

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOĞAL RADYOAKTİF İZOTOPLARDA GERÇEK ÇAKIŞMA ETKİSİ

Eren ŞAHİNER

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2010**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DOĞAL RADYOAKTİF İZOTOPLARDA GERÇEK ÇAKIŞMA ETKİSİ

Eren ŞAHİNER

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Niyazi MERİÇ

Radyoaktivite araştırmalarında en önemli yöntemlerden biri gama spektrometresidir. Gama spektroskopisinde hataların en önemli kaynaklarından biri aynı radyoaktif çekirdekten farklı enerjilerde salınan gamaların çakışması sonucu analiz edilecek pikin hesaplanan alanının azalması veya artmasıdır. Bu olgu genel olarak gerçek çakışma etkisi (true coincidence effects) olarak bilinir. Doğadaki çoğu radyoaktif çekirdekten çok katlı gamalar salınır ve bozunum şemaları oldukça karmaşıktır. Bu yüzden çakışma etkisi, aktivite hesabında oldukça sık gözlenir.

Bu araştırmada, %33 görelî verime sahip yüksek saflıkta germanyum detektör için radyoaktivite analizde kullanılan hacimsel geometride, yakın geometri sayımları için doğal radyoaktif çekirdeklerdeki gerçek çakışma etkisi incelenmiştir ve aktivite analizindeki etkiye bağlı düzeltme katsayıları hesaplanmıştır. Katsayıların hesabında Dr. Sudár'ın algoritması "TrueCoinc" kullanılmıştır. Bu amaçla enerji kalibrasyonu, fotopik verim kalibrasyonu, Toplam/Pik (TTP) verim kalibrasyonu yapılmıştır. Farklı TTP hesap yaklaşımlarına göre gerçek çakışma katsayılarındaki değişim incelenmiştir. IAEA-RGTh-1, IAEA-RGU-1, IAEA-RGK-1 standart referans malzemelerinin aktiviteleri gerçek çakışma düzeltmeli ve düzeltmesiz hesaplanıp etki incelenmiştir.

Mayıs 2010 / 69 sayfa

Anahtar Kelimeler: Radyoaktivite, Gama spektrometresi, Yüksek saflıkta germanyum detektör (HPGe), Gerçek çakışma düzeltmesi (TCC), Tam enerji fotopik verim kalibrasyonu, Toplam/Pik (TTP) oranı

ABSTRACT

Master Thesis

TRUE COINCIDENCE EFFECTS IN NATURAL RADIOACTIVE ISOTOPES

Eren ŞAHİNER

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Engineering Physics

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Niyazi MERİÇ

In radioactivity researches, one of the most common using method is gamma spectrometry. Some nuclides emit multiple gamma rays when they decay to the ground state. If these gamma rays are emitted essentially at the same time, it is possible that multiple photons will be detected at the same time in the detector and appear as one full-energy peak in the spectrum. This is known as “Cascade” or “True Coincidence”. This True Coincidence has two effects, one is the reduction of the net peak count in the individual component peaks in the cascade. The second is the creation (or increase) of the extra peaks in the spectrum of the summation of the individual peaks. Both of these can cause the spectrum analysis to give erroneous results. In nature, most of radionuclides emit multiple gamma rays and have complex decay schemas. Because of these effects are quite observed on activity calculating.

In this research, true coincidence effects in natural radionuclides are investigated on voluminous source on close detection geometry for % 33 relative efficiency HPGe detector. Dr. Sudár’s method “TrueCoinc” is used to determine true coincidence (TCC) correction factors for high resolution γ -ray spectrometry. It needs the knowledge of both full energy peak (FEP) efficiency and total-to-peak (TTP) efficiency curves. Hence, the TTP efficiency curve and FEP efficiency curve is established. According to different TTP methods, changing in true coincidence factors are sought. Reference materials IAEA-RGTh-1, IAEA-RGU-1, IAEA-RGK-1’s activities are calculated and investigated considering corrected and uncorrected factors.

May 2010 / 69 pages

Key Words: Radioactivity, Gamma Spectrometry, High purity germanium detector (HPGe), True coincidence correction (TCC), full energy peak efficiency (FEP), total-to-peak (TTP)

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımı yönlendiren Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi danışman hocam Yrd .Doç. Dr. Niyazi MERİÇ'e, çalışmalarım süresince desteklerini, bilgilerini, yardımlarını esirgemeyen SANAEM'e ve SANAEM gama spektrometresi birimindeki hocalarım Hasan DİKMEN'e, Emin YELTEPE'ye, Namık Kemal ŞAHİN'e, Mustafa VURAL'a teşekkür ederim.

Bilgilerinden faydalandığım değerli hocalarım Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'nden Prof. Dr. Haluk YÜCEL'e, Gazi Üniversitesi Fizik Bölümü'nden Prof. Dr. A. Güneş TANIR'a teşekkür ederim.

Ankara Üniversitesi Tarihlendirme Araştırma Laboratuvarındaki birlikte çalıştığım çalışma arkadaşlarım Dr. Mehmet Altay ATLIHAN'a, Dr. Mehmet KOŞAL'a, Dr. Ülkü Rabia YÜCE'ye, Fiz.Yük. Müh. Çağın GÜNEŞ'e, Fiz.Yük. Müh. Mustafa DOĞAN'a, Gül ÖZPEK'e, Aylin KARAGÖZ'e, Fatih KARA'ya teşekkür ederim. Ayrıca güzel arkadaşlıklarından dolayı Dr. Mustafa YÜKSEK'e, Daryoush TALATİ'ye, Hakan ALABOZ'a ve bugünlere gelmemde büyük fedakârlıklar göstererek beni yetiştiren aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eren ŞAHİNER

Ankara, Mayıs 2010

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KATIHAL RADYASYON DETEKTÖRLERİ VE GAMA SPEKTROMETRESİ	3
2.1 Yarıiletken Radyasyon Detektörleri.....	3
2.2 Gama Spektroskopisi	4
2.3 Gama Spektrometresi Bileşenleri	7
2.3.1 Önyükselteçler.....	7
2.3.2 Detektör besleme ve yüksek gerilim kaynakları	9
2.3.3 Yükselteçler	9
2.3.4 Analog-sayısal dönüştürücü (ADC).....	11
2.3.5 Çok kanallı analizör (MCA)	11
2.4 Sayım İstatistiği.....	12
2.5 Fotopik Alanı Hesaplama Yöntemi	13
3. KALİBRASYONLAR.....	16
3.1 Enerji Kalibrasyonu.....	16
3.2 Verim Kalibrasyonu.....	19
3.2.1 Göreceli verim	20
3.2.2 Mutlak verim.....	20
3.2.3 Öz (Gerçek) verim.....	20
3.2.4 Tam enerji fotopik verimi (ϵ^p)	20
3.2.5 Toplam verim (ϵ^t)	23
4. AKTİVİTE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ.....	24
4.1 Standartla Karşılaştırma Yöntemi	24
4.2 Doğrudan Ölçme Yöntemi	26

4.2.1 Ölü zaman düzeltmesi	26
4.2.2 Puls yığılması düzeltmesi (Random coincidence).....	27
4.2.3 Matris (Ortam).....	27
4.2.4 Gerçek çakışma (True coincidence).....	28
5. YÜKSEK SAFLIKTA GERMANYUM (HPGe) DETEKTÖRLER.....	29
5.1 Detektörün Yapısı	31
5.2 Detektör Şartları ve Karakteristiği	32
5.2.1 Çalışma voltajı.....	33
5.2.2 Zırhlama	34
5.2.3 Doğal fon (Background).....	34
5.2.4 Sıcaklık ve nem.....	34
6.GERÇEK ÇAKIŞMA (TRUE COINCIDENCE)	36
6.1 Gerçek Çakışma Kavramı	36
6.1.1 Toplam kaçış “Summing-out”	38
6.1.2 Toplam piki “ Summing-in”	38
6.1.3 Sahte pikler: spektrumda yeni bir kanalda pik oluşumu “Alias lines”.....	38
6.2 Gerçek Çakışma ve Verim	39
6.3 Çakışmaların Kaynağı.....	40
6.4 Gerçek Çakışma ve Geometri.....	41
6.5 Düzeltmenin Deneysel Olarak Gerekliliği.....	42
6.6 Çevresel Öneklerde Gerçek Çakışma.....	43
6.7 Yakın Geometri Veriminin Yapılması	44
7. “TRUECOINC” PROGRAMINDA GERÇEK ÇAKIŞMADÜZELTMESİ.....	47
7.1 Gerçek Çakışmanın Hesaplanması.....	47
8. UYGULAMA VE DENEYLER.....	49
8.1 Deneysel İşlemler	49
8.2 Yöntembilim.....	50
8.2.1 TTP (Toplam/Pik) kalibrasyonu.....	50
8.2.1.1 Venkataraman yaklaşımı	52
8.2.1.2 Genie 2000 yaklaşımı.....	53
8.2.1.3 Yamuk yaklaşımı.....	53
8.3 Tam Enerji Fotopik Verim Kalibrasyonu.....	57

8.4 Gerçek Çakışma Katsayılarının Hesaplanması	60
9. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	61
KAYNAKLAR.....	66
ÖZGEÇMİŞ	68

SİMGELER DİZİNİ

A	Aktivite
Bq	Becquerel, radyoaktivite birimi
Ci	Curie, radyoaktivite birimi
cps	saniyedeki sayım oranı
E	Enerji (eV, keV, MeV)
ETZ	Extrapolation to zero
FWHM	Full width at half maximum (yarı maksimumdaki tam genişlik olarak)
f_γ	Gama yayınlama olasılığı
HpGe	High Purity Germanium
IAEA	Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (International Atomic Energy Agency)
m	Kütle (gram)
NPL	National Physics Laboratory (Ulusal Fizik Laboratuvarı)
P/T	Pik/Toplam
t	Zaman
$t_{1/2}$	Yarılanma süresi
TCC	True coincidence correction (Gerçek çakışma düzeltmesi)
TOI	Table of Isotopes (İzotopların Tablosu)
TTP	Total to peak (Toplam/Pik)
α	Alfa parçacığı
β	Beta Parçacığı
γ	Gama Işını
ϵ^p	Tam enerji fotopik verimi
ϵ^t	Toplam verim
μCi	mikroCurie, radyoaktivite birimi
ADC	Analog-Sayısal Dönüştürücü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Ge ve NaI detektörlerinin spektrum olarak karşılaştırılması	6
Şekil 2.2 Gama spektroskopisi ölçüm düzeneği.....	7
Şekil 2.3 Önyükselteç çıkışındaki puls şekli.....	8
Şekil 2.4 Önyükselteçten yükseltece gelen sinyalin şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.5 Tek ve çift kutuplu sinyal pulsuları.....	10
Şekil 2.6 Çok kanallı analizörün temsili	12
Şekil 2.7 Gama pik alanının hesaplanmasında kullanılan parametrelerin şekil üzerinde gösterimi	14
Şekil 3.1 Enerji kalibrasyonu	18
Şekil 3.2 FWHM.....	19
Şekil 5.1 Temel olarak Ge detektör yapısı	30
Şekil 5.2 HPGe detektör tasarımları	30
Şekil 5.3 Enerji aralıklarına göre farklı tipte germanyum detektörler	31
Şekil 5.4 Tipik bir germanyum detektör	32
Şekil 5.5 Bir pikin FWHM'u	33
Şekil 6.1 Radyoaktif bir çekirdeğin parçalanması	36
Şekil 6.2 Ba-133'ün bozunumunda kaçak ve toplam pikleri	37
Şekil 6.2 Ba-133 spektrumundaki oluşmuş sahte pikler	39
Şekil 6.3 115 mm ve detektör yüzeyinden alınan ölçümlere göre çizilen verim eğrileri.....	40
Şekil 6.4 Eu-152' nin basitçe bozunum şeması.....	41
Şekil 6.5 Detektör kaynak geometrisi.....	42
Şekil 6.6 Kısa d mesafesi ve uzun d ₀ mesafesinde nokta kaynak geometrisinde alınan ölçümlere göre Tam enerji fotopiklerinin sayım oranları.....	43
Şekil 6.7 Çok iyi bir şekilde uygunlaştırılmış kalibrasyon eğrisi.....	45
Şekil 8.1 Deneyde kullanılan hacimsel geometri	49
Şekil 8.2 Yamuk yönteminde spektrumun değerlendirilmesi	54
Şekil 8.3 Yamuk yaklaşımı T/P fonksiyonu.....	56
Şekil 8.4 Genie-2000 yaklaşımı T/P fonksiyonu.....	56
Şekil 8.5 Venkataraman yaklaşımı T/P fonksiyonu	57
Şekil 8.6 Negatif kuvvet serisine uygunlaştırılmış tam enerji fotopik verim eğrisi ve fonksiyonun katsayıları.....	60
Şekil 9.1 Yamuk yaklaşımıyla hesaplanmış T/P kalibrasyonuna göre TCC katsayılarıylaölçülen/sertifika aktivite oranı.....	63

Şekil 9.2 Venkataraman yaklaşımıyla hesaplanmış T/P kalibrasyonuna göre TCC katsayılarıyla ölçülen/sertifika aktivite oranları.....	64
Şekil 9.3 Genie-2000 yaklaşımıyla hesaplanmış T/P kalibrasyonuna göre TCC katsayılarıyla ölçülen/sertifika aktivite oranları.....	64

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Enerji Kalibrasyonu için önerilen radyonüklitler.....	17
Çizelge 4.1 Farklı yoğunluktaki aynı ölçüm geometrisindeki örnekler için sayım oranları	28
Çizelge 5.1 %30-50'lik detektör için tipik enerjiye karşılık FWHM değerleri	33
Çizelge 6.1 Yakın geometri verim kalibrasyonu için uygun radyonüklitlerin bazıları ..	44
Çizelge 8.1 Deneysel işlemlerde kullanılan HPGe detektörün özellikleri.....	49
Çizelge 8.2 Laboratuvarda radyoaktivite analizlerinde kullanılan kaplar	49
Çizelge 8.3 TTP kalibrasyonunda kullanılan radyoaktif çekirdekler	51
Çizelge 8.4 ETZ değerleri.....	52
Çizelge 8.5 Yaklaşıklık yöntemlerine göre elde edilen T/P oranları.....	55
Çizelge 8.6 79830-839 kodlu sıvı standard ve içerdği radyoaktif çekirdeklerin sertifika değerleri.....	57
Çizelge 8.7 Tam enerji fotopik verimi değerleri	59
Çizelge 9.1 % 33'lük görelî verime sahip p-tipi HPGe detektörde radyoaktivite analizinde kullanılan sayım geometrisi için elde edilen gerçek çakışma ve NIST X-com veri tabanından elde edilmiş öz soğurma katsayıları	62

1.GİRİŞ

Radyasyon, doğal radyoaktif çekirdeklerden, kozmik ışınlardan ve insanoğlunun ürettiği yapay radyasyondan kaynaklanmaktadır. Yeryüzündeki bütün canlılar hayatları boyunca sürekli olarak bu radyasyona, bulundukları bölgedeki yerkabuğunun radyoaktivitesine göre, ortalamadan az ya da çok, maruz kalırlar. Bölgeden bölgeye doğal radyoaktivite farkı yerkabuğunun jeolojik, kimyasal yapısına ve deniz seviyesine göre yüksekliğine bağlı olarak değişir. Doğal radyasyon düzeylerinin hassaslıkla belirlenmesi çok önemlidir ancak bu şekilde, bölgenin doğru radyoaktivite analizi yapılabilir.

Arkeolojik ve jeolojik örneklerin soğurdıkları radyasyon dozunun lüminesans yöntemlerle belirlenmesinin önemi son yıllarda artmıştır. Bu yöntemle örneğin yaşı; gömü boyunca biriktirdiği eşdeğer dozun örneğin kendisindeki ve etrafındaki doğal radyasyondan kaynaklanan yıllık doza oranlanmasıyla bulunur (Aitken 1985). Bu konuda her geçen gün daha az hata aralığında yaş tayini çalışmaları geliştirilmektedir.

Yıllık doz hesabı için, örneğin maruz kaldığı radyasyonun kaynağı olan kozmik ışınlardan etkisinin, doğal radyoaktif serilerin (^{238}U , ^{232}Th , ^{235}U) ve ^{40}K miktarlarının belirlenmesi gerekir. Kozmik radyasyonun örneğin bulunduğu bölge şartlarına göre yaklaşık bir değeri vardır. Hesaplanması gereken doğal radyoaktif kaynakların aktiviteleridir. Tarihlendirmede U, Th ve K analizi hassas yapılırsa, yıllık doz hesabında hata aralığı düşecektir.

U, Th ve K analizi için çeşitli yöntemler vardır. Son yıllarda gelişen teknolojiyle birlikte üretilen yüksek saflıkta detektörler ile en güvenilir sonuç veren, gama spektroskopisi yöntemidir. Gama Spektroskopisi, gama ve aktivite analizinde, nükleer yapılarının araştırılmasında, çevresel radyoaktivitenin belirlenmesinde, lüminesans yöntemleriyle yaş tayini çalışmalarında yıllık doz tespiti için oldukça önemli bir rol oynar.

Gama spektroskopisiyle radyoaktivite ölçümleri nükleer fizik laboratuvarlarında her geçen gün artarak yayılmaktadır. Gama spektroskopisinde hataların en büyük kaynaklarından biri aynı çekirdekten farklı enerjilerde salınan gamaların çakışması sonucu analiz edilecek çekirdekten çıkan gama enerjisi pikinin hesaplanan alanının azalması veya artmasıdır. Çoğu radyoaktif çekirdekten çok katlı karmaşık gamalar salınır. Bu yüzden durum, aktivite hesabında oldukça sık gözlenir ve dikkate alınmadığı takdirde yanlış aktivite hesabına yol açabilir. Eğer doğru ve hassas radyoaktivite analizi yapılmaz ise çıkan sonuçlar yıllık doz ve çevresel radyoaktivite ile ilgili yanlışlara neden olacaktır (Gilmore 2008).

Bu çalışmanın amacı, çevresel doğal radyasyonun ve yıllık dozun daha doğru hesaplanabilmesinin geliştirilmesi için gerçek çakışmaların etkisinin incelenmesidir. Gerçek çakışmanın hesabı için birçok teori, program geliştirilmiştir ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Bu programların çoğu yüksek maliyette ticari programlardır. Tezde kullanmış olduğumuz programın Debrecen kentindeki Kossuth Üniversitesi Fizik Bölümü'nden Dr. S.SUDÁR tarafından geliştirilmiştir ve ücretsiz olarak elde edilebilmektedir. Programın uygulama ve yöntem bakımından kullanımı kolaydır ve ticari yazılım alamayanlar için alternatif bir yöntemdir. Yücel ve arkadaşları kuyu tipi yüksek saflıkta germanyum detektörde gerçek çakışma katsayılarını incelemiş ve programın gerçek çakışma hesabında kullanılabileceğini söylemiştir (Yücel vd. 2009).

Çalışmamda, doğal radyoaktif serilerdeki ürün çekirdeklerden salınan gama enerjileri bu yöntemle göre incelenmiştir. Laboratuvarda %33 görelili verimli yüksek saflıkta Germanyum detektör ile radyoaktivite analizde kullanılan hacimsel kap için gerçek çakışma katsayıları hesaplanmış ve aktivite hesabında kullanılmıştır.

2. KATIHAL RADYASYON DETEKTÖRLERİ VE GAMA SPEKTROMETRESİ

2.1 Yarıiletken Radyasyon Detektörleri

Yarıiletken detektörlerde yük taşıyıcısı elektron ve deşiklerdir. En yaygın olarak kullanılanları silisyum ve germanyumdan yapılmış olanlarıdır ama selenyum gibi elementler, bakır oksit, galyum arsenik, indiyum fosfor, kursun sülfür gibi bileşikler de sıklıkla kullanılır. Yarıiletken detektörlerin en önemli özellikleri enerji çözme güçlerinin çok yüksek olmasıdır. Özellikleri;

- Enerji çözme gücü yüksek olduğundan sıklıkla enerji ölçümünde kullanılırlar.
- Farklı geometrik tasarımda yapılmaları mümkündür.
- Geniş enerji aralığında radyasyona karşı yanıtları (parçacık enerjisi değişimine karşı puls yüksekliği) geniş bir aralıkta doğrusaldır.
- Puls doğma zamanları hızlıdır (gaz detektörlere göre).
- Manyetik alana hassas değildirler.
- Vakumda çalışabilme özellikleri bulunur.
- Yapılarında kullanılan yüksek yoğunlukta sert madden dolayı belirli bir boyut için etkinlikleri yüksektir.

Yarıiletken detektörlerde gelen radyasyon, kristal ile etkileşir. Bu etkileşmeler sonucunda kristal atomlarından koparılan elektronlar diğer elektronlarla etkileşerek elektron-deşik çiftleri meydana getirirler ve yaklaşık 10^{-12} s gibi çok kısa bir sürede olay kararlı hale gelir. Biriken yük dışarıdan uygulanan elektrik alan ile kristal boyunca sürüklenir. Elektrik alanın zorladığı yönde hareket eden ve sonra katoda ulaşan elektrik yükü, bir direnç üzerinden geçirilerek, bir sinyale dönüştürülür. Gelen radyasyonun enerjisiyle orantılı olarak bir voltaj (elektrik) sinyali elde edilir. Kristal içinde meydana gelen ve temas yüzeylerinde toplanan yük miktarı, radyasyonun cinsinden bağımsız olarak yalnızca soğurulan enerji ile orantılıdır.

Yarı iletken detektörlerin yapımında en çok germanyum ve silisyum kullanılır. Bu yarıiletkenlerin bantları arasındaki enerji farkı 1eV'tan daha azdır. Yarı iletken detektörlerin en büyük üstünlüğü enerji ayırma güçlerinin çok iyi olmasıdır. Yani birbirine yakın enerjiler rahatlıkla ayırt edilebilirler. Ancak ölçme verimi diğer detektörlere göre daha düşüktür. Yapılacak çalışmanın amacına göre detektör seçimi yapılmalıdır. Örneğin tek bir radyoaktif çekirdekle yapılabilen çalışmalarda çözme gücü düşük fakat verimi yüksek sintilasyon detektörü ile çalışmak daha uygundur. Buna karşılık eser miktardaki element tayininde kullanılan aktivasyon çalışmalarında birbirine yakın enerjileri ayırmak önemli olduğundan Ge, Ge(Li), Si(Li) gibi detektörlerin kullanılması daha uygundur.

2.2 Gama Spektroskopisi

Gama Spektroskopisi, radyoaktif çekirdek ayırma ve tespit etme yöntemleri arasında en hassas analitik ölçüm tekniğidir. Gama, maddeyle etkileşim sırasında enerjisini fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşum sonucu maddenin içindeki elektronlara aktarır. Gama ışınlarının enerjisi her bir çekirdek için kesikli ve karakteristiktir.

NaI(Tl) sintilasyon detektörü ve HPGe yarıiletken detektörler gama spektroskopisinde en yaygın olarak kullanılanlarıdır. Esas amaç, detektörden gelen sinyallerin işlenmesiyle oluşan ve enerji soğurulmasına karşılık gelen puls yükseklik spektrumundaki piklerin analizinin yapılmasıdır.

