μ toplam lineer zayıflama katsayısı olmak üzere dedektör verimini belirleyen bir temel bağıntıdır.

Bu yüksek lisans çalışmasında geniş ve yaygın olarak kullanılan NaI(Tl) sintilasyon dedektörü dedektör özellikleri Geant4 tabanlı GATE simülasyon programı ile belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki GATE simülasyon programı açık erişimli ve maliyetsiz olması ve geniş kullanım yelpazesi olması nedeniyle dedektör özelliklerini belirlemede tercih edilebilecek bir benzetişim programıdır. Sintilasyon dedektörleri elde tutulan radyasyon ölçüm cihazları, kontaminasyon için personel ve çevresel izleme, tıbbi görüntüleme, radyometrik test, nükleer güvenlik ve nükleer tesis güvenliği gibi çeşitli yaygın uygulama alanı bulunan dedektörlerdir. Program maddi ve zaman açısından tasarruf sağlar. Son yıllarda radyasyon dedektörü olarak kullanılabilecek yeni sintilasyon materyalleri üretilmektedir. Bu yüksek lisans çalışmamız, bu tür sintilatör materyallerinin dedektör özelliklerini belirlemede bir temel çalışma niteliğindedir. Çalışmanın bir ileriki aşaması yeni tür sintilatörlerin dedektör özelliklerini belirleyerek ülkemizde sanayi iş birliği çerçevesinde yeni dedektör sistemleri geliştirmek. Ve pahalı olan bu tür sistemlerin ülkemizde üretilmesini sağlamak ülke ekonomisine katkıda bulunmaktır.

5. KAYNAKLAR

- Abbas MI, 2010. A new analytical method to calibrate cylindrical phoswich and LaBr₃(Ce)scintillation detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 621: 413-418.
- Abbas MI, Noureddeen S, 2011. Analytical expression to calculate total and full-energy peak efficiencies for cylindrical phoswich and lanthanum bromide scintillation detectors, Radiation Measurement, 46:440-445.
- Acar E, 1994. Paralel Gamma Demeti Önüne Konulan Sonlu Geometrilili Cisimlerin Maruz Kaldıkları Işınlama Dozu Ve Soğurulma Dozu İncelenmesi, Bitirme Çalışması, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Aksu L, 1992. Radyasyon Ölçme Sistemleri, TAEK Yayınları, Ankara, s:21-45.
- Altun A,2016. Siirt İlinin İçme Sularında Toplam Alfa ve Beta Aktivitesi. Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.
- Ashrafi S, Anvarian S, Sobhanian S, 2006. Monte-Carlo Modeling of a NaI(Tl) Scintillator. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 269(1):95–98.
- Belluscio M, DeLeo R, Pantaleo A, Vox A, 1974. Efficiencies and response functions of NaI(Tl) crystals for gamma rays from thick disk sources. Nuclear Instruments and Methods, 118:553-563.
- Bilge AN, 1985. Nükleer Tekniklerin Endüstriye Uygulanması. TAEK/ÇNAEM Matbaası. İstanbul.
- Büget N, 1992. Genel Radyoaktivite, TAEK Yayınları, Ankara, s: 1-16.
- Cesana A, Terrani M, 1977. Gamma-ray Activity Determination in Large Volume Samples with a Ge-Li Detector. Analytical Chemistry, 49(8):1156-1159.
- Chuong HD, Nguyen QH, Nguyen TML, Nguyen VH, 2019. Validation of gamma scanning method for optimizing NaI(Tl) detector model in Monte Carlo simulation. Applied Radiation and Isotopes, 149:1-8.
- Cember H, Johnson TE, 2009. Introduction to Health Physics (4th ed.). McGraw-Hill Medical. New York.
- Damla N, 2005. Doğu Karadeniz Bölgesi İçme Sularında Toplam Alfa, Toplam Beta ve Gama Aktivitesi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Ergül RN, 1987. NaI(Tl) Dedektörleri İçin Toplam Verim ve Tüm Enerji Pik Duyarlılığının Monte Carlo Yöntemi İle Elde Edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Fişne A, 2002. Yeraltı Madenlerinde Radon Gazı Konsantrasyon Seviyelerinin Belirlenmesi ve İşçi Sağlığı Üzerine Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gardner PR, Ely RL, 1967. Radioisotope Measurement Applications In Engineering. Reinhold Publishing Corporation. USA.
- Garnett R, Prestwich WV, Atanackovic J, Wong M, Byun SH, 2017. Characterization of a LaBr₃(Ce) detector for gamma-ray spectrometry for CANDU power reactors, Radiation Measurement, 106:628-631.
- Gedikoğlu A, 1988. Çekirdek Fiziğine Giriş. K.T.Ü. Basımevi, Trabzon.
- Gilmore G, Hemingway JD, 1995. Practical Gamma-Ray Spectrometry. Wiley. New York.
- Hamzawy A, 2010. Simple analytical formula to calculate γ -ray cylindrical detectors efficiencies. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 624(1):124-129.
- Hatipoğlu D, 2017. Kalker Tozu, Kırklareli Mermerleri Ve Alüminyum İçin Gama Zayıflatma Katsayısının Hesaplanması. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne.
- Heath RL, 1964. Scintillation Spectrometry, Cilt. 1, IDO-16880-1.
- Hofstadter R, 1949. The Detection of Gamma-Rays with Thallium-Activated Sodium Iodide Crystals. Physical Review, 75(5):796-810.
- <https://www.taek.gov.tr/ogrenci/sf5.html>, Erişim Tarihi: 04.04.2020.
- <https://opengate.readthedocs.io/en/latest/introduction.html>, Erişim Tarihi: 05.06.2020.
- https://tr.wikipedia.org/wiki/Monte_Carlo_benzetimi, Erişim Tarihi: 01.07.2020.
- Jenkins PF, Harbison SA, Martin A, Koster J, 2006. An Introduction to Radiation Protection. Hodder Education. London.
- Jarczyk L, Knoepfel H, Müller R, Wölfl W, 1962. Photopeak efficiency and response function of various NaI(Tl) and CsI(Tl) crystals in the energy range up to 11 MeV. Nuclear Instruments and Methods. 17: 310-320.
- Kuluöztürk MF, 2015. Radon Seviyelerini Tayin Etmek Amacıyla Görelî Sayım Yapabilen Ve Düşük Enerji Tüketen Bir Spektroskopi Sistemi Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Knoll GF, 2010. Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons, Inc. New York
- Krane SK, 2001. Introductory Nuclear Physics. Çev. ŞARER B., Palme Yayıncılık. Ankara.

