



**HPGe DEDEKTÖRLERDE MARİNELİ KAYNAK GEOMETRİSİNİN
MONTE CARLO YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ**

Gölper AKSOY

**DOKTORA TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Gülper AKSOY

14/12/2023

HPGe DEDEKTÖRLERDE MARİNELLİ KAYNAK GEOMETRİSİNİN MONTE CARLO YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

(Doktora Tezi)

Gülper AKSOY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2023

ÖZET

Gama spektroskopisi ile çevresel numunelerin radyoaktif olup olmadığı, bir aktiflik söz konusu ise radyoaktivitenin hangi atom çekirdeğinden kaynaklandığı belirlenebilmektedir. Bu amaçla Yüksek Saflıkta Germanyum (HPGe) detektörleri, çevresel numunelerdeki düşük radyoaktivitenin saptanması için sıklıkla kullanılır. Dedektörün ve kaynağın geometrisi iyi biliniyorsa herhangi bir gama enerjisi için HPGe'den elde edilen toplam enerji pik verimi (FEPE), Monte Carlo (MC) simülasyon yöntemleriyle kolayca simüle edilebilir. Böylece standart kaynağı bulunmayan bir kaynak geometrisi için FEPE elde edilmesini sağlayabilir. MC ile FEPE hesabı dedektörün ölü tabaka kalınlığı (DL), alüminyum tutucular ve pencere kalınlığı gibi parametreler ile yakından ilgilidir. Bu tezin birinci çalışmasında, çok enerjili nokta radyoaktif kaynak ile p tipi HPGe dedektörün FEPE değerleri deneysel ve MC yöntemi ile elde edilmiştir. Dedektörün üretimden bugüne yedi yıllık kullanımdan sonra tek katman ölü tabaka kalınlığının 0,7 mm'den 1,4 mm'ye arttığı bulunmuştur. Daha sonra ölü tabaka kalınlığı ön ve yan olarak ayrıldığında sırasıyla 1,075 ve 1,7 mm olarak tespit edilmiştir. Tezin ikinci çalışmasında, 0,5 g/cc, 0,7 g/cc, 1,0 g/cc ve 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli radyoaktif kaynakların deneysel ve MC ile verim değerleri elde edilmiştir ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. ^{241}Am (59,5keV) için %12, ^{137}Cs (661,7 keV) için %2 fark gözlenmiştir. Üçüncü çalışmada, en yüksek verim değerini veren Marinelli kap geometrisinin nasıl olması gerektiği MC ile incelenmiştir. Son çalışmada, fotonun kaynaktan kritale doğru seyahatinde karşılaştığı alüminyum pencere ve ölü tabakanın verim profiline etkisi incelenmiştir. Ölü tabakanın dedektörün verim profilinin baskın belirleyicisi olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 20216
Anahtar Kelimeler : HPGe dedektör, verim, dedektör karakterizasyonu, Marinelli, Marinelli kap modellenmesi, Monte Carlo, PHITS.
Sayfa Adedi : 118
Danışman : Prof. Dr. Mustafa Hicabi BÖLÜKDEMİR

MODELLING OF MARINELLI SOURCE GEOMETRY IN HPGe DETECTORS USING MONTE CARLO METHOD

(Ph. D. Thesis)

Gülper AKSOY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2023

ABSTRACT

With gamma spectroscopy, it can be determined whether environmental samples are radioactive or not, and if so, which atomic nucleus the radioactivity originates from. For this purpose, High-Purity Germanium (HPGe) detectors are frequently used to detect low radioactivity in environmental samples. If the geometry of detector and source are well known, the full energy peak efficiency (FEPE) obtained from HPGe for any gamma energy can be easily simulated with Monte Carlo (MC) methods. Thus, it can provide FEPE for a weld geometry that does not have a standard source. FEPE calculation with MC is closely related to parameters such as the detector's dead layer (DL) thickness, aluminum holders and window thickness. In the first study of this thesis, FEPE values of p-type HPGe detector with multi-energy point radioactive source were obtained experimentally and using MC method. In the seven years since the detector was produced, it was found that the single-layer dead layer thickness increased from 0.7 mm to 1.4 mm. Later, when the dead layer thickness was divided into front and side, it was determined as 1.075 and 1.7 mm, respectively. In the second study of the thesis, experimental and MC efficiency values of 0.5 g/cc, 0.7 g/cc, 1.0 g/cc, and 1.3 g/cc density epoxy Marinelli radioactive sources were obtained and compared with each other. 12% difference was observed for ^{241}Am (59.5 keV) and 2% difference was observed for ^{137}Cs (661.7 keV). The third study investigated the Marinelli container geometry with the highest efficiency value using MC. The last study examined the effect of the aluminum window and dead layer encountered by the photon on the efficiency profile on its path from the source to the crystal. The dead layer was found to be the dominant determinant of the detector's efficiency profile.

Science Code : 20216
Key Words : HPGe detector, efficiency, detector characterization, Marinelli, Marinelli beaker modelling, Monte Carlo, PHITS.
Page Number : 118
Supervisor : Prof. Dr. Mustafa Hicabi BÖLÜKDEMİR

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmam süresince bilimsel bilgi ve deneyimini paylaşan, her konuda desteğini esirgemeyen sayın hocam, danışmanım Prof.Dr. Mustafa Hicabi BÖLÜKDEMİR'e, Değerli tavsiyeleriyle tez çalışmama katkı veren Tez İzleme Komitesi ve Jüri Üyeleri hocalarım Prof.Dr. Sema Bilge OCAK ve Prof.Dr. Erhan ESER'e, Prof.Dr. Abdullah AYDIN ve Prof.Dr. Adem ACIR'a, Nükleer Fizik alanında bilgi ve bilimini paylaşarak bu konuda uzmanlaşmamı ve Nükleer Fiziğe tutkumu sağlayan değerli hocam Prof. Dr. A. Güneş TANIR'a, Deneylerim esnasında önemli ölçüde desteğini hissettiğim Aylin TANIR'a, Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü, Teknoloji Geliştirme ve Nükleer Araştırma Koordinatörlüğü, Radyoaktivite Ölçüm ve Analiz Birimi, Gama Spektrometri Laboratuvarına (Küçükçekmece İSTANBUL) ve deneysel bilgi ve tecrübelerini paylaşan Dr. Nilgün ORHAN ve Dr. Ayhan YÜKSEL'e, Çalışma hayatım boyunca her an desteklerini yanımda hissettiğim arkadaşlarım Doç.Dr. Ceren KARAMAN, Doç.Dr. Onur KARAMAN ve Doç.Dr. Hasan ÖZDOĞAN'a, Çalışma arkadaşım Hasan ÜNLÜ'ye, Teknik konularda yardım ve desteklerini esirgemeyen arkadaşım Halim KIZMAZ'a, PHITS takım lideri Tatsuhiko Sato ve Japon Atom Enerji Kurumu Nükleer Bilim ve Mühendislik Merkezi PHITS ofisine, Eğitim ve öğretim hayatım boyunca her an desteklerini hissettiğim ve fedakarlıkları ile yürüdüğüm bu yolda, yol arkadaşım Muzaffer'e, melek olan annem ve canım babam Mustafa AKSOY'a sonsuz kıymetle teşekkürler. Annem Aysel'e...

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER	5
2.1. Radyoaktif Bozunma Kanunu	5
2.2. Gama Işınlarnının Madde ile Etkileşimleri	6
2.2.1. Fotoelektrik soğurma	8
2.2.2. Compton saçılması	10
2.2.3. Çift oluşumu	11
2.2.4. Thomson ve Rayleigh saçılması	12
2.2.5. Toplam azalma katsayısı	12
2.2.6. Dedektör içi etkileşimler	14
2.3. Gama Spektroskopisi ve Dedektörler.....	14
2.3.1. Yarı iletkenler	15
2.4. HPGe Dedektörler	20
2.4.1. HPGe dedektörlerin üretimi ve içeriği.....	20
2.4.2. Elektrik alanı ve kapasitans	22
2.4.3. Enerji çözünürlüğü	23
2.4.4. Verim	24

	Sayfa
2.4.5. Toplam enerji pik verimi	25
2.4.6. Gama spektrometresinde belirsizlik hesabı	25
2.4.7. Düzeltme faktörleri.....	27
2.4.8. Dedektör karakterizasyonu	31
2.4.9. Ölü tabaka.....	31
2.4.10. Marinelli radyoaktif kaynak kullanımı	33
2.5. Monte Carlo Simülasyon Yöntemi.....	35
2.5.1. Geometrik modelleme	37
2.5.2. Dedektör tanımı	38
2.5.3. Output aşaması	38
2.5.4. Modelleme ve simülasyon süreci	38
2.5.5. PHITS	40
2.5.6. GESPECOR.....	42
3. MATERYAL VE YÖNTEM	43
3.1. Deneyde Kullanılan HPGe Dedektörü	43
3.2. Çok Enerjili Nokta Kaynak	45
3.3. Marinelli Kaynaklar	46
3.4. Dedektörün Toplam Enerji Pik Veriminin (FEPE) DeneySEL Olarak Belirlenmesi.....	49
3.5. Dedektörün Toplam Enerji Pik Veriminin (FEPE) Monte Carlo ile Belirlenmesi.....	50
3.5.1. PHITS ile verimin belirlenmesi	52
3.5.2. GESPECOR ile verimin belirlenmesi.....	55
4. YAPILAN DENEY VE MONTE CARLO UYGULAMALARI	57
4.1. Radyoaktif Kaynaklar için Verim Değeri	57
4.1.1. Nokta kaynak için verim değeri.....	57
4.1.2. Marinelli kaynaklar için verim değerleri	58

Sayfa

4.2. Deneysel Verim ve Tek Parça Ölü Tabaka Kalınlığının Monte Carlo Uygulamaları	59
4.2.1. Nokta kaynak için tek parça ölü tabaka kalınlığı.....	59
4.2.2. Marinelli kaynaklar için tek parça ölü tabaka kalınlığı	64
4.3. Deneysel Verime Karşılık Ön ve Yan Ölü Tabaka Kalınlığı Etkisinin Monte Carlo Uygulamaları	73
4.3.1. Nokta kaynak için ön ve yan ölü tabaka kalınlığı	77
4.3.2. Marinelli kaynaklar için ön ve yan ölü tabaka kalınlığı	79
4.4. Marinelli Kap Geometrisinin Monte Carlo ile Modellenmesi	80
4.5. HPGe Kristali ve Dedektör Sisteminin Monte Carlo ile Modellenmesi	94
5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	101
KAYNAKLAR	109
ÖZGEÇMİŞ	117

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Gama dedektör tipleri	15
Çizelge 3.1. Dedektörün materyal ve geometrik boyut (mm) bilgileri.....	44
Çizelge 3.2. Çok enerjili nokta radyoaktif kaynak bilgileri.....	46
Çizelge 3.3. 0,5 g/cc yoğunluklu standart Marinelli kaynak için kalibrasyon sertifikası bilgileri	47
Çizelge 3.4. 0,7 g/cc yoğunluklu standart Marinelli kaynak için kalibrasyon sertifikası bilgileri	47
Çizelge 3.5. 1,0 g/cc yoğunluklu standart Marinelli kaynak için kalibrasyon sertifikası bilgileri	48
Çizelge 3.6. 1,3 g/cc yoğunluklu standart Marinelli kaynak için kalibrasyon sertifikası bilgileri	48
Çizelge 4.1. Çok enerjili nokta radyoaktif kaynağın özellikleri ve dedektörün deneysel verim değerleri	57
Çizelge 4.2. 0,5 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın özellikleri ve deneysel verim değerleri	58
Çizelge 4.3. 0,7 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın özellikleri ve deneysel verim değerleri	58
Çizelge 4.4. 1,0 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın özellikleri ve deneysel verim değerleri	59
Çizelge 4.5. 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın özellikleri ve deneysel verim değerleri	59
Çizelge 4.6. Nokta kaynak foton enerjileri için dedektörün deneysel verimi, PHITS ve GESPECOR MC ile hesaplanmış dedektör verim değerlerinin deneysel verimden % farkları	60
Çizelge 4.7. Nokta kaynak için deneysel verim ve farklı DL değerlerinde PHITS MC'den elde edilen dedektör verim değerleri	62
Çizelge 4.8. Nokta kaynak için deneysel verime karşılık farklı DL değerlerinde PHITS MC'den elde edilen dedektör verim değerlerinin % farkları	62
Çizelge 4.9. Nokta kaynak için deneysel verim ve farklı DL değerlerinde GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verim değerleri	63

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.10. Nokta kaynak için deneysel verim ve farklı DL değerlerinde GESPECOR MC'den elde edilen dedektör verim değerlerinin % farkları	63
Çizelge 4.11. 0,5 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim ve farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen dedektör verim değerleri.	65
Çizelge 4.12. 0,5 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim değerinin farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen dedektör verimine % farkları.....	65
Çizelge 4.13. 0,5 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim ve farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verim değerleri.....	66
Çizelge 4.14. 0,5 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim değerinin farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verimine % farkları.....	66
Çizelge 4.15. 0,7 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim ve farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen dedektör verim değerleri.	67
Çizelge 4.16. 0,7 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim değerinin farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen dedektör verimine % farkları.....	67
Çizelge 4.17. 0,7 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim ve farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verim değerleri.....	68
Çizelge 4.18. 0,7 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim değerinin farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verimine % farkları.....	68
Çizelge 4.19. 1,0 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim ve farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen dedektör verim değerleri.	69
Çizelge 4.20. 1,0 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim değerinin farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen dedektör verimine % farkları.....	69
Çizelge 4.21. 1,0 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim ve farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verim değerleri.....	70
Çizelge 4.22. 1,0 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim değerinin farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verimine % farkları.....	70

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.23. 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim ve farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen dedektör verim değerleri.	71
Çizelge 4.24. 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim değerinin farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde dedektör verimine % farkları.....	71
Çizelge 4.25. 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim ve farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verim değerleri.....	72
Çizelge 4.26. 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim değerinin farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verimine % farkları.....	72
Çizelge 4.27. GESPECOR programında ölü tabaka kalınlığı için tarama çalışması.....	74
Çizelge 4.28. Yan ölü tabaka kalınlığı 1,7 mm'de sabit tutularak ön ölü tabakanın farklı değerlerinde GESPECOR ve PHITS ile elde edilen verim değerleri ile deneysel verimler arasındaki % farkları.....	77
Çizelge 4.29. Ön ölü tabaka değeri 1,075 mm'de sabit tutulup 1,5-1,9 mm aralığındaki yan ölü tabaka kalınlığının GESPECOR ve PHITS verim değerlerine karşılık deneysel veriminden % farkları.....	78
Çizelge 4.30. 0,5 g/cc, 0,7 g/cc, 1,0 g/cc ve 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynaklar için 1,7mm'de sabit tutulan yan ölü tabaka kalınlığında ön ölü tabaka kalınlığının değiştirilerek PHITS ile elde edilen verim değerlerinin deneysel verim değerlerinden %farkları	80
Çizelge 4.31. 0,5 g/cc, 0,7 g/cc, 1,0 g/cc ve 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynaklar için 1,7mm'de sabit tutulan yan ölü tabaka kalınlığında ön ölü tabaka kalınlığının değiştirilerek GESPECOR ile elde edilen verim değerlerinin deneysel verim değerlerinden %farkları	80
Çizelge 4.32. 5,6 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için PHITS'te hesaplanan verim değerleri	83
Çizelge 4.33. 5,6 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için GESPECOR'da hesaplanan verim değerleri.....	84
Çizelge 4.34. 6,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için PHITS'te hesaplanan verim değerleri	84
Çizelge 4.35. 6,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için GESPECOR'da hesaplanan verim değerleri.....	85

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.36. 6,53 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için PHITS'te hesaplanan verim değerleri	86
Çizelge 4.37. 6,53 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için GESPECOR'da hesaplanan verim değerleri.....	86
Çizelge 4.38. 7,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için PHITS'te hesaplanan verim değerleri	87
Çizelge 4.39. 7,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için GESPECOR'da hesaplanan verim değerleri.....	87
Çizelge 4.40. 8,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için PHITS'te hesaplanan verim değerleri	88
Çizelge 4.41. 8,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için GESPECOR'da hesaplanan verim değerleri.....	88
Çizelge 4.42. 8,0-13,0 cm aralığındaki yükseklikler ve 5,6-8,0 cm aralığındaki yarıçaplarda olan Marinelli kaplarının 46,5-1836 keV enerji aralığında GESPECOR ve PHITS'ten elde edilen verim değerlerinin %farkı	89
Çizelge 4.43 Sanal dedektörün MC'deki boyut bilgileri	95
Çizelge 4.44. PHITS ve GESPECOR'dan elde edilen verimler arasında %RD a) saf Ge kristali için b) 0,7 mm ölü tabakaya sahip germanyum kristali için c) Al tutucu/boşluk ve DL'siz bir germanyum kristalinden oluşan sistem için d) tüm dedektör sistemi	97
Çizelge 5.1. Marinelli kabının PHITS MC programından elde edilen farklı yarıçap ve yüksekliklerde 46,5-1836 keV enerji aralığındaki dedektör verim değerleri.....	106
Çizelge 5.2. Marinelli kabının GESPECOR MC programından elde edilen farklı yarıçap ve yüksekliklerde 46,5-1836 keV enerji aralığındaki dedektör verim değerleri	107

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Foton şiddetinin soğurucu madde kalınlığına bağlı olarak değişimi	7
Şekil 2.2. Enerji ve etkileşim türü başına germanyumun kütle azalma katsayısı	8
Şekil 2.3. Fotoelektrik soğurma gösterimi (a) Fotoelektrik soğurma mekanizması ve (b) floresan x-ışınlarının emisyonu	9
Şekil 2.4. Compton saçılması.....	10
Şekil 2.5. Çift oluşum ve çift yok olma	12
Şekil 2.6. Ge materyalinde gama ışınlarının farklı tip etkileşmeler için azalma katsayılarının gama ışın enerjisi ile değişimleri (XCOM 2011).....	13
Şekil 2.7. Gama-ışını enerjisinin bir fonksiyonu olarak malzemelerin azalma katsayıları	13
Şekil 2.8. Koaksiyel tip germanyum dedektörleri için toplam enerji pik verimi.....	16
Şekil 2.9. p-tipi yarıiletken maddenin oluşturulması	17
Şekil 2.10. n-tipi yarıiletken maddenin oluşturulması	18
Şekil 2.11. HPGe Düzlemsel kesiti	18
Şekil 2.12. Koaksiyel kesit görünümü	19
Şekil 2.13. HPGe gama spektrometre sistemi.....	20
Şekil 2.14. Saf Germanyum Üretimi (cetvel 10 cm'dir.) (Gazi Üniversitesi Fotonik Laboratuvarı).....	21
Şekil 2.15. Net katkı konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak germanyumdaki elektriksel iletkenliğin değişimi	22
Şekil 2.16. Germanyum kristali (TENMAK- Gama Spektrometre Laboratuvarı)	22
Şekil 2.17. Gama ışınları için bir germanyum dedektörü ile ölçülen darbe yüksekliği spektrumları	23
Şekil 2.18. Dedektöre gelen parçacıkların etkileşmeler doğrultusunda izleyebilecekleri olası yollar	24
Şekil 2.19. ^{152}Eu 'nun bozunma şeması	29
Şekil 2.20. PHITS MC ile modellenen p-tipi dedektörün ölü tabaka gösterimi.....	33
Şekil 2.21. Marinelli kabı ve Dedektörde sayım esnasındaki konumu.....	34

Şekil	Sayfa
Şekil 2.22. MC simülasyonunda (a) 1, (b) 1000, (c)1000000, hikaye sayısı için foton dağılımı	37
Şekil 2.23. PHITS' te nükleer ve atomik çarpışmaları simüle etmek için kullanılması önerilen fizik modelleri	41
Şekil 2.24. GESPECOR arayüzü ve bir dedektörün şematik diyagramı	42
Şekil 3.1. p- tipi koaksiyel HPGe dedektörün (a) karşıdan ve (b) üstten görünümü	43
Şekil 3.2. HPGe dedektör 'end cap' kısmının üstten ve yakından görünümü	44
Şekil 3.3. Koaksiyel HPGe dedektörün şematik gösterimi.....	44
Şekil 3.4. Çok enerjili nokta radyoaktif kaynak	45
Şekil 3.5. 4 farklı yoğunluktaki Marinelli radyoaktif kaynaklar	46
Şekil 3.6. Genie 2000 programı ile spektrum analizi.....	50
Şekil 3.7. PHITS MC ile modellenmesinin 2D görünümü: germanyum kristali (18), yan ölü tabaka kalınlığı (21), ön ölü tabaka kalınlığı (22) ve alüminyum tutucular (24,25).....	53
Şekil 3.8. Çok enerjili nokta radyoaktif kaynak için 1 milyon hikaye sayısında PHITS MC'den elde edilen 2 boyutlu foton dağılımı (kaynak- dedektör mesafesi 2 cm alınmıştır).....	53
Şekil 3.9. Modellenen dedektör yapısının PHITS MC'den elde edilen 3 boyutlu görseli.....	54
Şekil 3.10. PHITS ile modellenen Marinelli kabının 2 boyutlu görünüşü.....	54
Şekil 3.11. PHITS ile modellenen Marinelli kabının 3 boyutlu görünüşü.....	55
Şekil 4.1. 07 mm ölü tabaka kalınlığında enerjiye karşılık dedektör veriminin değişimi.....	61
Şekil 4.2. Nokta kaynak için deneysel verim ve farklı DL değerlerinde PHITS MC'den elde edilen dedektör verim değerinin enerjiye karşılık değişimi.....	62
Şekil 4.3. Nokta kaynak için deneysel verim ve farklı DL değerlerinde GESPECOR MC'den elde edilen dedektör verim değerinin enerjiye karşılık değişimi.....	63
Şekil 4.4. 0,5 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deney verimi ile PHITS MC'den elde edilen dedektör veriminin enerjiye karşılık verim eğrisi	66
Şekil 4.5. 0,5 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deney verimi ile GESPECOR MC'den elde edilen dedektör veriminin enerjiye karşılık verim eğrisi.....	67

Şekil	Sayfa
Şekil 4.6. 0,7 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deney verimi ile PHITS MC'den elde edilen dedektör veriminin enerjiye karşılık verim eğrisi	68
Şekil 4.7. 0,7 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deney verimi ile GESPECOR MC'den elde edilen dedektör veriminin enerjiye karşılık verim eğrisi	69
Şekil 4.8. 1,0 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deney verimi ile PHITS MC'den elde edilen dedektör veriminin enerjiye karşılık verim eğrisi	70
Şekil 4.9. 1,0 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deney verimi ile GESPECOR MC'den elde edilen dedektör veriminin enerjiye karşılık verim eğrisi	71
Şekil 4.10. 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deney verimi ile PHITS MC'den elde edilen dedektör veriminin enerjiye karşılık verim eğrisi	72
Şekil 4.11. 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deney verimi ile GESPECOR MC'den elde edilen dedektör veriminin enerjiye karşılık verim eğrisi	73
Şekil 4.12. Yan (sabit) ve ön (değişen) ölü tabaka kalınlıklarında GESPECOR ve PHITS'ten elde edilen dedektör veriminin enerjiye göre değişimi ve deneysel verimlerle karşılaştırılması.....	79
Şekil 4.13. 5,6 cm yarıçap sabit tutularak yüksekliği 8,0 cm'den 13,0 cm' ye kadar değişen Marinelli kaplarının 2B kesit görünümü.....	82
Şekil 4.14. 5,6 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların PHITS MC'den elde edilen enerji verim eğrisi	83
Şekil 4.15. 5,6 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların GESPECOR MC'den elde edilen enerji verim eğrisi	84
Şekil 4.16. 6,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların PHITS MC'den elde edilen enerji verim eğrisi	85
Şekil 4.17. 6,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların GESPECOR MC'den elde edilen enerji verim eğrisi	85
Şekil 4.18. 6,53 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların PHITS MC'den elde edilen enerji verim eğrisi	86
Şekil 4.19. 6,53 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların GESPECOR MC'den elde edilen enerji verim eğrisi	86
Şekil 4.20. 7,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların PHITS MC'den elde edilen enerji verim eğrisi	87

Şekil	Sayfa
Şekil 4.21. 7,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların GESPECOR MC'den elde edilen enerji verim eğrisi	87
Şekil 4.22. 8,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların PHITS MC'den elde edilen enerji verim eğrisi	88
Şekil 4.23. 8,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların GESPECOR MC'den elde edilen enerji verim eğrisi	88
Şekil 4.24. 46,5-1836 keV aralığındaki enerjilerin değişen yarıçap ölçülerinde yüksekliğe karşı verim eğrileri.....	91
Şekil 4.25. Monte Carlo simülasyonundaki dört kurulumun görünümü, a) sadece germanyum, b) ölü tabakalı germanyum, c) alüminyum tutuculu germanyum, d) ölü tabakalı ve alüminyum tutuculu germanyum	96
Şekil 4.26. Saf Germanyum kristali için foton enerjilerine karşı verim eğrisi.....	97
Şekil 4.27. 0,7 mm'lik bir ölü tabakaya sahip saf Germanyum kristali için foton enerjilerine karşı verim eğrisi	98
Şekil 4.28. DL ve Al tutucusu ve boşlukları olmayan bir Germanyum kristalinden oluşan sistem için foton enerjilerine karşı verim eğrisi	99
Şekil 4.29. Tüm dedektör sistemi için foton enerjilerine karşı verim eğrisi	99

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Aktivite
E_g	Yasak band genişliğinin enerjisi
E_{e-d}	Elektron-deşik oluşturmak için gereken enerji
E	Enerji
E_e	Elektron enerjisi
E_i	İyon çiftini oluşturmak için gereken enerji
E_b	Elektronun kabuğa bağlanma enerjisidir
K	Kelvin
k	Boltzmann sabiti
κ	Çift oluşum tesir kesiti
λ	Bozunma sabiti
σ	Compton tesir kesiti
N	Çekirdek sayısı
N	Nötron sayısı
τ	Fotoelektrik tesir kesiti
γ	Gama-ışını
f_γ	Gama yayınlanma olasılığı
I	Geçen foton sayısı
I_0	Gelen foton sayısı
μ	Lineer azalma katsayısı
T	Mutlak sıcaklık
λ	Ortalama serbest yol
$\bar{\tau}$	Ortalama ömür
Z	Proton sayısı
ε	Verim
t	Zaman
x	Soğurucu kalınlığı

Simgeler	Açıklamalar
-----------------	--------------------

X	x-ışınları
μCi	Mikro Cruie

Kısaltmalar	Açıklamalar
--------------------	--------------------

DL	Ölü tabaka (Dead Layer)
FEPE	Toplam enerji pik verimi
Ge	Germanyum
GESPECOR	GERmanium SPEctra CORrection
HPGe	Yüksek Saflıkta Germanyum (High Purity Germanium)
IAEA	Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı
keV	Kilo elektron Volt
MC	Monte Carlo
MeV	Milyon elektron Volt
PHITS	Photon Heavy Ion Transport System
TCS	Gerçek zamanlı çakışma-true coincidence summing

1. GİRİŞ

Yüksek Saflıkta Germanyum (High Purity Germanium, HPGe) dedektörlerinin kullanıldığı gama spektrometresi, standart kaynaklar veya düşük enerjili (keV) çevresel numunelerdeki radyoaktivitenin doğru bir şekilde saptanması için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. HPGe dedektörler çok iyi enerji çözünürlüğüne ve yüksek algılama verimine sahip olduklarından, özellikle düşük enerjili radyoaktivite ölçümleri başta olmak üzere çevresel, gıda, yapı malzemesi, vb. her türlü numunede sıklıkla tercih edilmektedir (Breier, Laubenstein ve Povinec, 2017; Sima ve Arnold, 2009). Bu ölçümler disk, silindirik veya yakın sayım geometrisinde kurulan Marinelli kaplar gibi hacimsel kaynaklarla yapılır (Ababneh ve Eyadeh, 2015; Azbouche, Belgaid ve Mazrou, 2015; Guerra ve diğerleri, 2017; Semkow ve diğerleri, 2015).

HPGe dedektörlerde toplam enerji pik verimi (FEPE - full energy peak efficiency), istenen enerji aralığında standart gama-ışını kaynakları kullanılarak deneysel olarak belirlenebilir (Jevremović ve diğerleri, 2019). Maliyet, zaman, iş yükü vb. sebeplerden dolayı laboratuvarlar için gerekli standart numuneleri her zaman hazırlamak mümkün olmayabilir (Modarresi, Masoudi ve Karimi, 2018). Böyle bir durumda HPGe dedektörlerinin verimi Monte Carlo (MC) simülasyonu kullanılarak da belirlenebilir (Guerra ve diğerleri, 2017). HPGe dedektörlerinin Monte Carlo simülasyonu, gama spektrometri tekniğinde radyoaktif çekirdeklerin tanımlamayan ve niceleyen FEPE'yi belirlemek için son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Breier ve diğerleri, 2017; Sima ve Arnold, 2009).

Literatürde, Monte Carlo yöntemine dayalı birçok kod ve program bulunabilir: GESPECOR (Sima, Arnold ve Dovlete, 2001), EFFTRAN (Vidmar, 2005), MCNP (Briesmeister, 1997), GEANT (Hurtado, García-León ve García-Tenorio, 2004), PENELOPE (Sempau, Fernández-Varea, Acosta ve Salvat, 2003), PHITS (Peryoga, Sagara ve Shiba, 2017) ve FLUKA (Battistoni, Ferrari, Montaruli ve Sala, 2005). Simülasyon programları ile deneysel verim hesabı çalışmaları zamanla daha da artmaktadır. Deneysel olarak elde edilen FEPE değerlerine karşılık MC simülasyonu aracılığı ile farklı gama-ışını enerjileri için verim değerleri hesaplanır. FEPE değeri, dedektörün maruz kaldığı katı açı ve kaynak-dedektör mesafesi ile orantılıdır. FEPE enerjinin bir fonksiyonu olup DL kalınlığına ve dedektörün diğer geometrik özelliklerine güçlü bir şekilde bağlıdır (Azbouche ve diğerleri, 2015; Ferreux, Pierre, Thanh ve Lépy, 2013; Modarresi, Masoudi ve Karimi, 2017). Birçok

araştırma, deneysel verim ve Monte Carlo (MC) yöntemi ile hesaplanmış verim arasındaki tutarsızlığın germanyum kristalinin boyutları, ölü tabaka kalınlığı (Dead Layer, DL), kristal pencere mesafesi ve kristalin yuvarlak ön kenarlar gibi geometrik parametreler için üretici tarafından sağlanan bilgilerin net değerlerde olmayışından kaynaklanmıştır (Bölükdemir ve diğerleri, 2021; Boson, Ågren ve Johansson, 2008; Gasparro, Hult, Johnston ve Tagziria, 2008; Hurtado ve diğerleri, 2004; Peyres ve García, 2007; Ródenas, Ortiz, Ballesteros ve Serradell, 2001; Tzika, Kontogeorgakos, Vasilopoulou ve Stamatelatos, 2010). Bu parametrelerden verimi en çok etkileyen ve zamanla değişen ölü tabaka kalınlığının doğru belirlenmesi çok önemlidir (Huy, 2011). Özellikle p-tipi dedektörlerde, dış DL kalınlığı oldukça büyüktür (~ 1 mm). Bu kalınlık 100 keV'un altındaki enerji seviyelerinde dedektör verimini etkiler (Bölükdemir ve diğerleri, 2021). Dedektör verimi, sabit bir numune hacminde, numunedeki fotonun öz soğurma ve algılama bölgesinden dışarı saçılması nedeniyle, kabın farklı geometrik boyutlarında değişiklik gösterir. Yaklaşık 150 keV'un altındaki p-tipi dedektörler için verimin düşmesinin sebebi düşük enerjili fotonların dış ölü tabakadan geçerken soğurulmasıdır. Bu, germanyumda fotoelektrik soğurmanın baskın olduğu bölgedir ve neredeyse gelen tüm fotonları kesmek için birkaç milimetre kalınlık bile yeterlidir. 100 keV ile 1 MeV arasındaki enerjiye sahip gama-ışını fotonları dedektörde hala etkileşim halindedir, ancak bazıları toplam enerji pik verimine katkıda bulunmak yerine Compton olayına uğrayarak ortamdan uzaklaşır. 1 MeV'nin üzerindeki enerjilerde, gelen tüm gama ışınlarının önemli bir kısmı, herhangi bir etkileşim olmaksızın dedektörden geçebilir ve bu da verim eğrisinin daha hızlı düşmesine sebep olur (Knoll, 2010: 453). Ölü tabaka kalınlığının artmasının dedektör verimini azaltma etkisi, özellikle koaksiyel p-tipi HPGe dedektörler için önemli bir problemdir. DL kalınlığının kesin değerine sahip olmanın en iyi ve en kolay yolu dedektör boyutlarına sahip olduğunda, DL kalınlığını değiştirilerek bu kalınlığı simülasyon ile elde edilebilir ve deneyinin sonucu ile doğrulanabilir. MC simülasyonu ile dedektörün fiziksel ve geometrik parametrelerin doğru bir şekilde belirlenmesine dedektör karakterizasyonu denir. Karakterizasyonda Monte Carlo yöntemi, tahmini ve deneysel verim arasındaki minimum farkı elde etmek için kullanılır (Ródenas ve diğerleri, 2007). Farklı enerjilerde radyoaktif çekirdeklere sahip numuneler çeşitli kaynak-dedektör geometrileri kullanılarak elde edilen deneysel verim değerleriyle deneye karşılık gelen MC değerleri karşılaştırılarak doğrulanır (Modarresi ve diğerleri, 2017).

Çevre örneklerinden yayılan gama ışınlarını saymak ve HPGe dedektörlerinin verimini arttırmak için büyük hacimli Marinelli kaplarını kullanmak çok yaygınlaşmıştır. Çevresel

numune hacimleri dedektörün aktif hacmine olabildiğince yakın konumlandırıldığında elde edilen net sayım arttırılabilir. Düşük enerji seviyeli aktivite ölçümleri çerçevesinde, mümkün olduğu kadar düşük tespit limitleri gereklidir. Düşük yoğunluklu malzemeler için Marinelli geometrileri gibi büyük hacimli kaynaklar en iyi tespit limitlerini sağlayabilir (Ferreux ve diğerleri, 2013). Marinelli gibi büyük geometrik bir numune kabını dedektöre yakın konumlandırma, radyoaktif kaynağın dedektör ile temasını arttıracak ve bu sayede de numunelerden daha fazla algılamayla sayım hızı ve verim hesabının kolaylıkla elde edilmesine izin verecektir. Bu nedenle, Marinelli kap boyutlarının modellenmesi büyük önem taşımaktadır (Ahmed, Capello, Chiang, Cardenas-Mendez ve Kramer, 2009; Shweikani, Hasan, Tlas ve Doubal, 2014).

Marinelli kabını simüle etmek için kabın kendi kalınlığının yanı sıra, dedektörün temel geometrik bilgilerinin de iyi bilinmesi gerekir. Marinelli kaplarının boyutları simülasyon ve deneysel verim eğrileri arasındaki karşılaştırma, geometrinin modellenmesine veya germanyum kristalinin ölü tabaka kalınlığı gibi diğer yönlerle atfedilebilecek tutarsızlıklar sunar (Daza, Quintana, García-Talavera ve Fernández, 2001). Marinelli kabı, gama ışınları yayan bir numune ile doldurulduğunda, kabın üst kısmı silindirik bir kaynak alt kısmı ise dedektörün etrafını saran yüzük şeklindeki bir kaynak gibi davranacaktır. Marinelli kabına homojen dağılmış radyoaktif kaynakta kabın farklı bölümlerinden gelen fotonlar dedektöre ulaşana kadar farklı yol uzunlukları kat edecektir. Bu durumda ise kaynağın farklı bölümlerinden dedektörün aktif yüzeyini gören katı açısı farklı olacaktır. Bu nedenle, homojen dağılmış kaynağın farklı bölümlerinden gelen fotonların farklı geometrik verimle sonuçlanacağı varsayılabilir (Ahmed ve diğerleri, 2009).

Mevcut çalışmada, zamanla dedektör veriminin azalmasına neden olan ölü tabaka kalınlığı ve verim ile doğrudan alakalı olan Marinelli kap boyutları incelenmiştir. Yukarıda belirtilen bulgulara dayanarak, verimin esas olarak lityum atomlarının zaman içerisinde sürekli difüzyonu nedeniyle değiştiğini göstermiştir. Monte Carlo ile belirlenmeye çalışılan ölü tabaka kalınlığının en zorlu kısmı, FEPE değerinin doğru bir şekilde belirlenmesinde kristal yüzeyin ön mü yoksa ve yandan mı daha fazla etkilendiğinin tespit edilmesidir. Ölü tabakanın kalınlaşması verim değerinde büyük bir değişikliğe yol açar. Bu nedenle, <88 keV enerjiler, 661 keV'taki enerji ve >898 keV sonrasındaki yüksek enerjilerde ön ve yan ölü tabaka kalınlığı doğru belirlendiğinde, diğer enerjiler için verim değerine ulaşmak daha kolay olur.

Tez beş ana bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde tezin amacı, içeriği, dedektör karakterizasyonu ve Marinelli kap geometrisinin önemi üzerine genel bilgiler verilmiştir. Kuramsal Temeller bölümünde radyoaktif bozunma, gama ışınlarının madde ile etkileşmesi, gama spektrometresi, HPGe dedektörler, MC ile simülasyon ve modelleme yöntemi, PHITS ve GESPECOR programlarından bahsedilmiştir. Materyal ve Yöntem bölümünde tezde kullanılan p-tipi dedektör, nokta ve Marinelli kaynak referans malzemeleri verilmiştir. Deney ve Monte Carlo Uygulamaları bölümünde nokta ve Marinelli kaynaklar için deneysel verim değerlerinin belirlenmesi, PHITS ve GESPECOR MC programları ile referans malzemelerin tek parça ve iki parça ölü tabaka kalınlığı uygulamaları, Marinelli kap geometrisi, HPGe kristali ve dedektör sisteminin Monte Carlo yöntemi ile ayrıntılı bir şekilde incelenmesi çizelge ve şekiller halinde açıklanmıştır. Tartışma ve Sonuç bölümünde ise deney ve simülasyonlar sonucu elde edilen verimler, tek parça ve iki parçaya ayrılmış ölü tabaka kalınlığının verimi nasıl etkilediği, Marinelli kap geometrisinin verim değerlerine etkisi, HPGe kristali ve dedektör sisteminin MC ile modellenmesinin sonuçları tartışılmış ve yorumlanmıştır. Tezin son bölümünde ise elde edilen sonuçlar, tezin amaçları ışığında özetlenerek önerilerde bulunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Radyoaktif Bozunma Kanunu

Radyoaktif bozunma rastgele bir süreçtir ve bir atomun ne zaman bozunmaya uğrayacağını kesin olarak söylemek mümkün değildir. Bu bozunma sabiti radyoaktif çekirdekler için ayırt edici bir özellik olduğundan her radyoaktif çekirdeğin kendisine özgüdür. Genellikle λ ile gösterilen bu bozunma olasılığın ölçüsüne bozunma sabiti denir. Verilen bir örneğin ne kadarının verilen zaman aralığında bozunacağı hesaplanabilir. Bu hesaplama yapılırken, radyoaktif materyaldeki tüm çekirdeklerin bozunma ihtimalinin aynı olduğu kabul edilir. Bozunum miktarı, geçen zamanla ve radyoaktif çekirdek sayısı ile doğru orantılıdır (Knoll, 2010: 65). Belli bir radyoaktif maddenin parçalanma veya bozunma hızı bütün fiziksel ve kimyasal şartlardan bağımsız bir sabittir. Herhangi bir radyoaktif çekirdeğin atomları göz önüne alındığında, dt gibi küçük bir zaman aralığında bozunmaya uğrayan atomların ortalama sayısı dN , t anında mevcut atomların N sayısı ile orantılıdır. Yani λ sabit olmak üzere,

$$-dN = \lambda N dt \quad (2.1)$$

olur. Bu denklemin integrali alındığında

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

olur. N_0 , $t=0$ anındaki çekirdek sayısını gösterir. Başlangıçta var olan çekirdek sayısının yarıya düştüğü zaman yarılanma süresi yani yarıömür olarak tanımlanır. *Yarıömür* $t_{1/2}$ olarak gösterilir ve üstteki eşitliğe uygulandığında

$$N_0/2 = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \quad (2.3)$$

$$t = t_{1/2} = 0,693/\lambda \quad (2.4)$$

olur. Gerçekleşen radyoaktif parçalanmalar için belirlenen bir atomun ne zaman ve nasıl bozunuma uğrayacağını olasılık kanunlarına uygun olarak söylemek kolay değildir.

Bozunmanın gerçekleşmesinden t zaman sonra, ilk atomlardan N tanesi halen mevcut olacaktır. Bir atomun ortalama ömür süresi t_0 ,

$$t_0 = \frac{\int_0^{N_0} t dN}{N_0} \quad (2.5)$$

gibi ifade edilir. Eşitlik (2.5)'nin diferansiyeli alındığında

$$dN = -N_0 \lambda e^{-\lambda t} dt \quad (2.6)$$

olur. Bu değer (2.6) da yerine yazılırsa

$$t_0 = - \int_{\infty}^0 \lambda t e^{-\lambda t} dt \quad (2.7)$$

olur. Buradan da bir atomun ortalama ömrü için

$$t_0 = 1/\lambda \quad (2.8)$$

ifadesi bulunur. Yani λ bozunma sabitinin tersi, bir radyoaktif atomun ortalama ömür süresine eşittir. Bu durumda radyoaktivite artık;

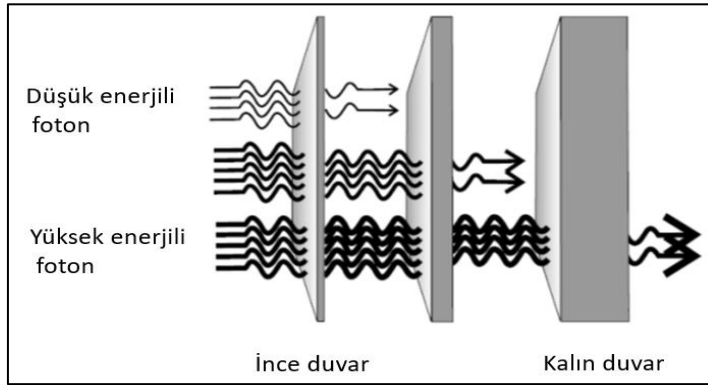
$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N \quad (2.9)$$

şeklinde tanımlanabilir. Radyoaktivite birimi olarak, Becquerel (1 bozunma / saniye), Curie ($3,7 \times 10^{10}$ bozunma/saniye), Rutherford (10^6 bozunma/saniye) tanımları kullanılmaktadır.

2.2. Gama Işınlının Madde ile Etkileşimleri

Foton, ışık veya elektromanyetik radyasyon türlerini temsil eden bir parçacık veya elektromanyetik dalga paketi olarak tanımlanır. Elektromanyetik radyasyon olarak x-ışınları ve gama ışınları düşünülür. Fotonların madde içerisindeki davranışları alfa ve beta gibi yüklü parçacıklarınkinden oldukça farklıdır. Fotonların (x ve gama-ışını) elektriksel yükleri olmadığı için yüklü parçacıklarda olduğu gibi Coulomb kuvvetine maruz kalmazlar. Bu

durumda madde içerisindeki atomları iyonlaştırmadığını düşünmek yanlış olacaktır. Gerçekte, fotonlar elektromanyetik kuvvet taşıyıcılarıdır. Madde ile etkileşimi ya iyonlaşma ya da ortama enerji aktarmasıyla gerçekleşir. Özellikle gama ışınları, atomun elektronları ile etkileştiğinde enerjisinin büyük bir kısmını hatta tamamını bir tek olayda kaybedebilir. Gama ışınlarının yüklü parçacıklarınki gibi menzilleri yoktur. Fotonların ortam içinde madde ile etkileşmesi ve şiddetinin değişmesi Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Foton şiddetinin soğurucu madde kalınlığına bağlı olarak değişimi

Foton şiddetindeki bu azalma kalınlığa bağlı olarak eksponansiyel değişir.

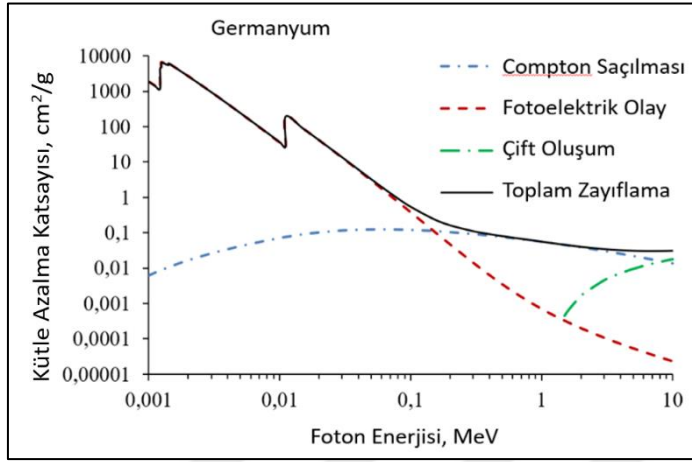
$$I(X) = I_0 \exp(-\mu x) \quad (2.10)$$

Burada I_0 gelen fotonların şiddeti, x soğurucunun kalınlığı ve μ lineer azalma katsayısı olup içerisinde geçtiği maddeye ve radyasyon enerjisine bağlıdır, bu durum etkileşmenin toplam tesir kesitidir.

Gama ışınlarının madde ile etkileşiminde çok sayıda olası etkileşim mekanizması bilinmesine rağmen, radyasyon ölçümlerinde yalnızca Fotoelektrik soğurma, Compton saçılması ve Çift Oluşumun önemli rolleri dikkate alınır. Tüm bu işlemler, gama-ışını foton enerjisinin kısmen veya tamamen elektron enerjisine aktarılmasıdır (Knoll, 2010: 47). Foton ani değişiklikler sonucu enerji aktarımı sürecinde ya tamamen kaybolur ya da önemli bir açıyla saçılır. Düşük enerjili gama ışınları için (birkaç yüz keV'a kadar) fotoelektrik soğurma, yüksek enerjili gama ışınları için (1,022-10 MeV'un üzerinde) ise çift oluşumu baskındır. Bu düşük-yüksek enerji aralığında Compton saçılması en olası süreçtir. Atom numarası, bu üç etkileşimin göreceli olasılıkları üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Gama

spektroskopisinde fotoelektrik olay baskın etkileşim biçimine sahip olduğundan ilgili dedektörlerin seçilmesinde avantaj sağlamaktadır.

Kütle azalma katsayısı, fotonun madde ile etkileşmesinde enerjinin saçılması veya soğurulmasının fonksiyonunu veren önemli bir parametredir (Şekil 2.2). Gelen fotonun şiddetindeki azalma, öz-soğurma ve etkileştiği maddede terk edilen enerji ise soğurulma olarak tanımlanır.

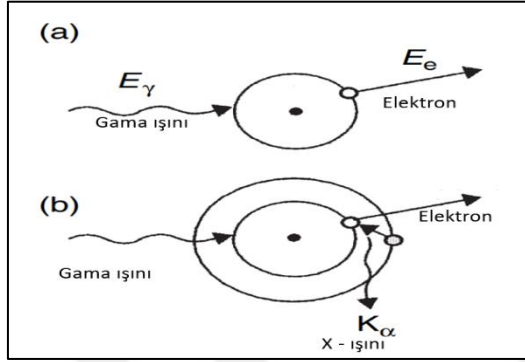


Şekil 2.2. Enerji ve etkileşim türü başına germanyumun kütle azalma katsayısı (Berger ve diğerleri, 2010)

2.2.1. Fotoelektrik soğurma

Maddenin atomları ile etkileşmeye giren gama-ışını, tüm enerjisini atomun bir yörünge elektronuna aktararak, madde tarafından soğurulabilir. Elektronu aktarılan enerjinin bir kısmı, elektronu atomdan koparmak için kullanılır, kalan kısmı ise elektrona kinetik enerji olarak verilir. Bu olay “fotoelektrik olay” olarak bilinir ve açığa çıkan elektronlar, “fotoelektron” olarak adlandırılır. Bu fotoelektronlar, büyük kinetik enerjilere de sahip olabileceklerinden dolayı, kendileri de birer iyonizasyon kaynağı olabilirler. Soğurucu ortamdaki bağlı elektron düşük enerjili bir fotonu soğurarak K_e kinetik enerjisine sahip bir elektron yayınlamaktadır. Atomun dış kabuğundaki elektronlar bir alt seviyeye inerek iç tabakalarındaki boş seviyeleri hızla doldururlar ve bu olay sonucunda x-ışını yayınlamaktadır. Gama-ışını için fotoelektronun K kabuğundan çıkma olasılığı yüksektir. Düşük atom numarasına sahip malzemeler için birkaç keV, daha yüksek atom numarasına sahip malzemeler için ise onlarca keV’luk bir bağlanma enerjisine ihtiyaç vardır. Bu bağlanma

enerjisi ya Auger elektronu ya da karakteristik bir x-ışını yayınlanarak serbest hale geçer (Şekil 2.3). Bu süreçte geri tepme enerjisi çok küçük olduğundan momentum korunumunda ihmal edilebilir.



Şekil 2.3. Fotoelektrik soğurma gösterimi (a) Fotoelektrik soğurma mekanizması ve (b) floresan x-ışınlarının emisyonu (Gilmore, 2008: 27)

$$E_e = E_\gamma - E_b \quad (2.11)$$

E_γ , gama-ışını enerjisidir ve E_b elektronun kabuğa bağlanma enerjisidir. Atom, E_b enerjisi ile uyarılmış bir durumda bırakılır ve iki yoldan biriyle dengesini geri kazanır. Atom, uyarma enerjisinin atomda kalan elektronlar arasında yeniden dağıtılmasıyla uyarılabilir. Bu, toplam gama-ışını enerjisinin atomdan (bir Auger elektronu) daha fazla elektron koparmasına neden olabilir. Alternatif olarak, fotoelektronun fırlatılmasıyla kalan boşluk, yüksek enerjili bir elektron tarafından doldururken x-ışını flüoresansı olarak adlandırılan karakteristik bir x-ışınının emisyonu ile sonuçlanır. Bu x-ışını daha sonra fotoelektrik soğurmaya uğrayabilir, belki de daha fazla x-ışını yayabilir ve bu işlem en sonunda gama ışınının tüm enerjisi soğurulana kadar devam eder. Fotoelektrik soğurmada tesir kesiti, keV mertebesindeki foton enerjileri için yaklaşık olarak şu şekilde tanımlanır (Gilmore, 2008: 27);

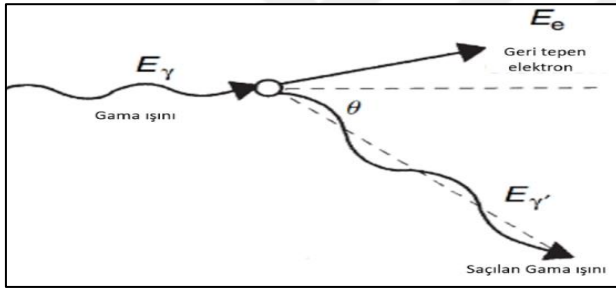
$$\tau \approx \frac{Z^5}{(h\nu)^2} \quad \text{için} \quad E_\gamma < m_e c^2 \quad (2.12)$$

$$\tau \approx \frac{Z^5}{(h\nu)} \quad \text{için} \quad E_\gamma > m_e c^2 \quad (2.13)$$

Yüksek atom numaralı atomlar için bu etkileşme mekanizması oldukça önemlidir. Fakat 1 MeV'luk foton enerjilerinde önemini kaybetmektedir. Bu nedenle, fotoelektrik soğurma gama ışınının enerjisini ölçmek için ideal bir etkileşimdir (Gilmore, 2008: 27).

2.2.2. Compton saçılması

Compton saçılması fotonun madde ile etkileşmesinde en iyi anlaşılan etkileşimlerden birisidir. Compton saçılması (Şekil 2.4), gama-ışını enerjisinin bir kısmını zayıf bağlı bir elektrona aktardığı etkileşimdir. Gama ışınının enerjisi, saçılan elektron ve saçılan foton arasında paylaşılır. Elektronlar atom içerisinde bağlı olduğundan fotonun enerjisi elektronun bağlanma enerjisinden çok büyük ise bağlanma enerjisi göz ardı edilir ve elektron serbest kabul edilir. Gelen fotonun enerjisi atomun bağlanma enerjisi seviyesinde ise bu olay gerçekleşemez (Gilmore, 2008: 28).