Gama spektrometresinde analizin avantajları;

- Aynı örnekte, farklı radyoaktif çekirdekleri tek tek ve aynı anda analiz etmek mümkündür.
- Karmaşık kimyasal ayırma işlemi gerekmediğinden numune hazırlama işlemi kolay ve hızlıdır.

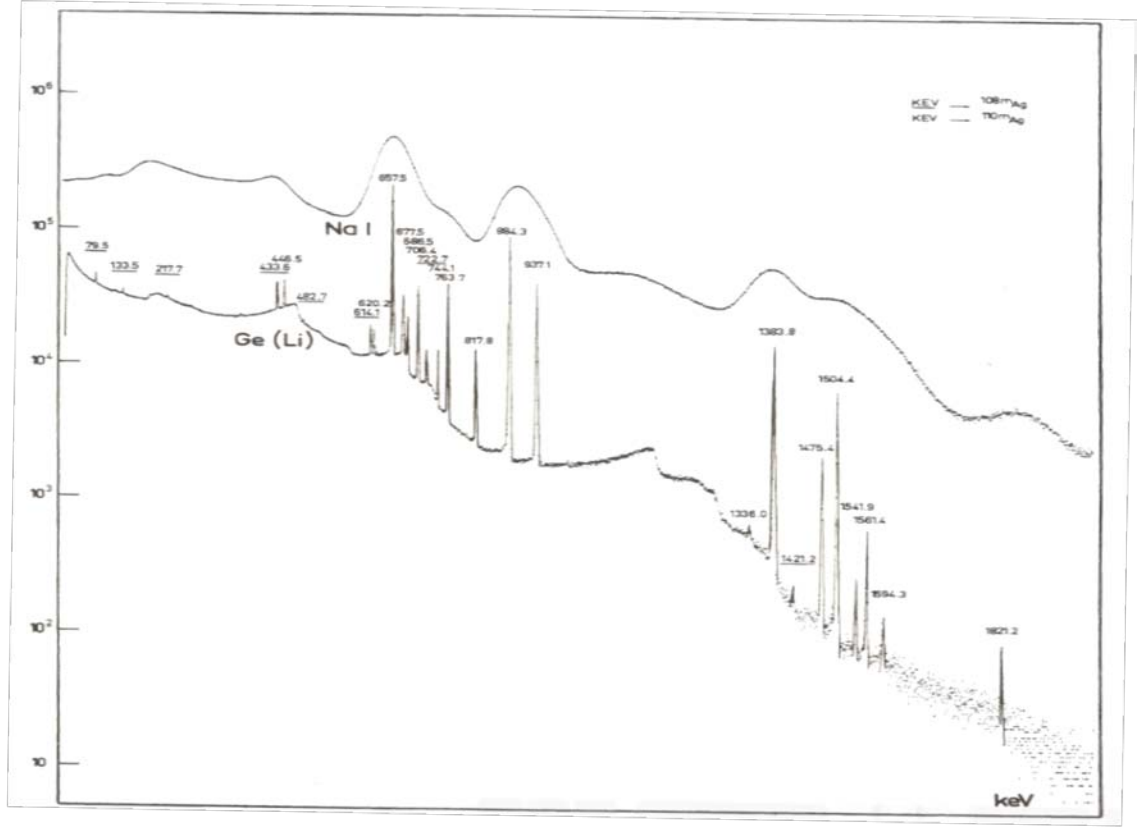
- Ölçümlerdeki yüksek kararlılık, veri işlemedeki doğruluk ve analiz edilen bilgilerin güvenilirlik düzeyleri yüksektir.
- Düşük dedüksiyon limitine sahiptir. Bu yüzden çevre radyoaktivitelerinin ölçümünde, özellikle gama spektrometresi kullanılmaktadır.

Gama spektroskopisi için seçilecek ideal bir detektörün özellikleri şöyle olmalıdır.

- Çıkış gama ışınının enerjisiyle orantılı olmalıdır.
- İyi verimli ve yüksek soğurma katsayısı olmalıdır.
- Sinyalleri toplama için kolay bir mekanizmaya sahip olmalıdır.
- Makul bir fiyatının olması gerekir.
- Uygun boyutlarda olması gerekir.

Gama spektroskopisi için ölçüm yapan bir detektörden beklenen en önemli iki özellik vardır. Birincisi bir veya daha fazla hızlı elektron yaratan olası gama ışını etkileşimleriyle bir dönüşüm ortamı gibi davranmalı, ikincisi ikincil elektronlar için rutin bir detektör gibi davranmasıdır. Gaz detektörlerde çok düşük enerjili ikincil elektronları soğurulması çok zordur. Diğer taraftan gaz detektörlerde 1 MeV' lik bir elektron normal basınç ve sıcaklık altında ancak birkaç metrede soğurulabilir. Gama spektrometresinde kullanılan enerji aralığı 50 keV- 3000 keV civarındadır. Bu duruma baktığımızda gama spektroskopisi için gaz detektör kullanmak hem hacimsel hem de ölçüm için pek kullanışlı değildir.

Gama ışınlarının ölçülmesi için 2 önemli detektör türü bulunmaktadır. Bunlar inorganik pırıldayanlar (sintilatörler) NaI(Tl) gibi ve katıhal detektörlerdir. Sintilatörler yarıiletken detektörlere göre geniş boyutlarda rahat elde edilebilmesi ve yüksek yoğunluğa sahip olmaları nedeniyle gama ışınları ile çok fazla etkileşimde bulunurlar ve gama ışınlarını bütünüyle soğururlar. Çok kullanışlıdır, verimleri yüksektir fakat enerji çözünürlüğüne gelince biraz zayıf kalırlar. Şekil 2.1'de tipik çözünürlüğe sahip iyi bir Ge(Li) detektör ile %5-10'luk NaI(Tl) detektörlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

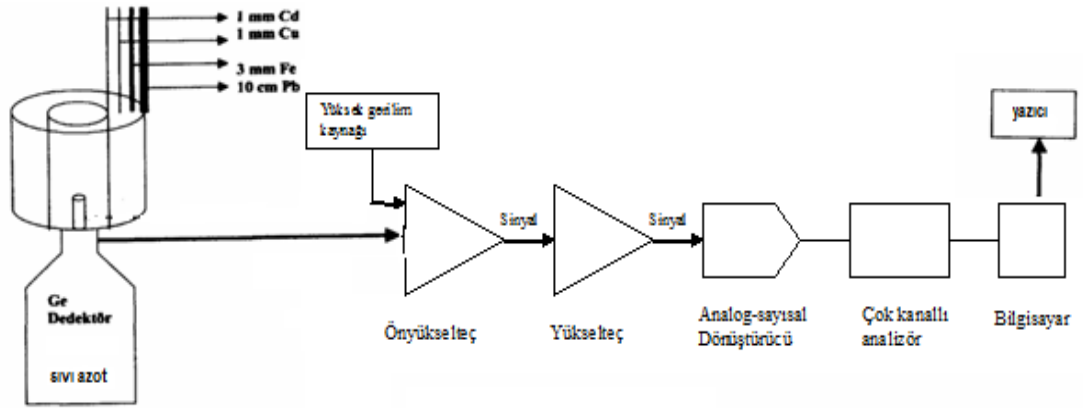


Şekil 2.1 Ge(Li) ve NaI detektörlerinin spektrum olarak karşılaştırılması
(Glenn 1979,1989)

Daha küçük boyutlarda elde edilen germanyum yarıiletken detektörler, fotopik verimini düzgün bir şekilde verebilmektedir ve iyi çözünürlüğe sahip olmaları nedeniyle eser miktardaki kaynakların tespitinde ve üst üste binmelerin engellenmesinde oldukça faydalıdır.

2.3 Gama Spektrometresi Bileşenleri

Gelen gama ışınının enerjisine bağlı olarak, detektörden elde edilen elektrik darbeleri, bir seri elektronik parçalardan geçirilerek Çok Kanallı Analizörde (MCA) enerji dağılımlı gama spektrumu olarak gözlenir. Detektör ve diğer elektronik parçaların uygun birleşimine bir gama spektrometresi olarak adlandırılır.

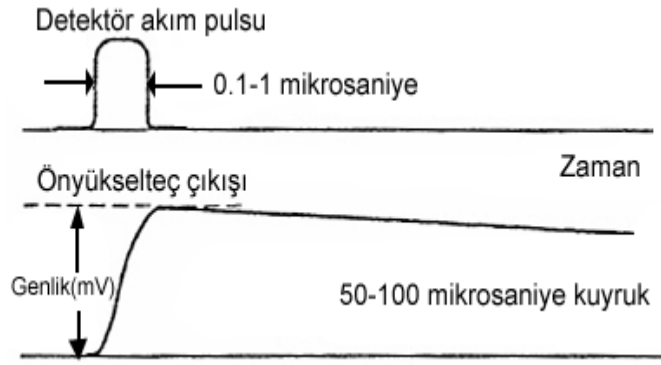


Şekil 2.2 Gama spektroskopisi ölçüm düzeneği

2.3.1 Önyükselteçler

Detektör ve puls işleme elektroniği arasındaki ilk eleman genellikle önyükselteçtir. Detektöre mümkün olduğunca yakın tutulur. Önyükselteçlerin gama spektrometresindeki görevi detektörden gelen göreceli olarak küçük sinyali büyütme, detektör ve sonraki bileşenler arasında direnç seviyesini düzenlemek, daha sonraki işlemler için sinyal şeklini ayarlamak ve biçimlendirmektir.

Detektörde kapasitans yüklenmesinin en aza indirilmesi için detektör ve önyükselteç arasında uzun bağlantı kabloları kullanmaktan kaçınılmalıdır. Önyükselteç kapasitansı hızlıca yok ederek sinyal-gürültü oranının maksimum olmasını sağlar. Önyükselteçler puls şekillendirmesi yapmazlar ve çıkışları lineer kuyruklu bir pulstur. Çıkış pulsunun doğuş zamanı detektörün yük toplama süresine uygun olacak şekilde mümkün olduğunca kısa tutulur. Pulsun azalım zamanı ise uzundur (50–100 μ s) ve detektördeki tüm yük toplanabilir. Şekil 2.3'te ön yükselteç puls şekli gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Önyükselteç çıkışındaki puls şekli (Solmaz 2007)

Önyükselteçler voltaja veya yüke hassas olarak tasarımlanabilirler. Voltaja hassas önyükselteçler girişe gelen voltaj pulsunun genliği ile orantılı genliğe sahip çıkış pulsu oluştururlar. Giriş devresinin zaman sabiti, yük toplama zamanına göre büyük ise giriş pulsunun genliği aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$V_{\max} = Q/C \quad (2.1)$$

olur, burada C giriş kapasitansıdır. Birçok detektörde giriş kapasitansı sabittir, bu yüzden voltaja hassas önyükselteç ile üretilen çıkış pulsu gelen radyasyon tarafından oluşturulan Q yükü ile orantılıdır. Eğer giriş kapasitansı değişirse istenilen orantı özelliği kaybolur. Örneğin yarıiletken diyot detektörlerde, detektör kapasitansı çalışma parametreleriyle değişebilir. Bu gibi durumlarda $V_{\max}$ ve Q arasındaki orantı kaybolduğu için voltaja hassas önyükselteçler kullanılmaz. Bu sorunun çözümünde yüke hassas önyükselteçler kullanılır. Giriş kapasitansındaki herhangi bir değişiklik çıkış voltajında önemli bir etkiye neden olmaz.

Önyükselteçler için en önemli sorunlardan birisi gürültüdür. Gürültünün kaynağı önyükselteç girişinin yüklendiği kapasitanstır. Giriş kapasitansı, doğal detektör kapasitansı ve detektör ile önyükselteç arasındaki bağlantı kablolarından meydana gelebilir. Bundan dolayı bağlantı kablolarını mümkün olduğunca kısa tutmak ve gereğinden fazla doğal kapasitansı olmayan detektör seçmek önemlidir.

2.3.2 Detektör besleme ve yüksek gerilim kaynakları

Çoğu radyasyon detektörleri çalışmaları için dışarıdan uygulanacak bir yüksek gerilime ihtiyaç duyarlar. Bu gerilim genellikle detektör beslemesi olarak adlandırılır. Detektör besleme kaynaklarının önemli özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Minimum ve maksimum gerilim seviyesi ve polaritesi.
- Cihazdan sağlanan maksimum akım.
- Geçiş geriliminde veya sıcaklık değişimlerine bağlı olarak meydana gelen sapmalara karşı düzeltme derecesi.
- Alçak frekans gürültülerini veya frekanstaki oynamaları önleme derecesi.

Besleme kaynağının özellikleri detektör tipine bağlıdır. Sintilasyon sayıcılarıyla birlikte kullanılan fotoçoğaltıcı tüplerde birkaç miliamperlik akım ve 3000 V kadar gerilim gerekebilir. Aynı zamanda fotoçoğaltıcı tüpte yüksek gerilim seviyesindeki dalgalanmalardan dolayı meydana gelen kazanç değişimlerini önlemek için çıkış iyi düzenlenmiş olmalıdır. Geniş hacimli germanyum detektörler için 5000 V' a kadar gerilim gerekir ancak akım değeri çok düşüktür.

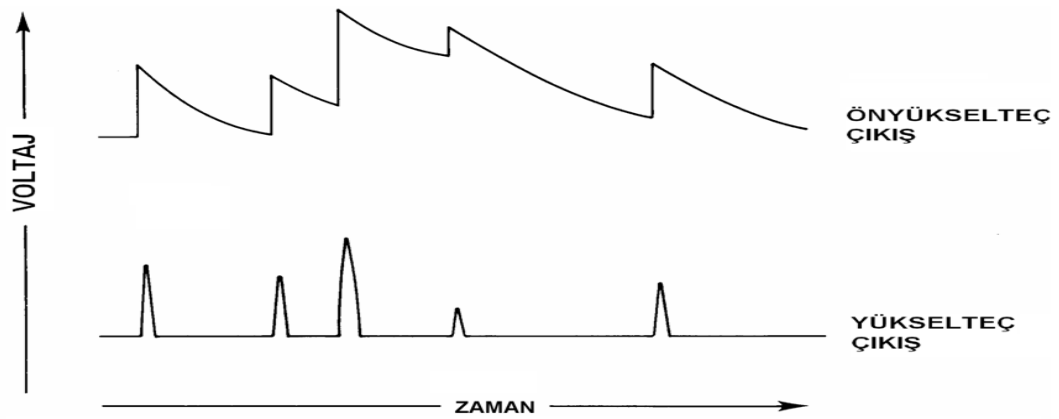
2.3.3 Yükselteçler

Önyükselteçten gelen sinyaller burada yeniden şekillendirilir, yükseltilir ve şekillendirmek için gerekli olan genel bilgi saklanır. Göreceli olarak uzun olan ön yükselteç zaman sabiti sinyallerin üst üste binmesine neden olur. Yükselteç çıkış sinyalleri kısılır, fakat zaman ve genlik bilgisinde önemli bir kayıp olmaz. Şekil 2.4'te önyükselteçten yükseltece gelen sinyal gösterilmiştir.

Yükseltecin önemli özellikleri şu şekildedir:

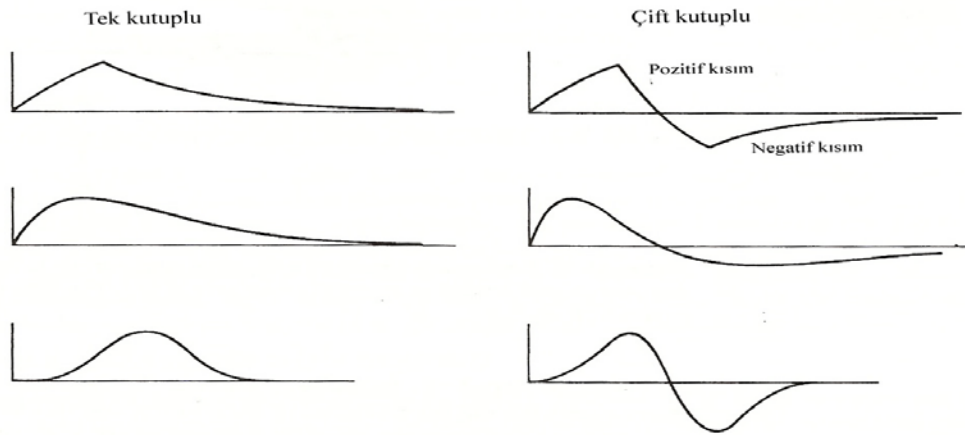
- Sinyal yükselmesi.
- Puls yığılması ve fazla yüklemeyi en aza indirerek yüksek sayım hızlarında performansı maksimum yapacak puls şekillenmesi.

- Toplanan yükün doğru bir şekilde ölçüleceği ve balistik zarar etkisinin olmayacağı bir puls şekillenmesi.
- Yüksek sayım hızlarındaki performansını korumak için puls yığılması ve temel seviye korunması için devreler içermelidir.
- Ayrı ayrı her puls genliğinin sinyal-gürültü oranını en iyi şekilde analiz edecek puls şekillenmesi.



Şekil 2.4 Önyükselteçten yükseltece gelen sinyallerin şematik gösterimi

Puls şekillenmesinde dikkate alınan en önemli husus sayım hızı ve ayırma gücü arasındaki çelişkidir. Yüksek sayım hızlarında çift kutuplu ve genişliği az olan pulslar istenirken en iyi ayırma gücü için tek kutuplu geniş puls istenir. Şekil 2.5'te tek ve çift kutuplu sinyal pulslar gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Tek ve çift kutuplu sinyal pulslar (Solmaz 2007)

2.3.4 Analog-sayısal dönüştürücü (ADC)

ADC' nin görevi, yükselteçten gelen analog elektrik sinyallerini sayısal sinyallere dönüştüren elektronik parçadır. ADC performansı aşağıdaki özelliklerle tanımlanır.

- Dönüşümün hızı
- Dönüşümün doğrusallığı
- Dönüşümün ayırma gücü

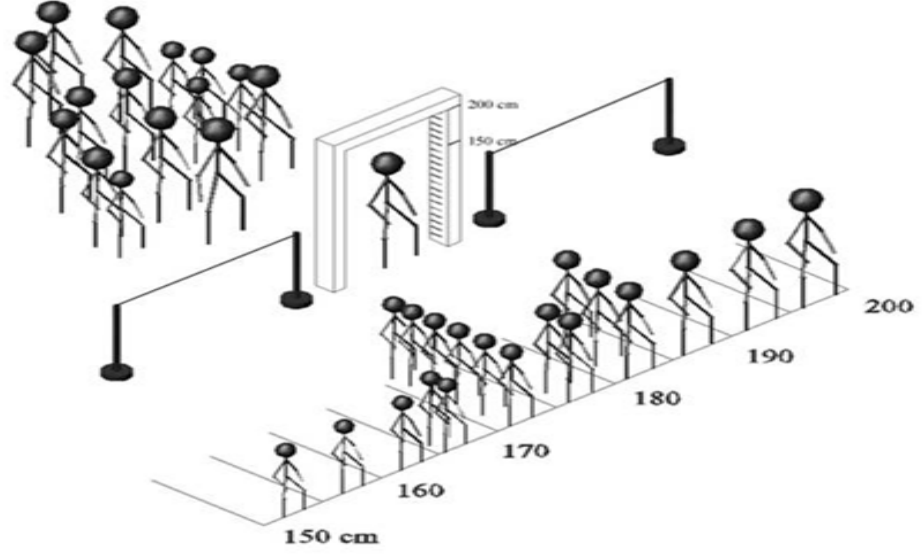
Ayırma gücü kanal sayısı ile belirlenir. Genliği aynı olan pulslar her zaman aynı kanalda kaydedilecektir. Oluşan kanal sayıları 2'nin üssü şeklinde artar. Örneğin, 8 bitten oluşan ADC, 2^8 (256) tane kanal oluşturur. 13 bitten oluşan ADC'de kanal sayısı 2^{13} (8192) dır. Spektrumun kaydedileceği kanal sayısı ADC' nin dönüşüm kazancı ile ayarlanır ve giriş genliğinin yayılacağı maksimum kanal sayısını belirtir. Örnek olarak, dönüşüm kazancı 8192 kanal olursa, 0–3 MeV ADC' de 3 MeV'lik puls 8192. kanalda kaydedilir. İhtiyaç duyulan kanal sayısı giriş pulsunun sinyal gürültü oranına büyük ölçüde bağlıdır. Eğer gürültü fazla ise ADC' nin bit sayısını fazla seçmek gürültünün de sayısal hale getirilmesine neden olur. Yüksek sinyal-gürültü oranı varsa bit sayısı fazla olan ADC kullanılmalıdır. İdeal dönüşüm işleminde sayısallaştırmadaki hata bit sayısı arttıkça azalır.

ADC dönüşüm hızı veya ölü zamanı, çok kanallı analizörün ölü zamanını sınırlayan faktördür. Puls analizinde kullanılan ADC çeşitleri; lineer yokuş dönüştürücüler, ardışık yaklaşım devreleri ve hızlı ADC' lerdir. Lineer yokuş dönüştürücüler en yavaş olmasına rağmen doğrusallığı en iyidir. Ardışık yaklaşımlı ve hızlı ADC daha hızlı dönüşüm zamanına sahiptir fakat doğrusallıkları kötüdür.

2.3.5 Çok Kanallı Analizör (MCA)

Çok kanallı analizör, spektrum analizinin kolayca yapılabilmesine imkân veren elektronik bir sistemdir. ADC'de sinyal işleme aşamalarından geçen sinyaller uygun adresleme düzeni yapabilen MCA'da çubuklu şekil (histogram) şeklinde görülebilir.

Sinyaller MCA'nın kanal olarak tanımlanan hafıza bölgelerinde depolanır. Sinyal işleme aşamasında hafızada kaydedilen spektrum, monitörde gözlenir, analiz edilir ve yazıcı ünitesine veya bir bilgisayara aktarılır. Gama spektrometrelerinde, çok kanallı analizörler bilgi saklama ve işleme ünitesidir. Şekil 2.6'da çok kanallı analizör anlatılmaya çalışılmıştır.



Şekil 2.6 Çok kanallı analizörün temsili

Bir MCA, bir mikroişlemci ve birbiriyle ilişkili hafıza, monitör, sinyal işlemcisi, kullanıcı paneli ve veri girdi/çıktısı kısımlarından oluşur. Mikroişlemci kontrol ünitesi olup, hafızada sürekli kalan ve silinmeyen bir programdan analizörle ilgili bilgileri okuyan kısımdır. Bu kısım, MCA fonksiyonlarını kontrol ederek, anakart (mainboard) üzerinden gönderdiği emirlerle diğer kısımların işlevlerini yönlendirir.

