T.C
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GAMA SPEKTROSKOPİSİNDE FOTOPİK ŞİDDETİNİ HESAPLAMAK İÇİN FARKLI ALGORİTMALAR KULLANARAK NUMERİK VE SAYISAL ANALİZLERİN YAPILMASI

Kadir DAĞLI

FİZİK ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2022

Dr. Öğr. Üyesi İlker Can ÇELİK danışmanlığında, Kadir DAĞLI'nın hazırladığı "**Gama Spektroskopisinde Fotopik Şiddetini Hesaplamak İçin Farklı Algoritmalar Kullanarak Nümerik ve Sayısal Analizler Yapılması**" konulu bu çalışma 19.07.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlker Can ÇELİK

Üye : Doç. Dr. Mehmet YÜKSEL

Üye : Prof Dr. Şerife YALÇIN

Bu Tezin Fizik Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini onaylarım.

Prof. Dr. İsmail HİLALİ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ v
SEMBOLLER DİZİNİ vi
1.GİRİŞ 1
2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR. 3
3.MATERYAL VE YÖNTEM 5
3.1. Materyal. 5
3.2. Yöntem 7
4.ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA. 8
4.1. Elektromanyetik Dalga Spektrumu 8
4.1.1. Elektromanyetik dalga ve elektromanyetik dalga spektrumu 8
4.1.2. Gama ışını nedir ve nasıl oluşur? 10
4.1.3. Gama ışınlarının x ışınlarından farkları 12
4.2. Radyasyonun Madde İle Etkileşmesi 13
4.2.1. Fotoelektrik soğurma(fotoelektrik olay) 13
4.2.2. Compton saçılması 14
4.2.3. Çift oluşumu 16
4.3. Dedektörler 17
4.3.1. Dedektörlerin çalışma prensibi 17
4.3.2. Sintilasyon dedektörleri 19
4.4. Çok Kanallı Analizör (MCA) İşlem Basamakları 22
4.5. Histogram 23
4.6. Gauss Dağılım Fonksiyonu 26
4.7. Gama Pik Analizinin Yapılış Nedenlerine Bir Örnek 29
4.8. Gama Piki Sayım Sayılarının Bulunması 29
4.8.1. Toplam sayım sayısı ve net sayım sayısı bulunması 29
4.8.2. Gama pik analizinde hata miktarı hesabı 30
4.9. Covell Yöntemi 31
4.9.1. Covell yöntemi toplam sayım bulma 31
4.9.2. Covell yöntemi tabansayım bulma 33
4.9.3.Covell yöntemi net sayım bulma 34
4.10. Toplam Pik Alanı (TPA) Yöntemi 35
4.10.1. TPA yöntemi toplam sayım bulma. 35
4.10.2. TPA yöntemi tabansayım bulma 36
4.10.3. TPA yöntemi net sayım bulma 37
4.11. Gilmore TPA Yöntemi 39
4.11.1. Gilmore TPA yöntemiyle toplam sayım bulma. 39
4.11.2. Gilmore TPA yöntemiyle tabansayım bulma 40
4.11.3. Gilmore TPA yöntemiyle net sayım bulma 41
4.12. Maestro Yazılımının Kullandığı Yöntem 42
4.12.1. Maestro yazılımı toplam sayım bulma. 42
4.12.2. Maestro yazılımı tabansayım bulma 44
4.12.3. Maestro yazılımı net sayım bulma 45
4.13. Gauss Fit Yöntemi 46
4.11.1. Gauss fit yöntemiyle toplam sayımı bulma 48
4.11.2. Gauss fit yöntemiyle tabansayımı bulma 52
4.11.3. Gauss fit yöntemiyle net sayımı bulma 54
4.11.3. Hata hesabı 55
5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER 57
5.1. Sonuçlar 57
5.1.1. ^{60}Co 1173 keV enerji piki 57
5.1.2. ^{60}Co 1332 keV enerji piki 58
5.2. Öneriler 61

KAYNAKLAR 62
ÖZGEÇMİŞ 63

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GAMA SPEKTROSKOPİSİNDE FOTOPİK ŞİDDETİNİ HESAPLAMAK İÇİN FARKLI ALGORİTMALAR KULLANARAK NÜMERİK VE SAYISAL ANALİZLERİN YAPILMASI

Kadir DAĞLI

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlker Can ÇELİK
Yıl:2022, Sayfa:64