Şekil 2.4. Compton saçılması (Gilmore, 2008: 28)

Geri tepme elektronuna verilen enerji aşağıdaki gibi ifade edilir (Gilmore, 2008: 28)

$$E_e = E_\gamma - E_\gamma' \quad (2.14)$$

$$E_e = E_\gamma \left\{ 1 - \frac{1}{[1 + E_\gamma(1 - \cos\theta)/m_0c^2]} \right\} \quad (2.15)$$

Bu eşitlik soğurulan enerjinin saçılan elektronun açısıyla nasıl değiştiğini gösterir. $\theta = 0$ olduğunda, E_e 'nin sıfır olduğu bulunur, yani dedektöre hiçbir enerji aktarılmamış olur. Gama-ışını $\theta = 180^\circ$ açı ile saçıldığında eşitlikte parantez içerisindeki terim 1'den küçük olacağından gama-ışını enerjisinin yalnızca bir kısmı geri tepme elektronuna aktaracaktır. Saçılma açıları, elektrona aktarılan enerji miktarı bu iki uç nokta arasında olmalıdır. Compton saçılmasının tesir kesiti yaklaşık olarak aşağıdaki gibi verilir (Gilmore, 2008: 28):

$$\sigma \sim \frac{Z}{h\nu} \quad (2.16)$$

2.2.3. Çift oluşumu

Çift oluşumun, fotoelektrik olay ve Compton saçılmasından farkı gama ışınının tamamen atomla etkileşiminden kaynaklanmasıdır. Yüksek gama-ışını enerjilerinde önemi artan bir etkileşimdir. Süreç, çekirdeğin Coulomb alanı içerisinde gerçekleşir. Gama-ışını enerjisinin bir kısmı elektron -pozitron çifti (e^- ve e^+) oluşturmak için geri kalan kısmı ise elektron ile pozitrona kinetik enerji (T_{e^-} ve T_{e^+}) olarak verilir. Elektron ve pozitronun her birinin durgun kütle enerjisi 511 keV'tur. Bu olayın gerçekleşebilmesi için gama-ışını en azından her biri 511 keV, toplamda 1022 keV olan, iki parçacığın durgun kütlelerine eşdeğer bir enerji taşımalıdır.

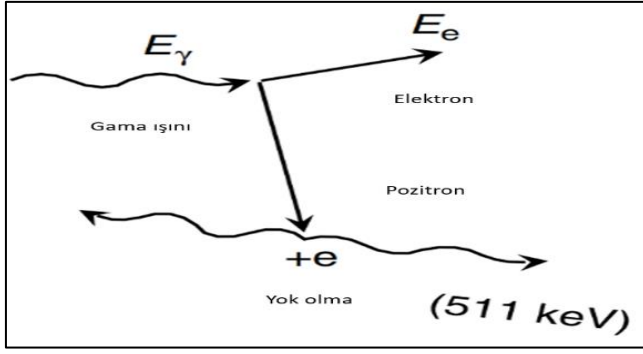
$$h\nu \rightarrow e^- + e^+ + T_{e^-} + T_{e^+} \quad (2.17)$$

$$T_{e^-} + T_{e^+} = h\nu - 1,022 \text{ MeV} \quad (2.18)$$

Uygulamada, çift üretiminin kanıtı, yalnızca enerji 1022 keV'tan oldukça fazla olduğunda bir gama-ışını spektrumunda kolaylıkla görülür. Oluşturulan elektron ve pozitron, fazla gama-ışını enerjisini eşit olarak paylaşır ve paylaştığı enerjiyi dedektör ortamında etkileşerek kaybeder. Daha sonra pozitronun enerjisi termal enerjilere yakın bir düzeye indirgendiğinde, kaçınılmaz olarak bir elektronla karşılaştığında 511 keV'luk iki fotonu (çift yok olma -annihilation radiation) serbest bırakarak yok olacaktır (Gilmore, 2008: 29). Bu olayın elektron -pozitron çiftinin oluşturulmasından sonraki 1 ns içinde gerçekleşmesi muhtemeldir. Dedektörlerin şarj toplama süresinin 100 ila 700 ns olduğu dikkate alınır, çift yok olma ve çift oluşum olayı anlık olarak kabul edilebilir. Olayların tam sırası Şekil 2.5' te açıklanmaktadır. Çift oluşum olayının sonuçları ve dedektör tarafından soğurulan enerji (keV cinsinden) aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$E_e = E - 1022 \text{ keV} \quad (2.19)$$

$$e^- + e^+ \rightarrow 2h\nu \quad (2.20)$$



Şekil 2.5. Çift oluşum ve çift yok olma (Gilmore, 2008: 29)

2.2.4. Thomson ve Rayleigh saçılması

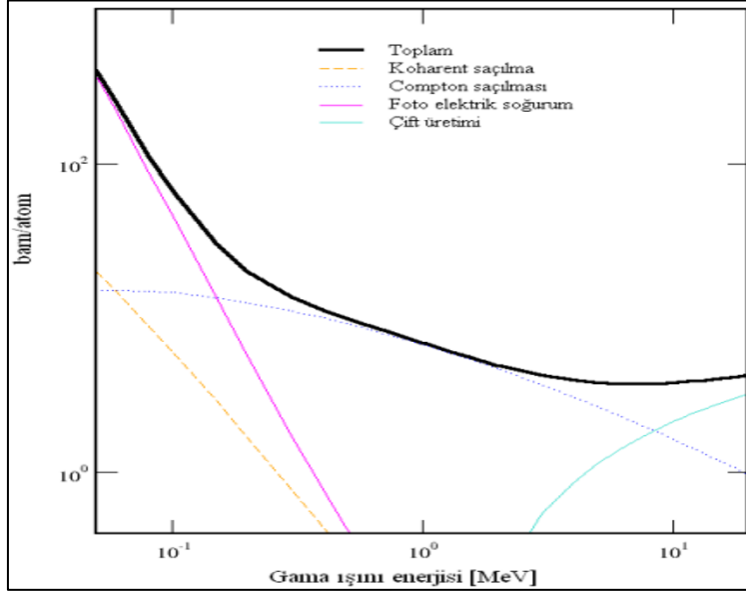
Compton saçılmasının dışında gama ışınlarının maddede elastik saçılma yoluyla etkileştiği diğer tip saçılmalar da vardır. Bunlar Thomson ve Rayleigh saçılmalarıdır. Thomson saçılmasında, gama ışınları serbest bir elektrondan, Rayleigh (koharent)'de ise atomun bütün elektronlarından saçılır. Rayleigh saçılmasının tesir kesiti Z^2 ile orantılıdır. Rayleigh saçılmasında, birim elektron başına düşen enerji değeri düşük olduğu için elektronun geri tepmesi ihmal edilir. Her iki saçılma türünde de gama ışınları atomun, uyarılmasına ve iyonlaşmasına katkı sağlamazlar. Enerjilerinde bir değişim olmadan saçılırlar. Relativistik enerjilerde, Thomson ve Rayleigh saçılmaları çok düşük ihtimallerle gerçekleşebilirler.

2.2.5. Toplam azalma katsayısı

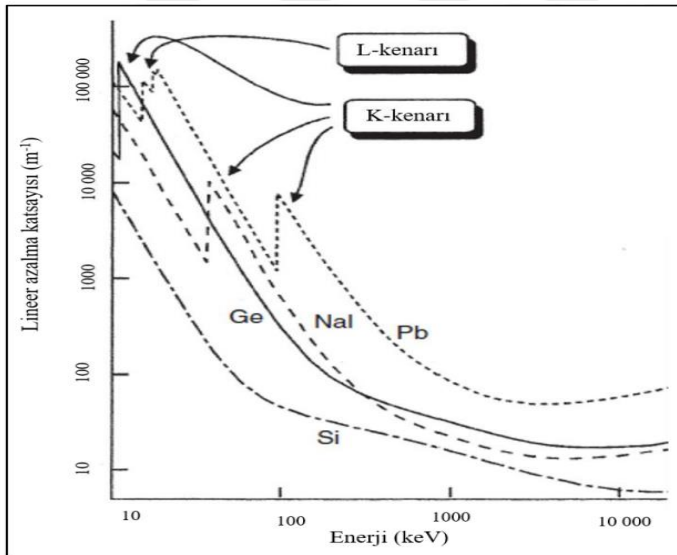
Madde içerisinde ilerleyen gama ışınlarının üç ana etkileşme mekanizmasından yukarıda kısaca bahsedildi. Aşağıda Şekil 2.6'da bu etkileşmelerin tesir kesitlerinin, gama-ışını enerjisi ile değişimleri gösterilmektedir. Gama ışınlarının, materyalin birim uzunluğunda bu üç etkileşmeyi yapma olasılıklarının toplamı, lineer azalma katsayısı olarak verilir. Azalma katsayısı, yalnızca belirli bir enerjiye sahip bir gama ışınının söz konusu malzeme ile etkileşime girme olasılığını ifade eder. Rayleigh saçılması, enerjinin soğurulmasına katkıda bulunmaz ve Eşitlik 2.21'de de görülmez. Burada τ , fotoelektrik soğurma, σ , Compton saçılması ve κ ise çift oluşum etkileşme tesir kesitleridir (Tanır, Bölükdemir ve Koç, 2013: 340).

$$\mu \text{ (m}^{-1}\text{)} = \tau \text{ (Fotoelektrik)} + \sigma \text{ (Compton)} + \kappa \text{ (Çift Oluşumu)} \quad (2.21)$$

Gama spektrometrisi ile ilgili bir dizi malzemenin azalma katsayısı, enerji bağımlılığının bir fonksiyonu olarak Şekil 2.6.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Ge materyalinde gama ışınlarının farklı tip etkileşmeler için azalma katsayılarının gama ışın enerjisi ile değişimleri (XCOM 2011)



Şekil 2.7. Gama-ışını enerjisinin bir fonksiyonu olarak malzemelerin azalma katsayıları (Gilmore, 2008: 25)

Şekil 2.7.'de görüldüğü gibi farklı elementlerin azalma katsayısına bakıldığında etkileşim olasılığının ortam atom numarasına bağlı olduğu anlaşılabılır. Azalma katsayısı, daha büyük atom numarasına sahip malzemeler için daha büyüktür. Bu nedenle, germanyum, gama

ışınları için silikondan daha tatmin edici dedektör malzemesidir ve kurşun, daha düşük atom numarasına sahip malzemelere göre daha fazla tercih edilir (Gilmore, 2008: 26, 29).

2.2.6. Dedektör içi etkileşimler

Gama ışınlarının dedektör malzemeleri ile aralarındaki tüm etkileşimler, enerjinin gama ışınından elektronlara veya çift üretimi durumunda bir elektron ve bir pozitrona aktarılmasıyla sonuçlanır. Gama spektrometrisinde, bu parçacıkların enerjisi birkaç keV'tan birkaç MeV'a kadar olabilir. Havada bir iyon çifti oluşturmak için gerekli olan enerji 34 eV'tur. Germanyum dedektörleri için iyonlaşma enerjisi 2,96 eV'tur. Bu iki değer karşılaştırıldığında, dedektörün içinde birincil elektronlar etrafa saçıldıklarında elektron-deşik çiftlerini oluşturabilir. Böyle bir durumda elektron tarafından oluşturulan iyon çifti sayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$N = E_e/E_i \quad (2.22)$$

E_e , elektron enerjisi ve E_i , iyon çiftini oluşturmak için gereken enerjidir. N 'i bir elektron yükü ile çarpmak, dedektör içinde oluşturulan tahmini yükü verecektir. Dedektörde toplanması gereken ikincil elektronlar ve bunlarla ilişkili pozitif yüklü deşikler elektrik sinyali üretirler (Gilmore, 2008: 30).

2.3. Gama Spektroskopisi ve Dedektörler

Gama ışınlarının ölçümünde en ideal malzeme, dedektörün veriminin yüksek olmasını, enerji çözünürlüğünün ise küçük olmasını sağlayan malzemedir (Breier ve diğerleri, 2017; Sima ve Arnold, 2009; Gilmore, 2008: 22). Etkili olması için dedektörün kaçan fotonların çoğunu yakalayacak kadar büyük olması ve bunların tespiti için iyi bir verime sahip olması gerekir (Knoll, 2010: 446). Enerji çözünürlüğü zayıf olan gaz dedektörleri, düşük yoğunluklu ve düşük Z sayısına sahip olduklarından ölçüm verimleri de düşüktür. Elektron-deşik çifti üretmek için ihtiyaç duyulan enerji sadece 1–2 eV civarındadır ki bu iyi bir enerji çözünürlüğü anlamına gelir. Dedektör materyali olarak şimdiye kadar kullanılan yarı iletken materyaller, Si, Ge, GaAs, CdTe, CdZnTe ve HgI'dir. Nükleer yapı çalışmalarındaki gama spektroskopisinde ilgili enerji aralığı 50 keV ile 10 MeV'tur ve bu enerji aralığı için en uygun yarı iletken materyal germanyumdur (Ge). Ge materyali, boyutları daha büyük olarak

üretilebilir ve enerji çözünürlüğü, sözü geçen diğer materyallere göre 3 kat daha iyidir. Pratik açıdan hiç bir tuzağın olmaması dedektör malzemesinin makul maliyette, yüksek saflıkta ve mümkün olduğu kadar mükemmel yakın kristal durumda olması anlamına gelir (Gilmore, 2008: 41). Gama dedektörleri için uygun yarı iletken dedektör malzemesinin: mümkün olduğu kadar büyük soğurma katsayısına sahip olması (yüksek Z), birim enerji başına mümkün olduğu kadar çok elektron-deşik çifti üretmesi, elektron ve deşik hareketliliğine izin vermesi, kristallerin mükemmel yakın yüksek saflıkta olması, makul maliyetle ve uygun miktarlarda mevcut olması gerekir.

Çizelge 2.1. Gama dedektör tipleri

Malzeme	Atom numarası	Çalışma sıcaklığı	Band Genişliği (eV) ^{a)}	E _{e-d} (eV) ^{a,b)}	Yoğunluk (g cm ⁻³)	Mobilité (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	
						Elektronlar	Deşikler
Si	14	Oda sıcaklığı	1,106	3,62	2,33	1350	480
Ge	32	Sıvı Azot (77 °K)	0,67	2,96	5,32	3,6x10 ⁴	4,2x10 ⁴
CdTe	48,52	Oda sıcaklığı	1,47	4,43	6,06	1000	80
CdZnTe	43,30,52	Oda sıcaklığı	1,57	4,64	5,78	1000	50-80
HgI ₂	80,53	Oda sıcaklığı	2,13	4,22	6,3	100	4
GaAs	31,33	Oda sıcaklığı	1,45	4,51	5,35	8000	400
NaI(Tl)	11,53,81	Oda sıcaklığı	4,0	170	3,67	-	-
TlBr	81,35	-20 °C	2,68	-	7,56	-	-
PbI ₂	82,53	-	2,6	7,68	6,16	8	2
GaSe	31,34	-	2,03	6,3	4,55	-	-
AlSb	13,51	-	1,62	5,05	4,26	-	-
CdSe	48,34	-	1,75	-	5,74	-	-
a) Ge için 77 °K, diğerleri için 300 °K olarak değer verilmiştir.							
b) Elektron-deşik oluşturmak için gereken enerji (Gilmore, 2008: 41).							

Çizelge 2.1'de gösterilen seçilmiş verileri olanlar arasında germanyum açık ara en yaygın gama dedektörü malzemesidir. Silikondan daha yüksek atom numarası, daha yüksek enerjili gama ışınlarının tespiti için kullanılmasını pratik hale getirir. Son yıllarda, bu tür dedektörlere olan talebin artması yüksek saflıkta germanyum üretimi teknolojisinin önemli ölçüde gelişmesini sağlamıştır (Gilmore, 2008: 42; Knoll, 2010: 365).

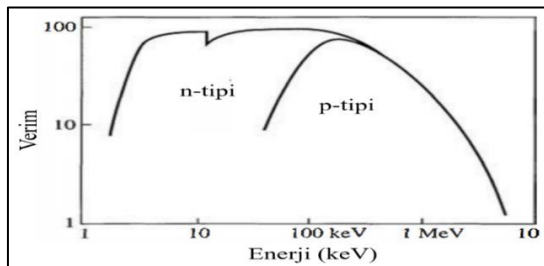
2.3.1. Yarı iletkenler

Yarı iletken malzemeler, akımı iyi iletmezler. Aslında ne iyi bir iletken ne de iyi bir yalıtıcıdır. Çünkü valans bandındaki deşiklerin ve iletim bandındaki serbest elektronların sayısı ile sınırlıdır. İletkenliği ayarlanabilen silisyum veya germanyum, elektronik devre elemanlarının yapımında kullanılır. Saf silisyum veya germanyumun mutlaka serbest elektron veya deşik sayısı (kontrollü) artırılarak iletkenliği ayarlanmalıdır. Bu ancak saf

malzemeye katkı maddesi eklenmesi ile sağlanır. Katkı maddesi (Doping) eklenerek oluşturulan iki temel yarıiletken materyal vardır. Akım taşıyıcılarının (elektron veya deşik) sayısının artırılması ile malzemenin iletkenliğini, azaltılması ile de malzemenin direnci artırılır. Bunlara; n-tipi madde ve p-tipi madde denir. Elektronik devre elemanlarının üretiminde bu iki madde kullanılır. Temel bilgi taşıyıcıları, yüklü parçacığın (birincil radyasyon veya ikincil parçacık) dedektörden geçtiği yol boyunca oluşturulan elektron-deşik çiftleridir. Elektrik alan hareketleriyle dedektörden gelen temel elektrik sinyali anlamlı hale getirir (Knoll, 2010: 365).

p-tipi ve n-tipi dedektörler

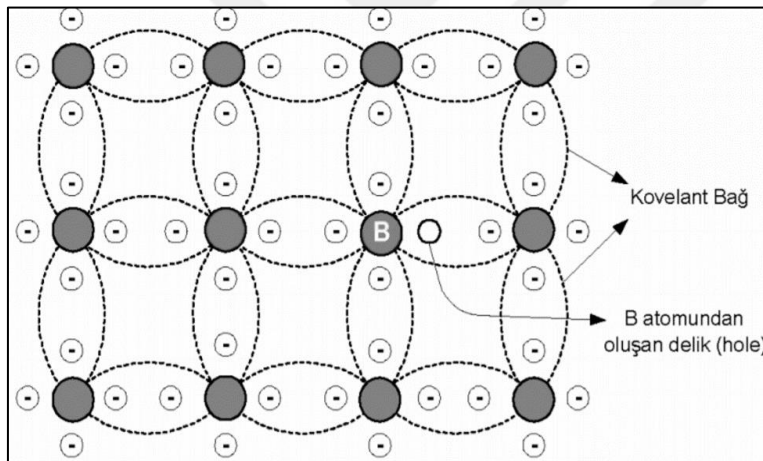
Koaksiyel tip germanyum dedektörler için toplam enerji pik veriminin taslağı Şekil 2.8’de gösterilmektedir. Eğriler, aynı hacimdeki temsili n ve p tipi dedektörler için gösterilmiştir. Eğriler arasındaki farklı davranışın, kristal ile hiçbir ilgisi yoktur, yalnızca katkılama malzemelerinin hangi elektrik kontak bölgesine yerleştirilmesiyle alakalıdır. Bu fark, p-tipi malzeme üzerindeki dış ölü tabakadan, n-tipi dedektörlerde çok daha ince bir ölü tabaka ile karşılaştırıldığında ortaya çıkar. Bu germanyumda fotoelektrik olayın hakim olduğu bölgedir ve neredeyse gelen tüm fotonları kesmek için birkaç milimetre kalınlık bile yeterlidir. 100 keV ile 1 MeV enerji aralığındaki gama-ışını fotonlarının çoğu dedektörle etkileşir, 100-500 keV aralığında fotoelektrik olay baskın iken 500 keV -1 MeV aralığında Compton saçılması baskındır, bu nedenle 1 MeV’e kadar fotonların bazıları toplam enerji pikine katkıda bulunmak yerine Compton saçılımına uğrayacak ve ortamdan kaçacaktır. 1 MeV’un üzerindeki enerjilerde, gelen gama ışınlarının önemli bir kısmı, herhangi bir etkileşim olmaksızın dedektörden geçebilir bu da verim eğrisinin hızla düşmesine neden olur (Skinner, 1996). Yüksek saflıkta germanyum dedektörleri genellikle tamamen tüketim bölgesi dedektörleri olarak çalıştırılır (Knoll, 2010: 452).



Şekil 2.8. Koaksiyel tip germanyum dedektörleri için toplam enerji pik verimi (Knoll, 2010: 452)

p- tipi

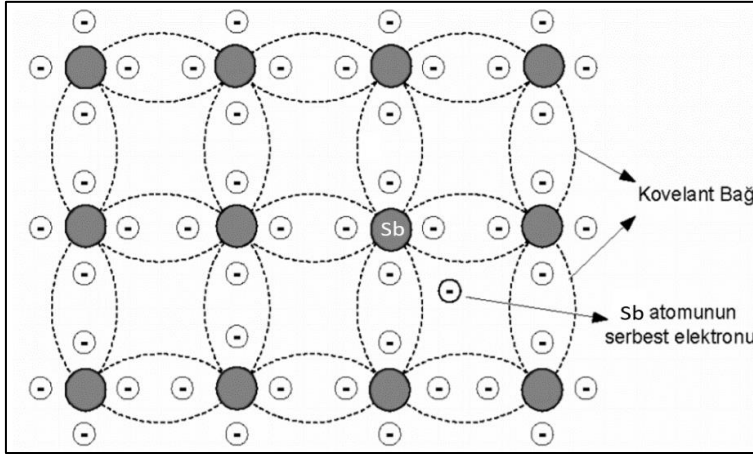
Saf germanyum atomu içerisine, 3 valans elektrona sahip (3-değerli) atomların belli bir oranda eklenmesi ile yeni bir kristal yapı oluşur. Bu yeni kristal yapıda deşik (boşluk) sayısı artırılmış olur. 3 valans elektrona sahip atomlara örnek olarak; alüminyum (Al), Bor (B) ve Galyum (Ga) elementlerini verilebilir. Örneğin; saf germanyum içerisine belli bir oranda bor katılırsa; bor elementinin 3 valans elektronu, germanyumun 3 valans elektronu ile ortak kovalent bağ oluşturur (Şekil 2.9). Fakat germanyumun 1 valans elektronu ortak valans bağı oluşturamaz. Bu durumda 1 elektron noksanlığı yani deşik oluşur. Germanyuma eklenen katkı miktarı ile deşiklerin sayısı kontrol edilebilir. Deşikler pozitif yüklü olduğundan bu yöntemle elde edilen yeni malzemeye p-tipi yarıiletken malzeme denir. Dolayısıyla p-tipi malzemede çoğunluk akım taşıyıcıları iken elektronlar ise azınlık akım taşıyıcılarıdır.



Şekil 2.9. p-tipi yarıiletken maddenin oluşturulması (Demirtürk, 2008)

n-tipi

Saf germanyumun iletkenlik bandındaki deşiklerinin artırılması ve atomlara 5-değerli valans elektronları olan arsenik (As), fosfor (P), bizmut (Bi) veya antimon (Sb) gibi katkı maddeleri eklenerek yapılır. Şekil 2.10.'da Antimon atomunun 4 valans elektronu, germanyumun 4 valans elektronu ile kovalent bağ oluşturduğu gösterilmiştir. Antimon'un 1 valans elektronu açıkta kalır ve ayrılır. Bu açıkta kalan elektron herhangi bir atoma bağlı olmadığından iletkenliği artırır. İletkenlik, elektron sayıları ile kontrol edilebilir. Bu ise germanyuma eklenen atomların sayısı ile olur.

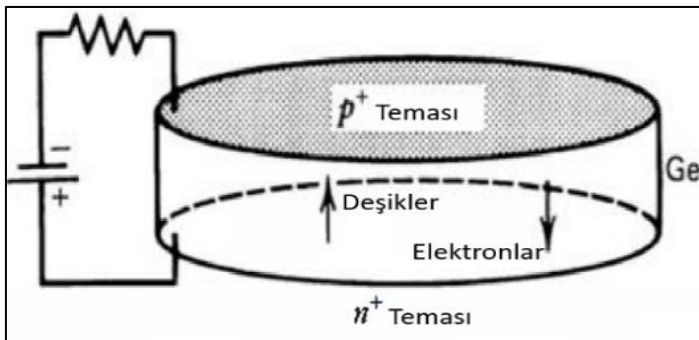


Şekil 2.10. n-tipi yarıiletken maddenin oluşturulması (Demirtürk, 2008)

Akım taşıyıcılarının çoğunluğu elektron olan silisyum veya germanyum maddesine n-tipi yarıiletken malzeme denir. Dış kontak kalınlığı, iç kontağına göre çok daha azdır. Bu incelik, dedektöre gelen düşük enerjili gama ışınlarının kristale kolayca girmesini sağlayarak, düşük enerjilerde iyi verim elde edilmesini sağlar.

Düzlemsel yapılandırma

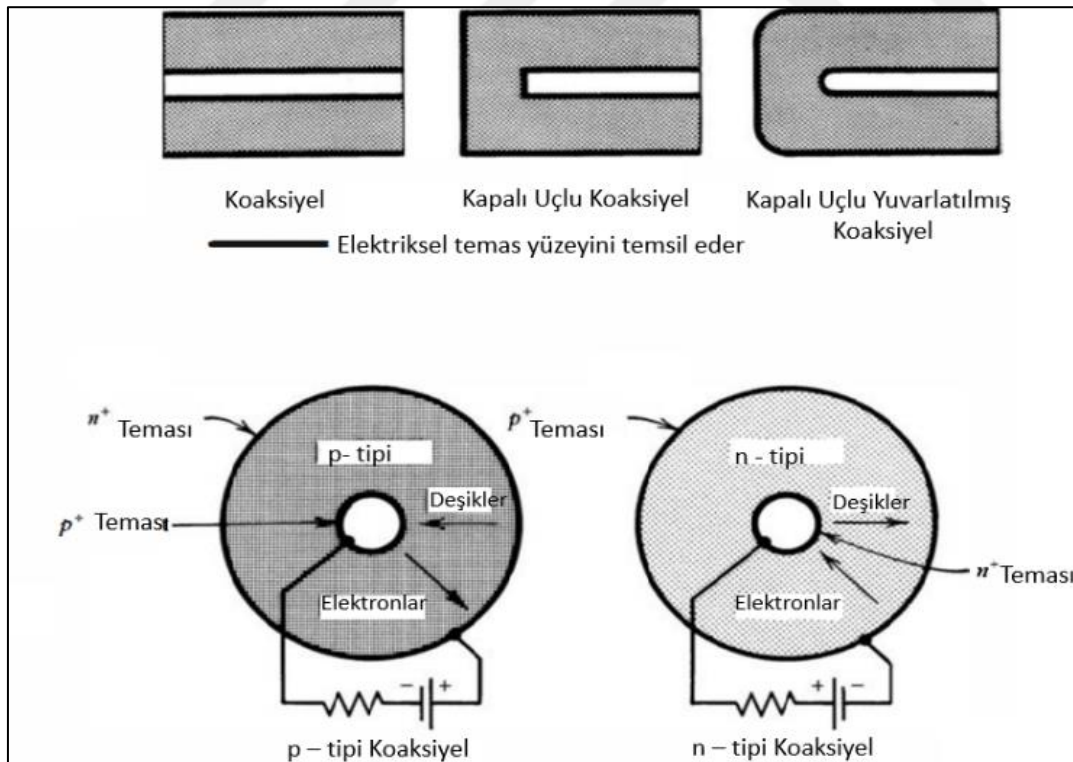
Düzlemsel bir konfigürasyonda, elektrik kontakları, bir germanyum diskinin iki düz yüzeyine yerleştirilir (Şekil 2.11). Elektrik kontakları kristalin bu iki düz yüzeyinden alınır. Lityum'un kristale difüze edilmesiyle düzlemsel yüzeylerden birisine n^+ kontak, diğer yüzeyde ise iyonlaştırılmış boron katkılanmasıyla p^+ kontak yapılır. Uygulanan gerilim diskin yan yüzeylerinde önemli bir kaçak akıma yol açabilir. Bu akımdaki dalgalanmalar bir gürültü kaynağıdır ve dedektörün enerji çözünürlüğünde bir bozulmaya yol açabilir. (Knoll, 2010: 417).



Şekil 2.11. HPGe düzlemsel kesiti (Knoll, 2010: 417)

Koaksiyel yapılandırma

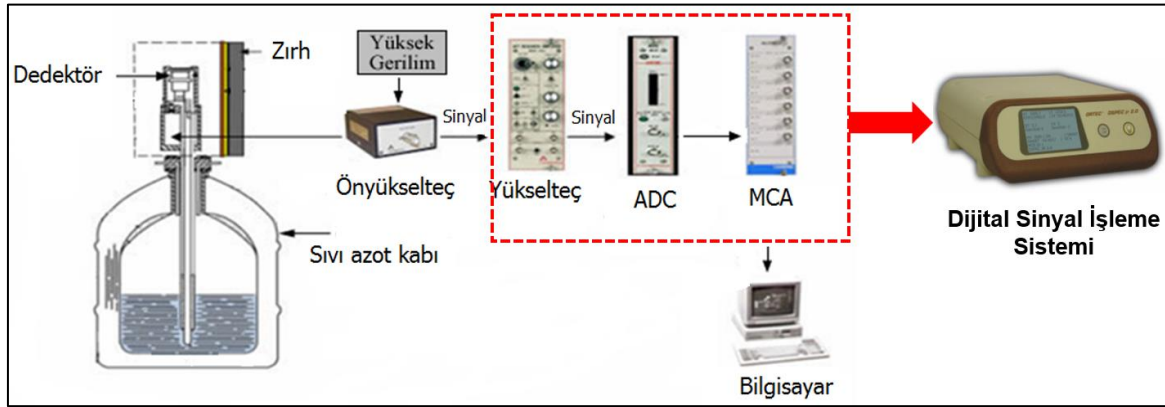
Gama spektroskopisinde koaksiyel yapılandırma daha büyük hacimli dedektörler üretmek için sıklıkla tercih edilirler. Kristal hacmi daha fazla ve tek bir tüketim bölgesine sahip bir geometridir. Bu geometride germanyum kristalin dış silindirik yüzeyinde bir elektrot üretilir. Büyük hacimli koaksiyel dedektörler Şekil 2.12’de gösterilmektedir. Dış elektrot, her iki kapalı uçlu durumda da ön yüzeyin üzerine uzatılır. Kristalin iç kısmının çıkarılıp iç silindirik yüzeyi üzerine bir temasın yerleştirilmesi ile ikinci bir silindirik temas sağlanır. Kristal eksenel yönde uzun yapılabildiğinden çok daha büyük aktif hacimler üretilebilir. HPGe malzemesi, yüksek saflıkta p veya n tipi olabilir. Dedektör tüketim bölgesi, bu n + -p bağlantısının ters çevrilmesiyle oluşturulur. Kapalı uçlu bir koaksiyel konfigürasyon, merkez çekirdeğin sadece bir kısmının çıkarıldığı ve dış elektrotun silindirik kristalin bir düz ucunun üzerine uzatıldığı bir konfigürasyondur. HPGe dedektörlerinin çoğu ticari üreticisi, ön yüzeydeki kaçak akımlarla başa çıkmanın zorluklarından kaçınmak için gerçek bir koaksiyel geometri yerine kapalı uçlu konfigürasyonu seçerler (Knoll, 2010: 419).



Şekil 2.12. Koaksiyel kesit görünümü (Knoll, 2010: 419)

2.4. HPGe Dedektörler

1960'ların başından itibaren ticari olarak satışa sunulan germanyum dedektörleri yaygın olarak kullanılmaya başlandılar. 1980'lerin başlarında yüksek saflıkta germanyumun kolay erişimi, lityum sürüklenmesine bir alternatif sağladı ve üreticiler lityum sürüklenme işlemiyle üretilen Ge (Li) dedektörlerinin üretimini durdurdu. Bu evrimin ana nedeni, HPGe dedektörlerinin sağladığı çok daha büyük operasyonel kolaylıktır. Genel olarak, algılama verimi ve enerji çözünürlüğü gibi önemli performans özellikleri, aynı boyuttaki Ge (Li) ve HPGe dedektörleri için esasen aynıdır (Knoll, 2010: 416). Örnekteki gama yayıcı radyoaktiflerin tayini, etrafı kurşunla zırhlanmış yüksek ayırma gücündeki germanyum dedektörü ile buna bağlı çok kanallı analizör ve ilgili elektronik birimlerden oluşmuş bir gama ölçüm sisteminde yapılır (Şekil 2.13). Dedektör kristaline ulaşan gama ışınlarının enerjisiyle orantılı olarak oluşan pulsların bir önyükselteç ve yükselteçte işlendikten sonra elde edilen sinyalin analog sayısal dönüştürücüde (ADC) sayısal hale getirilmesi ve çok kanallı analizörün (MCA) hafızasında spektrum olarak kaydedilmesine imkan veren bir sistemdir. Toplanan spektral bilgilerin değerlendirilmesi elle yapılabildiği gibi, uygun yazılımlar kullanılarak bilgisayarlarla da yapılır.



Şekil 2.13. HPGe gama spektrometre sistemi

2.4.1. HPGe dedektörlerin üretimi ve içeriği

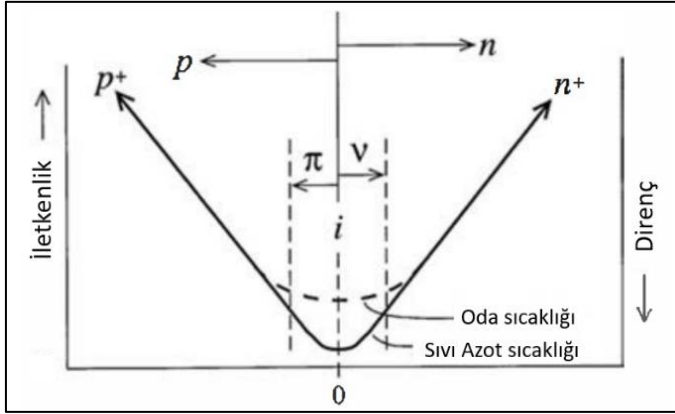
Safsızlık seviyeleri 10^{10} atom / cm^3 kadar düşük olan ultra saf germanyum üretim teknikleri ilk olarak 1970'lerin ortalarında geliştirildi. Başlangıç malzemesi, yarı iletken endüstrisinde kullanılması amaçlanan dökme germanyumdur. Yüksek saflıkta olan bu malzeme, bölge arıtma tekniği kullanılarak daha fazla işlenir. Katkılanma seviyeleri, malzemenin lokal

olarak ısıtılması ve erimiş bir bölgenin numunenin bir ucundan diğerine yavaşça geçirilmesiyle aşamalı olarak azaltılır. Safsızlıklar erimiş germanyum içinde katıya göre daha fazla çözünme eğiliminde olduklarından, safsızlıklar tercihen erimiş bölgeye aktarılır ve kristalden uzaklaştırılır. Bu işlemin birçok tekrarından sonra, 10^9 atom / cm³ kadar düşük safsızlık seviyeleri elde edilmiş olur. Böyle bir durumda elde edilen germanyum, ticari hacimde üretilmiş en yüksek düzeyde saflaştırılmış malzeme olur.



Şekil 2.14. Saf Germanyum üretimi (cetvel 10 cm'dir.) (Gazi Üniversitesi Fotonik Laboratuvarı)

Kristal büyütme teknolojisinin geliştirilmesiyle, büyük boyutlu (100 mm çap ve 140 mm uzunlukta), yüksek saflıkta Ge "HPGe" kristalleri üretmek günümüzde mümkündür (Şekil 2.14). Normal Ge dedektörlerinde 1–2 mm boyunda olan tüketim bölgesinin, HPGe dedektörlerinde 10–15 mm olması sağlanabilmiştir. Bu büyük boyut, gama ışınlarının kristaldeki çoklu saçılmalarından sonra soğurulma olasılıklarını artırır. Tüketim bölgesinin büyümesi, gama spektroskopisinde önemli olan yüksek çözünürlüğün elde edilmesini sağlamaktadır (Knoll, 2010: 415, 416, 417). Şekil 2.15, mevcut olan net verici veya alıcı konsantrasyonlarının (katkı maddeleri) bir fonksiyonu olarak germanyumun kristalinin elektriksel iletkenliğini göstermektedir. Mükemmel derecede saf malzeme apsis boyunca sıfır noktasındadır. Pratik germanyum dedektörleri her zaman net katkı maddesi konsantrasyonunun çok küçük olduğu ve iletkenliğin de buna bağlı olarak düşük olduğu malzemeden üretilir. Bu malzeme "yüksek dirençli malzeme" olarak tanımlanır (Knoll, 2010: 417).



Şekil 2.15. Net katkı konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak germanyumdaki elektriksel iletkenliğin değişimi (Knoll, 2010: 417)

2.4.2. Elektrik alanı ve kapasitans

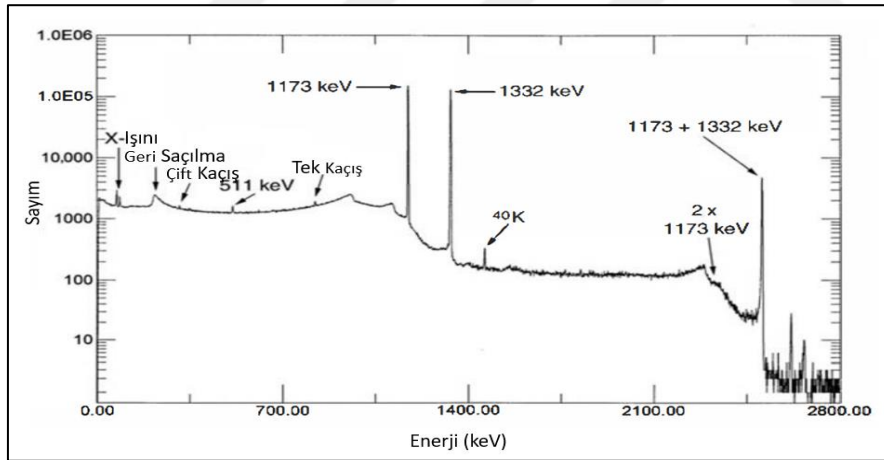
Germanyum dedektörlerindeki elektrik alan, yük taşıyıcılarının sürüklenme hızını belirler, bu nedenle konfigürasyonu, darbe şekli, zamanlama davranışı ve yük toplama işleminin eksiksizliği açısından önemlidir. Dedektör aktif hacmi boyunca alan gücünün uzamsal değişimi, düzlemsel ve koaksiyel geometride belirgin şekilde farklıdır (Şekil 2.16). Lityumla sürüklenen germanyum kristalinde, her tipteki safsızlıklar tam olarak dengelenir. Birçok yarı iletken dedektör, yük taşıyıcılar için doymuş sürüklenme hızıyla sonuçlanacak kadar yüksek elektrik alan değerleriyle çalıştırılır. Bu doymuş hızlar 10^7 cm/s mertebesinde olduğundan, 0,1 cm veya daha küçük tipik boyutların üzerindeki taşıyıcıları toplamak için gereken süre 10 ns'nin altında olacaktır. Bu nedenle yarı iletken dedektörler, en hızlı yanıt veren radyasyon dedektörü türleri arasındadır (Knoll, 2010: 420).



Şekil 2.16. Germanyum kristali (TENMAK- Gama Spektrometre Laboratuvarı)

2.4.3. Enerji çözünürlüğü

Karmaşık enerji spektrumlarını içeren germanyum dedektörleri ile hemen hemen tüm gama ışını spektroskopisi gerçekleştirilmektedir (Knoll, 2010: 426, 427). Dedektöre tek enerjili bir radyasyon demeti gönderildiğinde, radyasyonun enerji histogramında ideal olarak, keskin bir delta fonksiyonu piki görülmesi beklenir. Oysa gerçekte, dedektörde meydana gelen iyonlaşmalar ve uyarılmalardaki dalgalanmalardan dolayı, sonlu bir genişliğe sahip, gauss dağılımlı bir pik gözlenir. Bu genişlik, pikin yarı yükseklikteki tam genişliği “FWHM” olarak tanımlanır. İyi enerji çözünürlüklü dedektörlerden elde edilen gama-ışını piklerinin FWHM değerleri küçük, kötü çözünürlüklü dedektörlerin ise büyüktür. Toplam enerji pikine katkıda bulunan olayların, Compton saçılması ve ardından saçılan fotonun fotoelektrik olay gibi çoklu etkileşimlerden oluşma olasılığı çok daha yüksektir ve tek bir fotoelektrik olayda tam foton enerjisinin soğurulması nispeten nadirdir. Gama-ışını enerjilerinin en düşük enerji aralığı dışında tümünün, toplam enerji pikine katkıda bulunduğu görülebilir (Knoll, 2010: 438).



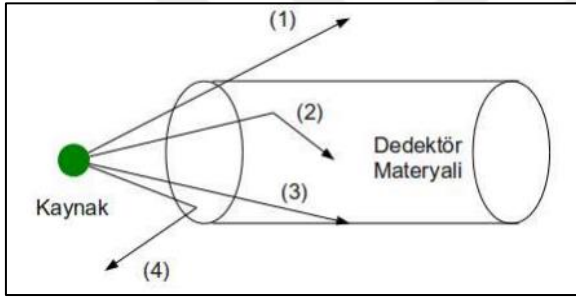
Şekil 2.17. Gama ışınları için bir germanyum dedektörü ile ölçülen darbe yüksekliği spektrumları (Knoll, 2010: 442)

Şekil 2.17’de, ^{60}Co tarafından yayılan 1173 keV ve 1332 keV gama ışınlarından elde edilen spektrum, %110 bağlı verime sahip bir p-tipi HPGe dedektörü kullanılarak ölçülmüştür. Spektrumda belirgin olan, kurşun zırhlamanın fotoelektrik soğurmasından gelen karakteristik x-ışınları, geri saçılma piki, 1332 keV’te gama ışınının (kaçış pikleri) çift oluşum etkileşimlerinden oluşan tek kaçış ve çift kaçış pikleri görülmektedir (Knoll, 2010: 442). Yok olma fotonlarından birinin veya her ikisinin orijinal gama-ışını enerjisinin bir

kısmını taşıdığı olaylara karşılık gelen spektrumda kaçış pikleri görülmektedir. Her iki yok olma fotonu da kaçarsa, toplam enerji pikinden 1,022 MeV daha düşük bir enerjide çift kaçış piki belirir.

2.4.4. Verim

Dedektöre gelen tüm parçacıkların, dedektör tarafından hepsini ölçüleceği kesin olarak söylenemez. Ölçümün gerçekleşip gerçekleşmeyeceği, dedektör tipi ve boyutuna, parçacığın tipi ve ölçülecek malzemenin enerjisine ve boyutlarına bağlıdır. Şekil 2.18’de görüldüğü gibi, parçacık, dedektör ile hiç etkileşmeden yoluna devam edebilir (1), dedektör içinde etkileşerek soğurulabilir (2), gözlenemeyecek küçüklükte sinyal üretecek kadar etkileşebilir (3) dedektörü çevreleyen koruyucu materyalden saçılarak dedektör ile etkileşemeyebilir (4).



Şekil 2.18. Dedektöre gelen parçacıkların etkileşmeler doğrultusunda izleyebilecekleri olası yollar

Yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörleri gama spektrometreleri, esas olarak yüksek çözünürlükleri ve ortamdaki radyoizotopların veya radyoaktif atık numunelerinin analizinde uygulama kolaylığı nedeniyle oldukça kullanışlıdır. Doğru sonuçlar, ancak HPGe dedektörünün verimi tam olarak biliniyorsa elde edilebilir. Verimi, istenen enerji aralığında gama-ışını kaynakları kullanılarak deneysel olarak belirlenebilir (Jevremović ve diğerleri, 2019). Gama-ışını tespiti söz konusu olduğunda, kantitatif analiz yapmak için dedektörün verimini bilmek gerekir (Yücel ve diğerleri, 2009). Üstelik bu verim hesaplamaları, belirtilen tüm koşullar sabit tutulduğunda bile her bir gama-ışını enerjisi için ayrı ayrı yapılmalıdır. Bunun tarihsel temeli, Germanyum (GeLi) dedektörleri ortaya çıktığında, herkesin bilmek istediği şey, bunların sodyum iyodür dedektörleriyle nasıl karşılaştırıldıklarıydı. Çoğu gama spektrometri laboratuvarında bulunan ve kolay elde edilebilen standart bir 3×3 NaI (Tl) dedektörü ile mevcut germanyum dedektör verimini ilişkilendirmek gerekir.

$$\text{Bağıl verim} = \frac{1332,5 \text{ keV pikinin net sayım hızı} \times 100}{^{60}\text{Co kaynağının aktivitesi (Bq)} \times 0,0012} (\%) \quad (2.23)$$

Bu oran Ge veya başka bir dedektörün aynı mesafe ve enerjide ölçülen veriminin standart NaI (Tl) dedektörün verimine göre yüzdesi olarak ifade edilir. Bağıl verim (relative efficiency), tekrarlanabilir şekilde üretilebilen 3"×3" NaI(Tl) dedektörleri için 25 cm'de ⁶⁰Co kaynağı ile herhangi bir dedektörde 1332,5 keV'taki sayım hızının Bq başına ve 0,0012 cps (saniye başına sayım) olarak bilinir (Gilmore, 2008: 236).

2.4.5. Toplam enerji pik verimi

Gama enerjisinin dedektörde tamamen soğurulmasıyla gama spektrumunda fotopik ya da toplam enerji piki adı verilen pikler oluşur. Gama spektrumunda belirli enerjilerde oluşan toplam enerji piklerinin analizinin yapılabilmesi için bu piklerin verimlerinin belirlenmesi gerekir. Gama spektrometresinde genellikle herhangi bir radyoaktif numunenin radyoaktivite miktarı hesaplanmaya çalışılır. Bu hesaplamanın en kritik değerlerinden biri deneysel verim olan toplam enerji pik verim (full energy peak efficiency- FEPE) değeridir. Deneysel FEPE değeri, Eş. 2.24 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_p(E) = \frac{\left[\frac{N_p}{t_c}\right]}{A \cdot f_\gamma(E)} \cdot D \quad (2.24)$$

Eşitlikte N_p , fotopikte ilgilenilen kısmın Compton sürekliliği çıkarılmış sayımı; t_c , sayım süresi (s); $f_\gamma(E)$, ilgilenilen enerjinin gama-ışını yayınlanma olasılığı; A , standart kaynağın aktivitesi (Bq) ve D , kaynağın özelliklerine ve ölçüm düzeneğine bağlı düzeltme faktörü katsayıdır (Azbouche ve diğerleri, 2015; Yücel ve diğerleri, 2009). HPGe dedektörlerinin verimi Monte Carlo simülasyonu kullanılarak da belirlenebilir. Bununla birlikte, simüle edilen verimin doğruluğu, dedektörün geometrik parametrelerinin bilgisine bağlıdır.

2.4.6. Gama spektrometresinde belirsizlik hesabı

Belirsizlik hesabı, fiziksel büyüklüğün ölçüm değerine ulaşılırken, büyüklüğü tanımlayan fonksiyonun sonuçlarını etkileyen olası her bir belirsizlik kaynağının ayrı ayrı tanımlanması, her bir kaynağın ölçüm belirsizliğine katkısının hesaplanması ve sonra belirsizlik

bileşenlerinin tek bir varyans değeri vermek üzere birleştirilmesi şeklinde tanımlanabilir. Belirsizlik hesabı, ilgili istatistiksel belirsizliği en aza indirmek için sayma deneylerinin tasarımında uygulanabilir (Knoll, 2010: 92). Rastgele bir süreçte radyoaktif bozunma ile yayılan radyasyonun gözlemlenmesine dayalı herhangi bir ölçüm, bir dereceye kadar istatistiksel dalgalanmaya tabidir. Bu doğal dalgalanmalar, tüm nükleer ölçümlerde kaçınılmaz bir belirsizlik kaynağını temsil eder ve çoğu zaman belirsizliğin veya hatanın baskın kaynağı olabilir. Sayma istatistikleri terimi, nükleer sayma deneylerinin sonuçlarını işlemek ve bu ölçümlerden elde edilen niceliklerin beklenen kesinliği hakkında tahminler yapmak için gereken istatistiksel analiz çerçevesini içerir (Knoll, 2010: 65). Mümkün olan en iyi tahmini Ölçüm Belirsizliğinin Değerlendirilmesi Prosedürü yapmalı ve yazılan raporun belirsizlik hakkında yanlış fikir vermemesini sağlamalıdır. Belirsizlik hesabı hakkındaki veriler genellikle aşağıdaki kaynaklardan elde edilebilir (TS 5822-1 ISO 5725-1 -Ölçme metodlarının ve sonuçlarının doğruluğu (gerçeklik ve kesinlik), JCGM 100:2008 - Ölçüm verilerinin değerlendirilmesi, ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement, EURACHEM / CITAC (2012), Quantifying uncertainty in analytical measurement, EUROLAB Technical Report No. 1/2006, Guide to the Evaluation of Measurement Uncertainty for Quantitative Test Results).

Bir ölçümün pek çok sayıda başka büyüklüklerin ölçüm sonuçlarından elde edilmiş sonuçlarının bileşik standart belirsizliği, ölçüm sonucunu etkileyen büyüklük değerlerindeki değişimlerin toplamının pozitif kareköküne eşittir. Gama spektrometresinde verimi ve aktivite hesabını etkileyen belirsizlik kaynakları;

- Enerjideki fotopik verimi,
- Gama yayınlanma olasılığı,
- Radyoaktif malzeme,
- Radyoaktif malzemenin pik alanından elde edilen birim zamandaki sayım hızı
- Numune ağırlığı ve boyutu,
- Numunenin dedektöre olan pozisyonu,
- Gama-ışını öz-soğurma düzeltme faktörü, gerçek çakışma düzeltme faktörü ve rastgele çakışma düzeltme faktörleridir.

Çalışmada ise belirsizlik hesabı şu şekilde hesaplanmıştır.

$$u(\varepsilon) = \varepsilon \sqrt{\left(\frac{u(Np)}{Np}\right)^2 + \left(\frac{u(f\gamma)}{\gamma}\right)^2 + \left(\frac{u(A)}{A}\right)^2 + \left(\frac{u(D)}{D}\right)^2 + \left(\frac{u(m)}{m}\right)^2} \quad (2.25)$$

ε , ilgilenilen enerjideki fotopik verimi; Np , fotopikin sayımı, $u(Np)$; fotopik sayımının belirsizliği; $f\gamma$, ilgilenilen enerjinin gama yayınlanma olasılığı; $u(f\gamma)$, gama-ışını yayınlanma olasılığının belirsizliği; A , standart kaynağın aktivitesi, $u(A)$, standart kaynağın aktivitesinin belirsizliği; D , düzeltme faktörlerinin bileşimi; $u(D)$ ise tüm düzeltme faktörlerini kapsayan belirsizlik; m , standardın miktarı; $u(m)$, standardın belli bir miktarındaki belirsizliğidir. Birleştirilmiş Standart Belirsizlik (Combined Standard Uncertainty) yönteminde saptanan belirsizlik kaynakları için standart belirsizlikler (u_i 'ler) hesaplandıktan sonra bunların birleştirilmesi ile Birleştirilmiş Standart Belirsizlik (u_c) elde edilir. Bütün belirsizlik bileşenlerinin birleştirilmesi, “Belirsizliklerin Yayılma Yasası’na (law of propagation of uncertainty)” göre yapılır ve standart sapmalar cinsinden belirlenen standart belirsizlik bileşenleri “kareler toplamının kare kökü (RSS)” yöntemi ile birleştirilir.

2.4.7. Düzeltme faktörleri

Düzeltilme için ölçüm sırasında sistemden kaynaklı sistematik hataların önceden belirlenmesi gerekir. Bir ölçüm sonucuna, hesaplanan sistematik hataların eklenmesi ya da çıkarılması işlemine düzeltme denir. Sistematik hata kaynaklarından gelebilecek belirsizlik faktörleri ölçüm sonucuna ait toplam belirsizlik bileşenleri içerisinde yer alır. Düzeltme faktörü (*Correction factor*), numunenin kendi içindeki soğurmayı hesaba katmak için standart verimle çarpımsal bir düzeltme faktörü olarak uygulanmaktadır. Sistematik hataların tam olarak bilinmesi mümkün olmadığından bu hatalara karşılık gelen değerlerin en doğru şekilde saptanması çok zordur. Ancak tahmin edilen sistematik hata istenilen doğruluk üzerinde ciddi bir etkilemede bulunuyorsa, bir düzeltme ya da düzeltme faktörü bu etkiyi minimum düzeye indirmek amacıyla kullanılır. Düzeltme ya da düzeltme faktörü uygulandıktan sonra sistematik etkiden kaynaklanan hatanın sıfır olduğu varsayılır.