2.4 Sayım İstatistiği

Spektrumda gözlenen gama çizgisinin içeriği kısmen doğal fon değerlerini de içeren sayım deneyinin (N) sonuçlarıdır. Pik alanındaki belirsizlik sonuçlara ciddi bir şekilde etki eder. Bu yüzden net pik alanının düzgün bir şekilde hesaplanması gerekir. Sayım

istatistiklerindeki belirsizlikler standart sapma ile hesaplanır. Bütün sayım deneyleri (N) Poisson dağılımı şeklinde ifade edilir. Standart sapma,

$$\sigma = \sqrt{N} \quad (2.2)$$

Yukarıdaki eşitlik gerçekte tekrarlanabilen sayım deneylerinin hakkında bilgi verir.
 $N \pm \sigma$

Analiz için bir pikten doğal fon başarılı bir şekilde çıkartılmalıdır. Fakat doğal fon çıkartılacak ise Poisson dağılımı bir Gaussian dağılımına yaklaştırılarak yapılır. Bu bize N sayımındaki geniş hatayı azaltacaktır ve eğer N 10'dan büyük bir değer ise bu durumda,

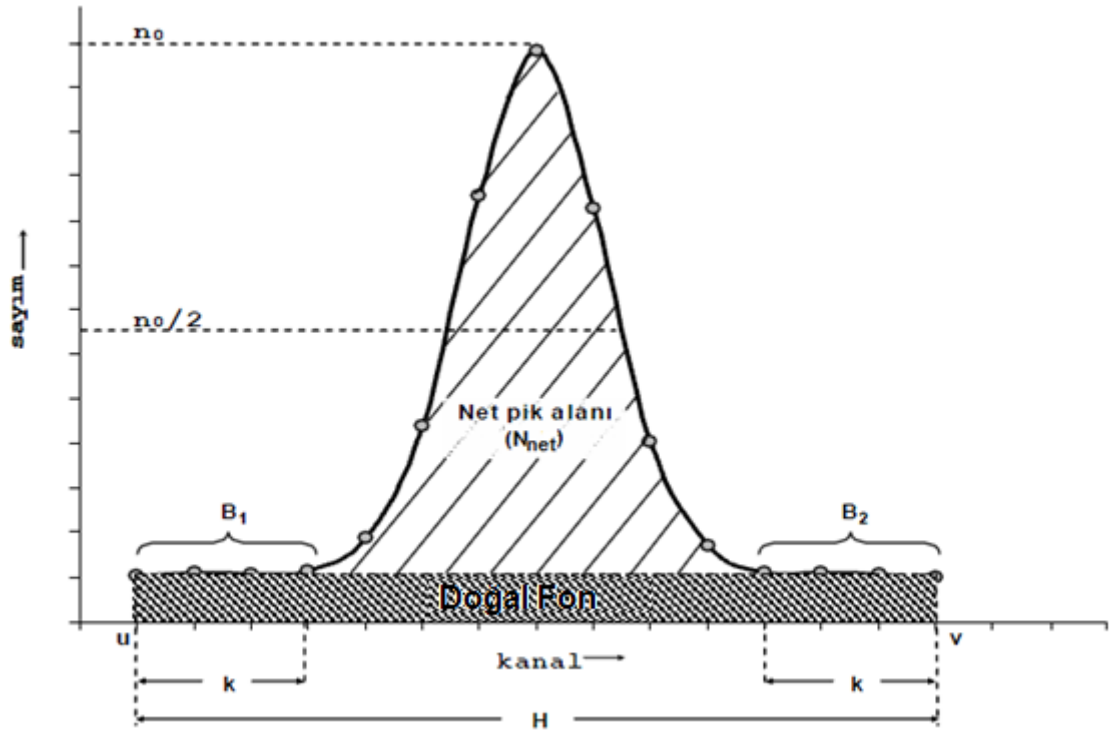
$$N_{net} = N_{top.} - N_{d.fon} \quad (2.3)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{top.}^2 + \sigma_{d.fon}^2} \quad (2.4)$$

Şeklinde olacaktır.

2.5 Fotopik Alanı Hesaplama Yöntemi

Fotopik alanı, ilgilenilen enerjideki pikin sürekli Compton fonunun (background) üstündeki toplam sayım olarak tanımlanır (Canberra 1986). Covell metodu olarak da bilinen bu pik alanı hesaplama metodunda, önce pikin uç noktalarındaki kanal sayısı tespit edilir. Sonra, her bir kanalda biriken sayımların toplamından doğal fon alanı çıkarılarak net pik alanı (N_{net}) belirlenir. Pik alanın hesabı şekil 2.7'de verilen örnek tek bir pik üzerinde açıklanmıştır.



Şekil 2.7 Gama pik alanının hesaplanmasında kullanılan parametrelerin şekil üzerinde Gösterimi (Karadağ 2004)

Net Pik Alanı(N_{net})=Toplam Alan - Doğal Fon Alanı

$$\text{Toplam alan: } \sum_{i=u}^v x_i \quad (2.5)$$

Doğal fon alanı:

$$\frac{H}{2} \times (B_1 + B_2) \quad (2.6)$$

Net Pik Alanı:

$$N_{net} = \sum_{i=u}^v x_i - \left\{ \frac{H}{2} \times (B_1 + B_2) \right\} \quad (2.7)$$

u: pikin başlangıç kanal numarasını,

v: pikin bitiş kanal numarasını,

H: piki oluşturan tüm kanalların sayısını ($H = v - u + 1$),

x_i : i. kanaldaki sayım miktarını,

B_1, B_2 : sırasıyla pikin sol ve sağ taraflarındaki tabii fon ortalama sayım miktarlarını;

$$B_1 = \frac{1}{k} \left\{ \sum_{i=u}^{u+k-1} x_i \right\} \quad (2.8)$$

$$B_2 = \frac{1}{k} \left\{ \sum_{i=v-k+1}^v x_i \right\} \quad (2.9)$$

k: pikin sağ ve sol uç taraflarında devam eden ve süreklilik gösteren kanalların sayısını ifade eder. Bu çalışmadaki pik alanı hesaplamalarında; k, pikin sağ ve sol taraflarındaki süreklilik gösteren kanalların durumuna göre genellikle 4 - 6 arasında seçilmiştir.

Tek veya girişimsiz (temiz) ilgilenilen pikin net alanından, gerektiğinde ayrı bir ölçümden elde edilen ilgili pike ait doğal fon (background) belirlenerek çıkarılır. Bu yöntem ile net alan hesaplanması, spektrumda girişim yapan piklere uygulanmaz. Girişim yapan piklerin net alanları başka işlemleri gerektirir. Ayrıca ORTEC ve CANBERRA detektör şirketleri tarafından geliştirilmiş Maestro-32 ve Genie 2000 detektör yazılımları pik analizlerinde kullanılmaktadır (Customization Tools Manual Genie-2000, 2004, Maestro-32 Software User's Manual, 2004).

3. KALİBRASYONLAR

Modern dijital gama spektrometresindeki pulsların ölçümünde birçok pulsun ardı ardına puls yüksekliği gözlenir. Eğer elimizdeki bu karmaşık spektrumun bir anlam kazanmasını istiyorsak enerjinin kanal sayısına göre veya voltaja göre ve radyoaktif çekirdek miktarının puls sayımına göre kalibrasyonu yapılmalıdır. Bunun için, iki ana başlık sağlanmalıdır.

- Enerji kalibrasyonu: kanal numarası ve enerji arasındaki ilişki
- Verim kalibrasyonu: sayım miktarı ile parçalanma oranı arasındaki ilişki

3.1 Enerji Kalibrasyonu

Enerji kalibrasyonu belli bir kazanç değeri için spektrumda gözlenen piklerin bulundukları kanal ile ait oldukları enerji arasındaki bağıntının bulunmasını sağlar. Detektör sisteminin belli bir kazançtaki (gain) enerji kalibrasyonu [kanal vs. gama enerjisi], belirlenen radyoaktif kaynaklardan yayılan gama ışınlarına ait Tam enerji fotopik kanal numaralarının tayin edilmesidir. Enerji kalibrasyonu ile çok kanallı analizör (MCA) kalibre edilir.

Kalibrasyon işleminden sonra MCA da kanal başına düşen enerji hesaplanır ve elde edilen kalibrasyon ifadesi daha sonra bilinmeyen bir numunenin MCA da oluşacak piklerinin nitel olarak tanımlanmasında kullanılır. Sayım sisteminin enerji kalibrasyonu, değişik enerjilere sahip standart gama kalibrasyonu kaynakları kullanılarak yapılır. En çok kullanılan kalibrasyon kaynakları çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Enerji Kalibrasyonu için önerilen radyoaktif çekirdekler
(IAEA Technical Reports Series No:295)

Çekirdek	Yarılanma süresi ($t_{1/2}$)	E_γ (keV)	f_γ
Am-241	432.70 yıl	59.54	0.359
Co-57	271.80 gün	122.06	0.855
		136.47	0.106
Co-60	5.27 yıl	1173.24	0.999
		1332.50	0.999
Cs-137	30.10 yıl	661.67	0.851
Mn-54	312.10 gün	834.84	0.999
Na-22	1.61 yıl	1274.52	0.999

Enerji kalibrasyonu için yükseltecin kazancı herhangi bir değere ayarlanır. Kalibrasyon işleminde kullanılan kaynakların spektrumda oluşturduğu piklerin tepe noktalarına göre o enerjideki piklerin hangi kanallarda oluştuğu tespit edilir. Sonra bu piklerdeki enerji değerleri bir fonksiyona uygunlaştırılarak (fit edilerek) kalibrasyon eğrisinin denklemi elde edilir. Bu şekilde MCA'nın tüm kanalları kalibre edilmiş olur.

Enerji kalibrasyon doğrusunun denklemi,

$$E = C_0 + C_1x + C_2x^2 + C_3x^3 \quad (3.1)$$

ifadesiyle verilir.

E: ilgilenilen Tam enerji fotopikinin enerjisi

x: kanal numarası

C_0 : sapma

C_1 : kazanç

C_2 ve C_3 : sistemin doğrusallıktan sapması

Enerji kalibrasyonu esnasında detektörün ayırma gücü (resolution) kontrol edilir.

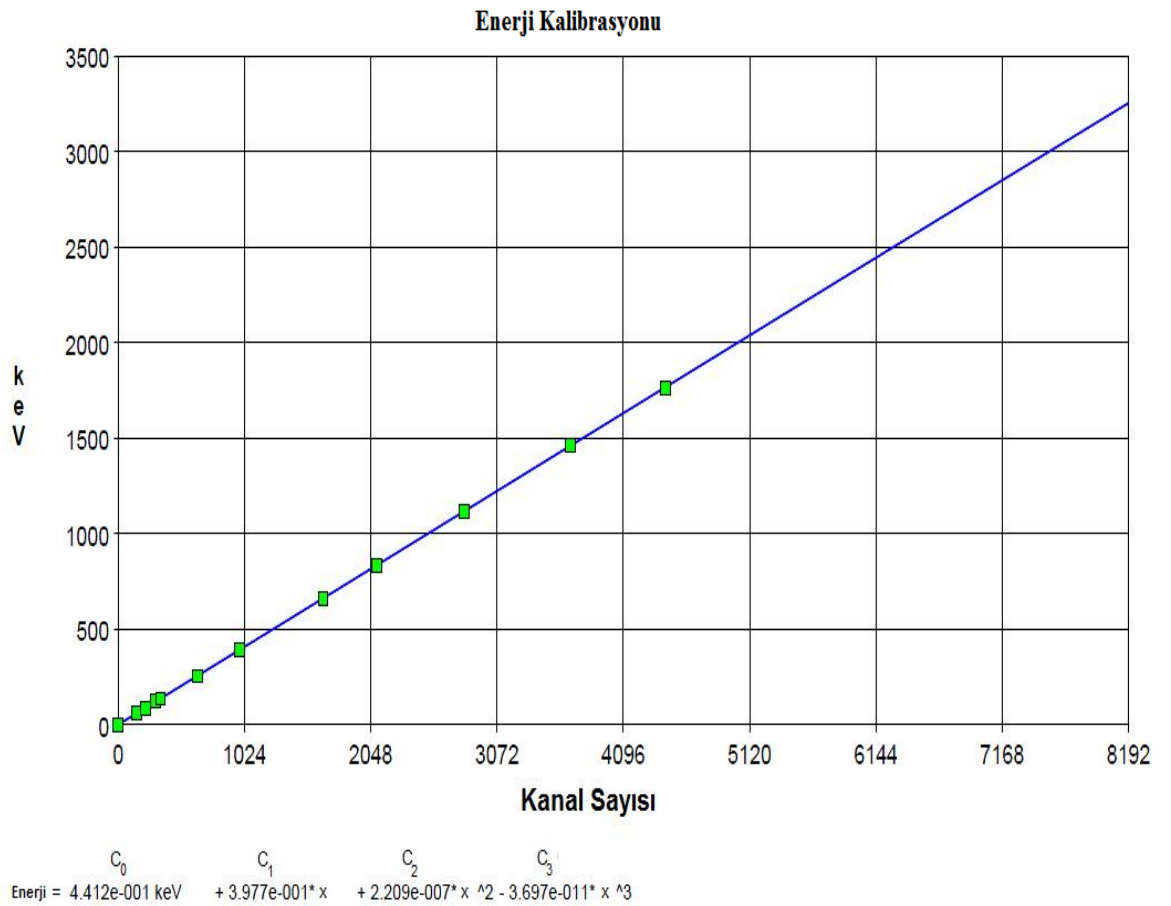
$$FWHM = \frac{F_0 + F_1\sqrt{E}}{C_1} \quad (3.2)$$

F: katsayılar

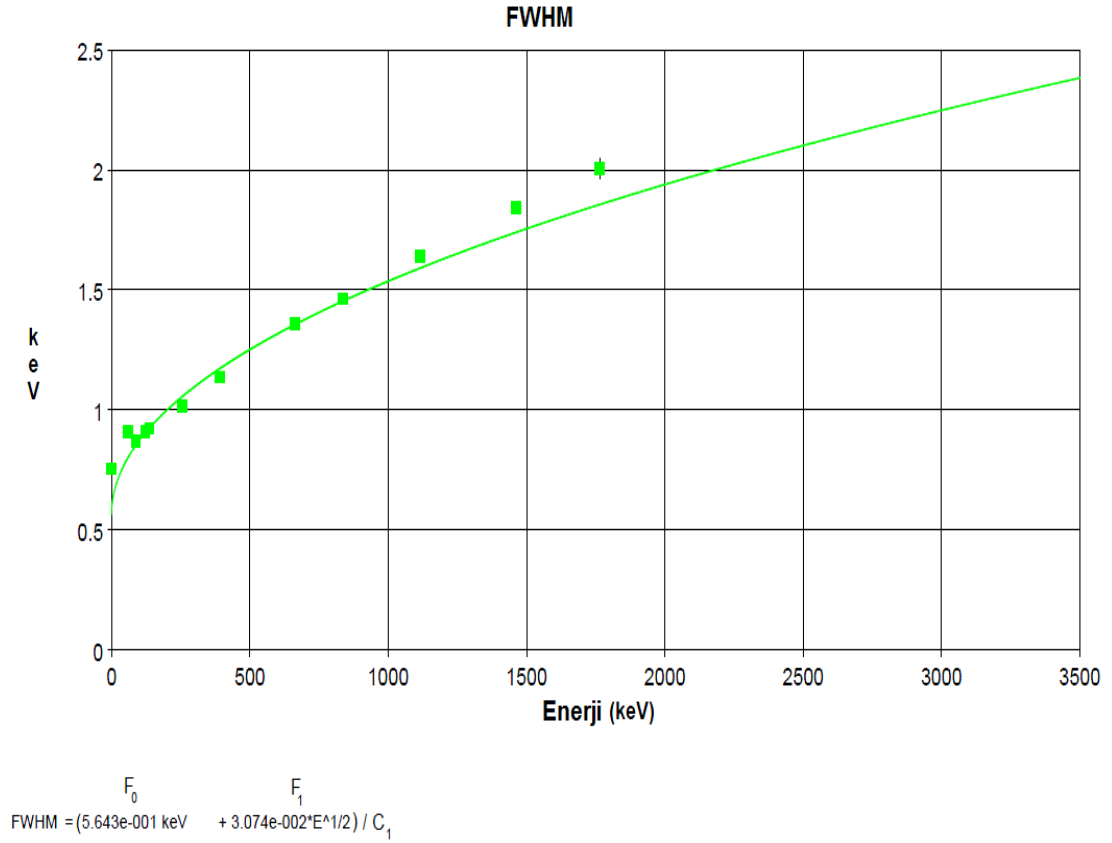
E: enerji

C₁: enerji kal.'dan elde edilmiş kazanç

Şekil 3.1-3.2'de Canberra P/T setindeki radyoaktif çekirdekler ve K40 (1460.82 keV), U238-Bi214 (1764.5) ile deneylerde kullanacağımız detektörde yapılmış olan enerji kalibrasyonu ve FWHM gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Enerji kalibrasyonu



Şekil 3.2 FWHM

3.2 Verim Kalibrasyonu

Verim, sayım sisteminin radyasyonu algılayabilme yeteneğinin ölçüsüdür. Kaynaktan çıkan bir radyasyonun algılanabilme ihtimali olarak tanımlanır. Alfa ve Beta parçacıkları aktif hacme girdiklerinde, kısa mesafe içerisinde algılanabilecek miktarda iyon çiftleri oluştururlar ve tamamı algılanabilir. Bu durumda sayım verimi %100 denilebilir. Gama ve nötron enerjisinin tamamını bırakabilmesi için çok büyük hacimlere ihtiyaç duyar. Detektör sisteminin verimi,

- Detektörün kendisinden kaynaklanan etkileri,
- Kaynak-detektör geometrisinin etkilerini
- Detektör çevresindeki madde ve malzemelerin etkilerini
- Kaynak maddesindeki öz-soğurma (self-absorbsiyon) etkisini kapsar.

Her kaynak-detektör geometrisi için ayrı bir verim kalibrasyonu yapılmalıdır. Gama spektrometresinde verim, kaydedilen olaylara göre sınıflandırılır.

3.2.1 Göreceli verim

HPGe detektörleri tanımlamak için kullanılan bir verim çeşididir. %10 verimli HPGe detektör, %40 verimli kuyu tipi detektör, %18 verimli düzlem detektörü vb. gibi ifadelerdeki yüzde verim, 25 cm uzaklıktaki Co60'ın kaynağından çıkan 1.33 MeV enerjisindeki gamaların HPGe detektördeki sayım hızının (3" X 3") NaI detektöründeki sayım hızına oranı olarak belirlenir.

3.2.2 Mutlak verim

Kaynaktan yayınlanan gama sayısının aktif hacimde oluşturduğu atma sayısıdır. Mutlak verim; detektör malzemesine, radyasyonun enerjisine, detektörün boyutlarına, radyasyon kaynağının malzemesine, geometrisine, kaynak-detektör mesafesine de bağlıdır.

Mutlak Verim=(Radyasyonun aktif hacimde oluşturduğu atma sayısı)/(Kaynaktan yayınlanan gama sayısı)

3.2.3 Öz (Gerçek) verim

Detektör üzerine düşen gamaların aktif hacimde oluşturduğu atma sayısıdır. Bu verim spektrumdaki piklerin sayımlarını detektördeki gama oluşum sayılarıyla ilişkilendirir ve detektör malzemesine, radyasyonun enerjisine, detektörün boyutlarına bağlıdır. Detektör kaynak geometrisine bağlı değildir.

Gerçek Verim=(Radyasyonun aktif hacimde oluşturduğu atma sayısı)/(Detektör üzerine düşen gama sayısı)

3.2.4 Tam enerji fotopik verimi (ϵ^p)

γ fotonunun deteksiyonu sırasında fotoelektrik olay, çift oluşum, Compton saçılması meydana gelir. Gelen radyasyonun fotoelektrik olaya yaparak enerjisini bıraktığını düşündüğümüz olayların sayısının dikkate alınması ile elde edilen verime tam enerji fotopik verimi denir. Bu verim pratik gama spektroskopisinde çok büyük önem taşır. Genellikle spektrumun değerlendirilmesinde kullanılır. Tam enerji fotopik verimi ile aktivite orantılıdır. E γ enerjisindeki Tam enerji fotopik verimi (ϵ), ilgilenilen radyoaktif çekirdeği ya da ilgilenilen enerjiyi kapsayan çoklu radyoaktif çekirdek içeren, aktivitesi bilinen standart referans malzeme kullanılarak elde edilir. E γ enerjisindeki tam enerji fotopik verimi, aktivite hesabının yapıldığı formüle benzeyen bir formülle hesaplanır.

$$\epsilon = \frac{N}{A \cdot f_{\gamma} \cdot t_s \cdot K_1 \cdot K_2} \quad (3.3)$$

N: İlgilenilen Tam enerji fotopikinin(fotopik) düzeltilmiş net alanıdır.

A: İlgili fotopikin ait olduğu radyoaktif çekirdeğin aktivitesidir.

f_{γ} : İlgilenilen fotopik E γ enerjisine karşılık gelen gama yayınlanma ihtimalidir.

t_s : Numune spektrumunun elde edilmesi için geçen, saniye cinsinden sayım süresidir.

K_1 : Numunenin toplanması ile ölçme işlemine başlama zamanı arasında geçen süre için bozunum düzeltme faktörüdür.

K_2 : Analiz edilen numunenin ölçme işlemi esnasında geçen süre için bozunum düzeltme faktörüdür.

Düzeltilme faktörü K_1 ve K_2 , uzun yarı ömürlü (uranyum, toryum ve bunların ürünleri) radyoaktif çekirdekler için hesaba katılmamalıdır, ancak kısa yarı-ömürlü radyoaktif çekirdekler için dikkatle hesaplanmalıdır. Birçok gamanın enerjisine göre bir verim eğrisi çizilebilir. Fakat doğru verim kalibrasyon eğrisi uygun uzaklıklarda tek gama yayan ve gerçek çakışması olmayan çekirdeklerden elde edilir. Bu kalibrasyon eğrisine etkiyen birden çok etmen vardır.

- Farklı detektör kaynak mesafeleri
- Farklı kaynak şekilleri
- Kaynak soğurma katsayıları
- Rastgele çakışmalarla (random coincidence) yüksek sayım oranı
- Yakın geometrilerde gerçek çakışmaların etkisi (true coincidence effect)
- Kaynağın aktivitesinin sayım sırasındaki değişimleri
- Elektronik zamanlama problemi

Her enerji için bulunan verim değerleri ait oldukları enerjiye karşı grafiğe geçirilir veya enerji-verim değişimi bir matematiksel fonksiyona uydurulur. Bu konuda çeşitli fonksiyonlar önerilmiştir. Bunlardan bazıları,

Kuvvet Fonksiyonu;

$$\varepsilon = a \cdot E^b + c \cdot E^d + e_1 \cdot E^f + g \cdot E^{h \cdot E} \quad (3.4)$$

a, b, c, d, f, g, h eşitlikteki değişkenlerdir. E salınan gamanın enerjisidir.

Üstel Log (E) Kuvvet serisi;

$$\varepsilon = e^{a_0 + a_1 \cdot \log(E) + a_2 \cdot (\log(E))^2 + a_3 \cdot (\log(E))^3} \quad (3.5)$$

a₀, a₁, a₂, a₃ eşitlikteki parametreler. E salınan gamanın enerjisidir.

Negatif Kuvvet Serisi;

$$\varepsilon = a \cdot E^{-1} + b \cdot E^{-2} + c \cdot E^{-3} + d \cdot E^{-4} + e \cdot E^{-5} + g \cdot E^{-6} + h \cdot E^{-7} \quad (3.6)$$

a, b, c, d, f, g, h eşitlikteki değişkenlerdir. E salınan gamanın enerjisidir.

