



**FARKLI TİP HPGE DEDEKTÖRLERİN DENEYSEL VE MONTE CARLO
YÖNTEMLERİ İLE KARAKTERİZASYONU**

Esra UYAR

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2022

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.

Esra UYAR

15/04/2022

FARKLI TİP HPGe DEDEKTÖRLERİN DENEYSEL VE MONTE CARLO YÖNTEMLERİ İLE KARAKTERİZASYONU

(Doktora Tezi)

Esra UYAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2022

ÖZET

Dedektör karakterizasyonu, dedektörün geometrik parametrelerinin deneysel veya Monte Carlo (MC) yöntemi ile belirlenmesi işlemidir. MC ile karakterizasyon için üretici tarafından sağlanan kristal ve iç boşluğunun uzunlukları ve çapları, dedektörün ön kenarının yarıçapı, kristal ile uç kabı arasındaki mesafe, ölü tabaka kalınlığı gibi parametrelerin doğru modellenmesi gereklidir. Bu tez çalışmasında üç adet p-tipi, bir adet n-tipi HPGe dedektör, kaynak geometrisi (noktasal ve hacimsel) ve dedektör parametrelerinin dedektör verimi üzerine etkisi, deneysel ve Monte Carlo yöntemleri ile incelenerek karakterize edilmiştir. Ayrıca yuvarlatılmış/keskin ön kenar geometrisi, kontak pim etkisi ve ölü tabaka kalınlık etkisi dört dedektörde de incelenmiştir. PHITS-MC simülasyon programının gama spektrometrik çalışmalarda güvenilir bir şekilde kullanılabileceği, amaca yönelik GESPECOR ve DETEFF programları ve deneysel çalışmalarla gösterilmiştir. Düşük enerjilerde dedektör kristalinin yuvarlatılmış kenarının verim üzerinde %23'e kadar, yüksek enerjilerde ise bakır kontak pimin %4'e kadar hataya sebep olabileceği ve ölü tabaka kalınlığının tamamen dedektöre özgü arttığı görülmüştür. MC ile karakterizasyon çalışması yapılırken yuvarlatılmış kenar ve bakır kontak pimin modellemeye dahil edilmesi ve güncel ölü tabaka kalınlığının belirlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Radyoaktivite analizlerinde en sık kullanılan silindirik kap geometrisi de PHITS'te modellenmiştir. Böylece, maliyetli ve zaman alıcı olan deneysel karakterizasyon yerine MC yöntemi kullanılarak doğru bir şekilde karakterize edilen dedektör ile referans kaynaklara ihtiyaç duymadan her türlü geometrideki numunenin verim değerleri ve aktivite konsantrasyonlarının belirlenebileceği gösterilmiştir.

Bilim Kodu : 20216

Anahtar Kelimeler : HPGe dedektör, Verim kalibrasyonu, Germanium dedektör karakterizasyonu, Monte Carlo modelleme, PHITS.

Sayfa Adedi : 132

Danışman : Prof. Dr. Mustafa Hicabi BÖLÜKDEMİR

CHARACTERIZATION OF DIFFERENT TYPES OF HPGe DETECTORS WITH EXPERIMENTAL AND MONTE CARLO METHODS

(Ph. D. Thesis)

Esra UYAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2022

ABSTRACT

Detector characterization is the process of precise determination of the detector geometric parameters by experimental or Monte Carlo method. For characterization with MC, parameters such as the length and diameter of the crystal and the inner-cavity, the radius of the front edge, the distance between crystal and end cap, the dead layer (DL) thickness, must be modeled. In this thesis, three p-type and one n-type HPGe detector were characterized by investigating the effects of source geometry and detector parameters on efficiency by experimental and MC methods. Rounded/sharp front edge geometry, copper contact pin (CCP) and DL thickness effect were investigated. It has been shown by the specific-purpose GESPECOR and DETEFF programs and experimental studies that the PHITS-MC simulation program can be used reliably in gamma spectrometric studies. The rounded edge can cause an error of up to 23% at low energies, and the CCP can cause an error of up to 4% at high energies on the efficiency; DL increases specific to the detector. While characterizing studies with MC, it was concluded that the rounded edge and CCP should be included in the modeling and the current DL should be determined. The cylindrical container, frequently used in radioactivity analysis, was also modeled in PHITS. Thus, instead of experimental characterization, it has been shown that the efficiency values and activity concentrations of the sample in any geometry can be determined without the need for reference sources with the detector characterized by using the MC method.

Science Code : 20216

Key Words : HPGe detector, Efficiency calibration, Characterization germanium detectors, Monte Carlo modelling, PHITS

Page Number : 132

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 Üyeleri hocalarım Prof. Dr. Abdullah AYDIN ve Prof. Dr. Gökay UĞUR'a;

Gama spektrometresi alanında bilgi ve tecrübelerini paylaşarak bu konuda uzmanlaşmamı sağlayan hocam Prof. Dr. Haluk YÜCEL'e;

Tezin deneysel kısmı Türkiye Enerji Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK) ile Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi arasında yapılan iş birliği ek protokolü kapsamında yapılmıştır. Tez çalışmalarım boyunca yardım ve desteklerinden dolayı TENMAK Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü (NÜKEN) Gama Spektrometri Laboratuvar ekibinden Dr. Abdullah ZARARSIZ, Mine ÖZGÜR ve verdiği yararlı bilgilerle Hasan DİKMEN'e;

Her an yanımda olarak motive eden başta Dr. Elif DOLAK YAVUZ, Doç. Dr. Defne AKAY ve Dr. Şölen YÜKSEL PACE olmak üzere tüm arkadaşlarıma;

En önemlisi de çalışmalarım süresince büyük fedakârlık göstererek beni her zaman destekleyen canım annem, kardeşlerim ve eşime sonsuz teşekkürler.

Bu tezi canım babam ve kızım İpek'ime ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER	7
2.1. Radyoaktif Bozunma.....	7
2.2. Gama Bozunumu.....	9
2.3. Fotonların Madde ile Etkileşmesi	12
2.3.1. Fotoelektrik soğurma.....	12
2.3.2. Compton saçılması	13
2.3.3. Çift oluşumu.....	14
2.3.4. Gama-ışını azalması - Azalma katsayısı	15
2.4. Gama Spektrometresi - HPGe Dedektörler	17
2.4.1. p- ve n-tipi HPGe dedektörler	21
2.5. Dedektör Verimi.....	24
2.5.1 Toplam enerji pik verimi.....	26
2.6. Belirsizlik Hesabı	27
2.6.1. Toplam enerji pik verimi ve aktivitenin belirsizliğinin belirlenmesi:.....	28
2.7. Düzeltme Faktörleri.....	28
2.7.1. Gerçek zamanlı çakışma düzeltme faktörü	29

	Sayfa
2.7.2. Gama-ışını öz soğurma düzeltme faktörü	30
2.7.3. Radyoaktif bozunma düzeltme faktörü	31
2.8. Monte Carlo Simülasyon Yöntemi.....	32
2.8.1. PHITS Monte Carlo programı.....	35
2.8.2. GESPECOR Monte Carlo programı	36
2.8.3. DETEFF Monte Carlo programı	36
2.9. Dedektör Karakterizasyonu.....	37
2.9.1. Yuvarlatılmış/keskin ön kenar geometrisi.....	38
2.9.2. Bakır kontak pim	40
3. MATERYAL VE YÖNTEM	47
3.1. HPGe Dedektörlerin Geometrik Özellikleri.....	47
3.1.1. p-tipi HPGe dedektörler (DET1, DET2 ve DET3)	47
3.1.2. n-tipi HPGe dedektör (DET4)	48
3.2. Sertifikalı Standart Nokta Kaynakların Özellikleri	49
3.3. Sertifikalı Hacimsel Standart ve Referans Malzemelerin Özellikleri	50
3.4. Spektrometrelerin Enerji Kalibrasyonlarının Yapılması.....	53
3.5. Toplam Enerji Pik Veriminin Deneysel Olarak Belirlenmesi.....	54
3.6. PHITS MC Programı ile Toplam Enerji Pik Veriminin Belirlenmesi	57
3.7. GESPECOR ve DETEFF MC Programları ile Toplam Enerji Pik Veriminin Belirlenmesi	58
4. BULGULAR	65
4.1. Yuvarlatılmış/Keskin Ön Kenar Etkisi	65
4.1.1. DET1 dedektörü yuvarlatılmış/keskin ön kenar etkisi	65
4.1.2. DET2 dedektörü yuvarlatılmış/keskin ön kenar etkisi	68
4.1.3. DET3 dedektörü yuvarlatılmış/keskin ön kenar etkisi	70
4.1.4. DET4 dedektörü yuvarlatılmış/keskin ön kenar etkisi	72

	Sayfa
4.2. Bakır Kontak Pim Etkisi	80
4.2.1. DET1 dedektörü bakır kontak pim etkisi	80
4.2.2. DET2 dedektörü bakır kontak pim etkisi	83
4.2.3. DET3 dedektörü bakır kontak pim etkisi	86
4.2.4. DET4 dedektörü bakır kontak pim etkisi	89
4.3. Ölü Tabaka Kalınlık Etkisi.....	93
4.3.1. DET1 dedektörü ölü tabaka kalınlık etkisi.....	93
4.3.2. DET2 dedektörü ölü tabaka kalınlık etkisi.....	97
4.3.3. DET3 dedektörü ölü tabaka kalınlık etkisi.....	101
4.3.4. DET4 dedektörü ölü tabaka kalınlık etkisi.....	106
4.4. Sertifikalı Standart Hacimsel Radyoaktif Malzemelerin PHITS MC Programı ile Modellenerek Verim ve Aktivitelerinin Belirlenmesi	111
5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	117
KAYNAKÇA.....	123
ÖZGEÇMİŞ	129

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Gama-ışını dedektörlerine uygun bazı malzemeler için parametreler	19
Çizelge 3.1. DET1, DET2, DET3 ve DET4 HPGe dedektörlerinin üretici tarafından verilen özellikleri	48
Çizelge 3.2. Sertifikalı referans malzemelerdeki radyoaktif çekirdekler için tavsiye edilen spesifik aktivite değerleri	51
Çizelge 3.3. IAEA RG serisi sertifikalı referans malzemelere ait bilgiler.....	51
Çizelge 3.4. TCC serisi sertifikalı standart malzemelerdeki radyoaktif çekirdekler sertifika aktivite değerleri ve element kompozisyonları	52
Çizelge 3.5. PHITS, GESPECOR ve DETEFF MC programlarının modellemedeki farklılıkları.....	59
Çizelge 4.1. DET1 dedektörünün deneysel verim ve farklı ön kenar geometrileri için PHITS ile hesaplanan verim değerlerinin karşılaştırılması.....	67
Çizelge 4.2. DET2 dedektörünün deneysel verim ve farklı ön kenar geometrileri için PHITS ile hesaplanan verim değerlerinin karşılaştırılması.....	69
Çizelge 4.3. DET3 dedektörünün deneysel verim ve farklı ön kenar geometrileri için PHITS ile hesaplanan verim değerlerinin karşılaştırılması.....	71
Çizelge 4.4. DET4 dedektörünün deneysel verim ve farklı ön kenar geometrileri için PHITS ile hesaplanan verim değerlerinin karşılaştırılması.....	73
Çizelge 4.5. DET1, DET2, DET3 ve DET4 dedektörlerinin seçilmiş farklı kaynak-dedektör mesafeleri için keskin ve yuvarlatılmış ön kenar geometrisinde PHITS ile hesaplanan verim değerlerinin karşılaştırılması.....	76
Çizelge 4.6. DET1, DET2, DET3 ve DET4 dedektörlerinin hacimsel kaynak için keskin ve yuvarlatılmış ön kenar geometrisinde PHITS ile hesaplanan verim değerlerinin karşılaştırılması	79
Çizelge 4.7. DET1 dedektörünün 13,25 cm dedektör-kaynak mesafesinde deneysel verimi ile farklı bakır kontak pim yarıçaplarında PHITS MC ile elde edilen verim değerleri	80
Çizelge 4.8. DET1 dedektörü ile 5 cm, 10 cm, 13,25 cm, 15 cm ve 20 cm mesafede bakır kontak pimli ve pimsiz MC ile hesaplanan verim değerleri	82
Çizelge 4.9. DET2 dedektörünün 7,5 cm dedektör-kaynak mesafesinde deneysel verimi ile farklı bakır kontak pim yarıçaplarında PHITS MC ile elde edilen verim değerleri	83

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.10. DET2 dedektörünün farklı kaynak-dedektör mesafelerinde bakır kontak pimli ve pimsiz modellenmesi ile hesaplanan verim değerleri	84
Çizelge 4.11. DET3 dedektörünün 8 cm dedektör-kaynak mesafesinde deneysel verimi ile farklı bakır kontak pim yarıçaplarında PHITS MC ile elde edilen verim değerleri.....	86
Çizelge 4.12. DET3 dedektörünün farklı kaynak-dedektör mesafelerinde bakır kontak pimli ve pimsiz modellenmesi ile hesaplanan verim değerleri	87
Çizelge 4.13. DET4 dedektörünün 14,91 cm dedektör-kaynak mesafesinde deneysel verimi ile farklı bakır kontak pim yarıçaplarında PHITS MC ile elde edilen verim değerleri.....	89
Çizelge 4.14. DET4 dedektörünün farklı kaynak-dedektör mesafelerinde bakır kontak pimli ve pimsiz modellenmesi ile hesaplanan verim değerleri	90
Çizelge 4.15. 1 mm alüminyum ve 0,7 mm germanyumdan geçen fotonların yüzdeleri (Ortec, 2021).	92
Çizelge 4.16. DET1 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen verim değerleri.....	95
Çizelge 4.17. DET1 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen verim değerleri.....	95
Çizelge 4.18. DET1 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında DETEFF MC ile elde edilen verim değerleri.....	96
Çizelge 4.19. DET1 dedektörünün deneysel verimi ve 0,7 mm DL kalınlık değerinde PHITS, GESPECOR, DETEFF MC ile hesaplanmış verim değerlerinin karşılaştırılması	96
Çizelge 4.20. DET1 dedektörünün deneysel verim ve 1,29 mm optimize edilen DL kalınlık değerinde PHITS, GESPECOR, DETEFF MC ile hesaplanmış verim değerleri	97
Çizelge 4.21. DET2 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen verim değerleri.....	99
Çizelge 4.22. DET2 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen verim değerleri.....	99
Çizelge 4.23. DET2 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında DETEFF MC ile elde edilen verim değerleri.....	100
Çizelge 4.24. DET2 dedektörünün deneysel verimi ve 0,7 mm DL kalınlık değerinde PHITS, GESPECOR, DETEFF MC ile hesaplanmış verim değerlerinin karşılaştırılması	100

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.25. DET2 dedektörünün deneysel verimi ve 1,19 mm optimize edilen DL kalınlık değerinde PHITS, GESPECOR, DETEFF MC ile hesaplanmış verim değerlerinin karşılaştırılması.....	101
Çizelge 4.26. DET3 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen verim değerleri.....	102
Çizelge 4.27. DET3 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen verim değerleri.....	103
Çizelge 4.28. DET3 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında DETEFF MC ile elde edilen verim değerleri.....	103
Çizelge 4.29. DET3 dedektörünün deneysel verimi ve 0,7 mm DL kalınlık değerinde PHITS, GESPECOR, DETEFF MC ile hesaplanmış verim değerlerinin karşılaştırılması	104
Çizelge 4.30. DET3 dedektörünün deneysel verimi ve 1,71 mm optimize edilen DL kalınlık değerinde PHITS, GESPECOR, DETEFF MC ile hesaplanmış verim değerlerinin karşılaştırılması.....	104
Çizelge 4.31. DET2 ve DET3 dedektörlerinin 9 yıl önceki ve günümüzdeki deneysel verim değerleri.....	105
Çizelge 4.32. DET4 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen verim değerleri.....	108
Çizelge 4.33. DET dedektörünün farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen verim değerleri.....	109
Çizelge 4.34. DET4 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında DETEFF MC ile elde edilen verim değerleri.....	109
Çizelge 4.35. DET4 dedektörünün deneysel verimi ve 0,9 mm DL kalınlık değerinde PHITS, GESPECOR, DETEFF MC ile hesaplanmış verim değerlerinin karşılaştırılması	110
Çizelge 4.36. DET4 dedektörünün deneysel verimi ve 2,7 mm optimize edilen DL kalınlık değerinde PHITS, GESPECOR, DETEFF MC ile hesaplanmış verim değerlerinin karşılaştırılması.....	110
Çizelge 4.37. DET1 ve DET4 dedektörleri için IAEA numunelerinin düzeltme faktörleri, deneysel ve PHITS MC simülasyon ile hesaplanan verim değerleri.....	113
Çizelge 4.38. DET1 dedektörü ile TCC numunelerinin hesaplanan ve referans aktivite değerleri arasındaki % farklar	114

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.39. DET4 dedektörü ile TCC numunelerinin hesaplanan ve referans aktivite değerleri arasındaki % farklar	115
Çizelge 5.1. DET1, DET2, DET3 ve DET4 dedektörlerinin ölü tabaka değişimi.....	118

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Aktivitenin zamanla değişimi	8
Şekil 2.2. Elektromanyetik spektrum'dan derlenmiştir.	10
Şekil 2.3. ^{137}Cs 'nin bozunma şeması	11
Şekil 2.4 Fotoelektrik olay	13
Şekil 2.5. Compton saçılması.....	14
Şekil 2.6. Çift oluşumu	15
Şekil 2.7. Gama-ışınlarının üstel azalma eğrisi	15
Şekil 2.8. Enerji ve etkileşim türüne göre germanyumun lineer azalma katsayısı	16
Şekil 2.9. NaI(Tl), CdZnTe ve HPGe dedektörlerin örnek spektrumları.....	18
Şekil 2.10. Gama spektrometresinde sinyal işleme sistemi	20
Şekil 2.11. Yalıtkan, metal ve yarı iletkenlerin elektronik band yapılarının gösterimi ..	21
Şekil 2.12. Verici safsızlığın (P-fosfor atomu) bir silikon kristalindeki örgüye yerleşmesi ve silikonun yasak band aralığındaki verici seviyesi	23
Şekil 2.13. Alıcı safsızlığın (B-bor atomu) bir silikon kristalindeki örgüye yerleşmesi ve silikonun yasak band aralığındaki alıcı seviyesi.	24
Şekil 2.14. ^{152}Eu 'nun bozunma şeması	30
Şekil 2.15. PHITS'de nükleer ve atomik çarpışmaları simüle etmek için kullanılması önerilen fizik modelleri	35
Şekil 2.16. Dedektörün x-ışını görüntüsü ile yuvarlatılmış ön kenarın gösterimi	39
Şekil 2.17. PHITS'te modellenmiş bakır kontak pimin şematik gösterimi	40
Şekil 2.18. Dedektörün x-ışını görüntüsü	41
Şekil 2.19. Ir-192 gama kaynağı kullanılarak elde edilen dedektör merkezinin görüntüsü.....	42
Şekil 2.20. p- ve n-tipi HPGe dedektörlerde tipik DL kalınlıklarının gösterimi	43
Şekil 2.21. Sıvı azotun muhafaza edildiği dewar kabı.....	44
Şekil 2.22. Bakır soğutma çubuğunun gösterimi	45

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. HPGe gama spektrometre sistemi.....	49
Şekil 3.2. Enerji kalibrasyon eğrisi	54
Şekil 3.3. Ölçümlerde kullanılan nokta ve hacimsel kaynak geometrinin şematik gösterimi	55
Şekil 3.4. a) PHITS, b) GESPECOR ve c) DETEFF MC programlarında modellenen HPGe dedektörlerin şematik gösterimi	57
Şekil 3.5. Yuvarlatılmış ön kenar geometride PHITS MC kodu ile modellenmiş HPGe.....	60
Şekil 3.6. Torusun gösterimi.....	61
Şekil 3.7. Keskin ön kenar geometride PHITS MC kodu ile modellenmiş HPGe	61
Şekil 3.8. Bakır kontak pim	62
Şekil 3.9. PHITS MC ile bakır kontak pimli ve pimsiz modellenen dedektörün gösterimi	62
Şekil 3.10. PHITS MC ile modellenen ölü tabakanın gösterimi	63
Şekil 4.1. DET1 dedektörünün deneysel verim eğrisi	65
Şekil 4.2. DET2 dedektörünün deneysel verim eğrisi	68
Şekil 4.3 DET3 dedektörünün deneysel verim eğrisi	70
Şekil 4.4. DET4 dedektörünün deneysel verim eğrisi	72
Şekil 4.5. DET1 dedektörü için kaynak-dedektör mesafesine göre yuvarlatılmış ve keskin kenar arasındaki yüzde bağıl farkların değişimi.....	74
Şekil 4.6. DET2 dedektörü için kaynak-dedektör mesafesine göre yuvarlatılmış ve keskin kenar arasındaki yüzde bağıl farkların değişimi.....	74
Şekil 4.7. DET3 dedektörü için kaynak-dedektör mesafesine göre yuvarlatılmış ve keskin kenar arasındaki yüzde bağıl farkların değişimi.....	75
Şekil 4.8. DET4 dedektörü için kaynak-dedektör mesafesine göre yuvarlatılmış ve keskin kenar arasındaki yüzde bağıl farkların değişimi.....	75
Şekil 4.9. Silindirik dedektör ve noktasal kaynak durumu için katı açı gösterimi	77
Şekil 4.10. Yuvarlatılmış/keskin kenarlı geometride katı açı gösterimi.....	78
Şekil 4.11. DET1 dedektörünün bakır kontak pimli ve pimsiz MC verim değerlerinin mesafeye göre % bağıl farkı	81

Şekil	Sayfa
Şekil 4.12. DET1 dedektörünün bakır kontak pimli ve pimsiz MC verim değerlerinin enerjiye göre % bağıl farkı.....	81
Şekil 4.13. DET2 dedektörünün 2 mm ve 3,5 mm bakır kontak pim kalınlığındaki verim değerlerinin mesafeye göre % bağıl farkı	85
Şekil 4.14. DET2 dedektörünün 2 mm ve 3,5 mm bakır kontak pim kalınlığındaki verim değerlerinin enerjiye göre % bağıl farkı.....	85
Şekil 4.15. DET3 dedektörünün 2 mm ve 3,5 mm bakır kontak pim kalınlığındaki verim değerlerinin mesafeye göre % bağıl farkı	88
Şekil 4.16. DET3 dedektörünün 2 mm ve 3,5 mm bakır kontak pim kalınlığındaki verim değerlerinin enerjiye göre % bağıl farkı.....	88
Şekil 4.17. DET4 dedektörünün 2 mm ve 3,5 mm bakır kontak pim kalınlığındaki verim değerlerinin mesafeye göre % bağıl farkı	91
Şekil 4.18. DET4 dedektörünün 2 mm ve 3,5 mm bakır kontak pim kalınlığındaki verim değerlerinin enerjiye göre % bağıl farkı.....	91
Şekil 4.19. DET1 dedektörünün DL kalınlığının PHITS modellemesindeki gösterimi .	93
Şekil 4.20. DET1 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında deneysel ve PHITS MC ile hesaplanan verim değerleri.....	94
Şekil 4.21. DET2 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında deneysel ve PHITS MC ile hesaplanan verim değerleri.....	98
Şekil 4.22. DET3 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında deneysel ve PHITS MC ile hesaplanan verim değerleri.....	102
Şekil 4.23. DET2 ve DET3 dedektörlerinin 9 yıl önceki ile günümüzdeki deneysel verim değerlerinin karşılaştırması	105
Şekil 4.24. DET4 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında deneysel ve PHITS MC hesaplanan verim değerleri.....	107

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

A	Aktivite
ε	Verim
E	Enerji
N	Çekirdek sayısı
t	Zaman
λ	Bozunma sabiti
σ	Compton tesir kesiti
κ	Çift oluşum tesir kesiti
$\bar{\tau}$	Ortalama ömür
$\bar{\lambda}$	Ortalama serbest yol
γ	Gama-ışını
Z	Proton sayısı
τ	Fotoelektrik tesir kesiti
μ	Lineer azalma katsayısı
f_γ	Gama yayınlanma olasılığı
I_0	Gelen foton sayısı
I	Geçirilen foton sayısı
K	Kelvin
T	Mutlak sıcaklık
E_{e-d}	Elektron-deşik oluşturmak için gereken enerji
E_g	Yasak band genişliğinin enerjisi
k	Boltmann sabiti

Kısaltmalar**Açıklamalar****AlSb**

Alüminyum antimonit

CdSe

Kadmiyum selenür

CdTe

Kadmiyum tellür

CdZnTe

Kadmiyum çinko tellür

DL

Ölü tabaka

FEPE

Toplam enerji pik verimi

GaAs

Galyum arsenit

Ge

Germanyum

HgI₂

Civa iyodür

HPGe

Yüksek Saflıkta Germanyum

IAEA

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı

MC

Monte Carlo

PbI₂

Kurşun (II) İyodür

Si

Silisyum

TlBr

Talyum bromür

1. GİRİŞ

Gama spektrometresi, radyoaktivite ölçmenin hızlı, pratik ve hassas yöntemlerinden birisidir. Diğer nükleer analitik tekniklerle karşılaştırıldığında numune hazırlama işlemi daha kolay, basit ve tahribatsız bir yöntemdir. Radyoaktif çekirdekten yayılan gama-ışınlarının enerjileri çekirdeğe özgü olduğundan, gama spektrometrik yöntem ile numuneden yayılan fotonların enerjisi ölçülerek numunede bulunan radyoaktif çekirdekler tanımlanabilir ve sonrasında o radyoaktif çekirdeğin aktivitesi veya konsantrasyonu belirlenebilir. Bu yöntemde yüksek saflıkta germanyum dedektörler (HPGe) yüksek enerji ayırma güçleri ve dedeksiyon verimleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. HPGe dedektörler, yüksek enerji çözünürlüğü sayesinde her türlü numunedeki radyoaktivite ölçümünün yanı sıra, nükleer güvenlik, çevresel radyasyon izleme, tıbbi uygulamalar gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılabilir. HPGe dedektörler hangi amaçla kullanılırsa kullanılsın dedektörün toplam enerji pik veriminin (full energy peak efficiency- FEPE) doğru ve hassas bir şekilde belirlenmesi gereklidir (Modarresi ve diğerleri, 2017; Quang Huy, 2010; Sima, 2012:1-3). FEPE, nicel analiz için gerekli olan en önemli parametrelerden biridir ve dedektör performansını gösterir (Chham ve diğerleri, 2015). Kaynak-dedektör geometrisi, foton enerjisi gibi ölçüm koşullarına, ölü tabaka (DL, dead layer) kalınlığı, uç kabı kalınlığı, pencere malzemesi gibi dedektör özelliklerine, numune kompozisyonu, yoğunluğu gibi numune özelliklerine bağlıdır (Guerra ve diğerleri, 2015). FEPE, deneysel olarak ve Monte Carlo (MC) simülasyonları gibi teorik-matematiksel yöntemlerle belirlenebilir (Guerra ve diğerleri, 2018). Deneysel verim kalibrasyonu için aktivitesi bilinen, ölçülecek numune ile aynı ölçüm geometrisine sahip referans malzemeleri kullanarak standart kaynaklara ihtiyaç vardır. Numune ile standart kaynağın benzer yoğunluklara ve kimyasal bileşimlere sahip malzemeler olması gerekmektedir (Stancu ve diğerleri, 2015). Kullanılan standart kaynak ile numune birebir aynı geometri, konum ve matraste olması gerekir (Sima ve Arnold, 2009). Deneysel yöntem, güvenilirliğine rağmen pahalı, zaman alıcı ve karmaşıktır (Yücel ve diğerleri, 2019; Peryoga ve diğerleri, 2017, Vargas ve diğerleri, 2002). Özellikle karmaşık matris ve geometrilerde ilgilenilen enerji aralığını kapsayan standart gama kaynağı elde etmek her zaman mümkün olmayabilir. Her geometri ve numune matrisi için standart kaynak olmadığından verimin sertifikalı referans malzemelerle deneysel olarak belirlenmesi yerine MC simülasyon programı ile belirlenmesi hem maliyet hem de zaman açısından büyük bir kolaylık ve kazanç sağlamaktadır (Khan ve diğerleri, 2018). MC simülasyon programlarının gama spektrometrisinde özellikle HPGe

dedektörlerinin modellenmesi ve simülasyonunda kullanımı gün geçtikçe daha yaygın hale gelmektedir (Conti ve diğerleri, 2013; Huy ve diğerleri, 2007). HPGe dedektörlerinin simülasyonunda yaygın olarak MCNPX (Briesmeister, 2000), GEANT (Brun ve diğerleri, 1987), PENELOPE (Salvat ve diğerleri, 2009), FLUKA (Ferrari ve diğerleri, 2009) ve bu tez çalışmasında kullanılan PHITS (Peryoga ve diğerleri, 2017; Sato ve diğerleri, 2018) gibi genel amaçlı kodlar ve GESPECOR (Sima ve diğerleri, 2001), EFFTRAN (Vidmar, 2005) ve DETEFF (Díaz ve Vargas, 2008) gibi özel amaçlı MC simülasyon programları kullanılmaktadır. MC simülasyonu ile verim kalibrasyonunda en önemli unsurlar, Ge kristalinin uzunluğu ve çapı, iç boşluğun uzunluğu ve çapı, dedektörün ön kenarının yuvarlatma yarıçapı, dedektör kristali ile uç kabı arasındaki mesafe, mevcut ölü tabakanın kalınlığı, dedektör penceresinin boyutları gibi fiziksel ve geometrik parametrelerin doğru bir şekilde belirlenmesi işlemidir.

Bu parametreleri belirlemek için genellikle, deneysel verim ölçümlerini ve Monte Carlo simülasyonlarını birleştiren “*dedektör karakterizasyonu*” adı verilen özel bir prosedür gerçekleştirilir. Dedektör karakterizasyonu, dedektörün geometrik parametrelerinin mümkün olduğunca hassas bir şekilde belirlenmesidir. Karakterizasyon işlemi standart bir prosedürle dedektörü üreten şirket tarafından gerçekleştirilir. Firma tarafından yapılan karakterizasyon dedektörün sökülerek yurtdışına gönderilmesini ve geri geldiğinde tekrar kurulumunu ve test süreçlerini içerdiği için zaman alıcı ve yüksek maliyetli olması nedeniyle yaygın bir uygulama değildir. Ayrıca, HPGe kristalinin özellikleri zamanla da değişebileceği için belirli aralıklarla karakterizasyonunun tekrarlanması gerekir. Örneğin dedektör sürekli uygun sıcaklıktaki bir soğutma ünitesinde tutulmazsa ölü tabaka kalınlığının zamanla arttığı bilinmektedir (Elanique ve diğerleri, 2012; Prozorova ve diğerleri, 2021; Salman ve diğerleri, 2019). Dedektör karakterizasyon işleminde genellikle üretici tarafından sağlanmayan geometrik özelliklerin doğru bir şekilde belirlenmesi amaçlansa da, üretici firma tarafından sağlanan boyutlar, bilgiler büyük önem taşır. Çünkü bir dedektör karakterize edilirken başlangıçta üretici firma tarafından sağlanan nominal boyutlar kullanılır. Dedektörler öncelikle üretici tarafından sağlanan boyutlar kullanılarak modellenir. MC simülasyonundan elde edilen verim değerleri, çeşitli enerjilere sahip radyoaktif çekirdek içeren numuneler kullanılarak farklı kaynak-dedektör geometrilerinde elde edilen deneysel verim değerleriyle karşılaştırılarak doğrulanır. Simülasyon ve deneysel verim eğrileri arasındaki farklılığın en önemli sebepleri, geometrinin doğru modellenmemesi ve özellikle germanyum kristalini çevreleyen aktif olmayan germanyum

ölü tabaka kalınlığının yanlış bilinmesidir (Chham ve diğerleri, 2015; Ordóñez ve diğerleri, 2019).

Karakterizasyondaki en önemli parametre p-tipi dedektörlerde kristalin dışını, n-tipi dedektörde iç yüzeyini saran ölü tabaka kalınlığıdır. Ölü tabaka, lityum atomlarının germanyum kristaline difüzyonu sonucu zamanla kalınlaşan dinamik bir parametredir (Hau ve diğerleri, 2009).

Bu tez çalışmasında üç adet p-tipi (%150 bağıl verimli DET1, %58,5 bağıl verimli DET2, %54,7 bağıl verimli DET3) ve bir adet n-tipi (%70 bağıl verimli DET4) olmak üzere dört farklı HPGe dedektörün karakterizasyonunun yapılması amaçlanmıştır. Her dedektör birbirinden farklı geometrik özelliklere sahip olduğundan karakterizasyonu da kendine özgüdür. Dedektör karakterizasyonu 59,5 keV -1408 keV gama enerji aralığında deneysel olarak elde edilen referans FEPE değerleri ile PHITS MC hesabı arasındaki farkı en aza indiren dedektörün geometrik parametrelerini bulmak hedeflenmektedir. Bu amaçla tez çalışmasında karakterizasyon için üç parametre detaylıca incelenmiştir. Bu parametreler; yuvarlatılmış/keskin ön kenar geometrisi, bakır kontak pim ve DL kalınlığıdır. Hem p- hem de n-tipi HPGe dedektörlerde kristaldeki elektrik alanın saçak etkisini ortadan kaldırmak için gerekir. Üretilen yüklerin toplanmasını arttırmak için çoğunlukla kristal kenarları yuvarlatılmış (mermilleştirilmiş) olarak üretilir (Mihaljević ve diğerleri, 2012). Fakat literatürde alışlagelmiş şekilde kristal ön kenarı gerçekte olması gerektiği gibi yuvarlatılmış olarak modellenmez. Keskin olarak modelleme aktif kristal hacmini artıracığı için verim değerleri olması gereken değerden fazla hesaplanacaktır.

Tezde dört dedektörde kristal kenarı hem keskin hem de yuvarlatılmış olarak modellenerek verim değerleri elde edilmiş, böylece ön kenar geometrisinin verime etkisi incelenmiştir. Tez çalışmasında incelenen bir diğer parametre ise dedektörün iç boşluğunda bulunan bakır kontak pimin kalınlığıdır. Dedektörü soğuk tutmak için ısı iletimini ve elektriksel kontağı sağlayan bakır pimin kalınlığı hiçbir dedektör üreticisi tarafından verilmemektedir (Uyar ve diğerleri, 2021). Dedektörler ilk olarak bakır kontak pim olmadan, daha sonra farklı kalınlıklarda silindirik bakır kontak pimi dahil edilerek modellenmiş ve verim değerleri hesaplanmıştır. Aynı hesaplama farklı dedektör-kaynak mesafeleri için tekrar edilmiştir. Böylece artan bakır kalınlığı ile dedektör-kaynak mesafesinin verime etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. Tez çalışmasında ele alınan son parametre DL kalınlığıdır. Üreticinin

sağladığı DL değerinden başlanarak deneysel verimle uyumlu sonuçların elde edildiği değere kadar arttırılarak her bir dedektörün güncel DL değerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışmasında öncelikle basit ve modellenmesi nispeten kolay olan nokta kaynak geometride PHITS, GESPCEOR ve DETEFF MC programları ile dört dedektör karakterize edilerek özellikle PHITS'in *nokta kaynak geometride* güvenilir bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir. Gama spektrometri laboratuvarlarında radyoaktivite analizlerinde en sık kullanılan geometri silindir kapların kullanıldığı *hacimsel geometridir*. TENMAK NÜKEN Gama spektrometri laboratuvarında da rutin radyoaktivite analizlerinde 6 cm×5 cm boyutunda silindirik kap kullanılmaktadır. PHITS'te hacimsel kaynak modellemesinin başarılması ile maliyetli ve zaman alıcı olan deneysel verim yerine kısa sürede istenilen kompozisyondaki numunelerin verimi belirlenerek, PHITS MC programının hacimsel geometride de güvenilir bir şekilde kullanılabileceğinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç için kullanılacak sertifikalı referans numuneler; IAEA-RGU-1 (uranyum cevheri), IAEA-RGTh-1 (toryum cevheri), IAEA-RGK (potasyum sülfat), IAEA-375 (toprak numunesi), TCC-Sand-113674 (kum numunesi), TCC-Simulated Vegetation-113672 (kahve numunesi)'dir. Tez çalışmasında bu referans malzemelerin iki amaçla kullanılması hedeflenmiştir. IAEA serisi numuneler, PHITS ile hesaplanan verim değerlerinin deneysel verim değerleriyle uyumunun gösterilmesinde, TCC numuneleri ise aktivite konsantrasyonlarının hesaplanarak sertifika aktivite değerleriyle karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

Bu tez çalışması, ülkemizde HPGe dedektör karakterizasyonun yapıldığı ilk kapsamlı araştırmadır.

Tez beş ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde tezin amacı, içeriği ve dedektör karakterizasyonunun önemi üzerine genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde ise radyoaktif bozunma, gama ışınlarının madde ile etkileşmesi, gama spektrometresi, n- ve p-tipi HPGe dedektörler, MC simülasyon yöntemi, dedektör verimi ve karakterizasyonunda incelenen parametreler açıklanmıştır. Üçüncü bölümde tezde kullanılan dedektörler, referans malzemeler, MC programlarına yer verilerek, yapılan deneysel ve simülasyon çalışmaları açıklanmıştır. Dördüncü bölümde ise deneysel ve simülasyonlar sonucu elde edilen bulgular

tablolar ve grafikler şeklinde sunularak yorumlanmıştır. Tezin beşinci bölümünde ise elde edilen sonuçlar tezin amaçları ışığında özetlenerek tartışılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Radyoaktif Bozunma

Radyoaktif bozunma ya da dönüşüm, kararsız atom çekirdeğinin parçacıklar veya elektromanyetik radyasyon yayınlarak kendiliğinden değişime uğramasıdır. Radyoaktif bozunma rastgele bir süreçtir. Bu nedenle, kararsız bir çekirdeğin ne zaman bozunacağını kesin olarak söylemek mümkün değildir (Aydın ve diğerleri, 2018:14). Fakat N tane radyoaktif çekirdeği göz önüne aldığımızda, bir atomun dt süresi boyunca bozunma olasılığı, λdt ile verilir. Burada λ , çekirdeğin bozunma olasılığının bir ölçüsüdür ve bozunma sabiti olarak bilinen orantı sabitidir. λ , radyoaktif çekirdeğin yarı ömrüne bağlı bir sabit olup, değişmez bir niceliktir. Başlangıçta $N(0)$ sayıda atomun bulunduğu bir sistemde, dt zamanında bozunan atomlar $-dN = \lambda N dt$ ile verilir.

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

Zamana göre integral, herhangi bir t zamanındaki mevcut atomların sayısını verir, yani;

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

$N(0)$, $t=0$ anında yani başlangıçtaki radyoaktif çekirdek sayısını göstermektedir.

Yarı ömür, $t_{1/2}$, atom sayısının başlangıç değerinin yarısına düştüğü zamanı belirtmek için kullanılır, yani $\frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}}$. Dolayısıyla, yarı ömür bozunma sabitiyle ilişkilidir.

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda} \quad (2.3)$$

Bozunma sabitinin tersi olan radyoaktif çekirdeğin *ortalama ömrü* ($\bar{\tau}$) ise bir çekirdeğin bozununcaya kadar geçirdiği ortalama süre olarak tanımlanır ($\bar{\tau}=1/\lambda$).

Radyoaktif bozunma birinci dereceden diferansiyel bir süreçtir. Bozunma hızı, yani aktivite, kaynakta bulunan radyoaktif çekirdek sayısı ile doğru orantılıdır:

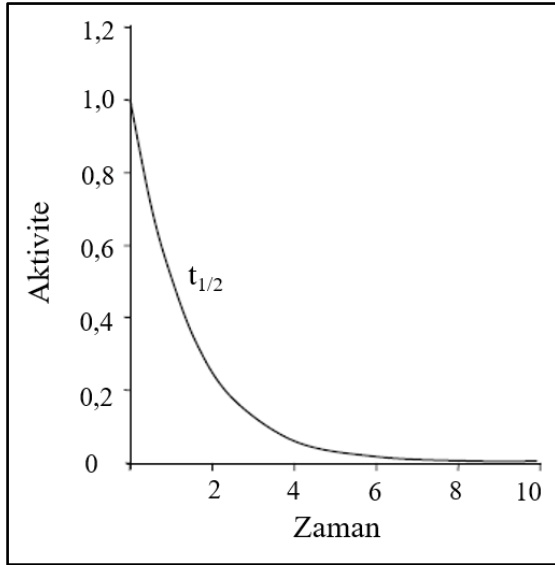
$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (2.4)$$

Bu tanımda, N 'nin bozunmadan dolayı azaldığının varsayıldığına dikkat edilmelidir. SI birim sisteminde aktivitenin birimi Becquerel (Bq) olup, bir saniyedeki parçalanma/bozunmaya eşittir.

Aktivite, atom sayısı ile orantılı olduğundan, atom sayısını aktiviteye dönüştürdüğümüzde;

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

aktivitenin zamanla üstel olarak azaldığını ifade eden eşitlik elde edilir. Şekil 2.1 bir radyoaktif çekirdeğin bozunma eğrisini göstermektedir.



Şekil 2.1. Aktivitenin zamanla değişimi

Çekirdeğin kararsızlığı proton - nötron oranı dengesizliğinden meydana gelir. Kararsız çekirdek radyoaktif dönüşümle kararlı bir duruma gelmeye çalışır. Radyoaktif bozunma esas olarak alfa (α) ve beta (β) bozunumu şeklinde olmakla birlikte çok nadir süreçlerden biri de kendiliğinden fisyon olayıdır (Gilmore, 2008:2). Bu bozunmalardan sonra çekirdek proton/nötron kazanır veya kaybeder, yani atom farklı bir element haline gelir. Çekirdeğin

kararsızlığı hem proton, hem nötron fazlalığından ileri geliyorsa çekirdek, iki proton ve iki nötrondan oluşan bir α parçacığı yayınlarak bozunur ve atom numarası (Z) 2, kütle numarası (A) ise 4 azalır (Eş. 2.6). Bu dönüşüm genellikle ağır çekirdeklerde gözlemlenir. α bozunmasının meydana gelmesi için ana çekirdeğin kütlelerinin ürün çekirdek ve α parçacık kütlelerinin toplamından büyük olması gerekir.



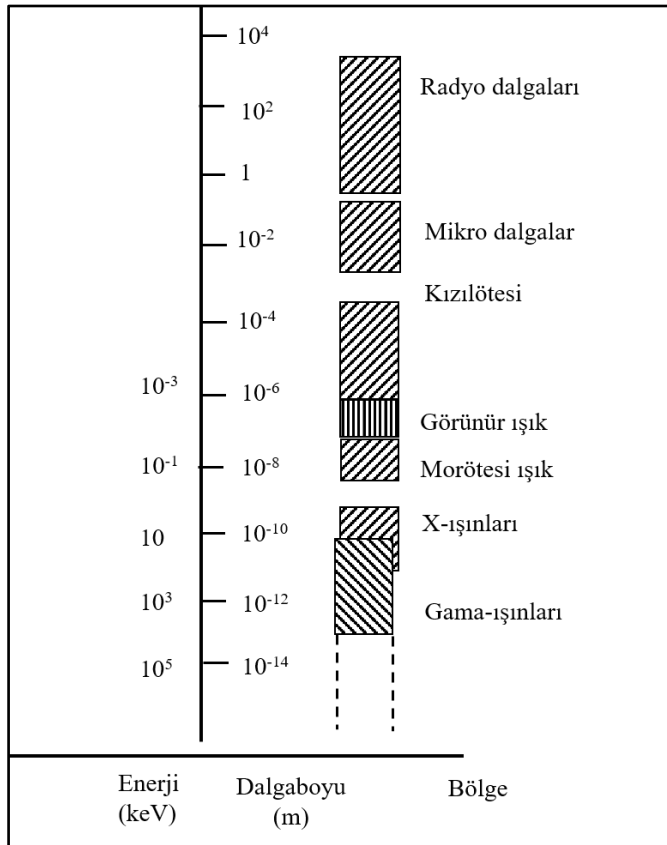
β bozunması ise β^- (eksi yüklü elektron), β^+ (artı yüklü elektron, pozitron) bozunumu ve elektron yakalama olmak üzere üç türdür. β^- bozunmasında: Radyoaktif çekirdeğin kararsızlığı nötron fazlalığından ileri geliyorsa çekirdekteki fazla nötron protona dönüşüp, bir elektron ve anti-nötrino yayımlanır (Eş. 2.7). Böylece çekirdekte nötron bir azalırken proton sayısı bir artar. β^+ bozunmasında: Atom çekirdeğinin kararsızlığı proton fazlalığından ileri geliyorsa çekirdek fazla protonu nötrona dönüştürüp, bir pozitron (e^+) ve nötrino yayımlanır (Eş. 2.8). Bu durumda çekirdekteki proton sayısı bir azalır, nötron sayısı bir artar ve kütle numarası değişmeden kalır. Elektron yakalamada ise çekirdek proton fazlalığından dolayı kararsız ise çekirdeğe yakın K veya L yörünge elektronlarının birinin çekirdek tarafından yakalanması sonucu oluşur. L tabakası ve daha üst tabakadaki elektronların yakalanma olasılığı K tabaka elektronlarına göre daha düşüktür (Aydın ve diğerleri, 2018:17). Elektronla proton birleşerek nötron ve nötrino haline dönüşür (Eş. 2.9). Elektron yakalamanın varlığı atomik yörüngede oluşan elektron eksikliğinden dolayı çıkan x-ışınlarından anlaşılır



2.2. Gama Bozunumu

Gama (γ) bozunumu, çekirdek uyarılmış durumdayken yani fazla enerjiye sahip olduğunda kararlı hale veya daha az enerjili duruma dönüşürken gerçekleşir. Uyarılmış durum, genellikle α veya β bozunması meydana geldikten sonra olur. γ bozunumu, çekirdekteki

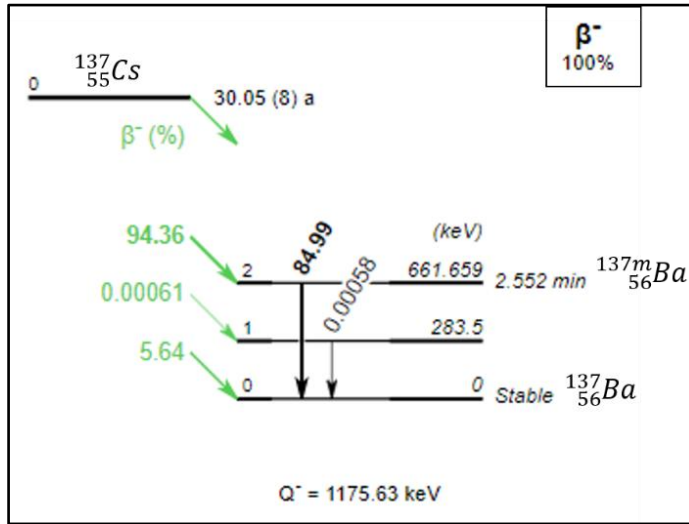
nükleonların sayısında veya türünde herhangi bir değişiklik olmadığı için α , β veya kendiliğinden fisyon gibi bir bozunma şekli değildir, çekirdeğin cinsi değişmeden uyarılmış durumdan taban duruma bozunmasıdır (Tanır ve diğerleri, 2013:100). Gama radyasyonu, temelde tıpkı radyo dalgaları, mikrodalgalar ve görünür ışık gibi elektromanyetik radyasyondur. Elektromanyetik spektrumdaki enerji aralığında yüksek enerjili, kısa dalga boylu uçta bulunur (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Elektromanyetik spektrum (Gilmore, 2008:9)'dan derlenmiştir.

Uyarılmış nükleer durum, bir veya daha fazla nükleonun daha yüksek enerjili bir kabuğa veya kabuklara sıçramasıdır. Nükleer enerji durumları, çekirdekteki yük ve akım dağılımları değiştikçe değişir. Yük dağılımları elektrik momentlerin, akım dağılımları manyetik momentlerin oluşmasına yol açar. Bir birim açısal momentum değişimine *elektrik dipol momenti* denir ve E1 ile gösterilir; iki birim söz konusuysa, *elektrik kuadrupol momenti*, E2, vb. şeklinde devam eder. Benzer şekilde, manyetik momentlerdeki değişikliklere karşılık gelen, manyetik dipol için M1'e, manyetik kuadrupol için M2'ye yol açan paralel bir manyetik multipol sistemi vardır. Açısal momentumdaki değişikliklerin yanı sıra, paritede de bir değişiklik olasılığı vardır. *Parite*, dalga fonksiyonlarının bir özelliğidir ve

matematiksel olarak orijine göre yansıma olduğu için dalga fonksiyonunun davranışına bağlı olarak + veya - (çift veya tek) olduğu söylenir. Geçişin elektrik geçişi (E) mi yoksa manyetik geçiş (M) mi? olduğu, açısal momentumdaki değişimin ne olduğu?, örn. E1, E2, E3 vb. ve parite değişikliğinin olup olmadığı? sorularının cevapları gama geçişleri için seçim kurallarını formüle etmede kullanılır. Nükleer durumların belirli ömürleri vardır ve geçişlerin seçim kurallarına göre büyük ölçüde yasaklılık içerdiği durumlarda seviyeler çok uzun ömürlü olabilir. Nükleer seviye ömrü kolayca ölçülebilecek kadar uzunsa buna *izomerik seviye* denir. Çoğu gama geçişi 10^{-12} s'den daha kısa sürede gerçekleşir. Geçişin yarı ömrü, geçişin E veya M olmasına, geçişin enerjisine ve kütle numarasına bağlıdır. 1 ns üstünde ömürlere sahip nükleer seviyelere de *yarı kararlı-metastabil (metastable)* denir. Metastabil durumdaki nükleer izomerler, üst simge olarak küçük 'm' ile gösterilir. Örneğin; ^{137}Cs , yarı ömrü 30,05 yıl olan ve beta bozunumu ile kararlı izotop ^{137}Ba 'ye bozunan uzun ömürlü bir ana radyoaktif çekirdektir. Bu geçiş, ya doğrudan kararlı ^{137}Ba 'ye (%5,4) dönüşümle ya da $^{137\text{m}}\text{Ba}$ 'nin yarı kararlı enerji durumuyla (%94,6) tamamlanır. $^{137\text{m}}\text{Ba}$, 2,55 dakikalık bir yarı ömre sahiptir ve bir gama ışını ($E_\gamma = 0,6617 \text{ MeV}$) yayarak kararlı izotop ^{137}Ba 'ye izomerik geçişle bozunur.



Şekil 2.3. ^{137}Cs 'nin bozunma şeması (LARAweb, 2021)

Uyarılmış durumdaki bir çekirdek daha düşük enerjili düzeye geçiş yapıp enerjisini gama-ışını yayınlamaya başlayabilir. Uyarılmış durumdaki çekirdek fazla enerjisini iç dönüşüm elektronunu çıkarmak için harcar. İç dönüşüm, yörünge elektronu uyarılmış

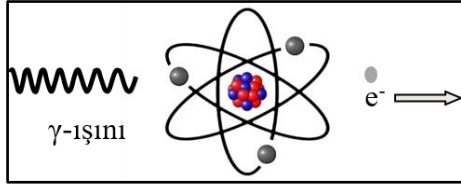
çekirdeğe yaklaştığında gerçekleştiğinden çekirdeğin uyarılmış enerji seviyesinde daha uzun kaldığı yarı kararlı durumlarında baskındır. İç dönüşüm olayı bir bozunma durumu olduğundan çekirdeğin atom numarası, kütle numarası ve nötron sayısında değişme olmaz; elektron yakalamada olduğu gibi bir dizi x-ışını yayınlanır.

2.3. Fotonların Madde ile Etkileşmesi

X ve γ -ışınları olarak adlandırılan enerjik fotonlar, elektromanyetik dalga paketleridir, yani durgun kütleleri ve yükleri sıfır olan parçacıklardır. Alfa ve beta gibi yüklü parçacıklar, dedektör malzemesinde doğrudan iyonlaşma ve uyarılma yoluyla bir sinyal üretirken, gama-ışınları yüksüz olduklarından bunu yapamazlar. Bu nedenle gamaların dedeksiyonu, gama-ışını enerjisini dedektör malzemesi içindeki elektronlara aktaran etkileşim türlerine bağlıdır. Gama-ışınları dedektör içerisinde kristal atomları ile genel olarak 3 şekilde etkileşir. Bunlar; fotoelektrik soğurma, Compton saçılması ve çift oluşumdur. Her üç durumda da serbest elektronlar üretilir ve bu elektronlar dedektör ortamındaki atomlarının iyonlaşması ve uyarılmasıyla enerjilerini kaybederek birçok elektron-deşik (hole) çifti oluştururlar. Foton detektörlerinde, bu yük çiftleri ya bir fotonun geçişini saptamak ya da üretilen yük miktarını ölçerek onun enerjisini belirlemek için kullanılır.