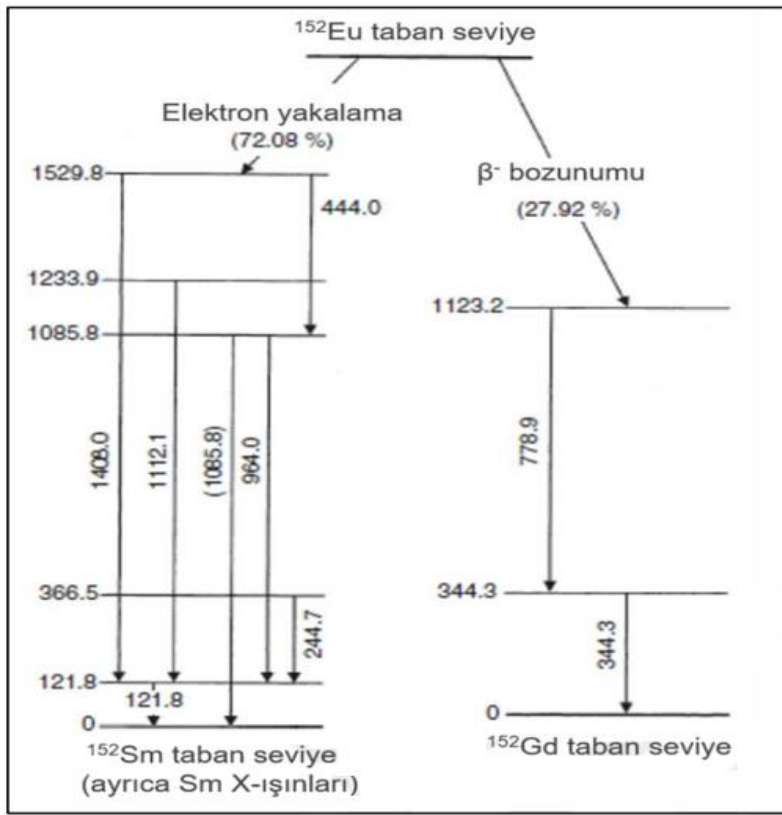
Gama spektrometrisinde radyoaktif kaynaklardan elde edilmeye çalışılan verim ve aktivite hesaplamalarında düzeltme faktörleri ölçüm değerlerini ciddi şekilde etkilemektedir. Numune içindeki katı aç ve foton öz-soğurma hesaplaması, üstesinden gelinmesi gereken özel problemler oluşturur. Katı aç hesaplamaları, radyoaktif kaynakların aktivitesinin belirlenmesinde kullanılmaktadır ve verim ölçümlerin doğruluğunu doğrudan etkilemektedir

(Zhang ve Bao, 2013). Radyoaktif kaynakların ölçümleri esnasında güvenilir ölçüm sonuçları elde etmek için düzeltme faktörlerinin hesaba katılması gerekir (Yücel ve diğerleri, 2009). Bununla birlikte hacimsel numunelerde toplam enerji pik verimini doğru bir şekilde belirlemek için düzeltme faktörleri (geometri, öz-soğurma, tesadüf-toplama vb.) dikkate alınmalıdır (Olivares ve diğerleri, 2016). Gama-ışını yayan nokta kaynaklar ve numuneler, ihmal edilebilecek kadar küçük olmadığında, öz-soğurma etkileri verimi önemli ölçüde azaltabilir. Bu yaklaşım, çok çeşitli fiziksel durumlar için yeterli temsil sağlar. Karmaşık bozunma şemasına sahip radyoaktif çekirdekler yakın mesafe geometrisiyle sayılacaksa gerçek zamanlı çakışma düzeltmesinin mutlaka dikkate alınması gerekir. Öte yandan, öz-soğurma faktörü, genellikle bilinmeyen matris bileşimine ve numune yoğunluğuna bağlıdır (Ahmed ve diğerleri, 2009). Her bir foton enerjisi ve her tür matris için öz-soğurma düzeltme faktörü MC hesaplamaları ile elde edilir (Olivares ve diğerleri, 2016). Monte Carlo tekniklerinin bu özel uygulamadaki en önemli avantajı, herhangi bir yeni geometri veya matris için yeni bir verim değerinin hızlı bir şekilde hesaplanmasını sağlamasıdır.

Gerçek zamanlı çakışma düzeltme faktörü

Gerçek zamanlı çakışma (True coincidence summing -TCS) etkisi birden fazla gama-ışını yayımlayan karmaşık bozunma şemasına sahip radyoaktif çekirdeklerde kesinlikle hesaba katılması gereken bir faktördür. Hem gerçek toplam tepe noktası hem de normal fotopikler, sayım hızıyla doğrusal olarak ilişkilidir. Birden fazla radyasyon soğurma söz konusu olduğunda, herhangi iki tek enerjinin tüm olası kombinasyonlarında tesadüfi toplam tepe noktaları potansiyel olarak meydana gelebilir. Toplam tepe noktasının altındaki sayıları artırırken fotopik alanının altında sayım kaybına yol açan bu etki geometriye dolayısıyla dedektörün gördüğü katı açığa bağlı olduğundan özellikle dedektörün direk üzerinde (uç kabı üzerinde) olan yakın sayım geometrilerinde baskındır. Bununla birlikte, normal hızlarda ve tipik dedektör katı açılarında, toplam tepe noktaları, bu tür arka planların düşük olduğu spektrumun üst enerji uç noktaları dışında, diğer enerjilerden gelen devamlılık ve arka plandaki dalgalanmalarda genellikle kaybolur. Bitişik olayları ayıran zaman aralıkları rastgele dağıldığı için bazıları dedektörün veya darbe işleme sisteminin doğal çözümleme süresinden daha az olacaktır. Bu tesadüfi çakışmalar, artan sayma hızıyla birlikte hızla artar ve gerçek tesadüflerin olmadığı durumlarda bile meydana gelir. Hem gerçek çakışma hem de tesadüfi çakışma toplamı için ikinci bir etkileşimin dedektörde tam yerine kısmi enerji soğurmasını içerdiği birçok durum olacaktır. En yaygın durum radyoaktif çekirdek

bozunurken birden fazla kademeli gama-ışını yayan bir izotop içeren uygulamalarda ortaya çıkar. Ana pik haricindeki ara pikin ömrü genellikle o kadar kısadır ki, aslında iki gama-ışını tesadüfen yayınlanır. Bu durumda, tek bir bozunumdan gelen her iki gama-ışını fotonunun, dedektörün tepki süresi veya sonraki elektronik cihazların çözüm süresi ile karşılaştırıldığında kısa bir süre içinde etkileşime girmesi ve tüm enerjilerini biriktirmesi oldukça mümkündür. Bu olaylardan yeterince meydana gelirse, spektrumda iki ayrı gama-ışını enerjisinin toplamına karşılık gelen bir darbe yüksekliğinde meydana gelen bir toplam çakışma tepe noktası gözlemlenebilir (Knoll, 2010: 335, 336, 337).



Şekil 2.19. ^{152}Eu 'nun bozunma şeması (Gilmore, 2008: 166)

Şekil 2.19'da ^{152}Eu 'nun çok geçişli bozunma şeması gösterilmektedir. Bu çekirdek bozunduğu zaman iki seçenek vardır; ya bir β parçacığı yayarak ^{152}Gd 'ye ya da daha yüksek ihtimalle (%72,08) elektron yakalamaya çalışarak ^{152}Sm 'ye dönüşebilir. Ayrıca, elektron yakalayarak her ^{152}Sm 'a bozunmasıyla Sm x-ışınları da yayımlanmaktadır. Dedektör açısından bakıldığında, kaynakta ^{152}Eu 'luk bir atomun her parçalanması, aynı anda bir dizi gama-ışını ve muhtemelen x-ışını salacaktır ve bu salınan gama ve x-ışınları birlikte dedektör tarafından algılanabilirler. Bu olasılık gerçekleşirse iki ayrı fotonun enerjilerinin

toplamını temsil eden bir darbe kaydedilir. Bu olay tesadüf eseri yayılan iki gama ışınının veya bir gama ışınıyla bir x-ışınının toplamı gerçek tesadüf toplamıdır; bazen gerçek zamanlı çakışma olarak adlandırılır (Gilmore, 2008: 166). TCS düzeltmelerini yapmaya yönelik birçok girişim, kaynağın farklı kısımlarından yayılan ve dedektörün farklı kısımlarına çarpan binlerce gama ışınının, kaynak içindeki ve dedektördeki soğurma dikkate alındığında zarar görebileceğini dikkate alan Monte Carlo hesaplama yöntemlerini kullanır. Program etkili bir verim eğrisi oluşturabilir veya gama ışınlarından elde edilen sonuçlara uygulanacak düzeltme faktörlerini basit bir şekilde hesaplayabilir (Gilmore, 2008: 178).

Gama ışını öz soğurma faktörü

Gama-ışını emisyonu ile dedektör kristali arasında meydana gelen herhangi bir soğurma, verimi doğrudan etkilemektedir. Numunenin içinden geçen γ -ışınlarının numune matrisi ve yoğunluğu nedeniyle, fotopik sayımında oluşan kayıpları düzeltmek adına gama-ışını öz-soğurma (self absorption) düzeltilmesi yapılmak zorundadır. Özellikle belli bir hacim ve kütleye sahip olan radyoaktif kaynaklarda dedektöre ulaşamayan fotonlar öz-soğurma ile soğurulur ve verimi önemli ölçüde etkilemektedir. Verim hesabını yakından ilgilendiren foton sayımlarındaki en ufak bir eksiklik özellikle düşük enerji bölgesinde daha dikkat çekici hale gelmektedir. Yayınlanan veriler normalde kaynak ile dedektör etkilerini ihmal eder, ancak büyük hacimli gama-ışını kaynaklarında olası fotopik sayım kayıplarını telafi etmek için düzeltme faktörüne ihtiyaç vardır. Genel prosedür, numunenin kendi içindeki soğurmayı hesaba katmak için standart verime çarpımsal bir düzeltme faktörü uygulamaktır (Knoll 352: 454). Eşitlikte verilen x , numune kalınlığı; $\mu(\text{cm}^{-1})$, lineer azalma katsayısıdır). MC yöntemleri kullanılacak ise dedektör geometrisi ve yapısı hakkında ayrıntılı bilgi gerekir. Üreticiden gelen nominal veya tahmini bir değer olan bu bilgi her zaman mevcut değildir. Bu nedenle, Monte Carlo yöntemlerinin, modeli deneysel olarak belirlenmiş verilere uydurması büyük boyutlu hacim numunesi ve içindeki malzemenin yoğunluğu, gama ışınlarının öz-soğurma için düzeltmenin de gerekli olduğu unutulmamalıdır (Knoll, 2010: 335-352).

$$K_s = \frac{\mu x}{1 - \exp(-\mu x)} \quad (2.26)$$

2.4.8. Dedektör karakterizasyonu

Birçok araştırma çalışması, deneysel ve simüle edilmiş verim arasındaki tutarsızlığın, kristal boyutları, ölü tabaka kalınlığı, kristal pencere mesafesi ile kalınlığı, yuvarlak ön kenarlar ve Marinelli kaynak gibi geometrik parametreler için üretici tarafından sağlanan değerlerin kullanılmasından kaynaklandığını göstermiştir (Boson ve diğerleri, 2008; Boson ve diğerleri, 2008; Gasparro ve diğerleri, 2008; Hurtado ve diğerleri, 2004; Huy, Binh ve An, 2007; Peyres ve García, 2007; Ródenas ve diğerleri, 2001; Tzika ve diğerleri, 2010). Kullanılan dedektörün karakterizasyonu için yukarıda sayılan tüm parametreler verim kalibrasyonunda önemlidir ve karakterize edilmelidir (Chham ve diğerleri, 2015). Huy ve diğerleri (2007), uzun bir çalışma süresinden sonra HPGe dedektörünün ölü tabaka kalınlığındaki artışı incelemişler ve doğru simüle edilmiş verim elde etmek için ölü tabaka kalınlığının iyi belirlenmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Karakterizasyon prosedürü ile belirlenen bir dedektörün verim değeri ve MC simülasyon hesaplamaları arasındaki verimin değerlendirilmesine dayanmaktadır. Dedektörün tüm parametrelerine sıkı sıkıya bağlı olarak değişen FEPE deneysel ve simülasyon programları ile belirlenerek dedektör karakterizasyonu tamamlanmaktadır. Bu prosedür ilk önce üretici firma tarafından verilen değerler kullanılarak uygulanır. Elde edilen simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılır. Ölü tabaka kalınlığı hariç diğer tüm parametreler zamandan bağımsız olarak sabit olduğu bilindiği için deneysel verime en yakın simülasyon değerini veren ölü tabaka kalınlığı belli bir aralıkta taranarak tespit edilir. Bu tez çalışmasında verimi etkileyen ve karakterizasyonda önemli olan ölü tabaka kalınlığı, alüminyum tutucu kalınlığı ve Marinelli geometrisi gibi parametreler incelenmiştir.

2.4.9. Ölü tabaka

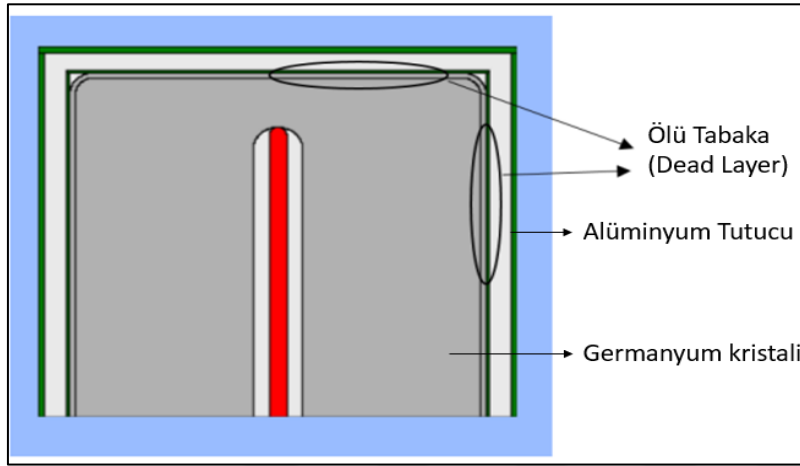
Genel olarak, ölü tabaka kalınlığı, ilk olarak üreticinin verilerinin çok doğru olmaması ve ikinci olarak, dedektör ömrü boyunca germanyum kristalindeki lityum atomlarının oda sıcaklığında bile kristale difüzyonu ve rastgele büyümesi nedeniyle iyi bilinen bir parametre değildir (Huy ve diğerleri, 2007; Pullia ve diğerleri, 2010). Ölü tabaka kalınlığının dedektör verimi üzerindeki etkisine ilişkin çalışmalar (Huy, 2010; 2011; Huy ve diğerleri, 2007; Rodenas ve diğerleri, 2003) ölü tabaka kalınlığındaki bir artışın, sadece ölü tabakadaki gama ışınlarının zayıflamasından dolayı değil, aynı zamanda dedektörün aktif hacminin azalmasından dolayı dedektörün veriminde bir azalmaya yol açtığını göstermiştir. DL

kullanım ve soğutma koşullarına bağlı olarak zamanla büyüyeceği için özellikle üretici firma tarafından verilen DL değeri ile yapılan simülasyonlarda deney ile tutarsızlıklar literatürde sıkça görülmektedir (Berndt ve Mortreau, 2012; Boson ve diğerleri, 2008; Dryak ve Kovar, 2006; Hernández ve El-Daoushy, 2003; Huy, 2010; Huy, 2011; Marzocchi ve diğerleri, 2010; Rodenas ve diğerleri, 2003) ve bu durumun sebebi aşağıdakilere atfedilir:

- Üretici tarafından sağlanan bilgi değerlerinde eksiklik,
- Kristalde eksik yük toplanması
- p+ temasının neden olduğu ölü tabakanın kalınlığında ve sıklıkla eksik tahmin.
- Dedektörün zamanla bozulması
- Ölü tabaka kalınlığının ön ve yan yüzeyde farklı boyutlarda rastgele kalınlaşması (Aksoy ve diğerleri 2023; Bölükdemir ve diğerleri, 2021)
- Ölü tabaka kalınlaşması ile Germanyum kristalindeki aktif hacmin azalması (Aksoy ve diğerleri 2023; Bölükdemir ve diğerleri, 2021).

Yukarıda belirtilen bu aksiliğe neden olacak durumlar araştırılmış ve çözüm bulunmaya çalışılmıştır. Mevcut çalışmada, zamanla dedektör verimin azalmasına katkıda bulunan bu olgu en çok benimsenen yaklaşım olmuştur. Ölü tabaka ayarındaki en zoru, ilgili alanın sayım verimin herhangi bir ölü tabaka kalınlığı değişimine karşı çok hassas olduğudur. Kristalin etrafını saran bu yüzeyin ön ve yan kısımda yer aldığını belirtmek önemlidir. Bir germanyum dedektörünün aktif hacmi basitçe ters yönlü diyot olan 'n' ve 'p' kontakları arasındaki bölgedir. Bununla birlikte, bu temas noktaları kayda değer bir kalınlığa sahip olabilir ve gelen radyasyonun içinden geçmesi gereken kristal yüzeyinde bir ölü tabakayı temsil eder. Bu işlem kristalin yüzeyine iyon implante edilmesi tekniğine dayanır. Bu da elektrik kontakları aracılığı ile temas sağlanır ve anlamlı sinyaller alınır. Bu kristalin elektrik kontaklarını alma yüzeyine bağlı olarak p-tipi ya da n-tipi şeklinde olur. Kristal üzerindeki bu elektrik kontaklara, n+ kontağı (700-900 μm) lityum diffüzyonlu, p+ kontağı ise (0,3 μm) Bor iyonlarının implante edilmesiyle üretilir. İşlem tam tersine çevrildiğinde dış yüzeyinde lityum (p-tipi), iç yüzeyinde de Bor (n-tipi) implante edilecek şekilde p-tipi dedektörler üretilebilir. İnce bir elektrik kontağı ile imal edildiğinde düşük enerjili fotonlar için bir giriş penceresi olarak hizmet edebilen düzlemsel bir ön yüzey sağlanmış olur (Knoll, 2010: 419). Bu üretim teknikleri ile ince pencereye sahip olabilen n-tipi dedektörlerde yaklaşık 200 keV ve daha altındaki fotonların sayımı daha belirgin şekilde tespit edilebilir.

Dış yüzeylerine lityum atomlarının diffüze ettirilmesiyle p tipi ölü tabaka kalınlığı oluşturulur (Şekil 2.20). Ge kristalinin etrafını saran bu ölü tabaka sayıma katkı vermemektedir. Aktif germanyum kristali tarafından sınırlanan bu geçiş tabakasının ve tamamen ölü tabakanın yanı sıra elektrik alan etkisi, ters öngerilim, kaçak akımlar ve yük toplama problemi gibi, simülasyon kodu tarafından dikkate alınmayan çeşitli fenomenlerin katkısını hesaba katmak zorunlu hale gelmiştir.

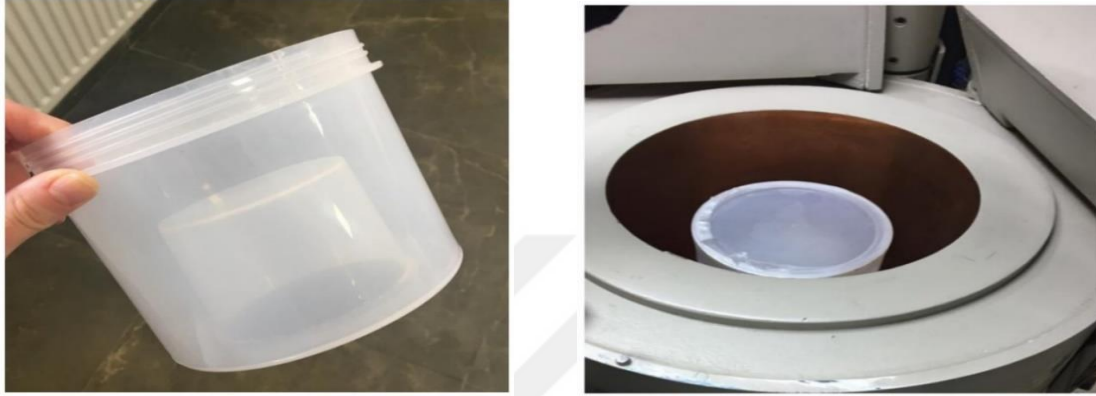


Şekil 2.20. PHITS MC ile modellenen p-tipi dedektörün ölü tabaka gösterimi

2.4.10. Marinelli radyoaktif kaynak kullanımı

HPGe dedektörlerinin kullanıldığı gama spektrometresi, çevresel numunelerdeki düşük radyoaktivitenin saptanması için çokça başvurulmuş bir tekniktir. Bu tür ölçümler diskler, silindirik kaplar veya Marinelli kapları gibi hacimsel kaynaklarla yakın sayım geometrisinde kurulan ölçüm düzeneği ile alınır (Ababneh ve Eyadeh, 2015; Altavilla ve diğerleri, 2013; Azbouche ve diğerleri, 2015; Arnedo ve diğerleri, 2017; Guerra ve diğerleri, 2017; Jäderström ve diğerleri, 2015; Nikolic ve diğerleri, 2015; Semkow ve diğerleri, 2015; Shizuma ve diğerleri, 2016). Numunedeki gama-ışını yayan radyoaktif çekirdeklerin tayini, etrafı kurşunla zırhlanmış germanyum dedektörü ile buna bağlı çok kanallı analizör ve ilgili elektronik birimlerden oluşmuş bir gama ölçüm sisteminde yapılır. Toplanan spektral bilgilerin değerlendirilmesi elle yapılabildiği gibi, Genie ve Gamma Vision gibi uygun yazılım programları ile de yapılır. Numuneler, mutlak verimin belirlenmesinde kullanılan standartların yoğunluğunda, ölçüm kabını homojen dolduracak şekilde hazırlanır. Bunun için numuneler yeterli tanecik büyüklüğüne getirilir (Guerra ve diğerleri, 2017; Yücel ve diğerleri 2019; TENMAK, 2006: 40). Kalibrasyon için kullanılacak standartların, gerçek

numuneyle aynı biçim ve sayım geometrisini sağlaması gereklidir. Ayrıca standardın ölçülecek radyoaktif çekirdeklerle benzer kimyasal bileşim ve yaklaşık aynı derişimde olması tercih edilir. Belli hacme ve yoğunluğa sahip marinelli kap geometrileri, geniş enerji aralığına sahip radyoaktif çekirdekleri içeren uluslararası akredite laboratuvarlardan temin edilen referans kaynaklar tercih edilir (Modarresi ve diğerleri, 2017; TENMAK, 2006: 25).



Şekil 2.21. Marinelli kabı ve dedektörde sayım esnasındaki konumu

Örnekler, kurşun zırh ile çevrili odacıkta, belirli bir sayım geometrisinde, sayım verimini arttırmak amacıyla dedektöre olabildiğince yakın konumda sayılır (Şekil 2.21). Ayrıca standardın ölçülecek radyoaktif çekirdeklerle benzer kimyasal bileşim ve yaklaşık aynı derişimde olması tercih edilir. Marinelli kap sayımında dikkat edilmesi gereken hususlar şöyle sıralanabilir (Debertin, 1998: 541-549):

- Numune hacmi bir ölçümden diğerine değişir,
- Kap içindeki numune yüksekliği bir ölçümden diğerine değişir,
- Radyoaktivite tüm numune hacmine homojen dağıtılmalı,
- Yoğunluk homojen olarak dağıtılmalı,
- Numune yoğunluklarındaki farklılıklar önemli öz-soğurma hatalarına neden olabilir.

Sayım süresi, ölçüm sisteminde doğal fon sayımına, örneğin aktivitesine, ilgilenilen radyoaktif çekirdeğe ve istenen tayin duyarlılığına bağlıdır. Gama enerjisi ile sayım veriminin değişimine ilişkin bilgiler ve doğal düzey spektrumlarının da hazır olması gereklidir. Cs-137 ve Co-60 gibi radyoaktif standartlar kullanılarak gama spektrometresinin kalibrasyonunun kontrolü amacıyla mümkünse belirli aralıklarda sayımları yapılmalıdır. Standardın, gerçek örneklerle aynı biçim ve sayım geometrisini sağlaması gereklidir. National Bureau of Standards

(NBS) veya mümkünse bir başka güvenilir uluslararası kuruluştan sağlanan standartların Ba-133, Cs-134, Cs-137, Co-60, Am-241, Cd-109 vb. Gibi radyoaktif çekirdekleri içermesi önerilir. Uygun standart bulunamadığı durumlarda kalibrasyon eğrileri; radyoaktivitesi tayin edilecek örneğin yoğunluğuna eşdeğer maddelere bilinen miktarlarda radyoizotop eklenmesiyle hazırlanır. Bunun da mümkün olmadığı durumlarda, mantıklı bir yaklaşımla sayım verimi belirlenebilir. Bunun için ilgilenilen enerjiden daha yüksek ve daha düşük gama enerjilerinde dedektör verimi tayin edilir ve istenilen enerjiye interpolasyon yapılır.

Çevresel numuneler genellikle daha yüksek sayma verimine sahip olması için Marinelli kaplarda analiz edildiğinden, çevre laboratuvarları bu geometrilerdeki sayımın simülasyonu ile daha fazla ilgilenmektedir. Genel olarak, Marinelli kapları dedektörün verimini artırmak için maksimum numune hacmi, dedektör tarafından öz-soğurma ile kaybolmadan veya algılama aralığının dışına dağılmadan önce algılanacak maksimum foton sayısını verecek şekilde dedektör yüzeyine en yakın konuma 4π katı açıyla yerleştirilir (Ahmed ve diğerleri, 2009; Ababneh ve diğerleri, 2015). Bu yöntemde, 40 -2000 keV enerji aralığında gama-ışını yayınlayan radyoaktif çekirdekler herhangi bir ön işlem uygulanmaksızın, genellikle örnek matrisinden (hava, su, toprak, sediment, bitki, bitkisel ve hayvansal gıdalar vb. gibi birçok çevre ve biyolojik örnek) ayrılmasına gerek kalmaksızın doğrudan gama spektrometresi ile tayin edilir.

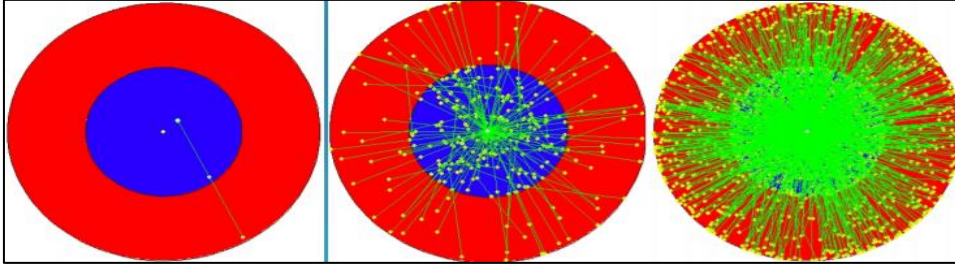
2.5. Monte Carlo Simülasyon Yöntemi

Monte Carlo analitik çözümü mümkün ya da pratik olmayan fiziksel veya matematiksel problemlere tekrarlanan rastgele örneklemeler yardımıyla sayısal çözümler oluşturan bir hesaplama tekniğidir. 1940'da LALN'de (Los Alamos National Laboratory Nuclear Facilities) nükleer silahlar üzerine çalışırken Stanislaw ULAM tarafından geliştirilmiştir. İsmi Monte Carlo şehrindeki kumarhanelerden alır (Nicholas METROPOLİS).

Temelde fiziksel bir süreci doğrudan simüle etmeye yarayan istatistiksel bir tekniktir. Sürecin davranışını tahmin edebilmek için süreci temsil eden analitik denklemlerin bilinmesi gerekmez. Yöntemi uygulamak için incelenen sürecin bir olasılık dağılım fonksiyonu ile temsil edilebilmesi yeterlidir. Monte Carlo simülasyonu bu olasılık dağılım fonksiyonundan rastgele örneklemeler yaparak çalışır. Sonuçta bir sürü simülasyon yapılır ve tüm gözlemlerin ortalaması aranan sonuç olarak alınır. Radyasyonun maddesel ortamlarda

taşınması gibi karmaşık problemleri çözmede oldukça yararlıdır. Radyasyon etkileşimleri istatistiksel bir doğaya sahip ve rastgele özelliktedirler. Örneğin bir radyasyon kaynağının birçok özelliği belli ölçülerde olasılık içeren nicelikler olarak varsayılabilir. Etkileşimlerde yayımlanacak parçacıkların türü, parçacık enerjisinin spektrumun neresinden seçileceği, parçacığın kaynak hacminin neresinden yayımlanacağı, parçacığın hangi doğrultuda uçuşa başlayacağı gibi. Ayrıca maddesel ortama giren her bir parçacığın ilk etkileşimini hacmin hangi noktasında gerçekleştireceği, her bir etkileşimde ne kadar enerji kaybedeceği, etkileşim sonrasında hangi doğrultuda saçılacağı, etkileşim sırasında yaratılacak yeni parçacıklar gibi özellikler de rastgele niteliklere sahiptir. Bu sebeple Monte Carlo tekniği radyasyon taşıma problemlerine başarılı şekilde uygulanabilmektedir. Bir kaynaktan yayımlanan her bir parçacığın özelliklerinin ve geçireceği etkileşimlerin belli olasılık dağılımlarına sahip olduğu varsayımından hareketle maddesel ortamda ilerleyen her bir parçacığın izlerini (yolları) birer birer takip eder. İzlenen her bir parçacık için (tüm hikayeler için) akı, enerji kaybı, soğurulan doz gibi nicelikler kaydedilir. Sonuçta bir ortalama değer (ve istatistik hatayı) hesaplar.

Wainio ve Knoll (1966) öncülüğünde Ge tabanlı gama spektrometri cihazlarının simülasyonunda da basit ve çok kullanışlı olarak uygulanmıştır. Geant, MCNP, EGS, PENELOPE, GESPECOR, PHITS gibi Monte Carlo yöntemleri günümüzde gama spektrometrisine dayanan her türlü uygulamanın simülasyonu için uygulanmaktadır, ancak özellikle düşük enerji seviyeli radyoaktivite ölçümlerinde kullanılan spektrometrelerin kalibrasyonu için faydalıdır. Bu nedenle, düşük enerjiye sahip numuneler büyük hacimli geometrilerde ölçülür. Büyük hacimli numunedeki fotonların öz-soğurması, numune yoğunluğuna ve bileşimine bağlıdır. Ayrıca, dedektör kullanımında yüksek verimli ölçüm koşulları elde edebilmek için dedektör-kaynak mesafesinin yakınlığı tercih edilir. Bu koşullar altında, çoğu radyoaktif tesadüf toplama etkileri ile önemli ölçüde bozulan ve verimi radyoaktif çekirdeğe bağımlı hale getiren spektrumlar üretir. Kapsamlı bir deneysel kalibrasyon eğrisi elde etmek için her bir numunenin geometrisine ve matrisine tam olarak uyan ve ilgili tüm radyoaktifleri içeren standart numunelerin kullanılması gerekecektir. Çoğu durumda, bu görev zor ve pahalıdır ve bazı durumlarda imkansızdır (Rodenas ve diğerleri, 2003).



Şekil 2.22. MC simülasyonunda (a) 1, (b) 1000, (c) 10000000, hikaye sayısı için foton dağılımı

Şekil 2.22’de farklı sayıda hikayeler için bir su küresinin merkezinden yayımlanan fotonların izleri verilmiştir. Görüldüğü gibi hikaye sayısı arttıkça kaynağın izotropik olma özelliği ve fotonların etkileşmelerindeki rastgele dağılım daha belirgin hale gelmektedir. Kaynaktan çıkan ışın, içinden geçtiği ortamla etkileştiğinde enerji ve doğrultusunda değişimler meydana gelir. Bu etkileşimler, radyasyon fiziği açısından iyi anlaşılmıştır; ancak herhangi bir ortamdaki parçacık taşınımını doğru şekilde tanımlayacak analitik bir bağıntı geliştirmek zordur. Radyasyon taşınımının MC benzetimi için kaynak, ışının yolu boyunca karşılaştığı tüm materyaller ve uygun nicelikleri (yoğunluk, atomik içerik, geometri vb.), hesaplamada kullanılacak dedektörün bilgisayar ortamında doğru ve gerçeğe mümkün olduğunca yakın bir şekilde tanımlanması gerekir. Simülasyonda taşınacak parçacıkları üretecek kaynağın geometrik ve radyolojik özelliklerinin doğru modellenmesi önemlidir. Kaynağın enerjisi ve ürettiği fotonların hangi doğrultularda hareket edecekleri önemli input parametrelerindendir. Örneğin hedef hacminde biriken radyoaktif çekirdekler her yöne eşit olasılıklarla (izotropik) foton yayarlar, x-ışını genellikle konik dağılıma sahip bir demet üretir.

2.5.1. Geometrik modelleme

Radyasyon kaynağın yanı sıra radyasyon demetinin içinden geçeceği tüm hedef hacimlerin (dedektör, kristal, tutucular (Al gibi), ölü tabaka, numune, radyoaktif kaynak, hava, vs.) Monte Carlo sistemine geometrik, fiziksel ve kimyasal olarak doğru tanımlanması gerekir. Modelleme esnasında göz ardı edilebilecek ya da yanlış tanımlanacak boyut/ geometri/ bileşim bilgileri Monte Carlo simülasyon sonucuna sistematik bir hata üretecek, bu durumda sonuçlar yanlış hesaplanmış olacaktır. Bazı durumlarda sistemin ayrıntılı tanımı, hesaplama zamanı açısından maliyetli olacağından geometrik yaklaşımlar yapmak daha pratik olabilir; sonuç daha kısa zamanda uygun istatistik hata ile elde edilir. Parçacık etkileşimlerini modellemede kullanılacak soğurma/ saçılma/ reaksiyon tesir kesitlerinin hangi veri

tabanlarından alınacağını Monte Carlo programlarına tanımlanması gerekir. Tesir kesitleri, kaynaktan yayımlanan fotonların geçirecekleri etkileşimlerin tür, olasılık, saçılma açısı gibi özelliklerini belirleyen niceliklerdir.

2.5.2. Dedektör tanımı

Monte Carlo yöntemi ile herhangi bir nokta, yüzey ya da hacim için akım, akı, enerji ya da doz hesabı yapılabilir. Dolayısıyla uygun dedektör seçimi, simülasyondan beklenen niceliğin türüne göre yapılmalıdır. Bazı Monte Carlo programları, dedektörlerin hesaplayacağı değerleri belli çarpanlarla başka birimlere dönüştürebilir. Dedektör sonuçları genellikle parçacık başına olacak şekilde hesaplanır ve kullanıcı tarafından probleme özgü foton şiddeti, verim ya da aktivite gibi parametreler kullanılır.

2.5.3. Output aşaması

Kaynaktan yayımlanan her fotonun, ilgilenilen bölgedeki istenen niceliğe katkısı her hikaye için ayrı ayrı belirlenir. Program, istenen niceliğin ortalama değeri ile birlikte bağlı hatasını da sonuç kısmında rapor eder. Tolere edilebilecek hata miktarı ile çalıştırılacak hikaye sayısı arasında güçlü bir korelasyon vardır. Düşük bir hata ile sonuç elde etmek istendiğinde, genellikle hikaye sayısının artırılması tercih edilir. Yanlış modellenmiş ama hassas (düşük hata payı içerecek) şekilde elde edilmiş bir sonucun pratik bir anlamı olmayacağı gibi, doğru modellenmiş ama yüksek hata içeren bir sonuç da kullanılamaz.

2.5.4. Modelleme ve simülasyon süreci

Monte Carlo, analitik çözümü mümkün ya da pratik olmayan fiziksel veya matematiksel problemleri, tekrarlanan ve rastgele örneklemeler yardımıyla numerik olarak çözebilen bir hesaplama tekniğidir. Monte Carlo simülasyonu, hem genel kullanım için geliştirilmiş kodlarla hem de özel olarak uyarlanmış kodlarla gama spektrometrisindeki problemleri çözmek için uygulanmaktadır (Vidmar, 2005). Monte Carlo yöntemleri, yüksek saflıkta germanyum (HPGe) gama spektrometrelerinin kalibrasyonu için etkili bir araç olduğundan giderek daha fazla kullanılmaktadır. Monte Carlo yöntemlerini kullanan güvenilir sonuçlar ancak, simülasyonları çalıştırmak için girdi olarak dedektörün doğru modelleri, sayım geometrileri ve ekranlama mevcutsa elde edilebilir. Belirli dedektör modelleri için nominal

temel parametreler üreticiden elde edilebilmesine rağmen, bireysel dedektörlerin aktif hacmi, kristalin uç kapak giriş penceresine göre konumu ve dedektörün duysarsız bölgelerinin kalınlıkları özellikle de dedektörün yaşı ve geçmişine göre değişebilen kontaklardaki ölü tabakalar ile ilgili olarak önemli belirsizlikler kalır (Helmer ve diğerleri, 2003; Pullia ve diğerleri, 2010). Germanyum kristallerindeki ölü tabaka kalınlığı verim için yararlı olmadığından ve fotonları güçlü bir şekilde zayıflatığından, verimde düşüşe neden olur. Geçiş bölgesinde soğurulan fotonlar, toplam enerji pik sayım oranına katkıda bulunmazlar. Bu, kristaldeki aktif olmayan tabaka ile aktif germanyum arasında bir geçiş bölgesinin varlığına atfedilebilir (Wójcik-Gargula ve diğerleri, 2019). Bunların yanı sıra dedektörün arka tarafından gelen fotonlar ve büyük miktardan dolayı öz-soğurma etkisi, simülasyonun doğruluğunu etkiler (Zare ve diğerleri, 2016).

Bu dedektör parametrelerinin bazılarının tam olarak bilinmemesi, Monte Carlo ile hesaplanmış verim değerlerinin deneysel olarak belirlenenlerden önemli ölçüde farklı olmasına neden olabilir ve bu durumda deneysel verim ile uyumlu hesaplanmış verimin simülasyon tarafından doğru bir şekilde yeniden üretilmesi için optimizasyon gereklidir (Guerra ve diğerleri, 2015; Lépy ve diğerleri, 2019). Optimizasyon işleminde, dedektörün tüm parametreleri için simülasyonu yapıldıktan sonra olası değişken parametre için yinelenen hesaplamalar yürütülür. Hesaplanan ve deneysel verim arasındaki uyumluluk kabul edilebilir olana kadar yineleme devam eder. Dedektör parametrelerindeki belirsizlikler nedeniyle, verim hesaplamaları genellikle deneysel verilerle uyuşmaz (Berndt ve Mortreau, 2012; Boson ve diğerleri, 2008; Dryak ve Kovar, 2006; Hernández ve El-Daoushy, 2003; Huy, 2010; Huy, 2011; Marzocchi ve diğerleri, 2010; Rodenas ve diğerleri, 2003;). Simülasyonlarda dedektör parametrelerinin optimizasyonu, hesaplanan ve ölçülen verim arasındaki boşluğu kapatmak için kullanılır (Azli ve diğerleri, 2015). Birçok çalışmada simüle edilmiş ve deneysel yanıtlar arasında önemli bir farklar görülür (Azli ve Chaoui, 2015; Chamm ve diğerleri, 2015; Khan ve diğerleri, 2018). Bu tutarsızlık, üretici tarafından sağlanan dedektör yapısı hakkında doğru verilerin olmamasından kaynaklanır. Bu sorunun üstesinden gelmek için dahili dedektör yapısı özelliklerini ölçmek için bir x-ışını radyografisi kullanılabilir (Elanique ve diğerleri, 2012). Ancak bu teknik dedektörün ilk kurulumundan önce uygulanmadı ise sökölmesini, dedektörün bir süre işlem dışı kalmasını gerektirir, ayrıca yüksek maliyetlidir ve çok uzun işlem süresi gerektirebilir. Gerçeği simüle etmek, deneyi mümkün olmayan ya da maliyetli durumlardan kaçınma halinde elverişli bir uygulamadır. Simülasyon programları aracılığı ile HPGe dedektörler gerçeğe yakın olacak

şekilde kurgulanabilirler. Pahalı ve zorlu işlemler yerine Monte Carlo simülasyonlarını kullanmak oldukça avantajlıdır. Monte Carlo kodu, büyük hacimli standart kaynakların yapım sürecinde hem kalibrasyon prosedürlerini optimize etmek hem de üretilen radyoaktif atık miktarını azaltmak için önemli bir yardımcı araçtır (Zare ve diğerleri, 2016). Her çalıştırmada dikkate alınan toplam hikaye sayısı, hesaplanan verimle ilişkili minimum belirsizlikle çetele sonuçları elde etmek için yeterince büyük olmalıdır (Chham ve diğerleri, 2015).

Farklı geometri ve kompozisyon örnekleri için gerçek çakışma ve tesadüf toplamı düzeltmelerinin yardımıyla verim eğrileri doğrudan güvenilir değerleri ile hesaplanır (Sima ve Arnold, 2009; Sima ve diğerleri, 2001; Sima ve Dovlete, 1997). Ancak bilgisayar teknolojisindeki son gelişmelere rağmen, hesaplama süresi, Monte Carlo simülasyonunun kapsamlı uygulamaları için hala bir dezavantajdır. Bu açıdan gama spektrometrisi için özel olarak geliştirilen kodlar (Sima ve diğerleri, 2001) daha iyi performans gösterir, çünkü hesaplama hızını artıran çeşitli verim azaltma tekniklerini karmaşık bozunma şemaları veya çeşitli bileşimlerin hacim kaynakları ile geniş bir ölçüm geometrileri kümesi için birleştirebilirler.

2.5.5. PHITS

Parçacık taşınımı ile ilgili bir başka Monte Carlo kodu da Japonya ve Avrupa'daki birçok kurum tarafından 2011 yılında geliştirilmeye başlanan çok amaçlı simülasyon yazılımı olan PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) isimli programdır (Sato ve diğerleri, 2018). Bu program, nötron kaynağı tasarımı, düşük enerjili nötron kaynaklı reaksiyonlar, ağır iyon taşınması, soğurulan doz, galaktik kozmik radyasyonlar ve diğerleri için yoğun bir şekilde kullanılmış ve onaylanmıştır (Peryoga ve diğerleri, 2017). 1 keV ile 1 TeV enerji aralığındaki elektronların ve fotonların atomik (hedef malzemelerin atom numaralarını hesaba katarak) etkileşimleri istenilen geometride PHITS MC programında EGS5 (Electron Gamma Shower) kütüphanesi ile simüle edilmektedir (Şekil 2.23).

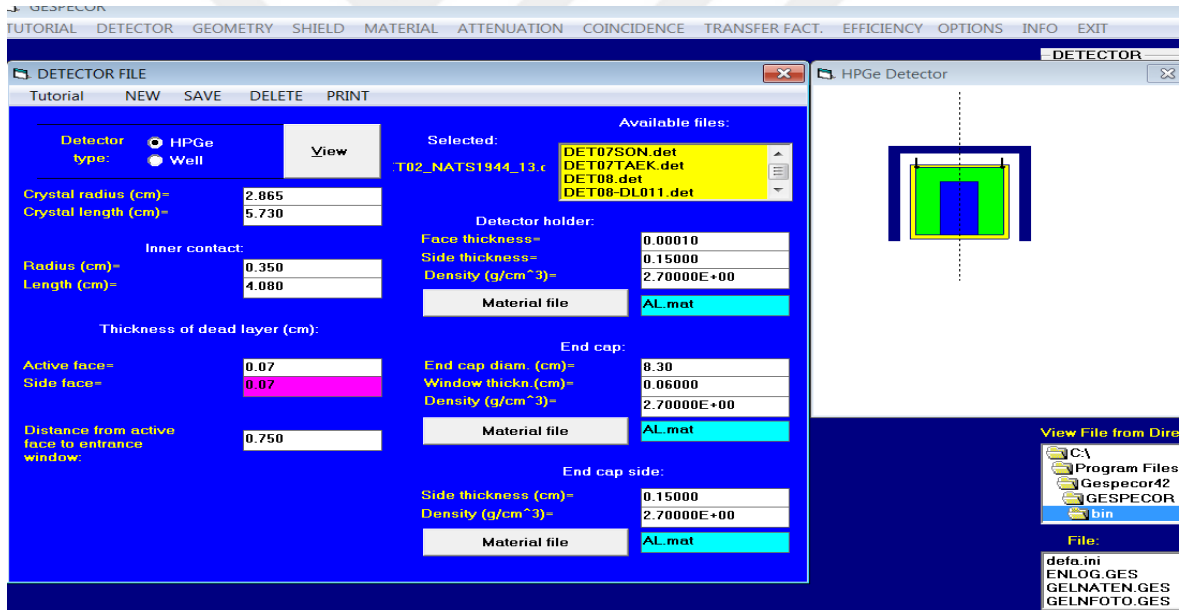
	Nötron	Proton, Pion (diğer hadronlar)	Çekirdek	Müon	e^- / e^+	Foton
	1 TeV	1 TeV/u				1 TeV
Yüksek ↑ Enerji	Intra-nuclear cascade (JAM) + Evaporation (GEM) 3.0 GeV	JAMQMD + GEM		Virtual Photo- Nuclear JAM/ JQMD + GEM 200 MeV	EGS5	Photo- Nuclear JAM/ JQMD + GEM + JENDL + NRF
	Intra-nuclear cascade (INCL4.6) + Evaporation (GEM) 20 MeV	d t ³ He α	Quantum Molecular Dynamics (JQMD) + GEM 10 MeV/u			
	Nuclear Data Library (JENDL-4.0) + EGM 0.01 meV	Stopping power (ATIMA) 1 keV or track structure (KURBUC)		ATIMA + Original		
Düşük ↓				Muonic atom + Capture	**Track structure 1 meV	*Sadece suda

Şekil 2.23. PHITS' te nükleer ve atomik çarpışmaları simüle etmek için kullanılması önerilen fizik modelleri (Iwamoto, 2018)

EGS kod sistemi, FORTRAN-IV programlama dilinde yazılmıştır. EGS1'den başlayarak, EGS2, EGS3, EGS4 olarak geliştirilmiş ve EGS5 olan son versiyonuna ulaştırılmıştır. EGS5 PHOTX (Photon Interaction Cross Section Library) kütüphanesini kullanmaktadır. Bu EGS5, geliştiricinin önerdiği gibi foton ve elektron taşınması için sağlam bir algoritma olduğu için mevcut hesaplamalar için seçilmiştir. 1'den 100'e kadar olan atom numaraları, elementler ve 1 keV -100 MeV aralığında olan foton enerjileri için PHOTX veri kütüphanesi kullanılmaktadır. Fotoelektrik soğurma, çift oluşumu, koherent ve koherent olmayan saçılma için tesir kesitleri sağlamaktadır (Hirayama ve diğerleri, 2005:17). MC simülasyon programları hem deneysel hem de teorik yaklaşımlar için hesaplanan tesir kesitleri ve olası etkileşimleri modellemek için kendi veri tabanından aldığı bilgilerle istatistiksel analizlerini gerçekleştirmektedir. PHITS'te "T-deposit tally" adı verilen çetele kısmından toplam enerji pik verim değerlerine ulaşılır. Bu çetele, dedektörde biriken enerji dağılımını puls yükseklik modundan elde eder.

2.5.6. GESPECOR

Gespecor (GERmanyum SPEctra CORrection), düzeltici faktörlerin (verim aktarımı, öz-soğurma ve tesadüf toplama düzeltmeleri) hesaplamasını gerçekleştirmek için pratik araçlar sağlayan Sima ve arkadaşları (2001) tarafından geliştirilmiştir. Hesaplama rutinleri, çok çeşitli ölçüm konfigürasyonlarında, gerçekçi boyutlara sahip koaksiyel, düzlemsel veya kuyu tipi HPGe dedektörlerine doğrudan uygulanabilen kullanıcı dostu arayüzlü bir programdır (Şekil 2.24). Başlangıçta gama spektrometrisinde doğru niceliksel sonuçlar sağlamak için gerekli olan öz-soğurma düzeltmelerinin ve çakışma toplamı düzeltmelerinin hesaplanması için geliştirilen bir programdır. Daha sonraları ise toplam enerji pik verimi ve toplam verimin hesaplanması eklenmiştir. Prosedürün optimizasyonu sayesinde, GESPECOR hızlı bir zamanda sonuç vermektedir (Chirosca ve diğerleri, 2013).



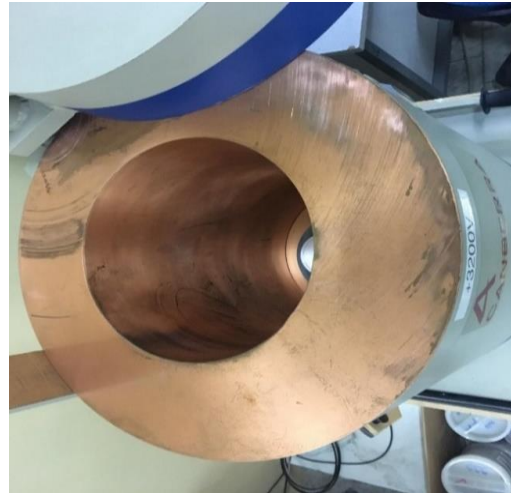
Şekil 2.24. GESPECOR arayüzü ve bir dedektörün şematik diyagramı

3. MATERİYAL VE YÖNTEM

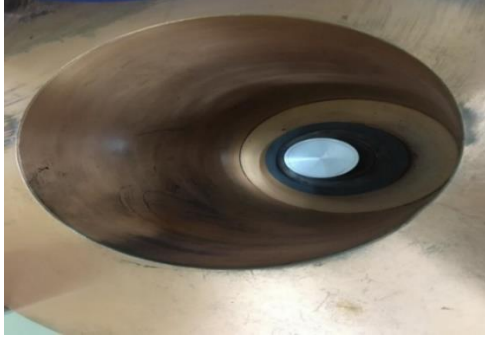
Bu tez çalışmasında deneysel ölçümlerde TENMAK NÜKEN Küçükçekmece İSTANBUL Gama Spektrometri laboratuvarında yer alan standart çok enerjili nokta ve 4 farklı yoğunluğa sahip radyoaktif kaynaklar ile yedi yıldır aktif bir şekilde kullanımda olan p-tipi HPGe dedektör kullanılmıştır. Dedektörün veriminin belirlenmesinde, dedektörün karakterizasyonunda ve Marinelli kabının modellenmesinde GESPECOR ve PHITS MC kodları kullanılmıştır.

3.1. Deneyde Kullanılan HPGe Dedektörü

Gama Spektrometre Sistemi, Canberra marka NAST-1944 model (GCD-30185) HPGe yarıiletken dedektör (p-tipi, koaksiyel eşeksenli), ön yükseltici, yüksek voltaj filtresi, güç kaynağı, yükseltici, sayısal dijital dönüştürücü ve çok kanallı analizörden oluşmaktadır (Şekil 3.1-3.2). Sistem 0,6 mm Al uç kapak pencere kalınlığına sahiptir. Dedektörün bağıl verimi %30'dur ve tepe noktası Compton'a oranı 1,33 MeV'ta 58:1'dir. Enerjilerin çözünürlükleri 1,33 MeV'ta 1,85 keV ve 0,122 MeV'ta 0,875 keV'tur.