Gama spektroskopisi nükleer fizikte uygulaması yaygın olan bir alandır. Genel itibariyle, gama ışını yayan radyoaktif bir kaynağın spektrumu incelenirken karşılaşılabilecek yöntemler iyi irdelenmelidir. Yöntemlerin farklılıklarına göre, alınacak çözümler için çıkacak sonuçlar ve hata payları da farklılık gösterecektir. Yöntemsel olarak analiz adımlarını açık ve net olarak adım adım belirtmek önem taşımaktadır. Bu işlemleri yaparken, ^{60}Co çekirdeğinden aldığımız spektrum örnek teşkil etmesi için derinlemesine incelenmiştir. İlk etapta elektromanyetik dalgaların madde ile etkileşiminden ve dedektörlerden kısaca bahsedilip, sonrasında fotopik alanı sayım analizlerinden derinlemesine bahsedilmiştir. Bilgisayarımızda yüklü olan MAESTRO isimli, A65-B32 modelli ve 6.08 sürümlü yazılımı kullanarak NaI(Tl) sintilasyon dedektörü vasıtasıyla, istenen numunenin sayım sayıları dijital ortama aktarılmıştır. Analiz için gerekli kanal başına düşen sayım sayıları, gama spektrumu için MAESTRO'nun bize sunduğu ASCII SPE formatlı kayıt seçeneğiyle kolaylıkla kaydedilip, herhangi bir metin belgesi okuyucusuyla rahatlıkla açılıp, okunabilmektedir. Bu işlenmemiş veriyi alarak, seçtiğimiz C++ programlama dili ve ROOT veri analizi ara yüzüyle ya da alternatif olarak basitçe EXCEL dokümanıyla üzerinde işlemler yaparak analiz edebilmekteyiz. Analiz edilmiş ve işlenmiş bu veri, daha sonra bizim için kendimizin geliştireceği yöntem ile daha önceleri denenmiş ve geliştirilmiş farklı algoritmalar ile kıyaslanmıştır. Son olarak ise veriler tablolara ve grafiklere dökülmek suretiyle yorumlanarak, kendi ürettiğimiz yöntemin etkililiği, verimliliği ve uygulanabilirliği gösterilmiştir. Bu çalışmamızda, gama piklerinin altında kalan alanların her türlü numerik ve analitik analizlerini yapmak üzere belli başlı yöntemlere yer verilmiştir.

Bunlardan bazıları şöyle sıralanabilir:

- ✓ Covell Yöntemi
- ✓ TPA Yöntemi
- ✓ Gilmore'un TPA Yöntemi
- ✓ Maestro Software Yöntemi
- ✓ Gauss Fit Yöntemi

Kullanılan bu yöntemlerde toplam pik alanı bulunmuş daha sonra net alanı bulmak amacıyla tabansayım olarak adlandırdığımız bölgenin alanını tayin etmek için geliştirilen farklı numerik veya analitik yöntemler kıyaslanıp, net alanlar tablolarla sunulmuştur. Görülen sonuçlar bize, genel anlamda tabansayımı sonuçlarının seçilen yöntemden yönteme değişeceğini, bununda net alan cevaplarını ve hatalarını etkileyeceğini göstermiştir. Ayrıca, pratiklik açısından analitik yöntemler ve kodlama stratejilerinin işlemlerdeki zaman kaybını azalttığı ve daha çok fit algoritmasını veya yöntemi tek seferde test etme üstünlüğünü bize verdiği görülmüştür. Bu net sayımlarının daha sonrasında radyoaktif materyallerin aktivite veya doz hesaplamalarında kullanılacağı bilinmelidir. Yani, bütün bu yöntemler ve net alan hesaplamaları aslında, diğer hesaplamalara taban hazırlar.

ANAHTAR KELİMELER: Covell Metodu, TPA Metodu, Gilmore'un TPA Metodu, Maestro Yazılımının Metodu, Gauss Fit Yöntemi.