- Lamarsh JR, Baratta AJ, 2001. Introduction to nuclear engineering (3rd ed.). Prentice Hall. New Jersey.
- Lépy MC vd., 2019. A benchmark for Monte Carlo simulation in gamma-ray spectrometry. Applied Radiation and Isotopes, 154,108850:1-7.
- Lilley J, 2018. Nuclear Physics Principles and Applications. Çev. Aydın A, vd., Palme Yayıncılık. Ankara.
- Martin JE, 2013. Radyasyon ve Radyasyondan Korunma Fiziği. Çev. Tanır AG, Bölükdemir MH, Koç K, Palme Yayıncılık. Ankara.
- Miller WF, Snow WJ, 1961 NaI and CsI efficiencies and photofractions for gamma-ray detection, Nucleonics, 19(11): 174.
- Moszyński M, 2005. Energy resolution of scintillation detectors. Hard X-Ray and Gamma-Ray Detector Physics VII, 5922:592205-1, doi: 10.1117/12.622316.
- Nakamura T, 1972. Monte Carlo calculation of efficiencies and response functions of NaI(Tl) crystals for thick disk gam-ray sources and its application to Ge(Li) detectors. Nuclear Instruments and Methods, 105:77-89.
- Özmutlu C, Ortaovalı AZ, 1976. Calculation of total and full energy peak efficiencies of Ge(Li) and NaI(Tl) detectors by introducing the mean chord length. Nuclear Instruments and Methods, s: 149-155.
- Pilakouta M, Pappa FK, Patiris DL, Tsabaris C, Kalfas CA, 2018. A methodology for expanding the use of NaI(Tl) based spectrometry in environmental radioactivity measurements. Applied Radiation and Isotopes, 139: 159-168.
- 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.
- Price WJ, 1958. Nuclear Radiation Detection. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York.
- Selim YS, Abbas MI, Fawzy MA, 1998. Analytical calculation of the efficiencies of gamma scintillators. Part I: Total efficiency for coaxial disk sources. Radiation Physics and Chemistry, 53:589-592.
- Tarım AU, Gürler O, Yalçın S, 2018. A Quick Method to Calculate NaI(Tl) Detector Efficiency Depending on Gamma ray Energy and Source-to-detector Distance, Celal Bayar University Journal of Science, 14(2):195-199.
- Tsoufanidis N, 1995. Measurement and Detection of Radiation. Second Edition, Taylor Francis. Washington.