Şekil 3.1. p- tipi koaksiyel HPGe dedektörün (a) karşıdan ve (b) üstten görünümü

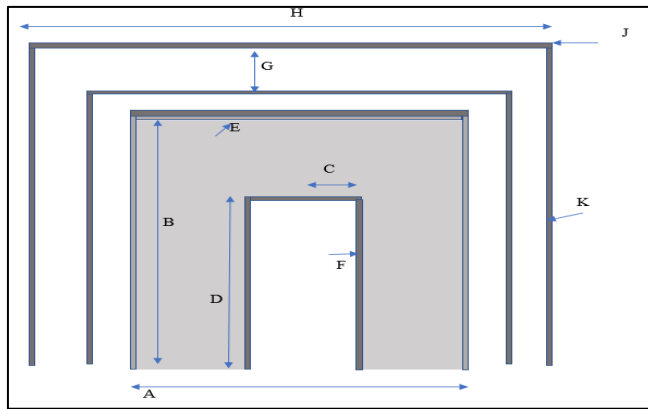


Şekil 3.2. HPGe dedektör 'end cap' kısmının üstten ve yakından görünümü

Çizelge 3.1. Dedektörün materyal ve geometrik boyut (mm) bilgileri

	Tanım	Boyut	Materyal
A	Kristal çapı	57,3	Germanyum
B	Kristal uzunluğu	57,3	"
C	Kristal boşluğunun iç yarıçapı	7	
D	Kristal boşluğunun iç derinliği	40,8	
E	Dış ölü tabaka kalınlığı	0,7	Lityum
F	İç ölü tabaka kalınlığı	0,003	Bor
G	Uç kapağından kristal kapağa olan mesafe	7,5	NA
H	Uç kapak çapı	83,0	Alüminyum
I	Uç kapak pencere kalınlığı	0,6	Alüminyum
J	Kapak duvarı kalınlığı	1,5	Alüminyum
K	Uç kapak duvar kalınlığı	1,5	Alüminyum

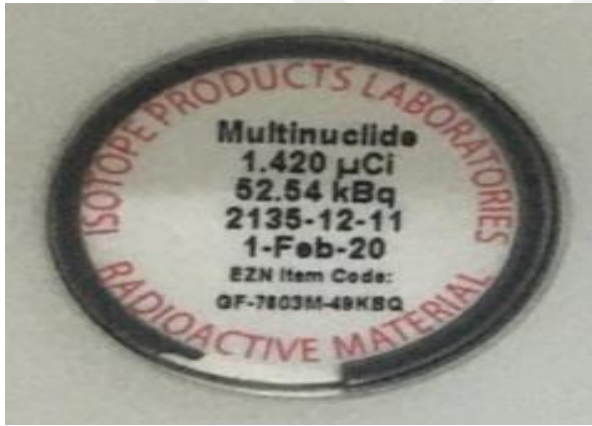
Germanyum kristalinin çapı 57,3 mm ve uzunluğu 57,3 mm'dir. Kristalin içinde 7,0 mm çapında ve 40,8 mm derinliğinde bir delik bulunmaktadır (Çizelge 3.1). Dedektöre ait boyut bilgilerinin şeması Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Koaksiyel HPGe dedektörün şematik gösterimi

3.2. Çok Enerjili Nokta Kaynak

Özellikle dedektör karakterizasyonunda silindirik veya Marinelli gibi kompleks hacimsel geometrilere göre daha basit bir geometriye sahip olan nokta kaynak geometrisi, tercih edilmektedir (Azbouche ve diğerleri, 2015; Dryak ve Kovar, 2006). Nokta şeklindeki radyoaktif kaynak merkezde noktadan her yöne demet şeklinde radyasyon salınımı yapar. Bu kaynaktaki aktif çekirdek sayısı ne kadar fazla ise salınan parçacık sayısı da o kadar fazla olacaktır. Yani salınan radyasyon, nokta radyoaktif kaynağın içindeki parçacığın aktivitesi ile doğru orantılıdır. Bu yüzden aktivitesi bilinen bir standart radyoaktif nokta kaynağın seçilmesi dedektör karakterizasyonu açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Bu nedenle tez çalışması öncelikle standart nokta kaynaklar ile başlatılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Çok enerjili nokta radyoaktif kaynak

Radyoaktif nokta kaynak ^{210}Pb , ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{139}Ce , ^{203}Hg , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{137}Cs , ^{88}Y ve ^{60}Co gibi standart radyoaktif çekirdekleri içeren 01.01.2020 tarihinde 1,42 μCi aktivitededir. 3,0 cm $\times$ 0,5 cm silindirik boyutlu plastik üzerine yerleştirilmiş Eckert&Ziegler Isotope Products firması tarafından üretilen bir nokta kaynaktır. NIST (National Institute of Standards and Technology) tarafından izlenebilir sertifikalı standarta sahiptir (Çizelge 3.2).

Nokta kaynaktaki radyoaktif çekirdeklerin gama enerjileri: ^{210}Pb (46,54 keV), ^{241}Am (59,54 keV), ^{109}Cd (88,03 keV), ^{57}Co (122,06 keV), ^{139}Ce (165,89 keV), ^{203}Hg (279,20 keV), ^{113}Sn (391,70 keV), ^{85}Sr (514,00 keV), ^{137}Cs (661,66 keV), ^{88}Y (898,04 keV, 1836,07 keV), ^{60}Co (1173,23 keV, 1332,49 keV) şeklindedir.

Çizelge 3.2. Çok enerjili nokta radyoaktif kaynak bilgileri

Gama enerjileri (Radyoaktif çekirdek)	Referans malzeme	Sertifika edilen aktivite değerleri (Bg kg-1)
46,54 keV (^{210}Pb)	Nokta radyoaktif kaynak 2135-12-11	11980,6
59,54 keV (^{241}Am)		1178,45
88,03 keV (^{109}Cd)		16261,5
122,06 keV (^{57}Co)		640,1
165,86 keV (^{139}Ce)		796,61
279,20 keV (^{203}Hg)		2494,17
391,70 keV (^{113}Sn)		3079,14
514,00 keV (^{85}Sr)		3855,4
661,66 keV (^{137}Cs)		2715,43
898,04 keV (^{88}Y)		6323,3
1173,23 keV (^{60}Co)		3197,17
1332,49 keV (^{60}Co)		3197,17
1836,07 keV (^{88}Y)		6323,3

3.3. Marinelli Kaynaklar

Tez çalışmasında, 10,65 cm × 13,6 cm boyutundaki Marinelli kabın kullanıldığı hacimsel geometride IAEA (Uluslararası Atom Enerji Ajansı)'dan temin edilen sertifikalı referans Eckert & Ziegler Isotope Products firmasından temin edilen ve NIST (National Institute of Standards and Technology) tarafından izlenebilir sertifikalı standart malzemeler kullanılmıştır.



Şekil 3.5. 4 farklı yoğunluktaki Marinelli radyoaktif kaynaklar

Bu malzemeler 0,5 g/cc, 0,7 g/cc, 1,0 g/cc ve 1,3 g/cc şeklinde 4 farklı yoğunluğa sahip epoksi matris içinde çok enerjili radyoaktif kaynak içeren numunelerdir (Şekil 3.5). Kullanılan epoksinin element bileşimi ağırlıkça %62,040 C, %27,547 O ve %10,413 H den oluşmaktadır. Standart radyoaktif kaynakları içeren Marinelli kaynaklar ^{210}Pb (46,54 keV), ^{241}Am (59,54 keV), ^{109}Cd (88,03 keV), ^{57}Co (122,06 keV) ^{139}Ce (165,86 keV), ^{203}Hg

(279,20 keV), ^{113}Sn (391,70 keV), ^{85}Sr (514,00 keV), ^{137}Cs (661,66 keV), ^{88}Y (898,04 keV, 1836,07 keV), ^{60}Co (1173,23 keV, 1332,49 keV) enerjilerine sahiptir.

0,5 g/cc, 0,7 g/cc, 1,0 g/cc ve 1,3 g/cc yoğunluğa sahip Marinelli kaynakların sertifika bilgileri sırasıyla verilmiştir. 0,5 g/cc yoğunluğuna sahip Marinelli 1000 mL hacime ve 501,0 gram kütleye sahip radyoaktif kaynaktır. Firma tarafından 01.02.2020 tarihinde üretilen 2135-12-6 no'lu bu kaynak 1,362 MCi (50,39 kBq) aktivite içermektedir (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3. 0,5 g/cc yoğunluklu standart Marinelli kaynak için kalibrasyon sertifikası bilgileri

Gama enerjileri (Radyoaktif çekirdek)	Referans malzeme	Sertifika edilen aktivite değerleri (Bg kg ⁻¹)	Element kompozisyonu (%)
46,54 keV (^{210}Pb)	0,5 g/cc Marinelli 2135-12-6	11218,4	C: 62,040 O: 27,547 H: 10,413
59,54 keV (^{241}Am)		1115,18	
88,03 keV (^{109}Cd)		15699,1	
122,06 keV (^{57}Co)		614,57	
165,86 keV (^{139}Ce)		758,87	
279,20 keV (^{203}Hg)		2276,61	
391,70 keV (^{113}Sn)		2952,23	
514,00 keV (^{85}Sr)		3700	
661,66 keV (^{137}Cs)		2642,91	
898,04 keV (^{88}Y)		6230,8	
1173,23 keV (^{60}Co)		3174,23	
1332,49 keV (^{60}Co)		3174,23	
1836,07 keV (^{88}Y)		6230,8	

Numune kütlesi= 501g, 1000 mL, Referans tarihi 01.02.2020

0,7 g/cc yoğunluğa sahip Marinelli 1000 mL hacime ve 700,0 gram kütleye sahip radyoaktif kaynaktır. Firma tarafından 01.02.2020 tarihinde üretilen 2135-12-7 no'lu bu kaynak 1,365 MCi (850,51 kBq) aktivite içermektedir (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4. 0,7 g/cc yoğunluklu standart Marinelli kaynak için kalibrasyon sertifikası bilgileri

Gama enerjileri (Radyoaktif çekirdek)	Referans malzeme	Sertifika edilen aktivite değerleri (Bg kg ⁻¹)	Element kompozisyonu (%)
46,54 keV (^{210}Pb)	0,5 g/cc Marinelli 2135-12-6	11240,6	C: 62,040 O: 27,547 H: 10,413
59,54 keV (^{241}Am)		1117,4	
88,03 keV (^{109}Cd)		15732,4	
122,06 keV (^{57}Co)		616,05	
165,86 keV (^{139}Ce)		760,35	
279,20 keV (^{203}Hg)		2281,42	
391,70 keV (^{113}Sn)		2958,15	
514,00 keV (^{85}Sr)		3707,4	
661,66 keV (^{137}Cs)		2648,46	
898,04 keV (^{88}Y)		6245,6	
1173,23 keV (^{60}Co)		3180,89	
1332,49 keV (^{60}Co)		3180,89	
1836,07 keV (^{88}Y)		6245,6	

Numune kütlesi= 700 g, 1000 mL, Referans tarihi 01.02.2020

1,0 g/cc yoğunluğuna sahip Marinelli 1000 mL hacime ve 1000 gram kütleye sahip radyoaktif kaynaktır. Firma tarafından 01.02.2020 tarihinde üretilen 2135-12-8 no'lu bu kaynak 1,310 MCi (48,47 kBq) aktivite içermektedir (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5. 1,0 g/cc yoğunluklu standart Marinelli kaynak için kalibrasyon sertifikası bilgileri

Gama enerjileri (Radyoaktif çekirdek)	Referans malzeme	Sertifika edilen aktivite değerleri (Bg kg ⁻¹)	Element kompozisyonu (%)
46,54 keV (²¹⁰ Pb)	0,5 g/cc Marinelli 2135-12-6	11240,6	C: 62,040 O: 27,547 H: 10,413
59,54 keV (²⁴¹ Am)		1117,4	
88,03 keV (¹⁰⁹ Cd)		15732,4	
122,06 keV (⁵⁷ Co)		616,05	
165,86 keV (¹³⁹ Ce)		760,35	
279,20 keV (²⁰³ Hg)		2281,42	
391,70 keV (¹¹³ Sn)		2958,15	
514,00 keV (⁸⁵ Sr)		3707,4	
661,66 keV (¹³⁷ Cs)		2648,46	
898,04 keV (⁸⁸ Y)		6245,6	
1173,23 keV (⁶⁰ Co)		3180,89	
1332,49 keV (⁶⁰ Co)		3180,89	
1836,07 keV (⁸⁸ Y)		6245,6	

Numune kütlesi= 1000 g, 1000 mL, Referans tarihi 01.02.2020

1,3 g/cc yoğunluğa sahip Marinelli 1000 mL hacime ve 1300 gram kütleye sahip radyoaktif kaynaktır. Firma tarafından 01.02.2020 tarihinde üretilen 2135-12-9 no'lu bu kaynak 1,323 MCi (48,95 kBq) aktivite içermektedir (Çizelge 3.6).

Çizelge 3.6. 1,3 g/cc yoğunluklu standart Marinelli kaynak için kalibrasyon sertifikası bilgileri

Gama enerjileri (Radyoaktif çekirdek)	Referans malzeme	Sertifika edilen aktivite değerleri (Bg kg ⁻¹)	Element kompozisyonu (%)
46,54 keV	1,0 g/cc Marinelli 2135-12-8	10900,2	C: 62,040 O: 27,547 H: 10,413
59,54 keV		1082,99	
88,03 keV		15251,4	
122,06 keV		597,18	
165,86 keV		737,41	
279,20 keV		2211,86	
391,70 keV		2867,87	
514,00 keV		3594,18	
661,66 keV		2567,43	
898,04 keV		6053,2	
1173,23 keV		3083,58	
1332,49 keV		3083,58	
1836,07 keV		6053,2	

Numune kütlesi= 1300 g, 1000 mL, Referans tarihi 01.02.2020

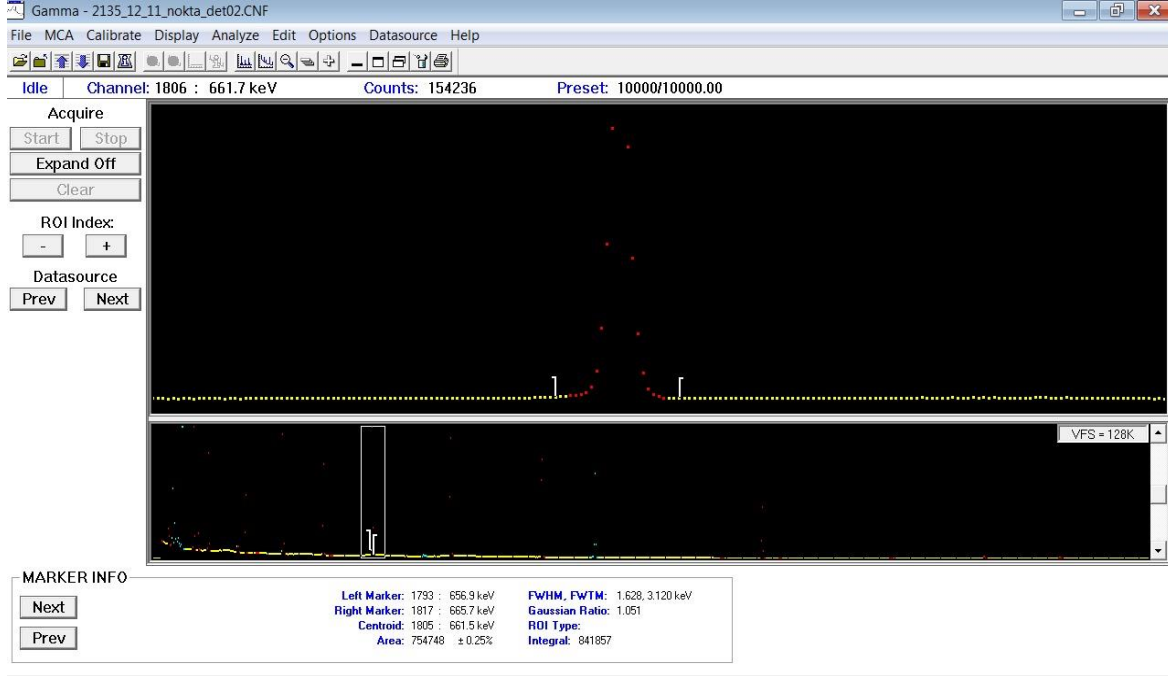
3.4. Dedektörün Toplam Enerji Pik Veriminin (FEPE) Deneysel Olarak Belirlenmesi

Herhangi bir numunede ilgilenilen radyoaktif çekirdeğin aktivite değerinin belirlenebilmesi için dedektörün veriminin belirlenmesi gerekmektedir. Özellikle düşük enerjilerde öz-soğurma düzeltmelerinden kaçınmak için deneysel kalibrasyonda numune ile çok benzer yoğunluklara ve kimyasal bileşimlere sahip standartların kullanılması gerekir (Guerra ve diğerleri, 2018). Deneysel toplam enerji pik verimi (FEPE) değeri, hem herhangi bir numunedeki aktivite değerinin belirlenmesinde hem de dedektör karakterizasyonunda önemli bir parametredir.

Bu tezde gama spektrometresinde kullanılan %30 bağıl verime sahip HPGe dedektörü (Şekil 3.1), çok enerjili radyoaktif nokta kaynak (Şekil 3.4) ve farklı yoğunluklara sahip çok enerjili Marinelli (Şekil 3.5) geometrilerle 46,5-1836 keV aralığındaki 13 farklı enerji için deneysel verim elde edilmiştir. Gerçek çakışma faktörlerinin etkileri nedeniyle verim belirlemede herhangi bir belirsizliği önlemek için nokta kaynak ile 10000 s, Marinelli geometrilerle 20000 s sayım gerçekleştirilmiştir. Kullanılan nokta kaynaklardan ^{60}Co ve ^{88}Y birden fazla gama ışını yaydığı için GESPECOR programından TCS faktörleri elde edilerek düzeltmeler yapılmıştır. Nokta kaynak geometride numune içinde gerçekleşen öz-soğurma olmayacağından öz-soğurma düzeltmesi yoktur. Öz-soğurma Marinelli geometrilerine uygulanmıştır. Nokta kaynak bir tutucu yardımıyla Marinelli kapların kullanıldığı kaynaklar ise dedektör penceresinin üzerinde sayılmıştır. Çünkü bu geometri tüm dedektörlerde rutinde de çokça tercih edilen sayım geometrisidir. Nokta kaynak ve Marinelli geometrideki numunelerin deneysel FEPE değerleri ise Eş.2.26'ya göre hesaplanmıştır.

Sayım hızı, Genie 2000/GammaVision yazılımından alınan spektrumun altındaki sayımın, sayım süresine bölünmesiyle elde edilir (Şekil 3.6). $A(Bq)$, kaynağın radyoaktif bozunma düzeltmesi yapılmış ölçüm tarihindeki aktivitesidir. Üretici tarafından verilen referans kaynak sertifikasında yazan ilgili enerjideki başlangıç aktivite değerinin ölçüm zamanına göre radyoaktif bozunma düzeltmesi yapılmış aktivite değeridir. $f\gamma(E)$, ilgilenilen enerjinin gama yayınlanma olasılığıdır. Çalışmada gama spektrometresinde ilgilenilen radyoaktif çekirdekler için gama yayınlanma olasılıkları LARA-NUCLEIDE (LARAweb, 2021) ücretsiz online erişim veri tabanından alınmıştır. Bu veri tabanları ayrıca yarı ömür ve sıralı radyoaktif bozunum şekilleri gibi birçok bilgiyi de sağlamaktadır. F_c , gerçek zamanlı

çakışma (TCS) düzeltme faktörüdür. Şekil 3.6’da Genie programından elde edilen ^{137}Cs ’ye ait olan pik görülmektedir.



Şekil 3.6. Genie 2000 programı ile spektrum analizi

3.5. Dedektörün Toplam Enerji Pik Veriminin (FEPE) Monte Carlo ile Belirlenmesi

Dedektör verimi, geometriye ve numune matrisine özgü bir parametre olduğundan, her numune geometrisine özgü sertifikalı verim standardının olma zorunluluğu maliyetli bir durumdur. Gerçekte her geometri ve numune matrisi için standart kaynak yoktur. Dolayısıyla verimin her zaman sertifikalı referans malzemelerle deneysel olarak belirlenmesi yerine bir MC simülasyon programı ile belirlenmesi hem maliyet hem de zaman açısından büyük bir kolaylık sağlamaktadır. MC simülasyonu ile verim kalibrasyonunda en önemli unsur, dedektörün Germanyum kristalinin uzunluğu, çapı, ölü tabaka kalınlığı, dedektör penceresinin boyutları gibi fiziksel ve geometrik parametrelerin doğru bir şekilde belirlenmesi işlemidir. Bu işleme dedektör karakterizasyonu denir. Karakterizasyonda üretici firma tarafından sağlanan boyutlar ve bilgiler büyük önem taşır. Bir dedektörün karakterize edilmesinde, başlangıçta üretici firma tarafından sağlanan nominal boyutlar kullanılarak dedektör modellenir. Daha sonra bu modelin MC simülasyonundan farklı gama enerjileri için toplam enerji pik verim (FEPE-full energy peak efficiency) değerleri hesaplanır. Bu verim değerleri çeşitli kaynak-dedektör geometrileri ve çeşitli enerjilerde

radioaktif çekirdeklere sahip numuneler kullanılarak elde edilen deneysel verim değerleriyle karşılaştırılarak doğrulanır (Modarresi ve diğerleri, 2017).

Çalışmada, geometrik parametrelerin dedektör cevabı üzerindeki etkisini ve aralarındaki etkileşimleri değerlendirmek için karakterizasyon yöntemi geliştirildi. Deneysel olarak elde edilen verim değerine karşılık dedektör parametreleri ve toplam enerji pik verimi GESPECOR ve PHITS Monte Carlo programları aracılığı ile hesaplandı. PHITS programında kristalin yuvarlatılmış kenar etkisi ve bakır çubuk tasarlanabilirken GESPECOR'da bu mümkün değildir (BÖLÜKDEMİR ve diğerleri, 2021). PHITS (3.26) Monte Carlo kodu (Peryoga ve diğerleri, 2017) tespit ve nükleer uygulamalarda yaygın olarak kullanıldığından bu çalışmada da kullanılmıştır.

Tez çalışmasında hacimsel numunelerdeki öz-soğurma faktörlerinin elde edilmesinde GESPECOR MC (Sima ve Arnold, 1996; Sima ve Dovlete, 1997) programı ve NIST XCOM (XCOM, 2022) veri tabanları kullanılmıştır. NIST XCOM veri tabanına numunelerin XRF (X-ray fluorescence) yöntemiyle belirlenen kimyasal element bileşim oranları girilerek, kütle soğurma katsayıları (μ/ρ , cm^2/g biriminde) elde edilmiştir. Veri tabanından alınan kütle soğurma katsayılarının numune miktarı (g) ile çarpılıp, numune hacmine (cm^3) bölünmesiyle lineer azalma katsayıları elde edilmiştir. Daha sonra Eş. 2.26'da lineer azalma katsayısı ve numune yüksekliği değerleri yerlerine konularak ilgilenilen her bir enerji değeri için öz-soğurma düzeltme faktörleri elde edilmiştir. GESPECOR MC programında öz-soğurma düzeltme faktörlerinin elde edilmesi için dedektör parametreleri (kristal çapı ve uzunluğu, dedektör iç boşluğunun çapı ve uzunluğu, pencere malzemesi ve kalınlığı, uç kabın çapı, DL kalınlığı, vb.), ölçüm geometrisi (dedektör-kaynak arası mesafe, kaynak geometrisi), dedektör zırhı (iç çapı, iç yüksekliği, dış çapı, dış yüksekliği, kullanılan zırhın malzeme yoğunluğu) ve numuneye ait tüm parametrelerin (kimyasal bileşimi, elementlerin yüzde olarak konsantrasyonu, yoğunluğu) tanıtılması gerekmektedir. Tüm parametreler tanımlandıktan sonra, GESPECOR programı öz-soğurma değerlerini parçacık etkileşim tesir kesitlerini kullanarak hesaplar.

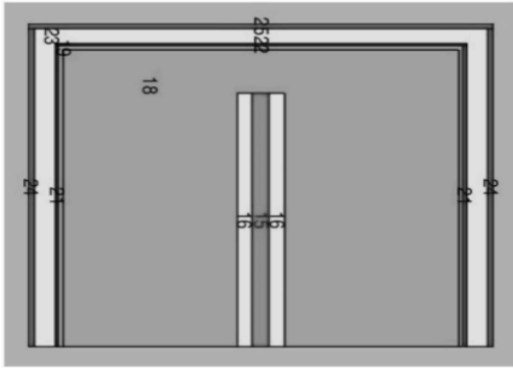
Kullanılan dedektör, nokta kaynaklar ile PHITS ve GESPECOR Monte Carlo tabanlı programlarla karakterize edilmiştir. Ardından 4 farklı yoğunluktaki Marinelli kaynakların MC verim değerleri de PHITS ve GESPECOR ile elde edilmiştir.

3.5.1. PHITS ile verimin belirlenmesi

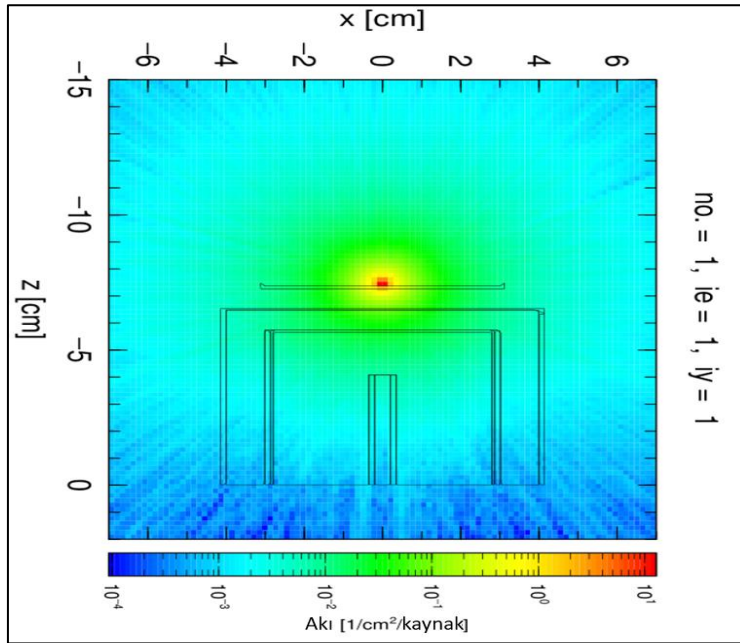
PHITS, açık kaynak kodlu genel amaçlı MC simülasyon programıdır. Japon Atom Enerjisi Kurumu'nun Japonya ve Avrupa'daki çeşitli kurumlarla iş birliği içinde geliştirdiği bir Monte Carlo parçacık taşınımı simülasyon kodudur ve nükleer uygulamalarda her geçen gün daha popüler hale gelmektedir. Çeşitli nükleer reaksiyon modelleri ve veri kitaplıkları kullanılarak, 1 TeV'ye kadar enerjiye sahip çoğu parçacık türünün taşınması PHITS MC kodu ile simüle edilebilir (Sato ve diğerleri, 2018).

Tez çalışmasında dedektör, üretici firma tarafından verilen Çizelge 3.1'deki geometrik parametreler kullanılarak PHITS MC (versiyon 3.26) programında modellenmiştir. PHITS MC programlarında modellenen HPGe dedektörün şematik gösterimi Şekil 3.7'de gösterilmiştir. PHITS MC ile dedektör modellenirken, üretici firma tarafından verilen tüm geometrik parametreleri (kristal kalınlığı, yüksekliği, pencere kalınlığı, DL kalınlığı, v.b.), CELL ve SURFACE kartında, dedektör kristalinin, dedektör penceresinin, kristal etrafındaki malzemelerin özellikleri (bileşimleri, yoğunlukları) MATERIAL kartında, nokta ve Marinelli kaynak geometrisi ve aktivitesi (Bq) SOURCE kartında ve dedektör-kaynak mesafeleri PARAMETERS kartında tanımlanarak modelleme gerçekleştirilmiştir. Kaynağın geometrisi, SOURCE kartında yer alan s-type değeri ile belirlenmektedir. Nokta kaynak için s-type=9, hacimsel kaynak için s-type=1 kullanılır. Dedektörün aktif bölgesinden kaçan foton, elektron ve pozitronlar ile taşınan enerji ve buna bağlı olarak oluşabilecek enerji kaybını önlemek amacıyla kesme enerjileri (cut-off) 1 keV olarak seçilmiştir (Díaz ve Vargas, 2008; Peryoga ve diğerleri, 2017; Vasconcelos ve diğerleri, 2011). Dedektör ve kaynak ile ilgili tüm bilgiler girdi olarak oluşturulduktan sonra FEPE cinsinden hesaplama değeri "T-DEPOSIT TALLY" ismiyle tanımlanan çeteleye kaydedilir. "T-deposit tally" isimli çetele, istenilen enerji bölgesinde biriken enerjiyi ve dedektörün puls yükseklik modunda çalışması elde edilir. "3-D SHOW" ile de görseller elde edilmektedir.

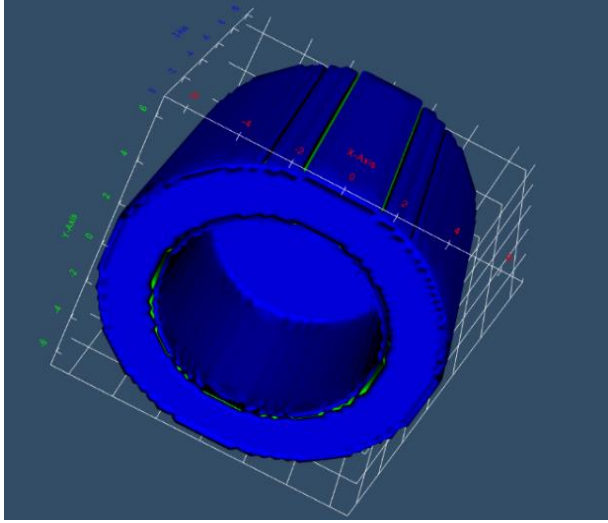
Hesaplama sonucunda "RESPONSE" olarak tanımlanan çıktı (out) dosyası tanımlanan enerji aralığı için FEPE değerini ve FEPE değerinin belirsizliğini vermektedir. PHITS'te istatistiksel dağılımın en doğru sonuca götüreceği hikaye sayısı (history number) tüm enerjilerde 10^6 olarak belirlenmiştir. Hikaye sayısı, tüm enerjilerde %1'den daha az belirsizliğe sahip ve sayma istatistiğine uygundur.



Şekil 3.7. PHITS MC ile modellenmesinin 2D görünümü: germanyum kristali (18), yan ölü tabaka kalınlığı (21), ön ölü tabaka kalınlığı (22) ve alüminyum tutucular (24,25)



Şekil 3.8. Çok enerjili nokta radyoaktif kaynak için 1 milyon hikaye sayısında PHITS MC'den elde edilen 2 boyutlu foton dağılımı (kaynak- dedektör mesafesi 2 cm alınmıştır)



Şekil 3.11. PHITS ile modellenen Marinelli kabının 3 boyutlu görünüşü

3.5.2. GESPECOR ile verimin belirlenmesi

GESPECOR MC programında da dedektöre ait tüm boyut bilgileri ‘DETECTOR’; radyoaktif kaynağın numune boyutları, numune kabı yoğunluğu ve boyut bilgileri ve dedektöre olan mesafesi ‘GEOMETRY’; zırh boyut ve zırhın malzeme bilgileri ‘SHIELD’; kullanılan radyoaktif kaynakların enerji bilgileri ‘EFFICIENCY’ kısmına tek tek tanımlanır. Radyoaktif çekirdekler seçildikten ve istenilen hikaye sayısı belirlendikten sonra dedektörün seçilen foton enerjileri için verim hesaplaması başlatılır (GESPECOR SOFTWARE). Bununla birlikte tüm çalışmada gerçek çakışma katsayısı (True Coincidence) GESPECOR programı ile hesaplanmıştır. Özel amaçlı GESPECOR programı PHITS programına göre daha kullanışlı gibi görünse de kristalin yuvarlatılmış kenar geometrisini ve bakır çubuk parametrelerini hesaba dahil etme özelliğine sahip değildir. Bu durum özellikle yüksek enerji bölgelerinde deneysel verim değerini ciddi bir şekilde etkilemektedir (Bölükdemir ve diğerleri, 2021; Uyar ve diğerleri, 2021).

PHITS ve GESPECOR MC programları ile dedektörün veriminin belirlenmesi, farklı DL kalınlıkları, Marinelli kabın modellenmesi ve sanal dedektör çalışmasında kullanılmak üzere toplam ~2150 input dosyası çalıştırılarak FEPE değerleri elde edilmiştir.



4. YAPILAN DENEY VE MONTE CARLO UYGULAMALARI

Çalışmada ilk önce nokta daha sonra 4 farklı yoğunluktaki epoksi Marinelli radyoaktif kaynaklar için deneysel verim değerleri elde edilmiştir. Bu kaynakların verim değeri kaynaklardan alınan sayım hızı, radyoaktif çekirdeğin yarılanma ömrü (gün), radyoaktif çekirdeğe ait aktivite değeri ve gama yayınlanma olasılıkları Eş. 2.26'ya uygulanarak elde edilmiştir. Dedektör uç kapağından yakın mesafeye yerleştirilen çok enerjili nokta kaynak 10000 s, dedektör penceresinin tam üzerine yerleştirilen Marinelli kaynaklar ise 20000 s sayılmıştır. Sayım esnasında dedektörün ölü zamanı %3'ten az olacak şekilde kontrol edilmiştir. PHITS ve GESPECOR MC programlarında deney ile aynı şartları taşıyan modeller hazırlanmış ve dedektör verim değerleri elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen verim değerleri PHITS ve GESPECOR MC programlarından elde edilen dedektör verim değerleri ile karşılaştırılmıştır. Nokta kaynak ve Marinelli kaynaklar için verim değerleri aşağıda sırası ile alt başlıklar halinde verilmiştir.

4.1. Radyoaktif Kaynaklar için Verim Değeri

4.1.1. Nokta kaynak için verim değeri

Çizelge 4.1. Çok enerjili nokta radyoaktif kaynağın özellikleri ve dedektörün deneysel verim değerleri

Radyoaktif kaynak	Enerji (keV)	A (Bq)	A ₀ (Bq) Belirsizlik	t _{1/2} (gün)	f(γ)	Sayım hızı	Verim	Mutlak hata
²¹⁰ Pb	46,54	11854,8	4,0	8140	4,25	5,9	0,011674	4,3
²⁴¹ Am	59,54	1177,81	3,0	157740	35,92	19,3	0,045570	3,3
¹⁰⁹ Cd	88,03	13504,8	3,0	462,6	3,66	54,7	0,110750	3,4
⁵⁷ Co	122,06	466,590	3,0	271,79	85,49	49,6	0,124364	3,3
¹³⁹ Ce	165,86	426,680	3,0	137,64	79,90	37,5	0,109904	3,3
²⁰³ Hg	279,20	394,440	3,0	46,595	81,48	23,5	0,073086	3,2
¹¹³ Sn	391,70	1459,36	3,0	115,09	64,97	50,4	0,053142	3,2
⁸⁵ Sr	514,00	1024,66	3,0	64,849	98,50	41,6	0,041214	3,1
¹³⁷ Cs	661,66	2694,32	3,0	11012	84,99	75,7	0,033048	3,2
⁸⁸ Y	898,04	2824,56	3,0	106,63	93,70	60,9	0,025174	3,0
⁶⁰ Co	1173,23	3057,54	3,0	1924,3	99,85	56,3	0,020332	3,2
⁶⁰ Co	1332,49	3057,54	3,0	1924,3	99,98	49,9	0,018024	3,1
⁸⁸ Y	1836,07	2823,98	3,0	106,63	99,35	34,5	0,013636	3,0

Çok enerjili nokta radyoaktif kaynağın (Bkz. Bölüm 3.2), enerji, kaynak aktivitesi (Bq) ve belirsizliği, yarılanma ömrü (gün), gama yayınlanma olasılığı (γ), toplam sayım hızı ve bu parametreler kullanılarak hesaplanan verimi (ε) ve verime ait mutlak hata (%) değerleri

Çizelge 4.1’de verilmiştir. Elde edilen verim değeri ile kullanılan dedektörün deneysel verimin belirlenmesi Bölüm 3.4’te ayrıntılı olarak verilmiştir.

4.1.2. Marinelli kaynaklar için verim değerleri

Deneyde kullanılan 0,5 g/cc, 0,7 g/cc, 1,0 g/cc ve 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynakların verimlerinin hesaplanabilmesi için gerekli olan radyoaktif kaynağın enerji değerleri, kaynak aktivitesi (Bq) ve belirsizliği, yarılanma ömürleri (gün), bu radyoaktif çekirdeklerden yayılan gama yayınlanma olasılıkları (γ), sayım hızı Eş.2.26’ya göre hesaplanarak dedektörün verimi (ϵ) ve verime ait mutlak hata değerleri Çizelge 4.2- 4.5’te sırası ile verilmiştir.

Çizelge 4.2. 0,5 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın özellikleri ve deneysel verim değerleri

Radyoaktif kaynak	Enerji (keV)	A (Bq)	A ₀ (Bq) Belirsizlik	t _{1/2} (gün)	f(γ)	Sayım Hızı	Verim	Mutlak hata
²¹⁰ Pb	46,54	11176,5	4,0	8140	4,25	1,1	0,00229	4,4
²⁴¹ Am	59,54	1115,0	3,0	157740	35,92	4,0	0,01008	3,4
¹⁰⁹ Cd	88,03	14697,7	3,0	462,6	3,66	14,8	0,02750	3,1
⁵⁷ Co	122,06	549,3	3,0	271,79	85,49	16,1	0,03431	3,1
¹³⁹ Ce	165,86	608,1	3,0	137,64	79,90	16,1	0,03335	3,1
²⁰³ Hg	279,20	1183,3	3,0	46,595	81,48	23,3	0,02418	3,1
¹¹³ Sn	391,70	2265,1	3,0	115,09	64,97	27,5	0,01868	3,0
⁸⁵ Sr	514,00	2312,0	3,0	64,849	98,50	33,7	0,01481	3,1
¹³⁷ Cs	661,66	2635,6	3,0	11012	84,99	27,3	0,01218	3,0
⁸⁸ Y	898,04	4681,2	3,0	106,63	93,70	40,5	0,00969	3,0
⁶⁰ Co	1173,23	3124,3	3,0	1924,3	99,85	23,2	0,00786	3,0
⁶⁰ Co	1332,49	3124,3	3,0	1924,3	99,98	21,0	0,00710	3,1
⁸⁸ Y	1836,07	4680,8	3,0	106,603	99,35	24,3	0,00553	3,0

Çizelge 4.3. 0,7 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın özellikleri ve deneysel verim değerleri

Radyoaktif kaynak	Enerji (keV)	A (Bq)	A ₀ (Bq) Belirsizlik	t _{1/2} (gün)	f(γ)	Sayım Hızı	Verim	Mutlak hata
²¹⁰ Pb	46,54	11196,7	4,0	8140	4,25	1,1	0,00228	4,4
²⁴¹ Am	59,54	1117,2	3,0	157740	35,92	3,7	0,00920	3,1
¹⁰⁹ Cd	88,03	14684,8	3,0	462,6	3,66	14,2	0,02649	3,1
⁵⁷ Co	122,06	547,9	3,0	271,79	85,49	15,3	0,03277	3,1
¹³⁹ Ce	165,86	603,2	3,0	137,64	79,90	15,2	0,03168	3,1
²⁰³ Hg	279,20	1151,0	3,0	46,595	81,48	21,9	0,02338	3,1
¹¹³ Sn	391,70	2242,5	3,0	115,09	64,97	26,4	0,01811	3,0
⁸⁵ Sr	514,00	2267,7	3,0	64,849	98,50	32,3	0,01445	3,1
¹³⁷ Cs	661,66	2640,8	3,0	11012	84,99	26,5	0,01179	3,0
⁸⁸ Y	898,04	4631,7	3,0	106,63	93,70	38,8	0,00941	3,0
⁶⁰ Co	1173,23	3128,6	3,0	1924,3	99,85	22,8	0,00772	3,0
⁶⁰ Co	1332,49	3128,6	3,0	1924,3	99,98	20,7	0,00699	3,0
⁸⁸ Y	1836,07	4631,3	3,0	106,603	99,35	23,3	0,00537	3,0

Çizelge 4.4. 1,0 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın özellikleri ve deneysel verim değerleri

Radyoaktif kaynak	Enerji (keV)	A (Bq)	A ₀ (Bq) Belirsizlik	t _{1/2} (gün)	f(γ)	Sayım Hızı	Verim	Mutlak hata
²¹⁰ Pb	46,54	10753,5	4,0	8140	4,25	0,9	0,00197	4,5
²⁴¹ Am	59,54	1072,8	3,0	157740	35,92	3,3	0,00851	3,1
¹⁰⁹ Cd	88,03	14080,0	3,0	462,6	3,66	12,4	0,02405	3,1
⁵⁷ Co	122,06	524,8	3,0	271,79	85,49	13,3	0,02960	3,1
¹³⁹ Ce	165,86	576,5	3,0	137,64	79,90	13,6	0,02960	3,1
²⁰³ Hg	279,20	1089,0	3,0	46,595	81,48	19,3	0,02178	3,1
¹¹³ Sn	391,70	2140,4	3,0	115,09	64,97	23,7	0,01707	3,1
⁸⁵ Sr	514,00	2154,5	3,0	64,849	98,50	29,2	0,01377	3,1
¹³⁷ Cs	661,66	2535,5	3,0	11012	84,99	24,2	0,01121	3,1
⁸⁸ Y	898,04	4419,0	3,0	106,63	93,70	35,2	0,00894	3,1
⁶⁰ Co	1173,23	3003,1	3,0	1924,3	99,85	20,8	0,00731	3,1
⁶⁰ Co	1332,49	3003,1	3,0	1924,3	99,98	18,8	0,00660	3,0
⁸⁸ Y	1836,07	4418,7	3,0	106,63	99,35	21,4	0,00517	3,1

Çizelge 4.5. 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın özellikleri ve deneysel verim değerleri

Radyoaktif kaynak	Enerji (keV)	A (Bq)	A ₀ (Bq) Belirsizlik	t _{1/2} (gün)		Sayım Hızı	Verim	Mutlak hata
²¹⁰ Pb	46,54	10862,2	4,0	8140	4,25	0,8	0,00167	6,3
²⁴¹ Am	59,54	1082,8	3,0	157740	35,92	2,6	0,00675	4,2
¹⁰⁹ Cd	88,03	14342,8	3,0	462,6	3,66	11,0	0,02095	3,1
⁵⁷ Co	122,06	537,9	3,0	271,79	85,49	12,9	0,02800	3,1
¹³⁹ Ce	165,86	599,9	3,0	137,64	79,90	13,3	0,02798	3,1
²⁰³ Hg	279,20	1202,1	3,0	46,595	81,48	20,3	0,02067	3,1
¹¹³ Sn	391,70	2240,5	3,0	115,09	64,97	23,9	0,01642	3,1
⁸⁵ Sr	514,00	2319,1	3,0	64,849	98,50	30,4	0,01331	3,1
¹³⁷ Cs	661,66	2560,8	3,0	11012	84,99	23,7	0,01091	3,1
⁸⁸ Y	898,04	4637,3	3,0	106,63	93,70	36,1	0,00878	3,1
⁶⁰ Co	1173,23	3038,4	3,0	1924,3	99,85	20,7	0,00725	3,1
⁶⁰ Co	1332,49	3038,4	3,0	1924,3	99,98	18,5	0,00649	3,0
⁸⁸ Y	1836,07	4636,9	3,0	106,63	99,35	22,1	0,00510	3,1

4.2. Deneysel Verim ve Tek Parça Ölü Tabaka Kalınlığının Monte Carlo Uygulamaları

4.2.1. Nokta kaynak için tek parça ölü tabaka kalınlığı

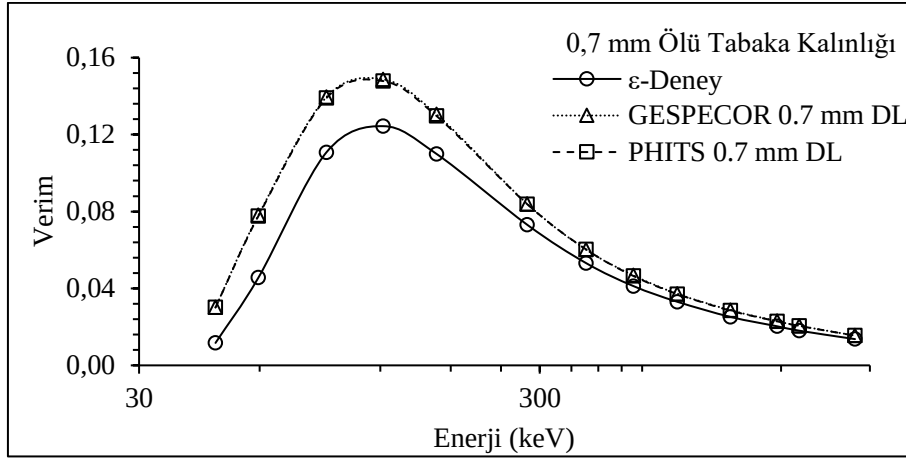
Dedektörün ilk modellenmesi yalnızca üretici tarafından sağlanan bilgilere dayanmaktadır (Çizelge 3.1). Dedektör üretildiğinde üretici tarafından belirlenen ve sertifikasına kayıt edilen dış ve iç ölü tabaka kalınlıkları sırasıyla 700 µm ve 0,3 µm'dir. Simülasyonlar, çok enerjili nokta (Çizelge 3.2) ve Marinelli radyoaktif kaynakların (Çizelge 3.3-3.6) sahip olduğu enerji değerleri ile gerçekleştirilmiştir. Monte Carlo ile verim hesaplamaları Bölüm 3.5'te ayrıntılı verilmiştir.

Nokta kaynak enerjileri için dedektörün deneysel verimleri, PHITS ve GESPECOR MC'den elde edilen dedektör verim değerleri ile deneysel verimden yüzde farkları Çizelge 4.6'da verilmiştir. Bu MC hesaplarında ölü tabaka kalınlığının dedektörün ilk üretildiğindeki değerleri olarak ve tek parça ele alındığına dikkat edilmelidir. Deneysel verim ile üretici firmanın verdiği ölü tabaka kalınlığına göre 46,5, 59,5 ve 88 keV'ta sırasıyla PHITS'te %157,8, %70,3, %25,5, GESPECOR'da ise %158,0 %71,3 ve %25,9'luk bir fark elde edilmiştir (Çizelge 4.6). 88 keV üstünde ise her iki hesaplama için %fark 12-19 aralığındadır.

Çizelge 4.6. Nokta kaynak foton enerjileri için dedektörün deneysel verimi, PHITS ve GESPECOR MC ile hesaplanmış dedektör verim değerlerinin deneysel verimden % farkları

Enerji (keV)	Verim			%Fark	
	Deney Verimi	PHITS	GESPECOR	PHITS	GESPECOR
46,54	0,0117	0,0301	0,0301	157,8	158,0
59,54	0,0456	0,0776	0,0781	70,3	71,3
88,03	0,1107	0,1389	0,1395	25,5	25,9
122,06	0,1244	0,1478	0,1487	18,8	19,5
165,86	0,1099	0,1296	0,1305	17,9	18,8
279,20	0,0731	0,0838	0,0839	14,6	14,8
391,70	0,0531	0,0602	0,0601	13,4	13,2
514,00	0,0412	0,0465	0,0468	12,7	13,5
661,66	0,033	0,037	0,0372	12,1	12,6
898,04	0,0253	0,0284	0,0287	12,9	13,2
1173,23	0,0204	0,0229	0,0229	12,6	12,0
1332,49	0,0181	0,0205	0,0206	13,7	13,0
1836,07	0,0137	0,0154	0,0155	13,3	12,6

Üretici firmanın vermiş olduğu 0,7 mm ölü tabaka kalınlığına göre deneysel verim değeri GESPECOR ve PHITS MC'den elde edilen dedektör verim değerlerinin enerjiye karşılık verim eğrisi Şekil 4.1'de görülmektedir. Şekil 4.1'den MC hesaplamalarının birbirleriyle uyum içinde olduğu fakat deneysel verim değerlerinden ciddi oranda ayrıştığı görülmektedir.



Şekil 4.1. 0,7 mm ölü tabaka kalınlığında enerjiye karşılık dedektör veriminin değişimi

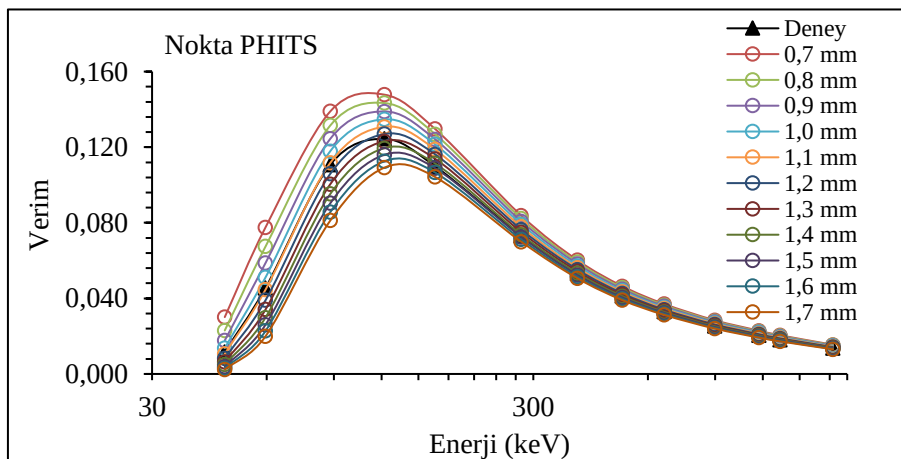
Deneysel verimin % hatası Çizelge 4.1'den görüldüğü gibi genel olarak %4,0'un altındadır, maksimum %4,3'tur. Hesaplama ve deneysel verim arasındaki fark dikkate alındığında, kabul edilebilir hesaplama sonuçları için %fark değerlerinin orta ve yüksek enerjide %3 altında, düşük enerji bölgesinde ise %5 altında olması beklenir. Literatürden bilindiği üzere (Huy, 2010; 2011; Anderotti ve diğerleri, 2014; Bölükdemir ve diğerleri, 2021; Uyar ve diğerleri, 2021;) dedektör parametreleri içinde zamanla değişebilecek tek parametre ölü tabaka (DL) kalınlığıdır. MC kodlarının birbiriyle uyumlu olması parametrik bir değerlendirmeye ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Modelleme parametreleri içinde zamanla değişen tek parametre ölü tabaka kalınlığı olduğu için dedektörün üretiminden günümüze kadar geçen zamanda ne kadar değiştiğinin belirlenmesi deneysel verim ve hesaplanan verim değerlerinin uyumlu olduğu ölü tabaka değerinin belirlenmesine bağlıdır. MC ile modellenen ölü tabakanın gösterimi standart nokta kaynaklardaki her bir foton enerjisi için PHITS ve GESPECOR MC programları ile üretici firmanın vermiş olduğu ölü tabaka kalınlığı 0,7 mm değerinden başlanarak 0,1 mm aralıklarla 1,7 mm'ye kadar artırılarak enerjiye karşılık verim değerleri (Çizelge 4.7, 4.9) ve bu verim değerlerinin deneysel verimden yüzde farkları (Çizelge 4.8, 4.10) elde edilmiş ve enerjiye karşılık verim eğrisi gösterilmiştir (Şekil 4.2, 4.3). Çizelge 4.8 ve 4.10 incelendiğinde 1,4 mm kalınlığında bir ölü tabaka kalınlığı dikkate alınarak yapılan PHITS ve GESPECOR simülasyonlarında, 46,5-1836 keV aralığında ilk üç enerji haricinde deneyle uyum görülmektedir. Orta ve yüksek enerji bölgesindeki deney ve hesaplar arasındaki uyum dikkate alındığında genel olarak 100 keV altındaki enerjilerde %fark %157'lere kadar çıkmaktadır.