ABSTRACT

MSc Thesis

ANALYTICAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF COUNTING THE INTENSITY OF PHOTOPEAK IN GAMMA RAY SPECTROSCOPY WITH DIFFERENT ALGORITHMS

Kadir DAĞLI

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Assist. Prof. Dr. İlker Can ÇELİK
Year:2022, Page:64

Gamma-ray spectroscopy is very widely used topic in nuclear physics. Generally, the methods in analysing any radioactive material should be investigated thoroughly. Depending on the different methods, the results and their errors will not be the same. Methodologically, each step in the procedure should be clearly stated. For that purpose, ^{60}Co spectrum will be used as a case study in detail. At first, the interactions of gamma radiation with matter and some detectors will be presented for the theory section. Then, the determination of photopeak area will be exemplified in detail on by one. At first, unprocessed data will be extracted via the software called MAESTRO which is linked to the scintillation detector of NaI(Tl). We will be using the A65-B32 model and 6.08 version of this software which enables us to retrieve the data as ASCII SPE format. This format can be opened in any text editor program easily to extract. By taking this raw data, either in EXCEL or in C++ programs with ROOT data analysis interface of CERN, researcher can proceed the calculations. This programs also help us to visualize the data for the interpretation. With this processed data, other previously studied algorithms and our new method can be compared in terms of results, errors, and interpretation. By the help of figures and tables, new ideas, the effectiveness of our new method and the feasibility of the method can be tested. In this study, some common numeric and analytic approaches are indicated, so they can be listed as follows.

- ✓ Covell Method
- ✓ TPA Method
- ✓ Gilmore's TPA Method
- ✓ Maestro Software Method
- ✓ Gaussian Fit Method

In these methods, we firstly found the gross area under each gamma-ray peak. Then, some distinct approaches as listed above to calculate the background counts under the peaks were tested and compared to reach the net counts of the signals. The results in tables proved that the background and the net counts or areas would change depending on the chosen method. Also, their errors will be affected as tested. In addition to all these, the flexibility and the practicality of the analytic method showed its superior usage in comparison to messy and more time consuming numerical methods. In the future analysis, either the net count or the net area will be in use to calculate the activity and doses of any radioactive materials in any related field. In summary, all these methods, which were studied in the thesis, provided the base results for future radioactive or radiological works.

KEY WORDS: Covell Method, TPA Method, Gilmore's TPA Method, Maestro Software Method, Gaussian Fit Method.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yapılması esnasında bana; bilgi birikimi ve deneyimleri ile gece gündüz demeden yol gösteren, her daim desteğini arkamda hissettiğim ve bana olan katkılarını bütün hayatım boyunca unutamayacağım saygıdeğer danışman hocam Öğr. Üyesi Dr. İlker Can ÇELİK'e (Harran Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi), tezimin hazırlanması sürecinde yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Mehmet AÇIK'a, hayatım boyunca iyi ve kötü günde yanımda ve bana destek olan değerli aileme teşekkürü bir borç bilirim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Enerji kalibrasyonu öncesinde radyoaktif ^{60}Co kaynağından alınan gama spektrumu 5
Şekil 3.2. ^{60}Co'dan elde edilen enerji kalibrasyonu yapılmamış spektrumda 1332 keV civarında oluşan gama ışını piki 6
Şekil 3.3. ^{60}Co'dan elde edilen enerji kalibrasyonu yapılmamış spektrumda 1173 keV civarında oluşan gama ışını piki 6
Şekil 4.1. Elektromanyetik dalga gösterimi 8
Şekil 4.2. Elektromanyetik dalga spektrumu 9
Şekil 4.3. Radyoaktif 60Co çekirdeğinin bozunum diyagramı 11
Şekil 4.4. Gama ve X ışınlarının grafiksel gösterimi 12
Şekil 4.5. Bir dedektör içerisinde gerçekleşen olayların gösterimi 13
Şekil 4.6. Fotoelektrik soğurma olayı ve karakteristik X ışını salınımı 14
Şekil 4.7. Compton saçılması olayının çarpışma öncesi ve sonrası şematize edilmesi 15
Şekil 4.8. Çift oluşumu ve yok olma olayının şematize edilmesi 16
Şekil 4.9. NaI dedektörü ve bileşenlerinin şeması 17
Şekil 4.10. Dedektörlerin iyi ve kötü enerji çözünürlüklerinin Gauss fonksiyonu genişliği ile gösterilmesi 19
Şekil 4.11. Sintilasyon dedektörünün çalışma prensibi 21
Şekil 4.12. Sintilasyon dedektörü bileşenleri ve bağlantı şeması 21
Şekil 4.13. ORTEC Firmasına ait bir MCA ünitesi cihazı görüntüsü 23
Şekil 4.14. Histogram gösterimi 23
Şekil 4.15. Hücre aralıkları çok geniş belirlenen histogram 24
Şekil 4.16. Hücre aralıkları çok dar belirlenen histogram 24
Şekil 4.17. ^{60}Co radyoaktif kaynağına ait 1173keV ve 1332keV enerjilerindeki piklerin denk geldiği kanalları gösteren bir gama spektrumunun gösterimi 25
Şekil 4.18. Gauss dağılım fonksiyonuna bir örnek 26
Şekil 4.19. Yükseklikleri ve orta değerleri eşit, standart sapmaları birbirinden farklı iki gauss fonksiyonu 27
Şekil 4.20. Orta değerleri ve standart sapmaları eşit, yükseklikleri birbirinden farklı iki gauss fonksiyonu 28
Şekil 4.21. Standart sapmaları ve yükseklikleri eşit, orta değerleri birbirinden farklı iki gauss fonksiyonu 28
Şekil 4.22. Covell yönteminde toplam sayım sayısını bulma 32
Şekil 4.23. Covell yönteminde tabansayım sayısını bulma 33
Şekil 4.24. Covell yönteminde net sayım sayısını bulma 34
Şekil 4.25. TPA yöntemiyle toplam sayım sayısının bulunmasının temsili grafiği 35
Şekil 4.26. TPA yöntemiyle tabansayım hesabının görsel bir şeması 37
Şekil 4.27. TPA yöntemiyle net sayım sayısını bulma 38
Şekil 4.28. Gilmore TPA yönteminin temsili şeması 39
Şekil 4.29. Maestro yazılımı yöntemiyle toplam alan bulma 42
Şekil 4.30. Maestro yazılımında tabansayım değerleri ayarlama 44
Şekil 4.31. Maestro yazılımı gösterimiyle sonuç bilgilerinin ekranda gösterilmesi 45
Şekil 4.32. 661,6 keV enerjideki ^{137}Cs pikinin Gauss fonksiyonun fit edilme örneği 47
Şekil 4.33. ^{60}Co verisi üzerine fit edilmiş iki Gauss fonksiyonunun şematize edilmesi 47
Şekil 4.34. ROOT programı ile 1. dereceden tabansayımı fiti uygulama işlemi 53
Şekil 4.35. ROOT programı ile 2. dereceden tabansayımı fiti uygulama işlemi 54