- Vegors SH, Marsden LL, Heath RL, 1958. Calculated efficiencies of cylindrical radiation detectors. AEC Research and Development Report, IDO-16370.
- Valkoviç V, 2000. Radioactivity in the Environment, Elsevier, 12: 7-18.
- Wang J, Zhang Y, Liu D, Wu B, Zhang Y, Jiang H, 2018 Automated spectra analysis of in situ radioactivity measurements in the marine environment using NaI(Tl) detector., Applied Radiation and Isotopes, 141: 88–94.
- Wirawan R, Angraini LM, Qomariyah N, Waris A, Djamal M, 2020. Gamma backscattering analysis of flaw types and orientation based on Monte Carlo Geant4 simulations. Applied Radiation and Isotopes, 155, 108924:1-7.
- Yalçın S, 1999. İki İnçlik $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ ve NaI(Tl) kristalli phoswich sintilasyon dedektörünün α , β , γ sayma veriminin kuramsal ve deneysel olarak tayini. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Yalçın S, Gurler O, Kaynak G, Gundogdu O, 2007. Calculation of total counting efficiency of a NaI(Tl) detector by hybrid Monte-Carlo method for point and disc sources. Applied Radiation and Isotopes, 65:1179-1186.
- Yavuzkanat N, Güngör D, Yalçın S, 2019. The Determination of the Total Efficiency for NaI(Tl) Detector by GATE Simulation. Bitlis Eren Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, Özel Sayı, 8: 37-45.
- Yücel H, Solmaz AN, Kurt A, İnal T, Bor D, 2008. Disk kaynak geometrisi İçin 30-670 keV gama ışını enerjialığında CdZnTe Detektörünün Dedeksiyon Verimi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 23: 699-707.
- Zhang Y, Li C, Liu D, Zhang Y, Liu Y, 2015 Monte Carlo simulation of a NaI(Tl) detector for in situ radioactivity measurements in the marine environment. Applied Radiation and Isotopes, 98: 44-48.
- Zhang J, Zhang P, Zhang Y, Yang J, Yuan G, Song X, Li X, Zhou Y, 2019. Geant4 simulation study on detection efficiencies of the Compton suppression system at the HL-2A tokamak. Applied Radiation and Isotopes, 150:63-69.
- Zikovsky L, Chah B, 1988. A computer program for calculating Ge(li) detector counting efficiencies with large volume samples. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A263(2-3):483-486.

ÖZGEÇMİŞ

05.01.1991 yılında Bitlis iline bağlı Hizan ilçesinde doğdum. İlköğretimi Hizan ilçesinde Şehit Öğretmen Abdurrahman Nafiz Özbagriçık İlköğretim Okulu'nda ve liseyi Van'da Vali Haydar Bey Anadolu Lisesi'nde tamamladım. 2013 yılında Dicle Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü'nden mezun oldum. Mayıs 2014 yılında Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi'nde Pedagojik Formasyon Eğitimimi tamamladım.Devlet okullarında ve özel okullarda lise fizik öğretmeni olarak çalıştım. Eylül 2017'de Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda yüksek lisansa başladım. Eylül 2018-Nisan 2019 tarihleri arasında Erasmus öğrenci değişim programı dahilinde Almanya'da Martin Luther Üniversitesi'nde Polimer Malzeme Bilimi bölümünde öğrenim gördüm. Temmuz 2020'de yüksek lisansımı tamamladım. Yabancı dilim İngilizce'dir.

Didem GÜNGÜR