2.3.1. Fotoelektrik soğurma

Gelen gama-ışınları ile ilgili tüm bilgilerin elde edilebilmesi için dedektörde tamamen soğurulmaları gerekir. Bu nedenle gama spektroskopisinde istenilen etkileşim türü fotoelektrik olaydır. Çünkü, fotoelektrik olayda hedefe gelen gama ışını, atoma bağlı elektrona enerjisini aktarır, elektron koparak serbest hale gelirken foton elektron tarafından soğurularak yok olur (Şekil 2.4). Bu yolla atomdan ayrılan fotoelektronun kinetik enerjisi soğrulan foton enerjisi ile bağlanma enerjisi arasındaki farka eşittir. Bu elektron ortamda ilerlerken ikincil iyonizasyona, uarmaya ve frenleme ışınlamına sebep olabilir. Elektronun kopmasıyla atomik yörüngede bir elektron boşluğu oluşur. Bu boşluk ta bir üst enerji seviyesindeki yörünge elektronu tarafından doldurulur. Bu sırada enerjisi iki yörünge arasındaki enerji farkına eşit bir karakteristik x-ışını salınır. X-ışını gelen ilk foton gibi çarpışmalarla ya ortamdan kaçır ya da ortamda soğrulur.



Şekil 2.4 Fotoelektrik olay

Fotoelektrik tesir kesiti (τ), yani fotoelektrik olayın gerçekleşme olasılığı, malzemenin atom numarasına (Z) ve fotonun enerjisine (E) bağlı olarak;

$$\tau = Z^{4,5} \cdot E_{\gamma}^{-3} \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilir. Güçlü Z bağımlılığı, yüksek Z 'li bir malzemenin fotonların soğurulmasında çok etkili olduğunu gösterir. Foton enerjisine bağımlılığı ise bu etkinin düşük enerjilerde baskın, ancak yüksek enerjilerde ihmal edilebilir etkileşim türü olduğunu göstermektedir.

2.3.2. Compton saçılması

Bu etkileşimde, hedefe gelen foton zayıf bağlı neredeyse serbest elektronla etkileşerek elektronu yörüngeden çıkarır. Elektron serbest hale gelirken foton, doğrultusu ve enerjisi değişerek hareketine devam eder, yok olmaz. Saçılan fotonun enerjisi (E'_{γ}), elektrona aktardığı enerji kadar azalır. Saçılan fotonun enerjisi, θ saçılma açısına bağlı olarak;

$$E'_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{[1 + E_{\gamma}/mc^2(1 - \cos\theta)]} \quad (2.11)$$

ile verilir. Eşitlikteki mc^2 , elektronun durgun kütle enerjisidir.

Geri tepen Compton elektronunun kinetik enerjisi ise,

$$E_{e^-} = E_{\gamma} - E'_{\gamma} = E_{\gamma} \frac{E_{\gamma}/mc^2(1 - \cos\theta)}{[1 + E_{\gamma}/mc^2(1 - \cos\theta)]} \quad (2.12)$$

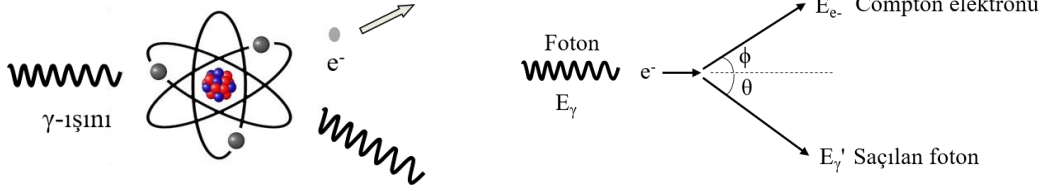
ile verilir. θ saçılma açısı 0° ise $E'_\gamma = E_\gamma$ ve $E_{e^-} = 0$ olduğundan Compton elektronlarının enerjisi çok küçüktür ve saçılan fotonun enerjisi hemen hemen gelen fotonun enerjisine eşittir (Debertin ve Helmer, 1998: 33).

θ saçılma açısı 180° ise gelen foton geliş doğrultusunda geri saçılır. Bu durumda,

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{[1 + 2E_\gamma/mc^2]} \quad (2.13)$$

$$E_{e^-} = E_\gamma \frac{[2E_\gamma/mc^2]}{[1 + 2E_\gamma/mc^2]} \quad (2.14)$$

elde edilir. Compton saçılması dedektörde bütün saçılma açılarında meydana gelir.



Şekil 2.5. Compton saçılması

Compton saçılmasının gerçekleşme olasılığını veren Compton tesir kesiti (σ);

$$\sigma = Z \cdot E_\gamma^{-1} \quad (2.15)$$

ifadesi ile verilir.

2.3.3. Çift oluşumu

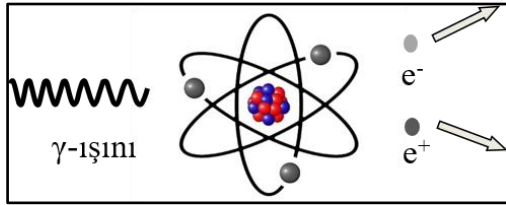
Fotoelektrik soğurma ve Compton saçılmasından farklı olarak çift oluşumu, gama-ışını ile atomun bir bütün olarak etkileşiminden kaynaklanır. Etkileşme, çekirdeğin Coulomb alanı içinde gerçekleşir ve bir gama-ışınının elektron-pozitron çiftine dönüşmesiyle sonuçlanır. Enerjisi 1022 keV'den büyük olan foton, atom çekirdeği ile etkileştiğinde yok olur ve onun yerine elektron-pozitron çifti oluşur. Çift oluşumda oluşan pozitron kararlı olmadığından, kinetik enerjisini kaybettikten sonra yavaşlayarak bir elektronla çarpışır ve 511 keV (m_0c^2)

enerjiye sahip iki tane anhilasyon (yok olma) fotonu oluşur. Anhilasyon sonucu oluşan bu gama-ışınları momentumun korunması gereği birbirlerine zıt doğrultuda yayınlanırlar ve ortam içerisinde fotoelektrik soğurma veya Compton saçılmasına uğrarlar.

Çift oluşumunun gerçekleşme olasılığını veren çift oluşum tesir kesiti (κ) ise;

$$\kappa = Z^2 \cdot \ln E \quad (2.16)$$

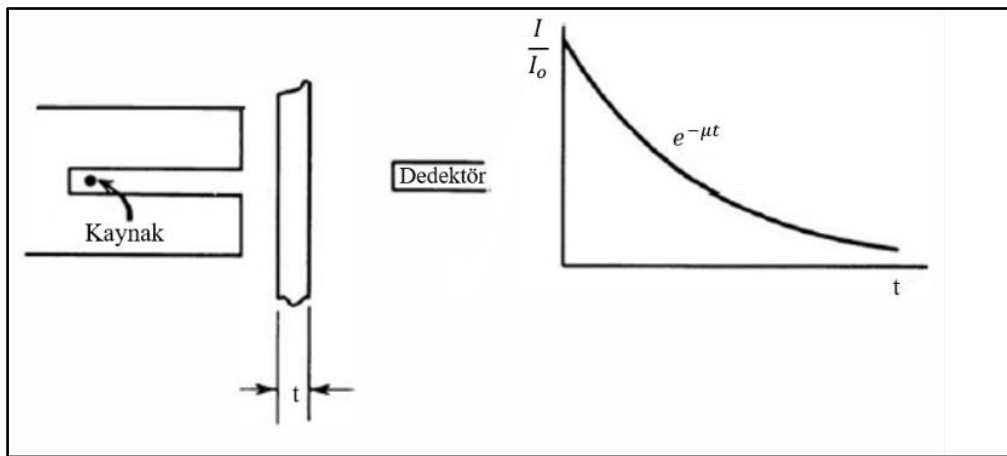
ifadesi ile verilir.



Şekil 2.6. Çift oluşumu

2.3.4. Gama-ışını azalması - Azalma katsayısı

Gama-ışınları dar bir ışın halinde toplanıp, değişken kalınlıktaki bir soğurucudan geçtikten sonra bir dedektöre çarpması sonucunda Şekil 2.7'de gösterildiği gibi üstel olarak zayıflamaktadır.



Şekil 2.7. Gama-ışınlarının üstel azalma eğrisi

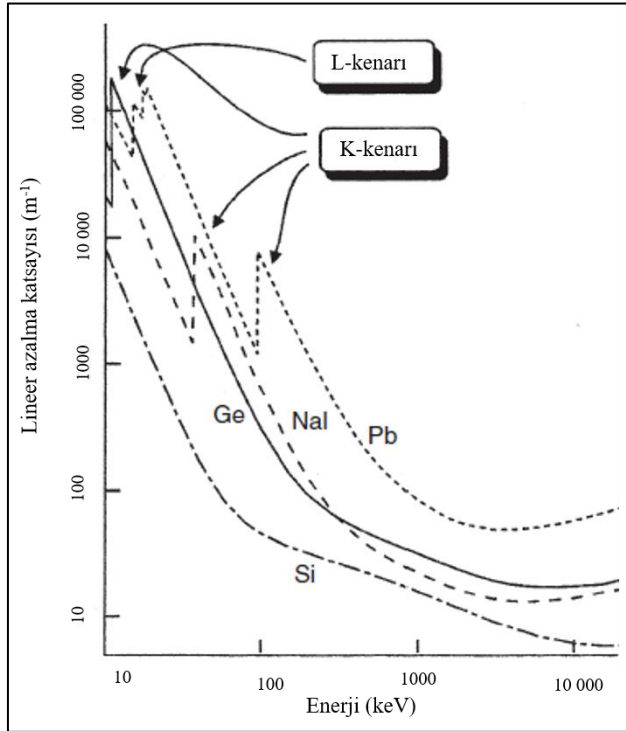
Gama-ışınlarının madde ile etkileşmesinin toplam olasılığı, Eş. 2.10, 2.15 ve 2.16 ile verilen fotoelektrik, compton ve çift oluşum etkileşme olasılıklarının toplamıdır ve lineer azalma katsayısı olarak adlandırılır.

$$\mu = \tau(\text{fotoelektrik}) + \sigma(\text{compton}) + \kappa(\text{çift oluşumu}) \quad (2.17)$$

t kalınlığındaki malzeme üzerine gelen (I_0) ve geçirilen (I) foton sayısı arasındaki ilişki;

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu t} \quad (2.18)$$

ifadesi ile verilir.



Şekil 2.8. Enerji ve etkileşim türüne göre germanyumun lineer azalma katsayısı (Gilmore, 2008:26)

Örnek olarak germanyumun enerjiye göre lineer azalma katsayısı incelendiğinde, düşük enerjide fotoelektrik etkileşimlerin, yüksek enerjide ise çift oluşumunun baskın olduğu, Compton saçılmasının ise orta enerjide baskın olduğu görülmektedir (Şekli 2.8).

Gama-ışınları ayrıca, bir etkileşim gerçekleşmeden önce soğurucuda kat edilen ortalama mesafe olan *ortalama serbest yol* ($\bar{\lambda}$) ile de karakterize edilebilir.

$$\bar{\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} t e^{-\mu t} dt}{\int_0^{\infty} e^{-\mu t} dt} = \frac{1}{\mu} \quad (2.19)$$

Ortalama serbest yol, lineer azalma katsayısının tersidir. Lineer azalma katsayısı, soğurucu malzeme aynı olmasına rağmen, soğurucunun yoğunluğuna göre değişmesinden dolayı, kütle azalma katsayısı çok daha yaygın olarak kullanılır ve şu şekilde tanımlanır:

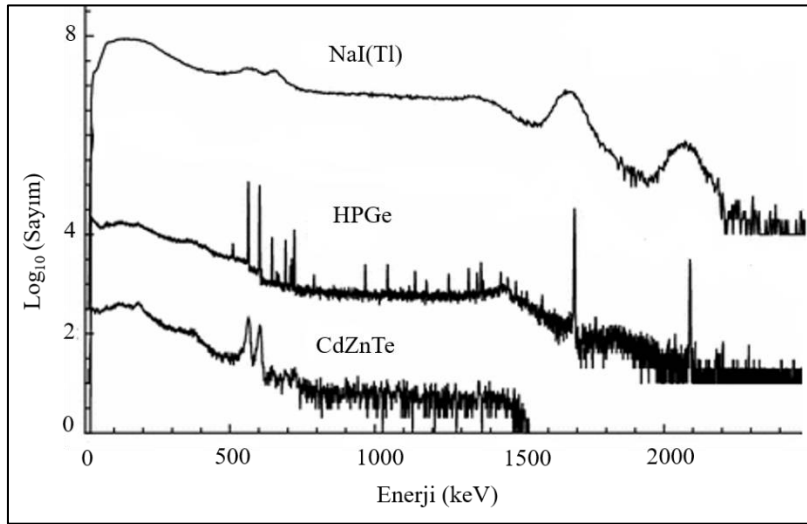
$$\text{Kütle azalma katsayısı} = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.20)$$

burada ρ , ortamın yoğunluğudur.

2.4. Gama Spektrometresi - HPGe Dedektörler

Fransız kimyager ve fizikçi Paul Villard, 1900 yılında radyumdan yayılan radyasyonu incelerken alfa parçacıkları gibi kolayca durdurulamayan farklı bir ışın keşfetti. Başlangıçta alfa ve beta ışınları gibi kütleli parçacıklar olduğu hatta son derece hızlı beta parçacıkları olabilecekleri düşünülen bu ışınlar gama-ışını adını veren ise Ernest Rutherford'dur (Debertin ve Helmer, 1998:8). Gama-ışınları elektromanyetik spektrumun en kısa dalga boylu, en yüksek enerjili ışınım türüdür (Şekil 2.8). Gama-ışını yayan radyoaktif çekirdeklerin saptanması ve miktarlarının belirlenmesinde gama spektrometrik yöntem kullanılır. Gama spektrometrik yöntem; alfa spektrometrisi, sıvı sintilasyon sayımı gibi diğer analitik tekniklere göre özellikle karmaşık olmayan, radyokimyasal ayırma işlemlerine gerek duyulmayan numune hazırlama prosedürü nedeniyle hızlı ve tahribatsız bir şekilde birden çok radyoaktif çekirdeğin aynı anda ölçülebildiği bir yöntemdir (Yücel ve diğerleri, 2010). Gamaların tespitinde kullanılan dedektör malzemesinin, gama-ışınına soğurduktan ve birçok yüklü parçacık (elektron-deşik çiftleri gibi) oluşturduktan sonra yükün bir şekilde toplanmasına izin vermesi ve bir elektrik sinyali oluşturması beklenir. Bu elektrik sinyallerinden bir spektrum elde edilerek analiz yapılmaya 1950'lerin başlarında talyum aktive edilmiş sodyum iyodür - NaI(Tl) - sintilasyon dedektörleri ile başlanmıştır. NaI(Tl) dedektörleri ile gama ışınlarının tespiti, yüksek verim sağlayabilen ve aynı zamanda birden fazla enerjili gama ışını kaynaklarının katkılarını ayırarak ilk kez taşınabilir cihazlarla gerçekleştirilmiştir. Radyasyon dedeksiyonunda amaç, radyasyonun miktarı ile birlikte enerjisinin de ölçülmesidir. Işık verimi yüksek, elektronlara olan cevabı belirli bir enerji aralığında doğrusal olan NaI(Tl) inorganik kristali günümüzde de yaygın olarak

kullanılmaktadır. Saf NaI kristalinde salınan fotonlar görünür bölgede değildir. Görünür bölgede foton salınma olasılığının artırılması için aktivatör denilen safsızlıklar eklenir. NaI kristaline de küçük miktarda (10^{-3} mol) talyum aktivatör ilave edilmiştir. Gama spektrometresi, genellikle herhangi bir numunede gama ışını yayan radyoaktif çekirdeklerin tanımlanması ve miktarının belirlenmesi için kullanılan bir ölçüm tekniğidir. Radyoaktif çekirdeklerin hem tanımlamasında hem de miktarın belirlenmesinde kristalin enerji ayırma gücü en önemli parametredir. NaI(Tl) sintilasyon dedektörlerinden sonra geliştirilen HPGe (yüksek saflıkta germanyum) yarı iletken dedektörler yüksek enerji ayırma gücüne sahip olduklarından günümüzde gama spektrometresinde en yaygın kullanılan dedektörlerdir. NaI(Tl) dedektörleri ise enerji ayırma gücünün önemli olmadığı yalnızca bir veya iki radyoaktif çekirdek ölçülecek durumlarda özellikle düşük maliyetli olmasından dolayı kullanılmaktadır. NaI(Tl) ve HPGe dışında gama spektrometresinde kullanılan bir diğer dedektör de $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ (CdZnTe-CZT-kadmiyum çinko tellür) yarı iletken dedektördür. NaI(Tl) sintilasyon dedektörlerinden (122 keV'de 31 keV) çok daha iyi, ancak HPGe'den (122 keV'de 0,5 keV) daha kötü enerji ayırma gücüne sahip olan CZT (122 keV'de 9 keV) dedektörlerin en önemli avantajı oda sıcaklığında kullanılabilmesidir.



Şekil 2.9. NaI(Tl), CdZnTe ve HPGe dedektörlerin örnek spektrumları

CdZnTe, CdTe, HgI_2 gibi tüm yeni yarı iletken malzemelerde ciddi yük toplama problemleri vardır. Bu malzemelerdeki elektronların mobilitesi (mobility) ile deşiklerin mobilitesi arasında fark fazladır. Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi CdZnTe dedektörlerde elektronların mobilitesi $1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ iken, deşiklerin mobilitesi $50\text{-}80 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 'dir. Bu farklılık elektronların kısa sürede anota ulaşmasına, deşiklerin ise katoda çok yavaş ilerlemesine,

dolayısıyla spektrumda tamamlanamayan yük toplanmasına (incomplete charge collection) neden olur. Pikin sol tarafında kuyruklanmaya sebep olan bu problem, bu dedektörlerin boyutunu ve kullanılabilecekleri enerji aralığını sınırlar (Knoll, 2010:477). Elektron - deşik hareketlilikleri yüksek ve birbirine yakın (elektronun mobilitesi $36000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, deşiklerin ise $42000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) olan HPGe dedektörler gama spektrometresinde en çok kullanılan dedektörlerdir. Elektron-deşik mobilitelerinin yüksek olmasından dolayı yük taşıyıcı özellikleri iyidir. Aynı zamanda elektron-deşik mobilitelerinin birbirine yakın olması sebebiyle gama spektrumlarında tamamlanamayan yük toplanmasından dolayı oluşan pulsların olması gerekenden küçük genlikte oluşması ve pikin sol tarafta kuyruklanması olayı bu kristallerde görülmez. Dedektöre gelen gama-ışınları dedektör içerisindeki kristal atomları ile fotoelektrik, Compton veya çift oluşum etkileşimleri yapabilir. Gelen gama-ışını ile ilgili tüm bilginin elde edilebilmesi için dedektörde tamamen soğurulması gerekir, bu nedenle gama spektrometresinde istenen etkileşim türü fotoelektrik soğurmadır. Eş. 2.10, 2.15 ve 2.16’da verilen tesir kesitlerinde (Debertin ve Helmer, 1998:31,35,36) de görüldüğü gibi atom numarasının büyük olması fotoelektrik etkileşme olasılığını artıracığından seçilen kristalin atom numarasının büyük olması istenir. Germanyum (Ge) yeterli sayılabilecek yüksek atom numarası (32) ve yoğunluğa ($5,32 \text{ g cm}^{-3}$) sahip bir kristaldir.

Çizelge 2.1. Gama-ışını dedektörlerine uygun bazı malzemeler için parametreler (Gilmore, 2008:41)

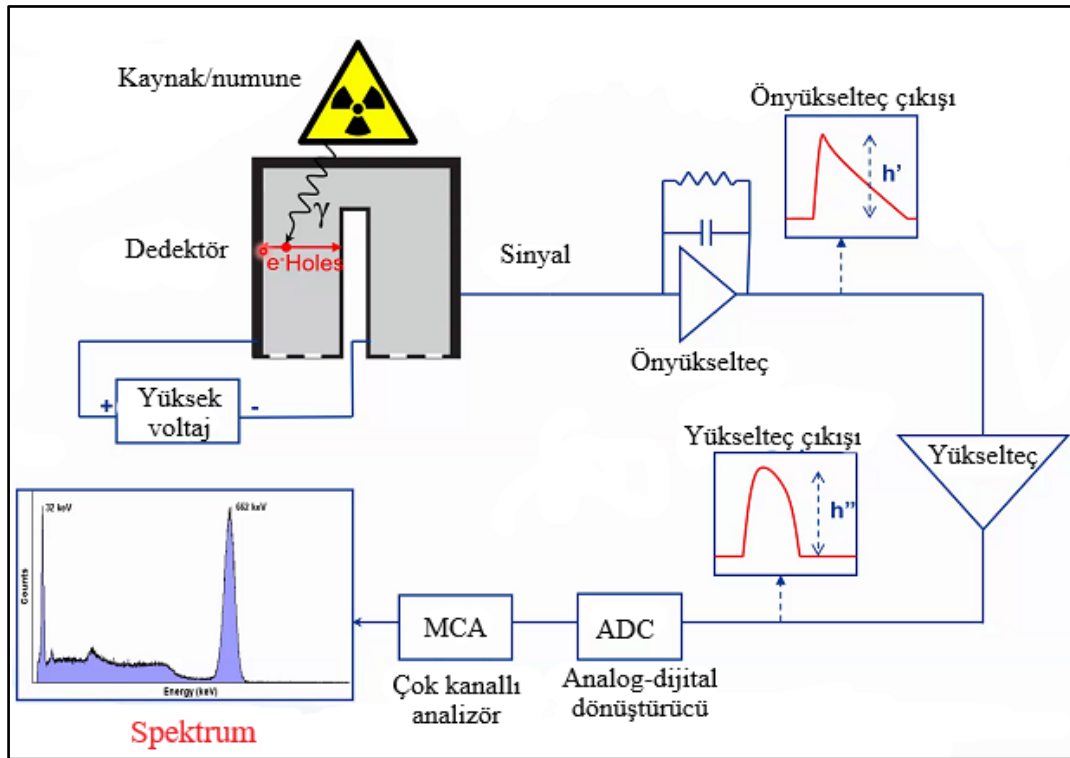
Malzeme	Atom numarası	Çalışma sıcaklığı	Band genişliği (eV) ^{a)}	E_{e-d} (eV) ^{a,b)}	Yoğunluk (g cm^{-3})	Mobilite ($\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)	
						Elektronlar	Deşikler
Si	14	Oda sıcaklığı	1,106	3,62	2,33	1350	480
Ge	32	Sıvı azot sıcaklığı (77 K)	0,67	2,96	5,32	36000	42000
CdTe	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	6,30	100	4
GaAs	31, 33	Oda sıcaklığı	1,45	4,51	5,35	8000	400
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)} Değerler Ge için 77 K, diğerleri için 300 K olarak verilmiştir.

^{b)} Elektron-deşik oluşturmak için gereken enerji (Gilmore, 2008:41)

Gama spektrometrik yöntemle herhangi bir radyoaktif kaynak veya numunede bulunan gama piklerinin elde edilebilmesi için dedektör dışında bir sinyal işleme sistemine ihtiyaç vardır

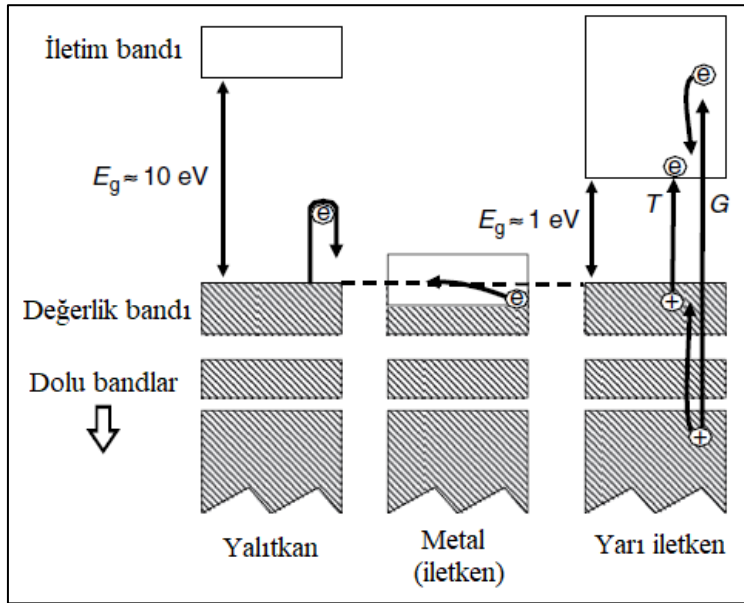
(Şekil 2.10). Sinyal işleme sistemleri; yükselteç, analog-dijital dönüştürücü (ADC) ve çok kanallı analizörden (MCA) oluşan elektronik bileşenlerden oluşmaktadır. Önyükseltecin çıkışındaki çok küçük genlikli pulsların puls işleme sistemlerinde işlenmesi mümkün değildir. Bu nedenle önyükselteç çıkışındaki yükselteç ile bu pulslar, şekillendirilmiş ve sinyal işleme sistemi için uygun hale getirilmiş olur. Daha sonra bu pulsların her birinin yüksekliğinin ölçülmesi ve küçük voltaj aralıklarında meydana gelen sayımları sayma işlemi çok kanallı analizör ile yapılmaktadır. Gelen analog sinyallerin sayılara dönüştürülmesi de analog-dijital dönüştürücü ile yapılmaktadır. Her pulsun yüksekliği, dedektörde soğurulan enerji miktarıyla orantılı olduğundan, sonuçta ortaya çıkan sayımların listesi gama ışını spektrumunu vermektedir. Dolayısıyla gama spektrometresi genel olarak, dedektör kristaline ulaşan gama ışınlarının enerjisiyle orantılı olarak oluşan pulsların bir önyükselteç ve bir yükselteçte işlendikten sonra elde edilen sinyalin analog-dijital dönüştürücüde sayısal hale getirildiği ve çok kanallı analizörde spektrum olarak kaydedildiği sistemdir.



Şekil 2.10. Gama spektrometresinde sinyal işleme sistemi

2.4.1. p- ve n-tipi HPGe dedektörler

Serbest bir atomda elektronlar belirli enerji seviyelerinde yer alır. Belirli enerji seviyelerindeki elektronların davranışını band teorisi ile tanımlayabiliriz. Bu teoriye göre, atomları bir araya getirerek katı bir yapı halinde birleştirmek, bu enerji seviyelerini her biri sabit sayıda elektron içerebilen enerji bandlarına genişletir. Kristal malzemelerin periyodik örgüsü, katı yapı içinde var olan elektronlar için izin verilen enerji bandlarını oluşturur. Değerlik (valance) bandı olarak adlandırılan alt band, kristal içindeki belirli latis bölgelerine bağlı olan dış kabuk elektronlarına karşılık gelir. Kimyasal reaksiyonlardan sorumlu olan ve serbest elektronun bulunmadığı en üst dolu enerji bandıdır. Daha yüksekte bulunan bir sonraki band ise kristal içerisinde elektronların serbestçe hareket ettiği iletkenlik bandıdır. Bu bandtaki elektronlar malzemenin elektriksel iletkenliğine katkıda bulunur. Değerlik ve iletkenlik bandları arasında elektronun bulunamayacağı yasak band vardır. Metallerde hiç bulunmayan bu bandın genişliği, herhangi bir malzemenin yarı iletken veya yalıtkan olarak sınıflandırılmasını belirler (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Yalıtkan, metal ve yarı iletkenlerin elektronik band yapılarının gösterimi (Gilmore, 2008:40)

Bir elektronun malzeme içinden geçmesi, değerlik bandından band boşluğu boyunca iletim bandına atlamak için yeterli enerjiyi kazanmasına bağlıdır. Yalıtkan, bu boşluk 10 eV mertebesinde olup, termal uyarımla aşılamaz büyüklüktedir. Yarı iletkenlerin band yapısı yalıtkanlarınkinden farklı değildir. Değerlik bandları doludur, ancak band genişliği ≈ 1 eV

mertebesindedir. Germanyumun yasak band enerji aralığı 0,7 eV'dir. Kristal içindeki elektronların sayısı, değerlik bandındaki mevcut tüm bölgeleri tamamen doldurmaya yeterlidir. Termal uyarının yokluğunda, hem yalıtkanlar hem de yarı iletkenler, değerlik bandının tamamen dolu ve iletim bandının tamamen boş olduğu bir durumdadır. Bu koşullar altında, ikisi de teorik olarak herhangi bir elektriksel iletkenlik göstermez. Sıfır olmayan bir sıcaklıkta termal enerji kristaldeki elektronlar tarafından paylaşılır ve değerlik bandındaki bir elektron yeterli enerjiyi kazanarak yasak bandı geçip iletkenlik bandına yükselir. Bu uyarılma sonunda iletim bandına yükselen elektron yerine bir deşik (boşluk, hole) oluşur. Uygulanan elektrik alan etkisi ile de elektron ve deşikler hareket ederek sürüklenmeye başlarlar.

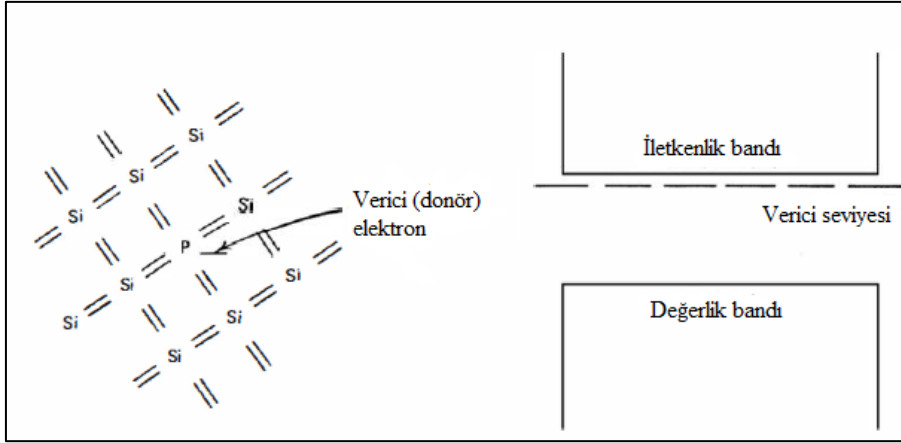
Bir elektronun iletim bandına geçme olasılığı sıcaklıktan güçlü bir şekilde etkilenir.

$$p(T) \propto T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (2.21)$$

Burada; T , mutlak sıcaklık, E_g , yasak band genişliğinin enerjisi, k , Boltzmann sabitidir. Malzemenin soğutulması iletim bandındaki elektronların sayısını azaltacak, böylece özellikle kaçak akım azalarak gama-ışını etkileşimlerinden kaynaklanan ekstra uyarım dedeksiyonu çok daha kolay hale getirecektir. Saf bir yarı iletken termal uyarı ile iletim bandına çıkmış elektron sayısı ile deşiklerin sayısı eşittir. Saf bir yarı iletken bir takım safsızlıklar eklenerek n- ya da p-tipi yarı iletken oluşturulur.

n-tipi yarı iletkenler:

Katkılamamanın yarı iletken özellikler üzerindeki etkisini göstermek için örnek olarak genelde silikon kristali kullanılır. Fakat germanyum ve diğer yarı iletken malzemeler de benzer şekilde davranır. Silikon dört değerlidir ve normal kristal yapıda en yakın dört silikon atomu ile Şekil 2.12'de tirelerle gösterilen kovalent bağlar oluşturur.

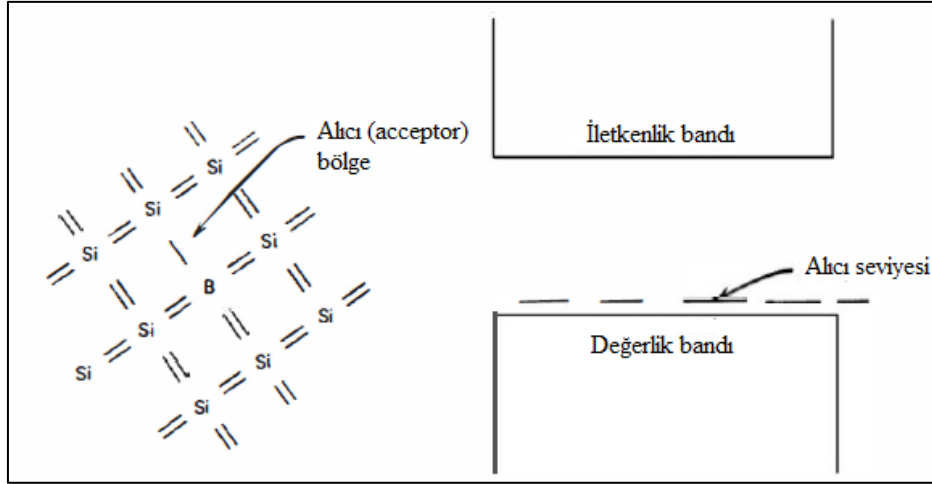


Şekil 2.12. Verici safsızlığın (P-fosfor atomu) bir silikon kristalindeki örgüye yerleşmesi ve silikonun yasak band aralığındaki verici seviyesi (Knoll, 2010:371).

Çok küçük konsantrasyonlarda (milyonda bir veya daha az) eklenen safsızlık kristal örgüsü içindeki bir silikon atomunun yerini alır. N-tipi yarı iletkenlerde safsızlık olarak beş değerlikli fosfor atomu dikkate alınır. Fosfor atomunun beş değerlik elektronu olduğu için dört tanesi silikon ile kovalent bağ yaparken bir tanesi boşta kalır. Bu ekstra elektron orijinal safsızlık bölgesine çok zayıf bir şekilde bağlıdır. Bu nedenle, değişsiz olan elektron iletkenlik bandındaki elektronlara katkıda bulunur. Bu tip safsızlıklar, iletim bandına kolayca elektron katkısı yaptıkları için verici (donör) safsızlıklar olarak adlandırılır. Verici safsızlıklara ait zayıf bağlı ekstra elektronlar Şekil 2.12’de gösterildiği gibi, yasak bandın içerisinde iletkenlik bandına yakın pozisyonda yer alırlar. Verici seviye ve iletim bandının alt kısmı arasındaki enerji aralığı, tüm verici safsızlıkların iyonize olmasını sağlayacak şekilde yeterince küçüktür. Dolayısıyla bu elektronlar kolaylıkla iletkenlik bandına çıkabilirler (Knoll, 2010:371).

p-tipi yarı iletkenler:

n-tipi yarı iletken olduğu gibi katkılamanın p-tipi yarı iletken özellikler üzerindeki etkisini göstermek için de silikon kullanılırsak silikon dört değerlidir ve normal kristal yapıda en yakın dört silikon atomu ile Şekil 2.13’te tirelerle gösterilen kovalent bağlar oluşturur.



Şekil 2.13. Alıcı safsızlığın (B-bor atomu) bir silikon kristalindeki örgüye yerleşmesi ve silikonun yasak band aralığındaki alıcı seviyesi (Knoll, 2010:373).

p-tipi yarı iletkenlerde safsızlık olarak üç değerlikli bor atomu dikkate alınsın. Bor atomuna ait üç değerlik elektronu silikonun üç elektronu ile kovalent bağ yaparken bir silikon bağı boşta kalır. Bu boşluk, normal bir değerlik elektronu iletim bandına uyarıldığında geride kalan deşik gibi davranır, ancak enerji özellikleri biraz farklıdır. Bu boşluğu doldurmak için bir elektron yakalanırsa, katılan iki atomdan biri üç değerlikli bir safsızlık olduğundan kristalin miktarıyla aynı sayıda olmayan bir kovalent bağ oluşur. Bu boşluğu dolduran bir elektron, tipik bir değerlik elektronundan daha zayıf bir şekilde bağlıdır. Bu nedenle, alıcı (acceptor) safsızlıklar, normalde yasaklanmış enerji aralığı içinde elektron bölgeleri oluşturur. Alıcı seviyeler, yasak bandın en altında değerlik bandına çok yakındır. Alıcı seviyeler ile değerlik bandının tepesi arasındaki enerji farkı küçük olduğundan, tüm alıcı bölgelerin büyük bir kısmı termal olarak uyarılmış elektronlar tarafından doldurulur. Bu elektronlar, kristal boyunca diğer normal kovalent bağlardan gelir ve çıkan her elektron için değerlik bandında deşik oluşturulur. Yani, eklenen her alıcı safsızlık için değerlik bandında fazladan bir deşik oluşturulur. P-tipi yarı iletkenlerde deşik sayısı fazla olduğundan deşikler çoğunluk taşıyıcıdır (Knoll, 2010:373).

2.5. Dedektör Verimi

HPGe dedektörler herhangi bir numunedeki (çevresel örnek, gıda maddesi, yapı malzemesi, vb.) radyoaktif çekirdeklerin aktivitesinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Numunedeki ilgilenilen radyoaktif çekirdeğin aktivite değerinin elde edilebilmesi için

dedektör veriminin belirlenmesi gerekmektedir. Verim ifadesini, nasıl kullanmak istediğimize bağlı olarak çeşitli şekillerde tanımlayabiliriz.

Germanyum dedektörler ilk ortaya çıktığında, sıklıkla kullanılan sodyum iyodür dedektörlerle performansları karşılaştırılmıştır. Bu nedenle, germanyum dedektör verimi çoğu gama spektrometri laboratuvarında mevcut olan ve kolay elde edilebilen standart bir 3"×3" NaI(Tl) dedektörün verimiyle ilişkilendirilerek ifade edilmektedir. Bu şekilde ifade edilebilen ve dedektörün genel bir performans ölçüsünü veren verim ifadesine “bağlı verim” denir.

Bağlı verim (relative efficiency), 3"×3" boyutlarında NaI(Tl) ve HPGe dedektörlerinin uç kabından 25 cm mesafeye yerleştirilen bir ⁶⁰Co kaynağının 1332,5 keV gama ışın pikinin net sayım hızlarının, ⁶⁰Co kaynağının aktivitesine oranıdır.

$$\text{Bağlı verim} = \frac{1332,5 \text{ keV pikinin net sayım hızı} \times 100}{^{60}\text{Co kaynağının aktivitesi (Bq)} \times 0,0012} (\%) \quad (2.22)$$

Bu oran standart NaI(Tl) dedektörün verimine göre, Ge veya başka bir dedektörün aynı mesafe ve enerjideki ölçülen veriminin yüzdesi olarak ifade edilir. Spektrumlar 1332,5 keV pikinde en az 20000 sayım toplanana kadar devam etmelidir. 3"×3" NaI(Tl) dedektörleri tekrarlanabilir şekilde üretilebildiği için 25 cm’de ⁶⁰Co kaynağı ile herhangi bir dedektörde 1332,5 keV’deki sayım hızının Bq başına 0,0012 cps (saniye başına sayım) olduğu bilinmektedir.

Bağlı verim ifadesi yalnızca geniş enerji aralığına sahip eş-eksenli dedektörlerle ilgilidir. Düzlemsel ve diğer düşük enerjili dedektörler, 1332,5 keV’e kadar olan enerji aralığını kapsayacak şekilde tasarlanmadığı için böyle bir ifade kullanılamaz (Gilmore, 2008:236).

Bir diğer verim ifadesi ise “toplam verim”dir. *Toplam verim (total efficiency)*, spektrumda dedekte edilen toplam sayımın kaynaktan yayınlanan gama ışını sayısına oranıdır. Toplam verimin bilinmesi özellikle gerçek zamanlı çakışma düzeltmesinin hesabında önemli bir parametredir. Gama spektrometrisinde nicel analizler için gerekli ve dedektör performansını gösteren en önemli parametre ise *deneyse verimidir (full energy peak efficiency-FEPE)*. FEPE, belirli bir enerjideki fotopikin altındaki sayım sayısının kaynaktan yayılan sayıya oranıdır.

2.5.1 Toplam enerji pik verimi

Gama spektrometresinde γ -ışın enerjisinin dedektörde tamamen soğurulması sonucu spektrumda oluşan piklere *fotopik* ya da *toplam enerji piki* adı verilir. Belirli enerjilerde oluşan toplam enerji piklerinin analizinin yapılması için ise bu piklerin veriminin belirlenmesi gerekmektedir. Gama spektrometresinde genellikle nihai olarak herhangi bir numunedeki radyoaktivite miktarı hesaplanmaktadır. Bu hesaplamada analizci tarafından belirlenecek en önemli nicelik dedektörün toplam enerji pik verim (FEPE) değeridir. HPGe dedektör γ -sayım sisteminin verimi, dedektörün kristal büyüklüğüne, dedektör-kaynak geometrisine, dedektör etrafındaki malzemelere ve kaynak veya malzeme matrisindeki soğurulmalara bağlıdır (Khan et al., 2018). Dolayısıyla FEPE, dedektör (boyutları ve bileşimi) ve ölçüm koşulları (kaynağın bileşimi ve geometrisi) ile karakterize edilen karmaşık bir fonksiyondur. Yayılan gama ışınlarının enerjisine ve numune geometrisine bağlı olarak FEPE, deneysel veya Monte Carlo yöntemi olmak üzere iki şekilde belirlenebilir. Deneysel yöntemde FEPE değeri, radyoaktif çekirdek standartları kullanılarak Eş. 2.23 ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon(E) = \frac{\left[\frac{N_p}{t_c} - \frac{N_b}{t_b} \right]}{A \cdot f_\gamma(E)} \cdot D \quad (2.23)$$

Eşitlikteki N_p , ilgilenilen fotopikin Compton sürekliliği çıkarılmış net sayımı; t_c , sayım süresi (s); N_b , doğal fon spektrumundan elde edilen fotopikin Compton sürekliliği çıkarılmış net sayımı; t_b , doğal fon 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 farklı etkileri içeren düzeltme faktörlerinin bileşimini veren katsayıdır. Bu faktörler Bölüm 2.7’de ayrıntılı açıklanmıştır.

Deneysel yöntem, her numuneye özgü kompozisyonda standart kaynak ve her ölçüm koşuluna uygun geometrinin sağlanmasını gerektirmektedir. Belirli bir dedektör-kaynak geometrisi için yapılan verim kalibrasyonu, diğer kaynak-dedektör geometrilerinde geçerli olmayacaktır, bu yüzden farklı kaynak-dedektör geometrileri için verim kalibrasyon eğrileri oluşturulmalıdır. Ayrıca, zamanla değişen etkilerden dolayı verim kalibrasyon eğrilerinin belirli aralıklarla kontrol edilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla kapsamlı bir deneysel kalibrasyon için her numunenin geometrisine ve matrisine (numune tipi, kompozisyonu ve

yoğunluğu) tam olarak uyan ve ilgilenilen tüm radyoaktif çekirdekleri içeren standart kalibrasyon kaynaklarının kullanılması gerekli olacaktır. Deneysel yöntemde, ölçüm geometrisi, numune tipi ve hacmi gibi ölçüm koşullarını hassasiyetle gerçekleştirmenin zorluklarının yanı sıra maliyetli ve zaman alıcı olması sebebiyle, artık yerini bu problemlerin olmadığı, kullanıcıya büyük esneklik sağlayan, bilgisayara dayalı bir yöntem olan *Monte Carlo simülasyon yöntemine* bırakmaktadır (Khan ve diğerleri, 2018; Boson ve diğerleri, 2008; Sima ve Arnold, 2009; Stancu ve diğerleri, 2015; Joel ve diğerleri, 2018). Detayları Bölüm 2.8’de verilen Monte Carlo simülasyon programlarının kullanıldığı yöntemde doğru şekilde modelleme yapıldığı takdirde çok kısa sürede, zahmetsiz ve kolay bir şekilde istenilen geometride verim değerleri elde edilebilir.

2.6. Belirsizlik Hesabı

Fiziksel bir niceliğin ölçüm sonucu rapor edilirken sonuçların güvenilirliğinin değerlendirilebilmesi için sonucun kalitesine ilişkin bazı nicel göstergelerin verilmesi gerekmektedir. Böyle bir gösterge olmadan, ölçüm sonuçları kendi aralarında veya bir standartta verilen referans değerlerle karşılaştırılamaz. Bu nedenle, bir ölçümün sonucunun kalitesini karakterize etmek için belirsizliğinin dikkatlice belirlenmesi ve verilmesi gereklidir. Gama spektrometresinde verim ve aktivite hesapları yapılmaktadır. Bu iki hesaplamada da birçok nicelik kullanılmaktadır. Dolayısıyla belirsizlik hesabında her bir niceliğin belirsizleri hesaplanmalı ve toplam ölçüm belirsizliği verilmelidir (ISO 1995, EURACEM/CTAC Guide CG 4 2000).

Gama spektrometresinde verimi ve aktivite hesabını etkileyen belirsizlik kaynakları;

- Sertifikalı referans malzemeler ve standart kaynaklar için pik alanları,
- Sertifika aktiviteleri,
- Numune ağırlığı
- Numune yüksekliği,
- Numune pozisyonu,
- Gama yayınlama olasılığı,
- Gama ışını öz-soğurma düzeltme faktörü, gerçek çakışma düzeltme faktörü ve rastgele çakışma düzeltme faktörleridir.

Bu belirsizliklerin hepsini içeren toplam belirsizlik “birleştirilmiş standart belirsizlik” (combined standard uncertainty) yöntemine göre hesaplanmaktadır. Bu yöntemde bütün belirsizlik bileşenlerinin standart belirsizlikleri (u_i 'ler) hesaplandıktan sonra karelerinin toplamının karekökü alınmaktadır. Standart sapmalar cinsinden belirlenen standart belirsizlik bileşenleri kareler toplamının karekökü yöntemi ile birleştirilir.

2.6.1. Toplam enerji pik verimi ve aktivitenin belirsizliğinin belirlenmesi:

Toplam enerji pik veriminin (FEPE) belirsizliği, FEPE hesabında kullanılan tüm parametrelerin karelerinin toplamının karekökü alınarak Eş. 2.24 ile hesaplanmaktadır.

$$u(\varepsilon) = \varepsilon \cdot \sqrt{\left(\frac{u(N_p)}{N_p}\right)^2 + \left(\frac{u(f_\gamma)}{f_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{u(A)}{A}\right)^2 + \left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(D)}{D}\right)^2} \quad (2.24)$$

Eş. 2.24'te ki ε , ilgilenilen enerjideki fotopik verimi; N_p , fotopikin net sayımı, $u(N_p)$; net fotopik sayımının belirsizliği; f_γ , ilgilenilen enerjinin gama ışını yayınlama olasılığı; $u(f_\gamma)$, gama ışını yayınlama olasılığının belirsizliği; A , standart kaynağın aktivitesi, $u(A)$, standart kaynağın aktivitesinin belirsizliği; m , standardın miktarı; $u(m)$, standardın miktarındaki belirsizlik; D , düzeltme faktörlerinin bileşimi; $u(D)$ ise tüm düzeltme faktörlerini kapsayan belirsizliktir.

Benzer şekilde aktivitenin belirsizliği de Eş. 2.25 ile hesaplanmaktadır.

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

Eş. 2.24'ten farklı olarak Eş. 2.25'deki A , örneğin aktivitesi; ε , fotopik verimi; $u(\varepsilon)$, fotopik veriminin belirsizliğidir.

2.7. Düzeltme Faktörleri

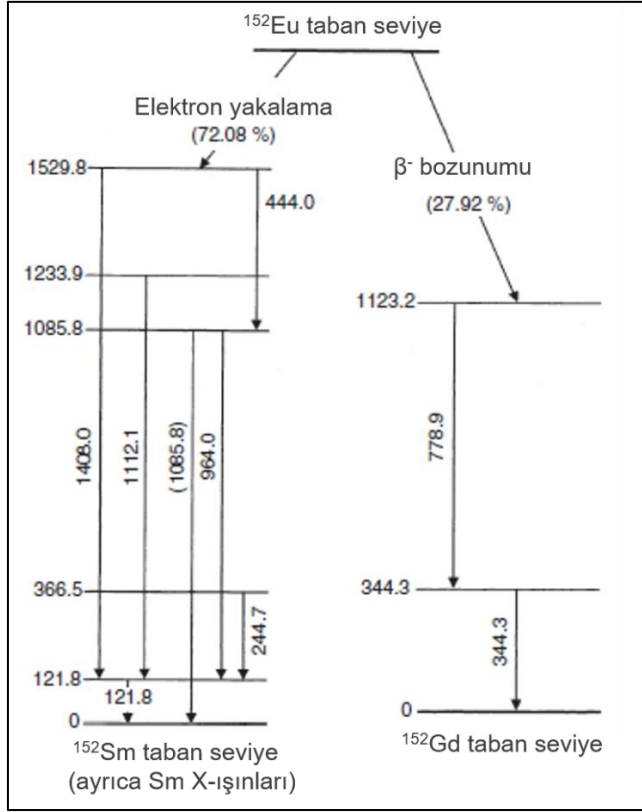
Gama-ışını spektrometrisi, çeşitli numunelerdeki radyoaktif çekirdekleri ölçmek için olgun bir teknik olarak bilinmesine rağmen, sonuçta elde edilen ölçüm doğruluğunu etkileyen

düzeltilme faktörlerinin dikkatli bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Daha güvenilir ölçüm sonuçları elde etmek için ilgilenilen radyoaktif çekirdekler için bu faktörlerin hesaba katılması gerekmektedir (Yücel ve diğerleri, 2011). Bu düzeltilme faktörleri; gerçek zamanlı çakışma düzeltilmesi, gama-ışını öz soğurma düzeltilmesi, radyoaktif bozunma düzeltilmesi, rastgele yığılma düzeltilmesi ve spektral girişim düzeltilme faktörleridir.

Doğru ve kesin verim veya aktivite sonucu için özellikle düşük enerji bölgesindeki piklerle çalışılması durumunda kesinlikle öz-soğurma düzeltilmesinin hesaba katılması; yakın mesafe sayım geometrilerinde ve karmaşık bozunma şemasına sahip radyoaktif çekirdeklerde gerçek zamanlı çakışma düzeltilmesinin dikkate alınması gerekmektedir. Dolayısıyla bu düzeltilme faktörlerinden tez çalışmasında da hesaba katılan en kritik olanlar, gerçek zamanlı çakışma düzeltilmesi ve gama-ışını öz soğurma düzeltilmesidir.

2.7.1. Gerçek zamanlı çakışma düzeltilme faktörü

Gerçek zamanlı çakışma (true coincidence summing-TCS), aynı çekirdekten yayımlanan iki veya daha fazla fotonun spektrometrenin çözme zamanı içinde etkileşmelerinin sonucu üretilen sinyalleri çözümleyememesinin bir sonucu oluşmaktadır. Gama spektrometre sisteminin çözümleme süresinin, fotonların ardışık bozunmaları arasındaki zaman aralıklarından çok daha uzun olması nedeniyle, biriktirilen toplam enerjiye karşılık gelen tek bir sinyal oluşmaktadır (Sima, 2012). TCS etkisi; çok geçişli (cascading) bozunma şemasına sahip radyoaktif çekirdeklerde, kaynak-dedektör mesafesinin kısa olduğu sayım geometrilerinde ve büyük hacimli dedektörlerde baskındır. Toplam tepe noktasının altındaki sayıları arttırırken 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. Ayrıca birden fazla gama-ışını yayımlayan karmaşık bozunma şemasına sahip radyoaktif çekirdeklerde kesinlikle hesaba katılması gereken bir faktördür. Şekil 2.14'te çok geçişli bozunmaya sahip ^{152}Eu 'nun bozunma şeması gösterilmektedir. Bu çekirdek bozunduğu zaman iki seçenek vardır; bir β^- parçacığı yayarak ^{152}Gd 'ye veya daha büyük olasılıkla (%72,08) elektron yakalamaya uğrayarak ^{152}Sm 'ye dönüşebilir. Ayrıca, her ^{152}Sm elektron yakalama bozunmasıyla birlikte Sm x-ışınları da yayımlanmaktadır.



Şekil 2.14. ^{152}Eu 'nun bozunma şeması (Gilmore, 2008:166)

Dolayısıyla ^{152}Eu 'nun bozunması sonucunda γ ve x-ışınları eş zamanlı olarak yayımlanır ve dedektör tarafından aynı anda dedekte edilir. Dedektör, iki γ -ışını veya bir γ , bir x-ışınının toplamı olarak oluşan bu piki ayırt edemeden toplam pik olarak kaydetmektedir (Gilmore, 2008:166). TCS etkisi, içerisinde uranyum ve toryum bulunan numunelerde aktivite hesabı yapılacağı zaman daha da önemli hale gelmektedir. Çünkü numunede bulunan uranyum ve toryumun bozunma ürünleri nedeniyle onlarca gama-ışını aynı anda yayımlanarak dedekte edilecektir. TCS düzeltme faktörlerinin hesaplanmasında, radyoaktif çekirdeklerin ayrıntılı bozunma şemasının dikkate alındığı MC simülasyon programları en kullanışlı yöntemdir. Ayrıca deneysel olarak veya analitik çözümlerle de hesaplanmaktadır.