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 4.1. ^{60}Co 1,173 keV enerji piki için çeşitli yöntemlerin karşılaştırılması. 57
Çizelge 4.2. ^{60}Co 1,332 keV enerji piki için çeşitli yöntemlerin karşılaştırılması. 58

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

β	Beta
E	Enerji
h	Planck Sabiti
f	frekans
γ	Gama
λ	Lambda
Ge	Germanyum
keV	Kilo Elektronvolt
MeV	Mega Elektronvolt
Co	Kobalt
Cs	Sezyum

1.GİRİŞ

Radyasyon yeryüzünde hayat ilk başladığı andan itibaren vardı. Ancak insanlığın radyasyonu keşfetmesi için uzun bir yol kat etmesi gerekti (Kurtman ve Çelebioğlu, 2000). Günümüzde radyasyon alanında birçok çalışma yapılmıştır. Radyasyonun olumlu ve olumsuz yanları büyük oranda bilinmektedir fakat radyasyon alanında gidilecek çok uzun bir yol vardır.

Radyasyon çeşitlerini iyonlaştırıcı radyasyon ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak iki ana gruba ayırabilirken bunları da kendi aralarında aşağıdaki gibi gruplara ayırmak mümkündür (Tsoulfanidis ve Landsberger, 2015).

1) İyonlaştırıcı Radyasyon
    a. Parçacık radyasyonu
        i) Elektronlar (e^-)
        ii) Pozitronlar (e^+)
        iii) Protonlar ($_1^1H$)
        iv) Döteronlar ($_1^2H$)
        v) Alfalar ($_2^4He$)
        vi) Ağır İyonlar (A>4)
    b. Elektromanyetik radyasyon (X ışınları veya gama ışınları)
    c. Nötronlar ($_0^1n$)
2) İyonlaştırıcı olmayan elektromanyetik radyasyon
    a. Radyo dalgaları
    b. Mikrodalgalar
    c. Kızılötesi
    d. Morötesi
    e. Görünür ışık

Elbette ki radyasyon kavramı geniş bir yelpazeye yayılmıştır. Radyasyonun insan yaşamına, doğaya ve diğer canlılar üzerine etkilerinin tespit edilmesi adına yapılan çalışmalarda aktivite hesabı sıklıkla kullanılmaktadır.