Log (E) Kuvvet Dönüşüm Serisi;

$$\varepsilon = \frac{1}{E} (a + b \cdot \log(E)^{-1} + c \cdot \log(E)^{-2} + d \cdot \log(E)^{-3} + e \cdot \log(E)^{-4} + g \cdot \log(E)^{-5} + h \cdot \log(E)^{-6}) \quad (3.7)$$

a, b, c, d, f, g, h eşitlikteki değişkenlerdir. E salınan gamanın enerjisidir.

Çevresel radyoaktivite ölçümlerinde bu verim eğrisi çok önemli rol oynar. Eğri doğru bir şekilde bulunduktan sonra ara değer kestirimi (interpolasyon) ile her çekirdek için verim değeri elde edilebilir. Fakat kalibrasyon eğrisi değerlendirilirken şu düzeltmeler yapılmalıdır.

3.2.5 Toplam verim (ε^t)

Bu verim kaynaktan salınan gama ışınlarının bütün spektrum boyunca ve Compton bölgesi ve eksik soğurmalarında hesaba katıldığı, her şekilde detekte edilen foton sayımlarının bütünüdür. Aktif hacim içerisinde gama radyasyonunun detektör malzemesi ile etkileşmesi sonucu oluşturduğu atma sayısının tamamının dikkate alınması ile elde edilir. ε^t toplam verim ε^p tam enerji fotopik veriminden her zaman daha büyüktür. $\varepsilon^t / \varepsilon^p$ oranı enerjiye bağlı olarak değişir. Tipik bir detektör için 600 keV civarında bu oran 5-6 civarında olacaktır (Sudár 2002).

4. AKTİVİTE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Aktivite hesabı çok kapsamlı ve geniş bir konudur. Bu konuda birçok analiz yöntemi geliştirilmektedir. Günümüzde gama spektroskopisi ile aktivite analizi yapan laboratuvarlarda en çok kullanılan yöntemler standartla karşılaştırma ve doğrudan ölçme yöntemleridir. Tez kapsamında doğrudan ölçme yöntemine göre aktivite hesabı yapılmıştır.

4.1 Standartla Karşılaştırma Yöntemi

Aktivite hesabı için bir yöntem olan bu yönteme göre, numuneleri ölçeceğimiz geometri ile aynı geometride hazırlanan daha önceden aktivitesi bilinen standart referanslar ölçülür. Daha sonra aynı geometri için hazırlanan numuneler ölçülür ve sayım hızları oranlanarak numunenin aktivitesi bulunur. Bu yöntemin avantajı orarlama sırasında verimlerin ve buna bağlı hataların birbirini yok etmesidir. Yöntemin dezavantajı ise her zaman numuneye uygun standart bulmak ve hazırlamak çok zor hatta bazen imkânsızdır.

Net alan / t = Sayım hızı olarak gösterilirse standardın aktivitesi;

$$A_s = \frac{(Netalan)_s / t_s}{\epsilon f_\gamma m_s} \times 1000 \quad (4.1)$$

$$A_x = \frac{(Netalan)_x / t_x}{\epsilon f_\gamma m_x} \times 1000 \quad (4.2)$$

İki bağıntı birbirine oranlandığında;

$$\frac{A_s}{A_x} = \frac{\frac{(Netalan)_s / t_s}{\varepsilon f_\gamma m_s}}{\frac{(Netalan)_x / t_x}{\varepsilon f_\gamma m_x}} \quad (4.3)$$

$$\frac{A_s}{A_x} = \frac{(Netalan)_s t_x m_x}{(Netalan)_x t_s m_s} \quad (4.4)$$

elde edilir.

(Net alan/t) = sayım hızı olduğuna göre,

$$\frac{A_s}{A_x} = \frac{(Netalan)_s}{t_s} \times \frac{t_x}{(Netalan)_x} \times \frac{m_x}{m_s} \quad (4.5)$$

$$A_s/A_x = (\text{Sayım hızı})_s m_x / (\text{Sayım hızı})_x m_s \quad (4.6)$$

Buradan A_x çekilirse;

$$A_x = A_s \cdot \frac{(\text{Sayım hızı})_x m_s}{(\text{Sayım hızı})_s m_x} \quad (4.7)$$

elde edilir.

A_s : Standardın aktivitesi (Bq)

A_x : Örneğin aktivitesi (Bq)

m_s : Standardın kütlesi (g)

m_x : Örneğin kütlesi (g)

t_s : Standardın sayım süresi (s)

t_x : Örneğin sayım süresi (s)

ε : Detektör verimi

f_γ : Gama yayınlama olasılığı

4.2 Doğrudan Ölçme Yöntemi

Bu yöntemle aktivite hesabı için analiz yapılacak geometride önce doğru verim kalibrasyonu yapılır. Buradan ilgili gama enerjisi için verim bulunur ve diğer katsayıların hesaplarıyla birlikte aktivite formülüne göre numunenin aktivitesi hesaplanır. Yöntem bizi ilgili çekirdeğin yapısına göre hesaplamaların titizlikle yapılmasıyla doğru aktivite sonuçlarına götürecektir. Aktivite hesabı;

$$A = \frac{N}{\varepsilon \cdot f_{\gamma} \cdot t_s \cdot m \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5} \quad (4.8)$$

şeklindedir.

N: İlgilenilen Tam enerji fotopikinin(fotopik) düzeltilmiş net alanıdır.

ε: Sayım geometrisi için doğru verim kalibrasyonundan elde edilmiş ilgili radyoaktif çekirdekdeki gama enerjisi için verim değeri

A: İlgili fotopik ait olduğu radyoaktif çekirdeğin aktivitesidir (Bq).

f_γ : İlgilenilen fotopik γ enerjisine karşılık gelen gama yayınlanma ihtimalidir.

t_s: Numune spektrumunun elde edilmesi için geçen, saniye cinsinden sayım süresidir

K₁: Numunenin toplanması ile ölçme işlemine başlama zamanı arasında geçen süre için bozunum düzeltme faktörüdür.

K₂:Analiz edilen numunenin ölçme işlemi esnasında geçen süre için bozunum düzeltme faktörüdür.

K₃: Numunenin öz soğurması faktörü

K₄: Ölü zaman düzeltmesi faktörü

K₅: Gerçek çakışma düzeltmesi faktörü

4.2.1 Ölü zaman düzeltmesi

Ölü zaman düzeltmesi faktörü $(1-R\tau)^{-1}$ şeklinde verilir. Burada detektörün ölü zamanıdır ve R eşik değerini aşan sayımları da içeren toplam sayım oranıdır. Bu oran kaynağın aktivitesiyle bağıntılıdır.

4.2.2 Puls yığılması düzeltmesi (Random coincidence)

Bir pulsun τ devir zaman diliminde sayılıp kaydedilmesi sırasında başka bir pulsun daha detekte edilmesi durumudur. Sayım hızlarının yüksek olması durumunda piklerin etkileşmesi durumudur. Pulsların genişliğinin mümkün olduğu kadar küçük tutulmasıyla en aza indirgenmeye çalışılır. Sinyal gürültü etkileşimlerinden dolayı belirli bir değerden aşağı çekilemez.

Poission dağılımını kullanarak devrinde puls yığılmalarının olasılığı P_c ,

$$P_c = 1 - e^{-2R\tau} \quad (4.9)$$

R: ortalama sayım oranı

Eğer A ölçülen pik alanı ve A_T gerçek pik alanı ise,

$$\frac{A_T - A}{A_T} = P_c = 1 - e^{-2R\tau} \quad (4.10)$$

şeklinde dir. Buradan eşitliği tekrar düzenler ve basit bir ifade ile gerçek pik alanını yazacak olursak,

$$A_T = A \cdot e^{-2R\tau} \quad (4.11)$$

şeklinde olacaktır.

4.2.3 Matris (Ortam)

Analiz yapılan örneğin cinsine göre sayım oranları değişir. Çizelge 4.1’de %45’lik p-tipi HPGe detektör ile 13-20 mm (çap-yükseklik) geometrisi için katı, sıvı, nokta Eu-152 kaynağından ölçülen sayım oranları incelenmiştir (Gilmore 2008).

Çizelge 4.1 Farklı yoğunluktaki aynı ölçüm geometrisindeki örnekler için sayım oranları (Gilmore 2008).

Enerji (keV)	(cps)		
	Nokta Kaynak	Sıvı	Katı(toprak)
39.91	386.0	243.1	174.5
45.4	109.6	75.0	58.1
121.78	469.3	325.6	301.0
244.70	63.7	46.4	44.8
344.28	255.1	151.8	139.0
411.13	13.2	9.51	8.62
443.97	14.4	11.0	10.6
778.90	46.6	32.7	30.2
867.39	9.67	7.26	7.23
964.06	35.6	26.4	25.5
1085.84	24.8	16.9	16.3
1112.09	30.4	22.8	22.3
1408.02	38.0	27.42	27.2

Çizelge 4.1’de matris farklarından dolayı farklı soğurma özellikleri vardır. Katı örnekte soğurma miktarı daha fazla olduğu için sayım oranı daha azdır. Analiz yapılırken öz soğurma katsayılarının hesaplanması ve hesaba katılması gerekir. Öz soğurma katsayıların hesabı için bu araştırmada NIST X-com veri tabanından yararlanılmıştır. Veri tabanı literatür tarafından desteklenmekte olup örneğin bileşiğindeki element yüzdelere katsayıları vermektedir (NIST Xcom 2008).

4.2.4 Gerçek çakışma (True coincidence)

Bu hataların kaynağı çekirdekten aynı anda yayınlanan çoklu gama ışınlarından kaynaklanır. Bozunum şeması karışık olan radyoaktif çekirdeklerde bu etki daha büyüktür. Gerçek çakışma geometriye bağlıdır ve hatalar özellikle kaynak detektör arasındaki geometri yapışık durumda ise çok fazla gözlenir. Bu sebepten dolayı yakın geometri verim eğrisinin gerçek çakışma yapmayan çekirdeklerle hesaplanması gerekir. Diğer bölümlerde daha ayrıntılı olarak bu durumun kaynağından ve düzeltme yöntemlerinden bahsedeceğiz.

5. YÜKSEK SAFLIKTA GERMANYUM (HPGe) DETEKTÖRLER

HPGe detektörler p-i-n yapısında yarıiletkenlerden oluşurlar. Öz (Intrinsic) bölge radyasyona karşı hassastır. Ters besleme uygulandığında elektrik alan öz bölgeye doğru genişler. Gelen gama ışınlarının germanyum kristalinde oluşturduğu elektron-deşik çiftleri elektrik alanın etkisiyle p ve n elektrotlarına hareket ederek sinyal oluştururlar. Germanyumun bant aralığı enerjisi 0,67 eV'dur. Bu nedenle sızıntı akıma bağlı oluşan gürültü sinyalinin önlenmesi için HPGe detektörler sıvı azot sıcaklığında (77 K) çalıştırılır fakat oda sıcaklığında muhafaza edilebilir.

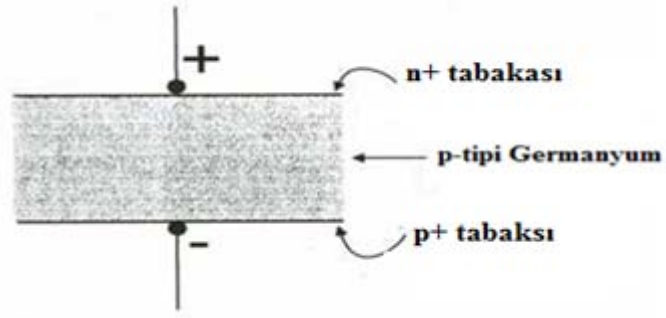
Yarıiletken malzemelerin elektron-deşik çiftleri detektörün içerisinde uygun bir sürenin içerisinde oluşabilmelidir. Ayrıca kristalde tuzaklar olmamalıdır.

Tuzaklar;

- Kristal örgüdeki safsızlıklara,
- Kristaldeki yapısal kusurlara bağlı olarak ara atomlara ve boşluklara,
- Ara atomların yarattığı radyasyon kusurlarına

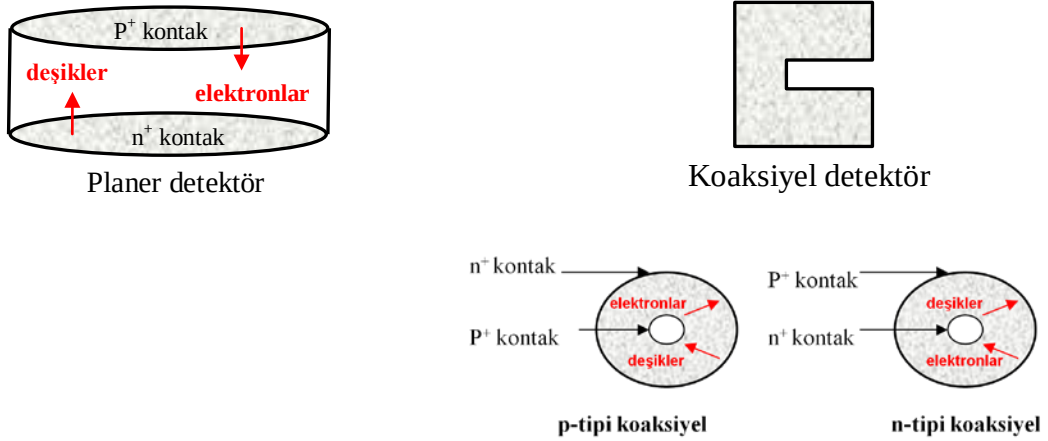
bağlıdır. Özet olarak ideal detektör malzemesi yüksek saflıkta ve mükemmel kristale yakın durumunda olmalıdır.

Germanyum silisyum ile karşılaştırıldığında daha yüksek atom numarasına sahip olduğu için daha yüksek enerjili gama ışınlarını detekte edebileceği için detektör materyali olarak daha uygundur ve daha çok kullanılmaktadır. Son yıllarda gelişen teknolojiyle birlikte detektör malzemesi olarak uygun olan yüksek saflıkta mükemmel kristal yapımı başarıldı. n^+ tabakası yüksek saflıkta p-tipi germanyuma eklendiği zaman detektöre ters besleme uygulanır ve tüketim bölgesi boyunca p-tipi germanyum maddesi vardır. Böyle detektörlere aşırı saflıkta veya sadece yüksek saflıkta p-tipi germanyum detektör ya da kısaltılmış şekilde yaygın kullanış ismi olan İngilizce yazılımının baş harfleri ile gösterilen HPGe p-tipi detektör denir.



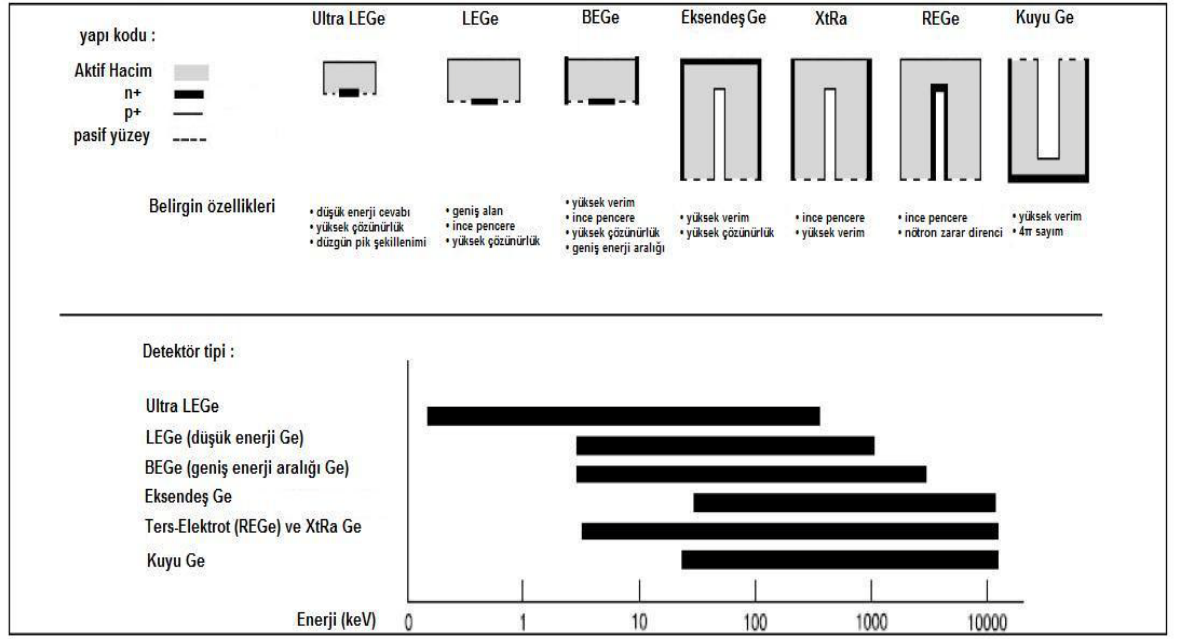
Şekil 5.1 Temel olarak Ge detektör yapısı (Glenn 1979, 1989)

HPGe detektörler düzlemsel (planer) ve koaksiyel olarak tasarımlanabilirler. Koaksiyel geometrinin avantajı gama spektrometresinde ihtiyaç duyulan geniş aktif hacmin sağlanmasıdır. Koaksiyel HPGe detektörler aynı zamanda kuyu tipi olarak da kullanılır. Kaynağın bu kuyu içine yerleştirilmesiyle kaynak neredeyse tamamen germanyum tarafından sarılmış olur ve deteksiyon etkinliği artar (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 HPGe detektör tasarımları (Solmaz 2007)

HPGe detektörler kullanım amaçlarına göre birçok farklı özel durumda üretilmektedir. Şekil 5.3'te enerji aralıklarına göre farklı tipte germanyum detektörler gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Enerji aralıklarına göre farklı tipte germanyum detektörler
(Canberra Industries 2006)

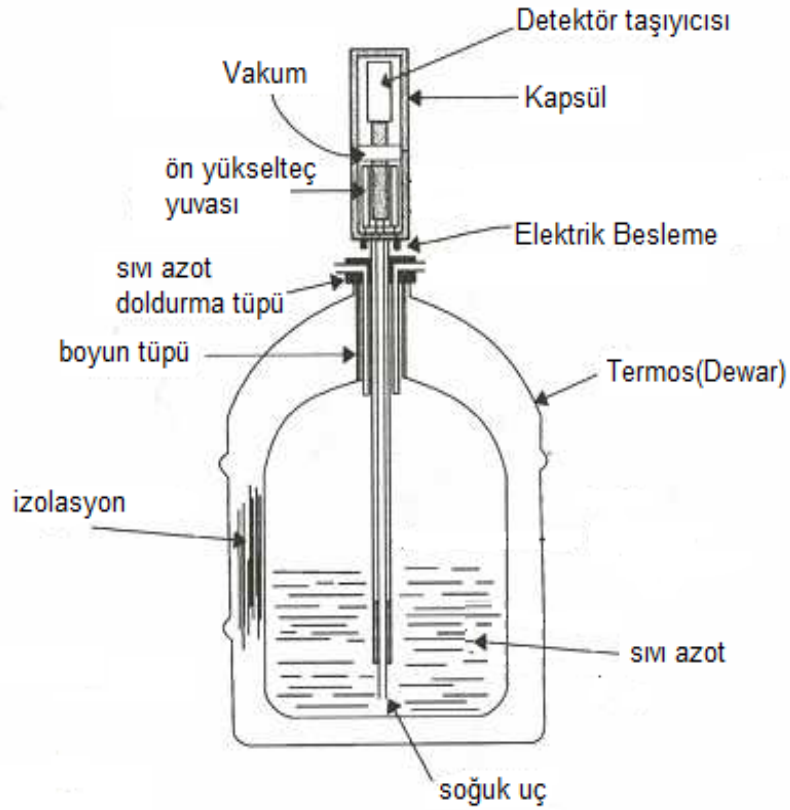
5.1 Detektörün Yapısı

HPGe detektörler içi boşaltılmış kaplar ile korunurlar (Genellikle alüminyum kullanılır). Detektör kristali termal iletkenliği çok iyi olan soğuk uca (coldfinger) bağlıdır. Metal ve soğuk ucun birleşimine kriyostat (cryostat: sabit düşük sıcaklık kabı) denir. Soğuk uç içi sıvı azot dolu, termos görevi yapan sıvı azotun depolandığı kap "dewar" boyunca uzanır. Sıvı azot içerisindeki kriyostat sayesinde kristal sabit düşük sıcaklıkta tutulur. Bu şekilde elektronik ölçümlerdeki tekrarlanabilirlik sağlanır, elektronik gürültü en az seviyeye indirgenir ve yüksek çözünürlük sağlanır. Kriyostatın yapımında birkaç önemli faktörü şu şekilde sıralayabiliriz.

- Detektör 77 K sıcaklığında korunmalıdır.
- Kriyostat mekanik titreşimlerden izole edilmiş olmalıdır.
- Detektör başlığı gama radyasyonu ile etkileşmeyecek şekilde yeterince ince olmalıdır ve vakumunun uygun bir şekilde ayarlanması gerekir.

- Eğer düşük doğal fon (background) ölçümleri yapılıyorsa kriyostat ona göre özel seçilmiş olmalıdır.
- Detektör temiz bir vakum altında çalışmalıdır bu şekilde yoğunlaşma engellenecektir ve sinyal alımı sırasında yüksek voltaj ile beslenmelidir.

Şekil 5.4'te bir germanyum detektör yapısı verilmiştir.



Şekil 5.4 Tipik bir germanyum detektör (Canberra Industries 2006)

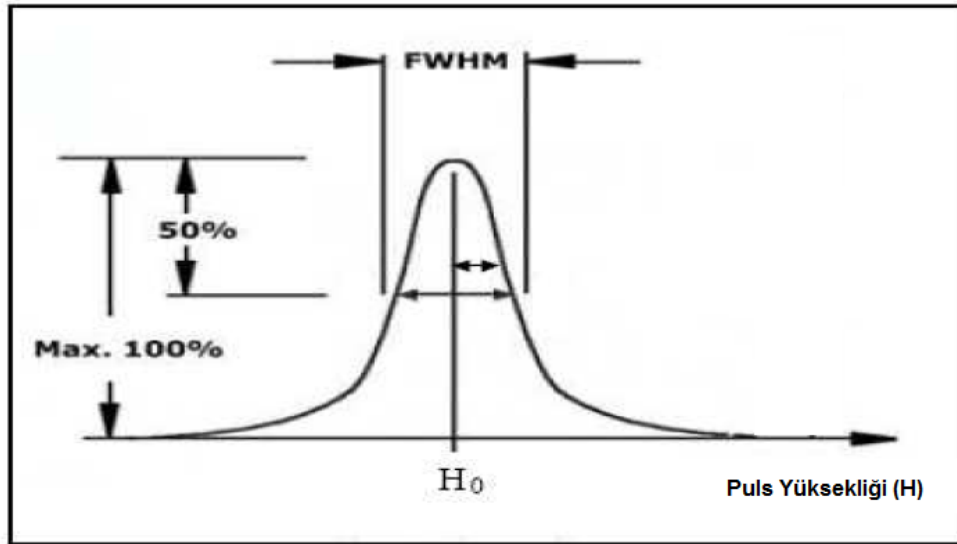
5.2 Detektör Şartları ve Karakteristiği

Çözünürlük, farklı enerjilerde fotonları ya da parçacıkları ayırabilme yeteneğinin ölçüsüdür. Spektrumda oluşan Tam enerji fotopiki, algılama işlemi esnasında istatistiksel etkilerden dolayı bir Gauss dağılımı olarak görülür. Şekil 5.5'te gösterildiği üzere HPGe detektörü yüksek enerji çözünürlüğü ile tanımlanır. Enerji çözme gücünün

pratik bir ölçüsü, yarı maksimumdaki tam genişlik olarak tanımlanan (FWHM), pikin genişliği ile belirlenir. Bir gama pikinin FWHM’u keV ile ifade edilir.

$$\text{Çözünürlük} = \frac{\text{FWHM}}{\text{Pik enerjisi}} \times 100\% \quad (5.1)$$

Daha yüksek çözünürlük demek spektrumdaki piklerin daha iyi ayırt edilebilmesi anlamına gelir demektir. FWHM enerjinin bir fonksiyonu olup çizelge 5.1’de belirli bir detektör için enerji ile nasıl değiştiği gösterilmiştir. Compton pik yüksekliği oranı başka bir spektral parametredir ki HPGe detektöründe NaI(Tl) e göre çok daha gelişmiştir. Bu değer genel olarak HPGe için 30-50 iken NaI(Tl) için tipik olarak 9 dur.