2.7.2. Gama-ışını öz soğurma düzeltme faktörü

Gama-ışını öz soğurma (self absorption) düzeltmesi, numunenin içinden geçen γ -ışınlarının numune matrisi ve yoğunluğu nedeniyle soğurulması sonucunda, fotopik sayımında oluşan kayıpları düzeltmek için yapılması gereken önemli düzeltme faktörlerinden birisidir. Ölçülecek numune belirli bir hacim ve kütleye sahip hacimsel geometride olduğunda gama-ışınları, numune malzemesinin içinde dedektöre ulaşmadan öz-soğurma ile soğurulabilir.

(Knoll, 2010:454). Fotopik sayımında kayıplar oluşmasına neden olan bu soğurulma, özellikle düşük enerji bölgesinde (<200 keV γ -ışını enerjilerinde) ve yüksek atom numaralı elementleri içeren yüksek yoğunluklu matrislerde baskındır.

Gama ışını spektrometrisinde numunelerin aktivitesi, bir kalibrasyon kaynağı (standart) ile belirlenen verim eğrisinden $\varepsilon(E)$ türetilir. Hacimsel geometrideki numune ve standart, aynı kimyasal bileşime ve yoğunluğa, dolayısıyla aynı öz-soğurulmaya sahip olduklarında, sayım alınan geometri de aynı ise bu düzeltmenin yapılmasına gerek yoktur. Fakat pratikte hemen hemen hiçbir numune ve standart malzeme aynı geometri ve kompozisyonda olamayacağından bu farklılıkları öz-soğurma düzeltmesi ile hesaba katılması gerekmektedir (Jodłowski, 2006).

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

Burada μ (cm^{-1}), lineer azalma katsayısı; x , numune kalınlığıdır.

Öz-soğurma düzeltmesinin belirlenmesinde Monte Carlo programları, analitik hesaplamalar ve deneysel yöntem kullanılmaktadır.

2.7.3. Radyoaktif bozunma düzeltme faktörü

Radyoaktif bozunma rastgele gerçekleşen bir süreçtir. Radyoaktif çekirdeklerin aktivitesi zamanla üstel olarak azalacağı için tüm hesaplamalarda Eş. 2.27 ile verilen radyoaktif bozunma düzeltmesinin hesaba katılması gerekmektedir.

$$R_t = R_0 \exp(0,693t/t_{1/2}) \quad (2.27)$$

burada R_t ve R_0 , t ve referans anındaki bozunma hızları, $t_{1/2}$ radyoaktif çekirdeğin yarı ömrüdür. Bu düzeltme uzun yarı ömürlü radyoaktif çekirdeklerde ihmal edilebilirken, kısa yarı ömürlü radyoaktif çekirdeklerde kesinlikle göz ardı edilmemesi gereken bir düzeltmedir (Gilmore, 2008:160).

2.8. Monte Carlo Simülasyon Yöntemi

İstatistiksel örnekleme yapmak için bilgisayar kullanma fikri, elektronik hesaplamanın başlangıcına kadar uzanır. Bu istatistiksel tekniğe, nötron zincir reaksiyonlarının davranışını incelemek amacıyla öncülük edenler ise Stanislaw Ulam ve John Von Neumann'dır. Nicholas Metropolis, Ulam'ın şans oyunlarına olan düşkünlüğüne atıfta bulunarak bu metodoloji için Monte Carlo adını önermiştir (Kroese ve Rubinstein, 2012). Rastgele değişkenler için rastgele sayılarının üretildiği bir algoritma ile çalışan bu yöntemde, fiziksel deneylerin bilgisayarda simülasyonu yapılmaktadır. Monte Carlo yöntemi, hem deneysel olarak elde edilen sonuçların validasyonunda hem de deneysel olarak yapılması mümkün olmayan araştırmaların yapılmasında kullanıcılara büyük kolaylık sağlayan bir yöntemdir. Rastgele sayıların kullanıldığı istatistiksel bir işlem olduğu için tekrar sayısının mümkün olduğunca yüksek tutulması daha anlamlı sonuçlar elde etmemizi sağlar. MC yöntemi, radyoterapi, zırlama, medikal fizik, astrofizik uygulamaları, hızlandırıcı tasarımı gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Nükleer enstrümantasyonda gelişen teknolojiye paralel olarak, doğruluğu ve güvenilirliği kanıtlanmış MC simülasyon yönteminin gama spektrometresinde kullanımı da günden güne artmaktadır. MC tabanlı simülasyon teknikleri, geniş enerji aralığındaki gama-ışınları ve farklı geometriler için HPGe dedektör yanıtının değerlendirilmesinde başarıyla kullanılmaktadır. MC programlarının birbirine göre üstünlükleri/eksiklikleri olduğundan, seçilen durumlar için aynı anda birkaç MC yazılımı kullanarak karşılaştırmalı değerlendirme yapmak, kullanıcıyı en doğru sonuca götürür (Lépy ve diğerleri, 2019). MC simülasyon programlarının HPGe dedektörlere uygulanması ile ilgili yapılan literatür taramasında EGS4 (Nelson ve diğerleri, 1985), MCNP (Briesmeister, 1997), MCNPX (Pelowitz, 2011), MCNP-CP (Berlizov, 2007), GEANT4 (Hurtado ve diğerleri, 2004), PENELOPE (Salvat ve diğerleri, 2003), FLUKA (Ferrari ve diğerleri, 2005) vb. olmak üzere birçok MC programının kullanıldığı görülmektedir. Wainio ve Knoll (1966)'da ilk defa MC simülasyon yöntemiyle dedektörün verim değerinin elde edilebildiğini göstermiştir. Rodenas ve diğerleri (2000) ise MCNP kodu ile Ge-Li dedektör kullanarak nokta kaynaklarla dedektörün verimini belirlemiş, matematiksel modellemeyle kabul edilebilir ve güvenilir sonuçlar elde edilebildiğini göstermişlerdir. Vidmar ve diğerleri (2008) gama spektrometresinde en çok kullanılan MC kodları üzerine yaptıkları çalışmada farklı kodlardan elde edilen verim sonuçlarının birbirinden farklı olduğunu bulmuştur. 45 -2000 keV enerji aralığında yapılan ölçümler sonucunda 45 keV'de %10'lara varan farkın, yüksek enerjilerde ise %1'den daha az olduğu

görülmüştür. MC programlarının karşılaştırıldığı Arif ve Malik (2015) tarafından yapılan çalışmada ise EGS5 programından elde edilen verim değerinde, MCNP 5 ve deneysel sonuçlara göre yaklaşık %5'lik bir farklılık gözlenmiştir. Benzer bir çalışmada Ordenez ve diğerleri (2019) MCNP6 ve GEANT4 programlarını kullanarak 59,5-1836 keV enerji aralığında nokta kaynaklarla verim değerlerini elde etmiş, deneysel ve MC programlarından elde edilen sonuçları birbiriyle karşılaştırmıştır. Sonuçların düşük enerji bölgesinde bulunan ^{109}Cd (88 keV) ve ^{57}Co (122,1 keV) dışında $\pm\%5$ kabul aralığında olduğu görülmüştür. Guerra ve diğerleri (2015, 2017, 2018a, 2018b) tüm çalışmalarında PENELOPE MC programı ile farklı geometrilerde numuneler kullanarak deneysel ve MC hesabından elde ettikleri verim değerleri yardımıyla dedektör karakterizasyonu yapmışlardır.

HPGe dedektörlerin kristal çapı, kristal uzunluğu, kristal boşluk çapı, kristal boşluk uzunluğu, dedektör pencere malzemesi, dedektör uç kabının kalınlığı, ölü tabaka kalınlığı ve kristal-uç kabı arasında mesafe gibi dedektöre ait geometrik özellikler üretici firma tarafından kullanıcıya çoğunlukla verilmektedir. MC simülasyon programına bu dedektör parametreleri girilerek dedektör modellendiğinden firma tarafından verilen bu değerler çok önemlidir. Firmaların bu değerleri eksik vermesi veya tam olarak doğru vermemesi durumunda dedektör yanlış modellenenilmekte dolayısıyla yanlış karakterize edilmektedir (Cabal ve diğerleri, 2010, Saraiva ve diğerleri, 2016). Lepy ve diğerleri (2001) ise 17 katılımcı laboratuvarın farklı MC kodları, farklı yarı-deneysel yöntemler ve MC-yarı deneysel hibrit yöntemlerle elde ettiği verim hesaplarını, deneysel sonuçlarla karşılaştırmış ve deneysel değerlerden %10'lara varan farklılık olduğunu belirtmiştir. Ayrıca bu farklılıkların özellikle dedektör üretici firmaların dedektör parametrelerinden bazılarını vermemesinden kaynaklandığını, geometrik parametrelerin daha doğru verilmesiyle farklılıkların düşeceğini belirtmişlerdir. Cabal ve diğerleri (2010) MCNPX ve GEANT4 programlarında nokta kaynaklar kullanarak 10 cm, 20 cm ve 30 cm mesafede HPGe dedektörü modelleyerek elde edilen verim değerleriyle deneysel değerleri kıyaslamış, en fazla %10 farklılık tespit etmişlerdir. Ancak bu çalışmada elde edilen en önemli sonuç, üretici firma tarafından verilen dedektör parametrelerinden elde edilen verim değerleri ile deneysel değerler arasında %45'lere varan fark çıkmasından sonra dedektör kristalinin radyografik görüntüsü alınarak dedektör boyutlarının tekrar belirlenmesi olmuştur. Dokania ve diğerleri (2014) üretici firma tarafından verilen dedektörün fiziksel boyutlarını, radyografi yöntemi ile Ge kristalini ışınlayarak test etmek istemişler ve aktif dedektör hacminin üretici firma tarafından verilen değerden %20 daha küçük olduğunu bulmuşlardır.

Garcia-Talavera ve diğerleri (2000) farklı kaynak geometrilerini GEANT programında simüle etmişler, 46-1800 keV enerji aralığında deneysel ve MC programıyla belirlenen verim değerlerinin kabul edilebilir aralıkta olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca, hacimsel kaynağın aktivitesinin doğru bir şekilde belirlenmesi için sadece yoğunluğun değil, aynı zamanda matrisin kimyasal bileşiminin de bilinmesinin gerekliliğini vurgulamışlardır. Saraiva ve diğerleri (2016) hacimsel çoklu gama kaynağı ile MCNPX ve MCNP-CP kullanarak deneysel ve simülasyondan elde edilen verim değerlerini karşılaştırmış, düşük enerji bölgesinde bulunan 46,5 keV (^{210}Pb) dışında en fazla %6 farkla elde etmişlerdir. Yapılan yeni çalışmalarda ise Mrdja ve diğerleri (2018) hacimsel kaynak kullanarak Geant4 MC simülasyonu ile verim tayini yapmışlar ve deneysel değerlerle karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada hacimsel kaynak olarak yoğunluğu ve kimyasal kompozisyonu bilinen toprak (soil matrix) numunesi kullanmışlar ve farklı derinliklerden (0-5 cm, 10-15 cm, 0-15 cm, 15-30 cm ve 30-50 cm) alınan toprak örneklerinin ^{40}K , ^{226}Ra ve ^{232}Th aktivitelerini belirlemişlerdir. Joel ve diğerleri (2018) nokta ve hacimsel kaynaklar kullanarak deneysel yöntem ile GEANT4 simülasyonundan elde edilen verim değerlerini karşılaştırmış ve %2'den daha az bir fark bulmuşlardır.

MCNP-CP'nin kullanıldığı bir diğer çalışmada ise gama spektrometresinde özellikle büyük hacimli dedektörlerde, karmaşık bozunma şemasına sahip çok geçişli radyoaktif çekirdeklerde ve kaynağın dedektöre yakın olduğu durumlarda baskın olan gerçek zamanlı çakışma (true coincidence summing-TCS) etkisi incelenmiştir (Zhu ve diğerleri, 2008). Bu çalışmada araştırmacılar bağıl verimleri %11 ila %150 arasında değişen 8 farklı HPGe dedektör, 4 farklı hacimsel kaynak (içerisinde ^{241}Am (59,5 keV) veya ^{137}Cs (661,66 keV) gibi TCS etkisi olmayan tek-enerjili radyoaktif çekirdekler ve ^{60}Co (1173,2 keV ve 1332,5 keV), ^{88}Y (898 keV ve 1836 keV) gibi TCS etkisinin olduğu radyoaktif çekirdekler bulunduran) ve 5 farklı kaynak-dedektör geometrisinde MCNP-CP ile fotopik verimini hesaplamışlardır. Çalışmada TCS etkisine sahip radyoaktif çekirdeklerin düzeltmeleri TCS algoritması ile yapılmış, düzeltme yapılmadan önce %20'lere varan hataların, düzeltmeden sonra %10'dan daha az değerlere düştüğü saptanmıştır. TCS etkisi, dedektörün numuneyi tamamen sardığı 4π sayım geometrisinin sağlandığı kuyu tipi dedektörlerde baskın bir şekilde görünmektedir (Yücel ve diğerleri, 2010). Guerra ve diğerleri (2018a) PENELOPE MC simülasyon programı ile kuyu tipi bir dedektörü ve içerisinde U, Th ve K bulunan referans numuneleri modellemişlerdir. Bu numunelerdeki TCS etkisine sahip olan pikleri belirleyip, TCS düzeltmesi yaptıktan sonra verim değerlerinde bu pikleri de kullanarak,

deneysel verim değerlerini elde etmişlerdir. Çalışmanın sonunda deneysel değerlerle simülasyondan hesaplanan değerleri kıyaslayıp uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

2.8.1. PHITS Monte Carlo programı

PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) Japonya Atom Enerjisi Kurumu öncülüğünde Japonya ve Avrupa'daki birçok kurumun iş birliği ile geliştirilmiş MC simülasyon programıdır ve son yıllarda nükleer uygulamalarda popülerliği artmıştır. PHITS, fotonlar, nötronlar, protonlar, ağır iyonlar ve elektronlar dahil olmak üzere neredeyse tüm parçacıkların, çeşitli nükleer reaksiyon modelleri ve nükleer veri kütüphaneleri kullanılarak geniş enerji aralıklarında parçacık taşınması ile ilgili bir MC kodudur. Radyasyondan korunma, radyoterapi, zırhlama, yüksek enerji fiziği, medikal fizik, tesis tasarımı vb. gibi birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır (Sato ve diğerleri, 2018).

	Nötron	Proton, Pion (diğer hadronlar)	Çekirdekler	Müon	e ⁻ / e ⁺	Foton	
	1 TeV	1 TeV/u			EGS5	1 TeV	
Yüksek ↑ Enerji	Intra-nuclear cascade (JAM) + Evaporation (GEM) 3.0 GeV	JAMQMD + GEM		Virtual Photo- Nuclear JAM/ JQMD + GEM 200 MeV		EPDL97 or EGS5	1 TeV 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				
↓ Düşük	Nuclear Data Library (JENDL-4.0) + EGM 0.01 meV	Stopping power (ATIMA) 1 keV or track structure (KURBUC)		ATIMA + Original			
				Muonic atom + Capture	**Track structure 1 meV		

Şekil 2.15. PHITS'de nükleer ve atomik çarpışmaları simüle etmek için kullanılması önerilen fizik modelleri (Iwamoto, 2018)

PHITS MC programında yer alan EGS5 (Electron Gamma Shower) kütüphanesi ile 1 keV ile 1 TeV arasında değişen geniş bir enerji aralığındaki (hedef malzemelerin atom numaralarına bağlı olarak) elektronların ve fotonların atomik etkileşimleri istenilen geometride simüle edilmektedir. EGS kod sistemi, FORTRAN-IV dilinde yazılmış EGS1 ile başlamış EGS2, EGS3, EGS4 olarak sürekli geliştirilen ve geliştirilmiş son versiyon olan

EGS5'ten oluşmaktadır. EGS5'te bulunan veri kütüphanesi ise PHOTX (Photon Interaction Cross Section Library)'dir. PHOTX veri kütüphanesi, atom numaraları 1 ile 100 arasında ve foton enerjileri 1 keV ile 100 MeV arasında olan elementler için sonuç vermektedir. Koherent ve koherent olmayan saçılma, fotoelektrik soğurma ve çift oluşumu için tesir kesitleri sağlamaktadır (Hirayama ve diğerleri, 2005:17). Hem teorik hem de ampirik yaklaşımlara dayanan tesir kesit hesaplamaları MC simülasyon programlarında, olası etkileşimleri modellemek için literatürden alınan geniş bir deneysel veri tabanı kullanılarak istatistiksel analizlerle nicel olarak değerlendirilir. 2020 yılında kullanılmaya başlanan PHITS versiyon 3.24'te EGS5 (Electron Gamma Shower) kütüphanesi kullanılmaktadır. Daha önceki versiyonlarda kullanılan EPDL97 kütüphanesinde, elektronların ve pozitronların üretimleri dikkate alınmamaktadır. Toplam enerji pik verim değerleri PHITS'te "T-deposit tally" adı verilen çetele kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çetele, dedektörün puls yükseklik modunda çalıştığı belirli bir bölgedeki biriken enerji dağılımını elde etmek için kullanılır. PHITS, $e_{min} < \text{energy} < d_{max}$ enerji bölgesindeki kütüphaneleri kullanır. Buna göre PHITS'de foton, elektron ve pozitronun kesme enerjilerinin (cut-off) (e_{min}) ve maksimum enerjilerinin (d_{max}) belirlenmesi gerekmektedir. d_{max} ilgilenilen maksimum enerji aralığı girilerek kolaylıkla belirlenirken, düşük enerji bölgesine ilişkin kesme enerji değerinin belirlenmesi kritik öneme sahiptir.

2.8.2. GESPECOR Monte Carlo programı

GESPECOR (G_Ermanium S_PEctra C_ORrection), gama spektrometri uygulamaları için özel olarak geliştirilmiş ticari olarak satılan MC tabanlı bir yazılımdır. Toplam enerji pik verimi (Sima ve Arnold, 2002), öz-soğurma etkileri (Sima ve Dovlete, 1997), gerçek zamanlı çakışma etkileri (Sima ve Arnold, 2000) gibi aktivite ve verim hesaplamalarında kullanılan önemli parametrelerin elde edilmesinde kullanılmaktadır. *GESPECOR*, koaksiyel ve kuyu tipi HPGe (Sima ve Arnold, 1996) dedektörlere ve programda tanımlanmasına izin verilen nokta, silindirik, küresel ve marinelli geometrideki kaynaklara kolay ve güvenilir bir şekilde uygulanabilir (Sima ve diğerleri, 2001).

2.8.3. DETEFF Monte Carlo programı

Gama spektrometrik çalışmalar için özel olarak geliştirilmiş başka bir MC programı ise *DETEFF* (DETECTOR EFFiciency)'tir. *DETEFF* ile silindirik, dikdörtgen ve marinelli

geometrisindeki numunelerin toplam enerji pik verimleri NaI, CsI, Ge ve Si dedektörleri ile kısa sürede hesaplanabilmektedir (Díaz ve Vargas, 2008, 2010). Kullanıcı dostu bir programdır ve diğer MC programlarına göre çok daha kısa sürede hesaplama yaptığından hızlı bir şekilde verim kalibrasyonu elde etmek için kullanılabilir (Carrazana González ve diğerleri, 2012).

2.9. Dedektör Karakterizasyonu

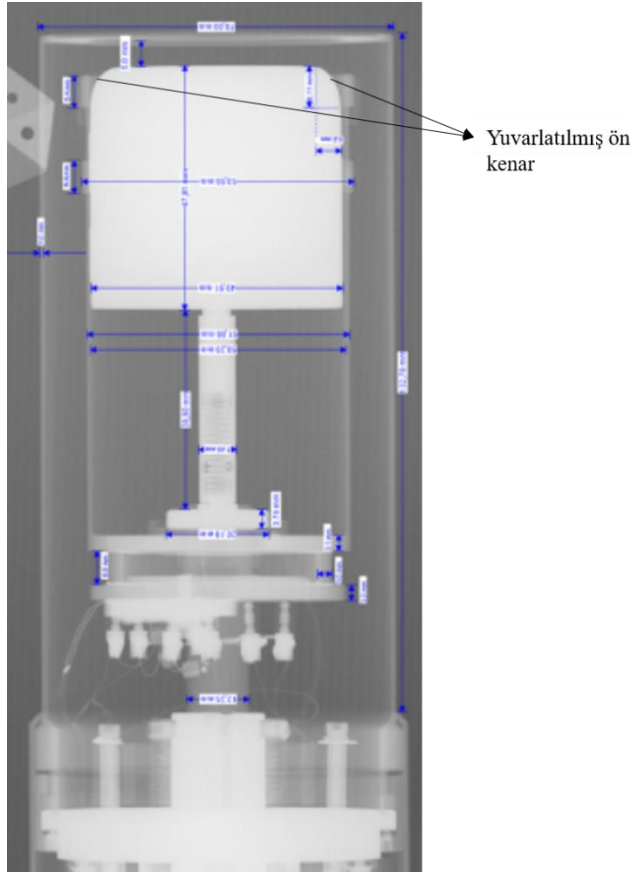
HPGe dedektörler toprak, sediment, gıda, sıvı gibi çeşitli numunelerdeki radyoaktivitenin belirlenmesinde, nükleer güvenlik gibi birçok alanda özellikle yüksek enerji ayırma gücünden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Her ne amaçla kullanılırsa kullanılsın HPGe dedektörün doğru karakterize edilmesi yani tanınması çok önemlidir. Her dedektörün özellikle kristal tipi, bağlı verimi, kristal boyutu, iç boşluk boyutu, pencere malzemesi, ölü tabaka kalınlığı, kristal ile uç kabı arasındaki mesafe, çalışma voltajı, vb. tüm parametreleri birbirinden farklı olduğundan karakterizasyonu da kendine özgüdür. Bu parametreleri belirlemek için deneysel FEPE ölçümlerinin ve Monte Carlo simülasyonlarının kullanımını birleştiren “dedektör karakterizasyonu” adı verilen özel bir prosedür gerçekleştirilir (Dokania ve diğerleri, 2014; Guerra ve diğerleri, 2015; Guerra ve diğerleri, 2017; Hoover, 2007; Prozorova ve diğerleri, 2021). Doğru ve kesin bir karakterizasyon için üretici tarafından verilen geometrik parametrelerin titizlikle kontrol edilmesi, verilmeyen parametrelerin belirlenmesi, ölü zaman gibi zamanla değişen parametrelerin periyodik olarak tespit edilmesi gerekmektedir. Fakat karakterizasyon işlemi yüksek maliyetli, zaman alıcı ve periyodik olarak kontrol edilmesi gereken bir süreç olduğundan pratikte laboratuvarlarda olması gereken şekilde yapılmamaktadır (Prozorova ve diğerleri, 2021). Bu parametrelerin kontrol edilmesinde ve optimum ölü tabaka kalınlığının belirlenmesinde Monte Carlo simülasyon programları kullanılmaktadır. Dedektör karakterizasyonunda üretici firma tarafından dedektörün ilk temin edildiğinde dedektöre ait birçok geometrik boyut bilgisinin verildiği kalite güvence veri listesi (Quality Assurance Data Sheet) çok önemlidir. Çünkü dedektör simülasyonu esas olarak üretici tarafından sağlanan bilgilere dayanmaktadır (Salgado ve diğerleri, 2006). Üreticinin dedektör parametrelerini belirsiz ve/veya eksik vermesi durumunda simülasyonların doğruluğu direkt olarak etkilenmektedir (Khan ve diğerleri, 2018, Azli, 2015, Ewa ve diğerleri, 2001). HPGe dedektörlerde kullanıcı tarafından belirlenen ve dedektör karakterizasyonunda kullanıcıya yol gösteren en önemli nicelik dedektörün toplam enerji pik verimidir (Quang Huy, 2010). Toplam enerji pik

verimi, kaynak-dedektör mesafesi gibi ölçüm koşullarına, foton enerjisine ve ölü tabaka kalınlığı, uç kabı kalınlığı, dedektör pencere malzemesi vb. gibi dedektör özelliklerine bağlıdır. Birden çok parametreye bağlı olarak değişen bu değer deneysel ve simülasyon programları ile belirlenerek dedektör karakterizasyonu yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında vurgulanan verimi etkileyen ve karakterizasyonda önemli olan başlıca parametreler aşağıdaki gibidir.

- Yuvarlatılmış – keskin ön kenar geometrisi (Rounded- sharp front edge effect)
- Bakır kontak pim etkisi (Copper contact pin effect)
- Ölü tabaka kalınlığı (Dead layer thickness)

2.9.1. Yuvarlatılmış/keskin ön kenar geometrisi

Enerji birikiminin hesaplanacağı bölge olan germanyum kristalinin modellenmesi simülasyonda kritik adımlardan birisidir. Dolayısıyla bu bölgenin yuvarlatılmış veya keskin olarak modellenmesi aktif kristal hacmini ve katı açığı değiştireceği için önemlidir. HPGe dedektörlerdeki Ge kristalinin ön kenarının şekli elektrik alan dağılımını etkilediğinden, elektrik alanın saçak (fringe) etkisini önlemek için ön taraftaki kenarlar yuvarlatılmıştır. Kristalin ön kenarının yuvarlatılmış olduğu Chuong ve diğerleri (2016) tarafından yapılan çalışmada dedektörün x-ışını görüntüsünden de açıkça görülmektedir (Şekil 2.16)



Şekil 2.16. Dedektörün x-ışını görüntüsü ile yuvarlatılmış ön kenarın gösterimi (Chuong ve diğerleri, 2016)

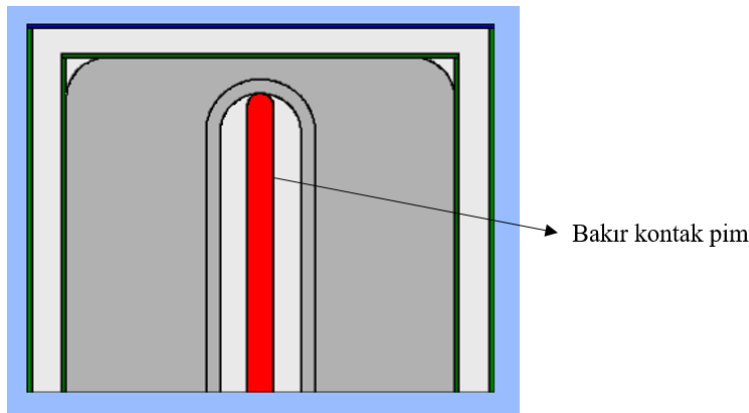
Gasparro ve diğerleri (2008) tarafından yapılan çalışmada keskin kenar olarak modellenmiş dedektör ile hesaplanan verimin, yuvarlatılmış ön kenara göre, özellikle <100 keV'de %5-10 veya daha fazla hesaplandığı belirtilmiştir. Literatürde dedektör verimiyle ilgili yapılan MC çalışmaları incelendiğinde genelde dedektörün keskin kenar olarak modellendiği görülmektedir (Khan ve diğerleri, 2018, Cabal ve diğerleri, 2010).

Koaksiyel dedektörlerde kristal başlangıçta tam silindir şeklinde üretilmiş ancak kristal boyutu arttıkça keskin köşelerde zayıf alan bölgelerinin olduğu anlaşılmıştır. Bu köşelerde meydana gelen etkileşimlerin, ortalamadan çok daha yüksek doğuş zamanına (rise time) sahip pulslara neden olduğu ve pulsların toplanması için gereken ortalama sürelerde bu pulsların toplanamadığı fark edilmiştir. Dedektör performansını azaltan ve yük toplanmasını zayıflatan bu zayıf alan bölgelerini ortadan kaldırmak için koaksiyel dedektörlerde kristalin ön yüzünün kenarları "mermilleştirme" (bulletization) olarak bilinen bir işlemle yuvarlatılır (Gilmore, 2008:53). Dedektörün ön kenarının keskin kenar olarak modellenmesi aktif hacmin artmasına ve FEPE değerinin olması gerekenden daha yüksek olmasına neden

olmaktadır (Gasparro ve diğerleri, 2008). Bu etki, özellikle 100 keV altındaki gama-ışını enerjileri için dedektör verimini %5-10 aralığında değiştirir (Gasparro ve diğerleri, 2008; Hoover, 2007; Jeřkovský ve diğerleri, 2019). Cornejo Díaz ve Jurado Vargas tarafından yapılan çalışmada, yuvarlama dikkate alınmadığında 60 keV altındaki enerjiler için %10'dan büyük sapmalar olduğu belirtilmiştir (Díaz ve Vargas, 2010).

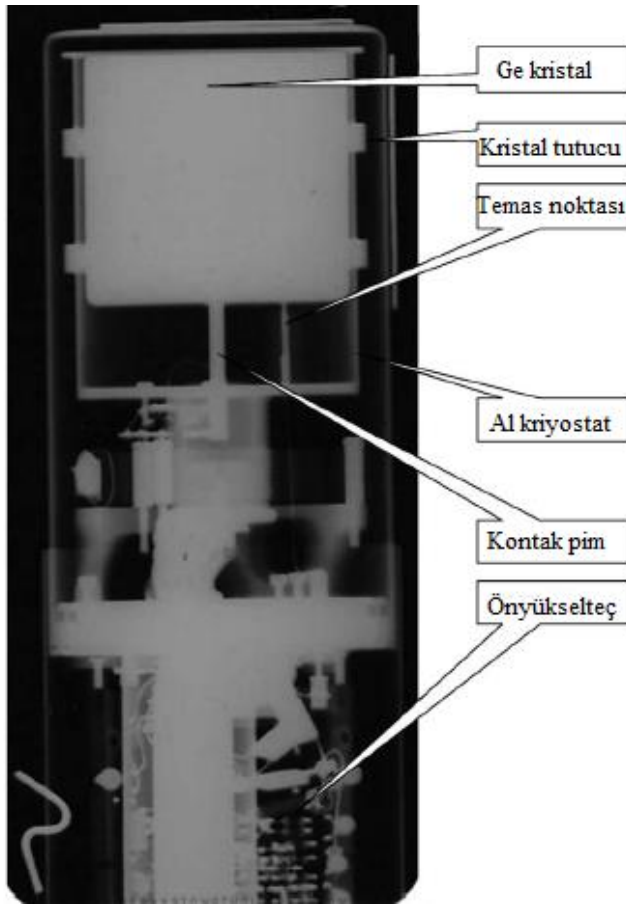
2.9.2. Bakır kontak pim

Simülasyon sonuçlarının kesinliği, yeterli girdi (input) verisine ve fiziksel modelde uygulanan çeşitli yaklaşımların doğruluğuna bağlıdır (Stancu ve diğerleri, 2015). Bu nedenle, bir dedektörün hassas bir şekilde modellenmesi çok önemlidir; ne kadar çok detay modellenirse o kadar doğru sonuçlar elde edilebilir. Dedektör iç boşluk (hole) kısmının ortasında yer alarak kristalle temas eden bakır kontak pim, HPGe dedektörünün önemli parçalarından biridir (Şekil 2.17). Bu kontak pimin iki ana işlevi vardır: gerilimi iç kontağa iletme ve yükleri toplamak; dedektördeki düşük sıcaklığı korumak. Bu yüzden bu pim soğutma çubuğu -cooling rod- olarak da adlandırılır. Ayrıca uç kaptaki kristalin stabilizesini desteklemek içinde kullanılır. Bakır kontak pimin etkisi ve bu pimin varlığında bazı foton etkileşimlerinin meydana gelerek dedeksiyon veriminde azalmaya neden olacağı sadece birkaç makalede kısaca tartışılmıştır (Bikit ve diğerleri, 1999; Britton ve diğerleri, 2014; Carson ve diğerleri, 2010). Kristalin ortasında bulunan bakır kontak pim firma tarafından verilmemektedir fakat simülasyonların doğru yapılması için verilmesi gerekir (Maidana ve diğerleri, 2016).

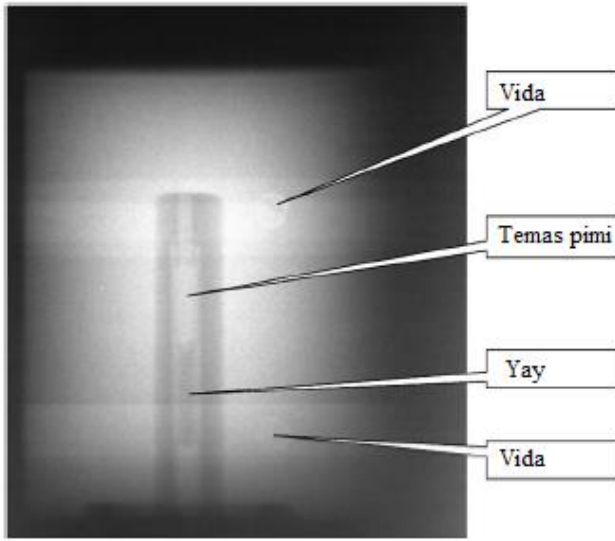


Şekil 2.17. PHITS'te modellenmiş bakır kontak pimin şematik gösterimi

Kristalin gerçek fiziksel boyutları hakkında en doğru bilgi, kristalin radyografik görüntüsünün alınması ile elde edilebilir (Boson ve diğerleri, 2008). MC simülasyonu ile geometriyi doğru bir şekilde karakterize etmek için de radyografi kullanıcıya çok büyük kolaylık sağlar (Chuong ve diğerleri, 2016). Ancak bu işlem, dedektör kurulumu yapılmadan önce ya da laboratuvara getirilen mobil x-ışını görüntüleme sistemiyle dedektör zırhları kaldırıldıktan sonra yapılabileceğinden her zaman mümkün olmayabilir. Ayrıca boyut bilgileri hiçbir üretici firma tarafından verilmeyen bakır kontak pim gibi kristalin iç boşluk kısmında yer alan bir parçanın gerçek boyutlarının elde edilmesinde x-ışını görüntüsü yeterli bilgi sağlamamaktadır. Dryak ve Kovar (2006) tarafından yapılan çalışmada dedektörün x-ışını görüntüsü (Şekil 2.18) ve Ir-192 gama kaynağı kullanılarak dedektör merkezinin görüntüsü (Şekil 2.19) alınarak iç boşlukta yer alan bakır kontak pim görüntüsü elde edilmiştir (Dryak ve Kovar, 2006). Ölçümleri sonucunda bakır kontak pim çapını $3,7 \pm 0,1$ mm olarak belirlemişlerdir.



Şekil 2.18. Dedektörün x-ışını görüntüsü (Dryak ve Kovar, 2006)



Şekil 2.19. Ir-192 gama kaynağı kullanılarak elde edilen dedektör merkezinin görüntüsü (Dryak ve Kovar, 2006)

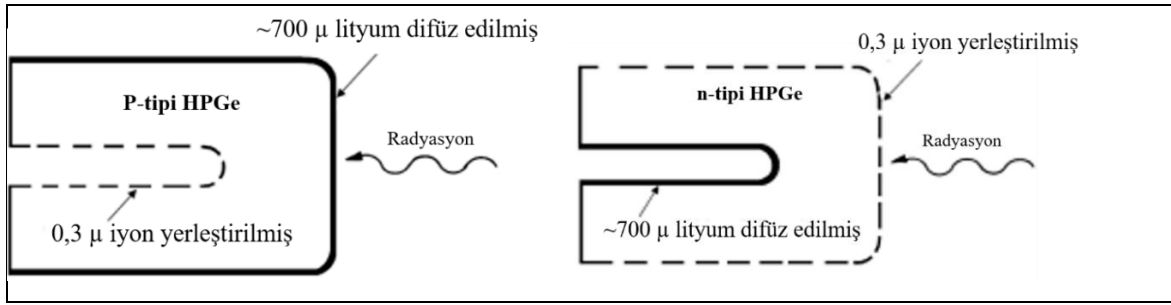
Benzer şekilde; Berndt ve Mortreau (2012) dedektörün radyolojik görüntüsünden içindeki bakırın çapını 4 mm olarak, Carson ve diğerleri (2010) ise 6,9 mm olarak ölçmüşlerdir (Berndt ve Mortreau, 2012; Carson ve diğerleri, 2010).

2.9.3. Ölü tabaka kalınlığı

Tüm HPGe dedektörler büyük, ters yönlü diyotlardır. Germanyum malzemesi "p-tipi" veya "n-tipi" olabilir. Dedektör tipi, kristaldeki verici veya alıcı atomların konsantrasyonuna bağlıdır. Sinyali yükseltmek, diyotu bir elektrik devresine bağlamak için kristalin üzerine kontaklar koymak gerekmektedir. Kristal üzerindeki bu elektrik kontaklardan, n+ kontağı kalın (700-900 μm) lityum yayımlı bir kontak, p+ kontağı ise ince iyon (0,3 μm Bor) implante edilmiş bir kontak. Kullanılan malzeme tipine (n veya p) bağlı olarak kontaklar farklı şekilde uygulanır. p-tipi dedektörde lityum difüze edilmiş kontak dış yüzeyde, bor implante edilmiş kontak ise iç yüzeydedir. n-tipi dedektörde ise tam tersi durum söz konusu olup, lityum difüze edilmiş kontak iç yüzeyde, bor implante edilmiş kontak ise dış yüzeydedir (Şekil 2.20).

p-tipi dedektörlerde kristalin dışını saran, n-tipi dedektörde de kristalin iç yüzeyini saran bu lityum tabakaya *ölü tabaka* (dead layer-DL) denir. Dolayısıyla DL, lityum atomlarının Ge kristaline difüzyonu nedeniyle zamanla oluşan germanyum kristalinin aktif olmayan kısmıdır. Ge kristalinin aktif olmayan bu tabakası sıvı azot sıcaklığında çalışan HPGe

dedektörlerin yıllar içindeki kullanımı sırasında azotsuz kalması/oda sıcaklığında tutulmasına bağlı olarak zamanla artar. Boson ve diğerleri (2008), dedektörlerin uzun süre oda sıcaklığında tutulması durumunda DL kalınlığında bir miktar artışın olacağını vurgulamışlardır (Boson ve diğerleri, 2008). Dedektör bir süre soğutulmaz oda sıcaklığına bırakılırsa, lityum atomlarının germanyumda son derece yüksek hareketliliğe sahip olması nedeniyle Ge kristaline kolayca difüz ederek kristalin aktif olmayan katmanını zamanla artıracaktır (Hult ve diğerleri, 2019; Huy ve diğerleri, 2007). DL kalınlığındaki bu artış, germanyum kristalinde soğurulan birincil gama ışınlarının yanı sıra germanyum kristalinden saçılan ikincil gama ışınlarının olasılığını da etkileyebilir. En önemli etkisi de dedektörün aktif hacmini azaltır ve verimini düşürür (Loan ve diğerleri, 2018).

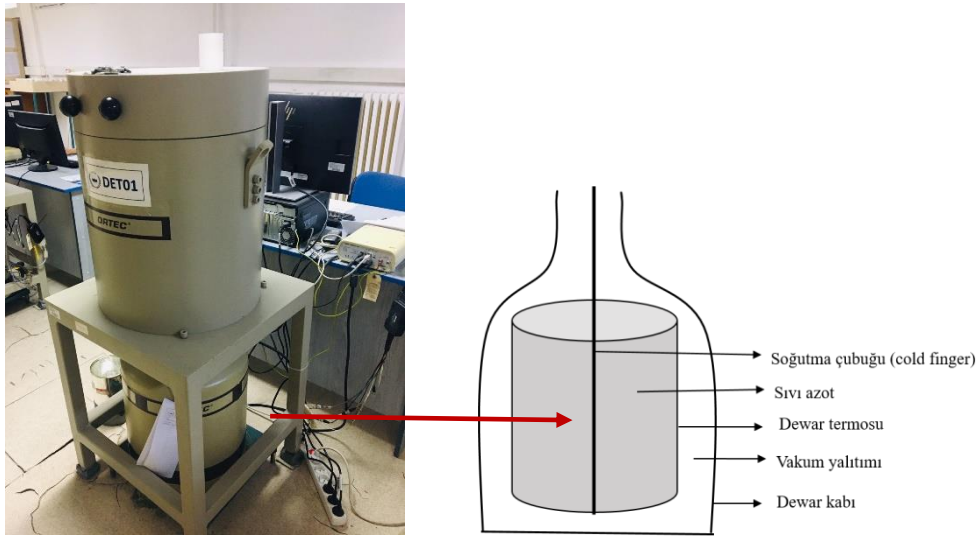


Şekil 2.20. p- ve n-tipi HPGe dedektörlerde tipik DL kalınlıklarının gösterimi (Ortec, 2021)

Zamanla değişen ve dedektör verimini düşüren DL kalınlığının belirlenmesi için MC simülasyon programları kullanılır. MC yönteminde en önemli faktör ise dedektörün doğru modellenmesi yani dedektörün fiziksel ve geometrik özelliklerinin doğru bilinmesidir. Bu parametreler, kristal uzunluğu ve çapı, iç boşluğun uzunluğu ve çapı, ölü tabakanın kalınlığı, uç kabı ile kristal arasındaki mesafe, pencere malzemesi vb. Bu parametrelerin belirlenmesinde dedektör karakterizasyonu adı verilen özel bir prosedür gerçekleştirilir (Guerra ve diğerleri, 2015; Prozorova ve diğerleri, 2021). Bir dedektör doğru bir şekilde karakterize edildiğinde, referans kaynaklarına ihtiyaç duymadan, herhangi bir geometri ve kompozisyondaki numunenin verim değerlerini çok kısa sürede ve uygun maliyetli bir şekilde elde etmek mümkündür. Doğru ve kesin bir karakterizasyon için üretici tarafından verilen geometrik parametrelerin titizlikle kontrol edilmesi, verilmeyen parametrelerin belirlenmesi ve DL gibi zamanla değişen parametrelerin periyodik olarak belirlenmesi gerekir. Dedektör üretildiğinde firma tarafından verilen DL kalınlığı ile elde edilen simülasyon verim değerleri ile deneysel verim arasında %100'lere varan farklılıklar çıkmaktadır. Bunun sebebi literatürde de birçok çalışmanın yapıldığı ölü tabakanın zamanla

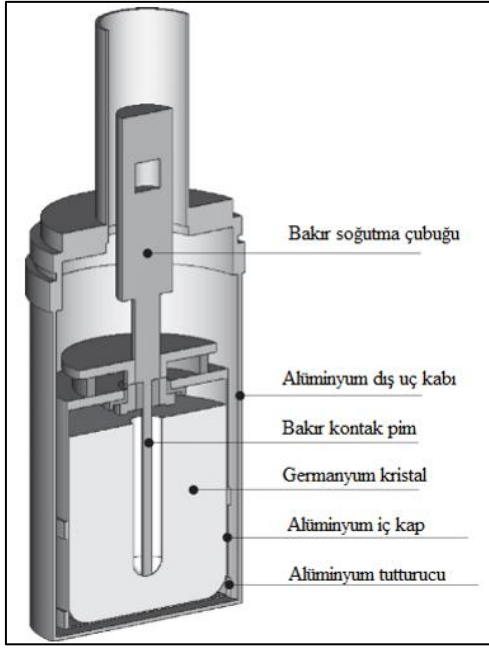
kalınlaşmasıdır (Azli ve Chaoui, 2015; Chham ve diğerleri, 2015; Huy ve diğerleri, 2007; Khan ve diğerleri, 2018; Maidana ve diğerleri, 2016). Huy (2010), 1996 yılında kullanımına başlanan p-tipi dedektörün 13 yıllık kullanımına bağlı olarak DL kalınlığının 0,35 mm'den 1,46 mm'ye arttığını belirtmiştir (Quang Huy, 2010). Yaptığı diğer bir çalışmada da aynı dedektörün DL kalınlığını 2005 yılında 1,15 mm, 2009 yılında 1,46 mm olarak belirlemiştir (Huy, 2011). Dolayısıyla bu kalınlığın zamanla lineer olarak değişmediği, tamamen kristalin kendine özgü ve çalışma şartlarına bağlı olarak değiştiği görülmektedir.

DL kalınlığındaki değişimin bir başka nedeni de zamanla vakum bozulmasıdır. Krishnan ve diğerleri (2017) ise, birçok faktöre bağlı kademeli olarak değişen DL kalınlığı artışının ana faktörünün zamanla oluşabilecek vakum azalımı/kaybı olduğunu belirtmişlerdir (Krishnan ve diğerleri, 2017). Belirtilen vakum kaybı, HPGe dedektörlerin soğutulmasında kullanılan sıvı azotun muhafaza edildiği dewar kabında gerçekleşmektedir (Şekil 2.21).



Şekil 2.21. Sıvı azotun muhafaza edildiği dewar kabı

Germanyum düşük band aralığına (0,7 eV) sahip olduğundan, HPGe dedektörlerin, yük taşıyıcıların termal oluşumu (dolayısıyla ters kaçak akımı) nedeniyle oda sıcaklığında çalışması mümkün değildir. Bunun için HPGe dedektörler soğutularak kullanılmalıdır. Aksi takdirde kaçak akım kaynaklı gürültü dedektörün enerji ayırma gücünü bozar. 77 °K sıcaklığa sahip sıvı azot, bu tür dedektörler için gereken soğutma ortamıdır. Dedektör, kristal ve çevreleyen hava arasındaki termal iletkenliği engellemek için vakumlu bir kriyostat içine yerleştirilmektedir (Knoll, 2010:477). Kristal, sıvı azotun bulunduğu dewar içerisine uzanan bakır soğutma çubuğu vasıtasıyla soğutulmaktadır (Şekil 2.22).



Şekil 2.22. Bakır soğutma çubuğunun gösterimi (Boson ve diğerleri, 2008)

Pratikte, standart 30 L dewara sıvı azot tam olarak doldurulması durumunda ortalama iki haftada tüketilmektedir (Gilmore, 2008:57). Dewarı, dedektörün kullanımı dikkate alınarak bir rutinde doldurmak çok önemlidir. Sayım sırasında dewara sıvı azot dolumu yapmak, doldurma sırasında elektronik gürültüye sebep olacağından, devam etmekte olan ölçümü bozabilir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. HPGe Dedektörlerin Geometrik Özellikleri

Gama spektrometresinde kullanılan farklı bağıl verimlere sahip HPGe dedektörlerin karakterize edilebilmesi için geometrik özelliklerinin biliniyor olması gerekir. Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK) Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü (NÜKEN) Radyoaktivite Ölçüm Laboratuvarında yer alan ve geometrik özellikleri bilinen üç p-tipi (DET1, DET2, DET3) ve bir n-tipi (DET4) olmak üzere dört adet HPGe dedektör deneysel ve MC simülasyon yöntemleri ile karakterize etmek için kullanılmıştır. Bu dedektörlerin üreticileri tarafından verilen bilgiler Çizelge 3.1’de detaylı olarak verilmiştir.

3.1.1. p-tipi HPGe dedektörler (DET1, DET2 ve DET3)

DET1 dedektörü 1,5 mm kalınlıkta Al pencerele eş eksenli Ortec marka GEM150P4 model %150 bağıl verimli bir HPGe dedektördür. Ortamdaki doğal fon radyasyonunun etkisinin en aza indirilmesi için dedektör Ortec marka HPLBS1 model zırh ile zırhlanmıştır. Bu zırh 9,5 mm kalınlığındaki çelik iskelet içinde 10 cm kalınlığında kurşun dökümdür. Ayrıca zırhın iç kısmı floresans x-ışını sonucu ve diğer saçılan x-ışınlarını önlemek amacıyla 0,5 mm kalınlığında kalay ve kalay x-ışınlarını (24-28 keV) önlemek için de 1,6 mm kalınlığında bakır ile kaplanmıştır. Zırhın taban kısmında halka şeklinde bir kurşunla kapatılmış ~10 cm çapında, dikey geometrili kriyostat ve dedektör kablolarının geçtiği boşluk vardır. Dedektör, zırh içindeki saçılan radyasyonu en aza indirmek için zırhın merkezine yerleştirilmiştir. Direnç geri beslemeli önyükselteç (A257P) ve sızdırmaz yüksek voltaj filtreli dedektöre Ortec DSPEC jr 2.0 dijital sinyal işleme sistemi bağlanmıştır. DET2 ve DET3 dedektörleri ise PGT (Princeton Gamma-Tech) marka IGC 50195 modeldir. Üretici firma tarafından verilen bilgilere göre hemen hemen aynı geometrik özelliklere sahip olan bu iki dedektörde 10 cm kalınlığında kurşunla zırhlanmıştır. Zırhların iç kısmı floresans x-ışını sonucu ve diğer saçılan x-ışınlarını önlemek amacıyla 5 mm kalınlığında bakır ile kaplanmıştır. Direnç geri beslemeli önyükselteç (RG11B/C) ve sızdırmaz yüksek voltaj filtreli dedektörlere Canberra DSA 1000 16k dijital sinyal analizörü bağlanmıştır.

Çizelge 3.1. DET1, DET2, DET3 ve DET4 HPGe dedektörlerinin üretici tarafından verilen özellikleri

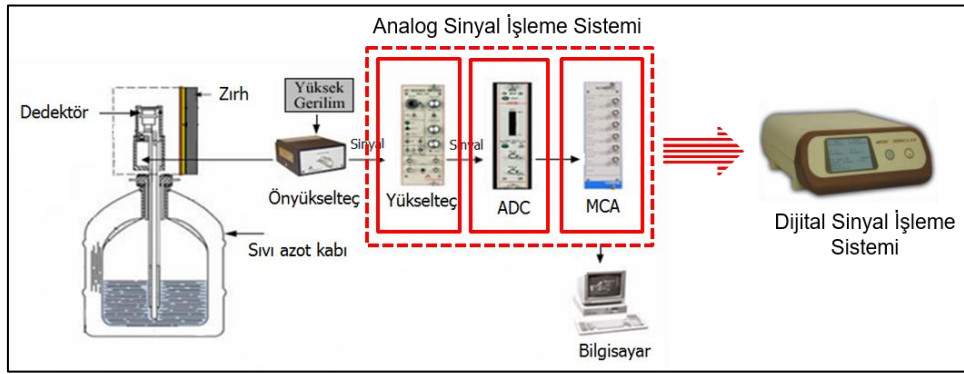
		DET1	DET2	DET3	DET4
<i>Dedektör geometrisi ve kristal tipi</i>		<i>p-tipi</i>	<i>p-tipi</i>	<i>p-tipi</i>	<i>n-tipi</i>
<i>Bağıl verimi</i>		%150	% 58,49	%54,71	%70
<i>Ge kristali</i>	<i>Çap</i>	94,8 mm	65,8 mm	65,8 mm	73,2 mm
	<i>Yükseklik</i>	87,2 mm	65,9 mm	65,8 mm	65 mm
<i>İç boşluk</i>	<i>Çap</i>	11,2 mm	9 mm	9 mm	10,7 mm
	<i>Derinlik</i>	73,4 mm	53 mm	53 mm	58 mm
<i>Dedektör ön kenarı</i>	<i>Yarıçap</i>	İç boşluk çapı/ 2: 5,6 mm	-	-	8 mm
<i>Enerji ayırma gücü (FWHM)</i>	5,9 keV (^{55}Fe)	-	-	-	0,96 keV
	122 keV (^{57}Co)	0,89 keV	1,22 keV	1,22 keV	-
	1332,5 keV (^{60}Co)	2,11 keV	2,0 keV	2,0 keV	2,10 keV
<i>Pik-Compton oranı</i>	1332,5 keV (^{60}Co)	90:1	67,15:1	67,15:1	66:1
<i>Dış ölü tabaka kalınlığı ve malzemesi</i>		700 μm /Lityum			0,3 μm /Bor
<i>İç ölü tabaka kalınlığı ve malzemesi</i>		0,3 μm /Bor	< 1 mm	< 1 mm	900 μm /Lityum
<i>Dedektör pencere malzemesi</i>		Alüminyum	Alüminyum	Alüminyum	Berilyum
<i>Dedektör kristali ile uç kabı arasındaki mesafe</i>		5 mm	5 mm	5 mm	4 mm
<i>Çalışma voltajı</i>		+3300 V	+2500 V	+3000 V	-4800 V

3.1.2. n-tipi HPGe dedektör (DET4)

TENMAK-NÜKEN Radyoaktivite Ölçüm Laboratuvarında bir adet bulunan n-tipi dedektör (DET4) 0,76 mm kalınlıkta Be pencereli eş eksenli Ortec marka GMX70P4 modeldir. Ortamdaki doğal fon radyasyonunun etkisinin en aza indirilmesi için dedektör Ortec marka HPLBS1 model zırh ile zırhlanmıştır. Bu zırh 9,5 mm kalınlığındaki çelik iskelet içinde 10 cm kalınlığında kurşun dökümdür. Ayrıca zırhın iç kısmı floresans x-ışını sonucu ve diğer saçılan x-ışınlarını önlemek amacıyla 0,5 mm kalınlığında kalay ve kalay x-ışınlarını (24-28 keV) önlemek için 1,6 mm kalınlığında bakır ile kaplanmıştır. Zırhın taban kısmında halka şeklinde bir kurşunla kapatılmış 11,4 cm çapında boşluk vardır. Bu boşluktan dikey geometrili kriyostat (CPG-P4) ve dedektör kabloları geçmektedir. Dedektör, zırh içindeki saçılan radyasyonu en aza indirmek için zırhın merkezine yerleştirilmiştir.