Radyoaktif bir kaynaktan yayılan radyasyon genellikle farklı enerjilerde foton veya parçacıklardan oluşur fakat yayılan parçacıklar genellikle belli enerji aralığı çevresinde pik oluşturur. Radyoaktif kaynağın aktivitesi hesaplanırken oluşan bu pike ait net tanecik sayısının bilinmesi gereklidir. Buna net sayım sayısı adı verilir ve aktivite hesaplamasında kullanılır. Bir pikin net sayım sayısının bulunabilmesi için pikin toplam sayım sayısından tabansayım olarak adlandırdığımız bölgedeki sayım sayısının çıkarılması gereklidir. Tabansayım miktarı birçok değişkene bağlıdır. Tabansayım aslında o pikin enerji aralığına sahip ama aslında pike ait olmayan sayımlar anlamına gelir.

Tabansayım ve net pik sayımı hesaplamada geçmişten günümüze birçok farklı yöntem kullanılmıştır. Bilgisayar teknolojisinin hayatımıza girmesi ile birlikte tabansayımı bulmak için artık çeşitli algoritmalar üretilmiştir. Bazı dedektör üretici firmaları da tabansayımı bulmak için çeşitli programlar ve yazılımlar geliştirmiştir.

Elbette ki tabansayım ve net alan bulma konusunda kesin doğrudur denilebilecek bir yöntem yoktur. Yöntemler kullanım kolaylığı veya tutarlı sonuçlar vermesi açısından değerlendirilebilir. Eldeki yöntemlerin karşılaştırılması ve farklı bir yöntemin tartışılması bilimsel açıdan önemli ve gereklidir.

Bu araştırmadaki hedefleri kısaca özetlemek gerekirse; radyoaktif bir kaynaktan elde edilen gama ışınlarının oluşturduğu pikleri inceleyerek bu piklerin toplam sayım sayısı, tabansayım sayısı ve net sayım sayılarının farklı yöntemler kullanılarak hesaplanması olarak belirlenmiştir.

2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Radyasyon ile ilgili çalışmalar çok eski tarihlere dayanmaktadır. 1895 yılında Wilhelm Conrad Rontgen tarafından gözlemlenen ve X ışını adını verdiği ışınlar bu alanda çalışmalara ivme kazandırmış ve bu tarihten sonra radyasyon ile ilgili çalışmalar sıklıkla yapılmıştır. X ışınları ile bir fotoğraf kaseti üzerine görüntülenen el büyük bir heyecan yaratmıştır. Bir diğer önemli buluş 1896 yılında gelmiştir. Fizik öğretmeni olan Henry Becquerel uranyum tozları üzerinde yaptığı çalışmalarda doğal radyoaktiviteyi keşfetmiştir (Becquerel, 1896).

1897 yılında Ernest Rutherford uranyumdan çıkan alfa ve beta parçacıklarını bulmuştur (Rutherford, 1897).

Radyasyon ile ilgili çalışmalar elde edilen spektrumların analiz edilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmış ve spektrum analizi ile ilgili çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Radyasyon elbette ki foton adı verilen ışık taneciklerinden veya madde parçacıklarından oluşmaktaydı. Elde edilen spektrumlar da bu tanecik veya parçacıkların enerjilerinden ve sayısından oluşmaktaydı. Elde edilen belirli enerji aralığındaki piklerin net sayım sayılarının hesaplanması aktivasyon bulma açısından önemlidir ve net pik alanı bulmak için öncelikle radyoaktif kaynağın içinden veya dışındaki diğer kaynaklardan gelebilen ve tabansayım olarak ifade edilen sayım sayısını bulmak gerekir. Net pik alanını bulmak için pik içinde kalan toplam sayım sayısından tabansayım çıkarılır. Böylece net pik alanı, yani o enerji aralığındaki tanecik sayısı bulunur.

1959 yılında D. F. Covell spektrumlarda gama pik alanlarının nasıl bulunabileceği ile ilgili bir makale yayınlamış ve bu alandaki diğer çalışmalara öncü olmuştur (Covell, 1959).

1968 yılında Slawomir Sterlinski “Gama Işınları Pikinde Çok Kanallı Analizörden Alınan Verilerin Analizi” isimli çalışmasını yayınlamıştır (Sterlinski, 1968).

1970 yılında "Gama Işını Spektrumunda Pik Alanlarının Hesaplanması İçin Modifiye Covell Yönteminin Özellikleri" isimli makalesini yayınlamıştır (Sterlinski, 1970).

1969 yılında "Germanyum Dedektörlerinde Pik Alanı Belirleme" isimli makaleler Paul Quittner tarafından yazılmıştır (Quittiner, 1969).