Çizelge 4.7. Nokta kaynak için deneysel verim ve farklı DL değerlerinde PHITS MC ile elde edilen dedektör verim değerleri

Enerji (keV)	Verim	Toplam enerji pik verimi (FEPE)										
		0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	0,0117	0,0301	0,0230	0,0177	0,0137	0,0107	0,0083	0,0064	0,0050	0,0039	0,0030	0,0023
59,54	0,0456	0,0776	0,0675	0,0587	0,0511	0,0446	0,0390	0,0341	0,0299	0,0260	0,0228	0,0200
88,03	0,1107	0,1389	0,1315	0,1244	0,1179	0,1117	0,1059	0,1004	0,0952	0,0903	0,0856	0,0812
122,06	0,1244	0,1478	0,1434	0,1389	0,1347	0,1308	0,1269	0,1231	0,1195	0,1159	0,1125	0,1092
165,86	0,1099	0,1296	0,1269	0,1242	0,1215	0,1189	0,1162	0,1139	0,1114	0,1089	0,1066	0,1042
279,20	0,0731	0,0838	0,0823	0,0808	0,0793	0,0778	0,0764	0,0750	0,0737	0,0725	0,0712	0,0699
391,70	0,0531	0,0602	0,0592	0,0583	0,0572	0,0562	0,0553	0,0543	0,0533	0,0523	0,0515	0,0506
514,00	0,0412	0,0465	0,0456	0,0449	0,0441	0,0434	0,0427	0,0419	0,0412	0,0405	0,0398	0,0391
661,66	0,0330	0,0370	0,0365	0,0358	0,0352	0,0346	0,0340	0,0335	0,0329	0,0323	0,0318	0,0313
898,04	0,0253	0,0284	0,0280	0,0275	0,0270	0,0266	0,0261	0,0257	0,0253	0,0248	0,0244	0,0240
1173,23	0,0204	0,0229	0,0225	0,0221	0,0218	0,0214	0,0210	0,0207	0,0203	0,0200	0,0196	0,0192
1332,49	0,0181	0,0205	0,0201	0,0198	0,0195	0,0191	0,0188	0,0185	0,0182	0,0179	0,0175	0,0172
1836,07	0,0137	0,0154	0,0152	0,0149	0,0147	0,0144	0,0142	0,0140	0,0137	0,0135	0,0132	0,0130

Çizelge 4.8. Nokta kaynak için deneysel verime karşılık farklı DL değerlerinde PHITS MC ile elde edilen dedektör verim değerlerinin % farkları

Enerji (keV)	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	157,8	97,1	51,8	17,2	8,7	29,1	44,9	57,2	66,8	74,4	80,1
59,54	70,3	48,0	28,9	12,2	2,1	14,4	25,2	34,5	42,8	50,1	56,2
88,03	25,5	18,7	12,4	6,5	0,9	4,4	9,3	14,0	18,4	22,7	26,7
122,06	18,8	15,3	11,7	8,3	5,2	2,1	1,0	4,0	6,8	9,5	12,2
165,86	17,9	15,4	13,0	10,5	8,1	5,8	3,6	1,3	0,9	3,0	5,1
279,20	14,6	12,5	10,5	8,5	6,5	4,5	2,7	0,8	0,9	2,6	4,3
391,70	13,4	11,4	9,6	7,7	5,8	4,0	2,2	0,3	1,5	3,1	4,7
514,00	12,7	10,7	8,9	7,0	5,3	3,6	1,7	0,1	1,8	3,5	5,2
661,66	12,1	10,3	8,4	6,5	4,8	2,9	1,2	0,5	2,2	3,8	5,4
898,04	12,9	10,5	8,7	7,0	5,4	3,7	2,1	0,4	1,2	2,7	4,2
1173,23	12,6	9,9	8,2	6,7	4,9	3,2	1,6	0,1	1,7	3,4	4,9
1332,49	13,7	10,8	9,1	7,5	5,7	4,1	2,6	1,0	0,7	2,4	4,0
1836,07	13,3	10,5	8,8	7,1	5,4	3,8	2,4	0,8	0,8	2,5	3,9



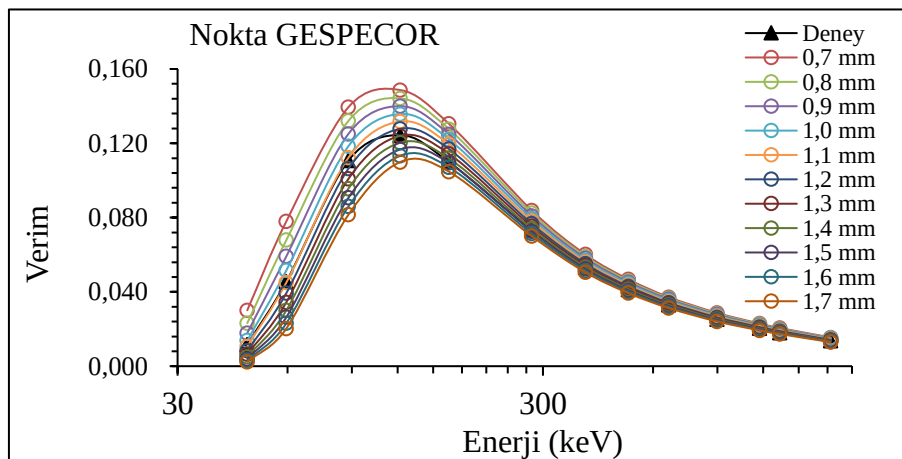
Şekil 4.2. Nokta kaynak için deneysel verim ve farklı DL değerlerinde PHITS MC'den elde edilen dedektör verim değerinin enerjiye karşılık değişimi

Çizelge 4.9. Nokta kaynak için deneysel verim ve farklı DL değerlerinde GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verim değerleri

Enerji (keV)	Verim	Toplam enerji pik verimi (FEPE)										
		0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	0,0117	0,0301	0,0232	0,0178	0,0138	0,0107	0,0083	0,0064	0,0050	0,0039	0,0031	0,0024
59,54	0,0456	0,0781	0,0679	0,0592	0,0516	0,0451	0,0394	0,0344	0,0301	0,0264	0,0231	0,0203
88,03	0,1107	0,1395	0,1321	0,1251	0,1185	0,1123	0,1064	0,1009	0,0956	0,0907	0,0860	0,0816
122,06	0,1244	0,1487	0,1442	0,1400	0,1358	0,1317	0,1278	0,1240	0,1203	0,1167	0,1133	0,1099
165,86	0,1099	0,1305	0,1276	0,1249	0,1221	0,1195	0,1169	0,1143	0,1119	0,1095	0,1071	0,1047
279,20	0,0731	0,0839	0,0824	0,0810	0,0795	0,0782	0,0767	0,0753	0,0740	0,0727	0,0714	0,0701
391,70	0,0531	0,0601	0,0591	0,0581	0,0571	0,0562	0,0552	0,0542	0,0533	0,0524	0,0515	0,0506
514,00	0,0412	0,0468	0,0460	0,0452	0,0445	0,0437	0,0429	0,0422	0,0414	0,0408	0,0400	0,0393
661,66	0,0330	0,0372	0,0366	0,0361	0,0354	0,0348	0,0341	0,0336	0,0330	0,0325	0,0319	0,0314
898,04	0,0252	0,0287	0,0283	0,0278	0,0273	0,0268	0,0263	0,0258	0,0254	0,0250	0,0245	0,0241
1173,23	0,0203	0,0229	0,0226	0,0222	0,0218	0,0214	0,0211	0,0207	0,0203	0,0200	0,0196	0,0193
1332,49	0,0180	0,0206	0,0202	0,0199	0,0196	0,0192	0,0189	0,0186	0,0183	0,0180	0,0177	0,0173
1836,07	0,0136	0,0155	0,0152	0,0149	0,0147	0,0144	0,0142	0,0139	0,0137	0,0135	0,0132	0,0130

Çizelge 4.10. Nokta kaynak için deneysel verim ve farklı DL değerlerinde GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verim değerlerinin % farkları

Enerji (keV)	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	158,0	98,3	52,8	18,0	8,6	29,1	44,9	57,1	66,5	73,8	79,5
59,54	71,3	49,1	29,9	13,3	1,1	13,6	24,4	33,9	42,1	49,2	55,5
88,03	25,9	19,3	13,0	7,0	1,4	3,9	8,9	13,7	18,1	22,3	26,3
122,06	19,5	15,9	12,5	9,2	5,9	2,8	0,3	3,3	6,1	8,9	11,6
165,86	18,8	16,0	13,6	11,1	8,7	6,4	4,0	1,8	0,4	2,5	4,7
279,20	14,8	12,8	10,8	8,8	6,9	5,0	3,1	1,2	0,6	2,3	4,1
391,70	13,2	11,2	9,4	7,5	5,7	3,8	2,0	0,3	1,4	3,1	4,9
514,00	13,5	11,6	9,7	7,9	5,9	4,2	2,3	0,5	1,1	2,9	4,6
661,66	12,6	10,8	9,2	7,2	5,2	3,3	1,6	0,1	1,8	3,5	5,1
898,04	13,2	11,6	9,8	8,1	6,2	4,3	2,6	1,0	0,7	2,3	4,0
1173,23	12,0	10,2	8,5	6,8	5,2	3,4	1,6	0,1	1,5	3,1	4,7
1332,49	13,0	11,3	9,7	8,0	6,1	4,7	3,1	1,5	0,1	1,7	3,5
1836,07	12,6	10,5	8,9	7,1	5,5	3,7	1,9	0,4	1,0	2,5	4,4



Şekil 4.3. Nokta kaynak için deneysel verim ve farklı DL değerlerinde GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verim değerinin enerjiye karşılık değişimi

Bu sonuçlar nokta kaynaktan salınan düşük enerjili fotonların en çok etkileneceği DL bölgesinin silindirik yapıdaki kristalin ön yüzü olduğu düşündürür. Bu nedenle DL'in tekrar değerlendirilmesi gerektiği açıktır.

4.2.2. Marinelli kaynaklar için tek parça ölü tabaka kalınlığı

46,5-1836 keV enerji aralığında foton salınımı yapan radyoaktif çekirdeklerden oluşan epoksi içeren Marinelli kapları dedektörün tam tepesine takılmıştır. 0,5 g/cc, 0,7 g/cc, 1,0 g/cc ve 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli radyoaktif kaynakların deneyden elde edilen verim değeri Çizelge 4.2- 4.5 arasında verilmiştir. Ölü tabaka kalınlığı PHITS ve GESPECOR'da 0,7 mm'den 1,7 mm' ye kadar 0,1 mm arttırılarak kalınlaştırılmıştır ve her bir DL kalınlık değeri için verim hesabı yapılmıştır. PHITS simülasyon programından elde edilen dedektör verim değerleri her bir yoğunluk için sırası ile Çizelge 4.11, 4.15, 4.19 ve 4.23'te verilmiştir. PHITS MC'den elde edilen verim değerlerinin deneysel verimlerden yüzdelik farkları Çizelge 4.12, 4.16, 4.20 ve 4.24'te gösterilmiştir. Benzer şekilde GESPECOR programından elde edilen dedektör verim değerleri Çizelge 4.13, 4.17, 4.21 ve 4.25'te verilmiştir. GESPECOR'dan elde edilen dedektör verim değerinin deneysel değerlerinden yüzde farkları Çizelge 4.14, 4.18, 4.22 ve 4.26'da sergilenmiştir. Bu dört kaynak için deneyden elde edilen verim değerleri PHITS ve GESPECOR'dan elde edilen verim değerleriyle karşılaştıran enerjiye karşılık verim eğrileri sırasıyla Şekil 4.4, 4.6, 4.8, 4.10'da ve Şekil 4.5, 4.7, 4.9, 4.11'de elde edilmiştir. 0,5 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli için deneysel verim ile üretici firmanın verdiği ölü tabaka kalınlığına (0,7 mm) göre PHITS programından elde edilen dedektör verimi ile karşılaştırıldığında %fark 46,5, 59,5 ve 88 keV'ta sırasıyla %152,6, %65,3 ve %24,8 bulunmuştur (Çizelge 4.12). Benzer durum GESPECOR programından elde edilen 0,5 g/cc yoğunluklu Marinelli kaynak için dedektör verimi ile karşılaştırıldığında 46,5, 59,5 ve 88 keV'ta sırasıyla %233,8 %98,3 ve %36,1'luk bir fark elde edilmiştir (Çizelge 4.14). Dört Marinelli kaynak için 100 keV üzerindeki enerjilerde PHITS ve GESPECOR programlarından elde edilen dedektör verim değerleri için ölü tabaka kalınlığı 0,7 mm' den başlayarak arttırıldıkça deneysel verim değerleriyle olan uyumun arttığı gözlenmiştir.

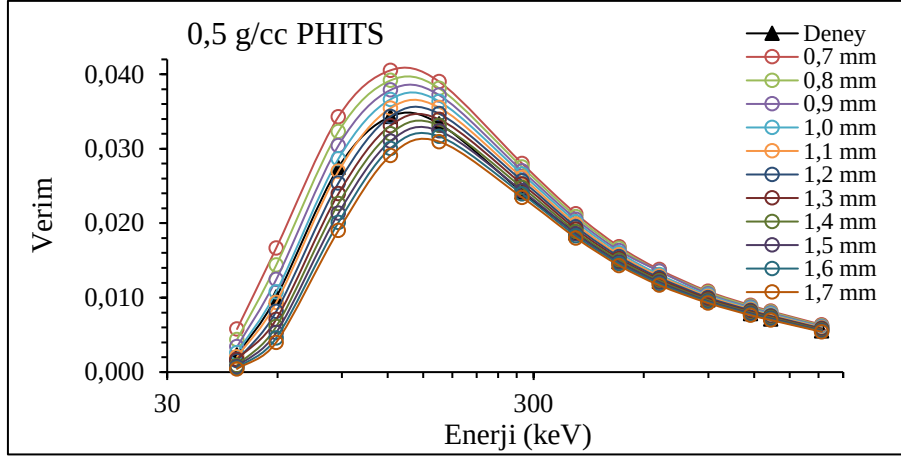
Çizelge 4.11. 0,5 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim ve farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen dedektör verim değerleri

Enerji (keV)	Verim	Toplam enerji pik verimi (FEPE)										
		0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	0,0023	0,0058	0,0044	0,0034	0,0026	0,0020	0,0016	0,0017	0,0009	0,0007	0,0006	0,0004
59,54	0,0101	0,0167	0,0144	0,0124	0,0108	0,0093	0,0082	0,0071	0,0061	0,0053	0,0046	0,0040
88,03	0,0275	0,0343	0,0323	0,0304	0,0287	0,0270	0,0254	0,0240	0,0226	0,0213	0,0201	0,0190
122,06	0,0343	0,0405	0,0392	0,0379	0,0366	0,0354	0,0343	0,0331	0,0320	0,0310	0,0300	0,0291
165,86	0,0334	0,0390	0,0381	0,0372	0,0364	0,0355	0,0347	0,0339	0,0331	0,0324	0,0317	0,0310
279,20	0,0242	0,0280	0,0275	0,0270	0,0266	0,0261	0,0257	0,0253	0,0248	0,0244	0,0239	0,0235
391,70	0,0187	0,0213	0,0209	0,0205	0,0202	0,0199	0,0195	0,0192	0,0189	0,0186	0,0183	0,0180
514,00	0,0148	0,0169	0,0166	0,0163	0,0160	0,0158	0,0155	0,0152	0,0150	0,0148	0,0146	0,0143
661,66	0,0122	0,0138	0,0136	0,0136	0,0131	0,0129	0,0127	0,0125	0,0123	0,0121	0,0119	0,0117
898,04	0,0097	0,0109	0,0107	0,0105	0,0103	0,0102	0,0100	0,0098	0,0097	0,0095	0,0094	0,0093
1173,23	0,0079	0,0090	0,0088	0,0087	0,0086	0,0084	0,0083	0,0082	0,0080	0,0079	0,0078	0,0076
1332,49	0,0071	0,0082	0,0081	0,0079	0,0078	0,0077	0,0075	0,0074	0,0073	0,0072	0,0071	0,0070
1836,07	0,0055	0,0064	0,0062	0,0061	0,0060	0,0060	0,0059	0,0058	0,0057	0,0056	0,0055	0,0054

Her iki simülasyon programında da 0,5 g/cc ve 0,7 g/cc yoğunluklu epoksi kaynak için 1,5 mm ölü tabaka kalınlığında deneysel verim değerleri ile en iyi uyum yakalanırken, 1,0 g/cc ve 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi kaynak için 1,6 mm ölü tabaka kalınlığında en iyi uyum yakalanmıştır. 100 keV enerji altında ise nokta kaynaktakine benzer olarak hesaplama ve deneysel verim değerleri arasında ciddi farklar gözlenmiştir.

Çizelge 4.12. 0,5 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim değerinin farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen dedektör verimine % farkları

Enerji (keV)	% FARK										
	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	152,6	91,2	48,7	13,7	11,1	32,3	25,4	60,7	68,1	75,4	81,2
59,54	65,3	42,6	23,4	7,1	7,4	19,1	29,6	39,3	47,3	54,4	60,3
88,03	24,8	17,5	10,7	4,2	1,9	7,6	12,9	17,7	22,4	26,9	30,8
122,06	18,1	14,2	10,4	6,8	3,3	0,0	3,5	6,7	9,6	12,4	15,3
165,86	16,9	14,3	11,6	9,1	6,6	4,1	1,8	0,5	2,8	5,0	7,1
279,20	15,9	13,9	11,8	10,0	8,1	6,3	4,5	2,6	0,8	1,0	2,9
391,70	13,8	11,8	10,0	8,1	6,3	4,5	2,8	1,0	0,7	2,1	3,6
514,00	13,9	12,1	10,2	8,3	6,5	4,7	3,0	1,5	0,2	1,7	3,3
661,66	13,0	11,2	11,2	7,5	5,8	4,1	2,3	0,7	0,9	2,6	4,3
898,04	12,0	10,5	8,6	6,9	5,1	3,6	1,9	0,2	1,3	2,3	3,8
1173,23	14,3	12,4	10,7	9,1	7,5	5,7	4,0	2,4	0,9	0,8	2,2
1332,49	15,1	13,5	11,6	10,0	8,1	6,5	5,1	3,5	1,9	0,5	1,0
1836,07	15,1	12,9	11,1	9,5	8,1	6,3	4,8	3,2	1,5	0,0	1,4



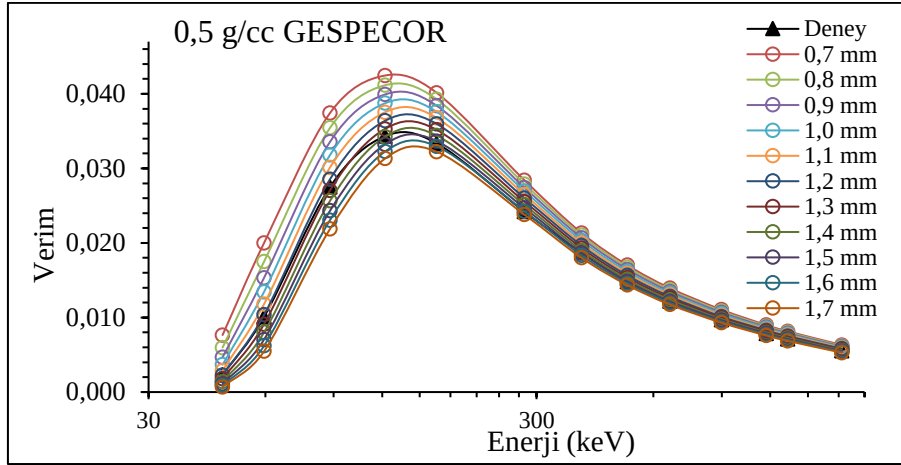
Şekil 4.4. 0,5 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deney verimi ile PHITS MC'den elde edilen dedektör veriminin enerjiye karşılık verim eğrisi

Çizelge 4.13. 0,5 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim ve farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verim değerleri

Enerji (keV)	Verim	Toplam enerji pik verimi (FEPE)										
		0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	0,0023	0,0077	0,0060	0,0047	0,0037	0,0029	0,0023	0,0018	0,0014	0,0011	0,0009	0,0007
59,54	0,0101	0,0200	0,0175	0,0153	0,0134	0,0118	0,0104	0,0091	0,0080	0,0070	0,0062	0,0055
88,03	0,0275	0,0374	0,0354	0,0336	0,0318	0,0301	0,0285	0,0270	0,0256	0,0243	0,0231	0,0219
122,06	0,0343	0,0425	0,0411	0,0399	0,0387	0,0375	0,0364	0,0353	0,0342	0,0332	0,0323	0,0313
165,86	0,0334	0,0401	0,0393	0,0384	0,0376	0,0368	0,0360	0,0352	0,0344	0,0337	0,0330	0,0322
279,20	0,0242	0,0284	0,0279	0,0274	0,0270	0,0265	0,0260	0,0256	0,0251	0,0247	0,0242	0,0238
391,70	0,0187	0,0213	0,0210	0,0207	0,0203	0,0200	0,0197	0,0193	0,0190	0,0187	0,0183	0,0180
514,00	0,0148	0,0170	0,0167	0,0165	0,0162	0,0159	0,0156	0,0154	0,0151	0,0148	0,0146	0,0144
661,66	0,0122	0,0139	0,0137	0,0135	0,0133	0,0130	0,0128	0,0126	0,0124	0,0121	0,0119	0,0117
898,04	0,0097	0,0111	0,0109	0,0107	0,0105	0,0103	0,0101	0,0100	0,0098	0,0096	0,0095	0,0093
1173,23	0,0079	0,0090	0,0088	0,0087	0,0086	0,0084	0,0083	0,0081	0,0080	0,0079	0,0077	0,0076
1332,49	0,0071	0,0081	0,0080	0,0079	0,0077	0,0076	0,0075	0,0074	0,0072	0,0071	0,0070	0,0069
1836,07	0,0055	0,0063	0,0062	0,0061	0,0060	0,0059	0,0058	0,0057	0,0056	0,0055	0,0054	0,0053

Çizelge 4.14. 0,5 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim değerinin farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verimine % farkları

Enerji (keV)	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	233,8	160,6	103,9	59,8	25,4	1,4	22,4	38,8	51,7	61,9	69,9
59,54	98,3	73,6	52,0	33,3	17,0	2,8	9,7	20,6	30,1	38,5	45,8
88,03	36,1	28,8	22,0	15,6	9,6	3,8	1,7	6,8	11,6	16,2	20,5
122,06	23,7	19,9	16,3	12,9	9,4	6,0	2,8	0,2	3,2	6,0	8,7
165,86	20,3	17,7	15,2	12,8	10,3	7,9	5,5	3,2	1,0	1,1	3,3
279,20	17,5	15,4	13,4	11,5	9,5	7,6	5,7	3,8	2,0	0,3	1,6
391,70	14,2	12,5	10,6	8,8	6,9	5,2	3,4	1,6	0,1	1,9	3,6
514,00	14,9	13,0	11,1	9,3	7,4	5,6	3,8	2,1	0,2	1,4	3,0
661,66	14,5	12,6	10,7	8,8	7,1	5,2	3,4	1,6	0,3	2,0	3,7
898,04	14,1	12,2	10,4	8,6	6,5	4,6	3,1	1,4	0,2	2,0	3,5
1173,23	14,3	12,5	10,8	9,1	7,2	5,5	3,9	2,1	0,6	1,2	3,1
1332,49	14,5	12,9	11,0	9,3	7,7	6,0	4,0	2,3	0,6	1,1	2,9
1836,07	14,3	12,1	10,4	8,7	7,2	5,4	3,4	1,5	0,3	2,0	3,8



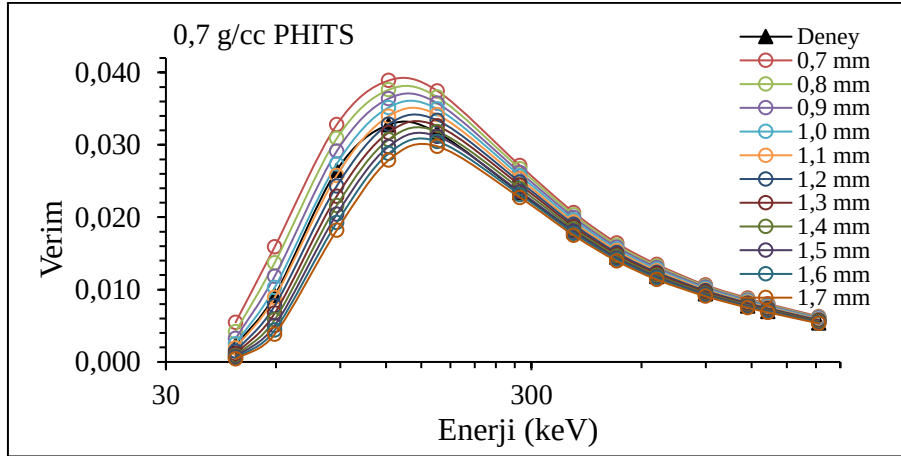
Şekil 4.5. 0,5 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deney verimi ile GESPECOR MCden elde edilen dedektör veriminin enerjiye karşılık verim eğrisi

Çizelge 4.15. 0,7 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim ve farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen dedektör verim değerleri

Enerji (keV)	Deneysel verim	Toplam enerji pik verimi (FEPE) PHITS										
		0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	0,0023	0,0055	0,0042	0,0033	0,0025	0,0019	0,0015	0,0011	0,0009	0,0007	0,0005	0,0004
59,54	0,0092	0,0159	0,0137	0,0118	0,0103	0,0089	0,0078	0,0067	0,0058	0,0050	0,0044	0,0038
88,03	0,0265	0,0328	0,0309	0,0291	0,0274	0,0258	0,0243	0,0229	0,0216	0,0204	0,0193	0,0182
122,06	0,0328	0,0389	0,0376	0,0364	0,0352	0,0340	0,0328	0,0317	0,0307	0,0298	0,0288	0,0279
165,86	0,0317	0,0375	0,0366	0,0358	0,0350	0,0342	0,0334	0,0326	0,0318	0,0312	0,0305	0,0298
279,20	0,0234	0,0271	0,0267	0,0262	0,0257	0,0253	0,0249	0,0244	0,0240	0,0235	0,0231	0,0227
391,70	0,0181	0,0207	0,0203	0,0200	0,0196	0,0193	0,0190	0,0187	0,0184	0,0181	0,0178	0,0175
514,00	0,0145	0,0164	0,0161	0,0159	0,0156	0,0154	0,0151	0,0149	0,0146	0,0144	0,0142	0,0139
661,66	0,0118	0,0135	0,0133	0,0130	0,0128	0,0126	0,0124	0,0122	0,0120	0,0118	0,0116	0,0114
898,04	0,0094	0,0106	0,0105	0,0103	0,0102	0,0100	0,0098	0,0097	0,0095	0,0094	0,0092	0,0091
1173,23	0,0077	0,0088	0,0087	0,0085	0,0084	0,0082	0,0081	0,0080	0,0079	0,0077	0,0076	0,0075
1332,49	0,0070	0,0080	0,0079	0,0078	0,0076	0,0075	0,0074	0,0073	0,0072	0,0071	0,0070	0,0068
1836,07	0,0054	0,0063	0,0062	0,0061	0,0060	0,0059	0,0058	0,0057	0,0056	0,0055	0,0054	0,0053

Çizelge 4.16. 0,7 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim değerinin farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen dedektör verimine % farkları

Enerji (keV)	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	139,8	82,9	42,3	9,9	15,4	35,7	51,1	62,4	69,6	76,6	81,9
59,54	72,8	49,0	28,7	11,8	3,3	15,7	26,8	36,6	45,2	52,3	58,5
88,03	23,8	16,6	9,9	3,3	2,7	8,2	13,5	18,4	22,9	27,3	31,3
122,06	18,7	14,8	11,0	7,3	3,6	0,2	3,2	6,2	9,2	12,1	14,9
165,86	18,2	15,6	12,9	10,4	7,9	5,4	3,0	0,6	1,2	3,7	5,9
279,20	16,1	14,1	12,0	10,1	8,2	6,4	4,6	2,6	0,6	1,1	2,8
391,70	14,1	12,2	10,3	8,4	6,7	4,9	3,3	1,5	0,2	1,8	3,4
514,00	13,6	11,6	9,8	8,1	6,3	4,4	2,9	1,2	0,5	2,0	3,5
661,66	14,3	12,4	10,7	8,7	6,9	4,9	3,4	1,6	0,1	1,6	3,5
898,04	12,9	11,5	9,9	8,1	6,5	4,8	3,0	1,4	0,2	1,6	3,0
1173,23	14,2	12,2	10,7	8,9	7,1	5,7	4,0	2,2	0,5	1,0	2,4
1332,49	14,7	12,9	11,2	9,5	7,8	6,2	4,5	3,1	1,8	0,2	1,5
1836,07	16,9	15,0	13,1	11,3	9,2	7,7	6,3	4,4	2,6	0,9	0,4



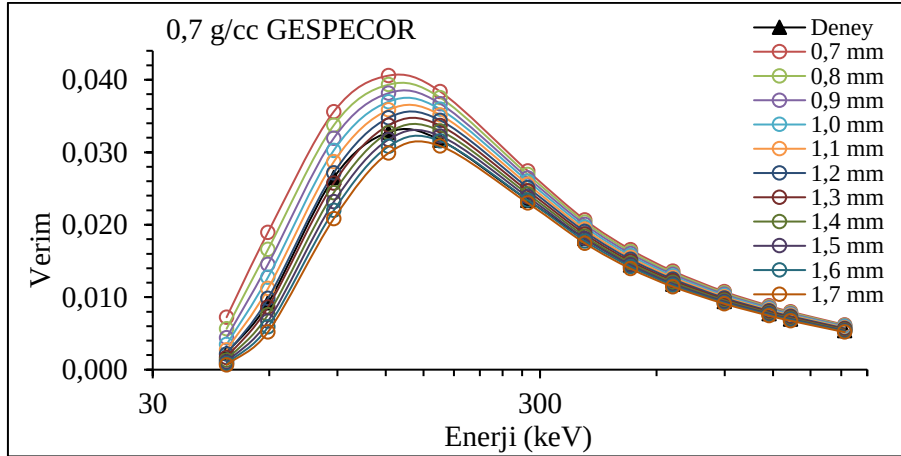
Şekil 4.6. 0,7 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deney verimi ile PHITS MC'den elde edilen dedektör veriminin enerjiye karşılık verim eğrisi

Çizelge 4.17. 0,7 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim ve farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verim değerleri

Enerji (keV)	Verim	Toplam enerji pik verimi (FEPE) GESPECOR										
		0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	0,0023	0,0072	0,0057	0,0044	0,0035	0,0027	0,0021	0,0017	0,0013	0,0010	0,0008	0,0007
59,54	0,0092	0,0019	0,0017	0,0145	0,0128	0,0112	0,0098	0,0087	0,0076	0,0067	0,0059	0,0052
88,03	0,0265	0,0356	0,0337	0,0319	0,0303	0,0287	0,0272	0,0258	0,0244	0,0232	0,0220	0,0208
122,06	0,0328	0,0406	0,0393	0,0382	0,0370	0,0358	0,0348	0,0337	0,0327	0,0318	0,0308	0,0299
165,86	0,0317	0,0384	0,0375	0,0367	0,0359	0,0352	0,0344	0,0337	0,0329	0,0322	0,0316	0,0309
279,20	0,0234	0,0274	0,0269	0,0265	0,0260	0,0256	0,0251	0,0247	0,0242	0,0238	0,0234	0,0230
391,70	0,0181	0,0207	0,0204	0,0200	0,0197	0,0194	0,0190	0,0187	0,0184	0,0181	0,0178	0,0175
514,00	0,0145	0,0166	0,0163	0,0160	0,0157	0,0155	0,0152	0,0149	0,0147	0,0145	0,0142	0,0140
661,66	0,0118	0,0136	0,0134	0,0132	0,0129	0,0127	0,0125	0,0123	0,0121	0,0118	0,0116	0,0114
898,04	0,0094	0,0108	0,0106	0,0104	0,0102	0,0101	0,0099	0,0097	0,0096	0,0094	0,0092	0,0091
1173,23	0,0077	0,0088	0,0087	0,0085	0,0084	0,0082	0,0081	0,0080	0,0078	0,0077	0,0076	0,0074
1332,49	0,0070	0,0080	0,0079	0,0077	0,0076	0,0075	0,0074	0,0072	0,0071	0,0070	0,0069	0,0067
1836,07	0,0054	0,0062	0,0061	0,0060	0,0059	0,0058	0,0057	0,0056	0,0055	0,0054	0,0053	0,0052

Çizelge 4.18. 0,7 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim değerinin farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verimine % farkları

Enerji (keV)	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	216,7	147,4	93,6	51,9	19,2	6,2	26,2	41,8	54,1	63,7	71,3
59,54	79,4	82,0	58,0	38,6	21,7	6,9	6,0	17,3	27,2	35,9	43,5
88,03	34,4	27,3	20,6	14,2	8,3	2,6	2,8	7,8	12,6	17,1	21,4
122,06	23,8	20,0	16,4	12,8	9,4	6,1	2,9	0,1	3,1	6,0	8,7
165,86	21,1	18,5	15,9	13,5	11,0	8,7	6,4	4,1	2,2	0,3	2,5
279,20	17,3	15,2	13,2	11,3	9,4	7,4	5,5	3,6	1,9	0,1	1,7
391,70	14,2	12,5	10,6	8,8	7,0	5,2	3,4	1,6	0,1	1,9	3,6
514,00	14,7	12,7	10,7	9,0	7,1	5,2	3,4	1,7	0,1	1,6	3,5
661,66	15,3	13,4	11,6	9,7	7,9	6,0	4,2	2,4	0,5	1,2	2,9
898,04	14,4	12,5	10,6	8,9	7,1	5,4	3,6	2,0	0,3	1,4	2,8
1173,23	14,1	12,2	10,6	9,0	7,0	5,3	3,7	2,1	0,5	1,4	3,0
1332,49	14,3	12,5	10,5	8,9	7,2	5,5	3,7	2,0	0,4	1,2	3,0
1836,07	15,1	13,4	11,6	10,0	8,0	6,1	4,2	2,3	0,3	1,5	3,1



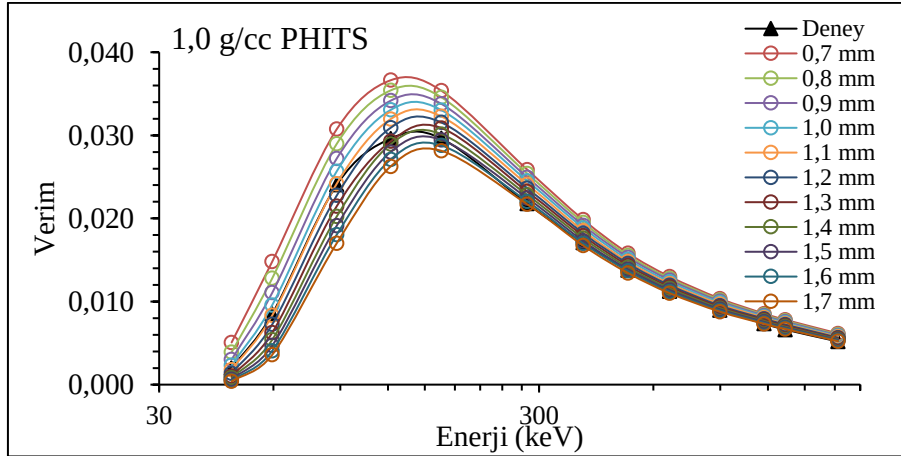
Şekil 4.7. 0,7 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deney verimi ile GESPECOR MC'den elde edilen dedektör veriminin enerjiye karşılık verim eğrisi

Çizelge 4.19. 1,0 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim ve farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen dedektör verim değerleri

Enerji (keV)	Verim	Toplam enerji pik verimi (FEPE) PHITS										
		0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	0,0020	0,0051	0,0039	0,0030	0,0023	0,0018	0,0014	0,0010	0,0008	0,0006	0,0005	0,0004
59,54	0,0085	0,0148	0,0128	0,0111	0,0096	0,0083	0,0073	0,0063	0,0054	0,0047	0,0041	0,0036
88,03	0,0241	0,0307	0,0290	0,0272	0,0257	0,0242	0,0228	0,0215	0,0202	0,0191	0,0181	0,0170
122,06	0,0296	0,0366	0,0354	0,0342	0,0331	0,0320	0,0309	0,0293	0,0289	0,0280	0,0271	0,0263
165,86	0,0296	0,0354	0,0346	0,0338	0,0330	0,0323	0,0316	0,0309	0,0302	0,0295	0,0288	0,0281
279,20	0,0218	0,0259	0,0254	0,0249	0,0245	0,0241	0,0236	0,0232	0,0228	0,0224	0,0221	0,0217
391,70	0,0171	0,0199	0,0195	0,0192	0,0189	0,0185	0,0182	0,0179	0,0176	0,0173	0,0170	0,0167
514,00	0,0138	0,0158	0,0156	0,0153	0,0151	0,0148	0,0146	0,0143	0,0141	0,0139	0,0137	0,0134
661,66	0,0112	0,0130	0,0128	0,0126	0,0124	0,0121	0,0120	0,0118	0,0116	0,0114	0,0112	0,0110
898,04	0,0090	0,0104	0,0102	0,0100	0,0099	0,0097	0,0095	0,0094	0,0092	0,0091	0,0089	0,0088
1173,23	0,0073	0,0085	0,0084	0,0083	0,0082	0,0081	0,0079	0,0078	0,0077	0,0076	0,0074	0,0073
1332,49	0,0066	0,0078	0,0077	0,0076	0,0074	0,0073	0,0072	0,0071	0,0070	0,0069	0,0068	0,0067
1836,07	0,0052	0,0062	0,0060	0,0059	0,0058	0,0057	0,0056	0,0056	0,0055	0,0054	0,0053	0,0052

Çizelge 4.20. 1,0 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim değerinin farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen dedektör verimine % farkları

Enerji (keV)	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	157,2	97,5	53,1	17,3	8,5	31,1	47,9	58,7	68,0	75,0	80,4
59,54	74,0	50,3	29,9	12,5	2,1	14,8	26,5	36,5	44,8	52,1	57,8
88,03	27,8	20,5	13,2	6,8	0,5	5,4	10,7	15,8	20,5	24,9	29,2
122,06	23,7	19,6	15,4	11,7	8,0	4,4	1,1	2,3	5,4	8,5	11,3
165,86	19,4	16,8	14,1	11,6	9,1	6,6	4,3	1,9	0,4	2,7	4,9
279,20	18,8	16,6	14,6	12,6	10,6	8,5	6,7	4,8	3,1	1,3	0,3
391,70	16,3	14,4	12,4	10,6	8,5	6,7	5,0	3,2	1,3	0,3	2,0
514,00	14,9	12,9	11,2	9,4	7,5	5,8	4,1	2,5	0,9	0,7	2,4
661,66	16,0	14,0	12,3	10,4	8,3	6,7	4,9	3,3	1,6	0,2	1,8
898,04	15,4	13,6	12,0	10,3	8,4	6,4	4,7	3,1	1,6	0,0	1,5
1173,23	16,5	15,0	13,4	11,7	10,2	8,5	6,8	5,2	3,6	1,9	0,4
1332,49	17,8	16,1	14,4	12,6	10,9	9,4	7,5	5,7	4,3	3,0	1,6
1836,07	18,7	16,3	14,4	12,6	11,1	9,3	7,7	5,9	4,5	2,9	1,3



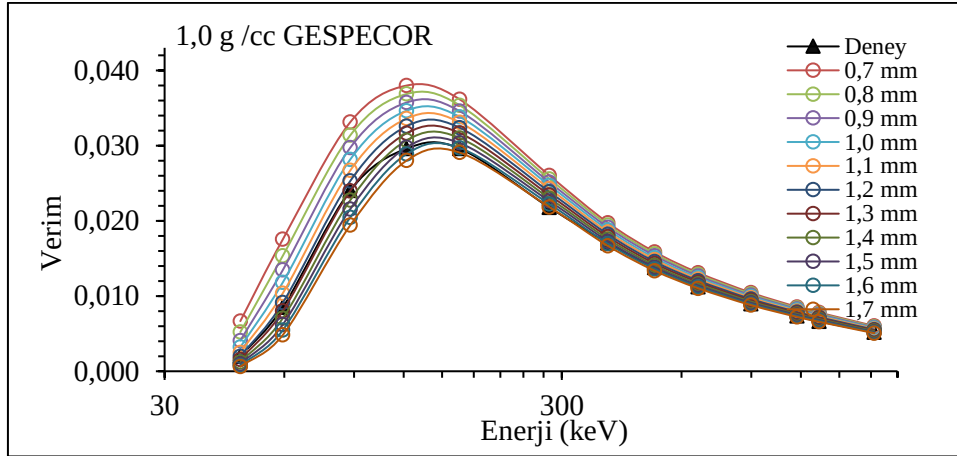
Şekil 4.8. 1,0 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deney verimi ile PHITS MC'den elde edilen dedektör veriminin enerjiye karşılık verim eğrisi

Çizelge 4.21. 1,0 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim ve farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verim değerleri

Enerji (keV)	Verim	Toplam enerji pik verimi (FEPE) GESPECOR										
		0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	0,0020	0,0067	0,0052	0,0041	0,0032	0,0025	0,0020	0,0016	0,0012	0,0010	0,0008	0,0006
59,54	0,0085	0,0018	0,0154	0,0135	0,0118	0,0104	0,0091	0,0080	0,0071	0,0062	0,0055	0,0048
88,03	0,0241	0,0331	0,0314	0,0297	0,0282	0,0267	0,0253	0,0240	0,0228	0,0216	0,0205	0,0194
122,06	0,0296	0,0380	0,0369	0,0357	0,0346	0,0336	0,0326	0,0316	0,0307	0,0298	0,0289	0,0280
165,86	0,0296	0,0362	0,0354	0,0346	0,0338	0,0331	0,0324	0,0317	0,0310	0,0304	0,0297	0,0291
279,20	0,0218	0,0260	0,0256	0,0251	0,0247	0,0243	0,0239	0,0234	0,0230	0,0226	0,0222	0,0218
391,70	0,0171	0,0197	0,0195	0,0191	0,0188	0,0185	0,0182	0,0179	0,0176	0,0173	0,0170	0,0167
514,00	0,0138	0,0159	0,0156	0,0154	0,0151	0,0148	0,0146	0,0143	0,0141	0,0138	0,0136	0,0134
661,66	0,0112	0,0131	0,0129	0,0127	0,0125	0,0123	0,0120	0,0118	0,0116	0,0114	0,0112	0,0110
898,04	0,0090	0,0104	0,0103	0,0101	0,0099	0,0098	0,0096	0,0094	0,0093	0,0091	0,0089	0,0088
1173,23	0,0073	0,0086	0,0084	0,0083	0,0082	0,0080	0,0079	0,0078	0,0076	0,0075	0,0074	0,0072
1332,49	0,0066	0,0078	0,0077	0,0076	0,0074	0,0073	0,0072	0,0071	0,0069	0,0068	0,0067	0,0066
1836,07	0,0052	0,0060	0,0059	0,0058	0,0057	0,0056	0,0055	0,0054	0,0053	0,0052	0,0051	0,0051

Çizelge 4.22. 1,0 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim değerinin farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verimine % farkları

Enerji (keV)	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	238,0	164,2	106,9	62,4	27,6	0,4	20,9	37,6	50,8	61,1	69,2
59,54	106,1	80,4	58,2	38,8	21,9	7,1	5,8	17,1	27,0	35,7	43,3
88,03	37,7	30,4	23,6	17,1	11,0	5,2	0,3	5,4	10,3	14,9	19,3
122,06	28,3	24,5	20,7	17,0	13,5	10,0	6,9	3,7	0,6	2,4	5,4
165,86	22,1	19,4	16,8	14,3	11,8	9,4	7,1	4,8	2,6	0,4	1,7
279,20	19,5	17,4	15,4	13,5	11,5	9,5	7,6	5,7	3,9	2,1	0,2
391,70	15,7	14,0	12,1	10,2	8,4	6,6	4,8	3,0	1,3	0,6	2,3
514,00	15,2	13,4	11,6	9,5	7,8	5,8	4,0	2,2	0,4	1,3	2,9
661,66	16,8	14,9	13,0	11,1	9,3	7,4	5,6	3,7	1,8	0,1	1,6
898,04	16,5	14,7	12,9	11,1	9,3	7,5	5,6	3,8	2,0	0,2	1,3
1173,23	16,7	14,9	13,1	11,5	9,5	7,7	6,1	4,5	2,7	0,9	0,7
1332,49	17,9	16,1	14,2	12,4	10,6	8,8	7,0	5,2	3,5	1,7	0,1
1836,07	16,0	14,1	12,3	10,5	8,8	7,0	5,1	3,3	1,2	0,2	1,8



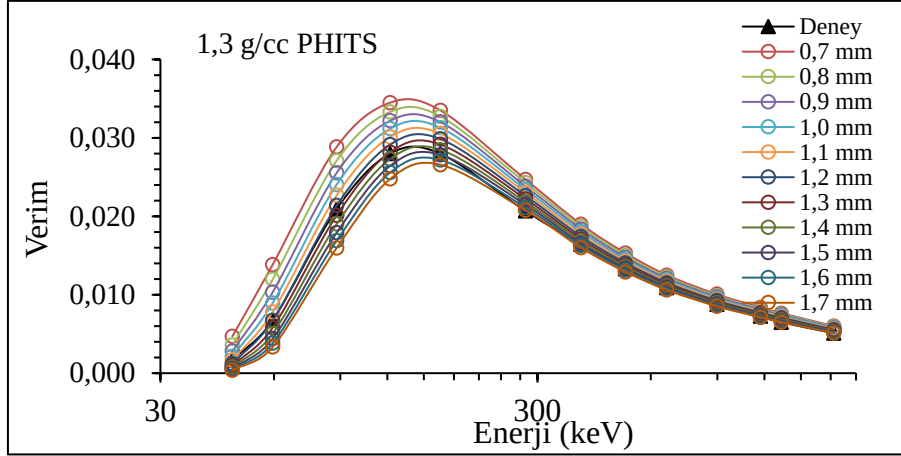
Şekil 4.9. 1,0 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deney verimi ile GESPECOR MC'den elde edilen dedektör veriminin enerjiye karşılık verim eğrisi

Çizelge 4.23. 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim ve farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen dedektör verim değerleri

Enerji (keV)	Verim	Toplam enerji pik verimi (FEPE) PHITS										
		0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	0,0017	0,0047	0,0036	0,0028	0,0021	0,0017	0,0012	0,0010	0,0008	0,0006	0,0005	0,0004
59,54	0,0067	0,0138	0,0120	0,0103	0,0089	0,0078	0,0067	0,0058	0,0051	0,0044	0,0038	0,0033
88,03	0,0209	0,0288	0,0271	0,0255	0,0241	0,0227	0,0214	0,0201	0,0190	0,0179	0,0169	0,0160
122,06	0,0280	0,0345	0,0333	0,0322	0,0312	0,0301	0,0291	0,0282	0,0273	0,0264	0,0256	0,0248
165,86	0,0280	0,0335	0,0327	0,0320	0,0313	0,0305	0,0299	0,0292	0,0285	0,0278	0,0272	0,0266
279,20	0,0207	0,0247	0,0243	0,0238	0,0234	0,0230	0,0226	0,0222	0,0218	0,0215	0,0211	0,0208
391,70	0,0164	0,0190	0,0187	0,0184	0,0180	0,0177	0,0174	0,0171	0,0168	0,0165	0,0163	0,0160
514,00	0,0133	0,0153	0,0150	0,0148	0,0145	0,0143	0,0141	0,0138	0,0136	0,0134	0,0131	0,0129
661,66	0,0109	0,0125	0,0123	0,0121	0,0119	0,0117	0,0115	0,0113	0,0111	0,0110	0,0108	0,0106
898,04	0,0088	0,0101	0,0099	0,0097	0,0096	0,0094	0,0092	0,0091	0,0090	0,0088	0,0087	0,0085
1173,23	0,0072	0,0084	0,0082	0,0081	0,0080	0,0079	0,0077	0,0076	0,0074	0,0073	0,0072	0,0071
1332,49	0,0065	0,0076	0,0075	0,0074	0,0073	0,0072	0,0071	0,0069	0,0068	0,0067	0,0066	0,0065
1836,07	0,0051	0,0060	0,0059	0,0058	0,0057	0,0056	0,0055	0,0054	0,0054	0,0053	0,0052	0,0051

Çizelge 4.24. 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim değerinin farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde dedektör verimine % farkları

Enerji (keV)	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	180,3	114,9	27,3	27,3	1,0	25,9	42,4	54,6	64,6	72,2	78,3
59,54	105,1	77,1	32,6	32,6	15,7	0,4	13,9	25,1	34,9	43,3	50,6
88,03	37,7	29,5	14,8	14,8	8,3	2,0	3,9	9,2	14,5	19,3	23,7
122,06	23,2	19,0	11,3	11,3	7,6	4,0	0,6	2,5	5,6	8,6	11,6
165,86	19,7	17,1	11,9	11,9	9,2	6,8	4,3	1,9	0,4	2,7	4,9
279,20	19,4	17,4	13,3	13,3	11,4	9,4	7,5	5,6	3,9	2,1	0,4
391,70	15,6	13,7	9,8	9,8	7,8	6,0	4,1	2,4	0,7	1,0	2,6
514,00	15,0	12,9	9,0	9,0	7,2	5,6	3,8	2,0	0,4	1,2	3,0
661,66	14,7	12,7	9,1	9,1	7,4	5,7	3,8	2,0	0,6	1,1	2,8
898,04	14,6	12,6	9,0	9,0	7,1	5,6	3,8	2,4	0,7	0,8	2,3
1173,23	15,5	13,5	10,1	10,1	8,7	6,9	4,8	3,2	1,7	0,3	1,2
1332,49	17,9	16,1	12,8	12,8	10,9	9,3	7,4	5,8	4,0	2,2	0,9
1836,07	17,7	16,0	12,0	12,0	10,4	8,8	7,1	5,5	3,8	2,2	0,5



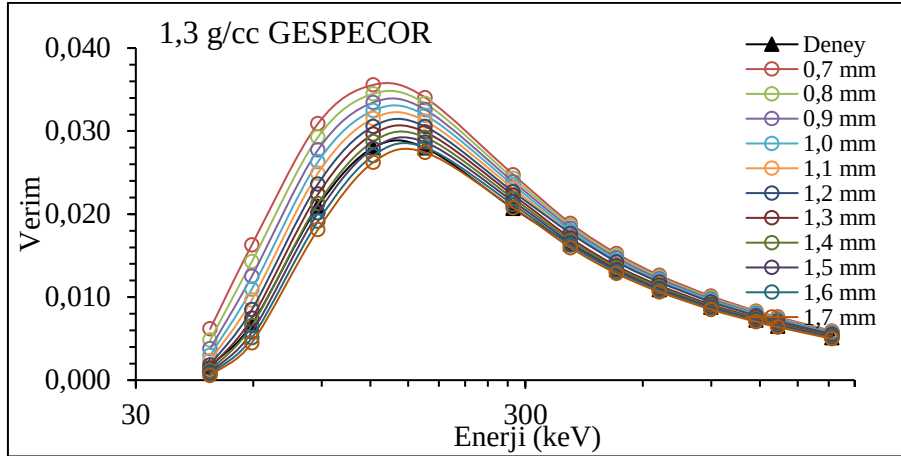
Şekil 4.10. 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deney verimi ile PHITS MC'den elde edilen dedektör veriminin enerjiye karşılık verim eğrisi

Çizelge 4.25. 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim ve farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verim değerleri

Enerji (keV)	Verim	Toplam enerji pik verimi (FEPE) GESPECOR										
		0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	0,0017	0,0062	0,0048	0,0038	0,0030	0,0023	0,0018	0,0014	0,0011	0,0009	0,0007	0,0006
59,54	0,0067	0,0163	0,0143	0,0125	0,0110	0,0097	0,0085	0,0075	0,0066	0,0058	0,0051	0,0045
88,03	0,0209	0,0309	0,0293	0,0277	0,0263	0,0249	0,0236	0,0224	0,0213	0,0202	0,0191	0,0181
122,06	0,0280	0,0356	0,0345	0,0334	0,0325	0,0315	0,0306	0,0296	0,0287	0,0279	0,0271	0,0262
165,86	0,0280	0,0340	0,0333	0,0326	0,0319	0,0312	0,0305	0,0299	0,0293	0,0287	0,0280	0,0274
279,20	0,0207	0,0247	0,0243	0,0239	0,0235	0,0231	0,0227	0,0223	0,0219	0,0215	0,0211	0,0208
391,70	0,0164	0,0189	0,0186	0,0183	0,0180	0,0177	0,0171	0,0168	0,0165	0,0162	0,0160	0,0160
514,00	0,0133	0,0153	0,0150	0,0148	0,0145	0,0143	0,0143	0,0138	0,0135	0,0133	0,0131	0,0128
661,66	0,0109	0,0126	0,0124	0,0122	0,0120	0,0118	0,0118	0,0114	0,0112	0,0110	0,0108	0,0106
898,04	0,0088	0,0101	0,0100	0,0098	0,0096	0,0094	0,0094	0,0091	0,0090	0,0088	0,0087	0,0085
1173,23	0,0072	0,0083	0,0082	0,0080	0,0079	0,0078	0,0078	0,0075	0,0074	0,0073	0,0071	0,0070
1332,49	0,0065	0,0076	0,0075	0,0074	0,0072	0,0071	0,0071	0,0069	0,0067	0,0066	0,0065	0,0064
1836,07	0,0051	0,0059	0,0058	0,0057	0,0056	0,0055	0,0055	0,0053	0,0052	0,0052	0,0051	0,0050

Çizelge 4.26. 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deneysel verim değerinin farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen dedektör verimine % farkları

Enerji (keV)	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm	1,7 mm
46,54	269,3	188,8	126,3	77,7	39,7	9,9	13,4	31,6	46,0	57,3	66,2
59,54	141,4	111,5	85,5	62,8	43,0	25,8	10,6	2,6	14,3	24,4	33,4
88,03	47,6	39,8	32,5	25,6	19,0	12,8	7,0	1,5	3,8	8,7	13,4
122,06	27,0	23,2	19,5	16,0	12,5	9,1	5,8	2,7	0,4	3,4	6,3
165,86	21,7	19,1	16,6	14,2	11,7	9,3	6,9	4,6	2,5	0,3	1,9
279,20	19,7	17,6	15,6	13,7	11,7	9,7	7,8	5,8	4,1	2,3	0,4
391,70	15,0	13,3	11,5	9,6	7,8	7,8	4,2	2,4	0,7	1,1	2,9
514,00	14,6	12,7	10,8	8,9	7,1	7,1	3,4	1,7	0,2	1,8	3,5
661,66	15,8	13,9	12,1	10,1	8,4	8,4	4,7	2,8	0,9	0,8	2,5
898,04	15,3	13,5	11,5	9,7	7,7	7,8	4,1	2,4	0,8	0,7	2,4
1173,23	14,8	13,0	11,2	9,4	7,5	7,6	4,1	2,6	1,0	0,8	2,4
1332,49	17,2	15,4	13,6	11,8	9,9	10,0	6,3	4,5	2,8	1,0	0,8
1836,07	16,2	14,2	12,5	10,5	8,8	8,9	5,0	3,3	1,5	0,2	1,7



Şekil 4.11. 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynağın deney verimi ile GESPECOR MC'den elde edilen dedektör veriminin enerjiye karşılık verim eğrisi

4.3. Deneysel Verime Karşılık Ön ve Yan Ölü Tabaka Kalınlığı Etkisinin Monte Carlo Uygulamaları

DL tabakasının homojen olmayan dağılım sergilemesi ve koaksiyel yapıdaki Ge kristalinin ön ve yan ölü tabaka kalınlığının farklı olacağı ile ilgili görüşler (Ahmed ve diğerleri, 2009) dikkate alınarak yekpare DL için yapılan hesapların benzeri parçalı DL için tekrarlanmıştır. Germanyum kristalinin dış ölü tabakası ön ölü tabaka ve yan ölü tabaka olarak ikiye ayrılmıştır. Kontak almak amacıyla Germanyum kristalinin üst yüzeyine implante edilmiş lityum atomları uygulanan voltajın etkisiyle oda sıcaklığında bile Germanyum kristalinin derinliklerine rastgele davranış sergileyerek difüze eder, bu nedenle ölü tabaka kalınlığı kristal yüzeyinde heterojen bir dağılım gösterir (Huy,2007; Pullia, 2010; Modarresi ve diğerleri, 2017).