Gelen ışınların/parçacıkların herhangi bir dedektör (HPGe, CdZnTe, CdTe, plastik sintilatör) tarafından algılanmasından sonra puls işleme sistemi devreye girmektedir (Şekil 3.1). Puls işleme sistemleri, önyükselteç çıkışından sonra sinyalin işlendiği yükselteç, analog-dijital dönüştürücü (ADC) ve çok kanallı analizörden (MCA) oluşan elektronik komponentlerden oluşmaktadır. Günümüzde analog ve dijital olmak üzere iki farklı puls

işleme sistemi kullanılmaktadır. Analog sistemlerde Şekil 3.1’de gösterilen yükselteç, ADC ve MCA üniteleri NIM kasa üzerine takılarak tüm ayarları manuel olarak yapılmaktadır. Tez çalışmasında tüm dedektörlerde kullanılan dijital sinyal işleme sistemlerinde ise yükselteç, ADC ve MCA’yı içinde barındıran “dijital sinyal işleme sistemi” bilgisayardan kontrol edilmektedir. Dijital sistemler sıcaklıktan bağımsız, daha hızlı veri çıktısının alınması ve ayırma gücü kayıplarının daha az olmaları nedeniyle analog sistemlere göre daha avantajlıdır.



Şekil 3.1. HPGe gama spektrometre sistemi

Spektrumların elde edilmesinde ve analizlerinde GammaVision™ (ORTEC) ve Genie 2000™ Gamma Acquisition&Analysis (Canberra) gelişmiş gama spektroskopi yazılımları kullanılmıştır. Bu yazılımlar ile sistemlerin enerji kalibrasyonları yapılır, böylece numune içinde hangi enerjilere sahip radyoaktif çekirdeklerin olduğu belirlenebilir. Elde edilen spektrumlar bize radyoaktif çekirdeklere ait enerji ve fotopiklerin altındaki net sayım bilgisini verdiğinden aktivite ve verim hesapları yapılabilir. Fakat bu yazılımlar, aktivite ve verim hesabının doğru ve kesin bir şekilde yapılması için gereken öz-soğurma ve TCS düzeltmelerini vermemektedir. Bu nedenle bu iki düzeltme faktörü ilgili programlarla değerlendirilerek ayrıca hesaba katılmaktadır.

3.2. Sertifikalı Standart Nokta Kaynakların Özellikleri

Nokta kaynak geometrisi, özellikle dedektör karakterizasyonunda silindirik veya marinelli gibi kompleks hacimsel geometrilere göre daha basit bir geometriye sahip olduğundan tercih edilmektedir (Ashrafi ve diğerleri, 1999; Azbouche ve diğerleri, 2018; Dryak ve Kovar, 2006; Padilla Cabal ve diğerleri, 2010). Bu nedenle bu tez çalışmasında, deneysel FEPE değerlerinin hesabında öncelikle standart nokta kaynaklar kullanılmıştır. Kullanılan nokta

kaynaklar, Amersham'dan satın alınan ^{241}Am (381,6 kBq), PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt)'den satın alınan ^{133}Ba ($21,57 \pm 0,22$ kBq), ^{152}Eu ($54,5 \pm 0,8$ kBq), ^{134}Cs ($54,0 \pm 0,4$ kBq), ^{137}Cs ($89,4 \pm 0,9$ kBq) ve ^{60}Co ($14,75 \pm 0,15$ kBq)'dır. Nokta kaynakların her birinin aktif çapı 5 mm'dir ve kaynak kapsüller, 30 mm çapında ve 4 mm kalınlığında alüminyum halka ile çevrilidir. Çalışmada kullanılan bu radyoizotopların gama enerjileri; 59,54 keV (^{241}Am); 81 keV, 302,85 keV, 356,01 keV, 383,85 keV (^{133}Ba); 121,78 keV, 344,28 keV, 778,91 keV, 964,08 keV, 1112,07 keV, 1408,01 keV (^{152}Eu); 569,33 keV, 604,72 keV, 795,86 keV (^{134}Cs); 661,56 keV (^{137}Cs); 1173,23 keV, 1332,49 keV (^{60}Co). Gama spektrometresinde nokta kaynaklar ile ölçüm alınırken radyoaktif kaynağın aktivitesine bağlı olarak ölü zaman ve puls yığılması kaynaklı sayım hızı kayıplarının en aza indirilmesi için kaynak-dedektör mesafesi en uygun mesafeye yerleştirilmelidir.

3.3. Sertifikalı Hacimsel Standart ve Referans Malzemelerin Özellikleri

Tez çalışmasında, 6 cm × 5 cm boyutundaki silindir kabın kullanıldığı hacimsel geometride IAEA (Uluslararası Atom Enerji Ajansı)'dan temin edilen sertifikalı referans malzemeler ile Eckert&Ziegler Isotope Products firmasından temin edilen NIST (National Institute of Standards and Technology) tarafından izlenebilir sertifikalı standart malzemeler kullanılmıştır. Bu malzemeler; IAEA-RGU-1 uranyum cevheri, IAEA-RGTh-1 toryum cevheri, IAEA-RGK potasyum sülfat, IAEA-375 toprak numunesi, TCC-Sand-113674 kum numunesi, TCC-Simulated Vegetation-113672 kahve numunesidir. Sertifikalı standart ve referans malzemelerin sertifikalarında yer alan spesifik aktivite, gama enerjileri ve element kompozisyon değerleri Çizelge 3.2 ve 3.3'te verilmektedir.

Çizelge 3.2. Sertifikalı referans malzemelerdeki radyoaktif çekirdekler için tavsiye edilen spesifik aktivite değerleri

Malzeme tanımı	Kod	Aktivite (Bq/kg) ^{d)}						
		²³⁸ U miktarı	²³⁵ U miktarı	²³² Th miktarı	²²⁶ Ra miktarı	⁴⁰ K miktarı	¹³⁷ Cs miktarı	¹³⁴ Cs miktarı
Seyreltilmiş Uranyum cevheri ^{a)}	IAEA-RGU-1	4941±99	224±5	-	-	-	-	-
Toryum cevheri ^{a)}	IAEA-RGTh-1	78±6	3,6±0,3	3250±90	-	6,3±3,2	-	-
Potasyum Sülfat ^{b)}	IAEA-RGK-1	14000±400	-	-	-	-	-	-
Toprak (soil) ^{c)}	IAEA-375	24,4±5,4	-	20,5±1,4	20±2	424±8	5280±80	463±9

a) Sertifikalı referans malzemeler IAEA (Uluslararası Atom Enerji Ajansı) adına CCRMP-CANMET (Canadian Certified Reference Materials Project - Canada Centre of Mineral and Energy Technology) tarafından hazırlanmıştır.

b) Merck tarafından tedarik edilmiş, IAEA laboratuvarlarında kontrolleri yapılmıştır.

c) 1990 yılında Rusya'nın Brjansk bölgesinden toplanarak bölgedeki laboratuvarında 0,3 mm'den daha küçük tanecik boyutuna getirilmiş, IAEA laboratuvarlarında da kontrolleri yapılmıştır.

d) Tüm değerler 95% güven aralığında verilmiştir.

Çizelge 3.3. IAEA RG serisi sertifikalı referans malzemelere ait bilgiler

Referans malzeme	Gama enerjileri (Radyoaktif çekirdek/Ana çekirdek)	Element kompozisyonu (%)
RGU-1	46,5 keV (²¹⁰ Pb/ ²³⁸ U)	O: 53,4; Si: 46,4; Al: 0,10 U: 0,04; Ca: 0,02; Fe: 0,02 Na: 0,02
	63,3 keV (²³⁴ Th/ ²³⁸ U)	
	143,8 keV (²³⁵ U)	
	185,7 keV (²³⁵ U)	
	1001,0 keV (^{234m} Pa/ ²³⁸ U)	
RGTh-1	129,1 keV (²²⁸ Ac/ ²³² Th)	O: 52,8; Si: 45,6; Y: 0,76 Ca: 0,50; Fe: 0,11; P: 0,11 Th: 0,08; K: 0,02; Mg: 0,02
	209,3 keV (²²⁸ Ac/ ²³² Th)	
	911,2 keV (²²⁸ Ac/ ²³² Th)	
RGK-1	1460,8 keV (⁴⁰ K)	K: 44,9; O: 36,7; S: 18,4
IAEA-375	1460,8 keV (⁴⁰ K)	O: 50,2; Si: 37,8; Al: 4,99 K: 1,86; Ca: 1,78; Fe: 1,45 Mg: 0,85; Na: 0,59; Ti: 0,33 S: 0,15
	661,7 keV (¹³⁷ Cs)	

Çizelge 3.3'te ki IAEA-RGU-1 ve RGTh-1 malzemeleri Uranyum (U), Toryum (Th) ve bunların bozunma ürünlerini içerdiğinden spektrumları çok karmaşıktır. Doğru ve hassas ölçüm sonuçları için bu spektrumların spektral çözülmesinde, girişim piklerinin değerlendirilmesi ve hangi piklerin kullanılacağına karar verme süreci önemlidir. Dikkat edilmesi gereken nokta, kullanılan pikin spektral olarak temiz ve gama yayınlama olasılığının yüksek olmasıdır. Bu kapsamda seçilen pikler; 46,5 keV(²¹⁰Pb), 63,3 keV (²³⁴Th), 129,0 keV (²²⁸Ac), 143,8 keV (²³⁵U), 185,7 keV (²³⁵U), 209,3 keV (²²⁸Ac), 351,9 keV (²¹⁴Pb), 609,3 keV (²¹⁴Bi), 911,2 keV (²²⁸Ac), 1001,0 keV (^{234m}Pa), 1120,3 keV (²¹⁴Bi),

1764,5 keV (^{214}Bi)’dir. Bu piklerden 63,3 keV ve 1001,0 keV pikleri ^{238}U ’in, 143,8 keV ve 185,7 keV pikleri ^{235}U ’in, 129,1 keV, 209,3 keV ve 911,2 keV pikleri ^{232}Th ’nin aktivite sonucunda kullanılan piklerdir. IAEA-RGK-1 malzemesinde sadece 1460 keV gama enerjili ^{40}K bulunmaktadır. IAEA-375 toprak standartında ise ^{40}K (1460 keV) ve ^{137}Cs (661,7 keV) radyoaktif çekirdekleri bulunmaktadır.

Çizelge 3.4’te ki sertifikalı standart malzeme ise U, Th gibi doğal radyoaktif çekirdekler yerine yapay radyoaktif çekirdekler içerdiğinden böyle bir pik seçimi yoktur.

Çizelge 3.4. TCC serisi sertifikalı standart malzemelerdeki radyoaktif çekirdekler sertifika aktivite değerleri ve element kompozisyonları

Gama enerjileri (Radyoaktif çekirdek)	Referans malzeme	Sertifika edilen aktivite değerleri (Bg kg ⁻¹)	Element kompozisyonu (%)
46,5 keV (^{210}Pb) 59,5 keV (^{241}Am) 88 keV (^{109}Cd) 122,1 keV (^{57}Co) 604,7 keV (^{134}Cs) 661,7 keV (^{137}Cs) 834,9 keV (^{54}Mn) 898 keV (^{88}Y) 1115,6 keV (^{65}Zn) 1836,1 keV (^{88}Y)	TCC-Sand-113674 (kum) ^{a)}	^{210}Pb : 12978±2,16% ^{241}Am : 1558±1,87% ^{109}Cd : 12859±2,35% ^{57}Co : 313±1,82% ^{134}Cs : 1656±1,82% ^{137}Cs : 416±1,82% ^{54}Mn : 868±1,82% ^{88}Y : 1232±1,82% ^{65}Zn : 2231±1,82%	O: 53,3; Si: 46,7
	TCC-Simulated Vegetation-113672 (kahve) ^{b)}	^{210}Pb : 13195±2,16% ^{241}Am : 1584±1,87% ^{109}Cd : 13074±2,35% ^{57}Co : 319±1,82% ^{134}Cs : 1684±1,82% ^{137}Cs : 423±1,82% ^{54}Mn : 882±1,82% ^{88}Y : 1253±1,82% ^{65}Zn : 2268±1,82%	C: 57,25; O: 21,35 N: 16,02; H: 5,38

^{a)} 6×5 geometride hazırlanan numunenin ağırlığı = 177,48 g, Referans tarihi: 30.09.2019

^{b)} 6×5 geometride hazırlanan numunenin ağırlığı = 67,67 g, Referans tarihi: 30.09.2019

Sertifikalı hacimsel standart ve referans malzemelerin hazırlanması:

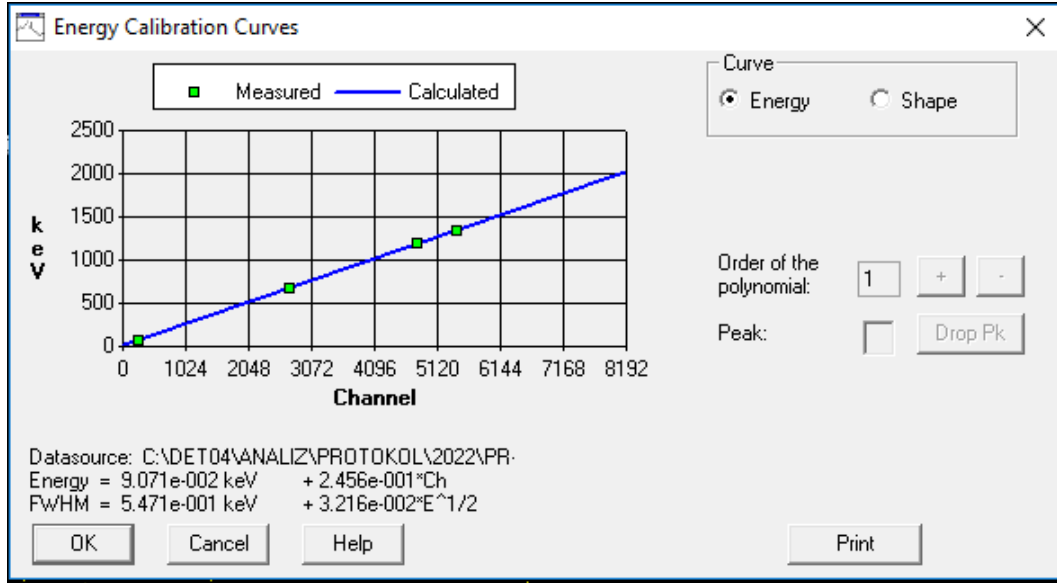
Verim ve aktivite konsantrasyon hesaplamalarında kuru ağırlık (dry mass) değerleri kullanılmıştır. Bunun için öncelikle sertifikalı referans malzemelerin ölçüme hazırlanmasında, 250°C’ye kadar ayarlanabilen Nüve KD 200 etüv ile numuneler 105°C’de bir gece (14-15 saat) kurutulmuştur. Daha sonra, standart kaynaklar ve sertifikalı referans malzemeler iç çapı 5,58 cm olan 1,19 g/cm³ yoğunluğa sahip akrilik (PMMA) silindirik kaplar içerisine numune yüksekliği 4,96 cm olacak şekilde doldurulmuştur. Hazırlanan standart kaynakların ve referans malzemelerin Radwag marka hassas terazi ile net ağırlıkları

belirlendikten sonra sızdırmazlıkları sağlanmıştır. Bunun için parafilm ile hava geçirmeyecek şekilde kapatılan kapların, ^{226}Ra 'nın ürün radyoaktif çekirdeği olan ^{222}Rn ile radyoaktif dengeye gelmesi için tüm numuneler ölçümünden önce en az 30 gün bekletilmiştir.

3.4. Spektrometrelerin Enerji Kalibrasyonlarının Yapılması

Gama-ışın spektrumu, ardışık puls yükseklik aralıklarında ölçülen puls sayılarının bir listesidir. Dedektör kalibrasyonu, gama-ışın spektrumunun kanal sayısı veya voltaj yerine enerji; puls sayısı yerine radyoaktif çekirdek miktarı açısından yorumlanmasına olanak tanır. Ayrıca, enerji veya kanal numarası ile pik genişliğinin değişimi hakkında bilgi sağlamaktadır (Debertin ve Helmer, 1998:191). Enerji kalibrasyonunun amacı, spektrumdaki pikin tepe noktasına karşılık gelen gama-ışını enerjisi arasında bir ilişki kurmak, belli bir büyüklükteki pulsun ne kadar enerji taşıdığı bilgisi vermektir. Enerji kalibrasyonunda enerjisi bilinen standart radyoaktif kaynaklar kullanılır. Kalibrasyon, spektrumda oluşan fotopiklerin tepesindeki kanal numaralarına bilinen gama-ışın enerjisinin tanımlanmasıyla gerçekleştirilir. Bunun için fotopik sayımlarının en yüksek değerine karşılık gelen kanal numaraları ve bilinen enerjileri sırayla sisteme girilir. Elde edilen grafik genellikle $y=mx+n$ şeklinde doğrusal bir davranış sergiler (Şekil 3.2). Doğrusallıktan sapmaları da dikkate almak için ikinci derece ($y=a+bx+cx^2$) bir polinoma fit edilir. Kaynağın tek veya birkaç radyoaktif çekirdek içermesi önemli değildir. Kullanılan radyoaktif çekirdek sayısı arttıkça kalibrasyon geniş bir enerji aralığını kapsayacağı için daha sağlıklı bir kalibrasyon yapılmış olacaktır. Bu durum özellikle uranyum, toryum ve bunların bozunma ürünlerinden gelen karmaşık gama spektrumlarında çok önemlidir. Dolayısıyla enerji kalibrasyonu, bilinen gama-ışını enerjilerini kullanarak bilinmeyen gama fotopiklerinin tanımlanabilmesi için gama spektrometrik ölçümlerde yapılması zorunlu bir işlemdir.

Tezde, deneysel çalışmalara başlamadan önce 46,539 keV - 2505,7 keV enerji aralığındaki nokta kaynaklar (^{210}Pb (46,539 keV), ^{241}Am (59,539 keV), ^{57}Co (122,061 keV), ^{109}Cd (88,034 keV), ^{133}Ba (80,998 keV, 276,4 keV, 302,852 keV, 356,014 keV, 383,85 keV), ^{137}Cs (661,66 keV), ^{54}Mn (834,846 keV), ^{22}Na (1274,54 keV) ve ^{60}Co (1173,233 keV, 1332,497 keV ve 2505,7 keV'de ki toplam pik)) ile geniş bir enerji aralığında enerji kalibrasyonları yapılarak tüm dedektörler ölçümlere hazır hale getirilmiştir. Her numune ölçümünden önce dedektörlerin enerji kalibrasyonlarının kayıp kaymadığı kontrol edilmiştir.

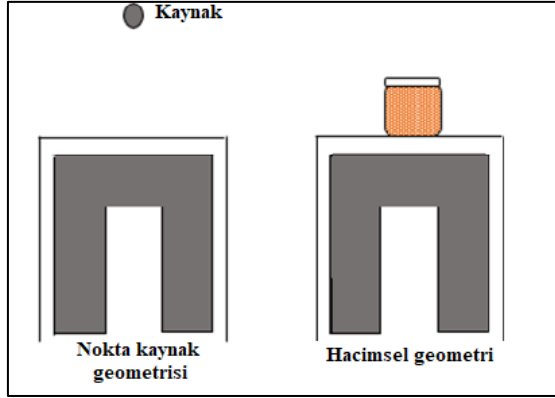


Şekil 3.2. Enerji kalibrasyon eğrisi (Genie 2000 yazılımından alınmıştır)

3.5. Toplam Enerji Pik Veriminin Deneysel Olarak Belirlenmesi

Gama spektrometrisinde nicel analizler için gerekli olan ve dedektör performansını gösteren en önemli parametrelerden toplam enerji pik verimi (FEPE) hem deneysel ve hemde MC yöntemi ile belirlenebilir. Deneysel verim kalibrasyonunda aktivitesi bilinen, ölçülecek numune ile aynı ölçüm geometrisine sahip standart kaynaklar içeren referans malzemeler kullanılır. Özellikle düşük enerjilerde öz-soğurma düzeltmelerinden kaçınmak için deneysel kalibrasyonda numune ile çok benzer yoğunluklara ve kimyasal bileşimlere sahip standartların kullanılması gerekmektedir (Guerra ve diğerleri, 2018). Deneysel yöntem, her numuneye özgü kompozisyonda standart bir kaynak gerektirdiğinden ve her ölçüm koşulu için uygun geometrinin sağlanması gerektiğinden maliyetli, zahmetli ve zaman alıcı bir yöntemdir (Jeřkovský ve diğerleri, 2019; Padilla Cabal ve diğerleri, 2010).

Deneysel FEPE değeri, hem herhangi bir numunedeki aktivite değerinin belirlenmesinde hem de dedektör karakterizasyonunda kullanıcıya yol gösteren bir parametredir. Tez çalışmasında her iki amaç için de FEPE değerleri hesaplanarak kullanılmıştır. FEPE değerinin elde edilmesinde nokta kaynak ve hacimsel geometri olmak üzere iki farklı geometri kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Ölçümlerde kullanılan nokta ve hacimsel kaynak geometrinin şematik gösterimi

Nokta kaynak geometride kaynakların deneysel FEPE değerleri Eş. 3.1'e göre hesaplanmıştır.

$$\varepsilon(E) = \frac{\left[\frac{N_p}{t_c} \right]}{A \cdot f_\gamma(E)} \cdot F_C \quad (3.1)$$

Burada N_p/t_c (sayım/s), ilgili E enerjisindeki fotopik net sayım hızıdır. Net sayım hızı, Genie 2000/GammaVision yazılımlarından alınan spektrumun altındaki net sayımın sayım süresine bölünmesiyle elde edilir. $A(Bq)$, 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 yayınlama olasılığıdır. Bu çalışmada gama-ışın spektrometresinde ilgilenilen radyoaktif çekirdekler için gama yayınlama olasılıkları LARA (LARAweb, 2021) ve DDEP (DDEP, 2017) ücretsiz online erişim veritabanlarından alınmıştır. Bu veri tabanları ayrıca yarı ömür, anne ve kız çekirdek gibi birçok bilgiyi de sağlamaktadır. F_C , gerçek zamanlı çakışma (TCS) düzeltme faktörüdür. Kullanılan nokta kaynaklardan ^{134}Cs , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve ^{60}Co 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.

Nokta kaynak ölçümlerinde radyoaktif kaynakların aktivitelerine bağlı olarak ölü zaman ve puls yığılması kaynaklı sayım hızı kayıplarını en aza indirmek için her bir dedektörde farklı kaynak-dedektör mesafesi seçilmiştir. Örneğin optimum DL belirlenmesi sırasında, kaynak-

dedektör mesafesi DET1 dedektöründe 13,25 cm, DET2 dedektöründe 7,5 cm, DET3 dedektöründe 8 cm, DET4 dedektöründe ise 14,9 cm seçilmiştir. Dedektörlerde belirtilen mesafelerden daha yakın mesafelerde sayım yapılırken ölü zamanın arttığı (>%1), daha uzun mesafelerde ise sayım sürelerinin gereksiz yere uzadığı görülmüştür. 6cm×5cm boyutundaki silindir kapların kullanıldığı hacimsel kaynaklar ise dedektör penceresinin direk üzerinde sayılmıştır. Çünkü bu geometri tüm dedektörlerde rutinde de tercih edilen sayım geometrisidir.

Benzer şekilde, hacimsel geometrideki numunelerin deneysel FEPE değerleri ise Eş. 3.2'ye göre hesaplanmıştır.

$$\varepsilon(E) = \frac{\left[\frac{N_p}{t_c} - \frac{N_b}{t_b} \right]}{A \cdot f_\gamma(E)} \cdot D \quad (3.2)$$

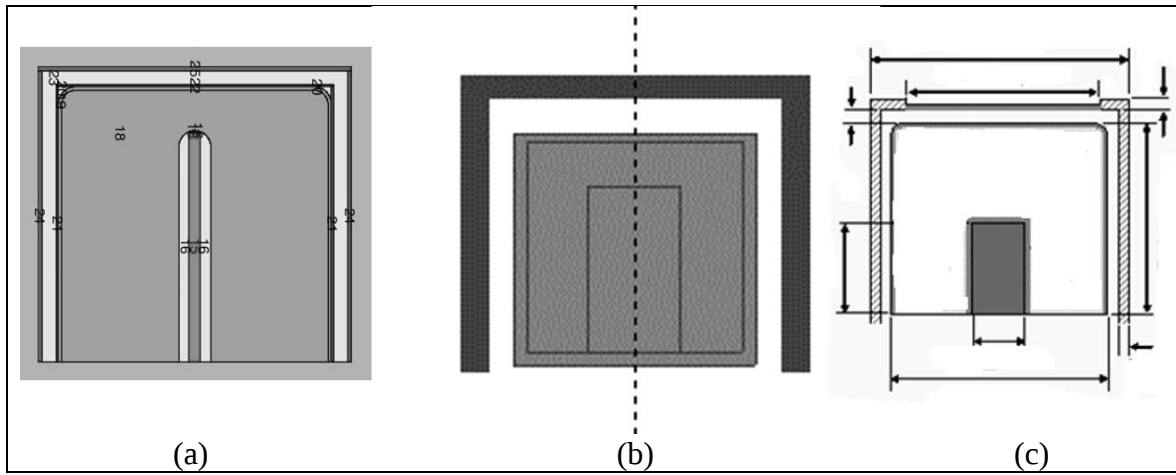
Burada N_b/t_b (sayım/s), ilgili E enerjisindeki doğal fon spektrumundan elde edilen fotopikin net sayım hızıdır. D ile gösterilen düzeltme faktörü ise TCS ve öz-soğurma düzeltmeleridir. Çizelge 3.3 ve 3.4 ile verilen hacimsel kaynakların hepsine her iki düzeltme faktörü de uygulanmıştır.

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)) elde edilmektedir. Veri tabanından alınan kütle soğurma katsayılarının numune miktarı (g) ile çarpılıp, numune hacmine (cm^3) bölünmesiyle lineer azalma katsayıları elde edilmektedir. Daha sonra Eş. 2.21'de lineer azalma katsayı 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 dedektöre (kristal çapı ve uzunluğu, dedektör iç boşluğunun çapı ve uzunluğu, pencere malzemesi ve kalınlığı, uç kabın çapı, DL kalınlığı, vb.), ölçüm geometrisine (dedektör-kaynak arası mesafe), zırha (iç çapı, iç yüksekliği, dış çapı, dış yüksekliği, kullanılan malzeme ve yoğunluğu) ve numuneye (kimyasal bileşimi, elementlerin yüzde olarak konsantrasyonu, yoğunluğu) ait tüm parametrelerin tanıtılması

gerekmektedir. Tüm parametreler tanımlandıktan sonra, program öz-soğurma değerlerini parçacık etkileşim kesitlerini kullanarak hesaplar.

3.6. PHITS MC Programı ile Toplam Enerji Pik Veriminin Belirlenmesi

Tez çalışmasında tüm dedektörler, üretici firma tarafından verilen Çizelge 3.1'deki geometrik parametreler kullanılarak PHITS, GESPECOR ve DETEFF MC programlarında modellenmiştir. Modellenen HPGe dedektörlerin şematik gösterimi Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. a) PHITS, b) GESPECOR ve c) DETEFF MC programlarında modellenen HPGe dedektörlerin şematik gösterimi

PHITS MC (versiyon 3.24) ile dört dedektör, üretici firma tarafından verilen tüm geometrik parametreleri (kristal kalınlığı, yüksekliği, pencere kalınlığı, DL kalınlığı, v.b.), dedektör kristalinin, dedektör penceresinin, kristal etrafındaki malzemelerin özellikleri (bileşimleri, yoğunlukları) ve dedektör-kaynak mesafeleri [parameters] kısmında tanımlanarak modellenmiştir. Dedektörler modellendikten sonra [source] kısmında kaynak bilgileri tanımlanmıştır. Kaynak, geometrisine bağlı olarak s-type değeri ile belirlenmektedir. Nokta kaynak için s-type=9, hacimsel kaynak için s-type=1 seçilmiştir. Kristal, dedektör penceresi, kontak pim ve etraftaki hava dahil tüm malzemelerin yoğunluk ve elementel kompozisyon bilgileri [material] kısmında tanımlanmıştır. Küre, düzlem, silindir, vb. yüzeylerin tanımlamaları ve x,y,z düzlemindeki konumlandırılmaları [surface] kısmında yapılmıştır. PHITS'te yuvarlatılmış ön kenarlı germanyum kristali silindir ve toruslardan oluşurken, keskin kenarlı germanyum kristali ise silindirlerden oluşturulmuştur. Oluşturulan yüzeyler

cinsinden hücrelerin tanımlanması, hücrenin yüzeyin içinde mi dışında mı olduğu ve her bir hücrenin hangi malzemeden oluştuğu bilgisi ise [cell] kısmında yapılmaktadır. Ayrıca, $E_{min} < E_{energy} < E_{max}$ enerji bölgesindeki kitaplıkların kullanıldığı PHITS'te dedektörün aktif bölgesinden kaçan fotonlar, elektronlar ve pozitronlar tarafından taşınan enerji kaybını önlemek için kesme enerjileri 1 keV olarak seçilmiştir. Literatürde de benzer şekilde fotonlar için enerji kesme değeri 1 keV olarak seçilmiştir (Díaz ve Vargas, 2010; Peryoga ve diğerleri, 2017; Vasconcelos ve diğerleri, 2011). Dedektör ve kaynak ile ilgili tüm girdiler oluşturulduktan sonra tezde hesaplanması istenen FEPE değerleri için “T-deposit tally” adı verilen çetele kullanılmıştır. Bu çetele, dedektörün puls yükseklik modunda çalıştığı, belirli bir bölgede biriken enerji dağılımını vermektedir. Hesaplama sonunda bir çıktı (out) dosyası tanımlanan enerji aralığı için FEPE değerini belirsizliği ile birlikte vermektedir. PHITS'te hikaye sayısı (history number) tüm enerji değerlerinde 10^7 olarak belirlenmiştir. Hikaye sayısı, kabul edilebilir sayım istatistiğini sağlamak için tüm enerjilerde % 1'den daha az belirsizlik olacak şekilde seçilmiştir.

Tez çalışmasında PHITS MC programı ile dört dedektörde yuvarlatılmış kenar, keskin kenar, farklı DL ve bakır kontak pim kalınlıkları olmak üzere toplam ~2500 input dosyası çalıştırılarak FEPE değerleri elde edilmiştir.

3.7. GESPECOR ve DETEFF MC Programları ile Toplam Enerji Pik Veriminin Belirlenmesi

Dedektör ve kaynağın GESPECOR ve DETEFF gibi özel amaçlı yani gama spektrometresi için amaca yönelik olarak geliştirilen kodlarla modellenmesi PHITS gibi genel amaçlı kodlara göre daha kolaydır. Dedektör, kaynak, zırh, mesafe gibi tüm parametreler program içinde var olan yerlere girilerek modellenmektedir. PHITS'te olduğu gibi her iki programda da hikaye sayısı 10^7 seçilmiştir. Ancak programlar paket program olduğu için kullanıcıyı sınırlamaktadır.

GESPECOR'da kristali yuvarlak kenarlı olarak modelleyecek bir parametre olmadığından dedektörler keskin kenarlı olarak modellenir. Fakat DETEFF'de, PHITS'te olduğu gibi, dedektörler yuvarlatılmış kenar olarak modellenebilmektedir. Çünkü DETEFF, "köşe yarıçapı" (corner radius) değerinin girilmesine ve dedektör kristalinin yuvarlak kenar olarak

modellemesine izin verir. Çizelge 3.5'te PHITS, GESPECOR ve DETEFF MC programlarının modellemedeki farklılıkları verilmiştir.

Çizelge 3.5. PHITS, GESPECOR ve DETEFF MC programlarının modellemedeki farklılıkları

<i>Kristal Parametreleri</i>		MC Programı		
		PHITS	GESPECOR	DETEFF
Yuvarlatılmış ön kenar		✓	X	✓
Bakır kontak pim		✓	X	X
Ölü tabaka kalınlığı	Dış ölü tabaka	✓	✓	✓
	İç ölü tabaka	✓	X	✓
<i>Kaynak Parametreleri</i>		PHITS	GESPECOR	DETEFF
Kaynağın kimyasal kompozisyonu		✓	✓	X
Kabın alt ve yan kalınlığı		✓	X	X

3.8. Dedektör Karakterizasyon Prosedürü

Bu tezde uygulanan karakterizasyon prosedürünün ilk aşaması deneysel ve MC simülasyon hesaplamaları arasındaki verim oranlarının değerlendirilmesine dayanmaktadır. Toplam enerji pik verimi, kaynak-dedektör mesafesi gibi ölçüm koşullarına, foton enerjisine ve DL kalınlığı, uç kabı kalınlığı, dedektör pencere malzemesi vb. gibi dedektör özelliklerine bağlıdır. Birden çok parametreye bağlı olarak değişen FEPE deneysel ve simülasyon programları ile belirlenerek dedektör karakterizasyonu yapılmaktadır. Dolayısıyla karakterizasyonda ilk etapta üretici tarafından verilen değerler kullanılarak dedektörler modellenir. Elde edilen simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılır. Bu tez çalışmasında verimi etkileyen ve karakterizasyonda önemli olan tüm parametreler araştırılarak belirlenmiştir:

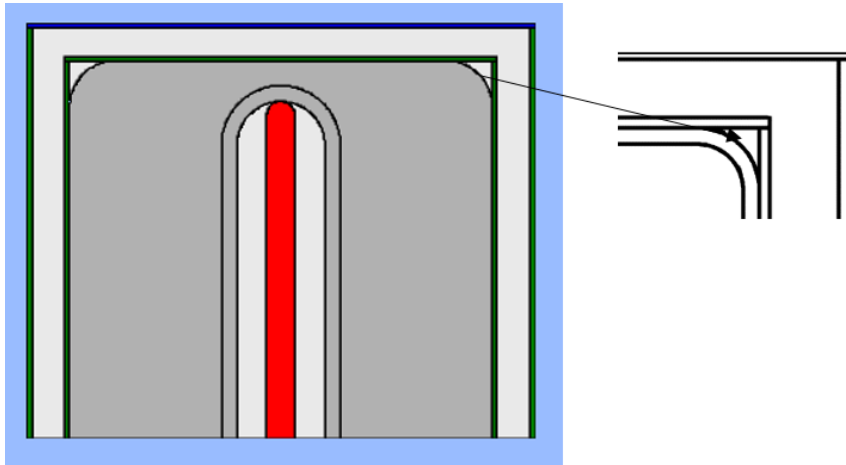
Bu parametreler:

- Yuvarlatılmış - keskin ön kenar geometrisi (Rounded- sharp front edge effect)
- Bakır kontak pim etkisi (Copper contact pin effect)
- Ölü tabaka kalınlığı (Dead layer thickness)

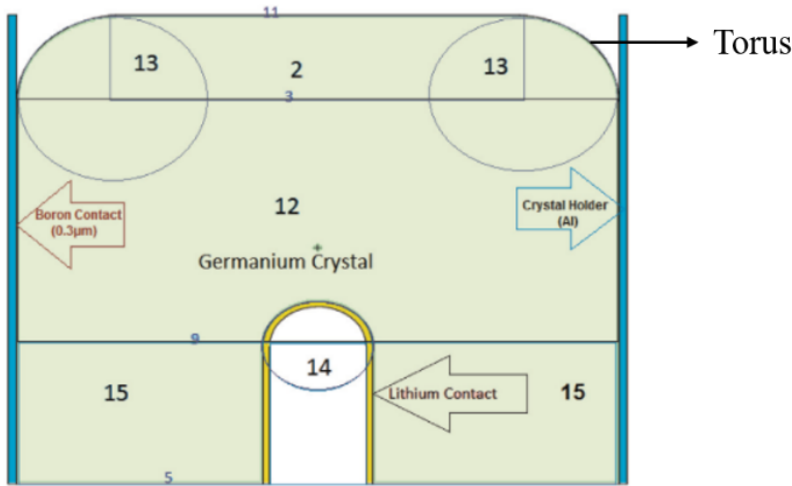
3.8.1. Yuvarlatılmış/keskin ön kenar etkisinin belirlenmesi

Verimi etkileyen birden çok parametre olduğundan karakterizasyona öncelikle bilinen ve kalınlığı zamanla değişmeyen parametrelerden başlanmıştır. Bu parametrelerden ilk ele alınan dedektör kristalinin ön kenarıdır. Dolayısıyla dedektör karakterizasyonunda ilk aşama kristalin yuvarlatılarak modellenmesi olmuştur. Kristalin ön kenar geometrisinin yuvarlatılmış veya keskin olarak modellenmesi aktif kristal hacmini, katı açığı ve dolayısıyla verimi değiştireceği için çok önemlidir. Tez çalışmasında ön kenar etkisi, tüm dedektörler için hem yuvarlatılmış hem de keskin kenar olarak modellenerek incelenmiştir. Bazı üretici firmalar kristalin ön kenarının yuvarlatma yarıçapını belirtirken, birçok üretici tarafından bu bilgi verilmemektedir. Tezde kullanılan dört dedektörden DET1 ve DET4'ün kalite güvence veri listelerinde yuvarlatma yarıçapları verilmişken DET2 ve DET3'ün veri listelerinde böyle bir bilgi verilmemiştir. DET1 ve DET4'ün veri listesinde ön kenarın yuvarlatma yarıçapı iç boşluk çapı/2 olarak verildiğinden aynı iç boşluk çapına (9 mm) sahip olan DET2 ve DET4 içinde yuvarlatma yarıçapı $9/2$: 4,5 mm olarak alınmıştır.

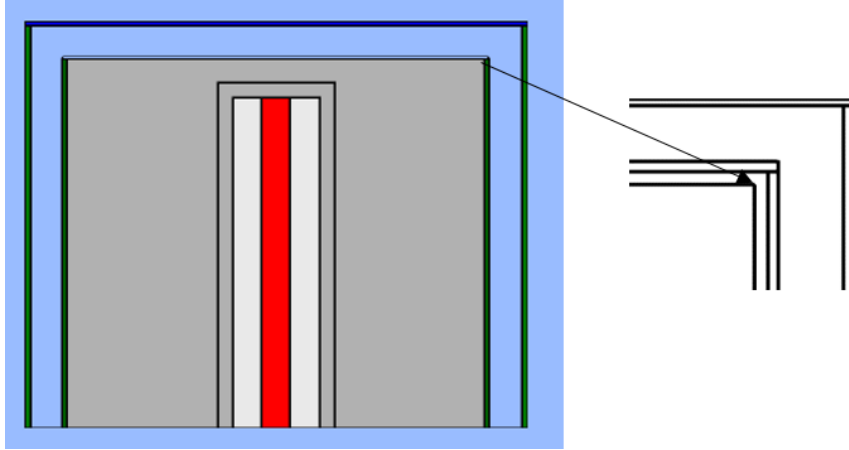
PHITS'te yuvarlatılmış ön kenar geometrisi silindir ve kürelerden oluşan dedektörün köşelerine eklenen toruslar ile oluşturulmuştur (Şekil 3.5). Torus, üç boyutlu uzayda bir dairenin, aynı düzlemde bulunan ancak onu kesmeyen bir doğru etrafında döndürülmesiyle oluşturulan simit şeklinde bir yüzeydir (Şekil 3.6). Keskin kenarlı germanyum dedektörü ise silindir ve kürelerden oluşturulmuştur (Şekil 3.7).



Şekil 3.5. Yuvarlatılmış ön kenar geometride PHITS MC kodu ile modellenmiş HPGe



Şekil 3.6. Torusun gösterimi (Azli ve Chaoui, 2015)



Şekil 3.7. Keskin ön kenar geometride PHITS MC kodu ile modellenmiş HPGe

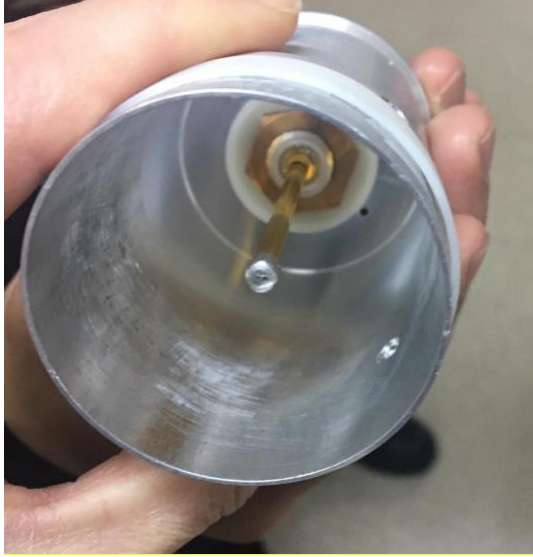
İlk aşamada yuvarlatılmış ve keskin ön kenar dikkate alınarak verim değerleri belirlenip karşılaştırılmıştır. Daha sonra diğer parametreler ön kenarı yuvarlatılmış olarak modellenen dedektörler üzerinde incelenmiştir.

GESPECOR'da kristal ön kenarı sadece keskin olarak, DETEFF'te ise sadece yuvarlatılmış olarak modellenebildiği için ön kenar geometrisinin hem yuvarlatılmış hem de keskin kenar olarak modellenerek farkının ortaya konmasında sadece PHITS MC kullanılmıştır.

3.8.2. Bakır kontak pim etkisinin belirlenmesi

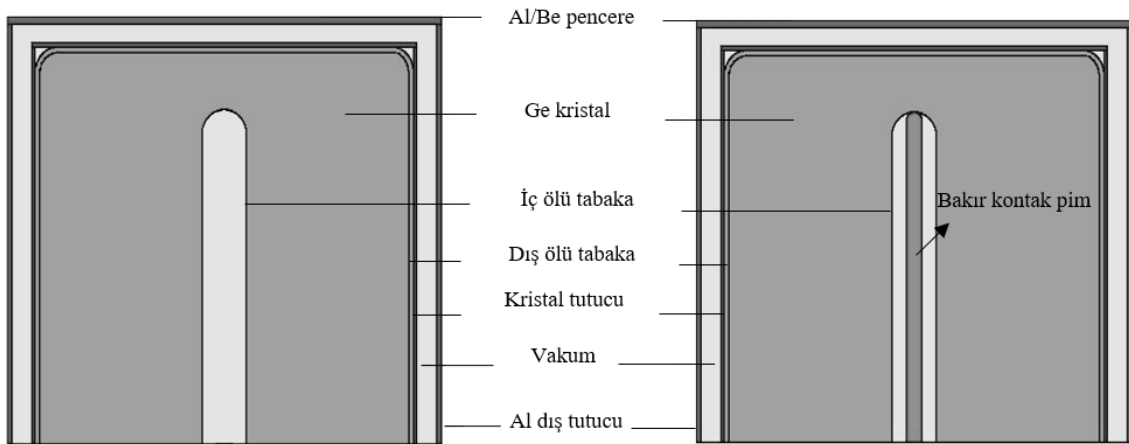
Dedektör karakterizasyonunda üretici tarafından bilgisi verilmeyen bakır pimin dedektör verimine etkisi de dikkate alınmıştır. Fakat GESPECOR ve DETEFF MC programlarında

pimle ilgili parametre tanımlanamadığından sadece PHITS MC kodu ile pimin etkisi incelenmiştir. Bakır pimin kalınlık aralığı, literatürdeki veriler ve TENMAK-NÜKEN’de bulunan sökülmüş bir dedektörün 4 mm olarak ölçülen bakır pim çapı göz önüne alınarak belirlenmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Bakır kontak pim

Tez içerisindeki dört HPGe dedektörün iç boşluğu ortasında ki bakır pim, kristalle temas edecek şekilde silindirik ve küre geometrileri kullanılarak modellenmiştir. Bakır pimin dedektör verimine etkisi, pimsiz ve pimli modelleme (Şekil 3.9) sonucunda elde edilen verim değerleri karşılaştırılarak incelenmiştir.

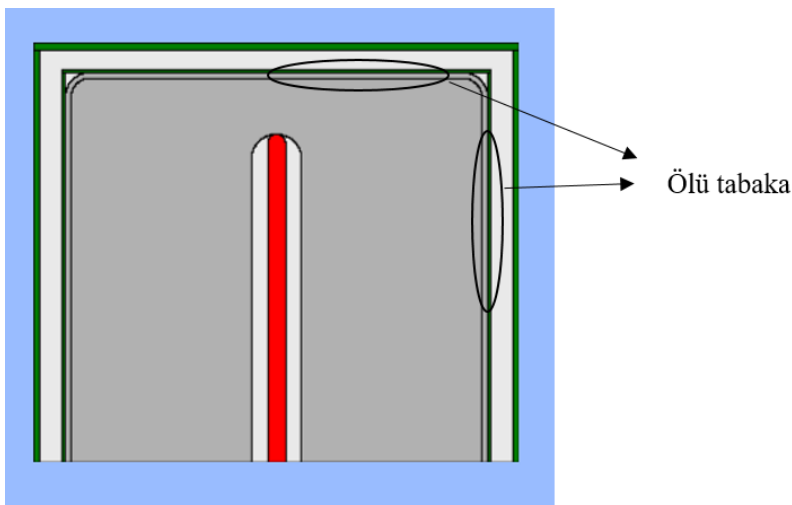


Şekil 3.9. PHITS MC ile bakır kontak pimli ve pimsiz modellenen dedektörün gösterimi

Pimin dedektör verimine etkisi öncelikle sabit mesafede (DET1 için 13,25 cm, DET2 için 7,5 cm, DET3 için 8 cm, DET4 için 14,9 cm mesafede) farklı bakır pim yarıçaplarında 81 keV-1408 keV aralığında ki 13 foton enerji değeri için incelenmiştir. Pim yarıçapı 0 mm (pimsiz) ve 1 mm'den 3,5 mm'ye 0,5 mm aralıklarla arttırılarak 6 farklı kalınlık için dikkate alınmıştır. Daha sonra bulgulara verildiği gibi düşük enerjide pimin bir etkisinin olmadığı, 569,3 keV ve daha yüksek enerjide ise verimde bir değişime neden olduğunun tespit edilmesi üzerine dört dedektörde de sadece 569,3 keV-1408 keV aralığında ki 10 enerji değeri için 5 cm, 10 cm, 15 cm ve 20 cm'lik dedektör-kaynak mesafesinde pim kalınlığının verime etkisi incelenmiştir.

3.8.3. Ölü tabaka kalınlığının belirlenmesi

Dedektör karakterizasyonunda kullanıcı tarafından belirlenmesi gereken en önemli parametre zamanla değişen ve dedektör verimini düşüren DL kalınlığıdır. Ge kristalinin etrafını saran bu tabaka sayıma katkı vermeyen ölü bir tabakadır (Şekil 3.10). Her dedektörün kullanım koşulları farklı olduğundan kristalin ölü tabaka kalınlığının farklı miktarlarda artması beklenir. Bu nedenle tez çalışmasında, referans nokta kaynaklar kullanılarak belirlenen deneysel verim değerleri simülasyon programından elde edilen verim değerleri ile karşılaştırılarak optimum ölü tabaka kalınlıkları belirlenmiştir. Dört dedektör için de mevcut optimum DL kalınlığı ayrı ayrı belirlenmiştir.



Şekil 3.10. PHITS MC ile modellenen ölü tabakanın gösterimi

Standart nokta kaynaklardaki her bir foton enerjisi için PHITS, GESPECOR ve DETEFF MC programları ile DL kalınlığı 0,7 mm değerinden başlanarak 0,1 mm aralıklarla 1,3 mm'ye kadar artırılarak verim hesaplanmıştır. Böylece deneysel fotopik verimine en yakın hesaplama sonucunun elde edildiği iki DL kalınlığı belirlenmiştir. Bu iki değer arası 0,01mm aralıklarla tekrar taranarak elde edilen verim değerleri, deneysel verimle karşılaştırılarak en yakın uyumu veren DL kalınlığı 10 μ m mertebesinde hassasiyetle tespit edilmiştir.

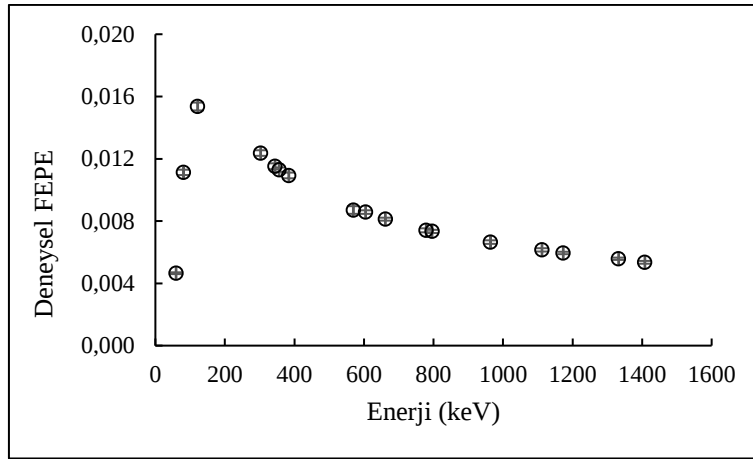
4. BULGULAR

4.1. Yuvarlatılmış/Keskin Ön Kenar Etkisi

Her bir dedektörün Ge kristali PHITS MC ile hem yuvarlatılmış hem de keskin kenar olarak modellenerek ön kenar geometri etkisi incelenmiştir.

4.1.1. DET1 dedektörü yuvarlatılmış/keskin ön kenar etkisi

DET1 p-tipi HPGe dedektöründe nokta kaynaklarla alınan spektrumların değerlendirilmesi sonucu belirlenen deneysel verim değerleri Şekil 4.1 ve Çizelge 4.1’de verilmektedir.



Şekil 4.1. DET1 dedektörünün deneysel verim eğrisi

DET1 dedektörünün Ge kristali PHITS MC ile hem yuvarlatılmış hem de keskin kenar olarak modellenerek ön kenar geometri etkisi incelenmiştir. MC ile hesaplanan verim ile deneysel verim değerlerinin karşılaştırılması, dedektörün üretici tarafından verilen DL kalınlığı (0,7 mm) ve karakterizasyon sonucu belirlenen 1,29 mm kalınlıklarında elde edilen verim değerlerinin deneysel değerden % farkları alınarak yapılmıştır (Çizelge 4.1). Üretici DL kalınlığı göz önüne alındığında, deneysel sonuçlar ile PHITS hesaplamaları arasında 59,5 keV’de keskin kenar için %115’e ve yuvarlatılmış kenar için %100’e varan farklılar gözlenmiştir. Enerji arttıkça farkın azaldığı, 300 keV üzerindeki enerjilerde MC sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki farkın yaklaşık %7 civarında olduğu görülmektedir. 300 keV altındaki büyük farklılığın en önemli sebebinin zamanla değişen DL kalınlığı olduğu düşünüldüğünden 0,7 -1,3 mm arasında DL taranarak optimum DL kalınlığı belirlenmiştir.