Şekil 5.5 Bir pikin FWHM’u (Evans 1955)

Çizelge 5.1 %30-50’lik detektör için tipik enerjiye karşılık FWHM değerleri (Evans 1955)

Enerji (keV)	100	600	1300
FWHM (keV)	1.3	1.8	2.1

5.2.1 Çalışma voltajı

- Germanyum detektörde sabit yüksek voltaj (1000-5000 DC) direkt olarak kristale uygulanır.
- Voltaj detektöre birlik sağlar ve hep aynı seviyede olmalıdır. Voltajda küçük değişimler olabilir fakat bu değişimler sabit voltaja normalize edilmiştir.
- Yüksek voltaj detektöre uygulandığında 50-100 Volt/s'lik küçük artışlarla verilir. Bu şekilde kristalin performansı korunur.

5.2.2 Zırhlama

- Detektör dış radyasyondan korunmalıdır Doğal fon etkisini azaltmak için detektör kurşun zırh ile çevrelenir.
- Zırhlama için seçilecek kurşuna dikkat edilmelidir. Eski kuşundan yapılmalıdır çünkü II. Dünya Savaşı'ndan sonra kurşun fabrikalarının büyük bir çoğunluğu Co60 izi taşımaktadır (Chehade 2007).
- Kaynaktan çıkan gama ışınları bu kurşunu uyararak karakteristik x-ışını çıkmasına neden olur. Spektrumunda zırhtan kaynaklanan bu x-ışınlarını engellemek için zırh içine kademeli bir kaplama yapılır. Zırhın iç kısmı önce kadmiyum (Cd) sonra bakır (Cu) ile kaplanmalıdır. Çünkü kolay işlenebilir ve ucuzdur. Bu şekilde gelen X-ışınları ve geri saçılan fotonlar en aza indirgenir.

5.2.3 Doğal fon (Background)

Belirli dönemlerde sık sık detektörün doğal fon sayımı en az 4 günlük sayımlarla yapılmalıdır. Bu şekilde çevredeki doğal radyoaktif çekirdeklerin etkisi, kozmik radyasyonun etkisi, çevredeki olası yapay radyoaktif çekirdeklerin etkisi ve zırhtan kaynaklanan X-ışınlarının etkisi kontrol altında tutulur.

5.2.4 Sıcaklık ve nem

Ortamin nem miktarı elektronik devresi ve kablolu bağlantısı çok olana germanyum detektör için çok önemli bir etkidir. Ortamdaki rutubet miktarı elektronik bağlantılarda bir iç direnç yaratacağı için pik şekillenimine büyük etkisi olacaktır. Sayım odasının nem miktarı kesinlikle kontrol altında tutulmalıdır.

Sıcaklığın iki ayrı etkisi bulunmaktadır;

- Birinci etki, detektörün kendisiyle ilişkilidir. Kristalin band genişliği mutlak sıcaklıkta korunmalıdır. Bunun için -196 °C’de sıvı azot ve kriyostat ile sağlanır. Kriyostat termal sızıntısının minimum olması gerekir bu da sabit oda sıcaklığında sağlanır.
- Sıcaklığın ikinci etkisi detektörün elektroniğine olan etkidir. Detektörün elektronik yapısı uygunlaştırılmış olsa da ölçüm odasındaki kararsız sıcaklık değişimleri, detektörün ön yükselteç, yükselteç ve dijital sinyal çeviricisinde kararsızlığa yol açacaktır.

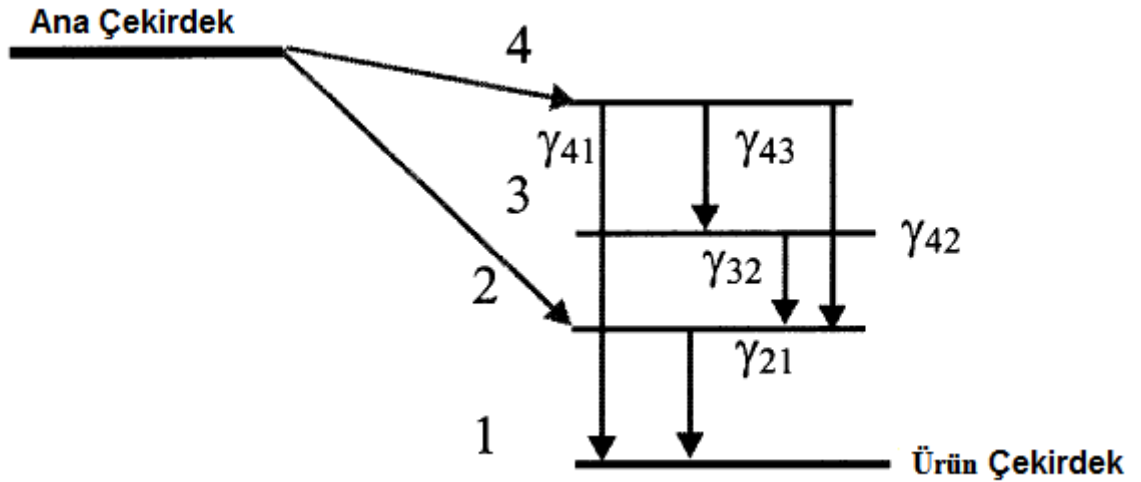
Ölçüm odasının sıcaklığı 21-27 °C civarında korunmalıdır.

6.GERÇEK ÇAKIŞMA (TRUE COINCIDENCE)

6.1 Gerçek Çakışma Kavramı

Çakışma etkisi çoklu gama salınımı yapan radyoaktif çekirdeklerin aktivitesinin hesabında oldukça önemli rol oynar. Radyoaktif çekirdek alfa, beta, pozitron, elektron yakalama gibi radyoaktif parçalanma sırasında uyarılmış seviyelerde bir süre kalıp çeşitli enerjilerde ışınları salarak kararlı hale geçer. Eğer bu salınımlar detektörün çözme zamanından daha kısa sürede gerçekleşiyor ise detektör aynı anda birden çok ışın detekte edecek ve spektrumda tek tam enerji fotopiki gibi gösterecektir.

Şekil 6.1’de bir ana çekirdek ve kararlı hale geçerken yaptığı gama salınımları gösterilmiştir.



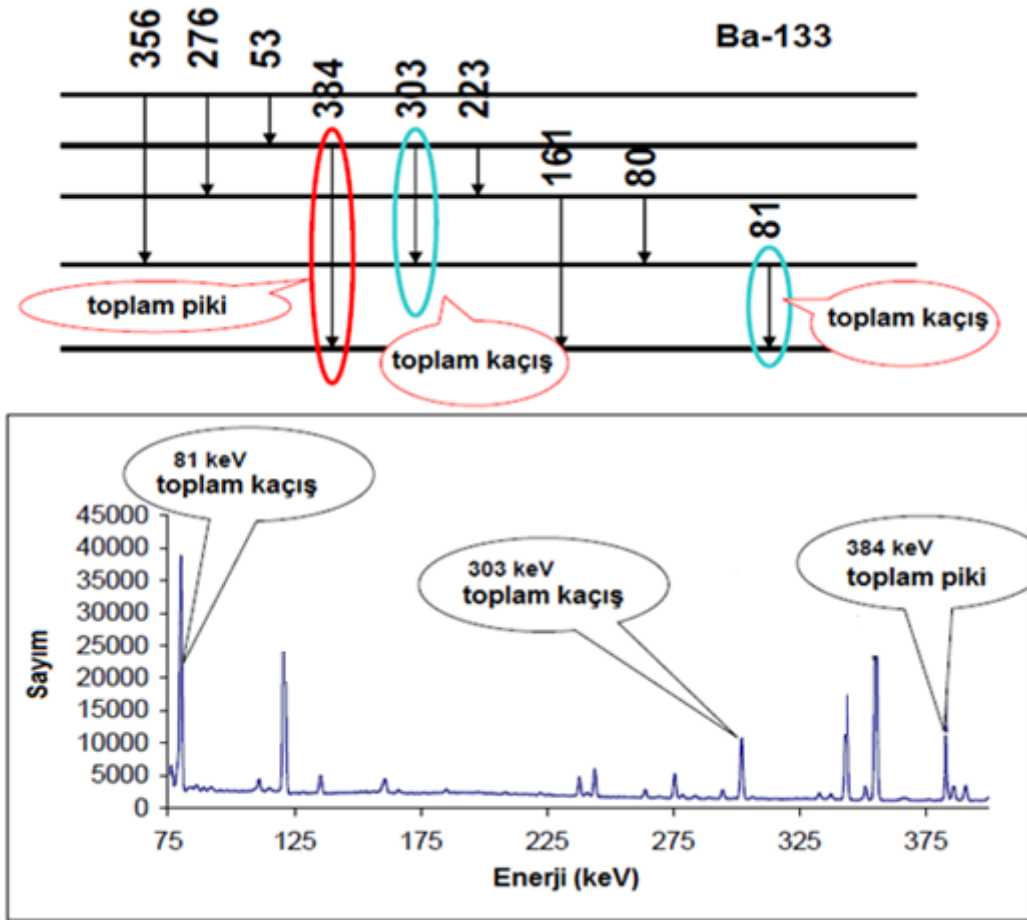
Şekil 6.1 Radyoaktif bir çekirdeğin parçalanması (Sudár 2002)

Eğer bu zaman yarıiletkenin çözme zamanından daha kısa ise bunları ayırt edemeyip bir enerjide toplayacaktır. Bu duruma gerçek çakışma denir ve detektörün karakteristiğine, ölçüm geometrisine, çekirdeğin karmaşık bozunum şemasına bağlı olarak değişir. Bu etki en çok yakın geometride ve yüksek verimli detektörlerde ortaya çıkar. Düşük enerji detektörlerinde ise buna ek olarak γ -X ışını gerçek çakışmalarda artacaktır.

Gerçek çakışma 3 çeşit etkiye sebep olur,

- Toplam kaçış “Summing-out”
- Toplam piki “ Summing-in”
- Sahte pik, spektrumda yeni bir kanalda pik oluşumu “Alias lines”

Şekil 6.2’de gerçek çakışma ile ilgili Ba133 için gerçek çakışma etkisi spektrumda bozunum şemasında gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Ba133’ün bozunumunda kaçak ve toplam pikleri (Chehade 2007)

6.1.1 Toplam kaçış “Summing-out”

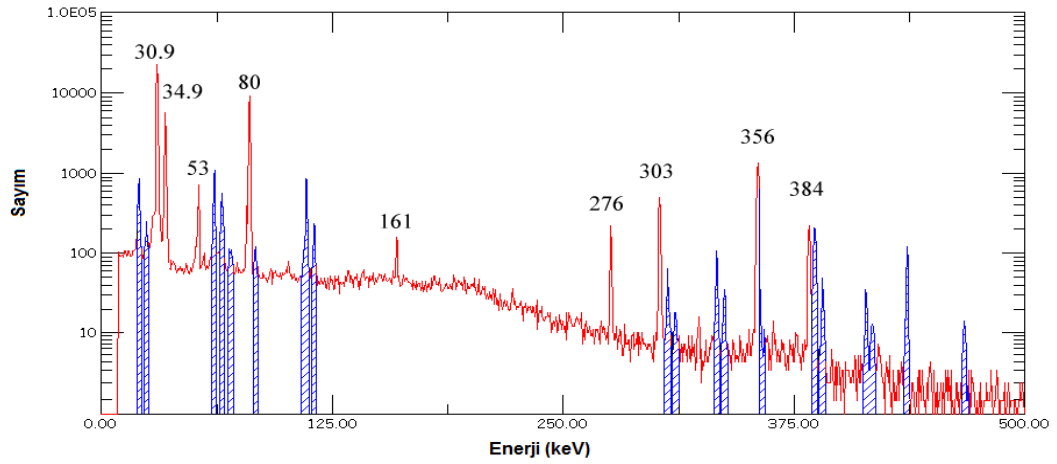
Bu etki, en önemli gerçek çakışma etkisidir. Çekirdeğin gerçek çakışma yapan enerjilerdeki gama piklerinde azalma şeklinde gözükür. Şekil 6.1'deki seviyeler arasındaki geçişlere baktığımız zaman γ_{41} hariç diğerleri için toplam kaçış hesaplamaları dikkate alınmalıdır.

6.1.2 Toplam piki “ Summing-in”

Radyoaktif çekirdeğin çakışan en az iki γ 'sının toplamı bir başka gamanın enerjisine eşitse diğer gamanın enerjisinin olduğu yerde pik şiddeti artacaktır. Şekil 6.1'de γ_{43} ve γ_{32} 'nin enerjisi toplam γ_{42} 'ye eşittir. γ_{42} 'nin sayımı artacaktır. Çok yüksek aktiviteli tek gama yayınlayan radyoaktif çekirdekte de bazen toplam piki gözlenir.

6.1.3 Sahte pikler: spektrumda yeni bir kanalda pik oluşumu “Alias lines”

Toplam pik etkisi başka bir gamanın enerjisine denk gelip o sayımı arttırmanın dışında toplamın olduğu yerde yeni bir pik oluşturabilir. $E = E(\gamma_{43} + \gamma_{21})$ şekil 6.1'de görüldüğü gibi böyle bir geçişi olmamasına rağmen spektrumda E enerjisine ait bir pik gözlemlenir. Benzer şekilde aynı etkiler gama ile X ışınları arasında da olabilir ve spektrumda beklenmedik bir pik şekillenmesi gözükabilir. Bir başka etki daha spektrumda yeni bir pik yaratabilir; düşük enerjide kaçak X-ışınları ile $\beta^+ 511$ keV'de yok olma fotonu çakışabilir ve aynı etkiyi gösterir. Şekil 6.2'de Ba133'e ait spektrumdaki kaçak pikler gösterilmiştir.



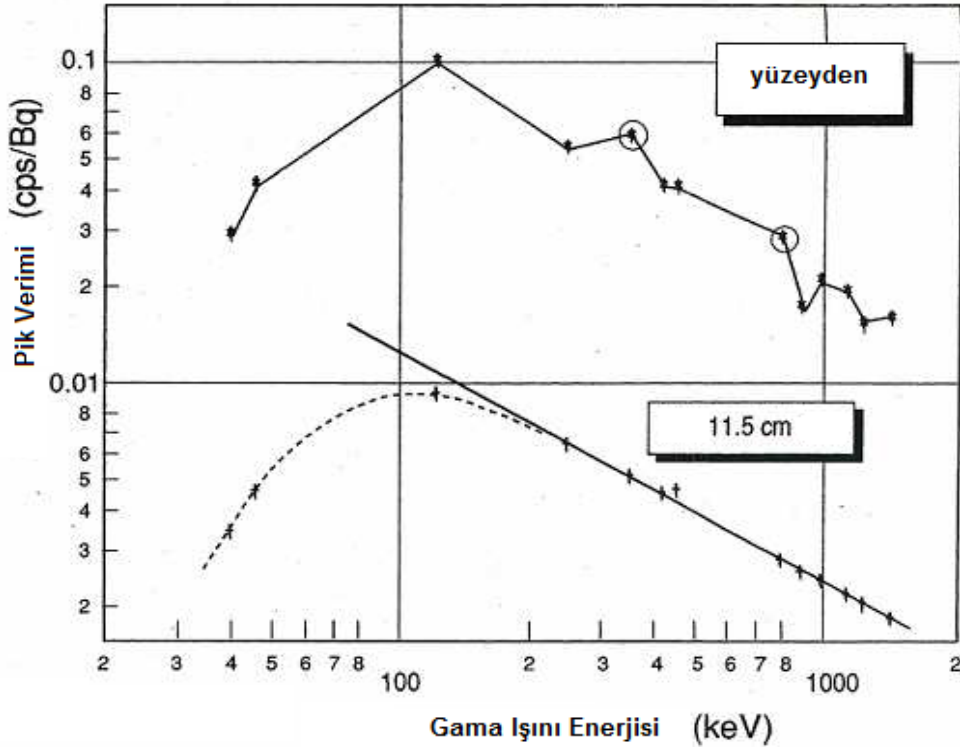
Şekil 6.2 Ba133 spektrumundaki oluşmuş sahte pikler (Sudár 2002)

6.2 Gerçek Çakışma ve Verim

Gerçek çakışma durumları beklenmedik bir şekilde analiz edilecek radyoaktif çekirdeğin değerlendirilmesinde yanlış sonuçlara neden olur. Bu yüzden bu etkilerin her zaman farkında olup spektrum değerlendirmede dikkate alınması gerekir.

Radyoaktif kaynağın aktivite hesabı için tam enerji fotopik verim kalibrasyonu yapılır ve eğrisi çizilir. Demek oluyor ki ara değer kestirimi (interpolasyon) yöntemiyle her gama enerjisi için verim değeri elde edilebilir. Ölçülen pik verim eğrisi kristale aynı anda detekte ettiği iki veya daha çok gama ışınları için düzeltilmelidir. Aynı anda detekte edilen gama ışınları yükseltecin çıkış pulsunda ayrı ayrı tanımlı olmayacaktır. Çıkış sinyali çakışan pulsların genliğince toplanarak gözükecektir. Bu durum yapışık geometri ölçümlerinde yanlış aktivite hesabına neden olacaktır. Aslında bu problem çokta yeni bir problem değildir ve bazı durumlarda ihmal edilebilecek kadar az olabilir. Fakat bazı durumlarda çok önemlidir ve mutlaka düzeltme yapılmalıdır. %45'lik HPGe detektöründen elde edilen verim eğrisi ve çakışmanın yarattığı şekil 6.3'de gösterilmiştir. Burada aktivitesi yumuşatılmış 7700 cps (saniyedeki sayım oranı) olan Eu152 kaynağı kullanılarak detektör yüzeyinde yapışık halde ve 115 mm uzaktan ölçümler yapılarak verim eğrileri elde edilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere 115 mm'den yapılan ölçümlerdeki verim çok düzgündür fakat detektör yüzeyinden yapılan

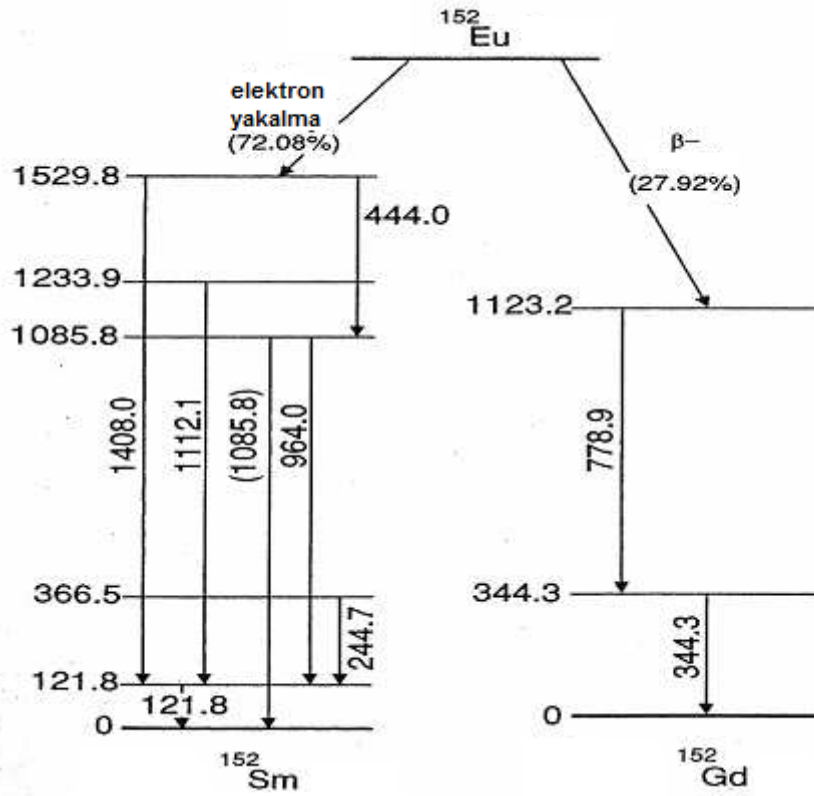
ölçümler sonucu oluşan verim eğrisi tatmin edici değildir. Detektör yüzeyinden elde edilen sonuçlara göre yapılan aktivite hesapları bize doğru sonuçları vermeyecektir.



Şekil 6.3 115 mm ve detektör yüzeyinden alınan ölçümlere göre çizilen verim eğrileri (Gilmore 2008).

6.3 Çakışmaların Kaynağı

Şekil 6.4'de Eu152 için basitleştirilmiş bir bozunum şeması gösterilmiştir. İki çeşit parçalanma olasılığı görülmektedir. Eu152 %27.92 olasılıkla parçalanması yapıp Gd152 olabilir ya da %72.08 olasılıkla elektron yakalayıp Sm152'ye dönüşecektir. Her iki bozunum durumunda da kız çekirdekler bir takım gama ışınları salarak kararlı olmaya çalışacaktır.

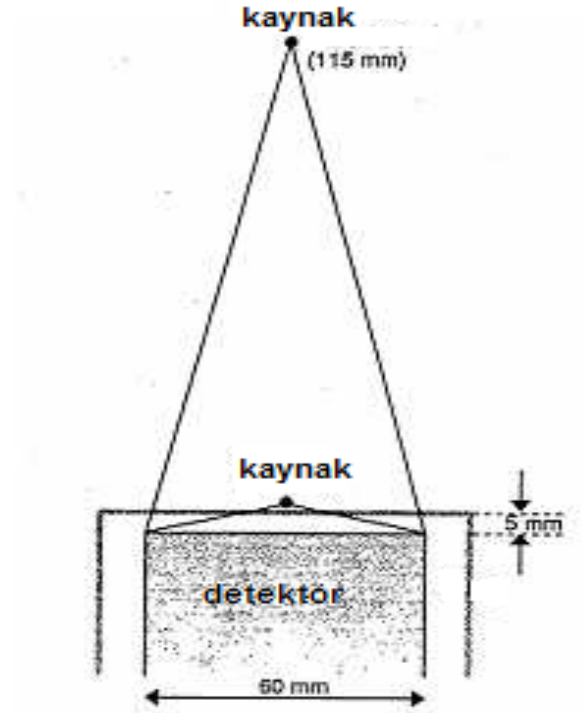


Şekil 6.4 Eu-152'nin basitçe bozunum şeması (Gilmore 2008)

Seviyeleri incelediğimiz zaman çok kısa yaşam seviyeleri bulunmaktadır ve çoğu detektörün çözümleme zamanından daha da kısadrlar. Detektör her parçalanma sırasında Eu152 belirli olasılıklar çerçevesinde gama ışınları eş zamanlı olarak detekte edecektir. Bu durumda kaydedilen puls gamaların toplam enerji değerlerini temsil etmektedir. Diğer taraftan normalde pulsun gözlenmesi gereken pikte bir azalma olacaktır. İşte bu olguya gerçek çakışma (true coincidence) denir.