Bu sebeple GESPECOR programında ön ölü tabaka kalınlığı üretici firma değeri olan 0,7 mm'den 1,2 mm'ye yan ölü tabaka kalınlığı ise 0,7 mm'den (üretici firma değeri) 1,9 mm'ye kadar kalınlaştırılmıştır. GESPECOR MC programında ölü tabaka kalınlaştırılırken seçilen bu rakamlar deneysel verim değerinden olan yüzde farklara göre sınırlandırılmıştır. HPGe dedektörün germanyum kristalinin yüzeyinde bulunan ölü tabaka kalınlığı olası tüm yan ölü tabaka kalınlıklarına karşı yukarıda belirtilen boyutlarda incelenmiştir. Aynı şekilde her bir ön ölü tabaka kalınlığı olan 0,8, 0,9, 1,0, 1,1 ve 1,2 değerleri sabit tutularak 1,9 mm yan ölü tabaka kalınlığına ulaşana dek hesaplatılmıştır. GESPECOR programından elde edilen ölü tabaka dağılımının deneyden elde edilen nokta kaynak verim değerine karşılık %farkları Çizelge 4.27'de verilmiştir. Ön ölü tabaka kalınlığı 1,1 mm yan ölü tabaka kalınlığı 1,7

mm’de 46,5, 59 ve 88 keV’de sırasıyla %9,1, %2,1 ve %0,4 fark elde edilmiştir. Ön ölü tabaka kalınlığı artırıldıkça 88 keV altındaki enerjilerin veriminin azaldığı görülmüştür. Yine aynı şekilde yan ölü tabaka kalınlığındaki artış verimdeki azalışa sebep olmuştur. Özellikle, düşük enerjili fotonlar, dedektör kristalinde çok derinlere gitmeden önce yüzeye yakın bölgede soğurulduğundan deney ve GESPECOR programı arasında %158’lik bir fark oluşmuştur. Germanyum kristalinin yan DL’si kalınlaştığında GESPECOR MC programından elde edilen dedektör verimi, 100 keV’tan düşük enerjilerde çok düşük olduğu görülmüştür (Andreotti ve diğerleri, 2014; Azli ve Chaoui, 2015).

Çizelge 4.27. GESPECOR programında ölü tabaka kalınlığı için tarama çalışması

ENERJİ (keV)	ÖN / YAN	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,1 mm	1,2 mm
46,54	0,7 mm	158,0	98,5	53,1	18,4	8,3	28,8
59,54		71,3	49,4	30,4	13,9	0,4	12,9
88,03		25,9	19,6	13,6	7,9	2,5	2,6
122,06		19,5	16,4	13,3	10,3	7,4	4,6
165,86		18,8	16,6	14,5	12,6	10,6	8,7
279,20		14,8	13,4	12,0	10,6	9,3	7,9
391,70		13,2	11,9	10,6	9,4	8,2	7,0
514,00		13,5	12,3	11,1	10,1	8,9	7,8
661,66		12,6	11,0	10,4	9,4	8,3	7,1
898,04		13,2	12,3	11,3	10,3	9,5	8,5
1173,23		12,0	11,1	10,1	9,1	8,3	7,2
1332,49		13,0	12,1	11,3	10,3	9,5	8,7
1836,07		12,6	11,6	10,7	10,0	9,0	8,0
46,54	0,8 mm	157,7	98,3	53,0	18,3	8,4	28,9
59,54		70,9	49,1	30,1	13,7	0,6	13,0
88,03		25,6	19,3	13,3	7,6	2,2	2,9
122,06		19,1	15,9	12,9	10,0	7,0	4,2
165,86		18,0	16,0	14,0	12,1	10,2	8,3
279,20		14,2	12,8	11,4	10,0	8,7	7,4
391,70		12,5	11,2	10,0	8,8	7,6	6,4
514,00		12,8	11,6	10,5	9,3	8,2	7,0
661,66		12,0	10,8	9,8	8,8	7,7	6,5
898,04		12,5	11,6	10,6	9,7	8,6	7,5
1173,23		11,2	10,2	9,3	8,4	7,4	6,5
1332,49		12,1	11,3	10,4	9,5	8,7	7,9
1836,07		11,6	10,5	9,8	8,9	8,0	7,1
46,54	0,9 mm	157,4	98,1	52,8	18,2	8,5	28,9
59,54		70,6	48,8	29,9	13,5	0,8	13,2
88,03		25,2	18,9	13,0	7,3	2,0	3,1
122,06		18,7	15,6	12,5	9,6	6,7	3,9
165,86		17,6	15,6	13,6	11,6	9,7	7,8
279,20		13,6	12,2	10,8	9,4	8,1	6,8
391,70		11,8	10,6	9,4	8,1	6,9	5,8
514,00		12,0	10,8	9,7	8,6	7,4	6,3
661,66		11,2	10,2	9,2	8,1	7,0	5,9
898,04		11,7	10,8	9,8	8,9	7,8	6,7
1173,23		10,3	9,4	8,5	7,8	6,6	5,6
1332,49		11,2	10,6	9,7	8,8	7,8	7,0
1836,07		10,5	9,8	8,9	8,1	7,3	6,5
46,54	1,0 mm	157,1	97,9	52,7	18,0	8,5	29,0
59,54		70,3	48,5	29,7	13,3	0,9	13,3
88,03		24,9	18,6	12,6	7,0	1,7	3,4
122,06		18,3	15,2	12,1	9,2	6,3	3,5
165,86		17,0	15,1	13,1	11,1	9,2	7,3
279,20		13,0	11,6	10,2	8,8	7,5	6,2
391,70		11,2	9,9	8,7	7,5	6,3	5,1
514,00		11,3	10,1	9,0	7,9	6,7	5,5
661,66		10,4	9,4	8,3	7,2	6,1	5,0

Çizelge 4.27. (devam) GESPECOR programında ölü tabaka kalınlığı için tarama çalışması

898,04		11,0	10,0	9,1	8,1	7,0	6,1
1173,23		9,4	8,7	7,8	6,8	5,8	4,9
1332,49		10,5	9,9	8,9	8,0	7,0	6,0
1836,07		9,9	9,1	8,2	7,1	6,3	5,4
46,54	1,1 mm	156,8	97,7	52,5	18,0	8,6	29,0
59,54		69,9	48,2	29,4	13,1	1,1	13,4
88,03		24,5	18,3	12,3	6,7	1,4	3,7
122,06		17,9	14,8	11,8	8,8	5,9	3,1
165,86		16,5	14,5	12,5	10,6	8,7	6,8
279,20		12,4	11,0	9,7	8,3	6,9	5,6
391,70		10,5	9,3	8,1	6,8	5,7	4,5
514,00		10,6	9,4	8,3	7,2	5,9	4,8
661,66		9,7	8,6	7,5	6,3	5,2	4,0
898,04		10,2	9,3	8,2	7,2	6,2	5,2
1173,23		8,7	8,0	7,1	6,2	5,2	4,2
1332,49		9,9	8,9	8,0	7,1	6,1	5,3
1836,07		9,2	8,1	7,3	6,3	5,5	4,4
46,54	1,2 mm	156,4	97,4	52,4	17,9	8,7	29,1
59,54		69,6	47,9	29,2	12,9	1,3	13,6
88,03		24,2	17,9	12,0	6,4	1,1	3,9
122,06		17,5	14,4	11,3	8,4	5,5	2,8
165,86		16,0	14,0	12,1	10,1	8,2	6,4
279,20		11,8	10,4	9,0	7,6	6,3	5,0
391,70		9,9	8,6	7,4	6,2	4,9	3,8
514,00		9,9	8,7	7,5	6,3	5,3	4,2
661,66		8,9	7,7	6,6	5,5	4,4	3,3
898,04		9,4	8,4	7,3	6,2	5,3	4,3
1173,23		8,0	7,2	6,2	5,5	4,5	3,4
1332,49		9,1	8,3	7,3	6,4	5,4	4,7
1836,07		8,2	7,4	6,4	5,7	4,6	3,7
46,54	1,3 mm	156,1	97,2	52,2	17,7	8,7	29,1
59,54		69,2	47,7	28,9	12,7	1,4	13,7
88,03		23,8	17,6	11,7	6,1	0,8	4,2
122,06		17,1	14,0	10,9	8,0	5,2	2,4
165,86		15,5	13,5	11,6	9,7	7,8	5,9
279,20		11,2	9,8	8,4	7,0	5,7	4,4
391,70		9,1	7,9	6,7	5,5	4,3	3,2
514,00		9,2	8,0	6,8	5,7	4,5	3,5
661,66		8,0	6,9	5,8	4,8	3,8	2,6
898,04		8,5	7,4	6,4	5,4	3,3	3,6
1173,23		7,2	6,3	5,5	4,6	3,5	2,5
1332,49		8,2	7,4	6,5	5,8	4,9	4,0
1836,07		7,3	6,4	5,6	4,7	4,0	3,0
46,54	1,4 mm	155,7	96,9	52,0	17,6	8,8	29,2
59,54		68,8	47,3	28,7	12,5	1,6	13,9
88,03		23,4	17,2	11,3	5,8	0,5	4,5
122,06		16,5	13,4	10,4	7,6	4,8	2,0
165,86		15,0	13,0	11,1	9,2	7,3	5,4
279,20		10,3	9,0	7,7	6,4	5,1	3,8
391,70		8,4	7,2	6,0	4,8	3,6	2,5
514,00		8,0	7,0	5,8	5,0	3,8	2,7
661,66		7,7	6,9	5,6	4,1	3,0	2,0
898,04		7,6	6,8	5,6	4,6	3,8	2,9
1173,23		6,1	5,1	4,1	3,7	2,7	1,7
1332,49		7,1	6,3	5,5	5,1	4,1	3,2
1836,07		18,3	5,6	4,6	3,9	3,1	2,1
46,54	1,5 mm	155,4	96,7	51,8	17,4	9,0	29,3
59,54		68,5	47,0	28,4	12,2	1,8	14,0
88,03		23,1	16,9	11,0	5,5	0,2	4,7
122,06		16,1	13,0	10,0	7,1	4,3	1,5
165,86		14,5	12,5	10,6	8,7	6,8	5,0
279,20		9,8	8,4	7,1	5,8	4,5	3,2
391,70		7,8	6,5	5,4	4,2	3,0	2,0
514,00		7,4	6,3	5,2	4,1	3,0	1,9
661,66		7,0	6,0	4,8	3,8	2,7	1,6
898,04		6,8	5,9	4,7	3,8	2,8	1,8
1173,23		5,5	4,4	3,3	2,4	1,5	0,6
1332,49		6,4	5,6	4,5	3,6	2,7	1,6

Çizelge 4.27. (devam) GESPECOR programında ölü tabaka kalınlığı için tarama çalışması

1836,07		5,8	4,6	3,8	2,9	2,2	1,4
46,54	1,6 mm	155,0	96,4	51,7	17,3	9,0	29,4
59,54		68,1	46,7	28,2	12,0	2,0	14,0
88,03		22,7	16,5	10,7	5,2	0,1	4,7
122,06		15,7	12,6	9,6	6,7	3,9	1,5
165,86		13,9	12,0	10,1	8,2	6,3	5,0
279,20		9,2	7,8	6,5	5,2	3,9	3,2
391,70		7,1	5,9	4,7	3,6	2,4	2,0
514,00		6,7	5,5	4,5	3,3	2,2	1,9
661,66		6,2	5,2	4,1	2,9	1,9	1,6
898,04		6,1	5,1	4,1	3,1	2,1	1,8
1173,23		4,5	3,5	2,4	1,6	0,9	0,6
1332,49		5,7	4,7	3,8	2,7	1,7	1,6
1836,07		4,6	3,7	2,8	2,2	1,2	1,4
46,54	1,7 mm	154,7	96,2	51,5	17,2	9,1	27,7
59,54		67,8	46,4	27,9	11,8	2,1	14,2
88,03		22,3	16,2	10,4	4,8	0,4	5,0
122,06		15,2	12,2	9,2	6,3	3,5	1,2
165,86		13,4	11,5	9,6	7,7	5,8	4,5
279,20		8,6	7,2	5,9	4,6	3,3	2,6
391,70		6,3	5,2	4,0	2,9	1,7	1,3
514,00		5,9	4,8	3,7	2,6	1,6	1,2
661,66		5,5	4,4	3,3	2,2	1,2	0,9
898,04		5,4	4,3	3,3	2,3	1,3	1,1
1173,23		3,7	2,7	1,8	1,0	0,1	0,1
1332,49		4,9	3,8	2,8	1,9	1,1	0,9
1836,07		3,6	2,7	2,0	1,2	0,6	0,7
46,54	1,8 mm	154,3	95,9	51,3	17,1	9,2	29,5
59,54		67,4	46,1	27,7	11,6	2,3	15,6
88,03		21,9	15,8	10,0	4,5	0,7	5,6
122,06		14,8	11,7	8,8	5,9	3,1	0,4
165,86		12,9	11,0	9,1	7,2	5,3	3,5
279,20		7,9	6,6	5,3	4,0	2,7	1,4
391,70		5,7	4,5	3,3	2,2	1,1	0,0
514,00		5,2	4,1	2,9	1,9	0,8	0,2
661,66		4,5	3,4	2,4	1,3	0,3	0,7
898,04		4,4	3,4	2,7	1,7	0,6	0,6
1173,23		2,8	1,9	1,0	0,0	0,7	1,6
1332,49		4,0	3,1	2,1	1,3	0,4	0,7
1836,07		3,1	2,1	1,2	0,5	0,3	1,4
46,54	1,9 mm	154,0	95,7	51,2	17,0	9,3	29,5
59,54		67,0	45,8	27,4	11,4	2,5	14,6
88,03		21,5	15,5	9,7	4,2	0,9	5,8
122,06		14,3	11,3	8,4	5,5	2,8	0,1
165,86		12,4	10,5	8,6	6,8	4,9	3,1
279,20		7,3	6,0	4,6	3,3	2,1	0,8
391,70		5,0	3,8	2,7	1,5	0,3	0,8
514,00		4,4	3,3	2,2	1,1	0,1	0,9
661,66		3,7	2,7	1,5	0,6	0,4	1,4
898,04		3,7	2,8	5,9	0,8	0,3	1,1
1173,23		1,9	1,1	0,1	0,8	1,7	2,4
1332,49		3,2	2,3	1,3	0,4	0,4	1,2
1836,07		2,2	1,2	0,4	0,2	1,2	2,3

Yukarıdaki bölümlerde deneysel verime karşılık Monte Carlo programlarında ölü tabaka kalınlığı 0,7 mm ölü tabaka kalınlığında seçildiğinde 88 keV ve daha düşük enerjilerde fotonlar simülasyonlardaki verim değerlerinden oldukça yüksek değerlerdeyken 1,7 mm olarak belirlendiğinde ise aynı enerjilerde deney değerine yakın olan düşük verim değerleri belirlenmiştir. Fakat 661 keV ve yukarıdaki enerjiler için ise 1,0 mm'lik yan ölü tabaka kalınlığı oldukça ince olduğundan simülasyon programlarında verim değerleri deney verim

değerlerine göre oldukça yüksek olmuştur. 661 keV ve sonrasındaki enerjiler için GESPECOR programından elde edilen yan ölü tabaka kalınlığı 1,7 mm'deki dedektör verim değerleri deneysel verim değerleri ile uyumlu olmuştur.

4.3.1. Nokta kaynak için ön ve yan ölü tabaka kalınlığı

Ölü tabaka kalınlığı ne kadar fazla ise dedektör kristalinin aktif hacmi o kadar azalacağından kristalin aktif hacmine (minimum ölü tabaka kalınlığı) sadık kalacak şekilde değerler belirlenmiştir. GESPECOR MC ile nokta kaynak için belirlenen 1,1 mm-1,7 mm ölü tabaka kalınlığı simülasyon çalışması PHITS programında da çalıştırılmıştır.

Çizelge 4.28. Yan ölü tabaka kalınlığı 1,7 mm'de sabit tutularak ön ölü tabakanın farklı değerlerinde GESPECOR ve PHITS ile elde edilen verim değerleri ile deneysel verimler arasındaki % farkları

Enerji (keV)	1,0 mm		1,025 mm		1,050 mm		1,075 mm	
	GESPECOR	PHITS	GESPECOR	PHITS	GESPECOR	PHITS	GESPECOR	PHITS
46,54	17,2	16,3	10,0	8,9	3,2	2,5	3,1	3,7
59,54	11,8	10,7	8,2	7,1	4,6	3,6	1,2	0,1
88,03	4,8	4,3	3,5	3,0	2,2	1,7	0,9	0,4
122,06	6,3	5,5	5,7	4,8	5,0	4,2	4,3	3,5
165,86	7,7	7,1	7,3	6,7	6,8	6,2	6,3	5,7
279,20	4,6	4,1	4,2	3,8	3,9	3,5	3,6	3,1
391,70	2,9	2,9	2,5	2,7	2,2	2,3	1,9	2,1
514,00	2,6	1,9	2,4	1,7	2,1	1,4	1,8	1,2
661,66	2,2	1,1	1,6	0,2	1,3	0,6	1,1	0,4
898,04	2,3	1,4	2,1	1,5	1,8	1,3	1,7	1,0
1173,23	1,0	0,3	1,0	0,5	0,8	0,2	0,6	0,1
1332,49	1,9	1,3	2,4	1,5	2,2	1,3	2,0	1,1
1836,07	1,2	1,0	0,8	1,1	0,7	0,9	0,5	0,7

Çizelge 4.28'de yan ölü tabaka değeri 1,7 mm'de sabit tutulup ön ölü tabaka kalınlığı sırasıyla 1,000; 1,025; 1,050; 1,075 mm alınarak PHITS ve GESPECOR MC'dan elde edilen dedektör verim değerlerinin deneysel verim değerlerinden %farklarını göstermektedir.

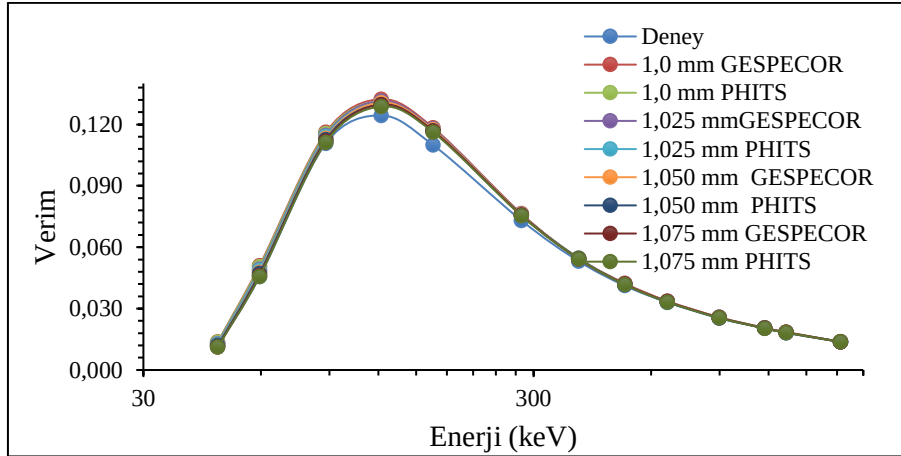
Ön ölü tabaka kalınlığı 1,075 mm'de sabit tutulup yan ölü tabaka kalınlığı 1,7 mm'den küçük ve büyük değerler olan 1,5 mm-1,9 mm aralığında çalıştırılmıştır (Çizelge 4.29). Nokta kaynak için belirlenen ön-yan ölü tabaka kalınlığı 88 keV ve altındaki enerji değerleri GESPECOR için 46,5 keV'ta %3,1, 59,5 keV'ta %1,2 ve 88 keV'ta %0,9 ve PHITS için 46,5 keV'ta %3,7, 59,5 keV'ta %0,1 ve 88 keV'ta %0,4'tür.

Çizelge 4.29. Ön ölü tabaka değeri 1,075 mm’de sabit tutulup 1,5-1,9 mm aralığındaki yan ölü tabaka kalınlığının GESPECOR ve PHITS verim değerlerine karşılık deneysel veriminden % farkları

Enerji (keV)	1,5 mm DL		1,6 mm DL		1,7 mm DL		1,8 mm DL		1,9 mm DL	
	GESPECOR	PHITS	GESPECOR	PHITS	GESPECOR	PHITS	GESPECOR	PHITS	GESPECOR	PHITS
46,54	2,9	3,5	3,0	3,7	3,1	3,7	3,2	3,9	3,3	4,0
59,54	1,6	0,5	1,4	0,3	1,2	0,1	1,0	0,1	0,8	0,3
88,03	1,5	1,0	1,2	0,7	0,9	0,4	0,6	0,1	0,3	0,2
122,06	5,1	4,3	4,7	3,9	4,3	3,5	3,9	3,1	3,5	2,7
165,86	7,3	6,7	6,8	6,2	6,3	5,7	5,8	5,3	5,3	4,8
279,20	4,8	4,4	4,2	3,8	3,6	3,1	3,0	2,5	2,4	1,9
391,70	3,3	3,3	2,6	2,7	1,9	2,1	1,2	1,4	0,5	0,7
514,00	3,5	2,6	2,7	1,9	1,8	1,2	1,1	0,4	0,5	0,3
661,66	2,7	1,8	1,9	1,0	1,1	0,4	0,3	0,4	0,4	1,1
898,04	3,5	2,7	2,6	1,9	1,7	1,0	1,0	0,3	0,3	0,3
1173,23	2,1	1,9	1,3	0,9	0,6	0,1	0,4	0,6	1,2	1,4
1332,49	3,5	2,6	2,7	1,8	2,0	1,1	1,1	0,3	0,4	0,4
1836,07	2,5	2,5	1,5	1,6	0,5	0,7	0,2	0,1	0,9	0,9

Ölü tabaka kalınlığı tüm yüzeyde eşit kalınlıkta değilse ön ve yan yüzeyde farklı kalınlıklar ile kalınlaştırıldığında deneysel verim ile yüzdelik farkları Çizelge 4.29’da verilmiştir. Ön ölü tabaka kalınlığı 1,075 mm’de sabit tutulup yan ölü tabaka kalınlığı 1,5-1,9 mm aralığında hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalarda 100 keV’tan düşük enerjili fotonlar için deneysel ve simülasyon sonuçları arasındaki farkın iyileştiği gözlenmiştir. Tüm enerjilerdeki ortalama fark değerleri hesaplandığında deneyle en uyumlu sonuçların ön ölü tabaka kalınlığı 1,075 mm’de yan ölü tabaka kalınlığının 1,7 mm’de alındığı tespit edilmiştir. Bu sayede sonuçlar hem düşük enerjili fotonlar hem de yüksek enerjili fotonlar için deneysel sonuçlarla optimum bir değere ulaşmıştır. Bu sonuca göre, üretici tarafından yekpare olarak beyan edilen dış ölü tabaka değeri, ön ölü tabaka için 0,3075 mm, yan ölü tabaka kalınlığının ise 1,0 mm daha kalınlaştığı anlamına gelir (Şekil 4.12).

Şekil 4.12’de grafiksel olarak verilen sonuçlardan görüleceği gibi özellikle 88-279 keV aralığında deneysel sonuçlarla olan ayırım yüksek enerjilerde azalmaktadır ve MC sonuçları deneysel sonuçlara yaklaşmaktadır. Yan ölü tabaka kalınlığının ön ölü tabaka kalınlığına göre daha fazla artış göstermesi, kristalin yan yüzeyindeki elektrik kontaklarından kaynaklanabileceğini akla getirmiştir. Elektrik kontaklarının olduğu yerlerde lityum atomlarının kristalin yüzeyinden derinine daha fazla nüfuz ettiğini açıklamaktadır (Knoll, 2010: 423-424).



Şekil 4.12. Yan (sabit) ve ön (değişen) ölü tabaka kalınlıklarında GESPECOR ve PHITS'ten elde edilen dedektör veriminin enerjiye göre değişimi ve deneysel verimlerle karşılaştırılması

4.3.2. Marinelli kaynaklar için ön ve yan ölü tabaka kalınlığı

Yapılan deneylerde dedektör verimini ciddi bir şekilde etkileyen tek parça ölü tabaka kalınlığına ek olarak üst ve yan yüzeylerdeki ölü tabaka kalınlığını dört farklı yoğunluktaki epoksi Marinelli kaynak için de uygulamak ilave bir tecrübe olmuştur. 0,5 g/cc, 0,7 g/cc, 1,0 g/cc ve 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynaklar için 1,0, 1,025, 1,050 ve 1,075 mm ön ölü tabaka kalınlığı ve 1,7 mm'de sabit tutulan yan ölü tabaka kalınlığı için GESPECOR ve PHITS MC'den elde edilen dedektör verim değerleri için sonuçlar sırası ile Çizelge 4.30-4.31'de verilmiştir. Çizelge 4.30'da 0,5 g/cc, 0,7 g/cc, 1,0 g/cc ve 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynakların PHITS MC programında 88 keV'in altındaki enerjiler için sırasıyla %53,6-4,2 %56-20,2, %53,8-18,2 ve %50,4-13,7 aralığında iken 88 keV üzerindeki enerjiler için %6,8-0,0, %8,8-0,1, %5,1-0,2 ve %5,6-0,0 aralığındadır. Çizelge 4.31'de 0,5 g/cc, 0,7 g/cc, 1,0 g/cc ve 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynakların GESPECOR MC programında 88 keV'in altındaki enerjiler için sırasıyla %43-8,9, %46,4-10,1, %43,5-8,0 ve %39,0-1,6 aralığında iken 88 keV üzerindeki enerjiler için %2,6-0,0, %2,5-0,0, %1,6-0,4 ve %0,7-0,0 aralığındadır. Bu çizelgelere göre 0,5 g/cc, 0,7 g/cc, 1,0 g/cc ve 1,3 g/cc epoksi Marinelli yoğunlukları için ön ve yan ölü tabaka kalınlıkları sırasıyla 1,075-1,7 mm'de deneysel sonuçlara en yakın değerlerdir.

Çizelge 4.30. 0,5 g/cc, 0,7 g/cc, 1,0 g/cc ve 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynaklar için 1,7mm’de sabit tutulan yan ölü tabaka kalınlığında ön ölü tabaka kalınlığının değiştirilerek PHITS ile elde edilen verim değerlerinin deneysel verim değerlerinden %farkları

	0,5 g/cc				0,7 g/cc				1,0 g/cc				1,3 g/cc			
Enerji (keV)	1,0 mm	1,025 mm	1,050 mm	1,075 mm	1,0 mm	1,025 mm	1,050 mm	1,075 mm	1,0 mm	1,025 mm	1,050 mm	1,075 mm	1,0 mm	1,025 mm	1,050 mm	1,075 mm
46,54	45,9	48,4	51,1	53,6	49,4	50,8	54,3	56,0	47,1	49,2	51,7	53,8	43,9	46	48,3	50,4
59,54	37,0	37,8	39,7	7,1	34,8	35,7	37,5	38,6	34,7	36,3	37,2	38,4	24,1	25,5	26,9	28,1
88,03	19,4	27,2	20,4	4,2	20,2	20,7	21,1	21,6	18,2	18,7	19,1	19,6	12,3	12,7	13,2	13,7
122,06	8,4	8,7	9,0	6,8	8,0	8,3	8,5	8,8	4,2	4,5	4,8	5,1	4,7	5,0	5,3	5,6
165,86	2,3	2,5	2,7	2,9	1,2	1,4	0,7	1,8	0,2	0,4	0,6	0,8	0,1	0,3	0,5	0,7
279,20	0,7	0,5	0,4	0,3	0,7	0,5	0,4	0,3	2,9	2,8	2,7	2,6	3,8	3,7	3,6	3,5
391,70	0,3	0,4	0,5	0,6	0,2	0,3	0,5	0,6	1,3	1,1	1,0	0,9	0,4	0,3	0,1	0,0
514,00	0,5	0,6	0,7	0,9	0,7	0,8	0,9	1,0	0,7	0,6	0,4	0,3	0,1	0,1	0,2	0,3
661,66	1,4	1,5	1,6	1,6	0,6	0,8	0,9	0,5	1,0	0,8	0,8	0,6	0,0	0,1	0,2	0,3
898,04	1,0	1,1	1,2	1,3	0,4	0,5	0,6	0,1	1,4	1,4	1,3	1,2	0,5	0,4	0,3	0,1
1173,23	0,2	0,1	0,0	0,0	0,3	0,3	0,1	1,3	3,0	2,9	2,8	2,7	1,4	1,2	1,1	1,1
1332,49	1,5	1,4	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	3,9	3,9	3,7	3,7	3,6	3,5	3,4	3,2
1836,07	1,3	1,1	1,0	1,0	2,5	2,3	2,2	2,0	4,3	4,3	4,2	4,1	3,2	3,1	3,1	3,0

Çizelge 4.31. 0,5 g/cc, 0,7 g/cc, 1,0 g/cc ve 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kaynaklar için 1,7mm’de sabit tutulan yan ölü tabaka kalınlığında ön ölü tabaka kalınlığının değiştirilerek GESPECOR ile elde edilen verim değerlerinin deneysel verim değerlerinden %farkları

	0,5 g/cc				0,7 g/cc				1,0 g/cc				1,3 g/cc			
Enerji (keV)	1,0 mm	1,025 mm	1,050 mm	1,075 mm	1,0 mm	1,025 mm	1,050 mm	1,075 mm	1,0 mm	1,025 mm	1,050 mm	1,075 mm	1,0 mm	1,025 mm	1,050 mm	1,075 mm
46,54	35,8	38,3	39,3	43,0	39,7	42,1	44,3	46,4	36,6	39,1	41,4	43,5	31,7	34,3	36,7	39
59,54	22,8	24,1	25,3	26,5	20,2	21,5	22,7	23,9	20,7	21,9	23,1	24,3	7,6	9	10,4	11,7
88,03	8,9	9,4	9,9	10,4	10,1	10,6	11,1	11,5	8,0	8,5	9,0	9,4	1,6	2,1	2,6	3,1
122,06	1,7	2,0	2,3	2,6	1,7	2,0	2,2	2,5	1,9	1,6	1,4	1,1	0,7	0,4	0,2	0,1
165,86	1,9	1,7	1,5	1,3	2,7	2,5	2,3	2,1	3,4	3,2	3,1	2,9	3,2	3,0	2,8	2,6
279,20	2,5	2,4	2,2	2,1	2,4	2,2	2,1	1,9	4,3	4,2	4,0	3,9	4,5	4,3	4,2	4,1
391,70	0,3	0,2	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	1,7	1,5	1,4	1,3	1,1	0,9	0,8	0,7
514,00	0,9	0,7	0,5	0,4	0,3	0,1	0,0	0,1	0,7	0,6	0,5	0,4	0,1	0,0	0,1	0,2
661,66	0,3	0,2	0,0	0,1	1,1	0,9	0,8	0,7	2,4	2,2	2,1	2,0	1,5	1,4	1,2	1,1
898,04	0,1	0,0	0,1	0,2	0,9	0,7	0,5	0,4	2,5	2,4	2,2	1,9	1,4	1,3	1,1	0,9
1173,23	1,0	0,8	0,6	0,5	0,9	0,7	0,6	0,5	3,3	3,2	3,0	2,8	1,3	1,2	1,0	0,8
1332,49	0,9	0,7	0,6	0,5	0,7	0,5	0,4	0,3	3,6	3,5	3,4	3,3	2,9	2,7	2,7	2,6
1836,07	0,1	0,1	0,3	0,3	1,1	1,0	0,9	0,7	1,8	1,8	1,6	1,5	2,3	2,1	1,9	1,8

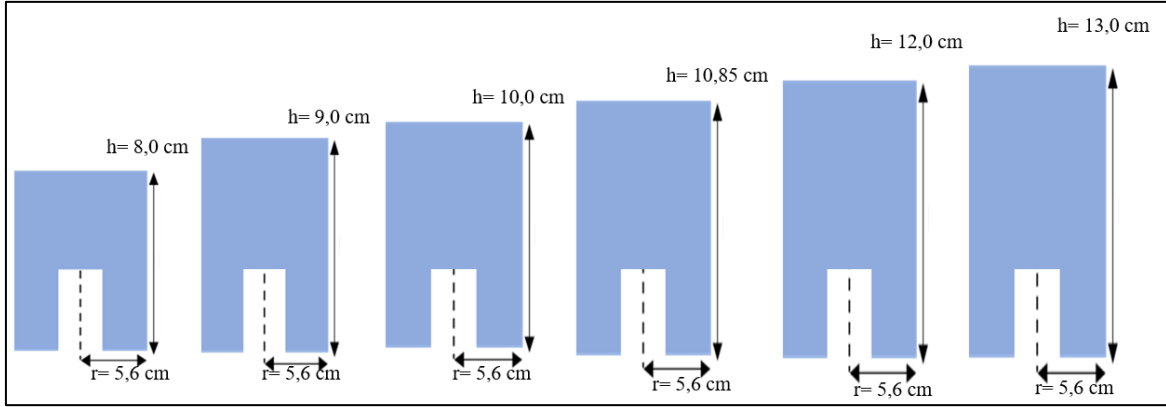
4.4. Marinelli Kap Geometrisinin Monte Carlo ile Modellenmesi

Germanyum dedektörlerinde özellikle 100 keV’den düşük enerjilerde dedektör parametreleri ve numune boyutları yüzünden (ölü tabaka kalınlığı, Marinelli kap boyutları) verim değerleri hızla düşüş sergilemektedir (Bölükdemir ve diğerleri, 2021; Ahmed ve diğerleri, 2009). Dedektör verimi numunenin konumuna, numune matrisine ve yoğunluğuna

ve hatta numune geometrisine de sıkı sıkıya bağlıdır (Harb ve Din, 2008). Üstelik bu verim hesaplamaları, belirtilen tüm koşullar sabit tutulsa bile her bir gama ışını enerjisi için ayrı ayrı yapılmalıdır. Dedektörün verimini hesaplamak için ne kadar farklı ve geniş enerji aralığındaki enerjiler kullanılırsa, o kadar iyi ve doğru verim eğrisi elde edilebilir. Yukarıdaki bilgilere dayanarak, tam bire bir geometri, konum ve matriste standart kaynaklar kullanılarak yapılan deneyler ve hesaplamalarla bir FEPE elde edilebilir (Peryoga ve diğerleri, 2017; Stancu ve diğerleri, 2015; Uyar ve diğerleri, 2021).

Marinelli kap geometrisi PHITS ve GESPECOR MC programlarında farklı kap boyutları kullanılarak yeni geometriler oluşturulmuş ve oluşturulan yeni geometrilerin verim değerleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Monte Carlo çalışmasında Bölüm 3.3'te incelenen Marinelli kabının iç derinliği 6,93 cm, iç silindir yarıçapı ise 4,44 cm, dedektörün alüminyum 'endcup' i 4,15 cm olan ölçüleri taklit eden çalışma kurgulanmıştır. Simülasyonda kurgulanan Marinelli kabı iç derinliği 6,93 cm ve iç yarıçapı 4,4 cm'dir. Dış yarıçapı (5,6, 6,0, 6,53, 7,0 ve 8,0 cm) ve dış yüksekliği (8,0, 9,0, 10,0, 11,0, 12,0, 13,0 cm) 1'er cm aralıklarla değiştirilmiştir. Marinelli kabın iç ve dış duvarı polypropilen malzemeden ve gerçek kap kalınlığı ise 2 mm olarak hesaba katılmıştır. 1 g/cc yoğunluğa sahip epoksi Marinelli dedektör tepesine 0,15 cm mesafe ile yerleştirilerek çalışma tasarlanmıştır. Monte Carlo simülasyonu 5 farklı yarıçap ve 6 farklı yükseklikten oluşturulan 5×6 kurulumla gerçekleştirilmiştir.

Marinelli kabının yerleştirildiği dedektör tepesi 4,15 cm yarıçaplıdır. Kap ve dedektör arası mesafe 3-4 mm ve Marinelli kabının iç ve dış duvar kalınlığı toplamı 4 mm'dir ve Marinelli kabının yüzük kısmında yaklaşık 0,7 mm kalınlıkta numune bulunmaktadır. Modelleme çalışması dedektörün 'endcup' ını saran ve Marinelli kabın yüzük kısmı 5,6 cm ile minimum yarıçap ve 8,0 cm yükseklik ölçüsünden başlatılmıştır.



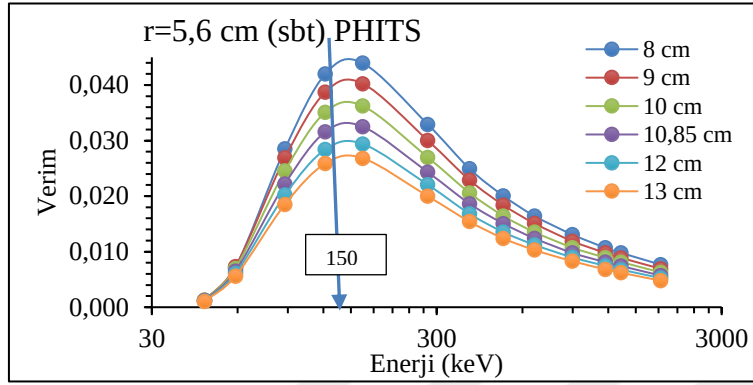
Şekil 4.13. 5,6 cm yarıçap sabit tutularak yüksekliği 8,0 cm'den 13,0 cm'ye kadar değişen Marinelli kaplarının 2B kesit görünümü

Marinelli kabının iç yarıçapı ve iç yüksekliği sabit tutularak kabın dış yarıçapı 5,6 cm'den 8 cm'ye kadar 5 farklı yarıçap ölçüsünde, yüksekliği ise bu yarıçap değerlerine karşılık 6 farklı ölçüde kurgulanmıştır. 30 farklı boyut durumunda 46,5 keV'tan 1836 keV'a kadar olan 13 enerji için simülasyon hesabı yapılarak verim üzerindeki etkisi gözlenmiştir. Tasarlanan Marinelli kabının 8,0 cm'lik yarıçap ve 13,0 cm kap yükseklikten ötesi için bütün enerjilerde verim çok düştüğünden dolayı dikkate alınmamıştır. Şekil 4.13'te 5,6 cm yarıçap sabit tutularak 8,0, 9,0, 10,0, 10,85 (Gerçek Marinelli kap yüksekliği), 12,0 ve 13,0 cm olan Marinelli kap yükseklikleri ile çalışılmıştır.

Marinelli kabın dış yarıçapı 5,6 cm, 6,0 cm, 6,53 cm 7,0 cm ve 8,0 cm'e kadar sırasıyla genişletilerek dedektör verimi hesaplanmıştır. Aynı işlem 9,0-13,0 cm aralığında 1,0 cm aralıklarla arttırılan kap yükseklikleri için de sırasıyla tekrar edilmiştir. Marinelli kap yüksekliğinin 8,0-13,0 cm arasındaki değiştirildiği PHITS ve GESPECOR MC programlarından elde edilen dedektör verim değerleri, Marinelli kabın 5,6 cm yarıçap değeri için Çizelge 4.32, 4.33; 6,0 cm yarıçap için Çizelge 4.34, 4.35; 6,53 cm yarıçap için Çizelge 4.36, 4.37; 7,0 cm yarıçap Çizelge 4.38, 4.39; 8,0 cm yarıçap için Çizelge 4.40, 4.41'de verilmiştir. PHITS ve GESPECOR MC ile 5,6-8,0 cm aralığındaki yarıçapların 8,0-13,0 cm yüksekliklerine göre elde edilen enerjiye karşılık verim eğrileri Şekil 4.14-4.23'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.32. 5,6 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için PHITS'te hesaplanan verim değerleri

Enerji/ h	46,5	59,5	88,0	122,1	165,9	279,2	391,7	514,0	661,67	898,0	1173,2	1332,5	1836,1
8 cm	0,0011	0,0072	0,0285	0,0420	0,0440	0,0329	0,0249	0,0201	0,0164	0,0131	0,0107	0,0098	0,0076
9 cm	0,0013	0,0073	0,0269	0,0387	0,0403	0,0300	0,0229	0,0184	0,0151	0,0119	0,0098	0,0089	0,0069
10 cm	0,0013	0,0070	0,0246	0,0351	0,0362	0,0270	0,0206	0,0164	0,0135	0,0107	0,0089	0,0081	0,0063
10,85cm	0,0012	0,0065	0,0222	0,0316	0,0325	0,0243	0,0186	0,0151	0,0124	0,0098	0,0081	0,0074	0,0057
12 cm	0,0011	0,0061	0,0202	0,0284	0,0294	0,0221	0,0168	0,0135	0,0112	0,0090	0,0074	0,0068	0,0052
13 cm	0,0011	0,0056	0,0185	0,0259	0,0268	0,0200	0,0154	0,0124	0,0103	0,0083	0,0068	0,0062	0,0048

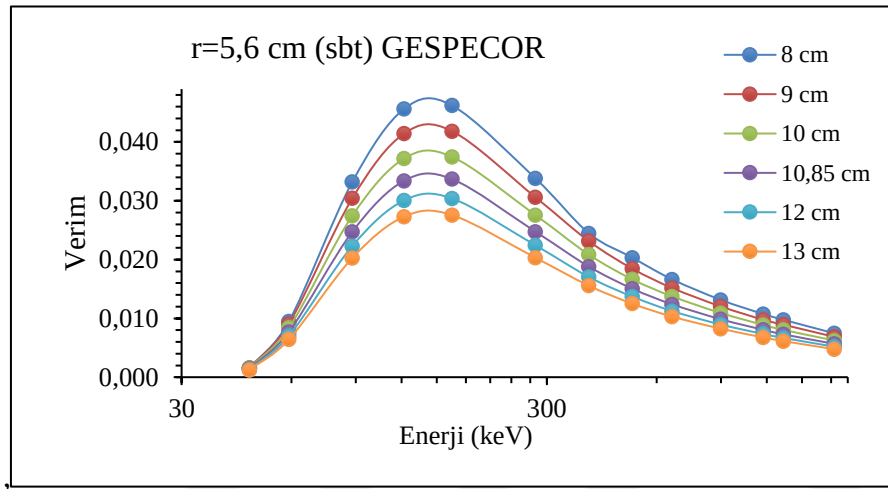


Şekil 4.14. 5,6 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların PHITS MC'den elde edilen enerji verim eğrisi

Çizelge 4.32 ve 4.33'te ki verilere ve Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'teki görsellere bakılacak olunursa Marinelli kabının 5,6 cm'de sabit yarıçapı için kap yükseklikleri 8-13 cm arasında PHITS ve GESPECOR programlarında değiştirildiğinde enerjiye karşılık verim eğrisinin en fazla verim değeri en düşük yükseklikte olmuştur. 46,5-1836 keV enerji aralığında Marinelli kabın yüksekliği arttırıldıkça verim değeri orantılı olarak daha düşük seviyelerdedir.