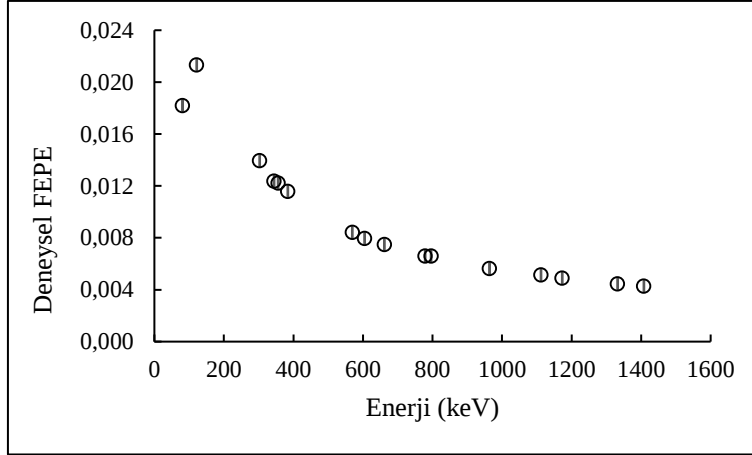
Optimum DL dikkate alınarak elde edilen simüle edilmiş verim değerleri ile deneysel değerler arasındaki farklar incelendiğinde ise en büyük farkın keskin kenarlı geometride %11, yuvarlatılmış kenarda %3,9 olduğu görülmektedir. 1,29 mm DL kalınlığındaki hesaplamalarda 300 keV üzerindeki enerjiler için bu farklılıkların çoğunlukla %1'in altına düştüğü ve belirsizlik sınırları içinde kaldığı görülmüştür. 59,5 keV, 81 keV ve 121,8 keV enerjilerde yuvarlatılmış ve keskin kenar ile elde edilen verim değerleri arasındaki farkın sırasıyla %7,1, %1,8 ve %2,3, orta ve yüksek enerjilerde ise % 0,6'dan az olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.1. DET1 dedektörünün deneysel verim ve farklı ön kenar geometrileri için PHITS ile hesaplanan verim değerlerinin karşılaştırılması

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Deneysel verim (% belirsizlik)	0,7 mm üretici ölü tabaka değeri				1,29 mm optimum ölü tabaka değeri			
			PHITS ile hesaplanan verim		Deneysel verimden % fark		PHITS ile hesaplanan verim		Deneysel verimden % fark	
			Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar	Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar	Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar	Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar
²⁴¹ Am	59,54	0,00465 (1,23)	0,00999	0,00930	115	100	0,00516	0,00483	11,0	3,9
¹³³ Ba	81,00	0,01113 (1,55)	0,01560	0,01488	40,2	33,7	0,01148	0,01098	3,1	1,3
¹⁵² Eu	121,78	0,01536 (1,64)	0,01811	0,01767	17,9	15,0	0,01580	0,01545	2,9	0,6
¹³³ Ba	302,85	0,01237 (1,45)	0,01332	0,01322	7,7	6,9	0,01244	0,01237	0,6	0,0
¹⁵² Eu	344,28	0,01152 (1,65)	0,01241	0,01233	7,7	7,0	0,01164	0,01157	1,0	0,4
¹³³ Ba	356,01	0,01130 (1,24)	0,01218	0,01210	7,8	7,1	0,01140	0,01135	0,9	0,5
¹³³ Ba	383,85	0,01093 (1,67)	0,01169	0,01162	6,9	6,3	0,01096	0,01090	0,3	0,3
¹³⁴ Cs	569,33	0,00871 (2,82)	0,00944	0,00938	8,3	7,7	0,00886	0,00882	1,7	1,3
¹³⁴ Cs	604,72	0,00858 (1,33)	0,00914	0,00909	6,5	5,9	0,00858	0,00855	0,3	0,3
¹³⁷ Cs	661,66	0,00812 (1,16)	0,00870	0,00866	7,1	6,6	0,00818	0,00815	0,7	0,3
¹⁵² Eu	778,91	0,00741 (1,73)	0,00795	0,00791	7,3	6,8	0,00747	0,00745	0,9	0,6
¹³⁴ Cs	795,86	0,00733 (1,41)	0,00785	0,00782	7,0	6,6	0,00739	0,00736	0,7	0,4
¹⁵² Eu	964,08	0,00665 (1,71)	0,00707	0,00705	8,2	7,7	0,00668	0,00666	0,4	0,1
¹⁵² Eu	1112,07	0,00615 (1,74)	0,00654	0,00651	6,3	5,9	0,00617	0,00615	0,3	0,0
⁶⁰ Co	1173,23	0,00595 (1,32)	0,00635	0,00633	6,7	6,4	0,00600	0,00599	0,8	0,6
⁶⁰ Co	1332,49	0,00558 (1,33)	0,00592	0,00589	6,0	5,6	0,00559	0,00558	0,2	0,1
¹⁵² Eu	1408,01	0,00535 (1,69)	0,00574	0,00572	7,3	6,9	0,00542	0,00541	1,3	1,0

4.1.2. DET2 dedektörü yuvarlatılmış/keskin ön kenar etkisi

DET2 p-tipi HPGe dedektöründe nokta kaynaklarla alınan spektrumların değerlendirilmesi sonucu belirlenen deneysel verim değerleri Şekil 4.2 ve Çizelge 4.2’de verilmektedir.



Şekil 4.2. DET2 dedektörünün deneysel verim eğrisi

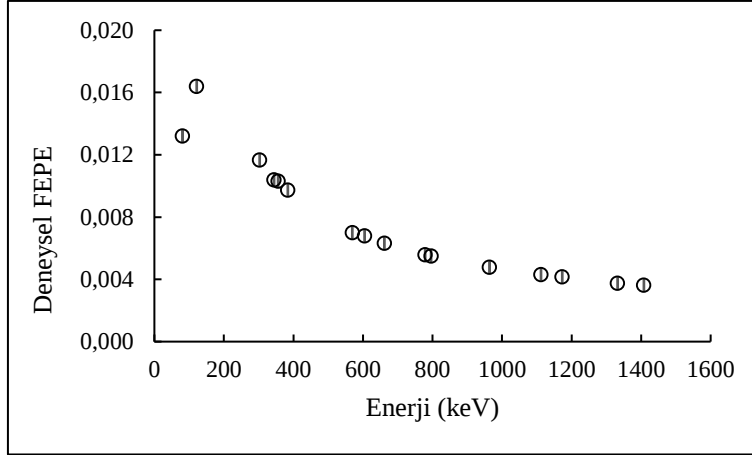
MC ile hesaplanan verim ile deneysel verim değerlerinin karşılaştırılması, dedektörün üretici tarafından verilen DL kalınlığı (0,7 mm) ve karakterizasyon sonucu belirlenen 1,19 mm kalınlıklarında elde edilen verim değerlerinin deneysel değerden % farkları alınarak yapılmıştır (Çizelge 4.2). Üretici DL kalınlığı göz önüne alındığında, deneysel sonuçlar ile PHITS hesaplamaları arasında 81 keV’de keskin kenar için %20’ye ve yuvarlatılmış kenar için %15’e varan farklılar gözlenmiştir. Enerji arttıkça fark azalmakta, 300 keV üzerindeki enerjilerde MC sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki fark DET1’de olduğu gibi yaklaşık %7 civarındadır. 300 keV altındaki büyük farklılığın en önemli sebebinin zamanla değişen DL kalınlığı olduğu düşünüldüğünden 0,7 -1,3 mm arasında DL taranarak optimum DL kalınlığı belirlenmiştir. Optimum DL dikkate alınarak elde edilen simüle edilmiş verim değerleri ile deneysel değerler arasındaki farklar incelendiğinde ise en büyük farkın keskin kenarlı geometride %7,7, yuvarlatılmış kenarda %2,5 olduğu görülmektedir. 1,19 mm DL kalınlığındaki hesaplamalarda 300 keV üzerindeki enerjiler için bu farklılıkların en fazla %1,8 olduğu ve tüm sonuçların belirsizlik sınırları içinde kaldığı görülmüştür. 81 keV ve 121,8 keV enerjilerde yuvarlatılmış ve keskin kenar ile elde edilen verim değerleri arasındaki farkın sırasıyla % 5 ve % 0,2, orta ve yüksek enerjilerde ise % 1’den az olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.2. DET2 dedektörünün deneysel verim ve farklı ön kenar geometrileri için PHITS ile hesaplanan verim değerlerinin karşılaştırılması

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Deneysel verim (% belirsizlik)	0,7 mm üretici ölü tabaka değeri				1,29 mm optimum ölü tabaka değeri			
			PHITS ile hesaplanan verim		Deneysel verimden % fark		PHITS ile hesaplanan verim		Deneysel verimden % fark	
			Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar	Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar	Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar	Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar
²⁴¹ Am	59,54	0,00465 (1,23)	0,00999	0,00930	114,8	100,0	0,00516	0,00483	11,0	3,9
¹³³ Ba	81,00	0,01113 (1,55)	0,01560	0,01488	40,2	33,7	0,01148	0,01098	3,1	1,3
¹⁵² Eu	121,78	0,01536 (1,64)	0,01811	0,01767	17,9	15,0	0,01580	0,01545	2,9	0,6
¹³³ Ba	302,85	0,01237 (1,45)	0,01332	0,01322	7,7	6,9	0,01244	0,01237	0,6	0,0
¹⁵² Eu	344,28	0,01152 (1,65)	0,01241	0,01233	7,7	7,0	0,01164	0,01157	1,0	0,4
¹³³ Ba	356,01	0,01130 (1,24)	0,01218	0,01210	7,8	7,1	0,01140	0,01135	0,9	0,5
¹³³ Ba	383,85	0,01093 (1,67)	0,01169	0,01162	6,9	6,3	0,01096	0,01090	0,3	0,3
¹³⁴ Cs	569,33	0,00871 (2,82)	0,00944	0,00938	8,3	7,7	0,00886	0,00882	1,7	1,3
¹³⁴ Cs	604,72	0,00858 (1,33)	0,00914	0,00909	6,5	5,9	0,00858	0,00855	0,3	0,3
¹³⁷ Cs	661,66	0,00812 (1,16)	0,00870	0,00866	7,1	6,6	0,00818	0,00815	0,7	0,3
¹⁵² Eu	778,91	0,00741 (1,73)	0,00795	0,00791	7,3	6,8	0,00747	0,00745	0,9	0,6
¹³⁴ Cs	795,86	0,00733 (1,41)	0,00785	0,00782	7,0	6,6	0,00739	0,00736	0,7	0,4
¹⁵² Eu	964,08	0,00665 (1,71)	0,00707	0,00705	8,2	7,7	0,00668	0,00666	0,4	0,1
¹⁵² Eu	1112,07	0,00615 (1,74)	0,00654	0,00651	6,3	5,9	0,00617	0,00615	0,3	0,0
⁶⁰ Co	1173,23	0,00595 (1,32)	0,00635	0,00633	6,7	6,4	0,00600	0,00599	0,8	0,6
⁶⁰ Co	1332,49	0,00558 (1,33)	0,00592	0,00589	6,0	5,6	0,00559	0,00558	0,2	0,1
¹⁵² Eu	1408,01	0,00535 (1,69)	0,00574	0,00572	7,3	6,9	0,00542	0,00541	1,3	1,0

4.1.3. DET3 dedektörü yuvarlatılmış/keskin ön kenar etkisi

DET3 p-tipi HPGe dedektöründe nokta kaynaklarla alınan spektrumların değerlendirilmesi sonucu belirlenen deneysel verim değerleri Şekil 4.3 ve Çizelge 4.3'te verilmektedir.



Şekil 4.3 DET3 dedektörünün deneysel verim eğrisi

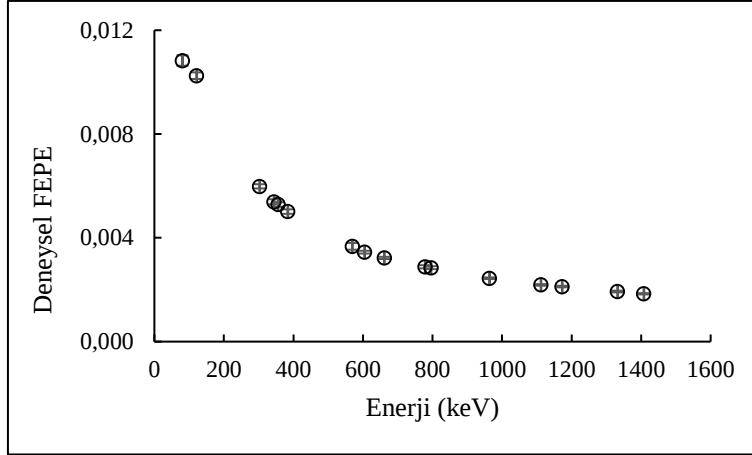
MC ile hesaplanan verim ile deneysel verim değerlerinin karşılaştırılması, dedektörün üretici tarafından verilen DL kalınlığı (0,7 mm) ve karakterizasyon sonucu belirlenen 1,71 mm kalınlıklarında elde edilen verim değerlerinin deneysel değerden % farkları alınarak yapılmıştır (Çizelge 4.3). Üretici DL kalınlığı göz önüne alındığında, deneysel sonuçlar ile PHITS hesaplamaları arasında 81 keV'de keskin kenar için %49'a ve yuvarlatılmış kenar için %42'lere varan farklılar gözlenmiştir. 300 keV üzerindeki enerjilerde MC sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki farkın % 15 civarında olduğu görülmektedir. 300 keV altındaki büyük farklılığın en önemli sebebinin zamanla değişen DL kalınlığı olduğu düşünüldüğünden 0,7 -1,8 mm arasında DL taranarak optimum DL kalınlığı belirlenmiştir. Optimum DL dikkate alınarak elde edilen simüle edilmiş verim değerleri ile deneysel değerler arasındaki farklar incelendiğinde ise en büyük farkın keskin kenarlı geometride %8,2, yuvarlatılmış kenarda %2,5 olduğu görülmektedir. 1,71 mm DL kalınlığındaki hesaplamalarda 300 keV üzerindeki enerjiler için bu farklılıkların en fazla %1,6 olduğu ve tüm sonuçların belirsizlik sınırları içinde olduğu görülmüştür. 81 keV ve 121,8 keV enerjilerde yuvarlatılmış ve keskin kenar ile elde edilen verim değerleri arasındaki farkın sırasıyla % 5,7 ve % 0,8, orta ve yüksek enerjide ise % 1'den az olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.3. DET3 dedektörünün deneysel verim ve farklı ön kenar geometrileri için PHITS ile hesaplanan verim değerlerinin karşılaştırılması

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Deneysel verim (% belirsizlik)	0,7 mm üretici ölü tabaka değeri				1,71 mm optimum ölü tabaka değeri			
			PHITS ile hesaplanan verim		Deneysel verimden % fark		PHITS ile hesaplanan verim		Deneysel verimden % fark	
			Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar	Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar	Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar	Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar
¹³³ Ba	81,00	0,01321 (1,52)	0,01963	0,01870	48,6	41,6	0,01429	0,01288	8,2	2,5
¹⁵² Eu	121,78	0,01641 (1,74)	0,02193	0,02140	33,6	30,4	0,01676	0,01664	2,2	1,4
¹³³ Ba	302,85	0,01168 (1,52)	0,01350	0,01339	15,6	14,7	0,01178	0,01159	0,9	0,7
¹⁵² Eu	344,28	0,01041 (1,71)	0,01227	0,01211	18,0	16,4	0,01054	0,01050	1,3	0,9
¹³³ Ba	356,01	0,01032 (1,24)	0,01194	0,01179	15,7	14,3	0,01026	0,01023	0,6	0,9
¹³³ Ba	383,85	0,00975 (1,73)	0,01116	0,01109	14,5	13,8	0,00988	0,00963	1,3	1,2
¹³⁴ Cs	569,33	0,00698 (3,44)	0,00821	0,00815	17,4	16,4	0,00711	0,00709	1,6	1,4
¹³⁴ Cs	604,72	0,00681 (1,51)	0,00784	0,00780	15,3	14,7	0,00682	0,00678	0,3	0,2
¹³⁷ Cs	661,66	0,00633 (1,25)	0,00731	0,00728	15,5	15,0	0,00634	0,00633	0,2	0,0
¹⁵² Eu	778,91	0,00558 (2,02)	0,00647	0,00645	16,0	15,6	0,00561	0,00560	0,6	0,5
¹³⁴ Cs	795,86	0,00551 (1,67)	0,00638	0,00635	16,0	15,4	0,00553	0,00552	0,5	0,3
¹⁵² Eu	964,08	0,00479 (2,04)	0,00552	0,00551	15,4	15,1	0,00481	0,00480	0,5	0,4
¹⁵² Eu	1112,07	0,00432 (2,06)	0,00498	0,00496	15,3	15,0	0,00433	0,00433	0,3	0,2
⁶⁰ Co	1173,23	0,00418 (1,67)	0,00478	0,00477	14,6	14,4	0,00416	0,00416	0,2	0,3
⁶⁰ Co	1332,49	0,00377 (1,68)	0,00435	0,00434	15,7	15,5	0,00379	0,00379	0,7	0,7
¹⁵² Eu	1408,01	0,00364 (1,91)	0,00418	0,00418	14,9	14,8	0,00365	0,00363	0,2	0,1

4.1.4. DET4 dedektörü yuvarlatılmış/keskin ön kenar etkisi

DET4 n-tipi HPGe dedektöründe nokta kaynaklarla alınan spektrumların değerlendirilmesi sonucu belirlenen deneysel verim değerleri Şekil 4.4 ve Çizelge 4.4'te verilmektedir.



Şekil 4.4. DET4 dedektörünün deneysel verim eğrisi

MC ile hesaplanan verim ile deneysel verim değerlerinin karşılaştırılması, dedektörün üretici tarafından verilen DL kalınlığı (0,9 mm) ve karakterizasyon sonucu belirlenen 2,7 mm kalınlıklarında elde edilen verim değerlerinin deneysel değerden % farkları alınarak yapılmıştır (Çizelge 4.4). Üretici DL kalınlığı göz önüne alındığında, deneysel sonuçlar ile PHITS hesaplamaları arasında 81 keV'de keskin kenar için %15'e ve yuvarlatılmış kenar için %10'lara varan farklılar gözlenmiştir. Enerji arttıkça farkın azaldığı, 300 keV üzerindeki enerjilerde MC sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki farkın % 15 civarında olduğu görülmektedir. 300 keV altındaki büyük farklılığın en önemli sebebinin zamanla değişen DL kalınlığı olduğu düşünüldüğünden 0,9 - 3 mm arasında DL taranarak optimum DL kalınlığı belirlenmiştir. Optimum DL dikkate alınarak elde edilen simüle edilmiş verim değerleri ile deneysel değerler arasındaki farklar incelendiğinde ise en büyük farkın keskin kenarlı geometride %7,5, yuvarlatılmış kenarda %1,3 olduğu görülmektedir. 1,71 mm DL kalınlığındaki hesaplamalarda 300 keV üzerindeki enerjiler için bu farklılıkların en fazla %1,1 olduğu ve tüm sonuçların belirsizlik sınırları içinde olduğu görülmüştür.

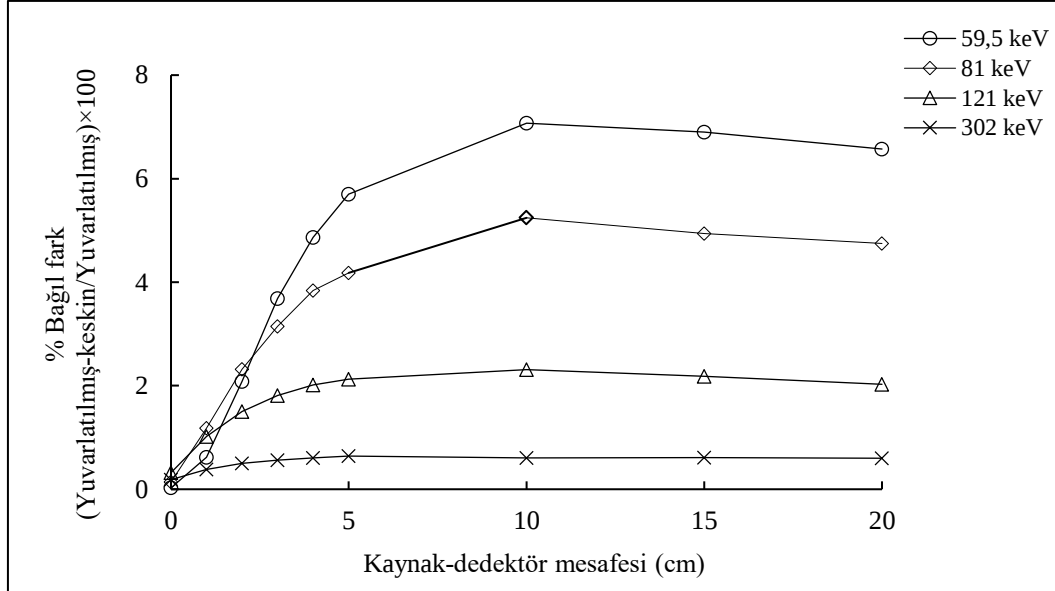
81 keV ve 121,8 keV enerjilerde yuvarlatılmış ve keskin kenar ile elde edilen verim değerleri arasındaki farkın sırasıyla % 6,2 ve % 2,1, orta ve yüksek enerjide ise % 1'den az olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.4. DET4 dedektörünün deneysel verim ve farklı ön kenar geometrileri için PHITS ile hesaplanan verim değerlerinin karşılaştırılması

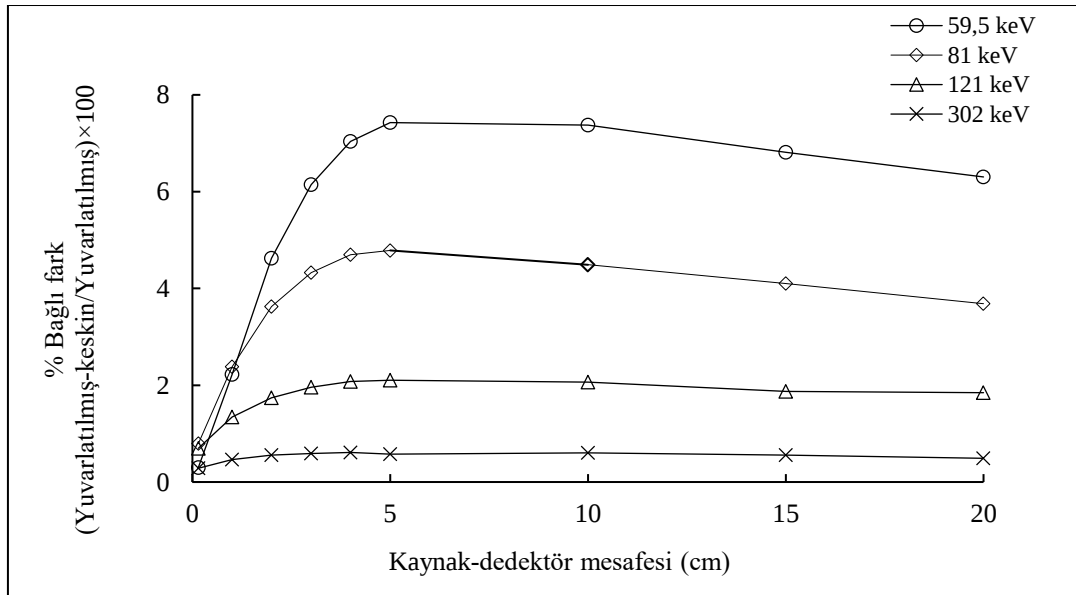
Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Deneysel verim (% belirsizlik)	0,9 mm üretici ölü tabaka değeri			2,7 mm optimum ölü tabaka değeri		
			PHITS ile hesaplanan verim			PHITS ile hesaplanan verim		
			Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar	Deneyisel verimden % fark	Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar	Deneyisel verimden % fark
¹³³ Ba	81,00	0,01083 (1,84)	0,01243	0,01193	14,7	0,01164	0,01097	7,5
¹³² Eu	121,78	0,01025 (1,25)	0,01144	0,01120	11,7	0,01053	0,01018	2,8
¹³³ Ba	302,85	0,00598 (1,36)	0,00663	0,00661	10,8	0,00604	0,00599	0,9
¹³² Eu	344,28	0,00539 (1,84)	0,00604	0,00600	12,1	0,00545	0,00541	1,1
¹³³ Ba	356,01	0,00528 (1,68)	0,00588	0,00586	11,2	0,00531	0,00527	0,4
¹³³ Ba	383,85	0,00501 (1,72)	0,00557	0,00554	11,1	0,00505	0,00497	0,9
¹³⁴ Cs	569,33	0,00367 (3,56)	0,00417	0,00415	13,5	0,00370	0,00364	0,9
¹³⁴ Cs	604,72	0,00345 (1,54)	0,00401	0,00396	16,3	0,00349	0,00347	1,1
¹³⁷ Cs	661,66	0,00323 (1,32)	0,00374	0,00372	15,8	0,00325	0,00324	0,8
¹⁵² Eu	778,91	0,00288 (2,12)	0,00331	0,00330	14,8	0,00286	0,00286	1,0
¹³⁴ Cs	795,86	0,00285 (2,04)	0,00327	0,00325	14,8	0,00282	0,00282	1,1
¹⁵² Eu	964,08	0,00244 (1,25)	0,00286	0,00284	17,0	0,00245	0,00245	0,5
¹⁵² Eu	1112,07	0,00219 (1,35)	0,00258	0,00256	18,0	0,00220	0,00220	0,6
⁶⁰ Co	1173,23	0,00212 (1,48)	0,00249	0,00247	17,1	0,00213	0,00212	0,5
⁶⁰ Co	1332,49	0,00193 (1,68)	0,00226	0,00225	16,8	0,00195	0,00192	0,8
¹⁵² Eu	1408,01	0,00184 (1,37)	0,00217	0,00217	17,7	0,00185	0,00184	0,3

Ön kenar geometri etkisi, kaynağın bulunduğu konuma dolayısıyla katı açığa bağlı olarak değişeceği için dört dedektörde etkinin baskın olduğu düşük enerji bölgesinde (59,5 keV, 81 keV, 121,8 keV ve 302,9 keV) farklı mesafelerde (dedektör penceresi (uç kabı) üzerinde, 1

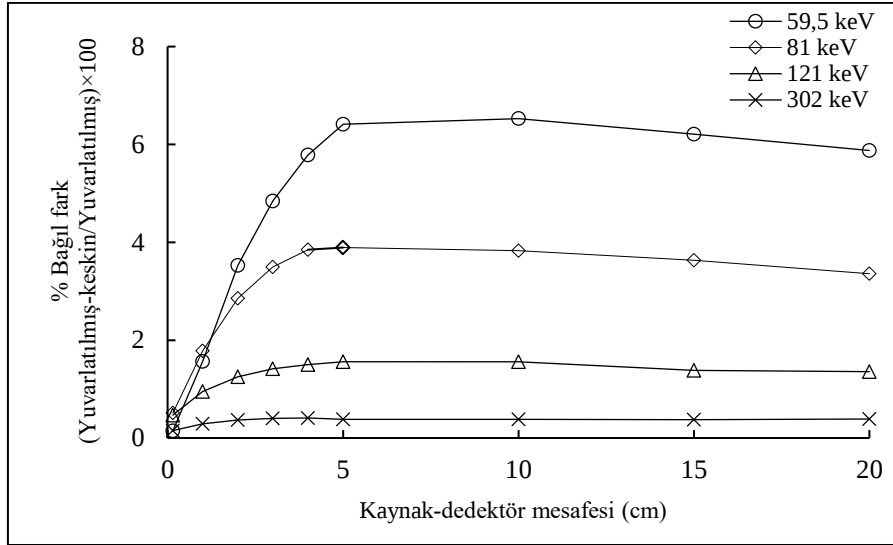
cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm ve 20 cm) verim değerleri her iki ön kenar geometrisinde dikkate alınarak elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Dört dedektör için kaynak dedektör mesafesine göre yuvarlatılmış ve keskin kenar modelleme ile elde edilen verim değerleri Çizelge 4.5'te ve aralarındaki bağıl farklar Şekil 4.5-4.8'de verilmektedir.



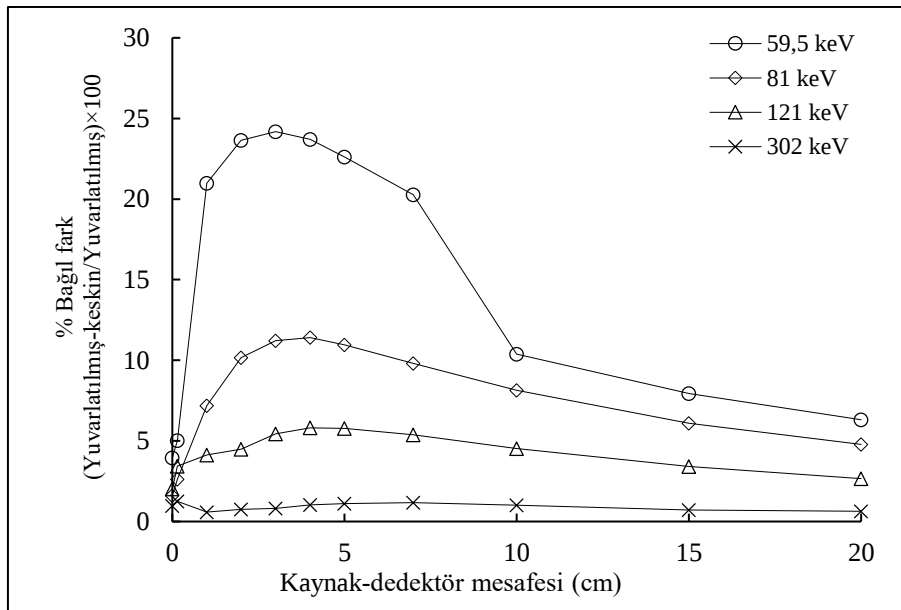
Şekil 4.5. DET1 dedektörü için kaynak-dedektör mesafesine göre yuvarlatılmış ve keskin kenar arasındaki yüzde bağıl farkların değişimi



Şekil 4.6. DET2 dedektörü için kaynak-dedektör mesafesine göre yuvarlatılmış ve keskin kenar arasındaki yüzde bağıl farkların değişimi



Şekil 4.7. DET3 dedektörü için kaynak-dedektör mesafesine göre yuvarlatılmış ve keskin kenar arasındaki yüzde bağıl farkların değişimi



Şekil 4.8. DET4 dedektörü için kaynak-dedektör mesafesine göre yuvarlatılmış ve keskin kenar arasındaki yüzde bağıl farkların değişimi

Çizelge 4.5. DET1, DET2, DET3 ve DET4 dedektörlerinin seçilmiş farklı kaynak-dedektör mesafeleri için keskin ve yuvarlatılmış ön kenar geometrisinde PHITS ile hesaplanan verim değerlerinin karşılaştırılması

Radioaktif çekirdek	Enerji (keV)	Uç kabı üzerinde				5 cm mesafede				10 cm mesafede				20 cm mesafede			
		Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar	% Fark*		Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar	% Fark*		Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar	% Fark*		Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar	% Fark*	
DET1 (p-tp)	²⁴¹ Am	0,03618	0,03617	0,0		0,01929	0,01825	5,7		0,00809	0,00756	7,1		0,00249	0,00234	6,6	
	¹³³ Ba	0,11425	0,11409	0,1		0,04596	0,04411	4,2		0,01819	0,01728	5,2		0,00553	0,00531	4,2	
	¹⁵² Eu	0,20659	0,20593	0,3		0,06414	0,06280	2,1		0,02497	0,02441	2,3		0,00769	0,00754	2,0	
	¹³³ Ba	0,18899	0,18864	0,2		0,04743	0,04713	0,6		0,01920	0,01908	0,6		0,00626	0,00622	0,6	
DET2 (p-tp)	²⁴¹ Am	0,06005	0,05987	0,3		0,01818	0,01693	7,4		0,00631	0,00588	7,4		0,00181	0,00170	6,3	
	¹³³ Ba	0,14749	0,14633	0,8		0,03368	0,03214	4,8		0,01148	0,01098	4,5		0,00328	0,00316	3,7	
	¹⁵² Eu	0,20506	0,20364	0,7		0,03878	0,03798	2,1		0,01343	0,01316	2,1		0,00394	0,00387	1,8	
	¹³³ Ba	0,13740	0,13701	0,3		0,02409	0,02395	0,6		0,00892	0,00886	0,6		0,00277	0,00276	0,5	
DET3 (p-tp)	²⁴¹ Am	0,03368	0,03363	0,1		0,01134	0,01065	6,4		0,00401	0,00376	6,5		0,00115	0,00109	5,9	
	¹³³ Ba	0,11064	0,11008	0,5		0,02688	0,02587	3,9		0,00923	0,00889	3,8		0,00265	0,00256	3,4	
	¹⁵² Eu	0,17381	0,17300	0,5		0,03373	0,03321	1,6		0,01174	0,01156	1,6		0,00346	0,00341	1,4	
	¹³³ Ba	0,12591	0,12572	0,2		0,02226	0,02218	0,4		0,00827	0,00823	0,4		0,00258	0,00257	0,4	
DET4 (n-tp)	²⁴¹ Am	0,33743	0,32460	4,0		0,07500	0,06117	22,6		0,02403	0,02177	10,4		0,00688	0,00647	6,3	
	¹³³ Ba	0,33101	0,32578	1,6		0,06777	0,06107	11,0		0,02350	0,02173	8,1		0,00678	0,00647	4,8	
	¹⁵² Eu	0,30120	0,29524	2,0		0,05908	0,05585	5,8		0,02094	0,02003	4,5		0,00618	0,00602	2,7	
	¹³³ Ba	0,16023	0,15868	1,0		0,03051	0,03017	1,1		0,01158	0,01147	1,0		0,00363	0,00361	0,6	

Çizelge 4.5 ve kaynak-dedektör mesafesine göre yuvarlatılmış kenar ve keskin kenar arasındaki yüzde bağıl farkların değişim grafikleri incelendiğinde tüm dedektörlerde, tüm mesafelerde 59,5 keV ve 81 keV’de bağıl farklılıkların daha büyük olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuca göre, gama spektrometresinde düşük enerji bölgesi olarak tanımlanan <100 keV enerjiye sahip radyoaktif çekirdeklerle çalışılırken dedektörün ön kenarının kesinlikle yuvarlatılmış olarak modellenmesi gerekir.

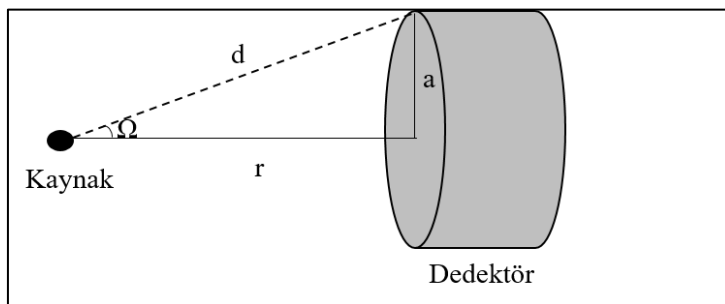
Tüm kaynak-detektör mesafelerindeki bağıl farklılıklar, katı açı farklılığı ile açıklanabilir. *Katı açı* (Ω), belirli bir nesnenin belirli bir noktadan görüş alanı miktarının bir ölçüsüdür. Burada, kaynağın bulunduğu yere göre dedektörün gördüğü açıdır ve kaynağa bakan dedektör yüzeyi üzerinde bir integral ile tanımlanır.

$$\Omega = \int \frac{\cos\alpha}{r^2} dA \quad (4.1)$$

Burada r , kaynak ile yüzey elemanı dA arasındaki mesafe, α ise yüzey elemanının normali ile kaynak yönü arasındaki açıdır. Dairesel silindirik bir dedektör ve noktasal bir radyasyon kaynak durumu için katı açı:

$$\Omega = 2\pi \left[1 - \frac{d}{d^2 + a^2} \right] \quad (4.2)$$

Burada d , kaynak-dedektör mesafesi, a ise dedektörün yarıçapıdır (Şekil 4.9).



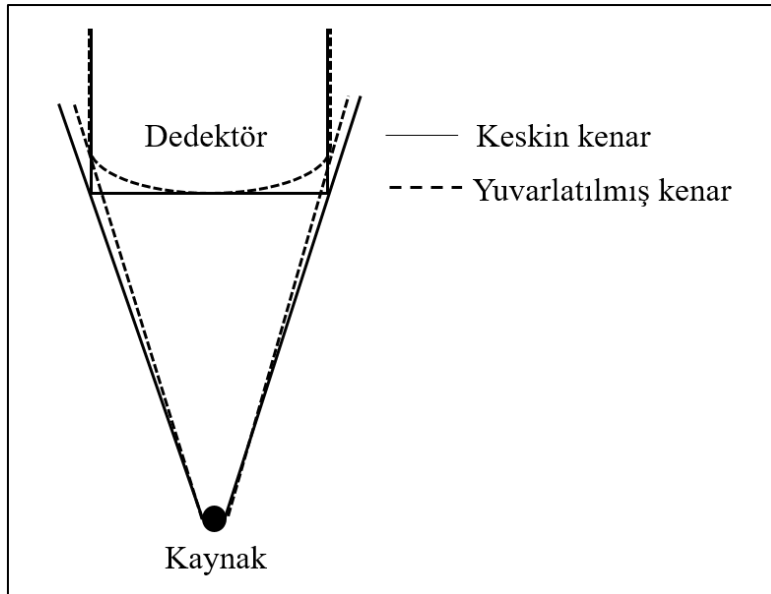
Şekil 4.9. Silindirik dedektör ve noktasal kaynak durumu için katı açı gösterimi

Her dört dedektörde de uç kabı üzerindeki geometride yuvarlatılmış kenar ile keskin kenar arasındaki farkın en az olduğu, yani dedektör penceresi üzerindeki sayımlarda ön kenar geometrisinin bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Bunun nedeni, uç kabı üzerindeki

sayımlarda arada mesafe olmadığından iki geometri arasında bir katı açı farklılığı olmamasıdır. DET1, DET2 ve DET3 p-tipi dedektörlerin benzer davranış sergiledikleri görülmektedir (Şekil 4.5, 4.6 ve 4.7). 59,5 ve 81 keV'de, uç kapaktaki ve 1 cm mesafedeki bağıl farklar % 2 civarında iken, kaynak-dedektör mesafesi arttıkça farklar artmaktadır. 5 cm mesafeye kadar farklar DET1'de % 5,7, DET2'de % 7,4, DET3'te % 6,4, DET4'te % 22,6 iken, 10 cm mesafede de benzer şekilde DET1'de % 7,1, DET2'de % 7,4, DET3'te % 6,5, DET4'te % 10,4'tür. 20 cm mesafedeki bağıl farklar ise DET1'de % 6,6, DET2'de % 6,3, DET3'te % 5,9, DET4'te ise % 6,3 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.5).

20 cm mesafede tüm dedektörlerdeki farkın azalışından, etkinin belirli bir mesafeden sonra kaynak-detektör mesafesinden neredeyse bağımsız olacağı görülmektedir. Bağıl farkların DET4 için diğer dedektörlerden daha fazla olmasının nedeni DET4 için katı açılardaki farkın diğer dedektörlerden daha büyük olmasıdır. Ayrıca bu farklılıklar, katı açığa ek olarak her dedektörün optimum mesafesinin farklılığı ve akı farklılıklardan kaynaklanmaktadır.

Tüm dedektör ve mesafelerde ön kenar geometrisinin sonuçları karşılaştırılmış ve keskin kenarlı olarak modellenen bir kristalin yuvarlatılmışı göre daha büyük bir aktif hacime ve daha büyük bir katı açığa sahip olduğundan dolayı dedektör veriminin olması gerekenden daha fazla belirlenmesine neden olmaktadır.



Şekil 4.10. Yuvarlatılmış/keskin kenarlı geometride katı açı gösterimi

Tezde, ön kenar geometrisinin verim üzerindeki etkisi hacimsel kaynaklar kullanılarak da araştırılmıştır. Nokta kaynak geometride etkinin düşük enerjide baskın olduğu görüldüğü için 46,5 keV, 63,3 keV ve 143,8 keV piklerine sahip IAEA RGU-1 referans malzemesi kullanılmıştır. PHITS'te 6cm×5cm silindirik kapta hazırlanan kaynak hacimsel olarak, dedektörler de her iki geometride modellenerek simüle edilmiş verim değerleri elde edilmiştir. Çizelge 4.6'da görüldüğü gibi, hacimsel kaynak geometride de kristalin ön kenarının geometrik farklılığının verimi etkilediği görülmektedir. Nokta kaynak geometride DET1 dedektöründe 59,5 keV'de fark % 7,1 iken, aynı dedektörde hacimsel geometride 46,5 keV (daha düşük enerji olduğundan farkın daha fazla olması beklenir) enerjide fark %3,5'tir. DET2 ve DET3 dedektörlerinde de deneysel verimden farklar nokta kaynak geometriye göre nispeten daha azdır. Fakat bu durumlar 46,5 keV'in deneysel verim belirsizliklerinin yüksek olması (DET1 %9,7, DET2 %4,2, DET3 %3,9) nedeniyle de oluşabilmektedir. DET4 dedektöründe ise nokta kaynak geometride keskin kenar ve yuvarlatılmış kenarlar arasındaki fark 81 keV'de %8,8 iken, hacimsel geometride 46,5 keV'de %12,6'dır. Dolayısıyla ön kenar geometri etkisinin dedektörden belirli bir mesafede sayılan nokta kaynak geometride olduğu gibi direk dedektörün üzerinde sayılan hacimsel geometride de verimi etkilediği görülmüştür.

Çizelge 4.6. DET1, DET2, DET3 ve DET4 dedektörlerinin hacimsel kaynak için keskin ve yuvarlatılmış ön kenar geometrisinde PHITS ile hesaplanan verim değerlerinin karşılaştırılması

	Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Deneysel verim (% belirsizlik)	Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar	Deneysel verimden % Fark	
						Keskin kenar	Yuvarlatılmış kenar
DET1	$^{210}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	46,54	0,00375 (9,7)	0,00385	0,00372	2,7	0,8
	$^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$	63,29	0,02992 (3,3)	0,03099	0,02997	3,6	0,2
	^{235}U	143,76	0,10462 (3,6)	0,10827	0,10691	3,5	2,2
DET2	$^{210}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	46,54	0,00397 (4,2)	0,00412	0,00390	3,8	1,6
	$^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$	63,29	0,02601 (3,4)	0,02679	0,02558	3,0	1,7
	^{235}U	143,76	0,07383 (4,1)	0,07484	0,07376	1,4	0,1
DET3	$^{210}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	46,54	0,00111 (3,9)	0,00115	0,00109	3,0	1,8
	$^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$	63,29	0,01436 (2,9)	0,01482	0,01431	3,2	0,4
	^{235}U	143,76	0,06529 (3,1)	0,06592	0,06524	1,0	0,1
DET4	$^{210}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	46,54	0,10236 (3,2)	0,11132	0,09851	8,8	3,8
	$^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$	63,29	0,09744 (3,0)	0,10906	0,09710	11,9	0,4
	^{235}U	143,76	0,08362 (2,1)	0,09072	0,08749	8,5	4,6

4.2. Bakır Kontak Pim Etkisi

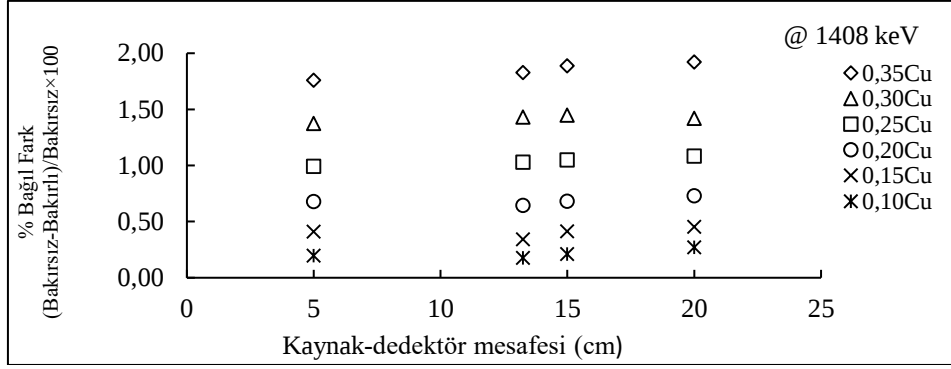
4.2.1. DET1 dedektörü bakır kontak pim etkisi

Üretici tarafından bilgisi verilmeyen bakır kontak pimin dedektör verimine etkisi PHITS MC ile gösterilmiştir. Bunun için dedektörler önce bakır pim olmadan daha sonra da farklı bakır pim yarıçapları ile modellenmiştir. DET1 dedektörü ile 81 keV-1408 keV enerji aralığındaki fotonlar için 13,25 cm mesafede önce bakır pim olmadan, sonra 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm, 3 mm ve 3,5 mm yarıçaplarında bakır ile verim değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7. DET1 dedektörünün 13,25 cm dedektör-kaynak mesafesinde deneysel verimi ile farklı bakır kontak pim yarıçaplarında PHITS MC ile elde edilen verim değerleri

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Deneysel verim	Toplam enerji pik verimi (FEPE)						
			Bakır pim olmadan	1 mm bakır ile	1,5 mm bakır ile	2 mm bakır ile	2,5 mm bakır ile	3 mm bakır ile	3,5 mm bakır ile
¹³³ Ba	81,00	0,01113	0,01098	0,01098	0,01098	0,01098	0,01098	0,01098	0,01098
¹⁵² Eu	121,78	0,01536	0,01546	0,01546	0,01545	0,01545	0,01545	0,01545	0,01545
¹⁵² Eu	344,28	0,01152	0,01161	0,01160	0,01159	0,01157	0,01155	0,01153	0,01151
¹³⁴ Cs	569,33	0,00871	0,00887	0,00886	0,00884	0,00882	0,00880	0,00878	0,00875
¹³⁴ Cs	604,72	0,00858	0,00860	0,00858	0,00857	0,00855	0,00853	0,00851	0,00848
¹³⁷ Cs	661,66	0,00812	0,00819	0,00818	0,00816	0,00815	0,00813	0,00810	0,00807
¹⁵² Eu	778,91	0,00741	0,00749	0,00748	0,00747	0,00745	0,00743	0,00741	0,00738
¹³⁴ Cs	795,86	0,00733	0,00741	0,00739	0,00738	0,00736	0,00734	0,00732	0,00730
¹⁵² Eu	964,08	0,00665	0,00670	0,00668	0,00667	0,00666	0,00664	0,00661	0,00659
¹⁵² Eu	1112,07	0,00615	0,00619	0,00618	0,00617	0,00615	0,00613	0,00611	0,00609
⁶⁰ Co	1173,23	0,00595	0,00602	0,00601	0,00600	0,00599	0,00597	0,00594	0,00592
⁶⁰ Co	1332,49	0,00558	0,00561	0,00560	0,00559	0,00558	0,00556	0,00553	0,00551
¹⁵² Eu	1408,01	0,00535	0,00544	0,00543	0,00542	0,00541	0,00539	0,00536	0,00534

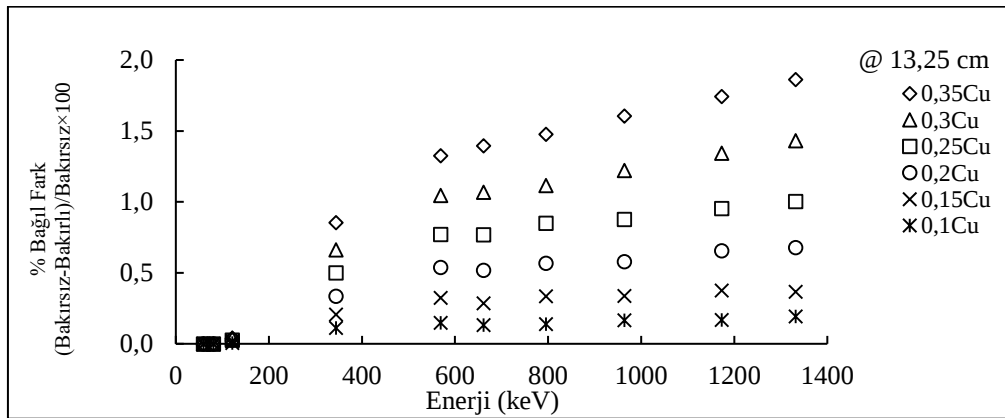
Çizelge 4.8'den görüldüğü gibi bakır pimin düşük enerji bölgesinde bir etkisi yokken; 3,5 mm yarıçaplı bakır pim varlığında 344 - 569 keV bölgesinde yaklaşık % 0,9-1,5, 604-1408 keV enerji aralığında yaklaşık % 1,4-1,9 aralığında verimi etkilediği görülmüştür. En büyük etki, 1408 keV enerjide ve 3,5 mm bakır yarıçapındadır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. DET1 dedektörünün bakır kontak pimli ve pimsiz MC verim değerlerinin mesafeye göre % bağıl farkı (1408 keV'de)

Artan bakır kalınlığı ile dedektör-kaynak mesafesinin verime etkisinin olup olmadığı 5 cm, 10 cm, 15 cm ve 20 cm mesafelerde etkinin baskın olduğu 569 keV-1408 keV aralığında incelenmiştir (Çizelge 4.8). Mesafeye bağlı değişim, tüm bakır kalınlıkları yerine laboratuvarında bulunan sökülmiş dedektörün 4 mm olarak ölçülen değeri ve literatürdeki 7 mm çap değeri göz önünde bulundurularak 2 mm ve 3,5 mm yarıçaplarında incelenmiştir. Çizelge 4.7 ve 4.8'de görüldüğü gibi orta ve yüksek enerjili bölgede dedektör verimindeki değişim 2 mm yarıçaplı pimde % 0,74 iken, 3,5 mm yarıçaplı bakır pimde % 1,92'dir.

13,25 cm mesafede bakır kontak pimli ve pimsiz modellenen dedektörlerden elde edilen verim değerlerinin % bağıl farkının verildiği Şekil 4.12'de her enerjide bakır kalınlığı arttıkça farkın arttığı görülmektedir. Hatta 2 mm'den büyük yarıçaplarda bakır kontak pimin verim üzerindeki etkisi enerji arttıkça neredeyse lineer olarak artmaktadır.



Şekil 4.12. DET1 dedektörünün bakır kontak pimli ve pimsiz MC verim değerlerinin enerjiye göre % bağıl farkı (13,25 cm'de)

Çizelge 4.8. DET1 dedektörü ile 5 cm, 10 cm, 13,25 cm, 15 cm ve 20 cm mesafede bakır kontak pimli ve pimsiz MC ile hesaplanan verim değerleri

	Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Toplam enerji pik verimi (FEPE)				
			Bakır pim olmadan	r=2 mm bakır ile	% fark*	r=3,5 mm bakır ile	% fark**
5 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,03271	0,03255	0,50	0,03228	1,32
	¹³⁴ Cs	604,72	0,03162	0,03146	0,52	0,03119	1,36
	¹³⁷ Cs	661,66	0,03005	0,02989	0,55	0,02963	1,40
	¹⁵² Eu	778,91	0,02742	0,02727	0,58	0,02702	1,49
	¹³⁴ Cs	795,86	0,02708	0,02692	0,59	0,02667	1,51
	¹⁵² Eu	964,08	0,02430	0,02415	0,63	0,02391	1,59
	¹⁵² Eu	1112,07	0,02238	0,02224	0,65	0,02202	1,65
	⁶⁰ Co	1173,23	0,02170	0,02156	0,65	0,02133	1,68
	⁶⁰ Co	1332,49	0,02011	0,01998	0,66	0,01976	1,75
	¹⁵² Eu	1408,01	0,01944	0,01931	0,68	0,01910	1,76
10 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,01355	0,01349	0,49	0,01338	1,27
	¹³⁴ Cs	604,72	0,01313	0,01307	0,50	0,01296	1,30
	¹³⁷ Cs	661,66	0,01250	0,01244	0,49	0,01233	1,32
	¹⁵² Eu	778,91	0,01142	0,01136	0,57	0,01125	1,50
	¹³⁴ Cs	795,86	0,01129	0,01122	0,58	0,01111	1,52
	¹⁵² Eu	964,08	0,01018	0,01012	0,59	0,01001	1,59
	¹⁵² Eu	1112,07	0,00941	0,00934	0,69	0,00924	1,76
	⁶⁰ Co	1173,23	0,00912	0,00906	0,68	0,00896	1,80
	⁶⁰ Co	1332,49	0,00848	0,00842	0,72	0,00832	1,80
	¹⁵² Eu	1408,01	0,00820	0,00815	0,70	0,00806	1,80
13,25 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,00887	0,00882	0,54	0,00875	1,32
	¹³⁴ Cs	604,72	0,00860	0,00855	0,51	0,00848	1,35
	¹³⁷ Cs	661,66	0,00819	0,00815	0,52	0,00807	1,39
	¹⁵² Eu	778,91	0,00749	0,00745	0,56	0,00738	1,46
	¹³⁴ Cs	795,86	0,00741	0,00736	0,57	0,00730	1,48
	¹⁵² Eu	964,08	0,00670	0,00666	0,58	0,00659	1,60
	¹⁵² Eu	1112,07	0,00619	0,00615	0,68	0,00609	1,72
	⁶⁰ Co	1173,23	0,00602	0,00599	0,66	0,00592	1,74
	⁶⁰ Co	1332,49	0,00561	0,00558	0,68	0,00551	1,86
	¹⁵² Eu	1408,01	0,00544	0,00541	0,64	0,00534	1,83
15 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,00728	0,00724	0,53	0,00718	1,34
	¹³⁴ Cs	604,72	0,00705	0,00701	0,57	0,00695	1,38
	¹³⁷ Cs	661,66	0,00673	0,00669	0,57	0,00663	1,45
	¹⁵² Eu	778,91	0,00617	0,00614	0,60	0,00608	1,53
	¹³⁴ Cs	795,86	0,00610	0,00606	0,59	0,00601	1,52
	¹⁵² Eu	964,08	0,00551	0,00547	0,63	0,00542	1,59
	¹⁵² Eu	1112,07	0,00511	0,00508	0,67	0,00502	1,68
	⁶⁰ Co	1173,23	0,00497	0,00494	0,67	0,00489	1,70
	⁶⁰ Co	1332,49	0,00463	0,00460	0,71	0,00454	1,87
	¹⁵² Eu	1408,01	0,00449	0,00446	0,68	0,00441	1,89
20 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,00453	0,00451	0,55	0,00447	1,28
	¹³⁴ Cs	604,72	0,00440	0,00437	0,55	0,00434	1,36
	¹³⁷ Cs	661,66	0,00420	0,00418	0,59	0,00414	1,42
	¹⁵² Eu	778,91	0,00385	0,00383	0,65	0,00380	1,54
	¹³⁴ Cs	795,86	0,00381	0,00379	0,66	0,00375	1,53
	¹⁵² Eu	964,08	0,00344	0,00342	0,69	0,00339	1,55
	¹⁵² Eu	1112,07	0,00320	0,00317	0,69	0,00314	1,64
	⁶⁰ Co	1173,23	0,00311	0,00309	0,74	0,00306	1,73
	⁶⁰ Co	1332,49	0,00290	0,00287	0,73	0,00284	1,83
	¹⁵² Eu	1408,01	0,00281	0,00279	0,73	0,00276	1,92

*Bakır pim olmadan ve 2 mm bakır pim ile hesaplanan verimler arasındaki % fark,

**Bakır pim olmadan ve 3,5 mm bakır pim ile hesaplanan verimler arasındaki % fark

4.2.2. DET2 dedektörü bakır kontak pim etkisi

DET2 dedektörü ile 81 keV-1408 keV enerji aralığındaki fotonlar için 7,5 cm kaynak-dedektör mesafesinde önce bakır pim olmadan, sonra 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm, 3 mm ve 3,5 mm yarıçaplarında bakır ile verim değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. DET2 dedektörünün 7,5 cm dedektör-kaynak mesafesinde deneysel verimi ile farklı bakır kontak pim yarıçaplarında PHITS MC ile elde edilen verim değerleri

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Deneysel verim	Toplam enerji pik verimi (FEPE)						
			Bakır pim olmadan	1 mm bakır ile	1,5 mm bakır ile	2 mm bakır ile	2,5 mm bakır ile	3 mm bakır ile	3,5 mm bakır ile
¹³³ Ba	81,00	0,01819	0,01604	0,01604	0,01604	0,01604	0,01604	0,01604	0,01604
¹⁵² Eu	121,78	0,02133	0,02107	0,02107	0,02107	0,02106	0,02106	0,02105	0,02105
¹⁵² Eu	344,28	0,01238	0,01254	0,01252	0,01250	0,01247	0,01244	0,01240	0,01236
¹³⁴ Cs	569,33	0,00843	0,00847	0,00845	0,00843	0,00841	0,00837	0,00834	0,00830
¹³⁴ Cs	604,72	0,00797	0,00810	0,00808	0,00806	0,00803	0,00800	0,00796	0,00792
¹³⁷ Cs	661,66	0,00748	0,00757	0,00755	0,00753	0,00750	0,00748	0,00744	0,00741
¹⁵² Eu	778,91	0,00660	0,00671	0,00669	0,00667	0,00664	0,00661	0,00658	0,00654
¹³⁴ Cs	795,86	0,00660	0,00661	0,00659	0,00657	0,00654	0,00651	0,00648	0,00644
¹⁵² Eu	964,08	0,00563	0,00573	0,00572	0,00570	0,00568	0,00565	0,00562	0,00559
¹⁵² Eu	1112,07	0,00516	0,00517	0,00515	0,00514	0,00511	0,00509	0,00506	0,00503
⁶⁰ Co	1173,23	0,00490	0,00498	0,00496	0,00495	0,00492	0,00490	0,00487	0,00484
⁶⁰ Co	1332,49	0,00446	0,00454	0,00452	0,00451	0,00448	0,00446	0,00443	0,00441
¹⁵² Eu	1408,01	0,00427	0,00435	0,00434	0,00432	0,00430	0,00428	0,00425	0,00422

Çizelge 4.9’da görüldüğü gibi bakır pimin düşük enerji bölgesinde bir etkisi yokken; 3,5 mm yarıçaplı bakır pim varlığında 344 - 569 keV bölgesinde yaklaşık % 1,4-2,1, 604-1408 keV enerji aralığında yaklaşık % 2,2-2,9 aralığında verimi etkilediği görülmüştür. 2 mm ve 3,5 mm yarıçaplarındaki bakır kalınlığı ile dedektör-kaynak mesafesinin verime etkisi 569 keV-1408 keV aralığında incelenmiştir (Çizelge 4.10).