6.4 Gerçek Çakışma ve Geometri

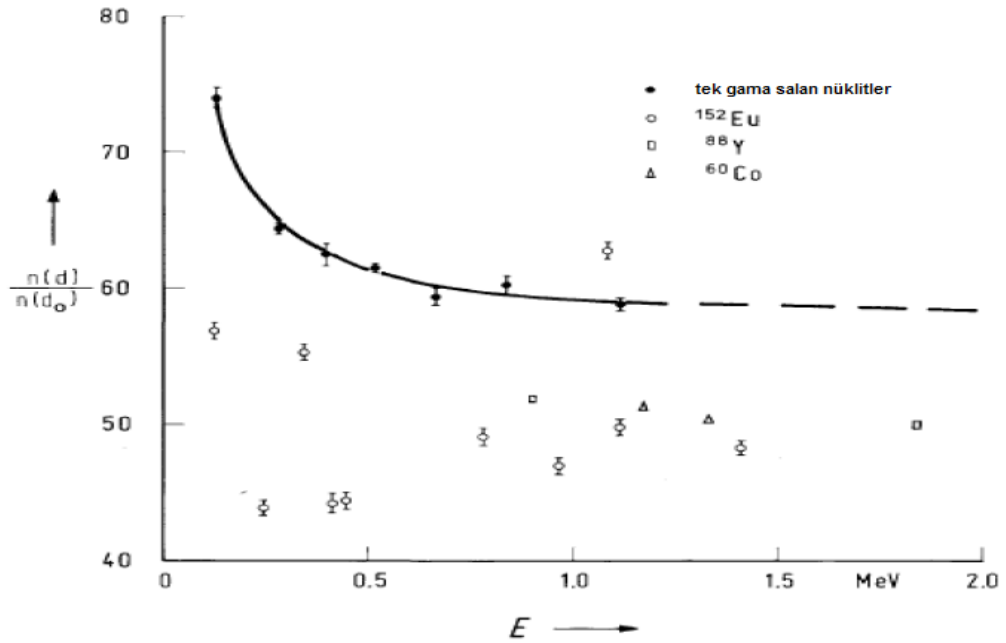
Çakışmanın olasılığı sayım geometrisiyle ve kaynak detektör arasındaki mesafe ile şekil 6.5'de gösterildiği gibi doğrudan ilişkilidir. Detektör yüzeyine yerleştirilmiş kaynak için olasılık olarak gama ışınlarının etkileşimi daha çok olacaktır ve çakışmaların sayımlarını da arttıracaktır. Detektör kaynak arasındaki mesafe arttıkça olasılık olarak gerçek çakışmaların azaldığı gözlenir ve belirli bir mesafenin dışında çakışmanın etkisi artık önemsizleşir.



Şekil 6.5 Detektör kaynak geometrisi (Gilmore 2008)

6.5 Düzeltmenin Deneysel Olarak Gerekliliği

TCC hesaplamanın son yıllarda geliştirilen yöntemlerle birlikte birçok yöntemi vardır. Deneysel olarak hesaplanabilmesi için gerçek çakışma yapan ve yapmayan kaynaklara ihtiyaç vardır. Bunun için kaynaktan detektörden belirli bir uzaklıkta (d_0) ve yakın geometride ölçümler alınır. Pik sayım oranları $n(d)$ ve $n(d_0)$ çakışma yapmayan fotonlar için düzgün bir şekilde enerjinin fonksiyonu olarak hesaplanır. Bu fonksiyon dışında kalan durumlar için çakışma miktarları belirlenir. Şekil 6.6'da tipik bir çakışma düzeltmesi verilmiştir.



Şekil 6.6 Kısa d mesafesi ve uzun d_0 mesafesinde nokta kaynak geometrisinde alınan ölçümlere göre Tam enerji fotopiklerinin sayım oranları oranı. Çizgi elle çizilmiştir (Glenn 1979, 1989)

6.6 Çevresel Öneklerde Gerçek Çakışma

Özellikle 1986'daki Çernobil kazasından sonra gama spektroskopisi laboratuvarlarında Cs137 ve Cs134 ölçümleri artmıştır. Örneğin Cs134'ün karışık bir bozunum şeması olup ölçümlerde gerçek çakışma kaçınılmazdır. Ölçülen örnekler çevresel örnekler olduğu için aktiviteleri çok düşüktür ve mecburen yakın geometride sayılması gerekir. Bu durumda gerçek çakışma etkisi açıkça ortaya çıkacaktır. Çakışma önemsenmeyerek 1989 yılında NPL (National Physics Laboratory: Ulusal Fizik Laboratuvarı) çevresel miktarda Cs134 içeren bir örnek için aktivite hesaplanmış ve %68 güvenilirlikle ölçtüklerini düşündükleri ölçümlerde %64' lık bir güvenilirlik çıkmıştır. (Jerome 1991, Jerome vd. 1993).

Daha doğru ve güvenilir aktivite hesaplamaları gerçek çakışmalar hesaba katılarak NPL'de yapılmaya başlamıştır ve bugün doğru aktivite ölçümü yapan bütün laboratuvarlarda bu etki düzeltilir.

6.7 Yakın Geometri Veriminin Yapılması

Yakın geometride verim eğrisi elde edilecek ise kesinlikle gerçek çakışma olmayan radyoaktif çekirdekler seçilmelidir. Çizelge 6.1’de gerçek çakışması olmayan ve tek gamalı radyoaktif çekirdeklerin bazıları verilmiştir. Bu tabloya bakarsak Cd109 ve Cr51’e dikkat edilmelidir. Özellikle n-tipi detektörlerde bulunan ince pencereden kaynaklanan X-ışınları bulunmaktadır. Bu X-ışınlarının gama ışınları ile çakışma olasılıkları vardır ve buna dikkat edilmelidir. Çizelge 6.1’de bazılarında ise örneğin Sn113 ve I131’de gama-Xışını gerçek çakışması olmasına rağmen genellikle önemsenmeyecek kadar azdır.

Çizelge 6.1 Yakın geometri verim kalibrasyonu için uygun radyoaktif çekirdeklerin bazıları (Firestone and Shirley 2008)

Nüklit	Gama Işını Enerjisi (keV)	Nüklit Tipi ^a
⁷ Be	477.6	S
⁴⁰ K	1460.8	S
⁴² K	1524.6	M
⁵¹ Cr	320.08	SX
⁵⁴ Mn	834.84	SX
⁵⁷ Co	122.06, 136.47	MX
⁶⁴ Cu	1345.8	SX
⁶⁵ Zn	1115.5	SX
⁹⁵ Zr	724.2, 756.7	M
⁹⁵ Nb	765.81	S
¹⁰³ Ru	497.1	S
¹⁰⁹ Cd	88.03	SX
¹¹³ Sn	391.70	MX
¹³¹ I	364.5, 637.0	M
¹³⁷ Cs	661.66	S
¹³⁹ Ce	165.86	S
¹⁴¹ Ce	145.4	S
¹⁴⁴ Ce	133.5	M
¹⁹⁸ Au	411.80	M
²⁰³ Hg	279.20	S
²¹⁰ Pb	46.5	S
²⁴¹ Am	59.54	M

S: Tek gama salınımı yapan nüklitler

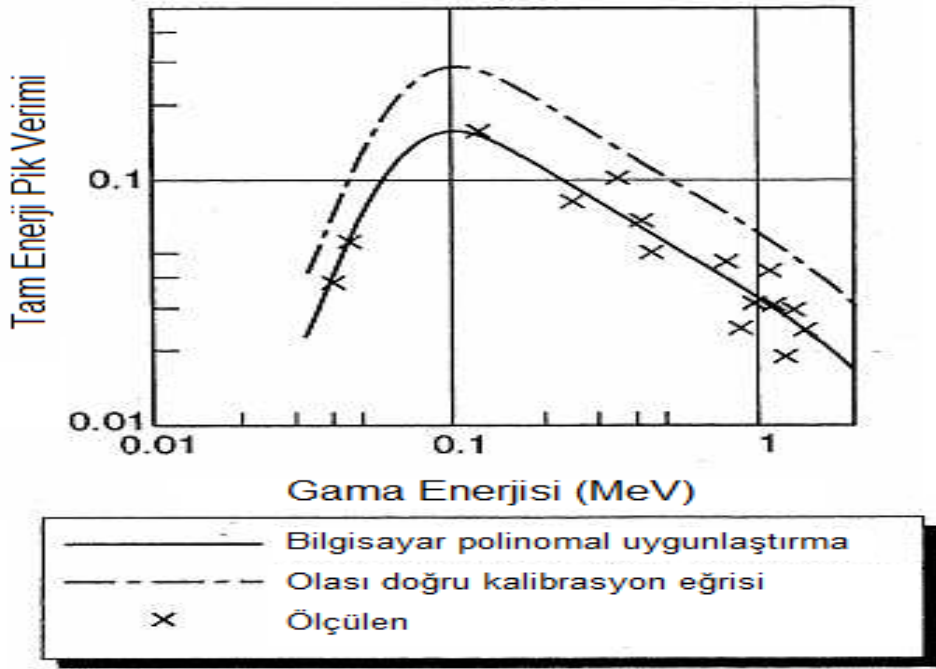
X: Gama-X ışını gerçek çakışması olan nüklitler

M: Çok az miktarda gerçek çakışması olan nüklitler

Bu radyoaktif çekirdekler pratik olarak kullanışlıdır fakat bazılarını verim kalibrasyonu yapılacak ölçüm geometrisi şeklinde hazırlamak çok zordur veya bazılarının yarı ömrü çok düşüktür rutin kalibrasyon işleminde kullanılamazlar.

Spektrum analizinde iyi bir yazılım kullanılması gerekir çünkü her zaman güzel kalibrasyon durumlarıyla karşılaşmayabiliriz. Bu durumda noktaların çok iyi bir şekilde değerlendirilip uygunlaştırılması (fit edilmesi) ve doğru kalibrasyon eğrisini elde edilmesi gerekir.

Verim kalibrasyonu analizi standart referans malzemeleriyle yapılır. Analiz için eğer iyi bir spektrum analiz programına sahipseniz bu programa son yıllarda yapılan çalışmalarla güncellenmiş çekirdekler için gerekli katsayılar girilmiştir fakat programınız yoksa literatür tarafından desteklenen veri tabanlarından (<http://laraweb.free.fr/>, <http://atom.kaeri.re.kr/ton/>, <http://www.nndc.bnl.gov/>, <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2>) çekirdeklerle ilgili güncel bilgileri kullanabilir. Bu şekilde doğru ve kolay analiz yapılır. Şekil 6.7’de verim kalibrasyonu için çizilen bir eğri örneği bulunmaktadır.



Şekil 6.7 Çok iyi bir şekilde uygunlaştırılmış kalibrasyon eğrisi (Gilmore 2008)

Verimden kaynaklanan hataların en aza inmesinden dolayı radyoaktivite analizinde en doğru sonucu standartla karşılaştırma yöntemi vermektedir (Gilmore 2008). Bu yöntemle göre, numuneleri ölçeceğimiz geometri ile aynı geometride daha önceden

aktivitesi bilinen standart referans malzemeleri ölçülür. Daha sonra aynı geometride hazırlanan numuneler ölçülür. Standardın aktivitesi bilindiği için sayım hızları oranından numunelerin aktivitesi kolaylıkla güvenli bir şekilde hesaplanabilir.

Bu yöntem için en büyük problemlerden biri standart referans kaynağı her çekirdek için istenilen geometride yoktur ya da hazırlamak çok zor ve pahalıdır. Bu durumda gerçek çakışma faktörleri ve diğer faktörlerin hesabı ile düzeltilmiş doğru kalibrasyon eğrisine göre hesaplamalar yapılmalıdır.

7. “TRUECOINC” PROGRAMINDA GERÇEK ÇAKIŞMA DÜZELTMESİ

Gerçek çakışma faktörlerinin hesaplanması için KAYZERO, GESPECOR, LabSOCS ve Ortec Gamma Vision gibi iyi bilinen birçok program ve algoritma bulunmaktadır. Fakat bu programlar ticari olup oldukça maliyeti yüksek ve hesapları zaman alan programlardır. Tezde kullanmış olduğumuz TRUECOINC programı Macaristan’ın Debrecen kentindeki Kossuth Üniversitesi Fizik Bölümü’nden Dr. S.SUDÁR tarafından gama spektrometresinde gerçek çakışma faktörlerini hesaplamak üzere geliştirilmiştir. Program ücretsiz olarak elde edilebilir. IAEA (Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu) tarafından desteklenmektedir.

Programı kullanmak zor değildir birtakım hazırlık gerektirir. İlgilenilecek çekirdeğin nükleer yapısının çok iyi bilinmesi gerekir. Çekirdekler hakkında tüm bilgi TOI (Table of Isotopes) ya da Uluslararası nükleer veri merkezi veri tabanından (<http://www.nndc.bnl.gov/>) güncel olarak elde edilebilir. Programda hesap için bu bilgilerden başka, tam enerji fotopik verimi ve T/P oranları gibi bazı hesapların önceden yapılıp verim eğrilerinin fonksiyonlarının hesaplanması gerekir. İstenen bilgiler ölçüm geometrisi için doğru bir şekilde hesaplanıp programa girildikten sonra program yüksek doğrulukla hesaplama yapabilmektedir.

7.1 Gerçek Çakışmanın Hesaplanması

Gerçek çakışma etkisinin hesaplanması için birçok matematiksel, deneysel yaklaşımlar geliştirilmiştir ve geliştirilmeye devam etmektedir. Etkinin ölçülen şiddetteki hesabı birkaç gama salınımı yapan durumlar için göreceli olarak hesaplanmıştır (Mc Callum 1975, Debertin vd. 1979). Debertin ve Schötzeng (Debertin vd.1979) bu problemi hacimsel örnekler için araştırmışlardır. Araştırmalarının detaylı hesabı Mc Callum ve Coote nin hesap yöntemini (Mc Callum 1975) ve Andreev ve arkadaşlarının hesap yöntemini (Andreev vd. 1972, 1973) temel alınarak yapılmıştır. Bu yöntemlerde toplam verim çok önemli bir rol oynar.

Dr. S. Sudár'ın programda kullandığı yaklaşım tümleşik yöntemi diye bilinen bir yaklaşımdır. Bu yöntem kaskat seviyelerin (cascades) saf gama salınımlarından yararlanarak hesaplama yapmaktadır (Daroczy ve Raics 1982).

γ_0 enerjisindeki I_{γ_0} ölçülen sayım oranı;

$$I_{\gamma_0} = R X_{\gamma_0} \varepsilon_{\gamma_0}^p K_{tc} K_{other} \quad (7.1)$$

R: Ana çekirdek parçalanma oranı

X_{γ_0} : γ_0 enerjisindeki yayılım hızı

$\varepsilon_{\gamma_0}^p$: γ_0 enerjisindeki Tam enerji fotopik verimi

K_{tc} : Gerçek çakışma düzeltmesi

K_{other} : Diğer düzeltme faktörleri (öz soğurma, zaman düzeltmesi,...)

Gerçek çakışma faktörü toplam kaçış (Summing-out) K_{tcl} , toplam piki (Summing-in) K_{tcg} çarpımı şeklinde tanımlanır.

$$K_{tc} = K_{tcl} \cdot K_{tcg} \quad (7.2)$$

8. UYGULAMA VE DENEYLER

8.1 Deneysel İşlemler

Tezdeki deneysel işlemler Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü Tarihlendirme Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan ORTEC marka HPGe detektöründe yapılmıştır. Kullanılan detektörün özellikleri çizelge 8.1'de verilmiştir.

Çizelge 8.1 Deneysel işlemlerde kullanılan HPGe detektörün özellikleri

Görelî verim	Çap / Uzunluk	1.33MeV'deki çözünürlük (FWHM)	122KeV'deki çözünürlük (FWHM)	Geometri
%33	58.7/52mm	1.65keV	664eV	Eş eksenli

Şekil 8.1'de deneyde kullanılan ölçüm geometrileri laboratuvarında rutin radyoaktivite analizinde kullanılan hacimsel geometri gösterilmektedir. Ölçüm geometrileri çizelge 8.2'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 8.2 Laboratuvarında radyoaktivite analizlerinde kullanılan kapların ölçüleri

Geometrik şekil	Çap (cm)	Yükseklik (cm)
Silindirik	5.6	4.9



Şekil 8.1 Deneyde kullanılan hacimsel geometri

Detektörün zırhı 0.5cm kalınlığında demir silindir kalıba dökülmüş 6cm kalınlığında kurşun, en içe sarılmış 1cm kalay ve 1.5cm bakırdan oluşmaktadır.

8.2 Yöntembilim

Tezde gerçek çakışma katsayılarının hesabı için sırasıyla şu hesaplar yapılmıştır:

- 1) TTP (Toplam/Pik) kalibrasyonu
- 2) Tam enerji fotopik verimi kalibrasyonu
- 3) Gerçek çakışma faktörlerinin hesaplanması

8.2.1 TTP (Toplam/Pik) kalibrasyonu

Hesaplama kullandığımız Dr.Sudár'ın algoritmasına göre gerçek çakışmaların hesabında toplam verimin pik verimine oranlarının hesaplanması gerekir. Hesaplanan TTP değerlerine göre enerjinin fonksiyonu olarak verim eğrisi çizilmelidir.

Oranları hesaplanabilmesi için tek gama salınımı yapan veya gerçek çakışma yapmayan radyoaktif çekirdeklere ihtiyaç vardır. Bu tür radyoaktif çekirdekler için oranlar hesaplanır ve enerjiye bağlı fonksiyon çizilerek diğer radyoaktif çekirdekler için oranlar interpolasyon (ara değer kestirimi) yöntemi ile hesaplanır. Deneyde gerçek çakışma yapmayan radyoaktif çekirdekler olarak ^{241}Am (59.5 keV), ^{109}Cd (88.0 keV), ^{57}Co (122.1 keV), ^{137}Cs (661.6 keV), ^{54}Mn (834.8 keV), ^{65}Zn (1115.5 keV) nokta kaynakları kullanılmıştır. Kaynakların aktiviteleri ve referans tarihleri çizelge 8.3'de verilmiştir.

Çizelge 8.3 TTP kalibrasyonunda kullanılan radyoaktif çekirdekler (yarıömür değerleri <http://laraweb.free.fr/> veri tabanından alınmıştır.)

Radyoaktif Çekirdek	Enerjisi (keV)	Yarı Ömür ($t_{1/2}$)	Aktivitesi	Referans Tarihi
^{241}Am	59.5	432.6 ± 0.6 yıl	381,6 kBq	1.5.1989
^{109}Cd	88.0	461.4 ± 0.12 gün	1.0 μCi	01.07.2009
^{57}Co	122.1	271.80 ± 0.05 gün	1.0 μCi	01.07.2009
^{137}Cs	661.6	30.05 ± 0.08 yıl	1.0 μCi	01.07.2009
^{54}Mn	834.8	312.13 ± 0.03 gün	1.0 μCi	01.07.2009
^{65}Zn	1115.5	244.01 ± 0.09 gün	1.0 μCi	01.07.2009

Her çekirdek için en az 3 kez ölçümler tekrar edilerek ölçüm kabı yüksekliğinden 600 s ölçümler alınmıştır. Oluşan spektrumlardan doğal fon kanal kanal;

$$\text{Net Spektrum} = \text{Spektrum} - (t_s/t_b) * \text{doğalfon} \quad (8.1)$$

şeklinde çıkartılmıştır. Burada t_s ve t_b sırasıyla gözlenen spektrumun ve doğal fonun ölçüm süreleridir.

Bütün ölçümlerde 50. kanaldan daha alttaki spektrum ölçülmemiştir ve hesaplamalarda γ -x ışını çakışmaları önemsenmemiştir. Bu durumda toplam verimi hesaplayabilmek için 50. Kanaldan aşağıdaki spektrumu yaklaşık olarak hesaplamak gerekir.

T/P verim kalibrasyonu için 3 çeşit yaklaşıklık yöntemi kullanılmıştır.

- Venkataraman'ın yaklaşımı
- Genie 2000 yaklaşımı
- Yamuk yaklaşımı

8.2.1.1 Venkataraman yaklaşımı

Bu yöntem Venkataraman ve arkadaşları tarafından spektrumdaki toplam sayımı elde edebilmek amacıyla geliştirtmiştir (Venkataraman vd. 2005). Yöntemde ilgili çekirdek için ölçülen spektrumun en yüksek x-ışınına bağlı olarak bir ETZ (extrapolation to zero) kesim kanalı belirlenir. Belirlenen kanalın sağından ve solundan 4 kanalın toplam sayımı hesaplanır ve ortalaması alınarak ETZ'deki ortalama sayım bulunur. Bu ortalama ETZ'nin kanal numarası ile çarpılarak ETZ'ye kadar olan sayımların toplamı yaklaşık olarak elde edilmiş olur. Son olarak spektrumun tüm sayımı için ETZ'den Tam enerji fotopikinin bitiş kısmına kadar olan toplam sayım ETZ'ye kadar olan sayımla toplanır. Bu şekilde toplam elde edilmiş olur.

$$Total = \sum_{i=ETZ}^R c_i + AvgC_{ETZ} \cdot ETZ \quad (8.2)$$

R: Tam enerji fotopikinin sağındaki bitiş noktasındaki kanal numarası

c_i : i. kanaldaki sayım

ETZ: kesim kanalı

$AvgC_{ETZ}$: ETZ kanalındaki ortalama sayım

İlgili radyoaktif çekirdeğin spektrumundan belirlenen ETZ değerleri Çizelge 8.4'de verilmiştir.

Çizelge 8.4 ETZ değerleri

Radyoaktif Çekirdek	Enerjisi (keV)	ETZ kanal	ETZ (keV)
²⁴¹ Am	59.5	81	32.3
¹⁰⁹ Cd	88.0	83	33.3
⁵⁷ Co	122.1	67	27.2
¹³⁷ Cs	661.6	104	41.7
⁵⁴ Mn	834.8	67	27
⁶⁵ Zn	1115.5	69	27.8

Tam enerji fotopiki ise elimizdeki yazılımın hesap metoduna göre elde edilir ve T/P oranları hesaplanır.