Çizelge 4.33. 5,6 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için GESPECOR’da hesaplanan verim değerleri

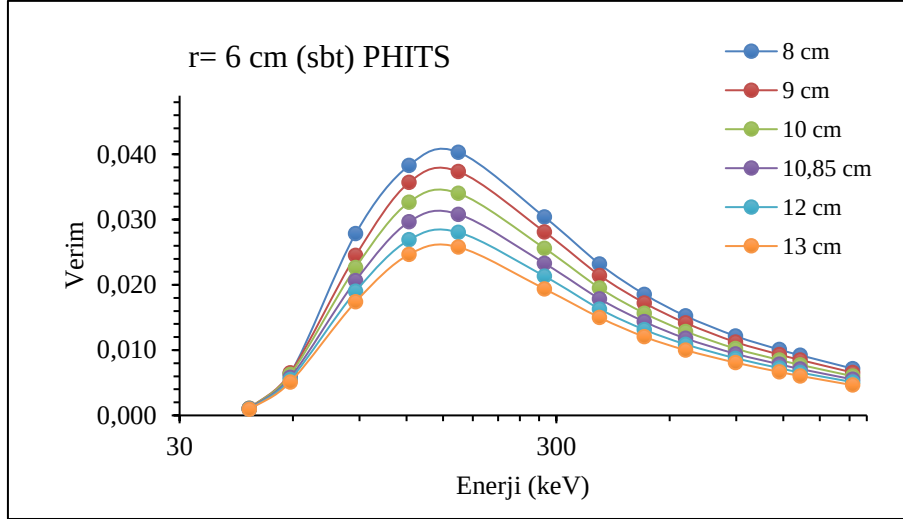
Enerji/ h	46,5	59,5	88,0	122,1	165,9	279,2	391,7	514,0	661,67	898,0	1173,2	1332,5	1836,1
8 cm	0,0015	0,0095	0,0332	0,0456	0,0462	0,0338	0,0245	0,0203	0,0166	0,0132	0,0108	0,0098	0,0075
9 cm	0,0016	0,0091	0,0304	0,0414	0,0418	0,0306	0,0231	0,0185	0,0152	0,0120	0,0098	0,0089	0,0069
10 cm	0,0015	0,0084	0,0275	0,0372	0,0375	0,0276	0,0208	0,0167	0,0137	0,0109	0,0089	0,0081	0,0062
10,85cm	0,0014	0,0077	0,0247	0,0334	0,0337	0,0248	0,0188	0,0151	0,0124	0,0099	0,0081	0,0073	0,0057
12 cm	0,0013	0,0070	0,0223	0,0301	0,0304	0,0224	0,0170	0,0137	0,0112	0,0090	0,0074	0,0067	0,0052
13 cm	0,0012	0,0064	0,0203	0,0273	0,0276	0,0203	0,0156	0,0125	0,0103	0,0082	0,0068	0,0061	0,0048



Şekil 4.15. 5,6 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların GESPECOR MC’den elde edilen enerji verim eğrisi

Çizelge 4.34. 6,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için PHITS’te hesaplanan verim değerleri

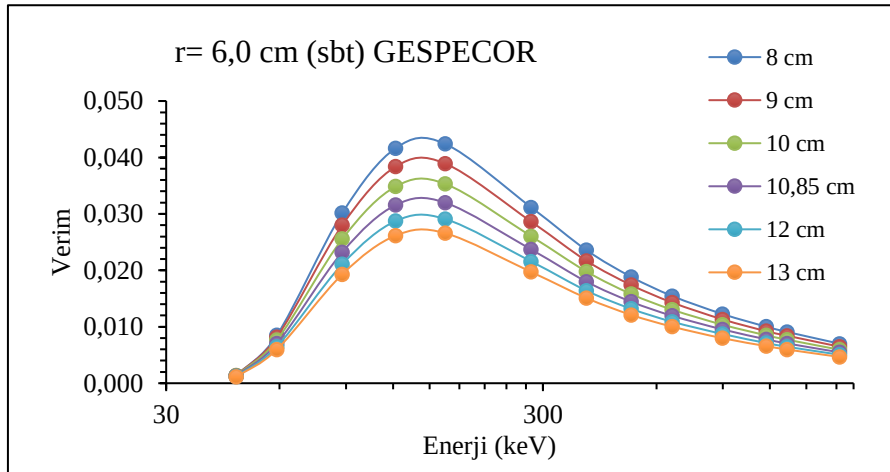
Enerji/ h	46,5	59,5	88,0	122,1	165,9	279,2	391,7	514,0	661,67	898,0	1173,2	1332,5	1836,1
8 cm	0,0009	0,0064	0,0279	0,0383	0,0403	0,0304	0,0232	0,0186	0,0152	0,0121	0,0101	0,0092	0,0072
9 cm	0,0011	0,0065	0,0245	0,0357	0,0374	0,0281	0,0215	0,0172	0,0142	0,0112	0,0093	0,0085	0,0066
10 cm	0,0011	0,0063	0,0227	0,0327	0,0340	0,0256	0,0195	0,0157	0,0129	0,0102	0,0085	0,0077	0,0060
10,85cm	0,0010	0,0058	0,0207	0,0297	0,0308	0,0233	0,0179	0,0144	0,0118	0,0094	0,0078	0,0071	0,0055
12 cm	0,0010	0,0055	0,0190	0,0269	0,0280	0,0213	0,0163	0,0131	0,0109	0,0087	0,0073	0,0066	0,0051
13 cm	0,0009	0,0051	0,0174	0,0247	0,0258	0,0194	0,0150	0,0120	0,0100	0,0081	0,0067	0,0060	0,0046



Şekil 4.16. 6,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların PHITS MC'den elde edilen enerji verim eğrisi

Çizelge 4.35. 6,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için GESPECOR'da hesaplanan verim değerleri

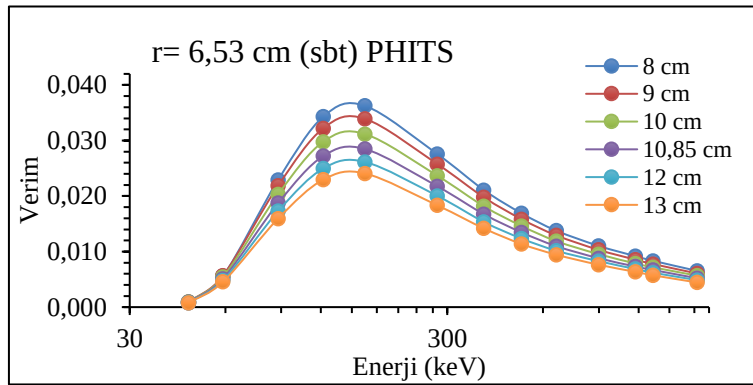
Enerji/ h	46,5	59,5	88,0	122,1	165,9	279,2	391,7	514,0	661,67	898,0	1173,2	1332,5	1836,1
8 cm	0,0013	0,0085	0,0302	0,0417	0,0424	0,0312	0,0236	0,0189	0,0154	0,0123	0,0100	0,0091	0,0070
9 cm	0,0014	0,0082	0,0280	0,0384	0,0389	0,0286	0,0217	0,0174	0,0143	0,0113	0,0092	0,0084	0,0065
10 cm	0,0013	0,0076	0,0256	0,0349	0,0353	0,0260	0,0198	0,0158	0,0130	0,0104	0,0085	0,0077	0,0059
10,85cm	0,0013	0,0070	0,0232	0,0316	0,0320	0,0237	0,0180	0,0144	0,0119	0,0095	0,0078	0,0070	0,0055
12 cm	0,0012	0,0065	0,0211	0,0287	0,0291	0,0216	0,0164	0,0132	0,0109	0,0087	0,0071	0,0065	0,0051
13 cm	0,0011	0,0060	0,0193	0,0262	0,0266	0,0197	0,0151	0,0121	0,0100	0,0080	0,0066	0,0060	0,0047



Şekil 4.17. 6,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların GESPECOR MC'den elde edilen enerji verim eğrisi

Çizelge 4.36. 6,53 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için PHITS'te hesaplanan verim değerleri

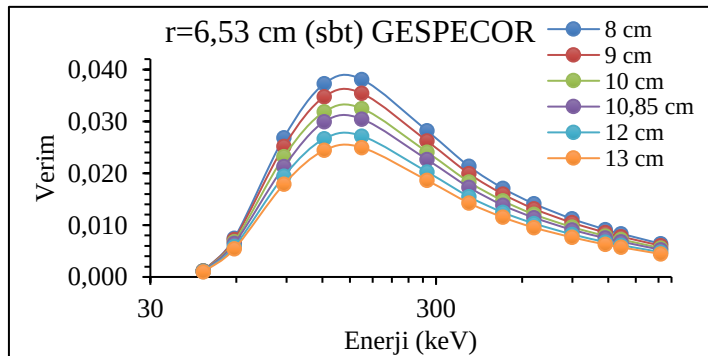
Enerji/ h	46,5	59,5	88,0	122,1	165,9	279,2	391,7	514,0	661,67	898,0	1173,2	1332,5	1836,1
8 cm	0,0008	0,0056	0,0229	0,0343	0,0363	0,0276	0,0211	0,0169	0,0138	0,0110	0,0092	0,0083	0,0065
9 cm	0,0009	0,0057	0,0219	0,0322	0,0339	0,0258	0,0198	0,0158	0,0129	0,0103	0,0085	0,0078	0,0061
10 cm	0,0009	0,0054	0,0203	0,0298	0,0312	0,0237	0,0182	0,0146	0,0119	0,0095	0,0079	0,0072	0,0057
10,85cm	0,0009	0,0051	0,0187	0,0272	0,0285	0,0218	0,0167	0,0135	0,0110	0,0088	0,0073	0,0067	0,0052
12 cm	0,0008	0,0048	0,0173	0,0250	0,0261	0,0200	0,0153	0,0123	0,0102	0,0083	0,0069	0,0062	0,0049
13 cm	0,0008	0,0046	0,0160	0,0230	0,0241	0,0183	0,0142	0,0114	0,0094	0,0076	0,0064	0,0057	0,0044



Şekil 4.18. 6,53 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların PHITS MC'den elde edilen enerji verim eğrisi

Çizelge 4.37. 6,53 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için GESPECOR'da hesaplanan verim değerleri

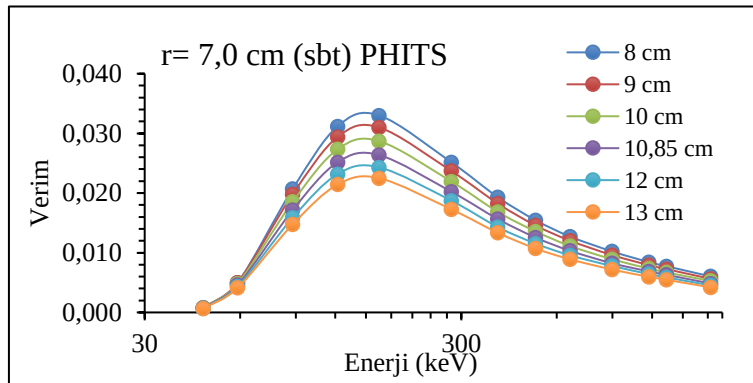
Enerji/ h	46,5	59,5	88,0	122,1	165,9	279,2	391,7	514,0	661,67	898,0	1173,2	1332,5	1836,1
8 cm	0,0011	0,0075	0,0269	0,0373	0,0381	0,0282	0,0213	0,0171	0,0141	0,0112	0,0092	0,0083	0,0064
9 cm	0,0012	0,0072	0,0252	0,0348	0,0354	0,0262	0,0199	0,0160	0,0131	0,0105	0,0086	0,0078	0,0060
10 cm	0,0012	0,0068	0,0232	0,0319	0,0325	0,0241	0,0183	0,0147	0,0121	0,0096	0,0079	0,0072	0,0056
10,85cm	0,0011	0,0064	0,0213	0,0299	0,0304	0,0226	0,0173	0,0138	0,0114	0,0091	0,0075	0,0068	0,0052
12 cm	0,0010	0,0058	0,0195	0,0267	0,0272	0,0202	0,0155	0,0125	0,0103	0,0082	0,0067	0,0061	0,0048
13 cm	0,0010	0,0054	0,0179	0,0244	0,0249	0,0186	0,0143	0,0115	0,0095	0,0076	0,0063	0,0057	0,0044



Şekil 4.19. 6,53 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların GESPECOR MC'den elde edilen enerji verim eğrisi

Çizelge 4.38. 7,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için PHITS'te hesaplanan verim değerleri

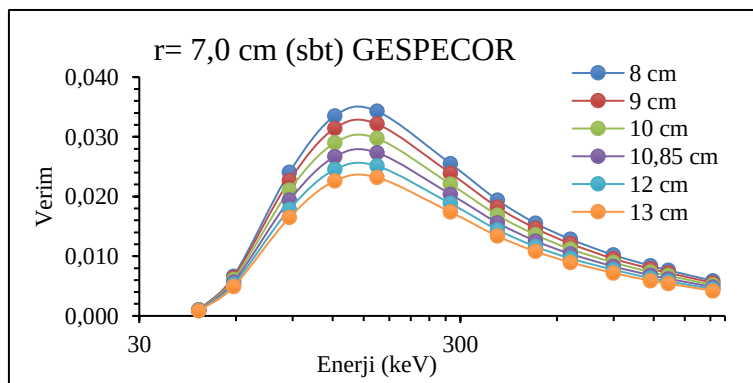
Enerji/ h	46,5	59,5	88,0	122,1	165,9	279,2	391,7	514,0	661,67	898,0	1173,2	1332,5	1836,1
8 cm	0,0007	0,0050	0,0207	0,0312	0,0330	0,0251	0,0193	0,0155	0,0127	0,0102	0,0084	0,0077	0,0060
9 cm	0,0008	0,0050	0,0198	0,0294	0,0310	0,0237	0,0182	0,0146	0,0120	0,0096	0,0079	0,0073	0,0056
10 cm	0,0008	0,0048	0,0185	0,0273	0,0287	0,0219	0,0168	0,0136	0,0111	0,0089	0,0074	0,0067	0,0053
10,85cm	0,0007	0,0046	0,0172	0,0252	0,0264	0,0202	0,0156	0,0126	0,0103	0,0082	0,0069	0,0063	0,0048
12 cm	0,0007	0,0043	0,0159	0,0232	0,0243	0,0187	0,0143	0,0115	0,0096	0,0078	0,0064	0,0059	0,0045
13 cm	0,0007	0,0041	0,0148	0,0214	0,0225	0,0173	0,0133	0,0107	0,0089	0,0072	0,0060	0,0055	0,0042



Şekil 4.20. 7,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların PHITS MC'den elde edilen enerji verim eğrisi

Çizelge 4.39. 7,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için GESPECOR'da hesaplanan verim değerleri

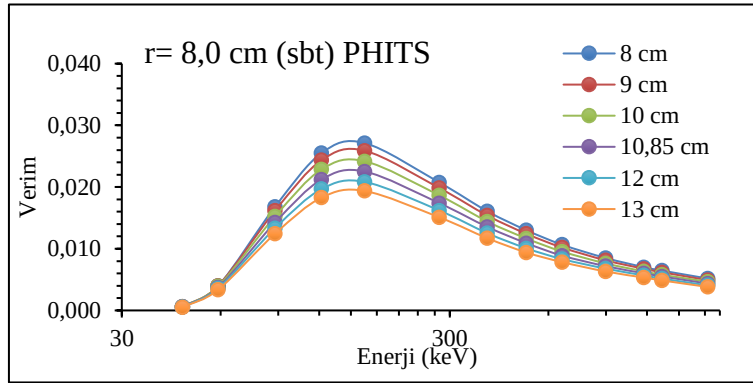
Enerji/ h	46,5	59,5	88,0	122,1	165,9	279,2	391,7	514,0	661,67	898,0	1173,2	1332,5	1836,1
8 cm	0,0010	0,0067	0,0240	0,0335	0,0343	0,0255	0,0194	0,0155	0,0128	0,0102	0,0084	0,0076	0,0059
9 cm	0,0010	0,0064	0,0227	0,0314	0,0321	0,0239	0,0182	0,0147	0,0121	0,0096	0,0079	0,0072	0,0055
10 cm	0,0010	0,0061	0,0211	0,0290	0,0297	0,0221	0,0169	0,0136	0,0112	0,0090	0,0073	0,0067	0,0052
10,85cm	0,0010	0,0057	0,0194	0,0267	0,0273	0,0204	0,0156	0,0126	0,0104	0,0083	0,0068	0,0062	0,0048
12 cm	0,0009	0,0053	0,0179	0,0245	0,0251	0,0188	0,0144	0,0116	0,0096	0,0077	0,0063	0,0058	0,0045
13 cm	0,0009	0,0049	0,0165	0,0226	0,0232	0,0174	0,0134	0,0108	0,0090	0,0072	0,0059	0,0054	0,0042



Şekil 4.21. 7,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların GESPECOR MC'den elde edilen enerji verim eğrisi

Çizelge 4.40. 8,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için PHITS'te hesaplanan verim değerleri

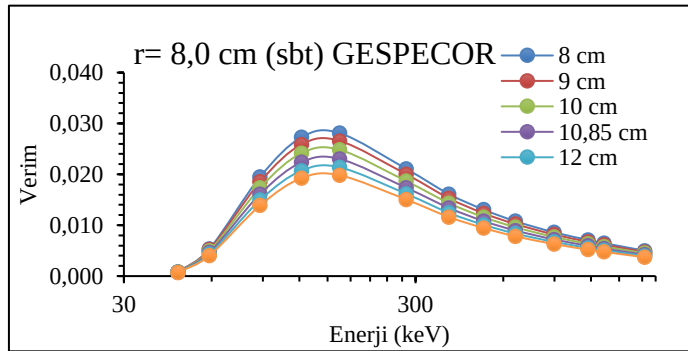
Enerji/ h	46,5	59,5	88,0	122,1	165,9	279,2	391,7	514,0	661,67	898,0	1173,2	1332,5	1836,1
8 cm	0,0005	0,0040	0,0168	0,0255	0,0271	0,0207	0,0161	0,0130	0,0107	0,0085	0,0070	0,0065	0,0052
9 cm	0,0006	0,0040	0,0162	0,0243	0,0259	0,0198	0,0154	0,0124	0,0102	0,0081	0,0068	0,0062	0,0049
10 cm	0,0006	0,0039	0,0152	0,0229	0,0242	0,0186	0,0144	0,0117	0,0095	0,0076	0,0063	0,0058	0,0046
10,85 cm	0,0006	0,0037	0,0142	0,0212	0,0225	0,0174	0,0135	0,0109	0,0089	0,0072	0,0060	0,0055	0,0044
12 cm	0,0006	0,0036	0,0133	0,0197	0,0208	0,0162	0,0125	0,0101	0,0083	0,0068	0,0057	0,0052	0,0041
13 cm	0,0005	0,0034	0,0124	0,0183	0,0194	0,0151	0,0117	0,0094	0,0078	0,0063	0,0053	0,0049	0,0038



Şekil 4.22. 8,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların PHITS MC'den elde edilen enerji verim eğrisi

Çizelge 4.41. 8,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kabın 46,5-1836 keV enerji aralığı için GESPECOR'da hesaplanan verim değerleri

Enerji/ h	46,5	59,5	88,0	122,1	165,9	279,2	391,7	514,0	661,67	898,0	1173,2	1332,5	1836,1
8 cm	0,0008	0,0054	0,0195	0,0273	0,0281	0,0211	0,0161	0,0131	0,0108	0,0086	0,0071	0,0065	0,0050
9 cm	0,0008	0,0052	0,0186	0,0259	0,0266	0,0200	0,0153	0,0123	0,0102	0,0082	0,0068	0,0062	0,0047
10 cm	0,0008	0,0049	0,0174	0,0242	0,0248	0,0187	0,0144	0,0116	0,0096	0,0077	0,0064	0,0058	0,0045
10,85 cm	0,0008	0,0046	0,0161	0,0224	0,0230	0,0174	0,0134	0,0108	0,0090	0,0072	0,0060	0,0054	0,0042
12 cm	0,0007	0,0043	0,0150	0,0207	0,0214	0,0162	0,0124	0,0101	0,0084	0,0067	0,0056	0,0051	0,0040
13 cm	0,0007	0,0041	0,0139	0,0193	0,0198	0,0150	0,0116	0,0095	0,0078	0,0063	0,0052	0,0048	0,0037



Şekil 4.23. 8,0 cm sabit yarıçap ve farklı yüksekliklere sahip Marinelli kapların GESPECOR MC'den elde edilen enerji verim eğrisi

Simülasyonlarda dedektöre en yakın mesafede yerleştirilen farklı yarıçaplarına karşılık Marinelli kabının farklı yüksekliklerde hesaplanan verim değerleri aşağıdaki gibidir. 30 farklı kurulumda GESPECOR MC programının PHITS MC programından olan yüzde farkı Çizelgede 4.42’de verilmiştir. 88 keV ve altındaki enerjiler haricindeki tüm enerjilerin farklı tüm boyutları için uyumludur. Sonuçlar, Marinelli kabının hacmi arttırıldıkça verim değerlerinin azaldığını göstermektedir. Marinelli kabın yarıçap ve yüksekliği arttırıldığında artan numune kalınlığı öz-soğurma sebebiyle düşük enerjili fotonların dedektöre ulaşmasına engel olur.

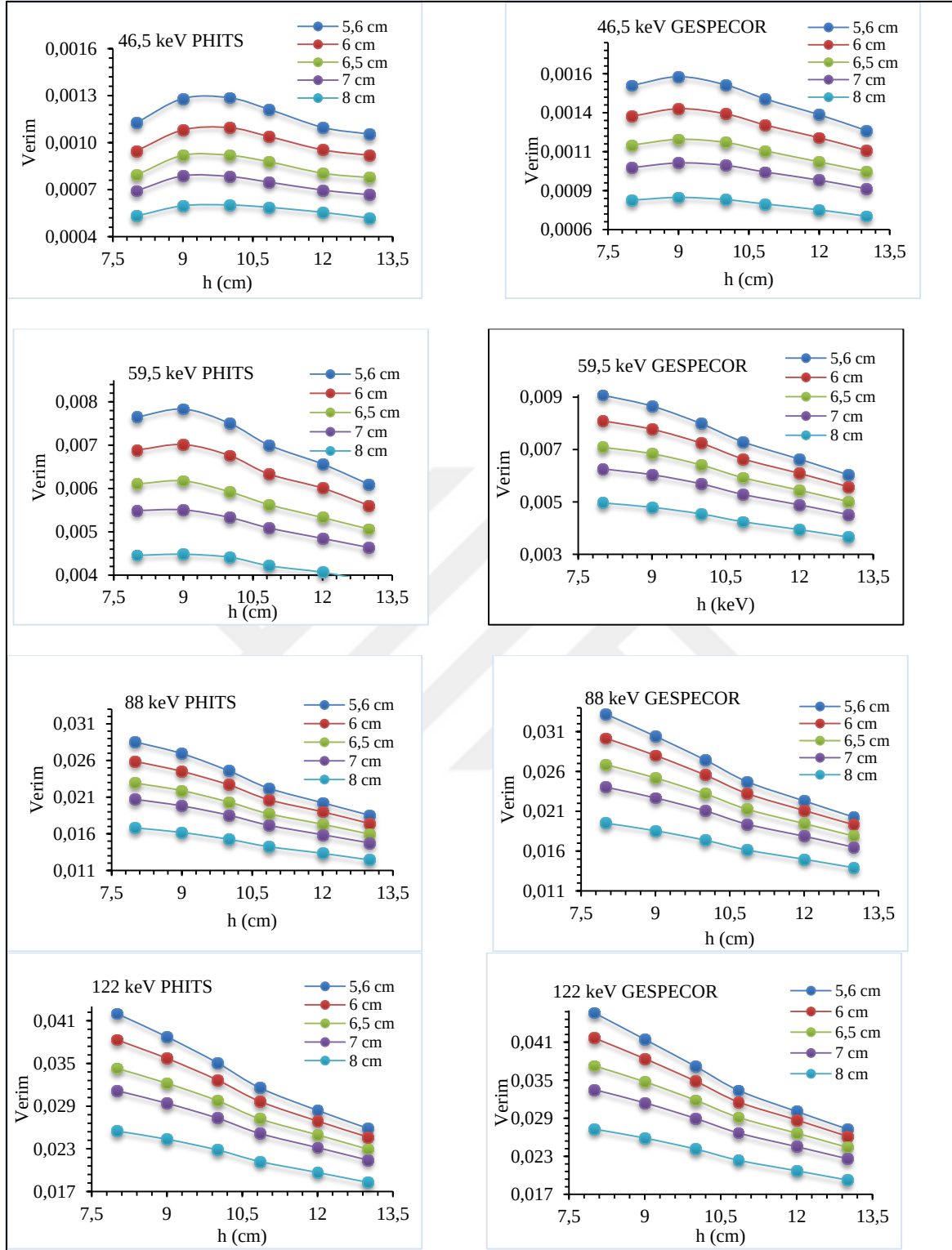
Çizelge 4.42. 8,0-13,0 cm aralığındaki yükseklikler ve 5,6-8,0 cm aralığındaki yarıçaplarda olan Marinelli kaplarının 46,5-1836 keV enerji aralığında GESPECOR ve PHITS’ten elde edilen verim değerlerinin %farkı

Enerji (keV)	r/h	5,6 cm	6,0 cm	6,53 cm	7,0 cm	8,0 cm
46,54	8 cm	26,1	28,6	30,5	30,6	32,6
59,54		24,5	24,8	25,1	25,0	26,2
88,03		14,1	7,6	14,7	13,8	13,9
122,06		7,9	8,0	7,9	7,0	6,5
165,86		4,9	4,9	4,8	3,8	3,5
279,20		2,7	2,5	2,2	1,5	1,6
391,70		1,9	1,7	1,2	0,6	0,4
514,00		1,4	1,5	1,3	0,5	0,5
661,66		1,1	1,3	2,4	1,0	1,3
898,04		0,5	0,9	1,5	0,1	1,2
1173,23		0,5	0,6	0,3	0,2	1,4
1332,49		0,1	1,4	0,1	1,3	0,3
1836,07		2,4	2,3	1,9	2,8	3,8
46,54	9 cm	19,0	21,4	22,0	23,3	25,9
59,54		19,1	20,3	21,6	22,2	23,3
88,03		11,5	12,5	13,1	12,7	12,8
122,06		6,5	7,0	7,3	6,5	5,9
165,86		3,8	4,0	4,2	3,6	2,6
279,20		1,9	1,8	1,7	0,9	0,9
391,70		1,0	1,1	0,8	0,1	0,5
514,00		0,4	1,0	0,9	0,6	0,7
661,66		0,6	0,9	1,6	0,6	0,4
898,04		1,2	0,8	1,4	0,2	0,6
1173,23		0,0	1,1	0,2	0,2	0,1
1332,49		0,6	1,0	0,3	0,7	0,4
1836,07		0,6	1,4	0,6	1,7	3,7
46,54	10 cm	15,9	18,4	20,7	22,5	24,0
59,54		16,5	18,1	20,4	20,7	20,8
88,03		10,5	11,3	12,4	12,0	12,2
122,06		5,6	6,2	6,5	5,7	5,4
165,86		3,3	3,7	4,0	3,5	2,6
279,20		2,1	1,6	1,7	0,7	0,1
391,70		1,2	1,4	0,9	0,3	0,4
514,00		1,3	0,9	0,6	0,1	0,6
661,66		1,5	1,1	1,4	0,5	0,6
898,04		1,7	1,4	0,9	0,5	0,8
1173,23		0,1	0,2	0,6	0,1	0,5
1332,49		1,0	0,4	0,8	0,4	0,1
1836,07		0,4	1,2	1,9	2,2	3,1
46,54	10,85 cm	15,7	18,2	20,5	22,8	23,1
59,54		15,5	17,2	19,0	19,3	20,0
88,03		10,2	11,1	11,9	11,4	11,7
122,06		5,5	6,0	6,6	5,7	5,2
165,86		3,5	3,7	3,9	3,6	2,2

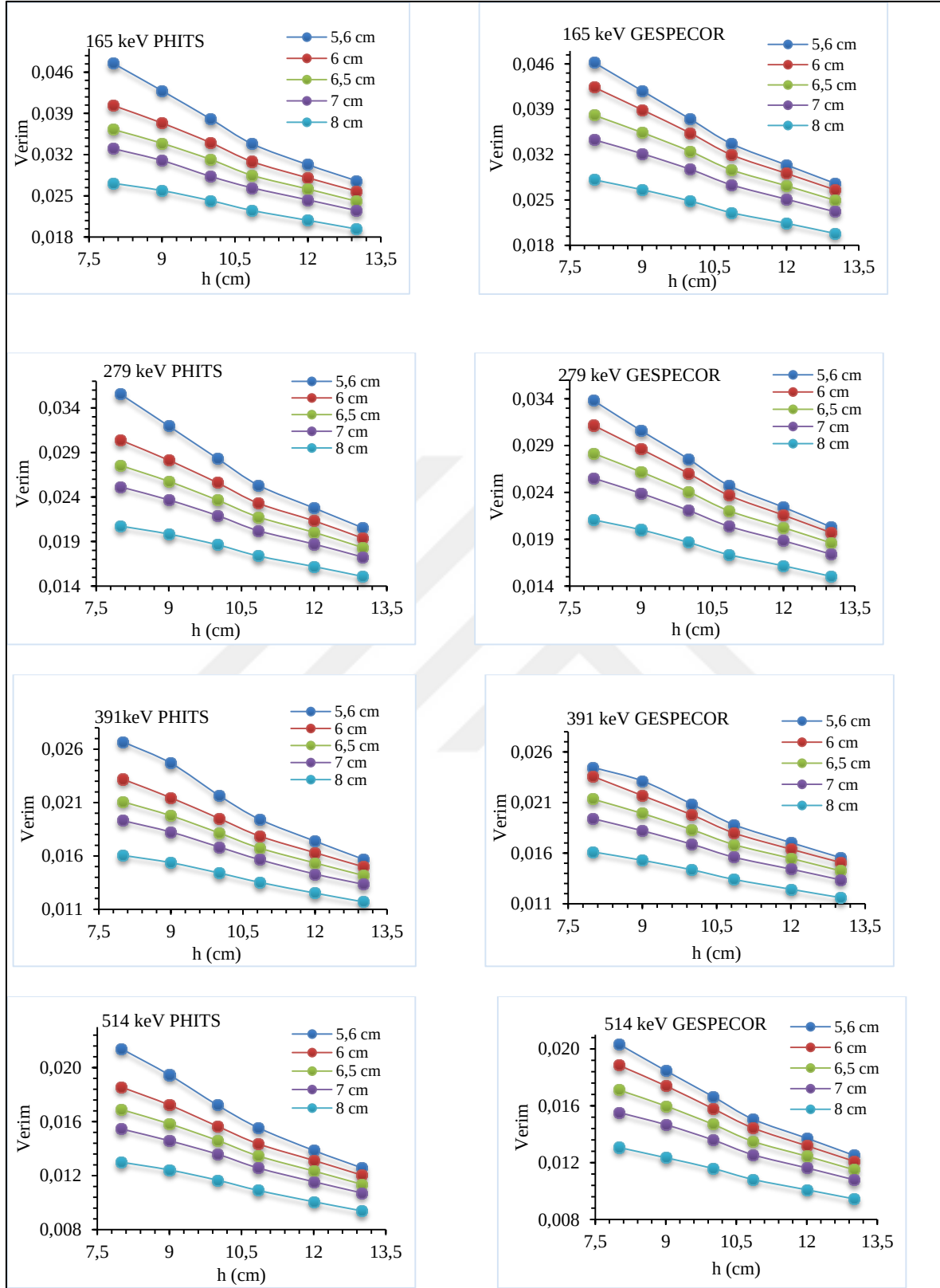
Çizelge 4.42. (devam) 8,0-13,0 cm aralığındaki yükseklikler ve 5,6-8,0 cm aralığındaki yarıçaplarda olan Marinelli kaplarının 46,5-1836 keV enerji aralığında GESPECOR ve PHITS'ten elde edilen verim değerlerinin %farkı

279,20		1,8	1,7	1,3	0,9	0,1
391,70		0,9	0,8	0,7	0,3	0,9
514,00		0,4	0,6	0,3	0,0	0,8
661,66		0,6	1,2	1,8	0,6	0,9
898,04		0,7	1,0	1,0	0,7	0,3
1173,23		0,4	0,8	0,0	0,7	1,1
1332,49		1,6	0,8	0,5	1,3	1,8
1836,07		0,3	0,8	1,2	0,5	3,4
46,54	12 cm	18,0	19,8	22,1	24,0	23,6
59,54		13,7	15,1	17,4	17,8	17,9
88,03		9,3	9,9	11,1	11,1	10,9
122,06		5,5	6,4	6,4	5,5	5,1
165,86		3,3	3,6	3,8	3,2	2,5
279,20		1,7	1,2	1,1	0,6	0,1
391,70		1,3	0,6	0,9	0,9	0,7
514,00		1,4	0,4	0,9	0,7	0,2
661,66		0,1	0,0	1,5	0,6	0,4
898,04		0,2	0,3	0,8	0,5	0,8
1173,23		1,2	1,8	2,0	1,5	2,1
1332,49		1,2	1,6	1,1	1,5	1,3
1836,07		0,9	0,9	1,7	0,7	2,6
46,54	13 cm	14,7	17,1	20,2	22,6	24,4
59,54		13,0	14,5	15,7	15,8	17,0
88,03		8,6	9,8	10,8	10,5	10,6
122,06		5,2	5,7	6,0	5,3	5,1
165,86		2,7	3,0	3,5	3,0	2,3
279,20		1,6	1,7	1,6	0,9	0,3
391,70		0,9	0,7	0,6	0,2	0,8
514,00		1,0	0,5	1,3	0,7	0,6
661,66		0,0	0,1	0,7	0,7	0,1
898,04		0,4	1,3	0,0	0,1	0,2
1173,23		0,7	1,2	1,3	1,2	2,6
1332,49		1,0	1,3	0,2	1,3	2,2
1836,07		0,0	0,6	0,4	0,1	2,8

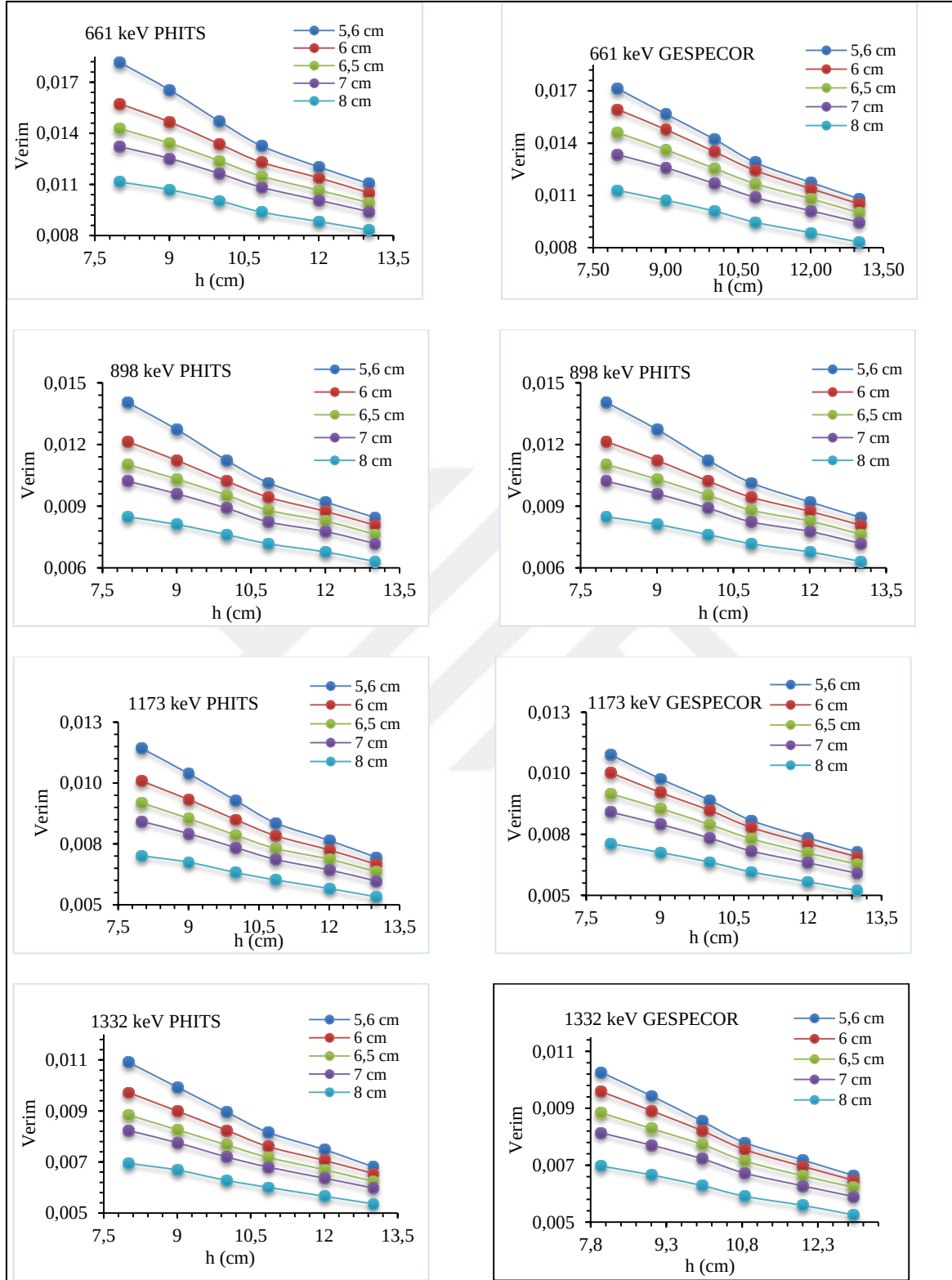
HPGe dedektör verim değeri özellikle numune enerjisine ve numunenin geometrisine yakından bağlıdır. Tanımlanan kaynak geometrisi altında verilen dedektörün enerji- verim ilişkisi incelenmiştir. Enerji verim eğrilerini oluşturmak için tüm enerjilerde 5,6-8,0 cm yarıçap ve 8,0-13,0 cm yüksekliklerde 46,5-1836 keV aralığındaki enerjilerin verim grafikleri görülmektedir (Şekil 4.25). ^{210}Pb radyoaktif çekirdeğinin 46,5 keV'taki foton enerjisi için Marinelli kabının 5,6 cm'lik yarıçapı ve yaklaşık 8,0 cm'lik yükseklikte tasarlanan durumu için bariz bir plato şekli görülmektedir. Bu plato öz-soğurma etkisinden kaynaklanmaktadır. 88 keV'den 1836 keV'e kadar yarıçap ve yükseklikler arttırıldıkça enerjiye karşılık verim değerlerinde düşüş gözlenmektedir.



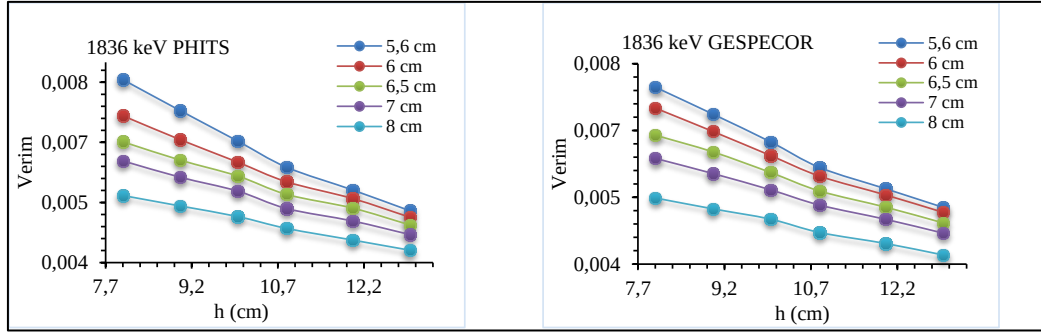
Şekil 4.24. 46,5-1836 keV aralığındaki enerjilerin değişen yarıçap ölçülerinde yüksekliğe karşı verim eğrileri



Şekil 4.24. (devam) 46,5-1836 keV aralığındaki enerjilerin değişen yarıçap ölçülerinde yüksekliğe karşı verim eğrileri



Şekil 4.24. (devam) 46,5-1836 keV aralığındaki enerjilerin değişen yarıçap ölçülerinde yüksekliğe karşı verim eğrileri



Şekil 4.24. (devam) 46,5-1836 keV aralığındaki enerjilerin değişen yarıçap ölçülerinde yüksekliğe karşı verim eğrileri

4.5. HPGe Kristali ve Dedektör Sisteminin Monte Carlo ile Modellenmesi

Deneysel olarak oluşturulması zor veya imkansız olan durumları oluşturmak için simülasyon programları kolaylıkla kullanılabilir. Alüminyum tutucular ve ölü bir tabaka olmadan doğrudan sadece germanyum kristalinin gama ışınlarına maruz kalması durumundaki davranışını incelemek günümüz teknolojisi ile mümkün değildir. Çünkü HPGe dedektörün kristalinden de-monte halde iken veya dedektörün eksik bir parçası ile ölçüm almak imkansızdır. Böyle bir durumun davranışının incelenmesi ancak MC ile mümkündür. Çünkü deneysel olarak kristalin gama ışınlarıyla etkileşimi, elektrik yüklerinin toplanmasıyla saptanabilmektedir (Huy, 2011; Uyar ve diğerleri, 2021). Bu elektrik yüklerini toplamak için germanyum kristalinin yüzeylerinden biri üzerinde lityum atomları ile bir temas oluşturmak gerekir, bu da lityum atomlarının kristal içine difüzyonu nedeniyle ölü tabakanın oluşmasına neden olur (Andreotti ve diğerleri, 2014; Huy, 2011).

Daha önceki çalışmalarda, farklı HPGe dedektörlerinden elde edilen deneysel verim değerleri ile PHITS ve GESPECOR Monte Carlo simülasyon araçları kullanılarak elde edilen dedektör verimi değerlerinin uyum içinde olduğu gösterilmiştir (Bölükdemir ve diğerleri, 2021; Uyar ve diğerleri, 2021). Bu çalışmanın temel motivasyonu, HPGe dedektörlerinde verim eğrisinin düşük enerji bölgesindeki tepe formunun nedenlerini ortaya çıkarmaktır. Bir diğeri de GESPECOR ve PHITS simülasyon programlarını kullanarak genel parçalarıyla birlikte keyfi ölçülerde bir HPGe dedektör modeli tasarlamak ve bu kurgu model detektörden toplam enerji pik verim (FEPE) eğrileri oluşturmaktır. Buradan hareketle foton enerjileri 46,5-1836 keV arasında seçilmiş, dedektörün yakın (5 cm), orta (10 cm) ve uzun

(20 cm) mesafe geometrilerindeki verim değerleri belirlenmiştir ve aynı olayı simüle eden iki simülasyon programının sonuçları arasındaki farklar gözlenmiştir.

Ölü tabakanın olmadığı HPGe kristalinin foton enerjisine bağlı veriminin MC kullanılarak araştırılması bu çalışmanın diğer bir amacıdır. HPGe dedektör sistemlerinin FEPE eğrileri oluşturulduğunda, 200 keV altındaki enerji seviyelerinde verim değerlerinin düşük kalması bir problemdir (Harb ve Din, 2008). Bu nedenle çalışmada dedektör sistemlerinin düşük enerji bölgesinde verimin azalmasına neden olan faktörler PHITS ve GESPECOR MC kullanılarak incelenmiştir. Yeni bir dedektör tasarlanmış, kolaylık olması için boyut parametreleri tamsayı olarak alınmış ve radyasyon kaynağı dedektör kristalinden tamsayı uzaklıklara yerleştirilmiştir. Amaç verim eğrisinin düşük enerji bölgesindeki bu durumunun nedenlerine odaklanmaktadır. Monte Carlo simülasyonu dört kurulumla gerçekleştirilmiştir: sadece germanyum kristali, ölü tabakalı germanyum kristali, alüminyum tutuculu germanyum kristali ve son olarak ölü tabakalı ve alüminyum tutuculu germanyum kristali ile simülasyon gerçekleştirilmiştir. Belirli bir amaca yönelik bir program olması ve bununla yapılabilecek tasarımların sınırlı olması nedeniyle ilk etapta GESPECOR'un koaksiyel dedektör tasarımı esas alınmıştır. Çünkü, genel amaçlı bir kod olma avantajı sayesinde, daha önce GESPECOR'da tasarlanmış herhangi bir dedektör sistemi, PHITS kullanılarak zaten kurgulanabilmektedir.

Çizelge 4.43 Sanal dedektörün MC'deki boyut bilgileri

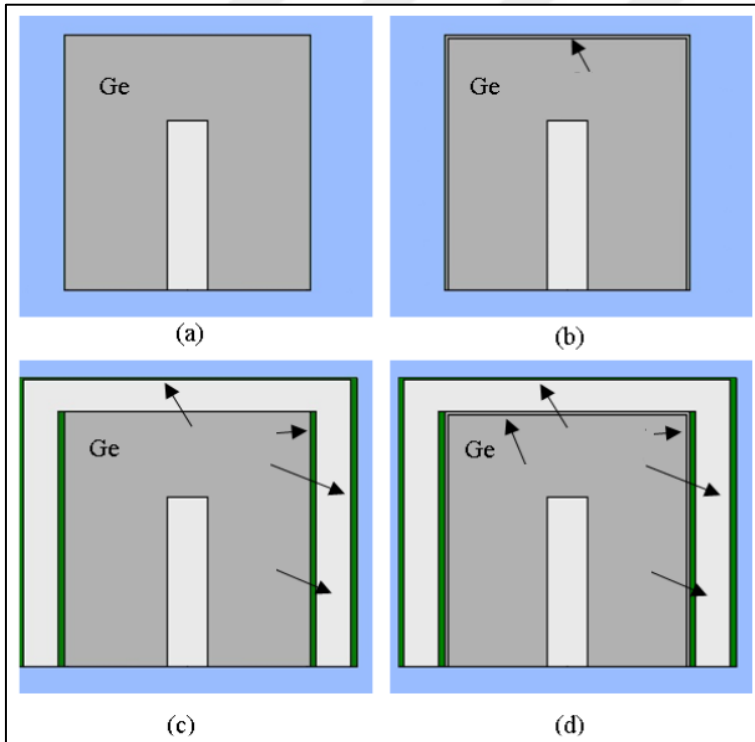
Dedektör bilgileri	Boyut (cm)
<i>Kristal yarıçapı</i>	3,0
<i>Kristalin iç yarıçapı</i>	0,5
<i>Kristalin dış yüksekliği</i>	6,0
<i>Kristalin iç derinliği</i>	4,0
<i>Dış ölü tabaka kalınlığı</i>	0,07
<i>Alüminyum tutucu (dış)</i>	0,0001
<i>Alüminyum tutucu (yan)</i>	0,15
<i>Ön boşluk</i>	0,75
<i>Yan boşluk</i>	0,85
<i>Dedektörün ön kalınlığı</i>	0,06
<i>Dedektörün yan kalınlığı</i>	0,15
<i>Dedektörün çapı</i>	8,3
<i>Dedektörün uzunluğu</i>	6,81

Her iki simülatörde kullanılan parçacık sayısı, tüm enerji değerleri için 10^6 idi ve bu da %1'den az belirsizlik veriyordu. Literatürdeki dedektör parametreleri dikkate alınarak belirlenen dedektör sisteminin boyutları Çizelge 4.43' te gösterilmiştir. GESPECOR ve

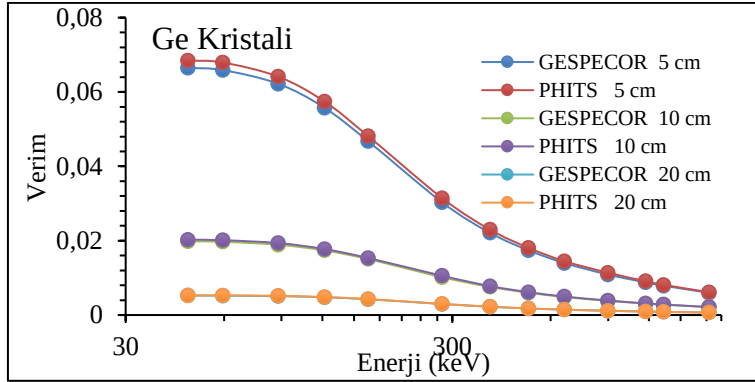
PHITS sonuçları arasındaki bağıl yüzde sapma (RD%) Eş. 2.29'da gösterilmektedir. Simulasyon programları arasındaki %RD aşağıdaki eşitliği kullanılarak tahmin edilmiştir.

$$RD\% = \frac{\varepsilon_{GESPECOR} - \varepsilon_{PHITS}}{\varepsilon_{GESPECOR}} \times 100 \quad (2.29)$$

Hem GESPECOR'da hem de PHITS'te alüminyum tutucular ve ölü tabaka (DL) içermeyen, ancak iç boşluklu saf bir kristal tasarlandı (Şekil 4.25 a). Simülatörler, kristalden sırasıyla düşük (5cm), orta (10cm) ve uzun (20cm) mesafelere yerleştirilmiş noktasal kaynaklardan yayıldığı varsayılan ilgili enerjiler için ayrı ayrı çalıştırıldı. Aynı işlem sırasıyla kristale ölü bir tabaka eklenerek (Şekil 4.25 b) ve ölü tabaka içermeyen kristale sadece alüminyum tutucular ve kristal iç deliği eklenerek (Şekil 4.25 c) tekrarlandı. Daha sonra kristale ölü tabaka, alüminyum tutucular ve alüminyum tutucular arasındaki hava boşluğu eklenerek simülatörler yeniden çalıştırılmıştır (Şekil 4.25 d). Bu işlemlerde noktasal kaynakların uzaklıklarının dedektör sistemine değil kristale olan uzaklıklarıdır.



Şekil 4.25. Monte Carlo simülasyonundaki dört kurulumun görünümü, a) sadece germanyum, b) ölü tabakalı germanyum, c) alüminyum tutuculu germanyum, d) ölü tabakalı ve alüminyum tutuculu germanyum



Şekil 4.26. Saf Germanyum kristali için foton enerjilerine karşı verim eğrisi

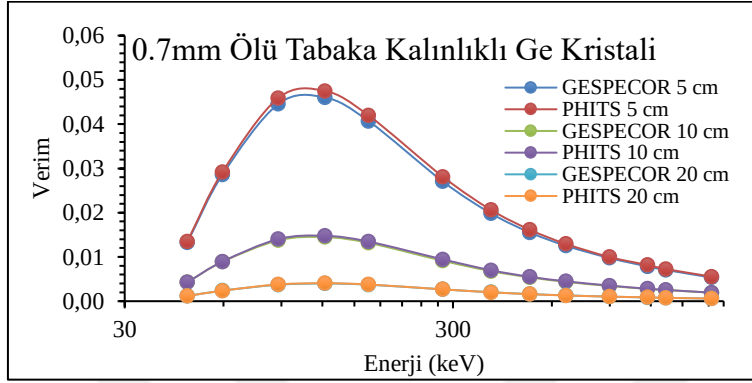
Sistemin karmaşıklığı arttıkça GESPECOR ve PHITS sonuçlarındaki farklılığı etkileyen faktörlerin artabileceği düşünülerek, her iki simülasyon programı da sadece saf kristaller (DL, alüminyum vb. olmadan) mevcutken çalıştırılmıştır (Şekil 4.26).

Çizelge 4.44. PHITS ve GESPECOR'dan elde edilen verimler arasında %RD a) saf Ge kristali için b) 0,7 mm ölü tabakaya sahip germanyum kristali için c) Al tutucu/boşluk ve DL'siz bir germanyum kristalinden oluşan sistem için d) tüm dedektör sistemi

Enerji (keV)	Saf Germanyum kristali			0,7 mm ölü tabakaya sahip Germanyum kristali			Al tutucu/boşluk ve DL'siz Germanyum kristali			Tüm dedektör sistemi		
	5cm	10 cm	20 cm	5cm	10cm	20cm	5 cm	10 cm	20 cm	5cm	10 cm	20 cm
46,54	2,98	2,34	1,53	1,63	0,16	0,01	3,24	0,17	1,71	1,95	0,88	0,08
59,54	3,10	2,15	1,47	2,12	0,58	0,50	3,30	2,30	1,45	2,19	0,44	0,95
88,03	3,08	2,39	1,75	3,03	2,06	1,71	3,23	2,43	1,83	3,14	2,33	2,30
122,06	3,06	2,11	1,53	3,19	2,05	1,65	3,30	2,16	1,46	3,32	1,96	1,49
165,86	2,93	1,95	1,30	3,09	2,19	1,16	3,01	1,93	1,27	3,09	2,03	1,22
279,20	3,74	3,74	1,21	3,99	3,51	0,03	3,90	3,41	0,87	4,06	3,41	0,24
391,70	3,89	3,12	0,26	3,96	2,91	0,39	3,96	2,72	0,08	4,16	3,05	0,33
514,00	3,90	2,78	1,00	3,93	2,51	0,62	4,01	2,85	1,23	4,05	2,57	0,67
661,66	3,59	2,56	1,22	3,34	2,95	1,59	3,58	2,71	1,89	3,52	3,03	1,47
898,04	4,65	2,37	2,12	2,23	2,78	0,17	2,14	2,46	2,05	2,60	3,32	0,49
1173,23	3,71	1,20	1,82	4,04	1,83	2,95	3,66	0,87	1,68	4,41	2,02	2,65
1332,49	2,90	1,49	0,71	2,95	1,96	1,48	3,00	1,05	0,04	3,15	1,83	0,10
1836,07	2,58	0,16	2,76	395	0,83	2,62	3,04	2,07	3,82	4,02	2,66	2,96

PTB (Almanya) tarafından dedektörlerin kalibrasyonu için önerilen (<https://radioaktif.id/calibration-radioactive-source/standardized>) NG1 radyoaktif kaynak karışımında 46,5-1836 keV enerji aralığındaki fotonlar için verim değerleri hesaplanmıştır. -, 5,10 ve 20 cm mesafelerde. GESPECOR ile PHITS sonuçları arasındaki fark Çizelge 4.44'te gösterilmiştir.

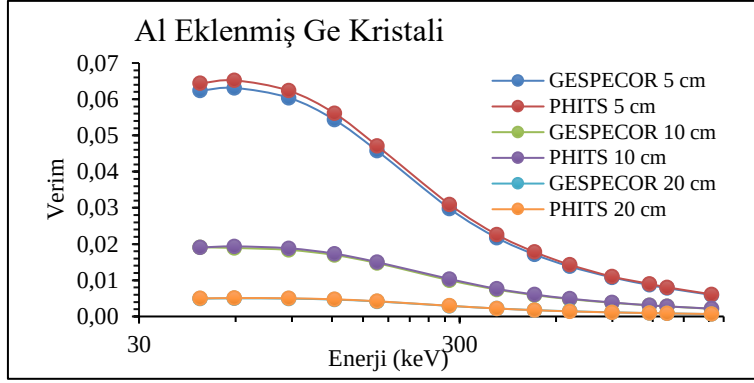
İki simülasyon programının sonuçları arasındaki fark yakın mesafelerde 2,98-4,65, orta mesafelerde 0,16-3,74 ve uzun mesafelerde 0,26-2,76 olarak bulunmuştur. Mesafe arttıkça simülatörlerin sonuçları arasındaki fark azalmaktadır.



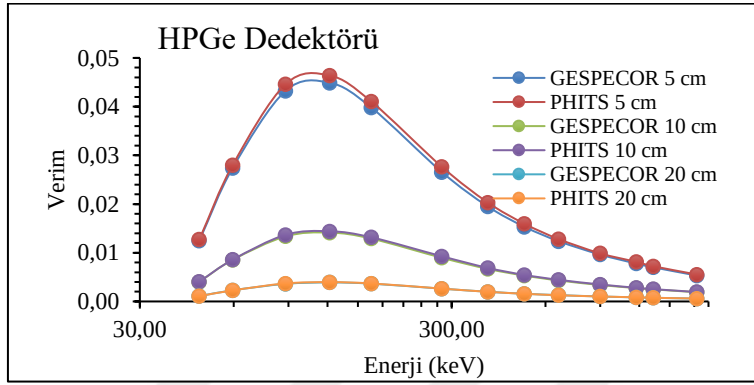
Şekil 4.27. 0,7 mm'lik bir ölü tabakaya sahip saf Germanyum kristali için foton enerjilerine karşı verim eğrisi

İkinci aşamada, kristale genellikle üreticiler tarafından belirtilen ölü tabaka olan 0,7mm ölü tabaka içeren kristal için simülatörler çalıştırılmış ve sonuçlar Şekil 4.27'de gösterilmiştir. GESPECOR ve PHITS sonuçları arasındaki fark Çizelge 4.44'te de gösterildiği gibi yakın mesafelerde 1,63-4,04, orta mesafelerde 0,16-3,51 ve uzun mesafelerde 0,01-2,95'tir. Mesafe arttıkça simülatörlerin sonuçları arasındaki fark azalmaktadır. Çalışmanın bu aşamasında FEPE eğrisinde 122 KeV civarında bir pik olduğu ve bu pikten daha düşük enerjilere inildikçe konvansiyonel dedektör sistemlerinde olduğu gibi verim değerlerinin düştüğü görülmektedir.

Çalışmanın üçüncü aşamasında ise kristal (DL'siz), alüminyum tutucular ve tutucular arasındaki boşluklardan oluşan sistem için simülatörler çalıştırılmış ve sonuçlar Şekil 4.28. gösterilmektedir. GESPECOR ve PHITS sonuçları arasındaki farklar Çizelge 4.44'te gösterildiği gibi yakın, orta ve uzun mesafelerde sırasıyla %2,14-4,01, %0,17-2,85 ve %0,04-3,82'dir. Mesafe arttıkça simülatörlerin sonuçları arasındaki fark beklendiği gibi azalmaktadır. Alüminyum tutucuların FEPE eğrisinin şekli üzerinde çok küçük bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Düşük enerji bölgesindeki verim değerleri, enerji düştükçe hafifçe azalmaya başlar ve 59,54 keV'ta ihmal edilebilir bir tepe noktası gözlenir.



Şekil 4.28. DL ve Al tutucusu ve boşlukları olmayan bir Germanyum kristalinden oluşan sistem için foton enerjilerine karşı verim eğrisi



Şekil 4.29. Tüm dedektör sistemi için foton enerjilerine karşı verim eğrisi

Çalışmanın son aşamasında, ölü tabakalı Ge kristali, alüminyum tutucular ve tutucular arasındaki boşluklar dahil olmak üzere tüm dedektör sistemi (koruyucu hariç) için dedektör verimi elde edilmiş ve sonuçlar Şekil 4.29 'da gösterilmiştir. Yakın mesafelerde %1,95-4,41, orta mesafelerde %0,44-3,41 ve uzun mesafelerde %0,08-2,96 arasında değişmektedir. Yine mesafe arttıkça simülasyon sonuçları arasındaki fark azalmaktadır. Dedektörün her bir parametresindeki en ufak bir değişiklik, simülasyon verim değerleri arasındaki farkı arttırıp azaltabildiğinden her ayrıntıya dikkat edilmelidir.