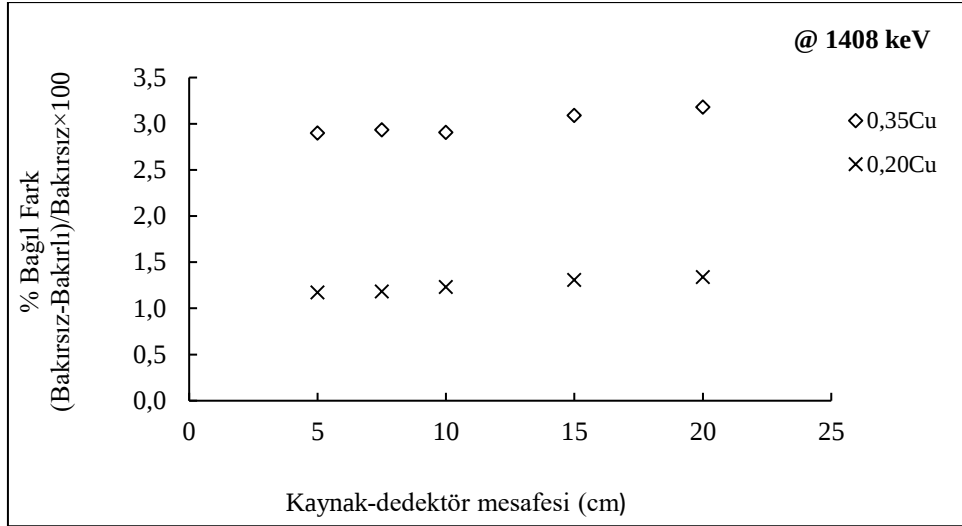
Çizelge 4.10. DET2 dedektörünün farklı kaynak-dedektör mesafelerinde bakır kontak pimli ve pimsiz modellenmesi ile hesaplanan verim değerleri

	Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Toplam enerji pik verimi (FEPE)				
			Bakır pim olmadan	r=2 mm bakır ile	% fark*	r=3,5 mm bakır ile	% fark**
5 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,01452	0,01440	0,81	0,01421	2,12
	¹³⁴ Cs	604,72	0,01388	0,01376	0,82	0,01358	2,17
	¹³⁷ Cs	661,66	0,01295	0,01283	0,90	0,01266	2,27
	¹⁵² Eu	778,91	0,01143	0,01132	0,96	0,01115	2,44
	¹³⁴ Cs	795,86	0,01124	0,01113	0,97	0,01096	2,47
	¹⁵² Eu	964,08	0,00975	0,00966	1,00	0,00951	2,46
	¹⁵² Eu	1112,07	0,00878	0,00869	1,10	0,00857	2,46
	⁶⁰ Co	1173,23	0,00843	0,00834	1,10	0,00820	2,78
	⁶⁰ Co	1332,49	0,00767	0,00759	1,13	0,00746	2,83
	¹⁵² Eu	1408,01	0,00736	0,00727	1,17	0,00715	2,90
7,5 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,00847	0,00841	0,78	0,00830	2,07
	¹³⁴ Cs	604,72	0,00810	0,00803	0,82	0,00792	2,18
	¹³⁷ Cs	661,66	0,00757	0,00750	0,92	0,00741	2,23
	¹⁵² Eu	778,91	0,00671	0,00664	0,96	0,00654	2,50
	¹³⁴ Cs	795,86	0,00661	0,00654	0,96	0,00644	2,51
	¹⁵² Eu	964,08	0,00573	0,00568	0,96	0,00559	2,55
	¹⁵² Eu	1112,07	0,00517	0,00511	1,11	0,00503	2,76
	⁶⁰ Co	1173,23	0,00498	0,00492	1,11	0,00484	2,73
	⁶⁰ Co	1332,49	0,00454	0,00448	1,15	0,00441	2,86
	¹⁵² Eu	1408,01	0,00435	0,00430	1,18	0,00422	2,93
10 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,00550	0,00545	0,75	0,00538	2,01
	¹³⁴ Cs	604,72	0,00526	0,00521	0,84	0,00514	2,15
	¹³⁷ Cs	661,66	0,00491	0,00487	0,88	0,00480	2,29
	¹⁵² Eu	778,91	0,00437	0,00432	1,07	0,00425	2,67
	¹³⁴ Cs	795,86	0,00431	0,00426	1,07	0,00419	2,74
	¹⁵² Eu	964,08	0,00374	0,00371	0,97	0,00364	2,67
	¹⁵² Eu	1112,07	0,00338	0,00334	1,11	0,00328	2,78
	⁶⁰ Co	1173,23	0,00325	0,00321	1,15	0,00316	2,82
	⁶⁰ Co	1332,49	0,00296	0,00292	1,18	0,00288	2,84
	¹⁵² Eu	1408,01	0,00285	0,00281	1,23	0,00277	2,91
15 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,00284	0,00282	0,88	0,00278	2,07
	¹³⁴ Cs	604,72	0,00273	0,00270	0,96	0,00266	2,25
	¹³⁷ Cs	661,66	0,00256	0,00253	1,02	0,00249	2,43
	¹⁵² Eu	778,91	0,00234	0,00231	1,37	0,00228	2,65
	¹³⁴ Cs	795,86	0,00224	0,00222	1,12	0,00218	2,69
	¹⁵² Eu	964,08	0,00195	0,00193	1,20	0,00190	2,75
	¹⁵² Eu	1112,07	0,00177	0,00175	1,08	0,00172	2,69
	⁶⁰ Co	1173,23	0,00170	0,00168	1,01	0,00165	2,82
	⁶⁰ Co	1332,49	0,00155	0,00153	1,26	0,00151	3,01
	¹⁵² Eu	1408,01	0,00149	0,00147	1,31	0,00145	3,09
20 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,00174	0,00173	0,76	0,00170	2,03
	¹³⁴ Cs	604,72	0,00166	0,00165	0,82	0,00163	2,19
	¹³⁷ Cs	661,66	0,00156	0,00154	1,01	0,00152	2,37
	¹⁵² Eu	778,91	0,00139	0,00137	1,00	0,00135	2,61
	¹³⁴ Cs	795,86	0,00137	0,00135	1,01	0,00133	2,58
	¹⁵² Eu	964,08	0,00120	0,00119	1,17	0,00117	2,72
	¹⁵² Eu	1112,07	0,00109	0,00108	1,14	0,00106	2,70
	⁶⁰ Co	1173,23	0,00105	0,00103	1,17	0,00102	2,74
	⁶⁰ Co	1332,49	0,00095	0,00094	1,27	0,00092	3,06
	¹⁵² Eu	1408,01	0,00092	0,00091	1,34	0,00089	3,18

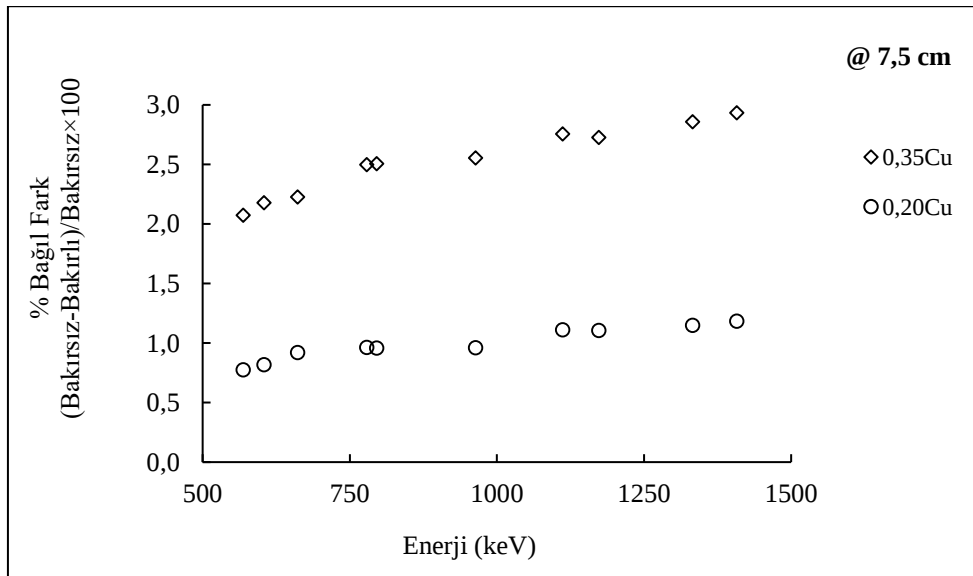
*Bakır pim olmadan ve 2 mm bakır pim ile hesaplanan verimler arasındaki % fark,

**Bakır pim olmadan ve 3,5 mm bakır pim ile hesaplanan verimler arasındaki % fark

DET2 dedektöründe de en büyük etki, 1408 keV enerjide ve 3,5 mm bakır kalınlığındadır (Şekil 4.13). DET2 için optimum mesafe olan 7,5 cm'de 0,2 mm ve 0,35 mm Cu yarıçaplarında 500-1408 keV enerji aralığında bağıl farklar Şekil 4.14'te verilmiştir. 661 keV ve üzerindeki enerjilerde bağıl fark neredeyse lineer artmaktadır. Foton enerjisi ve Cu kontak pim yarıçapının artışı pimin verim üzerindeki etkisini baskın kılmaktadır.



Şekil 4.13. DET2 dedektörünün 2 mm ve 3,5 mm bakır kontak pim kalınlığındaki verim değerlerinin mesafeye göre % bağıl farkı (1408 keV'de)



Şekil 4.14. DET2 dedektörünün 2 mm ve 3,5 mm bakır kontak pim kalınlığındaki verim değerlerinin enerjiye göre % bağıl farkı (7,5 cm'de)

4.2.3. DET3 dedektörü bakır kontak pim etkisi

DET3 dedektörü ile 81 keV-1408 keV enerji aralığındaki fotonlar için 8 cm mesafede önce bakır pim olmadan, sonra 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm, 3 mm ve 3,5 mm yarıçaplarında bakır ile verim değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.11). Çizelgeden görüldüğü gibi bakır pimin düşük enerji bölgesinde bir etkisi yokken bakır kalınlığı arttıkça FEPE değerleri azalmaktadır. 2 mm ve 3,5 mm yarıçaplarındaki bakır kalınlığı ile dedektör-kaynak mesafesinin verime etkisi de benzer şekilde 569 keV-1408 keV aralığında incelenmiştir (Çizelge 4.12).

Çizelge 4.11. DET3 dedektörünün 8 cm dedektör-kaynak mesafesinde deneysel verimi ile farklı bakır kontak pim yarıçaplarında PHITS MC ile elde edilen verim değerleri

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Deneysel verim	Toplam enerji pik verimi (FEPE)						
			Bakır pim olmadan	1 mm bakır ile	1,5 mm bakır ile	2 mm bakır ile	2,5 mm bakır ile	3 mm bakır ile	3,5 mm bakır ile
¹³³ Ba	81,00	0,01321	0,01092	0,01092	0,01092	0,01092	0,01092	0,01092	0,01092
¹⁵² Eu	121,78	0,01641	0,01665	0,01665	0,01665	0,01664	0,01664	0,01664	0,01663
¹⁵² Eu	344,28	0,01041	0,01056	0,01055	0,01052	0,01050	0,01047	0,01044	0,01041
¹³⁴ Cs	569,33	0,00698	0,00715	0,00713	0,00712	0,00709	0,00706	0,00703	0,00699
¹³⁴ Cs	604,72	0,00681	0,00684	0,00682	0,00681	0,00678	0,00675	0,00672	0,00669
¹³⁷ Cs	661,66	0,00633	0,00639	0,00637	0,00635	0,00633	0,00630	0,00627	0,00624
¹⁵² Eu	778,91	0,00558	0,00566	0,00564	0,00560	0,00560	0,00557	0,00554	0,00551
¹³⁴ Cs	795,86	0,00551	0,00558	0,00556	0,00554	0,00552	0,00549	0,00546	0,00543
¹⁵² Eu	964,08	0,00479	0,00485	0,00484	0,00482	0,00480	0,00478	0,00475	0,00472
¹⁵² Eu	1112,07	0,00432	0,00438	0,00436	0,00435	0,00433	0,00430	0,00428	0,00425
⁶⁰ Co	1173,23	0,00418	0,00421	0,00419	0,00418	0,00416	0,00413	0,00411	0,00409
⁶⁰ Co	1332,49	0,00377	0,00383	0,00382	0,00381	0,00379	0,00376	0,00375	0,00372
¹⁵² Eu	1408,01	0,00364	0,00368	0,00367	0,00365	0,00363	0,00361	0,00359	0,00357

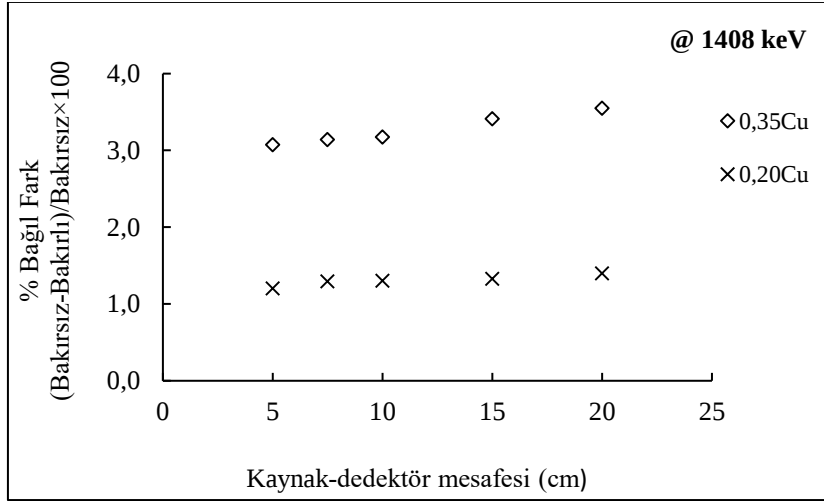
Çizelge 4.12. DET3 dedektörünün farklı kaynak-dedektör mesafelerinde bakır kontak pimli ve pimsiz modellenmesi ile hesaplanan verim değerleri

	Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Toplam enerji pik verimi (FEPE)				
			Bakır pim olmadan	r=2 mm bakır ile	% fark*	r=3,5 mm bakır ile	% fark**
5 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,01348	0,01338	0,76	0,01320	2,14
	¹³⁴ Cs	604,72	0,01287	0,01276	0,84	0,01259	2,22
	¹³⁷ Cs	661,66	0,01202	0,01191	0,92	0,01174	2,36
	¹⁵² Eu	778,91	0,01061	0,01050	0,99	0,01033	2,56
	¹³⁴ Cs	795,86	0,01043	0,01033	1,02	0,01016	2,59
	¹⁵² Eu	964,08	0,00907	0,00897	1,06	0,00882	2,69
	¹⁵² Eu	1112,07	0,00815	0,00805	1,15	0,00792	2,85
	⁶⁰ Co	1173,23	0,00783	0,00774	1,16	0,00760	2,89
	⁶⁰ Co	1332,49	0,00713	0,00705	1,19	0,00692	3,00
	¹⁵² Eu	1408,01	0,00683	0,00675	1,20	0,00662	3,07
8 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,00715	0,00709	0,78	0,00699	2,16
	¹³⁴ Cs	604,72	0,00684	0,00678	0,85	0,00669	2,25
	¹³⁷ Cs	661,66	0,00639	0,00633	0,93	0,00624	2,38
	¹⁵² Eu	778,91	0,00566	0,00560	1,02	0,00551	2,66
	¹³⁴ Cs	795,86	0,00558	0,00552	1,05	0,00543	2,70
	¹⁵² Eu	964,08	0,00485	0,00480	1,07	0,00472	2,72
	¹⁵² Eu	1112,07	0,00438	0,00433	1,18	0,00425	2,87
	⁶⁰ Co	1173,23	0,00421	0,00416	1,20	0,00409	2,91
	⁶⁰ Co	1332,49	0,00383	0,00379	1,26	0,00372	3,03
	¹⁵² Eu	1408,01	0,00368	0,00363	1,29	0,00357	3,14
10 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,00511	0,00507	0,78	0,00500	2,17
	¹³⁴ Cs	604,72	0,00489	0,00485	0,85	0,00478	2,27
	¹³⁷ Cs	661,66	0,00457	0,00453	0,93	0,00446	2,38
	¹⁵² Eu	778,91	0,00406	0,00402	1,05	0,00395	2,76
	¹³⁴ Cs	795,86	0,00401	0,00396	1,08	0,00390	2,79
	¹⁵² Eu	964,08	0,00349	0,00345	1,10	0,00339	2,77
	¹⁵² Eu	1112,07	0,00314	0,00311	1,16	0,00305	2,88
	⁶⁰ Co	1173,23	0,00303	0,00299	1,18	0,00294	2,92
	⁶⁰ Co	1332,49	0,00276	0,00273	1,23	0,00268	3,05
	¹⁵² Eu	1408,01	0,00265	0,00262	1,30	0,00257	3,17
15 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,00265	0,00263	0,88	0,00260	2,17
	¹³⁴ Cs	604,72	0,00254	0,00252	0,98	0,00248	2,39
	¹³⁷ Cs	661,66	0,00238	0,00235	1,02	0,00232	2,57
	¹⁵² Eu	778,91	0,00211	0,00209	1,03	0,00205	2,77
	¹³⁴ Cs	795,86	0,00209	0,00207	1,03	0,00203	2,80
	¹⁵² Eu	964,08	0,00182	0,00180	1,05	0,00177	2,86
	¹⁵² Eu	1112,07	0,00165	0,00163	1,11	0,00160	2,90
	⁶⁰ Co	1173,23	0,00159	0,00157	1,13	0,00154	2,99
	⁶⁰ Co	1332,49	0,00145	0,00143	1,27	0,00140	3,21
	¹⁵² Eu	1408,01	0,00140	0,00138	1,33	0,00135	3,41
20 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,00162	0,00160	0,92	0,00158	2,21
	¹³⁴ Cs	604,72	0,00155	0,00153	1,06	0,00151	2,43
	¹³⁷ Cs	661,66	0,00145	0,00144	1,01	0,00141	2,68
	¹⁵² Eu	778,91	0,00129	0,00128	1,03	0,00126	2,80
	¹³⁴ Cs	795,86	0,00128	0,00126	1,05	0,00124	2,82
	¹⁵² Eu	964,08	0,00112	0,00111	1,19	0,00109	2,89
	¹⁵² Eu	1112,07	0,00102	0,00100	1,20	0,00099	2,94
	⁶⁰ Co	1173,23	0,00098	0,00097	1,22	0,00095	3,02
	⁶⁰ Co	1332,49	0,00089	0,00088	1,32	0,00086	3,25
	¹⁵² Eu	1408,01	0,00086	0,00085	1,40	0,00083	3,55

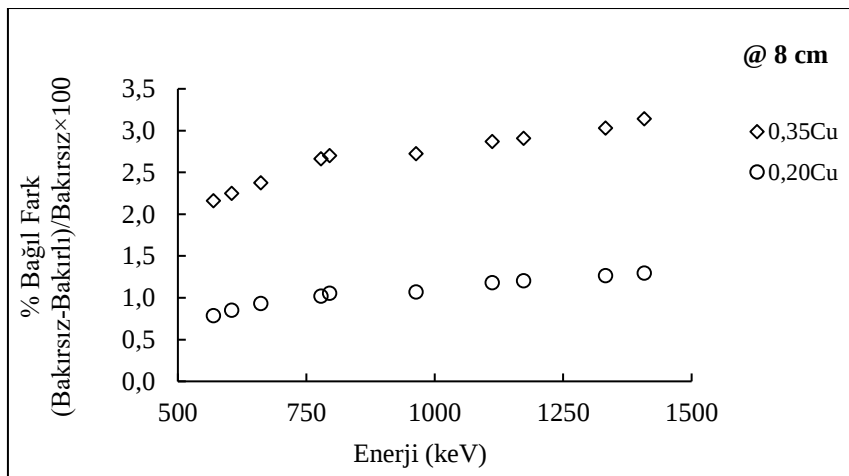
*Bakır pim olmadan ve 2 mm bakır pim ile hesaplanan verimler arasındaki % fark,

**Bakır pim olmadan ve 3,5 mm bakır pim ile hesaplanan verimler arasındaki % fark

Çizelgeler incelendiğinde 2 mm bakır yarıçapında verim % 1,4'lere kadar değişirken, 3,5 mm yarıçap değerinde ise %3,6'lara varan farklar görülmüştür. Mesafeye bağlı olarak değişim, etkinin baskın olduğu 1408 keV enerji için değerlendirildiğinde ise 5 cm mesafede fark %3,1 iken 20 cm'de 3,6'dır. Dolayısıyla katı aç farkından dolayı oluşan bu farklılığa göre, mesafenin bu parametrenin değişimde etkin bir rol oynamadığı söylenebilir. En büyük etki, 1408 keV enerjide ve 3,5 mm bakır yarıçapındadır (Şekil 4.15). DET3 için optimum mesafe olan 8 cm'de 0,2 mm ve 0,35 mm Cu yarıçaplarında 500-1408 keV enerji aralığında bağıl farklar Şekil 4.16'da verilmiştir. 661 keV ve üzerindeki enerjilerde bağıl fark neredeyse lineer artmaktadır.



Şekil 4.15. DET3 dedektörünün 2 mm ve 3,5 mm bakır kontak pim kalınlığındaki verim değerlerinin mesafeye göre % bağıl farkı (1408 keV'de)



Şekil 4.16. DET3 dedektörünün 2 mm ve 3,5 mm bakır kontak pim kalınlığındaki verim değerlerinin enerjiye göre % bağıl farkı (8 cm'de).

4.2.4. DET4 dedektörü bakır kontak pim etkisi

DET4 dedektörü ile 81 keV-1408 keV enerji aralığındaki fotonlar için 8 cm mesafede önce bakır pim olmadan, sonra 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm, 3 mm ve 3,5 mm yarıçaplarında bakır ile verim değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.13).

Çizelge 4.13. DET4 dedektörünün 14,91 cm dedektör-kaynak mesafesinde deneysel verimi ile farklı bakır kontak pim yarıçaplarında PHITS MC ile elde edilen verim değerleri

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Deneysel verim	Toplam enerji pik verimi (FEPE)						
			Bakır pim olmadan	1 mm bakır ile	1,5 mm bakır ile	2 mm bakır ile	2,5 mm bakır ile	3 mm bakır ile	3,5 mm bakır ile
¹³³ Ba	81,00	0,01083	0,01097	0,01097	0,01097	0,01097	0,01097	0,01097	0,01097
¹⁵² Eu	121,78	0,01025	0,01018	0,01018	0,01018	0,01018	0,01018	0,01018	0,01018
¹⁵² Eu	344,28	0,00539	0,00543	0,00543	0,00543	0,00542	0,00541	0,00541	0,00540
¹³⁴ Cs	569,33	0,00367	0,00366	0,00366	0,00366	0,00365	0,00364	0,00364	0,00363
¹³⁴ Cs	604,72	0,00345	0,00349	0,00349	0,00349	0,00348	0,00347	0,00346	0,00346
¹³⁷ Cs	661,66	0,00323	0,00326	0,00326	0,00325	0,00325	0,00324	0,00324	0,00323
¹⁵² Eu	778,91	0,00288	0,00288	0,00288	0,00287	0,00287	0,00286	0,00286	0,00285
¹³⁴ Cs	795,86	0,00285	0,00284	0,00284	0,00283	0,00283	0,00282	0,00282	0,00281
¹⁵² Eu	964,08	0,00244	0,00246	0,00246	0,00245	0,00245	0,00245	0,00244	0,00243
¹⁵² Eu	1112,07	0,00219	0,00221	0,00221	0,00220	0,00220	0,00220	0,00219	0,00219
⁶⁰ Co	1173,23	0,00212	0,00213	0,00213	0,00212	0,00212	0,00212	0,00211	0,00211
⁶⁰ Co	1332,49	0,00193	0,00193	0,00193	0,00193	0,00192	0,00192	0,00191	0,00191
¹⁵² Eu	1408,01	0,00184	0,00185	0,00185	0,00185	0,00184	0,00184	0,00183	0,00183

2 mm ve 3,5 mm yarıçaplarındaki bakır kalınlığı ile dedektör-kaynak mesafesinin verime etkisi de DET4'te de 569 keV-1408 keV aralığında incelenmiştir (Çizelge 4.14).

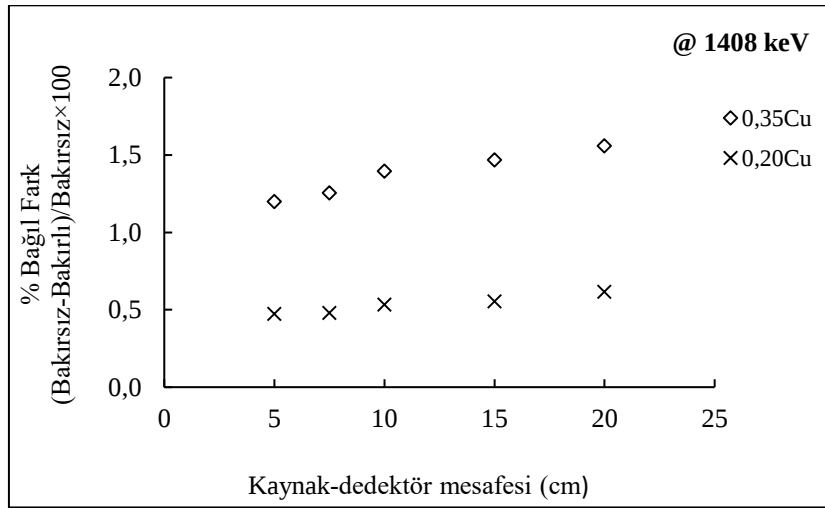
Çizelge 4.14. DET4 dedektörünün farklı kaynak-dedektör mesafelerinde bakır kontak pimli ve pimsiz modellenmesi ile hesaplanan verim değerleri

	Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Toplam enerji pik verimi (FEPE)				
			Bakır pim olmadan	r=2 mm bakır ile	% fark*	r=3,5 mm bakır ile	% fark**
5 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,01780	0,01774	0,34	0,01765	0,89
	¹³⁴ Cs	604,72	0,01699	0,01693	0,34	0,01683	0,92
	¹³⁷ Cs	661,66	0,01582	0,01576	0,36	0,01567	0,94
	¹⁵² Eu	778,91	0,01396	0,01391	0,39	0,01382	1,01
	¹³⁴ Cs	795,86	0,01372	0,01367	0,39	0,01358	1,02
	¹⁵² Eu	964,08	0,01185	0,01180	0,45	0,01172	1,11
	¹⁵² Eu	1112,07	0,01061	0,01056	0,45	0,01049	1,10
	⁶⁰ Co	1173,23	0,01019	0,01014	0,46	0,01008	1,12
	⁶⁰ Co	1332,49	0,00925	0,00921	0,45	0,00914	1,18
	¹⁵² Eu	1408,01	0,00885	0,00881	0,47	0,00875	1,20
8 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,00689	0,00687	0,33	0,00683	0,87
	¹³⁴ Cs	604,72	0,00658	0,00656	0,34	0,00652	0,89
	¹³⁷ Cs	661,66	0,00614	0,00612	0,34	0,00608	0,89
	¹⁵² Eu	778,91	0,00543	0,00541	0,39	0,00537	1,06
	¹³⁴ Cs	795,86	0,00534	0,00532	0,40	0,00529	1,07
	¹⁵² Eu	964,08	0,00462	0,00461	0,38	0,00457	1,10
	¹⁵² Eu	1112,07	0,00415	0,00413	0,46	0,00411	1,12
	⁶⁰ Co	1173,23	0,00399	0,00398	0,42	0,00395	1,14
	⁶⁰ Co	1332,49	0,00363	0,00361	0,42	0,00359	1,17
	¹⁵² Eu	1408,01	0,00347	0,00346	0,48	0,00343	1,26
10 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,00366	0,00365	0,34	0,00363	0,98
	¹³⁴ Cs	604,72	0,00349	0,00348	0,36	0,00346	0,99
	¹³⁷ Cs	661,66	0,00326	0,00325	0,39	0,00323	1,02
	¹⁵² Eu	778,91	0,00288	0,00287	0,43	0,00285	1,04
	¹³⁴ Cs	795,86	0,00284	0,00283	0,45	0,00281	1,05
	¹⁵² Eu	964,08	0,00246	0,00245	0,46	0,00243	1,10
	¹⁵² Eu	1112,07	0,00221	0,00220	0,47	0,00219	1,15
	⁶⁰ Co	1173,23	0,00213	0,00212	0,48	0,00211	1,21
	⁶⁰ Co	1332,49	0,00193	0,00192	0,52	0,00191	1,34
	¹⁵² Eu	1408,01	0,00185	0,00184	0,53	0,00183	1,40
15 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,00363	0,00361	0,33	0,00359	0,95
	¹³⁴ Cs	604,72	0,00346	0,00345	0,36	0,00342	0,99
	¹³⁷ Cs	661,66	0,00323	0,00322	0,39	0,00320	1,03
	¹⁵² Eu	778,91	0,00285	0,00284	0,44	0,00282	1,05
	¹³⁴ Cs	795,86	0,00281	0,00280	0,44	0,00278	1,02
	¹⁵² Eu	964,08	0,00244	0,00243	0,49	0,00241	1,12
	¹⁵² Eu	1112,07	0,00219	0,00218	0,42	0,00216	1,15
	⁶⁰ Co	1173,23	0,00211	0,00210	0,47	0,00208	1,20
	⁶⁰ Co	1332,49	0,00191	0,00190	0,57	0,00189	1,35
	¹⁵² Eu	1408,01	0,00184	0,00183	0,55	0,00181	1,47
20 cm	¹³⁴ Cs	569,33	0,00221	0,00220	0,31	0,00219	0,87
	¹³⁴ Cs	604,72	0,00210	0,00209	0,39	0,00208	0,92
	¹³⁷ Cs	661,66	0,00196	0,00196	0,45	0,00195	0,91
	¹⁵² Eu	778,91	0,00174	0,00173	0,43	0,00172	1,14
	¹³⁴ Cs	795,86	0,00171	0,00170	0,46	0,00169	1,16
	¹⁵² Eu	964,08	0,00149	0,00148	0,44	0,00147	1,23
	¹⁵² Eu	1112,07	0,00135	0,00134	0,45	0,00133	1,25
	⁶⁰ Co	1173,23	0,00130	0,00129	0,50	0,00128	1,29
	⁶⁰ Co	1332,49	0,00118	0,00118	0,58	0,00117	1,38
	¹⁵² Eu	1408,01	0,00113	0,00113	0,62	0,00112	1,56

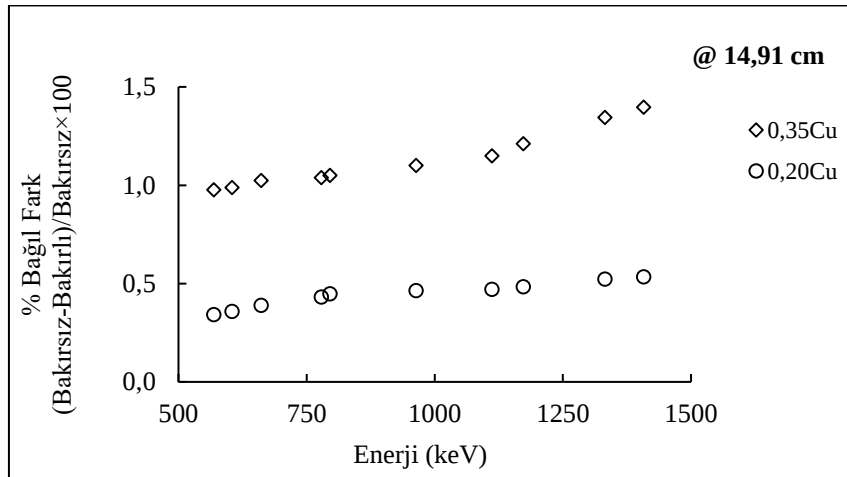
*Bakır pim olmadan ve 2 mm bakır pim ile hesaplanan verimler arasındaki % fark,

**Bakır pim olmadan ve 3,5 mm bakır pim ile hesaplanan verimler arasındaki % fark

Elde edilen verilere göre en büyük farklar; 2 mm bakır yarıçap değerinde % 0,62 iken 3,5 mm yarıçapta %1,56'dır. En büyük etki diğer üç dedektörde de olduğu gibi 1408 keV enerjide ve 3,5 mm bakır yarıçaptadır (Şekil 4.17). DET4 için optimum mesafe olan 14,91 cm'de bakır kontak pimli ve pimsiz modellenen dedektörlerden elde edilen verim değerlerinin % bağıl farkının verildiği Şekil 4.18'de her enerjide bakır kalınlığı arttıkça farkın arttığı görülmektedir.



Şekil 4.17. DET4 dedektörünün 2 mm ve 3,5 mm bakır kontak pim kalınlığındaki verim değerlerinin mesafeye göre % bağıl farkı (1408 keV'de)



Şekil 4.18. DET4 dedektörünün 2 mm ve 3,5 mm bakır kontak pim kalınlığındaki verim değerlerinin enerjiye göre % bağıl farkı (14,91 cm'de)

Literatürde varlığından bahsedilen fakat modellemelerde dikkate alınmayan bakır kontak pimin dedektör verimi üzerindeki etkisi fark edilerek tez kapsamında bu konu ile ilgili bir çalışma yapılmıştır. Çalışmamızda, PHITS MC kodu ile modellenen dedektörde bakır

kontak pimin toplam enerji pik verimi üzerindeki etkisini göstermek amaçlanmıştır. Bu amaçla HPGe dedektör dört farklı kaynak-dedektör mesafesi (5, 13,25, 15 ve 20 cm) için ilk olarak bakır kontak pim olmadan, daha sonra altı farklı yarıçapta (1, 1,5, 2, 2,5, 3 ve 3,5 mm) Cu kontak pimi dikkate alınarak FEPE değerleri hesaplanmıştır. 59,5 keV-1408 keV enerji aralığındaki fotonlar için bakır kontak pimin yarıçapı 1 mm'den 3,5 mm'ye 0,5 mm aralıklarla artırılarak verim değerleri hesaplanmıştır. Artan bakır yarıçap değeri ile dedektör-kaynak mesafesinin verime etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bakır kontak pim kalınlığının özellikle 600 keV'in üzerindeki enerji bölgesinde dedektör veriminde % 2'ye varan bir değişime neden olduğu, 81 keV ve altındaki enerjiler için bir etkisinin olmadığı görülmüştür (Uyar ve diğerleri, 2021).

Fotonlar dedektör kristalinden geçerken fotoelektrik olay ve Compton saçılımı yoluyla kristalle etkileşime girebilirler veya enerjilerine bağlı olarak çift oluşuma yol açabilirler. Bu etkileşimler dedektörün verimini doğrudan etkilemektedir. 200 keV enerjinin üzerinde, fotoelektrik tesir kesitteki düşüşle Germanyumun lineer azaltma katsayısı azaldığından verim de azalır (Şekil 2.8).

Çizelge 4.15. 1 mm alüminyum ve 0,7 mm germanyumdan geçen fotonların yüzdeleri (Ortec, 2021).

a) 1 mm Alüminyumdan Enerjinin Bir Fonksiyonu Olarak Geçen Fotonların Yüzdesi		b) 0,7 mm Germanyumdan Enerjinin Bir Fonksiyonu Olarak Geçen Fotonların Yüzdesi	
Enerji (keV)	% Geçen	Enerji (keV)	% Geçen
3	0	20	$1,5 \times 10^{-7}$
5	0	30	0,6
10	$8,5 \times 10^{-2}$	40	10
20	40	50	29
30	74	60	47
50	91	80	70
80	95	100	81
100	96		
400	97		
1000	98		

Dedektör uç kabı olarak yaygın kullanılan bir malzeme olan 1 mm alüminyumdan iletilen fotonların yüzdesi Çizelge 4.15.a'da gösterilmektedir. Bu zayıflama Eş. 2.18 ile verilmektedir.

Çizelge 4.15.b'de ise ölü tabaka kalınlığı yani DL 0,7 mm germanyum olan bir p-tipi dedektörden geçen fotonların yüzdesi verilmektedir. Enerji arttıkça alüminyum ve

germanyum kristali boyunca iletilen fotonların yüzdesi artmaktadır. Bu da özellikle yüksek enerjili fotonların enerjilerini kristale aktarmadan önce germanyum kristalinin merkezindeki bakır pim ile etkileşime girebileceği anlamına gelir.

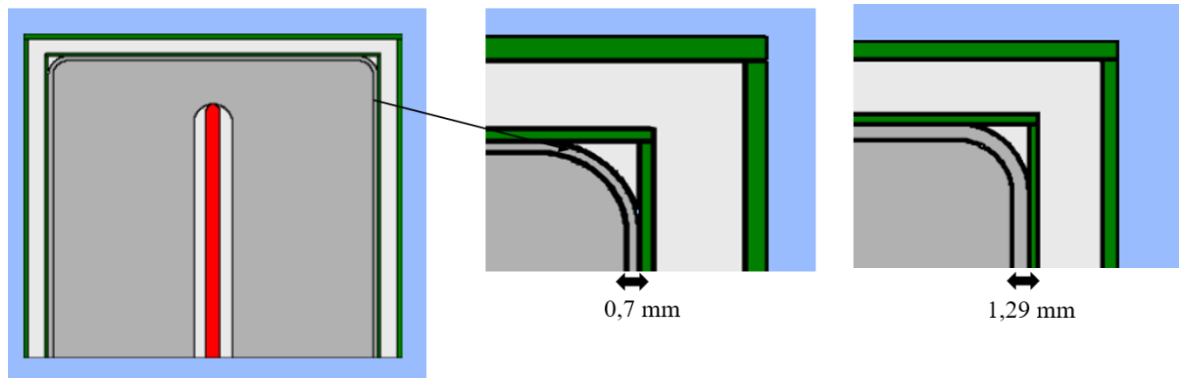
Bakır kontak pimin düşük enerjili bölgedeki fotonları etkilememesinin nedeni, fotoelektrik etki tesir kesitlerinin daha yüksek olmasıdır. Düşük enerjili fotonlar, kristalle etkileşime girerler ve enerjilerinin tamamını kristale bırakırlar yani bakır kontak pime ulaşmazlar. Yüksek enerjili bölgede Compton etkisi ve çift oluşumu olayları baskın olduğundan, bu bölgedeki fotonların verim değerlerindeki düşüşün Compton saçılması ve çift oluşumundan kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir. Yüksek enerjili fotonlarda bakır kontak pimin verimi etkilemesinin nedeni de bu enerjiye sahip fotonların bakır pimle etkileşime girmesidir. Dolayısıyla, 500 keV-900 keV arası ve özellikle 900 keV'in üzerindeki enerjilerde dedektör verim hesaplamalarında bakır kontak pim dikkate alınmalıdır.

4.3. Ölü Tabaka Kalınlık Etkisi

Tüm dedektörlerin optimum DL kalınlık değerlerinin belirlenmesinde PHITS, GESPECOR ve DETEFF MC programları kullanılmıştır.

4.3.1. DET1 dedektörü ölü tabaka kalınlık etkisi

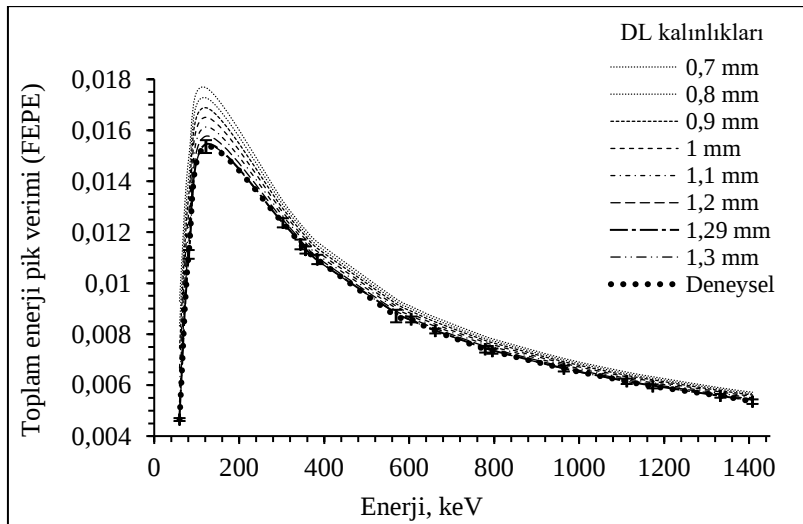
p-tipi %150 bağıl verimli DET1 dedektörünün DL kalınlığı üretici tarafından verilen 0,7 mm değerinden başlanarak 0,1 mm aralıklarla 1,3 mm'ye kadar artırılmıştır. DL kalınlığının değişimine göre hesaplanan FEPE değerleri Çizelge 4.16-4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.19. DET1 dedektörünün DL kalınlığının PHITS modellemesindeki gösterimi

MC programlarının hepsinde hemen hemen tüm enerjilerde deneysel verime en yakın fotopik verimi 1,2-1,3 mm kalınlıkta elde edilmiştir. Bu aralıkta kalınlık tekrar 0,01 mm aralıklarla incelendiğinde deneysel sonuçlara en yakın sonuçların 1,29 mm'de elde edildiği görülmüş ve optimum değer 1,29 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.19).

59,5 keV-1408 keV enerji aralığında 0,7 mm, 0,8 mm, 0,9 mm, 1 mm, 1,1 mm, 1,2 mm, 1,29 mm ve 1,3 mm DL kalınlıklarında PHITS, GESPECOR ve DETEFF MC programlarından hesaplanan simüle verim değerleri Çizelge 4.15-4.17'de verilmektedir. Çizelgelerden görüldüğü gibi tüm enerjilerde DL kalınlığı arttıkça fotopik verimi azalmaktadır, bunun temel sebebi, dedektörün aktif hacminin küçülmesidir (Şekil 4.20).



Şekil 4.20. DET1 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında deneysel ve PHITS MC ile hesaplanan verim değerleri

DL etkisinin baskın olduğu 59,5 keV'de, 0,7 mm kalınlık dikkate alınarak hesaplanan verimle deneysel verimin % farkları; DETEFF'te % 121, GESPECOR'da % 124, PHITS'te ise % 100'dür (Çizelge 4.19). 1,29 mm optimum değerde ise farklar; DETEFF'te % 14,4, GESPECOR'da % 16, PHITS'te % 3,9'dur (Çizelge 4.20). Orta ve yüksek enerji bölgelerinde ise 0,7 mm DL kalınlığında DETEFF'te ortalama % 10, GESPECOR ve PHITS'te yaklaşık % 6-7; 1,29 mm optimum değerde ise DETEFF'te % 3-4, GESPECOR ve PHITS'te ortalama % 1 farklar vardır.