8.2.1.2 Genie-2000 yaklaşımı

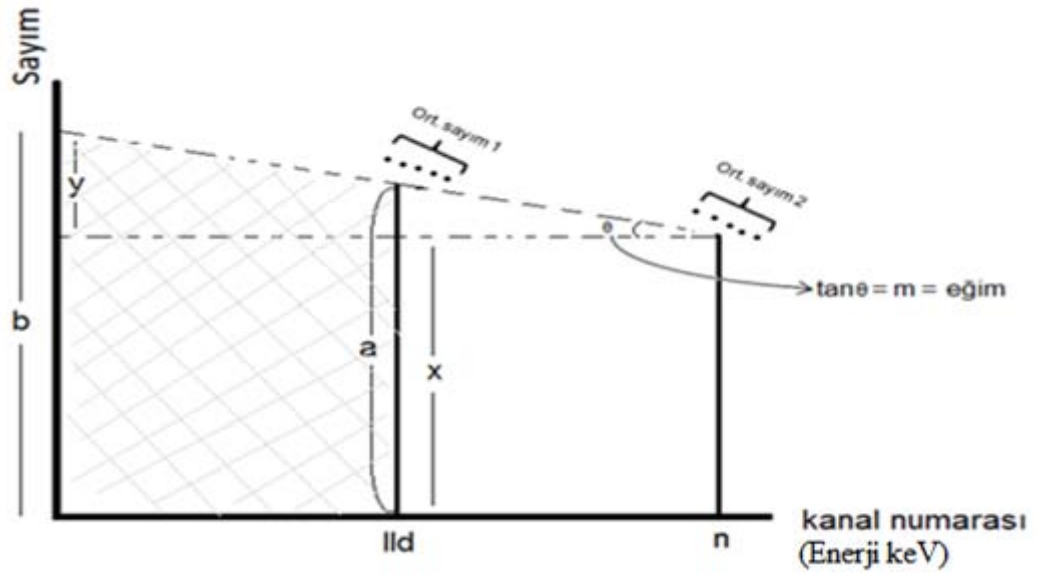
Bu yöntemde de Venkateraman'nın yöntemine benzer bir yöntemle spektrum hesaplanır. Fakat burada seçilen kesim kanalının sağında ve solundaki sayımların ortalamasına göre alınacak ortalama sayım kesim kanalından gerisi için aynı sayılarak hesaplanır (Customization Tools Manual Genie-2000 2004). Genie-2000 algoritmasına göre seçilen kesim kanalı hesap yapılacak bütün radyoaktif çekirdeklerin spektrumları için sabit alınır. Hesaplamalar kesim kanalı olarak 75. kanal seçilerek yapılmıştır.

Tam enerji fotopiki ise Genie-2000 programının kendi hesaplama metoduna göre hesaplanır ve T/P oranları bulunur.

8.2.1.3 Yamuk yaklaşımı

Bu yöntem diğer iki yöntemden farklı olarak toplam sayımın elde edilmesi için spektrumun düşük enerji bölgesine gittikçe sayımların sabitleşmeden daha çok bir artış olması (detektörün Bremsstrahlung ışımlarına verdiği cevap) temel alınarak geliştirilmiştir.

Yöntemde spektrumun kesilen bölgesi bir yamuğa benzetilir (taralı alan) ve bu yamuk için alan hesaplanarak spektrumun geri kalan sayımına eklenerek spektrumun toplam sayım bulunur. Ölçülen spektrumun başlangıcından (l_{ld}) itibaren birkaç kanalın sayım ortalaması alınarak sanki yamuğun bir kenarı gibi düşünülür. Diğer kenarı ise spektrumun çıkışının başladığı yerdeki birkaç kanalın ortalaması olarak alınır. Tam enerji fotopiki ise kullanılan yazılıma uygun bir şekilde hesaplanarak T/P oranı hesabı yapılır. Şekil 8.2'de yaklaşıklığın nasıl yapıldığı gösterilmektedir.



Şekil 8.2 Yamuk yönteminde spektrumun değerlendirilmesi

lld: Ölçülen spektrumun başlangıcındaki kanal sayısıdır ve bütün ölçümlerde 50 olarak alınmıştır.

$$x = \text{Ort. sayım} \quad 2 \quad (8.3)$$

$$m = \tan \theta = \frac{(\text{Ort. sayım } 1) - (\text{Ort sayım } 2)}{n - lld} \quad (8.4)$$

$$a = x + m \cdot (n - lld) \quad (8.5)$$

$$b = x + m \cdot n \quad (8.6)$$

$$\text{Total} = \sum_{i=lld}^R c_i + \frac{(a + b) \cdot lld}{2} \quad (8.7)$$

R: Tam enerji fotopikinin sonundaki kanal sayısı

Yöntemlere göre bulunan T/P oranları üstel bir fonksiyona uygunlaştırılır. Bu şekilde bütün radyoaktif çekirdekler için T/P oranları elde edilir. Uygunlaştırılan fonksiyon;

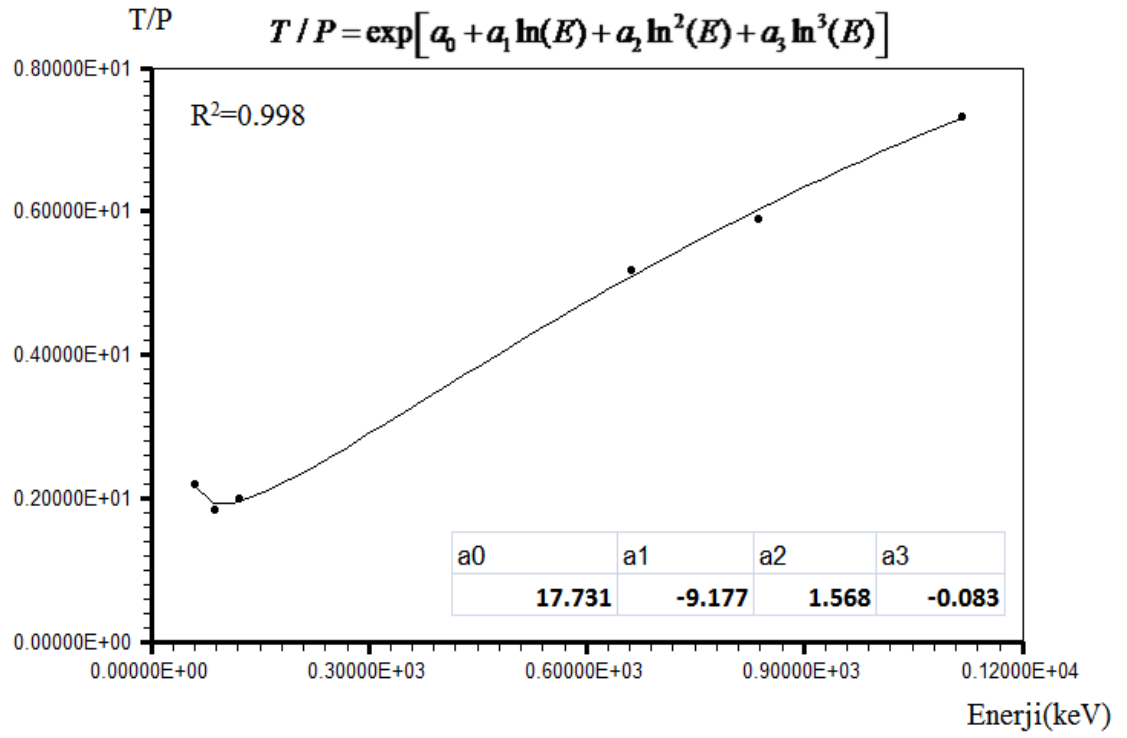
$$T / P = \exp \left[a_0 + a_1 \ln(E) + a_2 \ln^2(E) + a_3 \ln^3(E) \right] \quad (8.8)$$

Şeklinde üstel bir ifadedir. İfadede a'lar fonksiyon katsayıları ve E enerjidir.

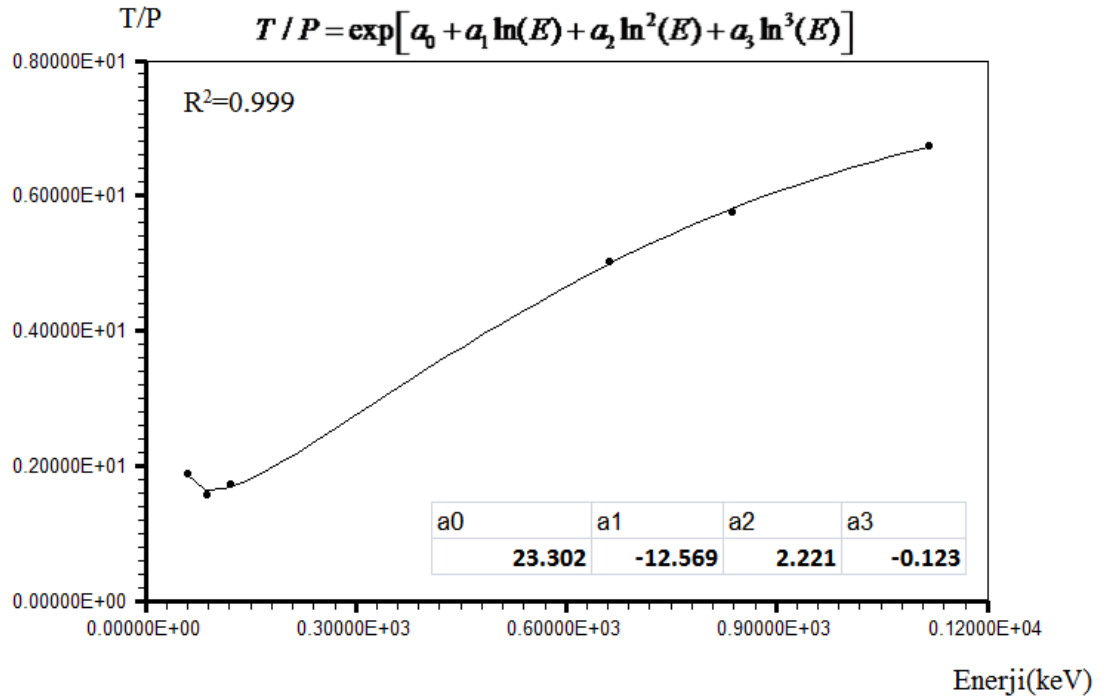
Yaklaşımlara göre elde edilen T/P değerleri çizelge 8.5'de verilmiştir ve bu değerlere ilişkin fonksiyon ve katsayıları şekil 8.3-8.5'de verilmiştir.

Çizelge 8.5 Yaklaşıklık yöntemlerine göre elde edilen T/P oranları

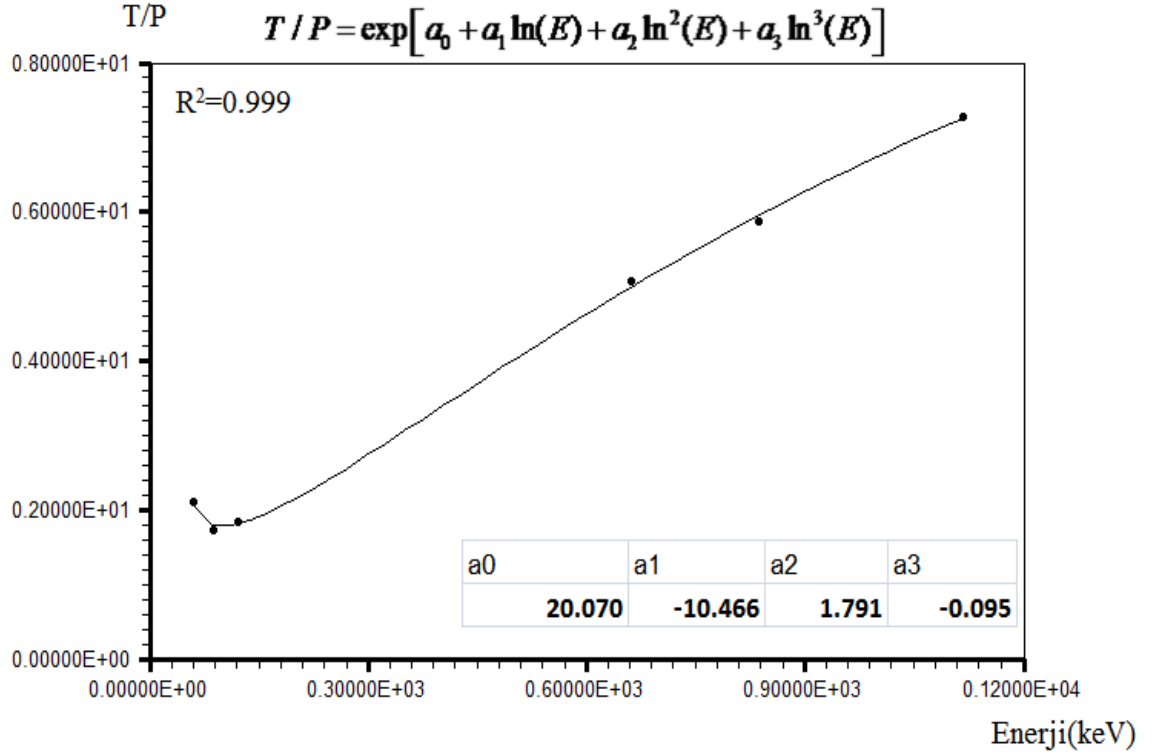
Çekirdek	Enerji (keV)	Venkataraman Yaklaşımı			Yamuk Yaklaşımı			Genie 2000 Yaklaşımı		
		ölçülen T/P	hesaplanan T/P	hata %	ölçülen T/P	hesaplanan T/P	hata %	ölçülen T/P	hesaplanan T/P	hata %
Am-241	59.5	2.1	2.1	1.4	2.1	2.2	1.7	1.9	1.9	1.3
Cd-109	88.0	1.7	1.8	4.4	1.8	1.9	4.9	1.6	1.6	4.4
Co-57	122.0	1.8	1.8	2.2	2.0	2.0	2.4	1.7	1.7	2.5
Cs-137	661.7	5.1	5.0	1.3	5.1	5.1	1.8	5.0	5.0	0.1
Mn-54	835.2	5.9	5.9	1.5	5.9	6.0	1.9	5.8	5.8	0.8
Zn-65	1115.7	7.3	7.2	0.4	7.3	7.3	0.5	6.7	6.7	0.2



Şekil 8.3 Yamuk yaklaşımı T/P fonksiyonu



Şekil 8.4 Genie-2000 yaklaşımı T/P fonksiyonu



Şekil 8.5 Venkataraman yaklaşımı T/P fonksiyonu

8.3 Tam Enerji Fotopik Verim Kalibrasyonu

Tam enerji fotopik verim kalibrasyonu için gerçek çakışma yapmayan radyoaktif çekirdekler kullanıldı. Kalibrasyon için 79830-839 “Reference Material (Radionuclide mixture for True Coincidence Correction” sıvı standardı, RG-U (IAEA Uranyum referans malzemesi), RG-K (IAEA Potasyum Referans Malzemesi) kullanıldı. 79830-839 kodlu standard sıvı olup içerisinde bulunan radyoaktif elementler çizelge 8.6’da verilmektedir. Tam enerji fotopik verim kalibrasyonu için; sıvı standardın içerisindeki radyoaktif elementlerden Am241, Cd109, Co57, Sn113, Hg203, Cs137, Ce139, Mn54, Zn65, Y88, RG-U standardından Pb210 ve RG-K standardından K40 radyoaktif çekirdekleri kullanılmıştır.

Çizelge 8.6 79830-839 kodlu sıvı standard ve içerdiği radyoaktif çekirdeklerin sertifika değerleri

Radyoaktif Çekirdek	Gama Işını Enerjisi (keV)	Yarı ömür (Gün)	Aktivite (Bq)	Belirsizlik %	Referans Tarihi
Am-241	59.5	158007	2439.4	1.8	01.04.2009
Cd-109	88.0	462.60	22046.8	3.6	01.04.2009
Co-57	122.1	271.79	574.3	1.8	01.04.2009
Ce-139	165.9	137.6	780.1	2.0	01.04.2009
Hg-203	279.2	46.61	1851.4	1.8	01.04.2009
Sn-113	391.7	115.1	1301.1	1.8	01.04.2009
Cs-134	604.7	754.2	2756.1	1.8	01.04.2009
Cs-137	661.7	10983	654.0	1.8	01.04.2009
Cs-134	795.9	754.2	2756.1	1.8	01.04.2009
Mn-54	834.9	312.1	1555.8	1.4	01.04.2009
Y-88	898.0	106.6	2916.7	1.4	01.04.2009
Zn-65	1115.6	244.1	4142.5	1.8	01.04.2009
Y-88	1836.1	106.6	2916.7	1.4	01.04.2009

Bu çekirdeklerden Y88 hariç diğerlerinde gerçek çakışma yoktur. Y88'i de kalibrasyonda hesaba katabilmek için önce 46.5 keV (Pb210)'den 1460.82 (K40)'ye kadar bir verim eğrisi elde edilip Y88'in 898 keV- 1836 keV gama enerjileri için gerçek çakışma katsayıları program yardımıyla hesaplanmıştır ve doğru verim değeri

$$\varepsilon^{p'} = \frac{\varepsilon^p}{F_{coi}} \quad \text{şeklinde elde edilmiştir. Burada } \varepsilon^p, \varepsilon^p, F_{coi} \text{ sırasıyla düzeltilmiş verim,}$$

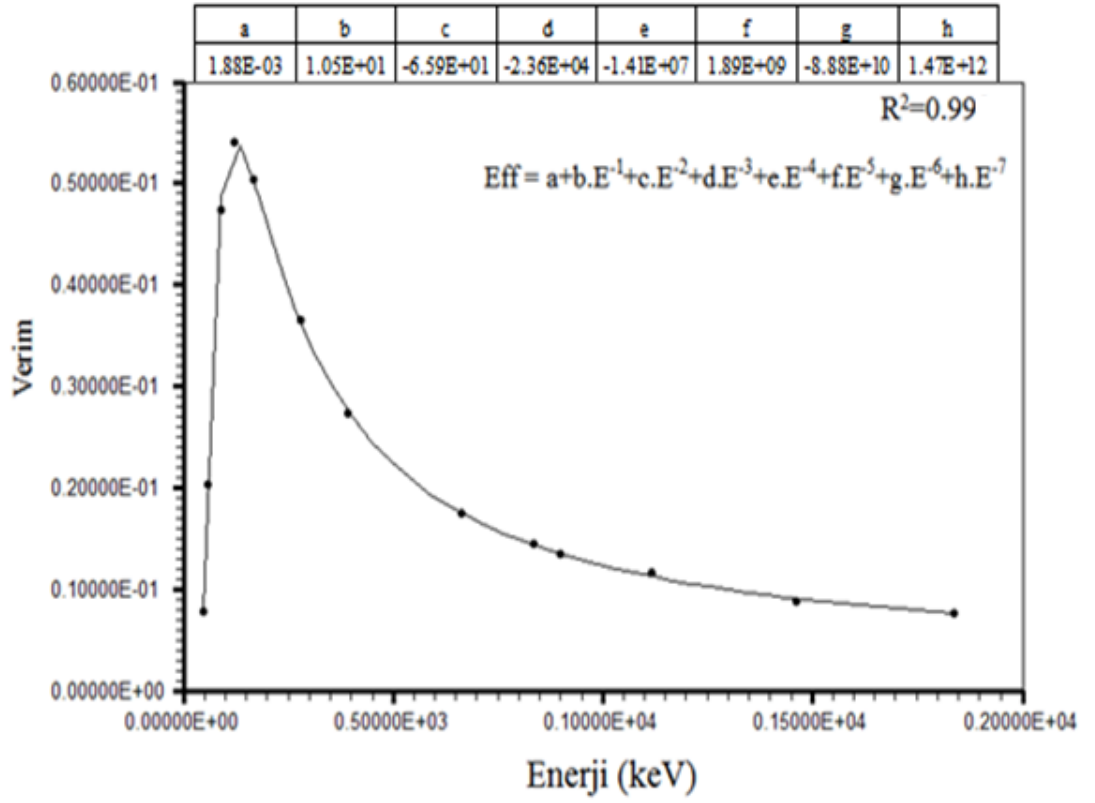
düzeltilmemiş verim ve gerçek çakışma katsayısıdır. Daha sonra bu enerji değerlerini de verim kalibrasyonunda kullanarak 46.5 keV (Pb210)'den 1836 keV (Y88)'e kadar verim eğrisi elde edilmiştir. Verim eğrileri, verim değerlerini negatif kuvvet serisi türünden bir fonksiyona uygunlaştırılarak bulunmuştur. Çizelge 8.7'de hesaplanan tam

enerji fotopik verimleri verilmiştir. Şekil 8.6’de bu değerlere göre çizilen fonksiyon ve katsayıları gösterilmiştir.

Çizelge 8.7 Tam enerji fotopik verimi değerleri

Radyoaktif Çekirdek	Enerji (keV)	Ölçülen Tam Enerji Pık Verimi	Uygunlaştırılmış Fonksiyona Göre Hesaplanan T.E.P. verim	Sapma %
Pb-210	46.54	0.00779 ± 0.00010	0.00779	0.00035
Am-241	59.54	0.02030 ± 0.00026	0.02030	-0.00167
Cd-109	88.04	0.04738 ± 0.00060	0.04739	0.01146
Co-57	122.07	0.05413 ± 0.00069	0.05409	-0.06398
Ce-139	165.85	0.05042 ± 0.00064	0.05050	0.17053
Hg-203	279.17	0.03655 ± 0.00047	0.03632	-0.63313
Sn-113	391.71	0.02730 ± 0.00035	0.02755	0.90728
Cs-137	661.62	0.01744 ± 0.00022	0.01752	0.42456
Mn-54	834.81	0.01453 ± 0.00018	0.01434	-1.25815
Y-88	898.02*	0.01338 ± 0.00017	0.01348	0.74340
Zn-65	1115.52	0.01159 ± 0.00015	0.01125	-3.01969
K-40	1460.82	0.00874 ± 0.00011	0.00905	3.44014
Y-88	1836.01*	0.00764 ± 0.00010	0.00760	-0.55874

*Tcc düzeltmesi yapıldıktan sonra kalibrasyona eklenmiş enerjiler



Şekil 8.6 Negatif kuvvet serisine uygunlaştırılmış Tam enerji fotopik verim eğrisi ve fonksiyonun katsayıları

8.4 Gerçek Çakışma Katsayılarının Hesaplanması

Gerçek Çakışma katsayıları Dr. Sudár'ın hazırlamış olduğu TrueCoinc programı yardımıyla hesaplanmıştır. Programa daha önceden doğru bir şekilde hesaplamış olduğumuz Tam enerji fotopik verim kalibrasyon eğrisinin fonksiyonu ve T/P verim kalibrasyonu eğrisi fonksiyonu programın ilgili bölümüne girilmiştir sonra menüden gerçek çakışma katsayısı hesaplanacak ilgili radyoaktif çekirdeğin bozunum şeması seçilmiştir. Bozunum şemaları literatür tarafından kabul görmüş, güncel olarak indirilebilen ENSDF veri tabanından veya TOI (Table of Isotopes) CD-Rom'dan alınmıştır. Program bu verileri kullanarak ilgili çekirdek için yayınladığı bütün gama enerjileri için toplam kaçış (summing-out), toplam piki (summing-in) ve bunların çarpımı olan gerçek çakışma katsayılarını rapor halinde vermektedir.

9. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada laboratuvarımızda lüminesans yöntemlerle tarihlendirme çalışmalarında HPGe detektörle yıllık doz hesabı için radyoaktivite analizinde rutin olarak kullanılan ölçüm kabındaki gerçek çakışma katsayıları hesaplanmıştır. Farklı T/P hesaplama yaklaşımları uygulanmış ve gerçek çakışma katsayılarındaki değişimler incelenmiştir. Gerçek çakışma katsayılarının hesabında kullanmış olduğumuz Dr. Sudár'ın algoritması TrueCoinc programı ücretsiz olarak elde edilebilen bir programdır. Program hesaplama ve kullanım bakımından diğer ticari yazılımlara göre daha kolaydır. Doğru olarak hesaplanması gereken T/P kalibrasyon fonksiyonu ve Tam enerji fotopik verim kalibrasyon fonksiyonu ilgili bölüme girildikten sonra bozunum şeması seçilen radyoaktif çekirdek için gerçek çakışma katsayılarını hesaplamaktadır. Analizlerde en çok kullanılan bazı doğal ve doğal olmayan radyoaktif çekirdeklerin gerçek çakışma yapan gama enerjileri için farklı T/P yöntemlerine göre hesaplanan katsayılar çizelge 9.1'de verilmiştir. Gerçek çakışma katsayıları, pik verimin geometriye bağlı olarak değişmesinden dolayı hangi geometride ölçüm yapılacaksa o geometri için hesaplanmalıdır. Çizelge 9.1'deki değerler laboratuvarında analiz için kullanılan hacimsel geometri için geçerlidir.

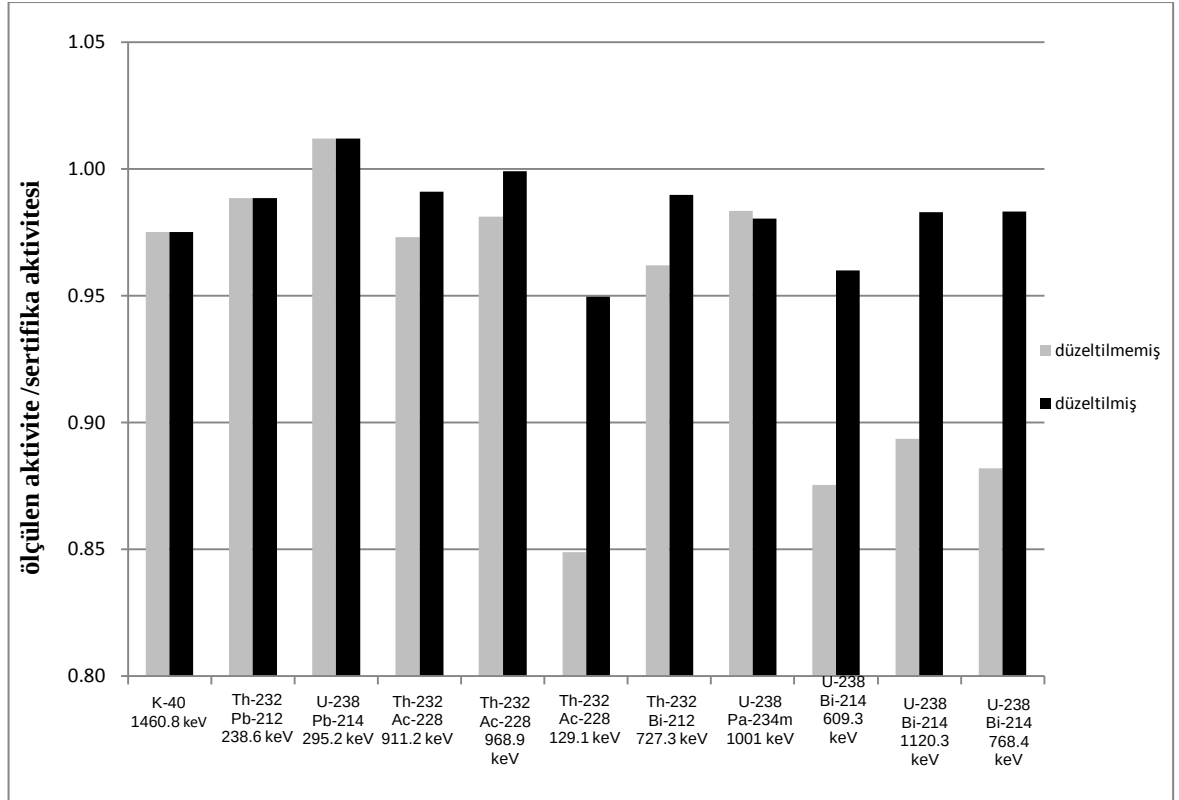
Çizelgedeki gerçek çakışma katsayılarını incelediğimizde farklı T/P yöntemlerine göre katsayılarda 10^{-3} mertebesinde farklılıklar gözlenmektedir ki bu da bize üç yöntemle de T/P kalibrasyonu yapılabilineceğini göstermektedir.

Gerçek çakışma katsayılarının yanı sıra aktivite analizlerinde dikkat edilmesi gereken çok önemli bir etken daha vardır. Spektrumda bazı enerjilerdeki piklerde spektral girişim olmaktadır. Örnek olarak doğal bir örnekten alınan spektrumda, U235'in 185.71 keV ve Ra226'nın 186.10 keV'deki salınan gama enerjilerinin pikleri üst üste binerler. Bu durumlarda bu enerjiler için bir de spektral girişimin dikkate alınması ve iki pik birbirinden ayrılması gerekir. Yücel ve arkadaşları toryumca zengin örneklerde 238U ölçümü için spektrumdaki girişimlere düzeltme yapmışlardır (Yücel vd. 2009).

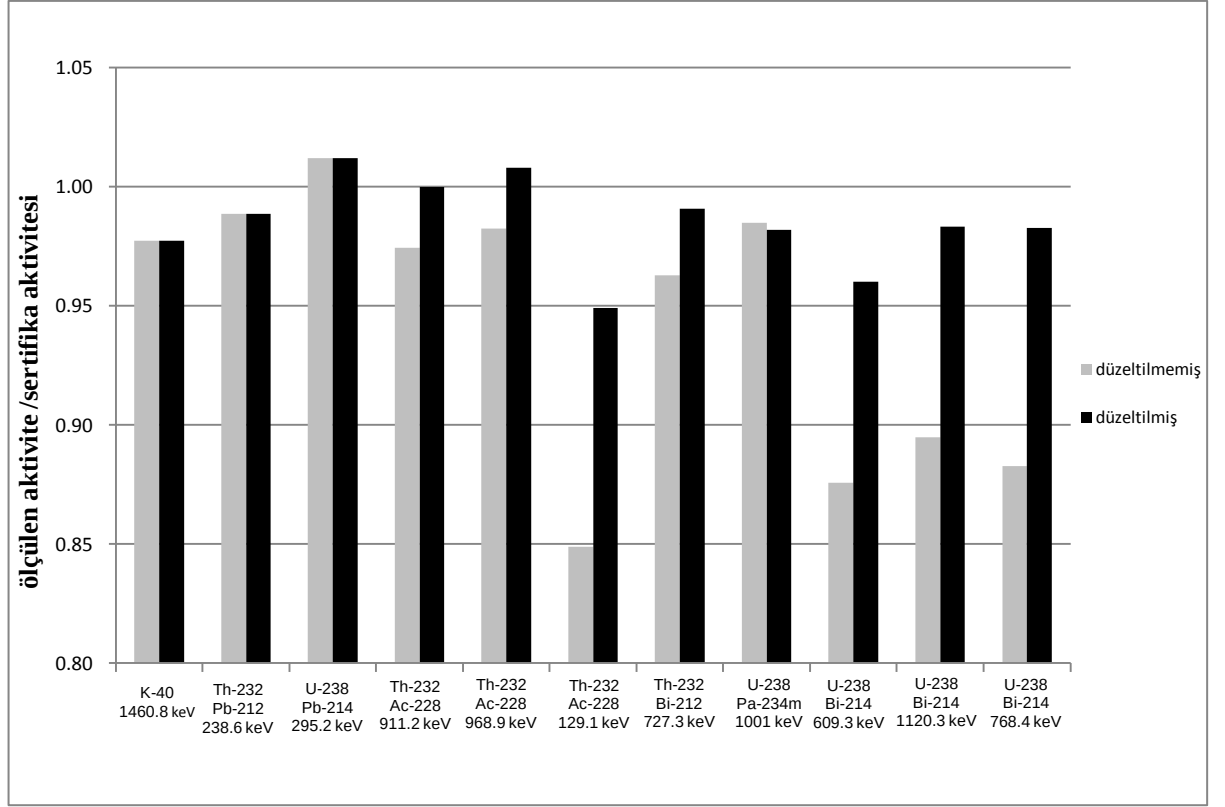
Çizelge 9.1 %33'lük görelî verime sahip p-tipi HPGe detektörde radyoaktivite analizinde kullanılan sayım geometrisi için elde edilen gerçek çıkışma ve NIST Xcom veri tabanından elde edilmiş öz soğurma katsayıları

Radyoaktif Çekirdek	Enerji (keV)	T/P Venkataraman Yaklaşımı TCC	T/P Yamuk Yaklaşımı TCC	T/P Genie 2000 Yaklaşımı TCC	Sıvı Standart için Öz Soğurma Katsayıları
Y-88	898.03	0.9298	0.9287	0.9441	0.07450
	1836.5	0.9202	0.9193	0.9231	0.05180
Co-60	1173.23	0.9221	0.9215	0.9310	0.06530
	1332.5	0.9198	0.9192	0.9266	0.06120
Cs-134	604.72	0.8956	0.8939	0.8973	0.08930
	795.86	0.8982	0.8958	0.8977	0.07880
Cs-137	661.6	1.0000	1.0000	1.0000	0.08580
K-40	1460.82	1.0000	1.0000	1.0000	0.05830
U-235	185.71	0.9931	0.9926	0.9935	0.14000
Ra-226	186.10	0.9999	0.9999	0.9999	0.14000
Th-234	63.30	0.9922	0.9922	0.9926	0.20100
Pb-214	295.21	1.0000	0.9997	1.0000	0.11900
	351.92	0.9992	0.9991	0.9991	0.11200
Pb-210	46.53	1.0000	1.0000	1.0000	0.23800
Bi-214	609.31	0.9122	0.9113	0.9187	0.08900
	768.35	0.8982	0.8970	0.8984	0.08010
	1120.28	0.9101	0.9079	0.9098	0.06680
	1238.11	0.9136	0.9116	0.9133	0.06350
	1764.49	1.0000	1.0000	1.0000	0.05290
Ac-228	129.06	0.8944	0.8905	0.8989	0.15800
	209.25	0.9446	0.9419	0.9471	0.13500
	338.32	0.9805	0.9801	0.9811	0.11300
	911.20	0.9745	0.9734	0.9752	0.07400
	968.97	0.9747	0.9734	0.9755	0.07180
Tl-208	583.19	0.9052	0.9018	0.9235	0.09070
Pa-234m	1001.03	1.0030	1.0030	1.0030	0.07070
Bi-212	727.33	0.9717	0.9713	0.9727	0.08220

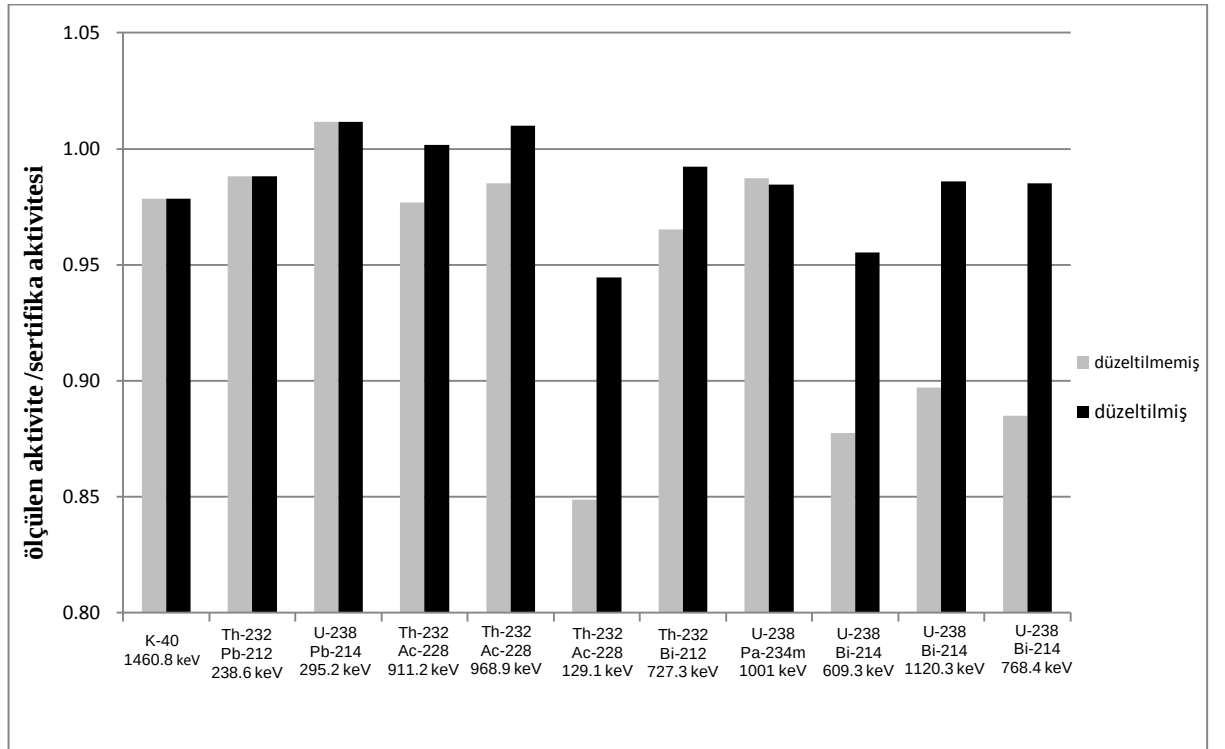
TCC (gerçek çakışma düzeltmesi) katsayılarının doğruluğunu karşılaştırabilmek için IAEA RGU-1, IAEA RGTh-1 ve IAEA RGK-1 referans malzemelerinin aktiviteleri ürün çekirdeklerden çıkan farklı gama enerjilerine göre hesaplanmış ve referans malzemeleri için verilen sertifikadaki aktivite değerleri ile karşılaştırılmıştır. TCC düzeltmesi yapılmış ve yapılmamış aktivite değerlerinin sertifikadaki aktivite değerlerine oranları hesaplanarak doğru aktiviteden sapma hesaplanmıştır. Şekil 9.1-9.3'de U, Th analizinde en çok kullanılan ürün çekirdeklerden elde edilmiş aktivite değerlerinin sertifikadaki aktivite değerlerine oranı gösterilmiştir.



Şekil 9.1 Yamuk yaklaşımıyla hesaplanmış T/P kalibrasyonuna göre TCC katsayılarıyla ölçülen/sertifika aktivite oranı



Şekil 9.2 Venkataraman yaklaşımıyla hesaplanmış T/P kalibrasyonuna göre TCC katsayılarıyla ölçülen/sertifika aktivite oranı



Şekil 9.3 Genie-2000 yaklaşımıyla hesaplanmış T/P kalibrasyonuna göre TCC katsayılarıyla ölçülen/sertifika aktivite oranı

Şekillere baktığımızda ^{40}K -1460.8 keV, ^{238}U -- ^{214}Pb -295.2 keV, ^{232}Th -- ^{212}Pb -238.6 keV enerjileri gerçek çakışma yapmayan enerjiler olup aktivite analizinde düzeltmeye gerek yoktur. Bu çekirdeklerin aktivitelerinin sertifika değerinden %3-5 farklıdır. Sonuçlar hata aralığına girmektedir. Fakat diğer çekirdeklerde düzeltme yapılmadan aktivite analizi yapıldığında sertifika aktivite değerinden %20'ye varan sapmalar gözlenmiştir. Bu enerjilerle aktivite analizi yapıldığında TCC düzeltmesi yapıldıktan sonra ancak yeterli hata aralığına ulaşılabilirdiği gözlenmektedir. Bu da bize gösteriyor ki aktivite hesabında TCC dikkate alınmaz ise yanlış aktivite tayinine neden olabilir. Bu etkinin her zaman farkında olup aktivite analizi yapılan her geometri için hesaplanıp gerçek çakışma yapan enerjiler için düzeltme yapılmalıdır.

Ayrıca sonuçlar Dr. Sudár'ın geliştirdiği algoritmanın gerçek çakışma katsayılarının hesaplanmasında diğer ticari programlara alternatif olarak kullanılabileceği yönündedir.

KAYNAKLAR

- Aitken, M.J. 1985. Thermoluminescence dating. Academic Press, 351 s., England.
- Andreev, D.S., Erokina, K.I., Zvonov, V.S. and Lemberg, I.K.H. 1972. Instr. Expt. Techn. 15,1358.
- Andreev, D.S., Erokina, K.I., Zvonov, V.S. and Lemberg, I.K.H. 1973. Izv. Akad Nauk, SSSR Ser. Fiz., 37 No.8.,1609.
- Atlıhan, M. A. 2008. Doktora tezi, Ankara Üniversitesi, Ege Çöküntü Sistemindeki Bazı Deprem İzlerinin Lüminesans Yöntemiyle İncelenmesi, Ankara.
- Bor, D. 2001. Radyasyon Deteksiyon ve Ölçüm Yötemleri ders notları, Ankara Üniversitesi, Ankara.
- Canberra Industries. 2006. Literature 931, Gamma and X-Ray Detection Customization Tools Manual. 2004. Canberra spectroscopy software Genie-2000, Ver. 3.0, Canberra Inc., Meriden, USA
- Chehade, W. 2007. Master Thesis, Universität Bremen Faculty of Environmental Physics, True Coincidence Summing Correction in Gamma Spectroscopy.
- Daroczy, S. and Raics, P. 1982. Laboratory manual IAEA Training Course on Utilization of Neutron Generators, Debrecen, 16.
- Debertin, K., Schötzig, U. 1979. Coincidence summing corrections in Ge(Li) spectrometry at low source-to-detector distances, Nucl. Instr. and Meth. 158,471.
- Evans, R. D. 1955. The Atomic Nucleus, McGraw-Hill Book Company.
- Firestone, R.B. and Shirley, V.S., 2008. Table of isotopes, 8th ed. CDROM Ver. (1999) or on the web page <http://www.nndc.bnl.gov/nndc/ensdf/>
- Gilmore, G.R. 2008. Practical gamma-ray spectrometry, 2nd edn., Chichester, England
- Glenn F. K., 1979,1989. Radiation Detection and Measurements. IAEA Technical Reports Series No.295 (pp 52)
- Jerome, S., Woods, M.J., Lucas, S.E.M. and Hooley 1993. Environmental radioactivity intercomparison exercise, Report RSA 37 (EXT) 5, National Physical Laboratory, Teddington
- Jerome, S. 1991. Environmental radioactivity intercomparison exercise, Report RSA (EXT) 20, National Physical Laboratory, Teddington.

- Karadağ, M. 2004. GÜ, Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi, Cilt 24, Sayı 1, 115-124
- Maestro-32 Software User's Manual, 2004. Ortec spectroscopy software, Ver. 6.0, Ortec Inc., USA.
- McCallum, G.J. and Coote, G.E. 1975. Influence of source-detector distance on relative intensity and angular correlation measurements with Ge(Li) spectrometers, Nucl. Instr. and Meth. 130, 189.
- NIST, Xcom. 2008. Photon Cross Sections Database on the web page <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/>
- NNDC NuDat 2.5 database. <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>
- Nuclide LARA database <http://laraweb.free.fr/>
- Solmaz, A.N. 2007. Yüksek Lisans Semineri, Ankara Üniversitesi, Gama Spektrometresi Ölçüm Düzenegi, Ankara.
- Sudár, S. 2002. "TRUECOINC", a software utility for calculation of the true coincidence correction, in the specialized software utilities for gamma spectrometry, IAEA-TECDOC-1275, pp 37– 49, International Atomic Energy Agency, ISSN 1011-4289, Vienna.
- Venkataraman, R., Croft, S. and Russ, W.R. 2005. J Radioanal Nucl Chem 66:183
- Yücel, H., Solmaz, A. N., Köse, E. and Bor, D. 2009. A semi-empirical method for calculation of true coincidence corrections for the case of a close-in detection in γ -ray spectrometry. J. Radioanal. Nucl. Chem.
- Yücel, H., Solmaz, A. N., Köse, E. and Bor, D. 2009. Spectral interference corrections for the measurement of ^{238}U in materials rich in thorium by a high resolution gamaray spectrometry. Appl. Radiat. Isot. 67, 2049–2056

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Eren ŞAHİNER

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Tarihi : 14.09.1985

Medeni Hali : Bekâr

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Ankara Binnaz-Rıdvan Ege Anadolu Lisesi (1999-2003)

Lisans : Akdeniz Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü
(2003-2007)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği
Anabilim Dalı (2008-2010)

Seminerler, Sunumlar, Paneller, Bilimsel Aktiviteler

1. **Eren Şahiner**, *Gama Spektroskopisi ile Yıllık Doz Tayini*, Lüminesans Yöntemlerle Arkeolojik ve Jeolojik Örneklerin Tarihlendirilmesi Paneli, Çağırılı Konuşmacı, Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 30 Nisan 2010, Gaziantep.
2. **Eren Şahiner**, *HPGe (Yüksek Safılıkta Detektörde) Detektörde U, Th ve K Analizi*, Antropolojik ve Arkeolojik Materyalde Lüminesans Yöntemlerle Tarihlendirme Paneli, Çağırılı Konuşmacı, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, 2 Mart 2010, Burdur.
3. **Eren Şahiner**, *Doğal Oksitlenmiş Materyallerin Tarihlendirmede Kullanılması*, Arkeolojik Alanlarda Lüminesans Yöntemlerle Tarihlendirme Paneli, Anadolu Üniversitesi Edebiyat Fakültesi, 6 Kasım 2009, Eskişehir.
4. **E. Şahiner**, M. Doğan, N. Meriç, *Doğada Oksitlenmiş Bazı Metallerin Lüminesans Özellikleri*, III. Lüminesans Dozimetre Kongresi, 28-30 Eylül 2009, Bodrum.
5. Çevresel Radyoaktivitenin Belirlenmesi ve İzlenmesine Yönelik İşbirliği Projesi
1.Çalıştayı, TAEK, 20-22 Mayıs 2009, Ankara.

6. 8th Workshop on Quantization, Dualities & Integrable Systems, Ankara University, 23-25 April 2009, Ankara.
7. **Şahiner Eren**, *Termolüminesans Tarihlendirme Laboratuvar Prosedürleri ve Protokolleri*, Yüksek Lisans Semineri, Ankara Üniversitesi, 20 Nisan 2009, Ankara.

Projeler

1. Optik Uyarımalı Lüminesans (OSL) ve Termolüminesans (TL) Teknikleri ile İnsan Dişlerinin Retrospektif Dozimetre Olarak Kullanımının ve Tarihlendirilmesinin Geliştirilmesi TUBİTAK [TBAG - 108T042], 2008 – 2010.