5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Gama spektrometresinde gama ışınlarından kaynaklanan fotonları sayarken daha az istatistiksel sapma için yüksek verim değerlerine sahip olmak bir avantajdır. Dedektörün verimini özellikle düşük enerjili bölgede arttırabilmek önemlidir. Bu nedenle tez çalışmasında belirlenen bir p-tipi HPGe dedektörle hem standart nokta kaynak hem de 4 farklı yoğunluktaki standart Marinelli kaynakların verim değerleri hesaplanmıştır. Deneysel verim değerlerini dikkate alarak MC verim değerleri ile dedektörün karakterizasyonu belirlenmiştir. Farklı yarıçap ve yüksekliklerde tasarlanan Marinelli kaplar ile Marinelli kap modellenmesi yapılmıştır. En sonunda ise verime en çok etki eden ölü tabaka ve alüminyum tutucular gibi dedektör parametrelerinin davranışları MC’de tek tek incelenmiştir. Yapılan çalışmada ölü tabaka kalınlığının enerji-verim eğrisini doğrudan etkilediği görülmüştür.

Tez çalışmasında ilk olarak standart nokta ve 0,5 g/cc, 0,7 g/cc, 1,0 g/cc ve 1,3 g/cc yoğunluğa sahip çok enerjili radyoaktif çekirdekleri içeren Marinelli kaynakların deneysel verimleri, bağlı verimi %30 olan 7 yıllık p-tipi dedektörde sayımları alınmıştır. Nokta kaynak için 10000 s ve Marinelli kaynaklar için 20000 s sayım yapılmıştır. Nokta kaynak ve Marinelli kaptaki radyoaktif çekirdeklerin gama enerjileri birbirleri ile aynı ve: ^{210}Pb (46,54 keV), ^{241}Am (59,54 keV), ^{109}Cd (88,03 keV), ^{57}Co (122,06 keV) ^{139}Ce (165,89 keV), ^{203}Hg (279,20 keV), ^{113}Sn (391,70 keV), ^{85}Sr (514,00 keV), ^{137}Cs (661,66 keV), ^{88}Y (898,04 keV, 1836,07 keV), ^{60}Co (1173,23 keV, 1332,49 keV) şeklindedir. Deneyde kullanılan aynı enerji setine sahip olan radyoaktif nokta ve Marinelli kaynaklar için enerji, kaynak aktivitesi (Bq) ve belirsizliği, yarılanma ömürleri (gün), gama yayınlanma olasılığı (γ), sayım hızı ve bu parametreler kullanılarak hesaplanan dedektör verimi (ϵ) ve verime ait mutlak hata (%) değerleri nokta kaynak için Bölüm 4.1.1.’de Marinelli kaynaklar için Bölüm 4.1.2.’de verilmiştir. Bu deneysel bilgiler toplam enerji pik veriminin Monte Carlo Yöntemi ile belirlenmesi, dedektör karakterizasyonu ve kaynak geometrilerinin modellenmesi çalışmalarında referans olarak kullanılmıştır.

Çalışmada nokta ve 4 farklı yoğunluktaki epoksi Marinelli radyoaktif kaynaklar Bölüm 4.1.’de deneysel verim değerleri elde edildikten sonra Bölüm 4.2.’de PHITS ve GESPECOR Monte Carlo programlarından elde edilen dedektör verim değerleriyle karşılaştırılmıştır. Dedektörün tek parça ölü tabaka kalınlığı, alüminyum tutucular, kaynak-dedektör mesafesi

vb. parametreler kullanılarak MC modellemeleri yapılmıştır. Üretici firmanın üretim esnasında öngördüğü 0,7 mm'lik ölü tabaka kalınlığı kullanılarak GESPECOR ve PHITS MC programları ile dedektörün verim değerleri elde edilmiştir. Deneysel verim ile üretici firmanın verdiği 0,7 mm'lik ölü tabaka kalınlığına göre PHITS ve GESPECOR MC programlarından elde edilen nokta kayanın verim değerleri arasındaki fark 46,5, 59,5 ve 88 keV'ta sırasıyla %157,8, %70,3 ve %25,5; %158,0 %71,3 ve %25,9'dur. Yaklaşık 150 keV'un altındaki enerjilerde, p-tipi dedektör için verimin düşmesi, düşük enerjili fotonların dış ölü tabakadan geçerken soğurulmasından kaynaklanmaktadır.

MC ile yapılabilen ölü tabaka kalınlığı ayar yöntemi, dedektör kristalinin yüzeyindeki ölü tabaka kalınlığının deneye en yakın sonuçların bulunmasına dayanır. Deneysel verim ve simülasyon programlarından elde edilen dedektör verimi değerleri karşılaştırıldığında sayısal olarak en yakın sonuçlar tercih edilmektedir. Zamanla kristalin lityum difüzyonu artışının 100 keV'tan düşük enerjilerdeki bu tutarsızlığını iyileştirebilmek için her iki programda da verime en fazla etki eden ölü tabaka kalınlığı 0,1 mm boyutlarında kademeli olarak artırılarak yeniden hesaplatılmıştır. Germanyum kristalinin dış ölü tabaka kalınlığı 0,7 mm'den 1,7 mm ye kadar 0,1 mm aralıklarla PHITS'te ve GESPECOR MC'de çalıştırılmıştır. Bu hesaplamalarda 1,4 mm'de ölü tabaka kalınlığında 46,5, 59,5 ve 88 keV'taki enerjileri için PHITS'ten elde edilen yüzdelik fark sırasıyla %57,2, %34,5 ve %14'tür. GESPECOR'da ise bu değerler sırası ile %57,1, %33,9 ve %13,7 şeklinde vermiştir. Bu yüzdelik farklar deneysel verim değeri ile dedektör verim değerlerinin birbirlerinden oldukça uzaklaştığını göstermektedir. Dedektörün ölü tabaka kalınlığındaki en ufak bir değişiklik, simülasyon ve deneysel verim değerleri arasındaki farkı bariz şekilde değiştirmiştir.

Nokta kaynak için MC'de ölü tabaka kalınlığı arttırıldıkça (1,4 mm civarına kadar artmakta) elde edilen dedektör verim değeri deneysel verim değerine yaklaşmaktadır. Nokta kaynak için Monte Carlo da hesaplanan dedektör verimlerinden sonra 4 farklı yoğunluktaki Marinelli geometri için elde edilen deneysel verim değerleri ile PHITS ve GESPECOR simülasyon programlarından elde edilen dedektör verim değerleri karşılaştırılmıştır. 0,5 g/cc ve 0,7 g/cc yoğunluklu epoksi kaynak için 1,5 mm ölü tabaka kalınlığında deneysel verim değerleri ile en iyi uyum yakalanırken, 1,0 g/cc ve 1,3 g/cc yoğunluklu epoksi kaynak için 1,6 mm ölü tabaka kalınlığında en iyi uyum yakalanmıştır. Dört Marinelli kaynak için 100 keV üzerindeki enerjilerde PHITS ve GESPECOR programlarından elde edilen dedektör

verim değerleri için ölü tabaka kalınlığı 0,7 mm'den başlayarak arttırıldıkça deneysel verim değerleriyle olan uyumun arttığı gözlenmiştir. 100 keV enerji altında ise nokta kaynağına benzer olarak hesaplama ve deneysel verim değerleri arasında ciddi farklar gözlenmiştir. Azli ve Chaoui (2015), çalışmasında da dediği gibi 59,54 keV'luk foton enerjisi dedektörün dış ölü tabakasından kristale ulaşmak için yetersizdir, ancak 661,66 keV'luk foton enerjisi kristalin hem dış yan hem de iç ölü tabakasına ulaşmak için yeterlidir. 122,06 keV'un üzerindeki enerjilerde hem GESPECOR hem de PHITS MC kodlarının dedektör verimi sonuçları yüksek enerjiler için aktif hacim azaldığında verim çok az düşerken 46,5-88 keV enerji aralığı için daha güçlü bir şekilde düşüş gözlenmiştir.

Homojen bir kalınlığa sahip bir ölü tabaka kalınlığı (Germanium malzemesinin tekdüze ölü tabaka kalınlığı) göz önüne alındığında, aynı anda hem düşük hem de yüksek foton enerjilerinde deney ve MC verim değerleri arasında bir uyum yakalamak çok zordur. Çalışmalarda PHITS ve GESPECOR olmak üzere iki farklı simülasyon programından elde edilen sonuçların deney ile uyuşmadığı ancak birbiri ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Bu sorunun nasıl iyileştirilebileceğine dair en iyi yaklaşım dedektörün ölü tabaka kalınlığının ön ve yan olarak iki parçaya ayrılabilmesi olarak değerlendirilmiştir.

Bölüm 4.3.'te nokta ve Marinelli kaynaklar kullanılarak 46,5-1836 keV arasındaki foton enerjileri ile germanium kristalinin hem ön hem de yan ölü tabaka kalınlığının lokal olarak değişimi detaylı biçimde incelenmiştir. GESPECOR programında ön ölü tabaka kalınlığı üretici firma değeri olan 0,7 mm'den 1,2 mm'ye yan ölü tabaka kalınlığı ise 0,7 mm'den (üretici firma değeri) 1,9 mm'ye kadar kalınlaştırılmıştır. GESPECOR programından elde edilen ölü tabaka dağılımının deneyden elde edilen nokta kaynak verim değerine karşılık %farkları Çizelge 4.27.'de verilmiştir. Ön ölü tabaka kalınlığı 1,1 mm yan ölü tabaka kalınlığı 1,7 mm'de 46,5, 59 ve 88 keV'de sırasıyla %9,1, %2,1 ve %0,4 fark elde edilmiştir. Ön ölü tabaka kalınlığı arttırıldıkça 88 keV altındaki enerjiler için deney ve simülasyonlar arasında uyum sağlanmıştır.

Bunun üzerine ön ölü tabaka kalınlığı olan 1,0 mm kalınlığı neredeyse sabit tutulacak şekilde yan ölü tabaka kalınlıkları 0,1 mm olarak 1,7 mm ye kadar arttırılmıştır. İnce ayar için ön ölü tabaka kalınlığı milimetrenin çeyrek katı kadar arttırılarak taranmıştır. 1,025 mm-1,7 mm, 1,050 mm-1,7 mm ve 1,075 mm-1,7 mm kalınlıkta daha hassas bir biçimde incelendiğinde deneysel ve GESPECOR ile PHITS MC sonuçları 4. Bölümde çizelge ve grafikler ile

gösterilmiştir. Ön ölü tabaka kalınlığı 1,075 mm ve yan ölü tabaka kalınlığı 1,7 mm alındığında; deneysel sonuçlardan sapmalar PHITS için 46,5 keV'ta %3,7, 59,5 keV'ta %0,1 ve 88 keV'ta %0,4 ve GESPECOR için 46,5 keV'ta %3,1, 59,5 keV'ta %1,2 ve 88 keV'ta %0,9 olarak elde edilmiştir. Her iki MC programında dedektör veriminin deneysel verimden sapmaları %5 in altında tespit edilmiştir. GESPECOR ve PHITS MC programlarında ön yüzeyin ölü tabaka kalınlığının, yan yüzey ölü tabaka kalınlığı ile aynı miktarda kalınlaşma yapmadığı ve bu kalınlıktaki ön ve yan ölü tabakanın farklı mesafelerde kalınlaştığı gözlemlendi. Üretici firma tarafından üretim tarihinde 0,7 mm olarak bildirilen ölü tabaka kalınlığı ön yüzeyde 1,075 mm ve yan yüzeyde 1,7 mm olarak belirlenmiştir. Bu sonuç ölü tabaka kalınlığının ön yüzeyde 0,375 mm, yan yüzeyde ise 1,0 mm arttığını göstermektedir. Üretici firmanın verdiği ölü tabaka kalınlığı, ön ölü tabaka kalınlığı için bu değer neredeyse 1,5 kat, yan ölü tabaka için ise bu kalınlık 2,5 kat artmıştır. Bu, esas olarak 7 yıllık kullanım sırasında lityum atomlarının difüzyonundan kaynaklanmaktadır. Böylelikle nokta kaynak ile dedektörün hem ön hem de yan ölü tabaka kalınlığının belirlendiği karakterizasyon çalışması yapılmıştır.

Bölüm 4.3.1.'de nokta kaynak ile belirlenen ön-yan ölü tabaka kalınlığı 4.3.2.'de her bir Marinelli yoğunluğu için ayrı ayrı uygulanmıştır. Tanımlanan kaynak geometrisi altında verilen dedektörün enerji- verim ilişkisi incelenmiştir. Özellikle düşük enerjili fotonlar için yan ölü tabakanın önemli bir etkisinin olduğu görülse de yüksek enerjili fotonlar için yan ölü tabakadaki değişimin etkisi oldukça azdır. Nokta kaynaklarda olduğu gibi Marinelli kaynaklar için de ön ve yan ölü tabaka kalınlığı iki parça halinde incelendiğinde deney-simülasyon karşılaştırmaları tek parçadaki hesaplamalara kıyasla daha iyi ve genel olarak literatürle uyumlu görünüşü elde edilmiştir (Krishnan ve diğerleri, 2017; Huy 2010). Ancak bazıları (Kaya ve diğerleri, 2022) çalışmalarında yan ölü tabaka arttıkça verimin arttığını belirtmiş olsalar da bu çalışmanın sonuçlarında literatüre göre bir hata olmadığı gözlenmiştir. Çünkü DL arttıkça aktif kristal hacminde azalma olacağı için verimin düşmesi bekleniyordu ki çalışmanın sonucunun da literatüre bağlılığını göstermiş oldu.

Bölüm 4.4.'te 1,0 g/cc yoğunluklu epoksi Marinelli kabın deney sonuçları dikkate alınarak sanal ortamda tasarlanan Marinelli kabın yarıçapı ve yüksekliğinin verime etkisi incelenmiştir. Dedektöre ve mevcut malzeme miktarına bağlı olarak kap boyutları ve şekli değiştirilmiştir. Marinelli kabın iç boşluğunun çapı dedektör muhafazasına çok yakın olması ve boşluğun derinliği dedektör uzunluğunu önemli ölçüde aşmamasına dikkat edilmiştir.

Dedektörün her bir parametresindeki en ufak bir değişiklik, simülasyon verim değerleri arasındaki farkı artırıp azaltabildiğinden her ayrıntıya dikkat edilmiştir. Marinelli kap modellenmesi GESPECOR MC'ye göre PHITS MC'nin yüzde farkları olarak hesaplanmıştır. Hesaplama PHITS'ten elde edilen verim değerleri GESPECOR'dan çıkarılmış ve GESPECOR'a olan oranının yüzdesi ile çarpılarak elde edilmiştir. Simülasyon programlarından elde edilen verim değerleri ile her iki simülasyon programları arasındaki farklılık karşılaştırıldığında sayısal olarak birbirlerine en yakın sonuçlar tercih edilmiştir. Bu programlar aynı anda farklı kodlar kullanarak aynı olayları simüle ettiğinde, sonuçlar MC kodları tarafından kullanılan kitaplıklara, rastgele sayı üreteçlerine, matematiksel modellere ve diğer değişkenlere bağlı olarak farklılık gösterebilir.

46,5-88 keV enerji aralığı için aktif Marinelli hacmi artırıldığında küçük boyutlara oranla enerjiye karşılık incelenen verim değerinin küçük yarıçap ve yükseklikte olandan daha az bir değere sahip olduğu görülmüştür. Bölüm 4.4.'teki çizelgelere bakıldığında 122 keV'tan büyük enerjilerde klasik enerji verim eğrisine sadık kalındığı gözlenmiştir. 122 keV'den düşük enerjilerde ve özellikle 46,5 keV'ta plato şekli görülmektedir. Bu durum öz-soğurmadan kaynaklanmaktadır. 46,5 keV'tan 122 keV'a kadar verim değerinde bir artış, 122 keV'tan 1836 keV'a kadar verim değerinde düşüş gözlenmektedir. Bu enerji verim eğrisinin doğasına bağlı olarak fotonun madde ile etkileşimlerini göstermektedir. Marinelli kabındaki numuneler dedektörün her yerini kapladığından, dedektörün etrafındaki ve üstündeki ölü tabakanın tam kalınlığı, Marinelli geometrilerin verim simülasyonu için önemlidir. Aktif hacmin azaltılması, daha yüksek enerjiler için daha yüksek bir etkiye sahiptir. Verim eğrisinin logaritmaları ve enerji grafiği 0,05-0,1 MeV aralığında bir plato gösterir. $E > 0,10$ MeV için grafik enerji ile neredeyse lineer olarak azalmaktadır. Düşük enerjili bölgede ($E < 0,1$ keV), gama ışınları sadece dedektörün yüzeyi ile etkileşir (Ahmed ve diğerleri, 2009). Büyük hacimli bir kap içerisinde homojen radyoaktif kaynaktan salınan fotonlar dedektöre ulaşana kadar numune içerisinde hapsolmuş vaziyette kalır. Bu durum duvar kalınlığı dedektöre sağlıklı sayımlar aldırmayacaktır. Düşük enerjili fotonlara sahip numuneler dedektöre yakın konumda ve Marinellinin yüzük kısmındaki kabın duvar ve numune kalınlığı ne kadar ince olursa dedektör tarafından yapılan sayımlar sağlıklı olacaktır. Yarıçap ve yükseklikler düzenli bir şekilde artırıldığında kabın hacmi artacaktır. Artan hacimde yarıçap ve yükseklik mesafeleri arttığında Marinelli kabın dış yüzeyine yakın bölgelerden salınan fotonların dedektöre mesafesi artacağından numunenin dedektör ile etkileşimi azalacaktır. Marinelli kaptaki numune dedektörün germanyum kristali sınırına

yaklaştığında kristalin ölü tabaka kalınlığından dolayı düşük enerjili fotonlar dedektörde sayılamamaktadır. Bu nedenle, enerji-verim eğrisi grafiğinde 88 keV'tan düşük enerji bölgesinde dedektörün verim eğrisi daha hızlı bir şekilde azalmaktadır. Gamanın madde ile etkileşiminde Marinelli kaplarının geometrilerinin dedektöre neden oldukça yakın olması gerektiği yapılan modelleme çalışmasıyla açıklanmıştır.

Çizelge 5.1. Marinelli kabının PHITS MC programından elde edilen farklı yarıçap ve yüksekliklerde 46,5-1836 keV enerji aralığındaki dedektör verim değerleri

r	h	Enerji (keV)												
		46	59	88	122	165	279	391	514	661	898	1173	1332	1836
5,6 cm	8 cm	0,00113	0,00715	0,02853	0,04200	0,04395	0,03293	0,02494	0,02006	0,01643	0,01308	0,01070	0,00978	0,00765
	9 cm	0,00128	0,00733	0,02693	0,03873	0,04026	0,03004	0,02290	0,01839	0,01509	0,01189	0,00978	0,00889	0,00691
	10 cm	0,00129	0,00700	0,02458	0,03510	0,03623	0,02699	0,02060	0,01644	0,01353	0,01074	0,00891	0,00813	0,00627
	10,85 cm	0,00121	0,00650	0,02221	0,03157	0,03250	0,02431	0,01864	0,01506	0,01240	0,00979	0,00811	0,00741	0,00569
	12 cm	0,00110	0,00607	0,02023	0,02840	0,02939	0,02205	0,01682	0,01352	0,01123	0,00898	0,00744	0,00677	0,00524
	13 cm	0,00105	0,00560	0,01853	0,02588	0,02683	0,01999	0,01542	0,01239	0,01030	0,00828	0,00683	0,00620	0,00477
6,0 cm	8 cm	0,00095	0,00639	0,02787	0,03832	0,04033	0,03039	0,02319	0,01856	0,01524	0,01215	0,01008	0,00922	0,00716
	9 cm	0,00108	0,00651	0,02451	0,03570	0,03736	0,02813	0,02145	0,01723	0,01417	0,01123	0,00932	0,00850	0,00657
	10 cm	0,00110	0,00626	0,02268	0,03268	0,03402	0,02561	0,01952	0,01566	0,01287	0,01023	0,00850	0,00775	0,00601
	10,85 cm	0,00104	0,00583	0,02065	0,02967	0,03082	0,02330	0,01786	0,01436	0,01180	0,00944	0,00784	0,00711	0,00552
	12 cm	0,00095	0,00551	0,01900	0,02690	0,02805	0,02132	0,01630	0,01314	0,01089	0,00875	0,00725	0,00656	0,00510
	13 cm	0,00092	0,00511	0,01741	0,02467	0,02579	0,01938	0,01499	0,01204	0,01001	0,00808	0,00666	0,00605	0,00463
6,53 cm	8 cm	0,00079	0,00560	0,02293	0,03430	0,03625	0,02756	0,02108	0,01689	0,01377	0,01103	0,00918	0,00835	0,00652
	9 cm	0,00092	0,00568	0,02189	0,03220	0,03392	0,02576	0,01977	0,01584	0,01292	0,01032	0,00855	0,00776	0,00606
	10 cm	0,00092	0,00542	0,02033	0,02978	0,03117	0,02366	0,01816	0,01461	0,01189	0,00954	0,00786	0,00717	0,00566
	10,85 cm	0,00088	0,00513	0,01873	0,02721	0,02848	0,02175	0,01673	0,01346	0,01098	0,00881	0,00732	0,00669	0,00520
	12 cm	0,00081	0,00483	0,01730	0,02496	0,02615	0,02003	0,01534	0,01235	0,01016	0,00828	0,00687	0,00620	0,00486
	13 cm	0,00078	0,00456	0,01595	0,02296	0,02408	0,01833	0,01418	0,01136	0,00944	0,00764	0,00636	0,00574	0,00444
7,0 cm	8 cm	0,00069	0,00499	0,02071	0,03118	0,03300	0,02514	0,01931	0,01546	0,01272	0,01022	0,00843	0,00774	0,00604
	9 cm	0,00079	0,00501	0,01981	0,02941	0,03100	0,02368	0,01824	0,01459	0,01203	0,00960	0,00793	0,00726	0,00563
	10 cm	0,00078	0,00483	0,01854	0,02733	0,02870	0,02193	0,01684	0,01359	0,01114	0,00891	0,00735	0,00670	0,00528
	10,85 cm	0,00075	0,00459	0,01717	0,02516	0,02636	0,02021	0,01565	0,01256	0,01033	0,00824	0,00687	0,00630	0,00485
	12 cm	0,00070	0,00435	0,01587	0,02318	0,02431	0,01871	0,01430	0,01155	0,00957	0,00777	0,00643	0,00586	0,00454
	13 cm	0,00067	0,00414	0,01476	0,02143	0,02249	0,01726	0,01335	0,01072	0,00891	0,00718	0,00598	0,00548	0,00420
8,0 cm	8 cm	0,00053	0,00396	0,01680	0,02551	0,02712	0,02073	0,01606	0,01300	0,01065	0,00849	0,00702	0,00645	0,00518
	9 cm	0,00060	0,00398	0,01617	0,02435	0,02589	0,01983	0,01537	0,01243	0,01019	0,00811	0,00675	0,00618	0,00491
	10 cm	0,00060	0,00391	0,01524	0,02285	0,02418	0,01864	0,01440	0,01167	0,00954	0,00762	0,00633	0,00578	0,00465
	10,85 cm	0,00059	0,00372	0,01425	0,02122	0,02252	0,01738	0,01352	0,01091	0,00888	0,00717	0,00603	0,00551	0,00435
	12 cm	0,00056	0,00357	0,01334	0,01968	0,02084	0,01619	0,01252	0,01007	0,00833	0,00677	0,00567	0,00516	0,00406
	13 cm	0,00052	0,00337	0,01244	0,01829	0,01937	0,01508	0,01170	0,00939	0,00783	0,00631	0,00533	0,00486	0,00381

46,5-1836 keV aralığında Marinelli kap yüksekliği arttıkça her bir enerjiye karşılık verim değeri azalma göstermektedir. 5,6 cm yarıçap ve 8,0 cm yüksekliğe sahip olan Marinelli kap tasarlanan diğer boyutlara göre tüm enerjilerde en yüksek verim değerini vermektedir. Çizelge 5.2'de ise GESPECOR programından elde edilen 5,6 cm, 6,0 cm, 6,53 cm, 7,0 cm ve 8,0 cm yarıçaplara karşılık 8,0 cm-13,0 cm aralığındaki yükseklik ile hesaplanan verim değerleri verilmiştir. Aşağıdaki çizelgeye bakıldığında 46,5-1836 keV aralığındaki enerjiler için 5,6 cm yarıçap ve 8,0 cm yükseklikte verim değerleri en yüksek olarak görülmektedir.

Marinelli kap yarı çap ve yükseklikleri arttırıldıkça en düşük boyuttaki Marinelli kaptan hesaplanan verim değerlerine göre azalış göstermektedir. Tüm enerji bölgelerinde küçük yarıçap ve yüksekliklerde verim değeri, büyük yarıçap ve yüksekliklere göre daha fazladır. Verimi etkilediği tespitinin Marinelli kaplarının modellenmesine katkısı göz ardı edilmemelidir.

Çizelge 5.2. Marinelli kabının GESPECOR MC programından elde edilen farklı yarıçap ve yüksekliklerde 46,5-1836 keV enerji aralığındaki dedektör verim değerleri

r	h	Enerji (keV)												
		46	59	88	122	165	279	391	514	661	898	1173	1332	1836
5,6 cm	8 cm	0,00152	0,00948	0,03320	0,04562	0,04621	0,03382	0,02448	0,02034	0,01664	0,01316	0,01076	0,00977	0,00747
	9 cm	0,00158	0,00906	0,03042	0,04143	0,04185	0,03062	0,02314	0,01847	0,01518	0,01203	0,00978	0,00894	0,00687
	10 cm	0,00153	0,00839	0,02746	0,03718	0,03748	0,02758	0,02084	0,01665	0,01374	0,01092	0,00890	0,00805	0,00624
	10,85 cm	0,00144	0,00769	0,02472	0,03340	0,03369	0,02476	0,01881	0,01506	0,01240	0,00985	0,00807	0,00729	0,00567
	12 cm	0,00134	0,00703	0,02231	0,03006	0,03040	0,02243	0,01704	0,01372	0,01125	0,00896	0,00735	0,00668	0,00519
	13 cm	0,00124	0,00643	0,02028	0,02730	0,02758	0,02033	0,01556	0,01251	0,01031	0,00825	0,00678	0,00614	0,00477
6,0 cm	8 cm	0,00133	0,00849	0,03017	0,04165	0,04241	0,03116	0,02359	0,01885	0,01544	0,01226	0,01002	0,00909	0,00700
	9 cm	0,00138	0,00817	0,02801	0,03839	0,03892	0,02863	0,02169	0,01740	0,01429	0,01131	0,00922	0,00841	0,00648
	10 cm	0,00134	0,00764	0,02556	0,03485	0,03532	0,02603	0,01979	0,01581	0,01302	0,01037	0,00849	0,00772	0,00594
	10,85 cm	0,00127	0,00704	0,02322	0,03157	0,03199	0,02369	0,01799	0,01445	0,01194	0,00953	0,00778	0,00705	0,00548
	12 cm	0,00119	0,00649	0,02109	0,02873	0,02910	0,02158	0,01640	0,01319	0,01089	0,00872	0,00713	0,00646	0,00505
	13 cm	0,00111	0,00597	0,01930	0,02616	0,02659	0,01971	0,01509	0,01211	0,01002	0,00798	0,00658	0,00597	0,00466
6,53 cm	8 cm	0,00114	0,00748	0,02687	0,03726	0,03808	0,02818	0,02134	0,01711	0,01411	0,01120	0,00916	0,00834	0,00640
	9 cm	0,00118	0,00724	0,02519	0,03475	0,03539	0,02620	0,01992	0,01598	0,01313	0,01046	0,00856	0,00779	0,00602
	10 cm	0,00116	0,00681	0,02321	0,03185	0,03248	0,02407	0,01832	0,01470	0,01206	0,00962	0,00791	0,00723	0,00556
	10,85 cm	0,00112	0,00645	0,02126	0,02994	0,03044	0,02263	0,01729	0,01383	0,01143	0,00909	0,00750	0,00681	0,00524
	12 cm	0,00103	0,00585	0,01946	0,02666	0,02717	0,02025	0,01548	0,01245	0,01031	0,00822	0,00674	0,00613	0,00478
	13 cm	0,00097	0,00541	0,01789	0,02443	0,02495	0,01862	0,01426	0,01151	0,00951	0,00764	0,00627	0,00573	0,00442
7,0 cm	8 cm	0,00114	0,00748	0,02687	0,03726	0,03808	0,02818	0,02134	0,01711	0,01411	0,01120	0,00916	0,00834	0,00640
	9 cm	0,00118	0,00724	0,02519	0,03475	0,03539	0,02620	0,01992	0,01598	0,01313	0,01046	0,00856	0,00779	0,00602
	10 cm	0,00116	0,00681	0,02321	0,03185	0,03248	0,02407	0,01832	0,01470	0,01206	0,00962	0,00791	0,00723	0,00556
	10,85 cm	0,00112	0,00645	0,02126	0,02994	0,03044	0,02263	0,01729	0,01383	0,01143	0,00909	0,00750	0,00681	0,00524
	12 cm	0,00103	0,00585	0,01946	0,02666	0,02717	0,02025	0,01548	0,01245	0,01031	0,00822	0,00674	0,00613	0,00478
	13 cm	0,00097	0,00541	0,01789	0,02443	0,02495	0,01862	0,01426	0,01151	0,00951	0,00764	0,00627	0,00573	0,00442
8,0 cm	8 cm	0,00079	0,00536	0,01951	0,02729	0,02810	0,02107	0,01613	0,01307	0,01079	0,00859	0,00712	0,00647	0,00498
	9 cm	0,00081	0,00520	0,01855	0,02588	0,02657	0,02001	0,01530	0,01234	0,01023	0,00816	0,00676	0,00616	0,00474
	10 cm	0,00079	0,00494	0,01737	0,02415	0,02482	0,01867	0,01435	0,01159	0,00960	0,00768	0,00636	0,00579	0,00451
	10,85 cm	0,00076	0,00464	0,01613	0,02238	0,02302	0,01736	0,01341	0,01082	0,00896	0,00719	0,00596	0,00541	0,00421
	12 cm	0,00073	0,00434	0,01497	0,02073	0,02138	0,01617	0,01243	0,01009	0,00836	0,00672	0,00556	0,00509	0,00396
	13 cm	0,00069	0,00406	0,01391	0,01927	0,01982	0,01505	0,01161	0,00945	0,00782	0,00630	0,00519	0,00476	0,00370

Bölüm 4.5'te ise dedektör verimi, dedektörlerin radyasyonu algılama yeteneğinin bir ölçüsü olan DL kalınlığının verim eğrisine ne kadar etki ettiğini incelemek oldu. Sunulan çalışmada dedektörlerin düşük enerji bölgesinde verimin düşmesine neden olan ve dolayısıyla FEPE eğrisinin şeklini etkileyen faktörler incelenmiştir. DL ve alüminyum tutucuların sisteme eklenmesinin özellikle düşük enerjilerde verimde ciddi düşüşlere neden olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeninin ise özellikle düşük enerjili fotonların DL ve alüminyum

tutuculardan geçememesi ve kristalin aktif hacim bölgesine ulaşamaması olduğu düşünülmüştür. Alüminyum tutucular bu azalmayı etkilese de DL'den gelen etki ile karşılaştırıldığında bu etkinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu unutulmamalıdır. Sanal dedektör çalışmasında, aynı olaylar için MC tabanlı simülasyon kodları GESPECOR ve PHITS sonuçlarındaki farklılıklar gösterilmiştir. Özellikle noktasal kaynaktan kristale olan yakın mesafelerde her iki simülasyon programının sonuçları arasındaki farkların %4,65'e varan oranlarda olduğu görülmektedir. Sonuç olarak verim eğrisinin doğasına ölü tabaka kalınlığının doğrudan etkisi görülmüştür. Zamanla değiştiği bilinen ölü tabakanın kalınlığı, dedektör kalibrasyonlarında veya karakterizasyonlarında hassasiyetle dikkate alınmalıdır.

Daha önceki çalışmalarımızda, farklı HPGe dedektörlerinden elde edilen deneysel verim değerleri ile PHITS ve GESPECOR Monte Carlo simülasyon araçları kullanılarak elde edilen verim değerlerinin uyum içinde olduğu görülmüştür (Bölükdemir ve diğerleri, 2021; Uyar ve diğerleri, 2021; Aksoy ve diğerleri, 2023). Bu tez çalışmasında GESPECOR programının yanı sıra PHITS MC programının da gama spektrometrik çalışmalarda güvenilir bir şekilde kullanılabileceği ve literatüre katkı sağlayabileceği gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında, HPGe dedektör karakterizasyonu deneysel verim değerleri kullanılarak MC programları ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda aynı radyoaktif çekirdeklere sahip nokta ve dört farklı yoğunluğa sahip Marinelli kaynaklar ile alınan deneysel verim elde edilmiştir. Tek ve iki parça olmak üzere ölü tabaka kalınlığının MC ile tespiti ve deneysel verim değerleriyle karşılaştırılması ve dedektör karakterizasyonu yapılmıştır. Marinelli kap modellenmesi MC ile yapılmıştır. Dedektör verimini etkileyen en kritik parametrenin ölü tabaka kalınlığı olduğu tespit edilmiştir.

Her bir doğal kaynağın yoğunluk, kompozisyon vb. fiziksel özellikleri farklı olacağı ve HPGe dedektörlerde etkin kullanılması için boyut optimizasyonu gerekli olacaktır. Bu çalışma HPGe dedektörlerde hacimsel kaynak geometrilerinin optimizasyon çalışmalarına ışık tutacaktır.

KAYNAKLAR

- Ababneh, A. M. and Eyadeh, M. M. (2015). Coincidence summing corrections in HPGe gamma-ray spectrometry for Marinelli-beakers geometry using peak to total (P/T) calibration. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 8(3), 323–327.
- Ahmed, A. S., Capello, K., Chiang, A., Cardenas-Mendez, E. and Kramer, G. H. (2009). Optimization of geometric parameters for Marinelli beaker to maximize the detection efficiency of an HPGe detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 610(3), 718–723.
- Aksoy, G., Ünlü, H., Orhan, N. and Bölükdemir, M.H. (2022). Comparison of Experimental and Monte Carlo Efficiencies of 0.5 g/cc Epoxy Matrix Marinelli Source with Multiple Radioactive Nuclides. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation* 9(4):359-366.
- Aksoy, G., Ünlü, H. and Bölükdemir, M. H. (2023). Monte Carlo simulation study on the cause of the formation of the efficiency curve at low energies in germanium detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, 192, 110571.
- Altavilla, M. and Remetti, R., (2013). Development of a stochastic detection efficiency calibration procedure for studying collimation effects on a broad energy germanium detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 712, 157-161.
- Andreotti, E., Hult, M., Marissens, G., Lutter, G., Garfagnini, A., Hemmer, S. and von Sturm, K. (2014). Determination of dead-layer variation in HPGe detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, 87, 331–335.
- Arnedo, M.A., Rubiano, J.G., Alonso, H., Tejera, A., González, A., González, J., Gil, J.M., Rodríguez, R., Martel, P. and Bolivar, J.P. (2017). Mapping natural radioactivity of soils in the eastern Canary Islands. *Journal of Environmental Radioactivity*, 166-242.
- Azbouche, A., Belgaid, M. and Mazrou, H. (2015). Monte Carlo calculations of the HPGe detector efficiency for radioactivity measurement of large volume environmental samples. *Journal of Environmental Radioactivity*, 146, 119–124.
- Azli, T. (2015). Performance revaluation of a N-type coaxial HPGe detector with front edges crystal using MCNPX. *Applied Radiation and Isotopes*, 97, 106-112.
- Battistoni, G., Ferrari, A., Montaruli, T. and Sala, P. R. (2005). The atmospheric neutrino flux below 100 MeV: The FLUKA results. *Astroparticle Physics*, 23(5), 526–534.
- Berndt, R. and Mortreau, P., (2012). Monte Carlo Modelling of a N-type coaxial high purity germanium detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 694, 341-347.
- Boson, J., Ågren, G. and Johansson, L. (2008). A detailed investigation of HPGe detector response for improved Monte Carlo efficiency calculations. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 587(2-3), 304-314.

- Bölükdemir, M. H., Uyar, E., Aksoy, G., Ünlü, H., Dikmen, H. and Özgür, M. (2021). Investigation of shape effects and dead layer thicknesses of a coaxial HPGe crystal on detector efficiency by using PHITS Monte Carlo simulation. *Radiation Physics and Chemistry*, 189, 109746.
- Breier, R., Laubenstein, M. and Povinec, P. P. (2017). Monte Carlo simulation of background characteristics of a HPGe detector operating underground in the Gran Sasso National Laboratory. *Applied Radiation and Isotopes*, 126, 188–190.
- Briesmeister, J. (Ed.), (1997). *MCNPFA General Monte Carlo N-particle transport code*, LA 1265-M, Version 4B.
- Britton, R., Burnett, J., Davies, A. and Regan, P.H., (2013). Determining the efficiency of a broad-energy HPGe detector using Monte Carlo simulations. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 295, 2035-2041.
- Chham, E., Piñero-García, F., El Bardouni, T., Ferro-García, M. A., Azahra, M., Benaalilou, K., Krikiz, M., Elyaakoubi, H., El Bakkali, J. and Kaddour, M. (2015). Monte Carlo analysis of the influence of germanium dead layer thickness on the HPGe gamma detector experimental efficiency measured by use of extended sources. *Applied Radiation and Isotopes*, 95, 30–35.
- Chirosca, A., Suvaila, R. and Sima, O. (2013). Monte Carlo simulation by GEANT 4 and GESPECOR of in situ gamma-ray spectrometry measurements. *Applied Radiation and Isotopes*, 81-87,91.
- Daza, M. J., Quintana, B., García-Talavera, M. and Fernández, F. (2001). Efficiency calibration of a HPGe detector in the [46.54-2000] keV energy range for the measurement of environmental samples. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 470(3), 520–532.
- Debertin, K. and Helmer, R. (1998). *Gamma and X-ray spectrometry with semiconductor detectors*. Amsterdam: Elsevier Science, 22-28.
- Díaz, N. C. and Vargas, M. J. (2008). DETEFF: An improved Monte Carlo computer program for evaluating the efficiency in coaxial gamma-ray detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 586(2), 204–210.
- Dryak, P. and Kovar, P. (2006). Experimental and MC determination of HPGe detector efficiency in the 40-2754 keV energy range for measuring point source geometry with the source-to-detector distance of 25 cm. *Applied Radiation and Isotopes*, 64, 1346-1349.
- Elanique, A., Marzocchi, O., Leone, D., Hegenbart, L., Breustedt, B. and Oufni, L. (2012). Dead layer thickness characterization of an HPGe detector by measurements and Monte Carlo simulations. *Applied Radiation and Isotopes*, 70, 538-542.
- Ferreux, L., Pierre, S., Thanh, T. T. and Lépy, M. C. (2013). Validation of efficiency transfer for Marinelli geometries. *Applied Radiation and Isotopes*, 81, 67–70.

- Gasparro, J., Hult, M., Johnston, P. N. and Tagziria, H. (2008). Monte Carlo modelling of germanium crystals that are tilted and have rounded front edges. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 594(2), 196–201.
- Gilmore, G. R. (2008). *Practical gamma-ray spectrometry*. New York: Wiley, 45-48.
- Guerra, J. G., Rubiano, J. G., Winter, G., Guerra, A. G., Alonso, H., Arnedo, M. A., Tejera, A., Gil, J. M., Rodríguez, R., Martel, P. and Bolivar, J. P. (2015). A simple methodology for characterization of germanium coaxial detectors by using Monte Carlo simulation and evolutionary algorithms. *Journal of Environmental Radioactivity*, 149, 8–18.
- Guerra, J.G., G. Rubiano, J., Winter, G., G. Guerra, A., Alonso, H., Arnedo, M. A., Tejera, A., Martel, P. and Bolivar, J. P. (2017). Computational characterization of HPGe detectors usable for a wide variety of source geometries by using Monte Carlo simulation and a multi-objective evolutionary algorithm. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 858, 113–122.
- Harb, S. and Din, K. S. (2008). *Study of efficiency calibrations of HPGe detectors for radioactivity measurements of environmental samples*. Proceedings of the 3rd Environmental Physics Conference, Cairo, 207–218.
- Helmer, R. G., Hardy, J. C., Iacob, V. E., Sanchez-Vega, M., Neilson, R. G. and Nelson, J. (2003). The use of Monte Carlo calculations in the determination of a Ge detector efficiency curve. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 511(3), 360–381.
- Hernández, F. And El-Daoushy, F., 2003. Accounting for incomplete charge collection in Monte Carlo simulations of the efficiency of well-type Ge-detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipmen*, 498,340-351.
- Hirayama, H., Namito, Y., Bielajew, A.F., Wilderman, S.J. and Nelson, W.R. (2005). The EGS5 Code System, SLAC-Report-730, SLAC, Stanford, 17-22.
- Hurtado, S., García-León, M. and García-Tenorio, R. (2004). Monte Carlo simulation of the response of a germanium detector for low-level spectrometry measurements using GEANT4. *Applied Radiation and Isotopes*, 61(2–3), 139–143.
- Huy, N.Q., Binh, D.Q. and An, V.X. (2007). Study on the increase of inactive germanium layer in a high-purity germanium detector after a long time operation applying MCNP code. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 573, 384-388.
- Huy, N. Q. (2010). The influence of dead layer thickness increase on efficiency decrease for a coaxial HPGe p-type detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 621, 390-394.

- Huy, N.Q. (2011). Dead-layer thickness effect for gamma spectra measured in an HPGe ptype detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 641, 101-104.
- Infantino, A., Valtieri, L., Cicoria, G., Pancaldi, D., Mostacci, D. and Marengo, M. (2015). Experimental measurement and Monte Carlo assessment of Argon-41 production in a PET cyclotron facility. *Physica Medica*, 31(8), 991–996.
- İnternet: Berger, M. J., Hubbell, J. H., Seltzer, S. M., Chang, J., Coursey, J. S., Sukumar, R., Zucker, D. S. and Olsen, K. (2010). XCOM: Photon Cross Section Database (version 1.5). Web: <http://physics.nist.gov/xcom>, Son Erişim Tarihi: 16/03/2023.
- İnternet: Demirtürk, T. (2008). Elektronik ders notları. Web: <http://docplayer.biz.tr/21200014-Elektronik-ders-notları-2.html>, Son Erişim Tarihi: 12.10.2023.
- İnternet: LARAweb. (2021). Laboratoire National Henri Becquerel (LNHB) Web: <http://laraweb.free.fr/>, Son Erişim Tarihi: 22.10.2023.
- İnternet: XCOM. (2022) XCOM Photon cross section database. Web: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>, Son Erişim Tarihi: 10.11.2023.
- İnternet: TENMAK (2006). Türkiye’de Çernobil Sonrası Radyasyon ve Radyoaktivite Ölçümleri. Web: <https://kutuphane.tenmak.gov.tr>, Son Erişim Tarihi: 19.10.2023.
- Jäderström, H., Mueller, WF., Atrashkevich, V. and Adekola, AS. (2015). True coincidence summing correction and mathematical efficiency modeling of a well detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 784- 264-268.
- Jevremović, A., Kandić, A., Djurašević, M., Vukanac, I., Čeliković, I., Milošević, Z. and Puzović, J. (2019). Determination of coincidence summing correction factors for ²²Na point source. *RAD Conference Proceedings*, 3, 32–35.
- JCGM 100. (2008). *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Geneva: International Organization for Standardization, 4.
- Jeřkovský, M., Javorník, A., Breier, R., Slučiak, J. and Povinec, P.P. (2019). Experimental and Monte Carlo determination of HPGe detector efficiency. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 322, 1863-1869.
- Kaya, S., Çelik, N. and Bayram, T. (2022). Effect of front, lateral and back dead layer thicknesses of a HPGe detector on full energy peak efficiency. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers*, 3, 166401
- Khan, W., Zhang, Q., He, C. and Saleh, M. (2018). Monte Carlo simulation of the full energy peak efficiency of an HPGe detector. *Applied Radiation and Isotopes*, 131(June 2017), 67–70. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.11.018>.
- Knoll, G.F. (2010). *Radiation detection and measurement* (Fourth Edition). United States of America: John Wiley and Sons, Inc., 371,373,454,477.

- Krishnan, N., Anilkumar, S., Verma, A. and Singh, R. (2017). Assessment of the inactive dead layer thickness of old high-purity germanium detector: A study by Monte Carlo simulations and experimental verification. *Radiation Protection and Environment*, 40, 69.
- Lépy, M. C., Thiam, C., Anagnostakis, M., Galea, R., Gurau, D., Hurtado, S., Karfopoulos, K., Liang, J., Liu, H., Luca, A., Mitsios, I., Potiriadis, C., Savva, M. I., Thanh, T. T., Thomas, V., Townson, R. W., Vasilopoulou, T. and Zhang, M. (2019). A benchmark for Monte Carlo simulation in gamma-ray spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*, 154(August), 108850.
- Martin, J.E. (2013). *Radyasyon ve Rasyasyondan Korunma Fiziği*. (Çev. Tanır, A.G., Bölükdemir, M.H. ve Koç, K. (2013). Ankara: Palme Yayıncılık (Eserin orijinali 2013'te yayımlandı), 340.
- Marzocchi ,O., Breustedt, B. and Urban, M., 2010. Characterization, modelling and optimization of the model of an HPGe detector with the aid of point sources. *Applied Radiation and Isotopes*, 68, 1438-1440.
- Modarresi, S. M., Masoudi, S. F. and Karimi, M. (2017). A method for considering the spatial variations of dead layer thickness in HPGe detectors to improve the FEPE calculation of bulky samples. *Radiation Physics and Chemistry*, 130, 291–296.
- Modarresi, S. M., Masoudi, S. F. and Karimi, M. (2018). A method for self-attenuation and sample-height correction for counting efficiency of HPGe using Marinelli beaker geometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 316(1), 129–137.
- Nikolic, J., Puzovic, J., Todorovic, D. and Rajacic, M., (2015). Application of PHOTON simulation software on calibration of HPGe detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 799, 159-165.
- Peryoga, Y., Sagara, H. and Shiba, T. (2017). PHITS Benchmarking for HPGe detector efficiency. *Energy Procedia*, 131, 246–249.
- Peyres, V. and García-Toraño, E. (2007). Efficiency calibration of an extended-range Ge detector by a detailed Monte Carlo simulation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 580(1 SPEC. ISS.), 296–298.
- Pullia, A., Zocca, F., Riboldi, S., Budjáš, D., D’Andragora, A. and Cattadori, C. (2010). Cryogenic performance of a low-noise JFET-CMOS preamplifier for HPGe detectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 57(2), 737–742.
- Ródenas, J., Ortiz, J., Ballesteros, L. and Serradell, V. (2001). Analysis of the simulation of ge-detector calibration for environmental radioactive samples in a marinelli beaker source using the monte carlo method. *Advanced Monte Carlo for Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications*, 517–522.

- Ródenas, J., Pascual, A., Zarza, I., Serradell, V., Ortiz, J. and Ballesteros, L. (2003). Analysis of the influence of germanium dead layer on detector calibration simulation for environmental radioactive samples using the Monte Carlo method. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 496(2–3), 390–399.
- Ródenas, J., Gallardo, S., Ballester, S., Primault, V. and Ortiz, J. (2007). Application of the Monte Carlo method to the analysis of measurement geometries for the calibration of a HP Ge detector in an environmental radioactivity laboratory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 263(1), 144–148.
- Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S. ichiro, Kai, T., Tsai, P.E., Matsuda, N., Iwase, H., Shigyo, N., Sihver, L. and Niita, K. (2018). Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 55, 684–690.
- Semkow, T. M., Bradt, C. J., Beach, S. E., Haines, D. K., Khan, A. J., Bari, A., Torres, M. A., Marrantino, J. C., Syed, U. F., Kitto, M. E., Hoffman, T. J. and Curtis, P. (2015). Calibration of Ge gamma-ray spectrometers for complex sample geometries and matrices. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 799, 105–113.
- Sempau, J., Fernández-Varea, J. M., Acosta, E. and Salvat, F. (2003). Experimental benchmarks of the Monte Carlo code PENELOPE. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 207(2), 107–123.
- Shizuma, K., Oba, Y. and Takada, M., (2016). A practical method for determining γ -ray full-energy peak efficiency considering coincidence-summing and self-absorption corrections for the measurement of environmental. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 383, 183–190.
- Shweikani, R., Hasan, M., Tlas, M. and Doubal, A. W. (2014). Determination of the optimal cylindrical geometry heights for gamma-ray spectrometric analysis. *Radiation Measurements*, 70, 34–38.
- Sima, O. and Arnold, D. (1996). Self-attenuation and Coincidence-summing Corrections Calculated by Monte Carlo Simulations for Gamma-spectrometric Measurements with Well-type Germanium Detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, 47, 889–893.
- Sima, O. and Dovlete, C. (1997). Matrix Effects in the Activity Measurements of Environmental Samples- Implementation of Specific Corrections in a Gamma-ray Spectrometry Analysis Program. *Applied Radiation and Isotopes*, 48, 59–69.
- Sima, O., Arnold, D. and Dovlete, C. (2001). GESPECOR: A versatile tool in gamma-ray spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 248(2), 359–364.
- Sima, O. and Arnold, D. (2009). On the Monte Carlo simulation of HPGe gamma-spectrometry systems. *Applied Radiation and Isotopes*, 67(5), 701–705.

- Skinner, G. K. (1996). Practical gamma-ray spectrometry. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 52(3), 85-92.
- Stancu, E., Costache, C. and Sima, O. (2015). Monte Carlo Simulation of p-type HPGe detectors—the dead layer problem. *Romanian Reports in Physics*, 67(2), 465-473.
- Tzika, F., Kontogeorgakos, D., Vasilopoulou, T. and Stamatelatos, I. E. (2010). Application of the Monte Carlo method for the calibration of an in situ gamma spectrometer. *Applied Radiation and Isotopes*, 68(7–8), 1441–1444.
- Uyar, E., Aksoy, G., Ünlü, H. and Bölükdemir, M.H. (2021). Investigation of the effect of copper contact pin on efficiency in HPGe detectors using Monte Carlo method. *Journal of Instrumentation*, 16 (11) T11003.
- Vasconcelos, D.C., Pereira, C., Gallardo, S., Rocha, Z. and Santos, T.O. (2011). *Efficiency simulation of a HPGe detector for the environmental radioactivity laboratory / CDTN Using a MCNP-gammavision method*. International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2011, Belo Horizonte, MG, Brazil, 22-28.
- Vidmar, T. (2005). EFFTRAN - A Monte Carlo efficiency transfer code for gamma-ray spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 550(3), 603–608.
- Wójcik-Gargula, A., Tracz, G., Dworak, D. and Królas, W. (2019). Characterization of the Coaxial n-type HPGe Detector for Activity Measurements of ITER Materials Irradiated in JET. *Acta Physica Polonica B*, 50(3), 719.
- Yücel, H., Solmaz, A. N., Köse, E. and Bor, D. (2009). Methods for spectral interference corrections for direct measurements of ²³⁴U and ²³⁰Th in materials by gamma-ray spectrometry. *Radiation Protection Dosimetry*, 138(3), 264–277.
- Yücel, H., Birgül, Ö., Uyar, E. and Çubukçu, Ş. (2019). A novel approach in voltage transient technique for the measurement of electron mobility and mobility-lifetime product in CdZnTe detectors. *Nuclear Engineering and Technology*, 51(3), 731-737.
- Zare, M. R., Kamali, M., Omid, Z. and Kapourchali, M. F. (2016). Designing and producing large-volume liquid gamma-ray standard sources for low radioactive pollution measurements of seawater samples by comparison between experimental and simulation results. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 90, 412–417. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.04.065>.
- Zhang, J. and Bao, T. (2013). Research on dead layer thickness and cold finger size of coaxial HPGe detector. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 33(8), 960-963.





Gazili olmak ayrıcalıktır...