Sonuç olarak DET1 dedektöründe üretici tarafından verilen nominal değere göre yaklaşık 15 yıllık kullanım sonucu ölü tabakanın 0,59 mm kalınlaşarak 1,29 mm'ye çıktığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.16. DET1 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen verim değerleri

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Toplam enerji pik verimi (FEPE)							
		0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,29 mm	1,3 mm
²⁴¹ Am	59,54	0,00930	0,00832	0,00745	0,00666	0,00596	0,00533	0,00483	0,00478
¹³³ Ba	81,00	0,01488	0,01413	0,01342	0,01275	0,01212	0,01152	0,01098	0,01093
¹⁵² Eu	121,78	0,01767	0,01727	0,01688	0,01651	0,01613	0,01577	0,01545	0,01542
¹³³ Ba	302,85	0,01322	0,01308	0,01292	0,01278	0,01264	0,01249	0,01237	0,01235
¹⁵² Eu	344,28	0,01233	0,01220	0,01207	0,01194	0,01181	0,01168	0,01157	0,01156
¹³³ Ba	356,01	0,01210	0,01197	0,01185	0,01173	0,01159	0,01147	0,01135	0,01134
¹³³ Ba	383,85	0,01162	0,01148	0,01137	0,01124	0,01113	0,01101	0,01090	0,01089
¹³⁴ Cs	569,33	0,00938	0,00929	0,00920	0,00910	0,00901	0,00891	0,00882	0,00882
¹³⁴ Cs	604,72	0,00909	0,00900	0,00890	0,00881	0,00872	0,00863	0,00855	0,00854
¹³⁷ Cs	661,66	0,00866	0,00857	0,00848	0,00839	0,00831	0,00822	0,00815	0,00814
¹⁵² Eu	778,91	0,00791	0,00783	0,00775	0,00767	0,00760	0,00752	0,00745	0,00744
¹³⁴ Cs	795,86	0,00782	0,00774	0,00767	0,00759	0,00751	0,00743	0,00736	0,00735
¹⁵² Eu	964,08	0,00705	0,00699	0,00692	0,00685	0,00679	0,00672	0,00666	0,00665
¹⁵² Eu	1112,07	0,00651	0,00645	0,00638	0,00632	0,00626	0,00620	0,00615	0,00614
⁶⁰ Co	1173,23	0,00633	0,00627	0,00621	0,00615	0,00609	0,00603	0,00599	0,00598
⁶⁰ Co	1332,49	0,00589	0,00584	0,00578	0,00573	0,00568	0,00563	0,00558	0,00557
¹⁵² Eu	1408,01	0,00572	0,00567	0,00561	0,00556	0,00551	0,00545	0,00541	0,00540

Çizelge 4.17. DET1 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen verim değerleri

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Toplam enerji pik verimi (FEPE)							
		0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,29 mm	1,3 mm
²⁴¹ Am	59,54	0,01039	0,00930	0,00832	0,00744	0,00666	0,00596	0,00539	0,00535
¹³³ Ba	81,00	0,01591	0,01511	0,01435	0,01363	0,01295	0,01230	0,01174	0,01168
¹⁵² Eu	121,78	0,01831	0,01788	0,01746	0,01707	0,01667	0,01630	0,01596	0,01593
¹³³ Ba	302,85	0,01328	0,01312	0,01297	0,01282	0,01266	0,01251	0,01239	0,01236
¹⁵² Eu	344,28	0,01236	0,01221	0,01207	0,01195	0,01182	0,01167	0,01155	0,01154
¹³³ Ba	356,01	0,01213	0,01199	0,01185	0,01172	0,01159	0,01145	0,01134	0,01132
¹³³ Ba	383,85	0,01163	0,01149	0,01136	0,01124	0,01112	0,01100	0,01088	0,01087
¹³⁴ Cs	569,33	0,00932	0,00923	0,00913	0,00904	0,00894	0,00885	0,00876	0,00875
¹³⁴ Cs	604,72	0,00902	0,00892	0,00883	0,00874	0,00865	0,00853	0,00847	0,00844
¹³⁷ Cs	661,66	0,00859	0,00851	0,00841	0,00832	0,00824	0,00814	0,00808	0,00805
¹⁵² Eu	778,91	0,00787	0,00779	0,00771	0,00762	0,00754	0,00747	0,00740	0,00739
¹³⁴ Cs	795,86	0,00778	0,00769	0,00761	0,00753	0,00745	0,00738	0,00731	0,00730
¹⁵² Eu	964,08	0,00702	0,00694	0,00687	0,00680	0,00673	0,00668	0,00660	0,00660
¹⁵² Eu	1112,07	0,00648	0,00642	0,00636	0,00629	0,00623	0,00616	0,00610	0,00610
⁶⁰ Co	1173,23	0,00630	0,00623	0,00616	0,00610	0,00604	0,00597	0,00591	0,00591
⁶⁰ Co	1332,49	0,00585	0,00579	0,00573	0,00567	0,00561	0,00555	0,00551	0,00549
¹⁵² Eu	1408,01	0,00566	0,00562	0,00556	0,00550	0,00544	0,00538	0,00533	0,00533

Çizelge 4.18. DET1 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında DETEFF MC ile elde edilen verim değerleri

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Toplam enerji pik verimi (FEPE)							
		0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,29 mm	1,3 mm
²⁴¹ Am	59,54	0,01029	0,00922	0,00825	0,00738	0,00657	0,00590	0,00532	0,00528
¹³³ Ba	81,00	0,01588	0,01505	0,01431	0,01357	0,01290	0,01226	0,01170	0,01161
¹⁵² Eu	121,78	0,01848	0,01811	0,01766	0,01727	0,01688	0,01647	0,01609	0,01606
¹³³ Ba	302,85	0,01367	0,01353	0,01337	0,01320	0,01312	0,01283	0,01277	0,01272
¹⁵² Eu	344,28	0,01275	0,01262	0,01243	0,01236	0,01215	0,01203	0,01192	0,01191
¹³³ Ba	356,01	0,01253	0,01241	0,01225	0,01213	0,01196	0,01187	0,01173	0,01171
¹³³ Ba	383,85	0,01199	0,01192	0,01175	0,01160	0,01151	0,01136	0,01122	0,01124
¹³⁴ Cs	569,33	0,00965	0,00960	0,00947	0,00937	0,00929	0,00918	0,00908	0,00904
¹³⁴ Cs	604,72	0,00936	0,00926	0,00917	0,00904	0,00897	0,00892	0,00877	0,00882
¹³⁷ Cs	661,66	0,00893	0,00886	0,00872	0,00863	0,00855	0,00847	0,00841	0,00838
¹⁵² Eu	778,91	0,00817	0,00808	0,00803	0,00791	0,00783	0,00777	0,00768	0,00768
¹³⁴ Cs	795,86	0,00813	0,00797	0,00791	0,00783	0,00774	0,00768	0,00761	0,00760
¹⁵² Eu	964,08	0,00730	0,00719	0,00714	0,00706	0,00697	0,00691	0,00685	0,00683
¹⁵² Eu	1112,07	0,00672	0,00666	0,00660	0,00650	0,00644	0,00641	0,00633	0,00634
⁶⁰ Co	1173,23	0,00655	0,00647	0,00641	0,00632	0,00629	0,00624	0,00615	0,00614
⁶⁰ Co	1332,49	0,00609	0,00601	0,00597	0,00591	0,00583	0,00580	0,00572	0,00572
¹⁵² Eu	1408,01	0,00586	0,00584	0,00580	0,00570	0,00566	0,00562	0,00556	0,00555

Çizelge 4.19. DET1 dedektörünün deneysel verimi ve 0,7 mm DL kalınlık değerinde PHITS, GESPECOR, DETEFF MC ile hesaplanmış verim değerlerinin karşılaştırılması

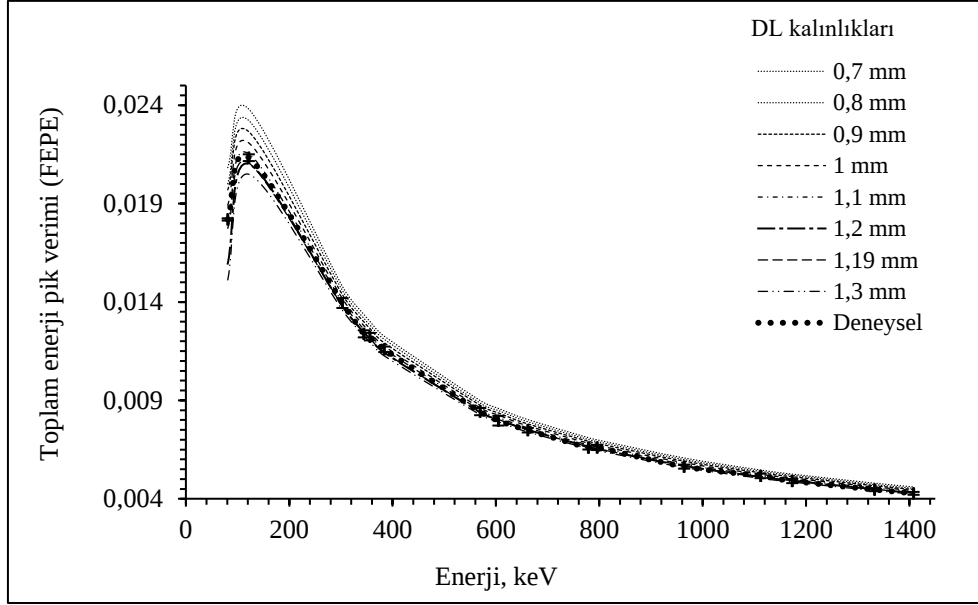
Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Deneysel verim (% belirsizlik)	MC ile hesaplanan verimler			Deneysel verimden % fark		
			DETEFF	GESPECOR	PHITS	DETEFF	GESPECOR	PHITS
²⁴¹ Am	59,54	0,00465 (1,23)	0,01029	0,01039	0,00930	121	124	100
¹³³ Ba	81,00	0,01113 (1,55)	0,01588	0,01591	0,01488	42,7	43,0	33,7
¹⁵² Eu	121,78	0,01536 (1,64)	0,01848	0,01831	0,01767	20,3	19,2	15,0
¹³³ Ba	302,85	0,01237 (1,45)	0,01367	0,01328	0,01322	10,5	7,3	6,9
¹⁵² Eu	344,28	0,01152 (1,65)	0,01275	0,01236	0,01233	10,7	7,3	7,0
¹³³ Ba	356,01	0,01130 (1,24)	0,01253	0,01213	0,01210	10,9	7,3	7,1
¹³³ Ba	383,85	0,01093 (1,67)	0,01199	0,01163	0,01162	9,7	6,4	6,3
¹³⁴ Cs	569,33	0,00871 (2,82)	0,00965	0,00932	0,00938	10,8	7,0	7,7
¹³⁴ Cs	604,72	0,00858 (1,33)	0,00936	0,00902	0,00909	9,1	5,1	5,9
¹³⁷ Cs	661,66	0,00812 (1,16)	0,00893	0,00859	0,00866	9,9	5,7	6,6
¹⁵² Eu	778,91	0,00741 (1,73)	0,00817	0,00787	0,00791	10,2	6,2	6,8
¹³⁴ Cs	795,86	0,00733 (1,41)	0,00813	0,00778	0,00782	10,8	6,1	6,6
¹⁵² Eu	964,08	0,00665 (1,71)	0,00730	0,00702	0,00705	9,7	5,5	7,7
¹⁵² Eu	1112,07	0,00615 (1,74)	0,00672	0,00648	0,00651	9,2	5,4	5,9
⁶⁰ Co	1173,23	0,00595 (1,32)	0,00655	0,00630	0,00633	10,1	5,8	6,4
⁶⁰ Co	1332,49	0,00558 (1,33)	0,00609	0,00585	0,00589	9,1	4,8	5,6
¹⁵² Eu	1408,01	0,00535 (1,69)	0,00586	0,00566	0,00572	9,5	5,7	6,9

Çizelge 4.20. DET1 dedektörünün deneysel verim ve 1,29 mm optimize edilen DL kalınlık değerinde PHITS, GESPECOR, DETEFF MC ile hesaplanmış verim değerleri

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Deneysel verim (% belirsizlik)	MC ile hesaplanan verimler			Deneysel verimden % fark		
			DETEFF	GESPECOR	PHITS	DETEFF	GESPECOR	PHITS
²⁴¹ Am	59,54	0,00465 (1,23)	0,00532	0,00539	0,00483	14,4	16,0	3,9
¹³³ Ba	81,00	0,01113 (1,55)	0,01170	0,01174	0,01098	5,1	5,5	1,3
¹⁵² Eu	121,78	0,01536 (1,64)	0,01609	0,01596	0,01545	4,8	3,9	0,6
¹³³ Ba	302,85	0,01237 (1,45)	0,01277	0,01239	0,01237	3,2	0,2	0,0
¹⁵² Eu	344,28	0,01152 (1,65)	0,01192	0,01155	0,01157	3,5	0,3	0,4
¹³³ Ba	356,01	0,01130 (1,24)	0,01173	0,01134	0,01135	3,8	0,4	0,5
¹³³ Ba	383,85	0,01093 (1,67)	0,01122	0,01088	0,01090	2,6	0,5	0,3
¹³⁴ Cs	569,33	0,00871 (2,82)	0,00908	0,00876	0,00882	4,2	0,6	1,3
¹³⁴ Cs	604,72	0,00858 (1,33)	0,00877	0,00847	0,00855	2,3	1,3	0,3
¹³⁷ Cs	661,66	0,00812 (1,16)	0,00841	0,00808	0,00815	3,6	0,6	0,3
¹⁵² Eu	778,91	0,00741 (1,73)	0,00769	0,00740	0,00745	3,8	0,1	0,6
¹³⁴ Cs	795,86	0,00733 (1,41)	0,00761	0,00731	0,00736	3,8	0,3	0,4
¹⁵² Eu	964,08	0,00665 (1,71)	0,00685	0,00660	0,00666	3,0	0,8	0,1
¹⁵² Eu	1112,07	0,00615 (1,74)	0,00633	0,00610	0,00615	2,8	0,8	0,0
⁶⁰ Co	1173,23	0,00595 (1,32)	0,00615	0,00591	0,00599	3,3	0,6	0,6
⁶⁰ Co	1332,49	0,00558 (1,33)	0,00571	0,00551	0,00558	2,4	1,3	0,1
¹⁵² Eu	1408,01	0,00535 (1,69)	0,00556	0,00533	0,00541	3,9	0,3	1,0

4.3.2. DET2 dedektörü ölü tabaka kalınlık etkisi

p-tipi %58,5 bağıl verimli DET2 dedektörünün DL kalınlığının belirlenmesi için de öncelikle dedektör penceresinden 7,5 cm uzaklıkta nokta kaynak geometrisinde 81 keV-1408 keV enerji aralığındaki farklı foton enerjileri kullanılarak deneysel verim değerleri elde edilmiştir. Üretici tarafından tam değeri yerine <1 mm olarak verilen DET2 dedektörünün DL kalınlığı, tipik bir lityum n+ kontağının yaklaşık kalınlığı olan 700 µm (0,7 mm) olarak (Gilmore, 2008:48) alınmıştır. Dedektör PHITS, GESPECOR ve DETEFF'te ilk olarak 0,7 mm'de modellenmiş, sonra 0,1 mm aralıklarla 1,3 mm'ye kadar artırılarak taranmıştır (Şekil 4.21). Hemen hemen tüm enerjilerde deneysel verime en yakın simüle FEPE değerlerinin 1,1 - 1,2 mm arasında olduğu belirlenmiştir. Daha sonra 1,1 – 1,2 mm kalınlık aralığı 0,01 mm aralıklarla detaylı olarak incelendiğinde, tüm enerjilerde 1,19 mm DL kalınlığında deneysel değerlere en yakın FEPE değerleri elde edilmiştir. 81 keV-1408 keV enerji aralığında 0,7 mm, 0,8 mm, 0,9 mm, 1 mm, 1,1 mm, 1,19 mm, 1,2 mm ve 1,3 mm DL kalınlıklarında PHITS, GESPECOR ve DETEFF MC programlarından hesaplanan simüle verim değerleri Çizelge 4.21-4.23'te verilmektedir.



Şekil 4.21. DET2 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında deneysel ve PHITS MC ile hesaplanan verim değerleri

Etkinin baskın olduğu 81 keV’de, 0,7 mm üretici tarafından verilen değerde deneysel verimden % farklar; DETEFF’te % 22, GESPECOR’da % 23, PHITS’te ise % 14’tür (Çizelge 4.24). 1,19 mm optimum değerde ise farklar; DETEFF’te % 3,8, GESPECOR’da % 4,7, PHITS’te % 2,5’dir (Çizelge 4.25). Orta ve yüksek enerji bölgelerinde ise 0,7 mm DL kalınlığında DETEFF’te ortalama % 10, GESPECOR ve PHITS’te yaklaşık % 6-7; 1,19 mm optimum değerde ise DETEFF’te % 3-4, GESPECOR’da % 2,5, PHITS’te ortalama % 1 farklar vardır.

DET 2 dedektörünün yaklaşık 9 yıllık kullanımından sonra ölü tabakasının 0,49 mm kalınlaşarak 1,19 mm’ye çıktığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.21. DET2 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen verim değerleri

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Toplam enerji pik verimi (FEPE)							
		0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1 mm	1,1 mm	1,19 mm	1,2 mm	1,3 mm
¹³³ Ba	81,00	0,02083	0,02001	0,01970	0,01892	0,01804	0,01774	0,01595	0,01512
¹⁵² Eu	121,78	0,02380	0,02322	0,02265	0,02208	0,02153	0,02106	0,02101	0,02049
¹³³ Ba	302,85	0,01479	0,01458	0,01437	0,01417	0,01398	0,01380	0,01378	0,01358
¹⁵² Eu	344,28	0,01337	0,01317	0,01299	0,01280	0,01262	0,01247	0,01245	0,01228
¹³³ Ba	356,01	0,01302	0,01283	0,01266	0,01249	0,01232	0,01216	0,01214	0,01198
¹³³ Ba	383,85	0,01226	0,01210	0,01192	0,01175	0,01159	0,01144	0,01142	0,01126
¹³⁴ Cs	569,33	0,00899	0,00886	0,00875	0,00862	0,00851	0,00841	0,00839	0,00827
¹³⁴ Cs	604,72	0,00859	0,00848	0,00836	0,00825	0,00813	0,00803	0,00802	0,00791
¹³⁷ Cs	661,66	0,00802	0,00791	0,00780	0,00770	0,00760	0,00750	0,00750	0,00739
¹⁵² Eu	778,91	0,00710	0,00701	0,00692	0,00682	0,00673	0,00664	0,00664	0,00655
¹³⁴ Cs	795,86	0,00699	0,00690	0,00681	0,00671	0,00663	0,00654	0,00653	0,00645
¹⁵² Eu	964,08	0,00607	0,00599	0,00591	0,00583	0,00575	0,00568	0,00567	0,00559
¹⁵² Eu	1112,07	0,00546	0,00539	0,00532	0,00524	0,00517	0,00511	0,00511	0,00504
⁶⁰ Co	1173,23	0,00525	0,00519	0,00512	0,00505	0,00498	0,00492	0,00492	0,00485
⁶⁰ Co	1332,49	0,00479	0,00472	0,00466	0,00460	0,00454	0,00448	0,00448	0,00441
¹⁵² Eu	1408,01	0,00460	0,00453	0,00447	0,00442	0,00435	0,00430	0,00429	0,00424

Çizelge 4.22. DET2 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen verim değerleri

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Toplam enerji pik verimi (FEPE)							
		0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1 mm	1,1 mm	1,19 mm	1,2 mm	1,3 mm
¹³³ Ba	81,00	0,02243	0,02125	0,02013	0,01906	0,01805	0,01718	0,01709	0,01618
¹⁵² Eu	121,78	0,02483	0,02419	0,02357	0,02297	0,02239	0,02186	0,02181	0,02126
¹³³ Ba	302,85	0,01510	0,01487	0,01465	0,01443	0,01422	0,01404	0,01402	0,01382
¹⁵² Eu	344,28	0,01363	0,01343	0,01323	0,01305	0,01286	0,01269	0,01267	0,01249
¹³³ Ba	356,01	0,01326	0,01306	0,01287	0,01269	0,01250	0,01234	0,01233	0,01214
¹³³ Ba	383,85	0,01247	0,01229	0,01211	0,01194	0,01176	0,01160	0,01159	0,01142
¹³⁴ Cs	569,33	0,00917	0,00904	0,00892	0,00877	0,00865	0,00854	0,00853	0,00842
¹³⁴ Cs	604,72	0,00875	0,00864	0,00850	0,00836	0,00825	0,00815	0,00813	0,00802
¹³⁷ Cs	661,66	0,00818	0,00807	0,00796	0,00785	0,00774	0,00764	0,00763	0,00752
¹⁵² Eu	778,91	0,00726	0,00716	0,00706	0,00697	0,00687	0,00678	0,00677	0,00667
¹³⁴ Cs	795,86	0,00715	0,00705	0,00695	0,00685	0,00676	0,00667	0,00666	0,00656
¹⁵² Eu	964,08	0,00621	0,00612	0,00602	0,00595	0,00587	0,00578	0,00577	0,00571
¹⁵² Eu	1112,07	0,00558	0,00551	0,00543	0,00536	0,00529	0,00523	0,00522	0,00514
⁶⁰ Co	1173,23	0,00539	0,00532	0,00524	0,00516	0,00510	0,00503	0,00502	0,00495
⁶⁰ Co	1332,49	0,00491	0,00484	0,00478	0,00471	0,00464	0,00458	0,00457	0,00451
¹⁵² Eu	1408,01	0,00470	0,00464	0,00457	0,00451	0,00444	0,00438	0,00438	0,00432

Çizelge 4.23. DET2 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında DETEFF MC ile elde edilen verim değerleri

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Toplam enerji pik verimi (FEPE)							
		0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1 mm	1,1 mm	1,19 mm	1,2 mm	1,3 mm
¹³³ Ba	81,00	0,02155	0,02102	0,02083	0,01973	0,01870	0,01774	0,01683	0,01595
¹⁵² Eu	121,78	0,02505	0,02434	0,02381	0,02311	0,02258	0,02202	0,02192	0,02143
¹³³ Ba	302,85	0,01545	0,01516	0,01495	0,01473	0,01455	0,01431	0,01428	0,01408
¹⁵² Eu	344,28	0,01392	0,01373	0,01351	0,01330	0,01312	0,01292	0,01294	0,01271
¹³³ Ba	356,01	0,01354	0,01334	0,01315	0,01298	0,01279	0,01258	0,01257	0,01235
¹³³ Ba	383,85	0,01277	0,01255	0,01238	0,01220	0,01199	0,01184	0,01183	0,01172
¹³⁴ Cs	569,33	0,00933	0,00924	0,00905	0,00896	0,00884	0,00872	0,00872	0,00857
¹³⁴ Cs	604,72	0,00894	0,00879	0,00868	0,00857	0,00840	0,00832	0,00827	0,00819
¹³⁷ Cs	661,66	0,00836	0,00822	0,00810	0,00798	0,00788	0,00775	0,00775	0,00765
¹⁵² Eu	778,91	0,00741	0,00728	0,00719	0,00705	0,00694	0,00692	0,00686	0,00675
¹³⁴ Cs	795,86	0,00726	0,00715	0,00708	0,00697	0,00687	0,00678	0,00673	0,00666
¹⁵² Eu	964,08	0,00631	0,00625	0,00613	0,00608	0,00599	0,00589	0,00587	0,00580
¹⁵² Eu	1112,07	0,00571	0,00561	0,00553	0,00542	0,00538	0,00529	0,00526	0,00520
⁶⁰ Co	1173,23	0,00544	0,00537	0,00533	0,00524	0,00514	0,00507	0,00505	0,00499
⁶⁰ Co	1332,49	0,00496	0,00488	0,00481	0,00476	0,00468	0,00461	0,00463	0,00455
¹⁵² Eu	1408,01	0,00477	0,00471	0,00463	0,00457	0,00448	0,00443	0,00442	0,00435

Çizelge 4.24. DET2 dedektörünün deneysel verimi ve 0,7 mm DL kalınlık değerinde PHITS, GESPECOR, DETEFF MC ile hesaplanmış verim değerlerinin karşılaştırılması

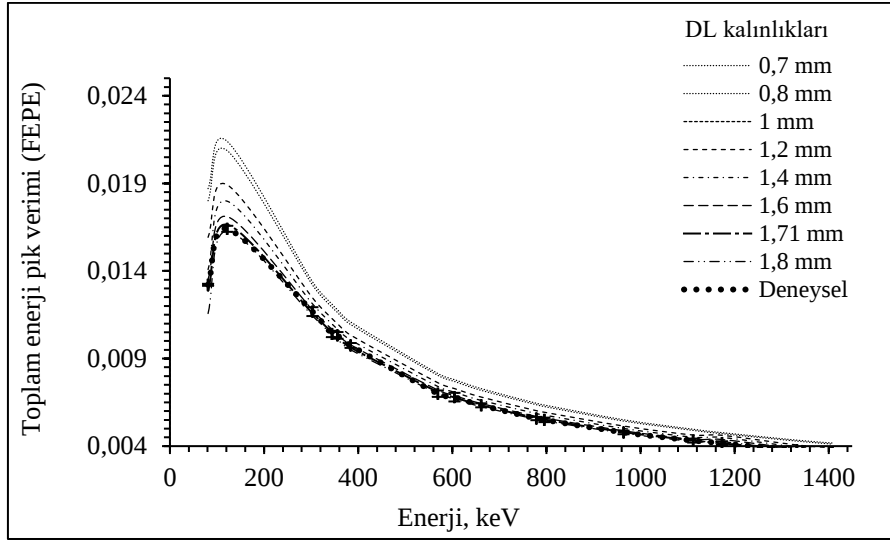
Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Deneysel verim (% belirsizlik)	MC ile hesaplanan verimler			Deneysel verimden % fark		
			DETEFF	GESPECOR	PHITS	DETEFF	GESPECOR	PHITS
¹³³ Ba	81,00	0,01819 (1,51)	0,02228	0,02243	0,02083	22	23	14
¹⁵² Eu	121,78	0,02133 (1,63)	0,02505	0,02484	0,02380	17	16	12
¹³³ Ba	302,85	0,01395 (1,42)	0,01545	0,01509	0,01479	11	8	6
¹⁵² Eu	344,28	0,01238 (1,64)	0,01392	0,01361	0,01337	12	10	8
¹³³ Ba	356,01	0,01224 (1,23)	0,01354	0,01327	0,01302	11	8	6
¹³³ Ba	383,85	0,01160 (1,60)	0,01277	0,01248	0,01226	10	8	6
¹³⁴ Cs	569,33	0,00843 (3,67)	0,00933	0,00916	0,00899	11	9	7
¹³⁴ Cs	604,72	0,00797 (1,55)	0,00894	0,00875	0,00859	12	10	8
¹³⁷ Cs	661,66	0,00748 (1,22)	0,00836	0,00818	0,00802	12	9	7
¹⁵² Eu	778,91	0,00660 (1,72)	0,00741	0,00726	0,00710	12	10	8
¹³⁴ Cs	795,86	0,00660 (1,72)	0,00726	0,00715	0,00699	10	8	6
¹⁵² Eu	964,08	0,00563 (1,71)	0,00631	0,00622	0,00607	12	10	8
¹⁵² Eu	1112,07	0,00516 (1,72)	0,00571	0,00560	0,00546	11	9	6
⁶⁰ Co	1173,23	0,00490 (1,62)	0,00544	0,00539	0,00525	11	10	7
⁶⁰ Co	1332,49	0,00446 (1,64)	0,00496	0,00490	0,00479	11	10	7
¹⁵² Eu	1408,01	0,00427 (1,68)	0,00477	0,00471	0,00460	12	10	8

Çizelge 4.25. DET2 dedektörünün deneysel verimi ve 1,19 mm optimize edilen DL kalınlık değerinde PHITS, GESPECOR, DETEFF MC ile hesaplanmış verim değerlerinin karşılaştırılması

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Deneysel verim (% belirsizlik)	MC ile hesaplanan verimler			Deneysel verimden % fark		
			DETEFF	GESPECOR	PHITS	DETEFF	GESPECOR	PHITS
¹³³ Ba	81,00	0,01819 (1,51)	0,01889	0,01905	0,01774	3,8	4,7	2,5
¹⁵² Eu	121,78	0,02133 (1,63)	0,02202	0,02187	0,02106	3,2	2,5	1,3
¹³³ Ba	302,85	0,01395 (1,42)	0,01431	0,01404	0,01380	2,6	0,7	1,1
¹⁵² Eu	344,28	0,01238 (1,64)	0,01292	0,01268	0,01247	4,4	2,4	0,7
¹³³ Ba	356,01	0,01224 (1,23)	0,01258	0,01235	0,01216	2,8	0,9	0,6
¹³³ Ba	383,85	0,01160 (1,60)	0,01184	0,01163	0,01144	2,1	0,3	1,3
¹³⁴ Cs	569,33	0,00843 (3,67)	0,00872	0,00855	0,00841	3,5	1,4	0,3
¹³⁴ Cs	604,72	0,00797 (1,55)	0,00832	0,00817	0,00803	4,5	2,5	0,8
¹³⁷ Cs	661,66	0,00748 (1,22)	0,00775	0,00763	0,00750	3,6	2,0	0,3
¹⁵² Eu	778,91	0,00660 (1,72)	0,00692	0,00677	0,00664	4,9	2,7	0,7
¹³⁴ Cs	795,86	0,00660 (1,72)	0,00678	0,00667	0,00654	2,7	1,0	0,9
¹⁵² Eu	964,08	0,00563 (1,71)	0,00589	0,00580	0,00568	4,5	3,0	0,8
¹⁵² Eu	1112,07	0,00516 (1,72)	0,00529	0,00523	0,00511	2,5	1,3	0,9
⁶⁰ Co	1173,23	0,00490 (1,62)	0,00507	0,00502	0,00492	3,4	2,5	0,5
⁶⁰ Co	1332,49	0,00446 (1,64)	0,00461	0,00458	0,00448	3,2	2,6	0,4
¹⁵² Eu	1408,01	0,00427 (1,68)	0,00443	0,00439	0,00430	3,6	2,8	0,6

4.3.3. DET3 dedektörü ölü tabaka kalınlık etkisi

p-tipi %54,7 bağıl verimli DET3 dedektörünün optimum DL kalınlığı da DET2’dekine benzer şekilde hesaplanmıştır. Öncelikle sistemin ölü zamanı kontrol edilerek belirlenen 8 cm mesafede 81 keV - 1408 keV enerji aralığındaki nokta ile deneysel verim değerleri belirlenmiştir. DET2’de olduğu gibi üretici tarafından tam değeri yerine <1 mm olarak verilen DL kalınlığı DET3’te de 0,7 mm olarak alınmıştır. Dedektör PHITS, GESPECOR ve DETEFF’te ilk olarak üretici DL kalınlığı olarak alınan 0,7 mm değerinden başlanarak önce 0,1 mm aralıklarla daha sonra ise deneysel değerden hala uzakta olmamız nedeniyle 0,2 mm aralıklarla artırılarak 1,8 mm’ye kadar taranmıştır. Tüm enerjilerde deneysel verime en yakın simüle FEPE değerlerinin 1,7 - 1,8 mm arasında olduğu belirlenmiştir. Daha sonra 1,7- 1,8 mm kalınlık aralığı 0,01 mm aralıklarla detaylı olarak incelendiğinde, tüm enerjilerde 1,71 mm DL kalınlığında deneysel değerlere en yakın FEPE değerleri elde edilmiştir. 81 keV-1408 keV enerji aralığında PHITS, GESPECOR ve DETEFF MC programlarından hesaplanan simüle verim değerleri Çizelge 4.26-4.28’de verilmektedir. Çizelgelerden görüldüğü gibi tüm enerjilerde DL kalınlığı arttıkça dedektörün aktif hacmi küçüldüğü için fotopik verimi azalmaktadır (Şekil 4.22).



Şekil 4.22. DET3 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında deneysel ve PHITS MC ile hesaplanan verim değerleri

Etkinin baskın olduğu 81 keV’de, 0,7 mm değerinde deneysel verimden % farklar; DETEFF ve GESPECOR’da % 52, PHITS’te ise % 42’dir (Çizelge 4.29). 1,71 mm optimum değerde ise farklar; DETEFF’te % 13, GESPECOR’da % 12, PHITS’te % 2,5’dir (Çizelge 4.30). Orta ve yüksek enerji bölgelerinde ise 0,7 mm DL kalınlığında DETEFF’te ortalama % 20, GESPECOR’da % 18, PHITS’te yaklaşık % 15; 1,71 mm optimum değerde ise DETEFF’te % 3, GESPECOR’da % 2, PHITS’te ortalama <% 1 farklar vardır. DET 3 dedektörünün de yaklaşık 9 yıllık kullanımından sonra ölü tabakasının 1,01 mm kalınlaştığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.26. DET3 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen verim değerleri

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Toplam enerji pik verimi (FEPE)							
		0,7 mm	0,8 mm	1 mm	1,2 mm	1,4 mm	1,6 mm	1,71 mm	1,8 mm
¹³³ Ba	81,00	0,01870	0,01801	0,01685	0,01592	0,01408	0,01352	0,01288	0,01157
¹⁵² Eu	121,78	0,02140	0,02087	0,01986	0,01892	0,01798	0,01710	0,01664	0,01627
¹³³ Ba	302,85	0,01339	0,01320	0,01283	0,01247	0,01213	0,01178	0,01159	0,01144
¹⁵² Eu	344,28	0,01211	0,01194	0,01161	0,01129	0,01098	0,01067	0,01050	0,01036
¹³³ Ba	356,01	0,01179	0,01163	0,01132	0,01099	0,01069	0,01039	0,01023	0,01009
¹³³ Ba	383,85	0,01109	0,01094	0,01064	0,01034	0,01006	0,00978	0,00963	0,00950
¹³⁴ Cs	569,33	0,00815	0,00804	0,00783	0,00762	0,00741	0,00720	0,00709	0,00700
¹³⁴ Cs	604,72	0,00780	0,00769	0,00749	0,00729	0,00708	0,00688	0,00678	0,00670
¹³⁷ Cs	661,66	0,00728	0,00718	0,00700	0,00680	0,00661	0,00643	0,00633	0,00625
¹⁵² Eu	778,91	0,00645	0,00636	0,00619	0,00602	0,00586	0,00569	0,00560	0,00553
¹³⁴ Cs	795,86	0,00635	0,00626	0,00609	0,00593	0,00577	0,00560	0,00552	0,00544
¹⁵² Eu	964,08	0,00551	0,00543	0,00529	0,00515	0,00501	0,00487	0,00480	0,00474
¹⁵² Eu	1112,07	0,00496	0,00490	0,00476	0,00464	0,00451	0,00439	0,00433	0,00427
⁶⁰ Co	1173,23	0,00477	0,00471	0,00459	0,00462	0,00450	0,00438	0,00416	0,00426
⁶⁰ Co	1332,49	0,00434	0,00429	0,00418	0,00407	0,00395	0,00385	0,00379	0,00374
¹⁵² Eu	1408,01	0,00418	0,00412	0,00401	0,00390	0,00379	0,00369	0,00363	0,00359

Çizelge 4.27. DET3 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen verim değerleri

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Toplam enerji pik verimi (FEPE)							
		0,7 mm	0,8 mm	1 mm	1,2 mm	1,4 mm	1,6 mm	1,71 mm	1,8 mm
¹³³ Ba	81,00	0,02012	0,01906	0,01710	0,01534	0,01377	0,01236	0,01164	0,01108
¹⁵² Eu	121,78	0,02231	0,02174	0,02065	0,01961	0,01862	0,01766	0,01704	0,01678
¹³³ Ba	302,85	0,01365	0,01345	0,01305	0,01268	0,01231	0,01196	0,01176	0,01160
¹⁵² Eu	344,28	0,01233	0,01216	0,01181	0,01147	0,01114	0,01081	0,01064	0,01049
¹³³ Ba	356,01	0,01199	0,01181	0,01149	0,01115	0,01083	0,01053	0,01037	0,01023
¹³³ Ba	383,85	0,01131	0,01114	0,01082	0,01052	0,01022	0,00992	0,00976	0,00963
¹³⁴ Cs	569,33	0,00831	0,00819	0,00795	0,00774	0,00751	0,00730	0,00719	0,00709
¹³⁴ Cs	604,72	0,00792	0,00781	0,00758	0,00737	0,00717	0,00697	0,00687	0,00678
¹³⁷ Cs	661,66	0,00742	0,00732	0,00712	0,00692	0,00606	0,00653	0,00642	0,00635
¹⁵² Eu	778,91	0,00658	0,00649	0,00631	0,00613	0,00597	0,00581	0,00570	0,00564
¹³⁴ Cs	795,86	0,00647	0,00639	0,00621	0,00604	0,00587	0,00571	0,00562	0,00555
¹⁵² Eu	964,08	0,00565	0,00557	0,00541	0,00525	0,00510	0,00496	0,00489	0,00482
¹⁵² Eu	1112,07	0,00510	0,00503	0,00489	0,00476	0,00462	0,00449	0,00440	0,00436
⁶⁰ Co	1173,23	0,00490	0,00483	0,00470	0,00457	0,00445	0,00433	0,00424	0,00421
⁶⁰ Co	1332,49	0,00447	0,00441	0,00428	0,00416	0,00405	0,00393	0,00386	0,00381
¹⁵² Eu	1408,01	0,00429	0,00423	0,00411	0,00399	0,00389	0,00377	0,00371	0,00367

Çizelge 4.28. DET3 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında DETEFF MC ile elde edilen verim değerleri

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Toplam enerji pik verimi (FEPE)							
		0,7 mm	0,8 mm	1 mm	1,2 mm	1,4 mm	1,6 mm	1,71 mm	1,8 mm
¹³³ Ba	81,00	0,02001	0,01895	0,01697	0,01520	0,01363	0,01223	0,01151	0,01095
¹⁵² Eu	121,78	0,02247	0,02197	0,02080	0,01977	0,01875	0,01780	0,01701	0,01689
¹³³ Ba	302,85	0,01395	0,01373	0,01335	0,01292	0,01258	0,01219	0,01202	0,01182
¹⁵² Eu	344,28	0,01252	0,01240	0,01208	0,01171	0,01130	0,01102	0,01087	0,01063
¹³³ Ba	356,01	0,01223	0,01208	0,01174	0,01141	0,01106	0,01073	0,01055	0,01041
¹³³ Ba	383,85	0,01152	0,01138	0,01104	0,01073	0,01040	0,01009	0,00990	0,00977
¹³⁴ Cs	569,33	0,00843	0,00831	0,00810	0,00783	0,00765	0,00741	0,00728	0,00721
¹³⁴ Cs	604,72	0,00810	0,00796	0,00773	0,00755	0,00730	0,00710	0,00699	0,00688
¹³⁷ Cs	661,66	0,00756	0,00746	0,00725	0,00702	0,00682	0,00662	0,00652	0,00647
¹⁵² Eu	778,91	0,00666	0,00662	0,00641	0,00624	0,00605	0,00585	0,00579	0,00568
¹³⁴ Cs	795,86	0,00660	0,00649	0,00633	0,00614	0,00594	0,00574	0,00567	0,00563
¹⁵² Eu	964,08	0,00572	0,00564	0,00548	0,00532	0,00514	0,00502	0,00494	0,00487
¹⁵² Eu	1112,07	0,00514	0,00509	0,00493	0,00480	0,00464	0,00452	0,00443	0,00437
⁶⁰ Co	1173,23	0,00497	0,00487	0,00476	0,00462	0,00448	0,00433	0,00428	0,00418
⁶⁰ Co	1332,49	0,00449	0,00447	0,00429	0,00420	0,00405	0,00394	0,00389	0,00381
¹⁵² Eu	1408,01	0,00433	0,00425	0,00413	0,00401	0,00390	0,00378	0,00373	0,00367

Çizelge 4.29. DET3 dedektörünün deneysel verimi ve 0,7 mm DL kalınlık değerinde PHITS, GESPECOR, DETEFF MC ile hesaplanmış verim değerlerinin karşılaştırılması

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Deneysel verim (% belirsizlik)	MC ile hesaplanan verimler			Deneysel verimden % fark		
			DETEFF	GESPECOR	PHITS	DETEFF	GESPECOR	PHITS
¹³³ Ba	81,00	0,01321 (1,54)	0,02001	0,02012	0,01870	51,5	52,3	41,6
¹⁵² Eu	121,78	0,01641 (1,67)	0,02247	0,02231	0,02140	37,0	36,0	30,4
¹³³ Ba	302,85	0,01168 (1,46)	0,01395	0,01365	0,01339	19,4	16,9	14,7
¹⁵² Eu	344,28	0,01040 (1,71)	0,01252	0,01233	0,01211	20,4	18,5	16,4
¹³³ Ba	356,01	0,01032 (1,24)	0,01223	0,01199	0,01179	18,5	16,1	14,3
¹³³ Ba	383,85	0,00975 (1,69)	0,01152	0,01131	0,01109	18,2	16,0	13,8
¹³⁴ Cs	569,33	0,00700 (3,41)	0,00843	0,00831	0,00815	20,5	18,8	16,4
¹³⁴ Cs	604,72	0,00680 (1,48)	0,00810	0,00792	0,00780	19,1	16,5	14,7
¹³⁷ Cs	661,66	0,00633 (1,19)	0,00756	0,00742	0,00728	19,4	17,3	15,0
¹⁵² Eu	778,91	0,00558 (1,96)	0,00666	0,00658	0,00645	19,4	18,0	15,6
¹³⁴ Cs	795,86	0,00550 (1,63)	0,00660	0,00647	0,00635	20,0	17,7	15,4
¹⁵² Eu	964,08	0,00478 (1,97)	0,00572	0,00565	0,00551	19,5	18,1	15,1
¹⁵² Eu	1112,07	0,00432 (2,04)	0,00514	0,00510	0,00496	19,0	18,2	15,0
⁶⁰ Co	1173,23	0,00417 (1,58)	0,00497	0,00490	0,00477	19,1	17,6	14,4
⁶⁰ Co	1332,49	0,00376 (1,60)	0,00449	0,00447	0,00434	19,4	18,8	15,5
¹⁵² Eu	1408,01	0,00364 (1,90)	0,00433	0,00429	0,00418	19,1	17,9	14,8

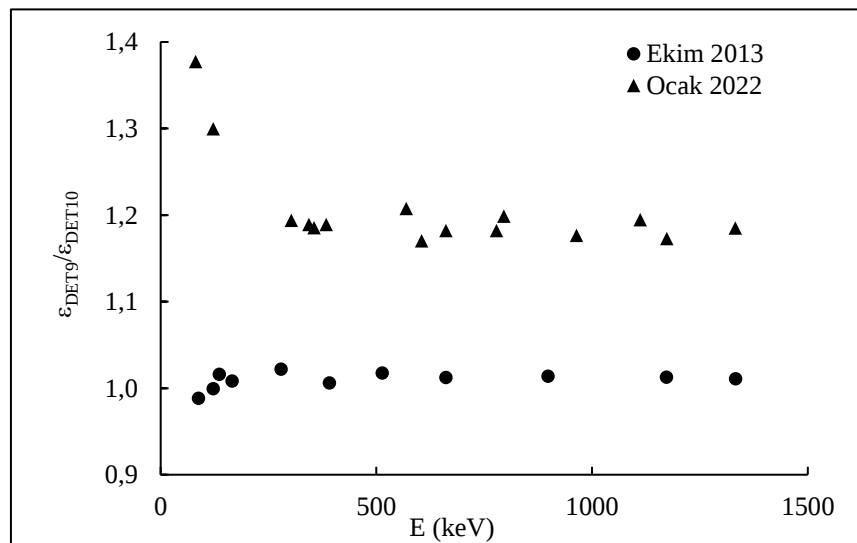
Çizelge 4.30. DET3 dedektörünün deneysel verimi ve 1,71 mm optimize edilen DL kalınlık değerinde PHITS, GESPECOR, DETEFF MC ile hesaplanmış verim değerlerinin karşılaştırılması

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Deneysel verim (% belirsizlik)	MC ile hesaplanan verimler			Deneysel verimden % fark		
			DETEFF	GESPECOR	PHITS	DETEFF	GESPECOR	PHITS
¹³³ Ba	81,00	0,01321 (1,54)	0,01151	0,01164	0,01288	12,9	11,9	2,5
¹⁵² Eu	121,78	0,01641 (1,67)	0,01701	0,01704	0,01664	3,7	3,9	1,4
¹³³ Ba	302,85	0,01168 (1,46)	0,01202	0,01176	0,01159	2,9	0,7	0,7
¹⁵² Eu	344,28	0,01040 (1,71)	0,01087	0,01064	0,01050	4,5	2,2	0,9
¹³³ Ba	356,01	0,01032 (1,24)	0,01055	0,01037	0,01023	2,2	0,5	0,9
¹³³ Ba	383,85	0,00975 (1,69)	0,00990	0,00976	0,00963	1,6	0,1	1,2
¹³⁴ Cs	569,33	0,00700 (3,41)	0,00728	0,00719	0,00709	4,0	2,8	1,4
¹³⁴ Cs	604,72	0,00680 (1,48)	0,00699	0,00687	0,00678	2,9	1,1	0,2
¹³⁷ Cs	661,66	0,00633 (1,19)	0,00652	0,00642	0,00633	3,0	1,4	0,0
¹⁵² Eu	778,91	0,00558 (1,96)	0,00579	0,00570	0,00560	3,8	2,2	0,5
¹³⁴ Cs	795,86	0,00550 (1,63)	0,00567	0,00562	0,00552	3,1	2,2	0,3
¹⁵² Eu	964,08	0,00478 (1,97)	0,00494	0,00489	0,00480	3,4	2,2	0,4
¹⁵² Eu	1112,07	0,00432 (2,04)	0,00443	0,00440	0,00433	2,7	2,0	0,2
⁶⁰ Co	1173,23	0,00417 (1,58)	0,00428	0,00424	0,00416	2,6	1,7	0,3
⁶⁰ Co	1332,49	0,00376 (1,60)	0,00389	0,00386	0,00379	3,4	2,7	0,7
¹⁵² Eu	1408,01	0,00364 (1,90)	0,00373	0,00371	0,00363	2,4	1,8	0,1

Her iki dedektöründe Ekim 2013'te kurulumları yapıldıktan hemen sonra nokta kaynaklarla belirlenen deneysel verimlerinin oranları bugünkü değerlerle karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.31). Kurulumdan hemen sonra iki dedektörün verimleri arasındaki fark en fazla % 2 iken, ~9 yıllık kullanım sonunda fark düşük enerji bölgesinde % 40'a, 300-1400 keV arasında ise % 20'ye yükselmiştir (Şekil 4.23). Sonuç olarak, aynı geometrik boyutlara sahip, aynı anda kullanılmaya başlanan DET2 ve DET3 dedektörlerinin Ocak 2022'de belirlenen mevcut DL kalınlıklarındaki farklılık bize dedektör karakterizasyon işleminin her dedektöre özgü olarak yapılması gerektiğini göstermektedir.

Çizelge 4.31. DET2 ve DET3 dedektörlerinin 9 yıl önceki ve günümüzdeki deneysel verim değerleri

Toplam enerji pik verimi (FEPE)					
Enerji (keV)	9 Yıl Önce		Enerji (keV)	Günümüzde	
	DET2	DET3		DET2	DET3
59,5	0,01768	0,01894	81,0	0,01819	0,01321
88,0	0,05120	0,05181	121,8	0,02133	0,01641
122,1	0,06599	0,06604	302,9	0,01395	0,01168
136,5	0,06580	0,06476	344,3	0,01238	0,01041
165,9	0,06133	0,06083	356,0	0,01224	0,01032
249,2	0,04347	0,04254	383,8	0,01160	0,00975
391,7	0,03428	0,03408	569,3	0,00843	0,00698
514,0	0,02713	0,02666	604,7	0,00797	0,00681
661,7	0,02370	0,02342	661,7	0,00748	0,00633
898,0	0,01730	0,01706	778,9	0,00660	0,00558
1173,2	0,01392	0,01375	795,9	0,00660	0,00551
1332,5	0,01262	0,01249	964,1	0,00563	0,00479
1836,1	0,01006	0,00994	1112,1	0,00516	0,00432
			1173,2	0,00490	0,00418
			1332,5	0,00446	0,00377
			1408,0	0,00427	0,00364



Şekil 4.23. DET2 ve DET3 dedektörlerinin 9 yıl önceki ile günümüzdeki deneysel verim değerlerinin karşılaştırması

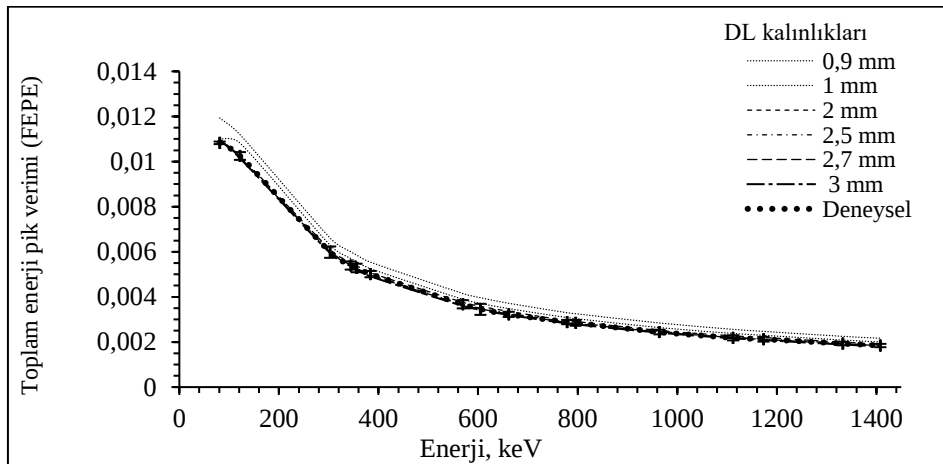
Aynı geometrik özelliklere sahip iki dedektör arasında bu farklılığın temel sebebinin ölü tabakanın artması olduğu düşünülmektedir. Çünkü verimi etkileyen ve zamana bağlı değişebilecek en temel parametre ölü tabaka kalınlığıdır. DET3 dedektörünün ölü tabakasının DET2'ye kıyasla daha büyük olması daha uzun süre oda sıcaklığına maruz bırakıldığı fikrini güçlendirmektedir. Bölüm 2.9.3'te açıklandığı gibi kontak alma amacıyla kullanılan lityum atomları sıcaklık artışıyla kristal içinde derinlere hareket ederek ölü tabakanın kalınlaşmasına sebep olur. Ayrıca laboratuvar kayıtlarından ve çalışanlarından edinilen bilgiye göre her iki dedektörde vakum kaybederek yeniden vakumlanmıştır. Dolayısıyla özellikle DET3 dedektöründeki DL kalınlaşmasının ana sebebinin vakum kaybı olduğu söylenebilir.

4.3.4. DET4 dedektörü ölü tabaka kalınlık etkisi

p-tipi dedektörler olan DET1, DET2 ve DET3'ten farklı olarak DET4 % 70 bağıl verimli n-tipi bir HPGe dedektördür. n-tipi dedektörlerde Bölüm 2.9.3, Şekil 2.19'da gösterildiği gibi DL kısmı kristalin iç yüzeyini sarmaktadır. Chuong ve diğerleri (2016) n-tipi bir dedektörün iç DL kalınlığını belirlemek için yaptıkları çalışmada üretici tarafından 1 mm olarak verilen DL kalınlığını MCNP5 programı ile 2,14 mm olarak belirlemişlerdir (Chuong ve diğerleri, 2016). Ayrıca çalışmada deneysel ve simüle edilen verim değerleri arasındaki farklılığın üretici tarafından sağlanan kristal boyutları, DL kalınlığı, kristal-pencere arası mesafe ve yuvarlatılmış kenar etkisinden kaynaklanacağını belirterek, radyografi yöntemiyle dedektörün görüntüsünü almışlardır. Aldıkları radyografi görüntüsüne göre, üretici tarafından 3 mm olarak verilen kristal-pencere arası mesafeyi 5 mm olarak ölçmüşlerdir. Deneysel verim değerleriyle MCNP kullanarak elde ettikleri verim değerleri arasında %10-50 arasında farklar bulan Berndt ve Mortreau (2012), özellikle n-tipi dedektörlerde bu verim farklılıklarının germanyum kristalinin fiziksel boyutlarının belirsizliğinden kaynaklanacağını belirtmişlerdir (Berndt ve Mortreau, 2012). Çalışmalarında n-tipi dedektörün 5 mm olarak verilen kristal-pencere arası mesafe ve kriyostat kuyusunun yarıçapını 7,1 mm, 54 mm olarak verilen kristal uzunluğunu 43,9 mm olarak ölçmüşlerdir.

Tez çalışmasında nokta kaynaklarla belirlenen deneysel verim değerleriyle PHITS ile 0,9 mm DL kalınlığında elde edilen verim değerleri Çizelge 4.35'te karşılaştırılmış ve aradaki farkların ortalama %9-17 arasında değiştiği görülmüştür. Benzer karşılaştırma GESPECOR ve DETEFF MC için sırasıyla %7-14, %6-15 bulunmuştur. İlk olarak farklılığın sebebinin

ölü tabakanın zamanla kalınlaşması olduğu düşünülerek, DL kalınlığı literatürde göz önüne alınarak 0,9-3 mm aralığında taranarak verim değerleri hesaplanmıştır. Yapılan DL taramasında DL kalınlığını ne kadar artırırız artıralım deneysel değere yaklaşılamamıştır. Bunun üzerine, deneysel değerden farklılığın sadece DL kalınlığı nedeniyle değil, literatürde de tespit edildiği gibi kristalin boyutlarının üreticinin verdiği değerden farklı olduğu düşünülmüştür. Bu tespit, TENMAK NÜKEN Radyoaktivite Ölçüm Laboratuvarı'nda ki uzmanlarla görüşülerek teyit edilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmaları sonunda, üreticinin verdiği 10,7 mm iç boşluk çapı 15,2 mm olarak; 4 mm olarak verilen dedektör kristali ile uç kabı arasındaki mesafe de 5,68 mm olarak belirlenmiştir. n-tipi %70 bağıl verimli DET4 dedektörünün optimum DL kalınlığının belirlenme prosedürüne de diğer dedektörlerde olduğu gibi, öncelikle 14,91 cm kaynak-dedektör mesafesinde 81 keV - 1408 keV enerji aralığındaki nokta kaynaklar ile deneysel verim değerleri belirlenerek başlanmıştır. Daha sonra PHITS, GESPECOR ve DETEFF MC programları ile DL kalınlığı, üretici firma tarafından verilen 0,9 mm değerinden başlanarak 0,1 mm aralıklarla taranmış, fakat bu değişimlerle verimin çok fazla değişmemesi üzerine aralık biraz artırılarak 0,5 mm aralıklarla tarama yapılmıştır. 0,9 mm'den 3 mm'ye kadar artan kalınlıklarda verim değerleri elde edilerek, deneysel FEPE değerine en yakın simüle FEPE değerleri 2,5 mm-3 mm aralığında bulunmuştur. Bu aralık 0,1 mm hassasiyetle tekrar taranarak optimum DL kalınlığının 2,7 mm olduğu tespit edilmiştir. 81 keV-1408 keV enerji aralığında PHITS, GESPECOR ve DETEFF MC programlarından hesaplanan simüle verim değerleri Çizelge 4.32-4.34'te verilmektedir. n-tipi dedektör olan DET4'te de DL kalınlığı arttıkça dedektörün aktif hacmi küçüldüğü için fotopik verimi azalmaktadır (Şekil 4.24).



Şekil 4.24. DET4 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında deneysel ve PHITS MC hesaplanan verim değerleri

Etkinin baskın olduğu 81 keV’de, üretici tarafından verilen 0,9 mm’de deneysel verimden % farklar; DETEFF’te % 12, GESPECOR’da % 11, PHITS’te ise % 10’dur (Çizelge 4.35). 2,7 mm optimum değerde ise farklar; DETEFF’te % 8, GESPECOR’da % 10, PHITS’te % 1’dir (Çizelge 4.36). Orta ve yüksek enerji bölgelerinde ise 0,9 mm DL kalınlığında DETEFF ve GESPECOR’da ortalama % 12, PHITS’te yaklaşık %15; 2,7 mm optimum değerde ise DETEFF ve GESPECOR’da % 5, PHITS’te ortalama <% 1 farklar vardır.

DET 4 dedektörünün de yaklaşık 14 yıllık kullanımından sonra ölü tabakasının 1,8 mm kalınlaşarak 2,7 mm’ye çıktığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.32. DET4 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında PHITS MC ile elde edilen verim değerleri

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Toplam enerji pik verimi (FEPE)						
		0,9 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm	2,7 mm	3 mm
¹³³ Ba	81,00	0,01193	0,01100	0,01101	0,01099	0,01098	0,01097	0,01096
¹⁵² Eu	121,78	0,01120	0,01082	0,01029	0,01025	0,01020	0,01018	0,01015
¹³³ Ba	302,85	0,00661	0,00629	0,00620	0,00610	0,00603	0,00599	0,00594
¹⁵² Eu	344,28	0,00600	0,00571	0,00562	0,00553	0,00545	0,00541	0,00536
¹³³ Ba	356,01	0,00586	0,00556	0,00548	0,00539	0,00531	0,00527	0,00522
¹³³ Ba	383,85	0,00554	0,00525	0,00516	0,00507	0,00500	0,00497	0,00491
¹³⁴ Cs	569,33	0,00415	0,00389	0,00382	0,00376	0,00367	0,00364	0,00360
¹³⁴ Cs	604,72	0,00396	0,00372	0,00364	0,00358	0,00350	0,00347	0,00343
¹³⁷ Cs	661,66	0,00372	0,00348	0,00341	0,00336	0,00327	0,00324	0,00320
¹⁵² Eu	778,91	0,00330	0,00308	0,00302	0,00294	0,00289	0,00286	0,00282
¹³⁴ Cs	795,86	0,00325	0,00304	0,00298	0,00291	0,00285	0,00282	0,00278
¹⁵² Eu	964,08	0,00284	0,00264	0,00258	0,00251	0,00247	0,00245	0,00241
¹⁵² Eu	1112,07	0,00256	0,00238	0,00233	0,00227	0,00222	0,00220	0,00217
⁶⁰ Co	1173,23	0,00247	0,00230	0,00225	0,00220	0,00214	0,00212	0,00209
⁶⁰ Co	1332,49	0,00225	0,00209	0,00204	0,00199	0,00194	0,00192	0,00189
¹⁵² Eu	1408,01	0,00217	0,00200	0,00195	0,00191	0,00186	0,00184	0,00181

Çizelge 4.33. DET dedektörünün farklı DL kalınlıklarında GESPECOR MC ile elde edilen verim değerleri

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Toplam enerji pik verimi (FEPE)						
		0,9 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm	2,7 mm	3 mm
¹³³ Ba	81,00	0,01206	0,01195	0,01194	0,01193	0,01191	0,01190	0,01188
¹⁵² Eu	121,78	0,01101	0,01100	0,01097	0,01093	0,01089	0,01087	0,01083
¹³³ Ba	302,85	0,00655	0,00654	0,00650	0,00644	0,00637	0,00634	0,006303
¹⁵² Eu	344,28	0,00593	0,00592	0,00588	0,00582	0,00575	0,00573	0,005686
¹³³ Ba	356,01	0,00578	0,00577	0,00572	0,00566	0,00560	0,00558	0,00554
¹³³ Ba	383,85	0,00545	0,00544	0,00539	0,00534	0,00527	0,00525	0,00521
¹³⁴ Cs	569,33	0,00403	0,00402	0,00397	0,00392	0,00389	0,00387	0,00382
¹³⁴ Cs	604,72	0,00386	0,00385	0,00380	0,00375	0,00371	0,00368	0,00365
¹³⁷ Cs	661,66	0,00361	0,00360	0,00356	0,00351	0,00348	0,00346	0,00342
¹⁵² Eu	778,91	0,00321	0,00320	0,00316	0,00312	0,00307	0,00304	0,00302
¹³⁴ Cs	795,86	0,00315	0,00315	0,00310	0,00306	0,00302	0,00300	0,00297
¹⁵² Eu	964,08	0,00276	0,00275	0,00272	0,00269	0,00264	0,00262	0,00260
¹⁵² Eu	1112,07	0,00248	0,00248	0,00244	0,00241	0,00238	0,00236	0,00234
⁶⁰ Co	1173,23	0,00239	0,00239	0,00236	0,00233	0,00228	0,00227	0,00224
⁶⁰ Co	1332,49	0,00218	0,00217	0,00214	0,00211	0,00208	0,00207	0,00204
¹⁵² Eu	1408,01	0,00209	0,00209	0,00206	0,00202	0,00199	0,00198	0,00196

Çizelge 4.34. DET4 dedektörünün farklı DL kalınlıklarında DETEFF MC ile elde edilen verim değerleri

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Toplam enerji pik verimi (FEPE)						
		0,9 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm	2,7 mm	3 mm
¹³³ Ba	81,00	0,01216	0,01176	0,01172	0,01169	0,01167	0,01165	0,01162
¹⁵² Eu	121,78	0,01088	0,01087	0,01083	0,01074	0,01065	0,01064	0,01057
¹³³ Ba	302,85	0,00658	0,00656	0,00645	0,00636	0,00625	0,00620	0,00613
¹⁵² Eu	344,28	0,00596	0,00595	0,00587	0,00573	0,00566	0,00561	0,00555
¹³³ Ba	356,01	0,00584	0,00578	0,00572	0,00560	0,00550	0,00543	0,00539
¹³³ Ba	383,85	0,00548	0,00548	0,00538	0,00527	0,00517	0,00511	0,00507
¹³⁴ Cs	569,33	0,00408	0,00405	0,00396	0,00387	0,00380	0,00376	0,00372
¹³⁴ Cs	604,72	0,00390	0,00388	0,00380	0,00372	0,00362	0,00359	0,00352
¹³⁷ Cs	661,66	0,00367	0,00363	0,00355	0,00347	0,00340	0,00338	0,00331
¹⁵² Eu	778,91	0,00324	0,00324	0,00317	0,00309	0,00302	0,00298	0,00293
¹³⁴ Cs	795,86	0,00319	0,00319	0,00311	0,00305	0,00295	0,00293	0,00290
¹⁵² Eu	964,08	0,00278	0,00278	0,00271	0,00266	0,00260	0,00256	0,00250
¹⁵² Eu	1112,07	0,00253	0,00250	0,00243	0,00239	0,00232	0,00228	0,00225
⁶⁰ Co	1173,23	0,00243	0,00242	0,00234	0,00229	0,00222	0,00222	0,00217
⁶⁰ Co	1332,49	0,00221	0,00221	0,00215	0,00208	0,00201	0,00200	0,00198
¹⁵² Eu	1408,01	0,00213	0,00212	0,00205	0,00200	0,00196	0,00193	0,00189

Çizelge 4.35. DET4 dedektörünün deneysel verimi ve 0,9 mm DL kalınlık değerinde PHITS, GESPECOR, DETEFF MC ile hesaplanmış verim değerlerinin karşılaştırılması

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Deneysel verim (% belirsizlik)	MC ile hesaplanan verimler			Deneysel verimden % fark		
			DETEFF	GESPECOR	PHITS	DETEFF	GESPECOR	PHITS
¹³³ Ba	81,00	0,01083 (2,2)	0,01176	0,01206	0,01193	12,3	11,3	10,2
¹⁵² Eu	121,78	0,01025 (1,9)	0,01088	0,01101	0,01120	6,2	7,4	9,3
¹³³ Ba	302,85	0,00598 (1,7)	0,00658	0,00655	0,00661	10,0	9,5	10,4
¹⁵² Eu	344,28	0,00539 (1,8)	0,00596	0,00593	0,00600	10,5	10,0	11,4
¹³³ Ba	356,01	0,00528 (1,2)	0,00584	0,00578	0,00586	10,5	9,3	10,8
¹³³ Ba	383,85	0,00367 (2,4)	0,00548	0,00545	0,00554	9,4	8,8	10,5
¹³⁴ Cs	569,33	0,00345 (1,4)	0,00408	0,00403	0,00415	11,2	9,6	13,0
¹³⁴ Cs	604,72	0,00323 (1,2)	0,00390	0,00386	0,00396	13,0	11,9	15,0
¹³⁷ Cs	661,66	0,00288 (1,8)	0,00367	0,00361	0,00372	13,9	11,9	15,2
¹⁵² Eu	778,91	0,00285 (1,5)	0,00324	0,00321	0,00330	12,5	11,3	14,3
¹³⁴ Cs	795,86	0,00244 (1,8)	0,00319	0,00315	0,00325	12,1	10,7	14,2
¹⁵² Eu	964,08	0,00219 (1,9)	0,00278	0,00276	0,00284	13,8	13,0	16,4
¹⁵² Eu	1112,07	0,00212 (1,2)	0,00253	0,00248	0,00256	15,9	13,6	17,2
⁶⁰ Co	1173,23	0,00193 (1,3)	0,00243	0,00239	0,00247	14,6	12,8	16,4
⁶⁰ Co	1332,49	0,00184 (1,7)	0,00221	0,00218	0,00225	14,3	12,8	16,5
¹⁵² Eu	1408,01	0,01083 (2,2)	0,00213	0,00209	0,00217	15,7	13,6	17,5

Çizelge 4.36. DET4 dedektörünün deneysel verimi ve 2,7 mm optimize edilen DL kalınlık değerinde PHITS, GESPECOR, DETEFF MC ile hesaplanmış verim değerlerinin karşılaştırılması

Radyoaktif çekirdek	Enerji (keV)	Deneysel verim (% belirsizlik)	MC ile hesaplanan verimler			Deneysel verimden % fark		
			DETEFF	GESPECOR	PHITS	DETEFF	GESPECOR	PHITS
¹³³ Ba	81,00	0,01083 (2,2)	0,01165	0,01190	0,01097	7,6	9,8	1,3
¹⁵² Eu	121,78	0,01025 (1,9)	0,01064	0,01087	0,01018	3,8	6,0	0,7
¹³³ Ba	302,85	0,00598 (1,7)	0,00620	0,00634	0,00599	3,6	6,0	0,2
¹⁵² Eu	344,28	0,00539 (1,8)	0,00561	0,00573	0,00541	4,1	6,3	0,5
¹³³ Ba	356,01	0,00528 (1,2)	0,00543	0,00558	0,00527	2,7	5,6	0,2
¹³³ Ba	383,85	0,00367 (2,4)	0,00511	0,00525	0,00497	1,9	4,7	0,8
¹³⁴ Cs	569,33	0,00345 (1,4)	0,00376	0,00387	0,00364	2,3	5,2	0,8
¹³⁴ Cs	604,72	0,00323 (1,2)	0,00359	0,00368	0,00347	4,1	6,8	0,7
¹³⁷ Cs	661,66	0,00288 (1,8)	0,00338	0,00346	0,00324	4,7	7,1	0,6
¹⁵² Eu	778,91	0,00285 (1,5)	0,00298	0,00304	0,00286	3,2	5,6	0,7
¹³⁴ Cs	795,86	0,00244 (1,8)	0,00293	0,00300	0,00282	2,9	5,4	0,9
¹⁵² Eu	964,08	0,00219 (1,9)	0,00256	0,00262	0,00245	4,7	7,2	0,1
¹⁵² Eu	1112,07	0,00212 (1,2)	0,00228	0,00236	0,00220	4,5	8,2	0,5
⁶⁰ Co	1173,23	0,00193 (1,3)	0,00222	0,00227	0,00212	4,4	6,8	0,3
⁶⁰ Co	1332,49	0,00184 (1,7)	0,00200	0,00207	0,00192	3,7	7,0	0,6
¹⁵² Eu	1408,01	0,01083 (2,2)	0,00193	0,00198	0,00184	4,8	7,2	0,2

4.4. Sertifikalı Standart Hacimsel Radyoaktif Malzemelerin PHITS MC Programı ile Modellenerek Verim ve Aktivitelerinin Belirlenmesi

Hacimsel geometrili doğal radyoaktif kaynaklar gama spektrometri laboratuvarlarında en çok kullanılan numunelerdir. Daha öncede belirtildiği gibi doğru ve kesin aktivite ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi için her doğal kaynağa uygun standart kaynaklarla kalibrasyonun yapılması gerekir. Bu nedenle MC modellemesi ile hacimsel geometrilerin verimlerinin elde edilmesi daha fazla önem arz etmektedir. Bu yüzden p-tipi dedektör olan DET1 ve n-tipi dedektör olan DET4'ün PHITS MC modellemesi hacimsel kaynak geometriler için yeniden uyarlanmıştır. Çizelge 3.3 ve 3.4'te verilen standart radyoaktif malzemelerin element kompozisyonları, yoğunlukları ve 6 cm×5 cm boyutundaki silindirik hacimsel kaynak tanımlaması PHITS inputlarına girilerek verim değerleri hesaplanmıştır.

IAEA-RGU-1 uranyum cevheri, IAEA-RGTh-1 toryum cevheri, IAEA-RGK potasyum sülfat, IAEA-375 toprak numunesi formundaki standart radyoaktif malzemeleri 6 cm×5 cm silindir kaplara hazırlayarak deneysel verimleri belirlenmiştir. Çeşitli toprak numuneleri ve referans malzemelerin kimyasal bileşimleri arasındaki farklılıklar bu tür numunelerin farklı öz-soğurma katsayılarına sahip olmasına neden olurken; içerdikleri radyoaktif çekirdeklerden birden fazla gama-ışını yayımlaması da farklı gerçek zamanlı çakışma etkisine sahip olmasına neden olur. Dolayısıyla bu farklılığın dedektör verimi üzerindeki etkisini araştırmak için tez çalışmasında cevher, toprak, kum ve kahve gibi farklı bileşimlere sahip numuneler kullanılmıştır. Deneysel verim hesaplamalarında her radyoaktif çekirdek için hesaplanan öz-soğurma düzeltme ve gerçek zamanlı çakışma düzeltmeleri uygulanmıştır. Daha sonra PHITS MC'den elde edilen simüle verim değerleri ve deneysel verimler karşılaştırılmıştır. 46,5 keV ile 1408 keV arasındaki enerjilere sahip radyoaktif çekirdekler için hesaplanan sonuçlar incelendiğinde farkın en fazla sırasıyla %3,5 ve % 4,7 olduğu, dolayısıyla gama spektrometrik çalışmalarda <%10 olan kabul sınırının içerisinde deneyle uyumlu MC simülasyon değerlerinin elde edildiği görülmüştür (Çizelge 4.37).

Deneyle uyumlu MC simüle verim değerleri kullanılarak TCC-Sand-113674 kum ve TCC-Simulated Vegetation-113672 kahve numunelerinin aktivite konsantrasyonu hesaplanmıştır. 46,5 keV – 1836 keV enerji aralığında 10 adet gama-ışını piki içeren bu numuneler sertifikalı olduklarından referans aktiviteleri bilinmektedir. PHITS'ten hesaplanan verim değerleri, NIST XCOM ve GESPECOR'dan elde edilen öz-soğurma düzeltmeleri ve GESPECOR'dan

elde edilen gerçek zamanlı çakışma düzeltmeleri uygulanarak aktivite konsantrasyonları hesaplanmıştır. Ayrıca deneysel verim ve aktivite hesaplamalarında doğal fon (background) sayımları da hesaba katılmıştır. HPGe dedektörlerin bir zırh içinde kullanılmasının amacı, dedektöre ulaşan doğal fon kaynaklarından gelen radyasyon miktarını azaltmaktır. Bu doğal fon, ortamdaki radyoaktif çekirdeklerden, özellikle doğal potasyumdaki ^{40}K , uranyum bozunma zinciri radyoaktif çekirdeklerinden ve kozmik radyasyondan kaynaklanır. Tezde kullanılan doğal radyoaktif çekirdekler içeren numuneler için ilgili numunenin sayımına yakın bir zamanda dedektörde numune yokken sayım alınarak doğal fon spektrumu elde edilerek, doğal fon sayımları hesaplanmıştır. Hesaplanan aktivite değerleri referans değerlerle karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.38 ve 4.39 incelendiğinde DET1 dedektöründe referans değerle hesaplanan değer arasındaki fark en fazla %4,5 iken, DET2’de %4,2’dir. Her iki dedektörde de farklar çoğunlukla deneysel belirsizliğin içinde kalmıştır. Elde edilen verim ve aktivite sonuçlarına göre PHITS’in gama spektrometrisinde güvenilir bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Çizelge 4.37. DET1 ve DET4 dedektörleri için IAEA numunelerinin düzeltme faktörleri, deneysel ve PHITS MC simülasyon ile hesaplanan verim değerleri

	Referans malzeme	Gama enerjileri (Radyoaktif çekirdek)	Deneysel verim (% belirsizlik)	Öz-soğurma düzeltme faktörü	Gerçek zamanlı çıkışına düzeltme faktörü	PHITS MC ile hesaplanan verim	Deneysel verimden % fark
DET1	IAEA-RGU-1	46,5 keV ($^{210}\text{Pb}/^{238}\text{U}$)	0,00375 (9,7)	2,182	1,000	0,00368	1,9
		63,3 keV ($^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$)	0,02992 (3,3)	1,759	1,000	0,02948	1,5
		143,8 keV (^{235}U)	0,10462 (3,6)	1,466	0,992	0,10518	0,5
		185,7 keV (^{235}U)	0,10404 (3,3)	1,423	0,992	0,10301	1,0
	IAEA-RGTh-1	1001,0 keV ($^{234\text{m}}\text{Pa}/^{238}\text{U}$)	0,04466 (3,3)	1,203	1,006	0,04326	3,1
DET4	IAEA-RGU-1	129,1 keV ($^{228}\text{Ac}/^{232}\text{Th}$)	0,09522 (3,7)	1,499	0,793	0,09825	3,2
		209,3 keV ($^{228}\text{Ac}/^{232}\text{Th}$)	0,09500 (3,6)	1,406	0,900	0,09831	3,5
		911,2 keV ($^{228}\text{Ac}/^{232}\text{Th}$)	0,04480 (3,7)	1,212	0,967	0,04563	1,8
	IAEA-RGK-1	1460,8 keV (^{40}K)	0,03363 (3,7)	1,197	1,000	0,03480	3,5
	IAEA-375	661,7 keV (^{137}Cs)	0,05458 (3,4)	1,269	1,000	0,05591	2,4
DET4	IAEA-RGU-1	46,5 keV ($^{210}\text{Pb}/^{238}\text{U}$)	0,10236 (3,3)	2,421	1,000	0,09851	3,8
		63,3 keV ($^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$)	0,09744 (3,4)	1,721	1,000	0,09708	0,4
		143,8 keV (^{235}U)	0,08362 (5,7)	1,445	0,990	0,08747	4,6
		185,7 keV (^{235}U)	0,07514 (3,4)	1,403	0,990	0,07613	1,3
	IAEA-RGTh-1	1001,0 keV ($^{234\text{m}}\text{Pa}/^{238}\text{U}$)	0,02061 (2,1)	1,195	1,005	0,01996	3,1
DET4	IAEA-RGTh-1	129,1 keV ($^{228}\text{Ac}/^{232}\text{Th}$)	0,08801 (5,7)	1,476	0,807	0,08762	0,4
		209,3 keV ($^{228}\text{Ac}/^{232}\text{Th}$)	0,06932 (4,2)	1,387	0,895	0,06948	0,2
		911,2 keV ($^{228}\text{Ac}/^{232}\text{Th}$)	0,02103 (3,9)	1,203	0,968	0,02144	2,0
	IAEA-RGK-1	1460,8 keV (^{40}K)	0,01432 (3,8)	1,189	1,000	0,01500	4,7
	IAEA-375	661,7 keV (^{137}Cs)	0,02640 (1,6)	1,257	1,000	0,02743	3,9
		1460,8 keV (^{40}K)	0,01491 (2,1)	1,172	1,000	0,01499	0,5

Çizelge 4.38. DET1 dedektörü ile TCC numunelerinin hesaplanan ve referans aktivite değerleri arasındaki % farklar

Referans malzeme	Gama enerjileri (Radyoaktif çekirdek)	Referans aktivite değeri (Bq) (% belirsizlik)	Öz-soğurma düzeltme faktörü	Gerçek zamanlı çakışma düzeltme faktörü	Hesaplanan aktivite değeri (Bq) (% belirsizlik)	Referans aktivite değerinden % fark
TCC-Sand-113674 (kum)	46,5 keV (^{210}Pb)	12800,7 (2,16)	2,672	1,000	12831,9 (6,4)	0,2
	59,5 keV (^{241}Am)	1556,9 (1,87)	2,058	1,000	1573 (2,4)	1,0
	88 keV (^{109}Cd)	10099,4 (2,35)	1,686	1,000	9932 (2,9)	1,7
	122,1 keV (^{57}Co)	207,9 (1,82)	1,563	0,999	204,4 (2,2)	1,7
	604,7 keV (^{134}Cs)	1428,1 (1,82)	1,288	0,797	1400,2 (1,9)	2,0
	661,7 keV (^{137}Cs)	412,2 (1,82)	1,276	1,000	405,5 (2,0)	1,6
	834,9 keV (^{54}Mn)	606,9 (1,82)	1,247	1,000	593,1 (1,9)	2,3
	898 keV (^{88}Y)	432,7 (1,82)	1,238	0,865	414,7 (2,0)	4,1
	1115,6 keV (^{65}Zn)	1412,3 (1,82)	1,213	0,997	1369,9 (1,9)	3,0
	1836,1 keV (^{88}Y)	432,7 (1,82)	1,163	0,857	413,4 (2,0)	4,5
TCC-Simulated Vegetation-113672 (kahve)	46,5 keV (^{210}Pb)	13015,1 (2,16)	1,262	1,000	13160,3 (2,9)	1,1
	59,5 keV (^{241}Am)	1583,0 (1,87)	1,240	1,000	1553,6 (2,0)	1,9
	88 keV (^{109}Cd)	10268,4 (2,35)	1,217	1,000	9841,6 (2,8)	4,2
	122,1 keV (^{57}Co)	211,6 (1,82)	1,199	0,997	207,5 (1,9)	2,0
	604,7 keV (^{134}Cs)	1452,4 (1,82)	1,111	0,819	1417,6 (1,9)	2,4
	661,7 keV (^{137}Cs)	419,2 (1,82)	1,107	1,000	414,0 (1,9)	1,2
	834,9 keV (^{54}Mn)	617,1 (1,82)	1,096	1,000	621,0 (1,9)	0,6
	898 keV (^{88}Y)	440,2 (1,82)	1,092	0,873	426,6 (1,9)	3,1
	1115,6 keV (^{65}Zn)	1435,9 (1,82)	1,083	0,998	1424,7 (1,9)	0,8
	1836,1 keV (^{88}Y)	440,2 (1,82)	1,064	0,863	420,8 (1,9)	4,4

Çizelge 4.39. DET4 dedektörü ile TCC numunelerinin hesaplanan ve referans aktivite değerleri arasındaki % farklar

Referans malzeme	Gama enerjileri (Radyoaktif çekirdek)	Referans aktivite değeri (Bq) (% belirsizlik)	Öz-soğurma düzeltme faktörü	Gerçek zamanlı kaçışma düzeltme faktörü	Hesaplanan aktivite değeri (Bq) (% belirsizlik)	Referans aktivite değerinden % fark
TCC-Sand-113674 (kum)	46,5 keV (^{210}Pb)	12950,2 (2,16)	2,574	1,000	13492,8 (2,57)	4,2
	59,5 keV (^{241}Am)	1557,8 (1,87)	2,002	1,000	1616,7 (2,07)	3,8
	88 keV (^{109}Cd)	12385,5 (2,35)	1,653	1,000	12502,4 (2,83)	0,9
	122,1 keV (^{57}Co)	294,0 (1,82)	1,536	0,998	289,2 (2,07)	1,7
	604,7 keV (^{134}Cs)	1618,3 (1,82)	1,275	0,843	1574,7 (2,12)	2,7
	661,7 keV (^{137}Cs)	415,7 (1,82)	1,264	1,000	401,7 (1,99)	3,4
	834,9 keV (^{54}Mn)	820,7 (1,82)	1,236	1,000	806,9 (1,98)	1,7
	898 keV (^{88}Y)	1047,1 (1,82)	1,228	0,894	1011,5 (2,00)	3,4
	1115,6 keV (^{65}Zn)	2078,1 (1,82)	1,204	0,999	2019,2 (1,98)	2,8
	1836,1 keV (^{88}Y)	1047,1 (1,82)	1,157	0,881	1019,9 (2,00)	2,6
TCC-Simulated Vegetation-113672 (kahve)	46,5 keV (^{210}Pb)	13167,1 (2,16)	1,251	1,000	13593,4 (2,50)	3,2
	59,5 keV (^{241}Am)	1583,9 (1,87)	1,230	1,000	1573,3 (2,03)	0,7
	88 keV (^{109}Cd)	12592,7 (2,35)	1,208	1,000	12372,9 (2,79)	1,7
	122,1 keV (^{57}Co)	299,3 (1,82)	1,191	0,982	294,9 (1,98)	1,5
	604,7 keV (^{134}Cs)	1645,7 (1,82)	1,107	0,854	1631,7 (1,93)	0,9
	661,7 keV (^{137}Cs)	422,8 (1,82)	1,102	1,000	413,8 (2,12)	2,1
	834,9 keV (^{54}Mn)	834,6 (1,82)	1,092	1,000	820,6 (1,97)	1,7
	898 keV (^{88}Y)	1065,3 (1,82)	1,089	0,849	1060,9 (2,00)	0,4
	1115,6 keV (^{65}Zn)	2112,9 (1,82)	1,080	0,989	2067,7 (1,98)	2,1
	1836,1 keV (^{88}Y)	1065,3 (1,82)	1,061	0,838	1064,5 (2,02)	0,1

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

HPGe dedektörler özellikle radyoaktivite ölçümlerinde karmaşık spektrumların analizi için tercih edilir. Bu tez çalışmasında dört adet HPGe dedektörün karakterizasyonu yapılmıştır. Karakterizasyonda kullanıcıya yol gösteren ve radyoaktivite ölçümleri için gerekli en önemli parametrelerden olan toplam enerji pik veriminin belirlenmesi için deneysel yöntem ve Monte Carlo simülasyon yöntemi hem nokta hem de hacimsel kaynak geometriye uygulanmıştır. Literatürde birçok Monte Carlo programı HPGe dedektörlerin modellenmesine uygulanmıştır. Fakat PHITS MC programı ilk kez bu tez ile kapsamlı bir şekilde kullanılarak literatüre büyük bir katkı sağlanmıştır. Deneysel ve MC hesaplamalar arasındaki tutarsızlığın en önemli nedeni, karmaşık dedektör geometrisinin özellikleri hakkında doğru bilgi eksikliğidir. Üretici genellikle dedektör yapısı ve bileşiminin yalnızca temel özelliklerini verirken, teknik bilgisinin detaylarını paylaşmamaktadır. Üretici tarafından tam olarak doğru verilmeyen kristal boyutları ve dedektör kristali ile uç kabı arasındaki mesafenin yanı sıra gama spektrometresinin doğası gereği kristaldeki homojen olmayan düzensizlikler, kristaldeki yetersiz yük toplanması gibi faktörler de deney ile MC arasındaki farklılığa neden olmaktadır. Dolayısıyla MC modellemede dedektörün geometrik boyutlarının en doğru şekilde belirlenmesi, programa tanıtılması büyük önem taşımaktadır. Deneysel yöntemden elde edilen verim değeri bize mevcut ölü tabaka kalınlığı hakkında yol gösterse de karakterizasyon için incelenen parametrelerde; ön kenarın yuvarlatılmış olarak modellenmesinde, bakır kontak pimin dahil edilmesinde ve mevcut ölü tabaka kalınlığının belirlenmesinde MC simülasyon programına ihtiyaç vardır.

Tez kapsamında ilk incelenen parametre olan kristalin ön kenar geometrisi tüm dedektörlerde hem yuvarlatılmış hem de keskin kenar olarak modellenerek incelenmiştir. Keskin kenarlı bir kristale göre yuvarlatılmış kenarın katı açının ve kristalin aktif hacminin küçülmesi gibi iki etkisi vardır. Düşük enerjiler söz konusu olduğunda baskın etki katı açının, daha yüksek enerjiler için hacimdeki değişikliklerdir. Ön kenar geometrisinin normalde olması gerektiği gibi yuvarlatılmış olarak modellenmemesi durumunda özellikle düşük gama enerjileri ve yakın sayım geometrileri için büyük sistematik hatalara yol açmaktadır. Özellikle 100 keV altındaki gama-ışın enerjileri için dedektörün mevcut ölü tabaka ile modellenmesi verimi % 5-7 arasında deneyden uzaklaştırmaktadır. Bu nedenle özellikle düşük enerji bölgesinde radyoaktif çekirdeklerle ilgili analiz yapıldığında dedektör mutlaka yuvarlatılmış olarak modellenmelidir.

Dikkate alınan ikinci parametre olan bakır kontak pim hiçbir üretici tarafından verilmemektedir. Literatürde de sadece yarıçap bilgisi sunulmaktadır. Fakat tez çalışmasında modellemeye dâhil edildiğinde verimi etkilediği görülmüştür. Gama spektrometresindeki hesaplamalarda %1'den daha büyük belirsizlikler anlamlıdır. Bakır kontak pim dâhil edilerek elde edilen sonuçlara göre verim % 1-4 arasında değiştiğinden HPGe dedektör modellemelerinde kesinlikle dâhil edilmelidir. Tüm dedektörlerden elde edilen sonuçlara göre bakır kontak pimin varlığının özellikle yüksek enerji bölgesinde %3,6'ya kadar dedektör veriminde değişikliğe neden olduğu, düşük enerji bölgesinde ise dedektör verimine herhangi bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Foton enerjisi arttıkça bu etkinin arttığı görüldüğünden, 600 keV'den daha yüksek enerjili gamalar ile ilgilenildiğinde (örneğin her türlü gıda numunesi, yapı malzemesi, çevresel örneklerde, endüstriyel ürünlerde incelenen bir radyoaktif çekirdek olan ^{40}K 'ın 1460,8 keV enerjili piki) kesinlikle bakır kontak pimin MC modellemeye dâhil edilmesi gerekmektedir. Ayrıca bakır kontak pim kalınlığının dedektör verimi üzerindeki etkisinin kaynak-dedektör mesafesinden neredeyse bağımsız olduğu gözlemlenmiştir.

Karakterizasyonda en önemli parametre ise kristalin ve iç boşluğun etrafını saran zamanla kalınlaşan ölü tabakadır. Ölü tabakadaki artış, kristalin üretimi sırasında kullanılan lityum kontağından kaynaklanmaktadır. Lityum, dedektör kristalinin aktif hacmine sızarak daha büyük bir ölü tabaka ve daha küçük aktif kristal boyutuna, dolayısıyla fotopik veriminde azalmaya sebep olur. Tez çalışmasında bu parametre dört dedektörde de detaylıca incelenerek mevcut ölü tabaka kalınlıkları belirlenmiştir. Her dedektörün kullanım yılları ve ölü tabaka kalınlıklarındaki değişim Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. DET1, DET2, DET3 ve DET4 dedektörlerinin ölü tabaka değişimi

Dedektör	Kullanım yılı	Üretici tarafından verilen ölü tabaka kalınlığı	Optimize edilen ölü tabaka kalınlığı
DET1	15 yıl	0,7 mm	1,29 mm
DET2	9 yıl	< 1 mm	1,19 mm
DET3	9 yıl	< 1 mm	1,71 mm
DET4	14 yıl	0,9 mm	2,7 mm

Uygun şartlarda soğutulmayan, oda sıcaklığına bırakılan veya vakum kaybı nedeniyle ısınmadan dolayı ölü tabaka artabilmektedir. Her dedektörün kullanım koşulları farklı olduğundan birbirinden tamamen farklı ölü tabaka artışı elde edilmiştir.

Tezde özellikle aynı anda kullanılmaya başlandığı bilinen, aynı geometrik boyutlara sahip, p-tipi dedektör olan DET2 ve DET3 dedektörlerinden elde edilen sonuçlar önemlidir. Laboratuvar kayıtlarından ve çalışan personelden edinilen bilgiye göre her iki dedektör de vakum kaybetmiş ve tekrar vakumlanmıştır. ~9 yıllık kullanım sonunda belirlenen ölü tabaka kalınlıklarındaki artışın sebebi olarak oda sıcaklığına maruz bırakılmaları düşünülmektedir. Fakat DET2 ile DET3'deki DL artışının yaklaşık aynı olması beklenirken neredeyse iki katlık bir fark gözlenmiştir. Edinilen bilgiye göre DET3 dedektörünün dewar termosunun içinde kırık/çatlak oluşmuş, bu çatlak fark edilemediği için dedektöre azot doldurulmaya ve ısınan dedektöre voltaj uygulanmaya devam edilmiştir. Durum fark edildikten sonra dewar değiştirilerek sorun ortadan kalkmıştır. Bu nedenle DET3 dedektöründeki ölü tabaka kalınlık artışının DET2'ye göre daha yüksek olmasının ana nedeni olarak basınç kaybı olduğu düşünülmüştür.

Tez çalışmasında PHITS'in yanı sıra gama spektrometresinde ticari olarak yaygın kullanılan GESPECOR ve DETEFF MC programları da kullanılmıştır. MC programları benzer algoritmaya sahipken birbirinden farklı tesir kesitleri, veri tabanları, kütüphaneler kullanması nedeniyle sonuçları arasındaki farkların olması beklenen bir durumdur. Fakat buradaki farklılıkların asıl sebebi programlarda dedektörlerin aynı şekilde modellenememesidir. PHITS'den elde edilen verim sonuçlarının deneysel değerlere GESPECOR ve DETEFF sonuçlarından daha yakın olmasının nedeni, dedektörün tüm detaylı parametrelerinin PHITS'te tanımlanabilmesidir. GESPECOR'da kristalin ön kenarın keskin kenar olarak modellenmesi, bakır kontak pimin modele dâhil edilememesi, hacimsel kaynak geometride kabın yan ve alt kalınlığının aynı alınması, n-tipi dedektörde ölü tabaka kalınlığının kristalin iç kısımda artması fakat GESPECOR'da sadece dış ölü tabaka kalınlığının tanımlanabilmesi gibi farklılıklardır. DETEFF'te de, PHITS'te olduğu gibi dedektörler yuvarlatılmış kenar olarak modellenmiş fakat bakır kontak pim modele dâhil edilememiştir. DETEFF'te ayrıca kaynak parametrelerinden sadece kaynağın yoğunluğu tanımlanabilmekte, kimyasal kompozisyonu ve numune kabına ait boyut bilgileri detaylı tanımlanamamaktadır.

Tezde dedektörlerin karakterize edilmesinde nokta kaynak geometrideki standart kaynaklar kullanılmıştır. Gama spektrometri laboratuvarlarında genellikle gıda, sıvı, çevresel örnek, sediment, granit/mermer gibi yapı malzemelerindeki radyoaktivite analizleri yapıldığından numuneler belirli hacimdeki tüp, silindir ya da marinelli geometride hazırlanır. Bu nedenle

IAEA-RGU-1, IAEA-RGTh-1, IAEA-RGK, IAEA-375, TCC-Sand-113674, TCC-Simulated Vegetation-113672 hacimsel geometrideki standart kaynaklar da kullanılmıştır. Tez çalışmasında bu referans malzemeler $6 \times 5 \text{ cm}^2$ boyutundaki silindirik kaplara hazırlanarak deneysel verim değerleri hesaplanmıştır. Silindirik kaynak geometrisi PHITS'te de modellenerek simüle verim değerleri hesaplanmış, aralarındaki fark %5'ten az bulunmuştur. Daha sonra, elde edilen verim değerleri kullanılarak aktivite konsantrasyonları hesaplanmış sertifika aktivite değerleriyle karşılaştırılmaları sonucunda farkların benzer şekilde %5'ten az olduğu görülmüştür. Deneysel verim ve aktivite hesaplamalarında öz-soğurma ve gerçek zamanlı çakışma düzeltmeleri uygulanmıştır. Özellikle düşük enerji bölgesindeki 46,5 keV, 59,5keV, 63,3 keV ve 88 keV piklerinde öz-soğurma etkisinin baskın olduğu ve verim/aktivite sonuçlarını % 167 kata kadar değiştirdiği görülmüştür. Ayrıca birden fazla gama-ışını yayımladığı için karmaşık bozunma şemasına sahip olan ^{134}Cs , ^{88}Y , ^{65}Zn , ^{228}Ac ve ^{235}U radyoaktif çekirdeklerinde de GESPECOR ile hesaplanan gerçek zamanlı çakışma düzeltme faktörlerinin sonuçlarda %20'lere varan düzeltme etkisi olduğu hesaplanmıştır.

MC programlarının gama spektrometresinde kullanımının giderek yaygınlaştığı, kullanıcıya birçok kolaylık sağladığı bilinmektedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında da birçok parametrenin elde edilmesinde MC simülasyon programları kullanılmıştır. Gama spektrometresinde özellikle olağandışı şekilli (unusual shapes) geometrideki numunelerin (küçük bir hap, metal/plastik parçası, vb. gibi) standart kaynaklarla deneysel verimini belirleyerek analiz yapmak çok zor hatta imkansızdır. Fakat MC yöntemi ile istenilen şekilde geometri modellenebilmektedir.

Dedektörlerin karakteristik özellikleri yani dedektörü oluşturan tüm geometrik parametreleri birbirinden farklı olduğundan, ölü tabaka kalınlığı gibi zamanla değişen parametreleri de aynı şekilde değişmeyeceği için her dedektörün karakterizasyonu kendine özgüdür.

Çalışma ile PHITS MC programının gama spektrometrik çalışmalarda güvenilir bir şekilde kullanılabileceği gösterilerek literatüre katkı sağlanmıştır (Bölükdemir ve diğerleri, 2021).

Bu tez çalışması, ülkemizde verilmeyen bir hizmet olan dedektör karakterizasyon prosedürünün dört farklı dedektöre uygulanarak geliştirildiği ilk detaylı çalışmadır. Yurtdışında yapılması durumunda yüksek maliyetli olan bu prosedür konusunda tecrübe

kazanılmıştır. Elde edilen sonuçlar TENMAK NÜKEN Gama Spektrometri laboratuvar çalışanlarıyla paylaşılmış, ayrıca yayımlanan makaleler ile bu konuda çalışan paydaşlara da katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Ashrafi, S., Likar, A., Vidmar, T. (1999). Precise modeling of a coaxial HPGe detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 438, 421-428.
- Aydın, A., Sarpün, İ.H., Tel, E., Kaplan, A. (2018). *Nükleer Fizik İlkeler ve Uygulamalar* (Birinci Baskı). Türkiye: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., 14,17.
- Azbouche, A., Belamri, M., Tchakoua, T. (2018). Study of the germanium dead layer influence on HP(Ge) detector efficiency by Monte Carlo simulation. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2(45).
- Azli, T., Chaoui, Z.E.A. (2015). Performance revaluation of a N-type coaxial HPGe detector with front edges crystal using MCNPX. *Applied Radiation and Isotopes*, 97, 106-112.
- Berndt, R., 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.
- Bikit, I., Slivka, J., Krmar, M., Durčić, Ž., Žikić, N., Čonkić, L., Vesković, M., Aničin, I. (1999). Detection limits of the NaI(Tl) shielded HPGe spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 421, 266-271.
- Boson, J., Ågren, G., 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, 304-314.
- Britton, R., Burnett, J.L., Davies, A. V., Regan, P.H. (2014). Monte-Carlo optimisation of a Compton suppression system for use with a broad-energy HPGe detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 762, 42-53.
- Carrazana González, J., Cornejo Díaz, N., Jurado Vargas, M. (2012). Application of the Monte Carlo code DETEFF to efficiency calibrations for in situ gamma-ray spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*, 70, 868-871.
- Carson, S., Iliadis, C., Cesaratto, J., Champagne, A., Downen, L., Ivanovic, M., Kelley, J., Longland, R., Newton, J.R., Rusev, G., Tonchev, A.P. (2010). Ratio of germanium detector peak efficiencies at photon energies of 4.4 and 11.7 MeV: Experiment versus simulation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 618, 190-198.
- Chham, E., Piñero-García, F., El Bardouni, T., Ferro-García, M.A., Azahra, M., Benaalilou, K., Krikiz, M., Elyaakoubi, H., El Bakkali, J., 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.

- Chuong, H.D., Thanh, T.T., Ngoc Trang, L.T., Nguyen, V.H., Tao, C. V. (2016). Estimating thickness of the inner dead-layer of n-type HPGe detector. *Applied Radiation and Isotopes*, 116, 174-177.
- Debertin, K., Helmer, R. (1998). *Gamma and X-ray spectrometry with semiconductor detectors*. Netherlands: Elsevier Science Publishers, 8,31,33,35,36,191.
- Díaz, N.C., Vargas, M.J. (2010). Improving the trade-off between simulation time and accuracy in efficiency calibrations with the code DETEFF. *Applied Radiation and Isotopes*, 68, 1413-1417.
- Díaz, N.C., 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, 204-210.
- Dokania, N., Singh, V., Mathimalar, S., Nanal, V., Pal, S., Pillay, R.G. (2014). Characterization and modeling of a low background HPGe detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 745, 119-127.
- Dryak, P., 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., Oufni, L. (2012). Dead layer thickness characterization of an HPGe detector by measurements and Monte Carlo simulations. *Applied Radiation and Isotopes*, 70, 538-542.
- Ewa, I.O.B., Bodizs, D., Czifrus, S., Molnar, Z. (2001). Monte Carlo determination of full energy peak efficiency for a HPGe detector. *Applied Radiation and Isotopes*, 55, 103-108.
- Guerra, J.G., Rubiano, J.G., Winter, G., Guerra, A.G., Alonso, H., Arnedo, M.A., Tejera, A., Martel, P., 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.
- Guerra, J.G., Rubiano, J.G., Winter, G., Guerra, A.G., Alonso, H., Arnedo, M.A., Tejera, A., Martel, P., Bolivar, J.P. (2018). Modeling of a HPGe well detector using PENELOPE for the calculation of full energy peak efficiencies for environmental samples. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 908, 206-214.
- Gasparro, J., Hult, M., Johnston, P.N., 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, 196-201.

- Gilmore, G. (2008). *Practical Gamma-ray spectrometry* (Second edition). New York: John Wiley and Sons, 2,9,26,40,41,48,53,57,160,166,236.
- 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., 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.
- Hau, I.D., Russ, W.R., Bronson, F. (2009). MCNP HPGe detector benchmark with previously validated Cyltran model. *Applied Radiation and Isotopes*, 67, 711-715.
- Hirayama, H., Namito, Y., Bielajew, A.F., Wilderman, S.J., Nelson, W.R. (2005). *The EGS5 Code System, SLAC-Report-730*. Stanford: Stanford Linear Accelerator Center, 17.
- Hoover, A.S. (2007). Characterization of the virtual point detector effect for coaxial HPGe detectors using Monte Carlo simulation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 572, 839-843.
- Hult, M., Geelen, S., Stals, M., Lutter, G., Marissens, G., Stroh, H., Schreurs, S., Schroeyers, W., Bruggeman, M., Verheyen, L. (2019). Determination of homogeneity of the top surface deadlayer in an old HPGe detector. *Applied Radiation and Isotopes*, 147, 182-188.
- Huy, N.Q., Binh, D.Q., 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 p-type detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 641, 101-104.
- Internet: Decay Data Evaluation Project (DDEP). 2017. URL: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm, Son Erişim Tarihi: 24.12.2021.
- Internet: LARAweb. (2021). Laboratoire National Henri Becquerel (LNHB) URL: <http://laraweb.free.fr/>, Son Erişim Tarihi: 22.11.2021.
- Internet: Ortec. (2021). Overview of Semiconductor Photon Detectors. URL: www.ortec-online.com/-/media/ametektortec/other/overview-of-semiconductor-photon-detectors, Son Erişim Tarihi: 06.10.2021.
- Internet: XCOM. (2022) Berger, M.J., Hubbell, J.H., Seltzer, S.M., Chang, J., Coursey, J.S., Sukumar, R., Zucker, D.S., and Olsen, K. XCOM Photon cross section database. URL: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, Son Erişim Tarihi: 5 Kasım 2021.

- 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., Povinec, P.P. (2019). Experimental and Monte Carlo determination of HPGe detector efficiency. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 322, 1863-1869.
- Jodłowski, P. (2006). Self-absorption correction in gamma-ray spectrometry of environmental samples - An overview of methods and correction values obtained for the selected geometries. *Nukleonika*, 51, 21-25.
- Khan, W., Zhang, Q., He, C., Saleh, M. (2018). Monte Carlo simulation of the full energy peak efficiency of an HPGe detector. *Applied Radiation and Isotopes*, 131, 67-70.
- Knoll, G.F. (2010). *Radiation Detection and Measurement* (Fourth Edition). United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 371,373,454,477.
- Krishnan, N., Anilkumar, S., Verma, A., 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.
- Kroese, D.P., Rubinstein, R.Y. (2012). Monte Carlo methods. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 4, 48-58.
- 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., Zhang, M. (2019). A benchmark for Monte Carlo simulation in gamma-ray spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*, 154, 108850.
- Loan, T.T.H., Ba, V.N., Thy, T.H.N., Hong, H.T.Y., Huy, N.Q. (2018). Determination of the dead-layer thickness for both p- and n-type HPGe detectors using the two-line method. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 315, 95-101.
- Maidana, N.L., Vanin, V.R., García-Alvarez, J.A., Hermida-López, M., Brualla, L. (2016). Experimental HPGe coaxial detector response and efficiency compared to Monte Carlo simulations. *Applied Radiation and Isotopes*, 108, 64-74.
- Mihaljević, N., Dlabač, A., Jovanović, S. (2012). Accounting for detector crystal edge rounding in gamma-efficiency calculations theoretical elaboration and application in ANGLE software. *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 27, 1-12.
- Modarresi, S.M., Masoudi, S.F., 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.
- Ordóñez, J., Gallardo, S., Ortiz, J., Sáez-Muñoz, M., Martorell, S. (2019). Intercomparison of full energy peak efficiency curves for an HPGe detector using MCNP6 and GEANT4. *Radiation Physics and Chemistry*, 155, 248-251.

- Padilla Cabal, F., Lopez-Pino, N., Luis Bernal-Castillo, J., Martinez-Palenzuela, Y., Aguilar-Mena, J., D'Alessandro, K., Arbelo, Y., Corrales, Y., Diaz, O. (2010). Monte Carlo based geometrical model for efficiency calculation of an n-type HPGe detector. *Applied Radiation and Isotopes*, 68, 2403-2408.
- Peryoga, Y., Sagara, H., Shiba, T. (2017). PHITS Benchmarking for HPGe Detector Efficiency. *Energy Procedia* 131, 246-249.
- Prozorova, I. V., Ghal-Eh, N., Bedenko, S. V., Popov, Y.A., Prozorov, A.A., Vega-Carrillo, H.R. (2021). Characterizing the coaxial HPGe detector using Monte Carlo simulations and evolutionary algorithms. *Applied Radiation and Isotopes*, 174, 109748.
- Salgado, C.M., Conti, C.C., Becker, P.H.B. (2006). Determination of HPGe detector response using MCNP5 for 20-150 keV X-rays. *Applied Radiation and Isotopes*, 64, 700-705.
- Salman, A., Ahmed, Z., Allam, K.A., El-Sharkawy, S. (2019). Investigation hybrid MCNP/Angle model for calculating the absolute full-energy peak efficiency of HPGe detector. *Applied Radiation and Isotopes*, 150, 57-62.
- 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., 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.
- Sima, O. (2012). *Efficiency Calculation of Gamma Detectors by Monte Carlo Methods. Encyclopedia of Analytical Chemistry*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 1-3.
- Sima, O., Arnold, D. (2002). Transfer of the efficiency calibration of Germanium gamma-ray detectors using the GESPECOR software. *Applied Radiation and Isotopes*, 56, 71-75.
- Sima, O., Arnold, D. (2000). Accurate computation of coincidence summing corrections in low level gamma-ray spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*, 53, 51-56.
- Sima, O., 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., Arnold, D., Dovlete, C. (2001). GESPECOR: A versatile tool in gamma-ray spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 248, 359-364.
- Sima, O., 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.
- Stancu, E., Costache, C., Sima, O. (2015). Monte carlo simulation of p-type HPGe detectors – The dead layer problem. *Romanian Reports in Physics*, 67, 465-473.
- Tanır, A.G., Bölükdemir, M.H., Koç, K. (2013). *Radyasyon ve Radyasyondan Korunma Fiziği*, İkinci. ed. Palme Yayınevi, 100.

- Uyar, E., Aksoy, G., Ünlü, H., 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., 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.
- Yücel, H., Köse, E., Esen, A.N., Bor, D. (2011). Correction methodology for the spectral interfering γ -rays overlapping to the analytical peaks used in the analysis of ^{232}Th . *Applied Radiation and Isotopes*, 69, 890-897.
- Yücel, H., Solmaz, A.N., Köse, E., Bor, D. (2010). Methods for spectral interference corrections for direct measurements of ^{234}U and ^{230}Th in materials by gamma-ray spectrometry. *Radiation Protection Dosimetry*, 138(3), 264-277.

- Yücel, H., Birgül, Ö., Uyar, E., 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.
- Uyar, E., Yüksel, A.Ö., Güven, R., Yücel, H. (2017). Methodology for determination of correction factors in direct gamma spectrometric measurement of radionuclides in sediments. *International Journal of Sediment Research*, 32, 324-330.
- Yücel, H., Çubukçu, Ş., Uyar, E., Engin, E. (2014). Determination of the energy dependence of the BC-408 plastic scintillation detector in medium energy X-ray beams. *Physics in Medicine and Biology*, 59, 6749-6758.
- Yücel, H., Uyar, E., Esen, A.N. (2012). Measurements on the spectroscopic performance of CdZnTe coplanar grid detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, 70, 1608-1615.
- Yücel, H., Köse, E., Solmaz, A.N., Bor, D. (2011). Correction methodology for the spectral interfering gamma-rays overlapping to the analytical peaks used in the analysis of ^{232}Th . *Applied Radiation and Isotopes*, 69, 890-897.
- Yücel, H., Solmaz, A.N., Köse, E., Bor, D. (2010). True coincidence-summing corrections for the coincident gamma-rays measured with coplanar grid CdZnTe detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, 68, 1040-1048.
- Yücel, H., Solmaz, A.N., Köse, E., Bor, D. (2010). Methods for spectral interference corrections for direct measurements of ^{234}U and ^{230}Th in materials by gamma-ray spectrometry. *Radiation Protection Dosimetry*, 138(3), 264-277.
- Yücel, H., Solmaz, A.N., Köse, E., Bor, D. (2010). A semi-empirical method for calculation of true coincidence corrections for the case of a close-in detection in gamma-ray spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 283(2), 305-312.
- Yücel, H., Solmaz, A.N., Köse, E., Bor, D. (2009). Spectral interference corrections for the measurement of ^{238}U in materials rich in thorium by a high resolution gamma-ray spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*, 67(11), 2049-2056.

Ulusal Yayınlar

- Yücel, H., Çakal, G.Ö., Yüksel, A.Ö., Kurt, R., Uyar, E., Güven, S., Hancı, H. (2013). Nükleer Adli Bilim ve İnceleme Konuları, Adli Bilimler Dergisi/Turkish Journal of Forensic Sciences, 12 (1):37-48.

Uluslararası/Ulusal Kongre Sunum

- Uyar, E., Bölükdemir, M.H. (2021, 1-5 September). *Evaluating the Performance of n-type HPGe Detector Modeled as Sharp and Rounded Edge Using PHITS MC*. Turkish Physical Society 37th International Physics Congress, Bodrum.

- Uyar, E., Bölükdemir, M.H. (2021, 2-4 June). *Investigation of the Effect of Copper Cooling Rod on Detector Efficiency with Monte Carlo Method in HPGe Detectors*. XIV. International Conference on Nuclear Structure Properties, NSP 2021, Konya.
- Uyar, E., Bölükdemir, M.H. (2019, 2-4 May). *Modeling of a HPGe Detector Using PHITS for the Calculation of Full Energy Peak Efficiencies*. 5th International Conference on Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology, TESNAT 2019, Amasya.
- Uyar, E., Bölükdemir, M.H., Eser, E. (2018, 20-22 April). *Determination of the Full Energy Peak Efficiency of HPGe Detector Using Monte Carlo Simulation*. 4th International Conference on Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology, TESNAT 2018, Akdeniz University, Antalya.
- Uyar, E., Yücel, H. (2016, 12-14 Ekim). *Gama Spektrometrik Yöntemle Uranyum ve Toryum Cevher Örneklerinin Karakterizasyonu*. XI. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi, Kuşadası, Aydın.
- Zümrüt, S., Narttürk, R.B., Gedik, G., Uyar, E., Yücel, H. (2016, 12-14 Ekim). *Radyonüklit Analizi Yeterlik Deneyleri İçin Çeşitli Çevresel Örneklerde Uygulanan Gama Spektrometrik Yöntemler*. XI. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi, Kuşadası, Aydın.
- Yücel, H., Gökmen, H., Uyar, E. (2015, 11-14 Ekim). *Determination of Radioactivity Content in Ceramic Tile and Marble Samples Used for Covering Materials in Buildings Using Gamma Spectrometric Method for Radiation Dose Assessment*. 3rd International Conference on Po and Radioactive Pb Isotopes (INCO-PoPb-2015), Kuşadası, Aydın.
- Yücel, H., Yüksel, A.Ö., Uyar, E., Kurt, R. (2013, 16-21 June). *Correction Factors In Direct Gamma Spectrometric Measurement Of Some Radionuclides In Lake And Stream Sediment Samples*. 19th International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications, ICRM 2013, Antwerp, Belgium.
- Köse, E., Yücel, H., Tarımcı, Ç., Kadioğlu, Y.K., Göksu, H.Y. (2010, 20-22 Eylül). *Gama Spektrometrik Yöntem İle Kapadokya Bölgesinden Toplanan Toprak Örneklerinde ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{232}Th ve ^{40}K Aktivite Ölçümü*. Lümidoz-4 Lüminesans Dozimetri Kongresi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep.
- Kozanlılar, B., Kaya, Ş., Köse, E., Göksu, H.Y., Kadioğlu, Y.K., Tarımcı, Ç., Moğulkoç, Y. (2010, 20-22 Eylül). *Ayrışmış Volkanik Kayaçların Optik ve Termal Uyarımlı Lüminesans Özellikleri*. Lümidoz-4 Lüminesans Dozimetri Kongresi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep.
- Köse, E., Esen, A.N., Yücel, B., D. (2010, 14-17 Eylül). *Gama Spektrometrik Yöntem İle Aktivite Ölçümünde ^{238}U ve ^{226}Ra Analitik Piklerinde Spektral Girişim Düzeltmesi*. Türk Fizik Derneği 27.Uluslararası Fizik Kongresi, İstanbul.

- Kaya, Ş., Köse, E., Göksu, H.Y. (2010, 14-17 Eylül). *Türkiye Kaynaklı Doğal Kuvarsın Lüminesans Özellikleri ve Geriye Dönük Dozimetri Çalışmalarında Kullanımı*. Türk Fizik Derneği 27. Uluslararası Fizik Konferansı, İstanbul.
- Yücel, H., Köse, E., Solmaz, A.N., Bor, D. (2008, 14-17 October). *Interference corrections for some spectral peaks used in gamma spectrometric analysis of ^{238}U and ^{226}Ra in presence of thorium in samples*. V. Eurasian Conference on Nuclear Science and Its Applications, Ankara, Türkiye.
- Solmaz, A.N., Yücel, H., Köse, E., Bor, D. (2008, 14-17 October). *Comparison of the activity results measured in the well-type HPGe detector by using radionuclide specific and absolute efficiency calibrations*. V. Eurasian Conference on Nuclear Science and Its Applications, Ankara, Türkiye.



GAZİ GELECEKTİR..