1973 yılında J. J. Steyn ve M. Reier tarafından "Ge (Li) Fotopiklerinin Analizi" isimli makale yazılmıştır (Steyn and Reier,1973).

1973 yılında L. Kokta tarafından net pik alanlarının hesaplanması üzerine ve farklı yöntemlerin de açıklanmasını içeren "Pik Alanı Hesaplama" isimli makale yazılmıştır (Kokta, 1973).

1987 yılında Ludwik Loska Toplam Pik Alanı Yönteminin Gamma Işınları Pik Analizi Modifikasyonu" isimli makaleyi yazmıştır (Loska, 1988).

1971 yılında Philip A. Baedecker tarafından "Aktivasyon Analizinde Fotopik Hesaplamanın Dijital Metotları" isimli makale yazılmış. Makalede metotlar karşılaştırılmıştır (Beadecker, 1971).

1990 yılında G. Kennedy tarafından "Fotopik Hesaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması" isimli makale yayınlanmıştır (Kennedy, 1990).

Önceki çalışmalarda fotopik alanı hesaplama yöntemleri denenmiş ve geliştirilmiş. Bazı çalışmalarda farklı yöntemler verilmiştir. 1971 yılında Philip A. Beadecker tarafından yazılan makalede bazı farklı yöntemler bir çalışma içerisinde verilmiş ve kıyaslanması sağlanmıştır.

Bizim yaptığımız bu çalışmada da gauss fiti yöntemi üzerinde durulmuş, kabul görmüş diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlar ile gauss fiti yönteminden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

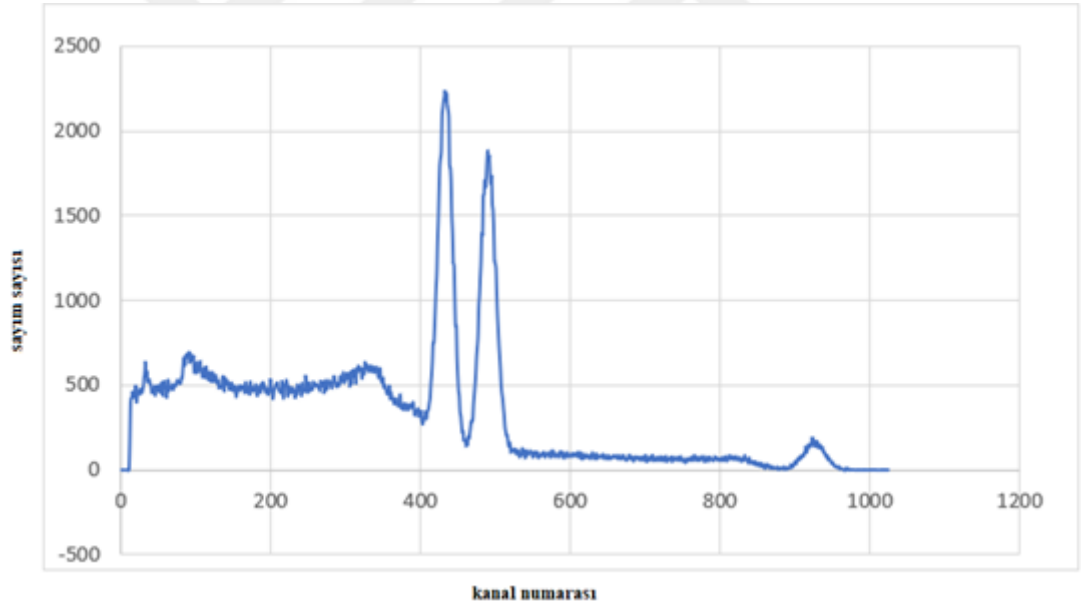
3.MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Yapılan bu çalışmada radyoaktif bozunum yapan bir kaynaktan yayılan radyasyon dedektör ile tespit edilmiş, elde edilen veriler çok kanallı analizör (MCA) ve bilgisayar yardımıyla spektruma çevrilmiştir.

Kullanılan detektör Tl katkılı NaI detektörü olup veriler yazılım aracılığı ile alınmıştır.

Kullanılan spektrum ^{60}Co radyoaktif maddesinin yaptığı ışımalardan elde edilen spektrumdur. Daha öncesinde ölçümler yapılmış ve spektrum verileri elde edilmiş ve elde edilen bu veri analizlerimizde kullanılmıştır. Şekil 3.1'de enerji kalibrasyonu yapılmamış ^{60}Co spektrumu görülmektedir.



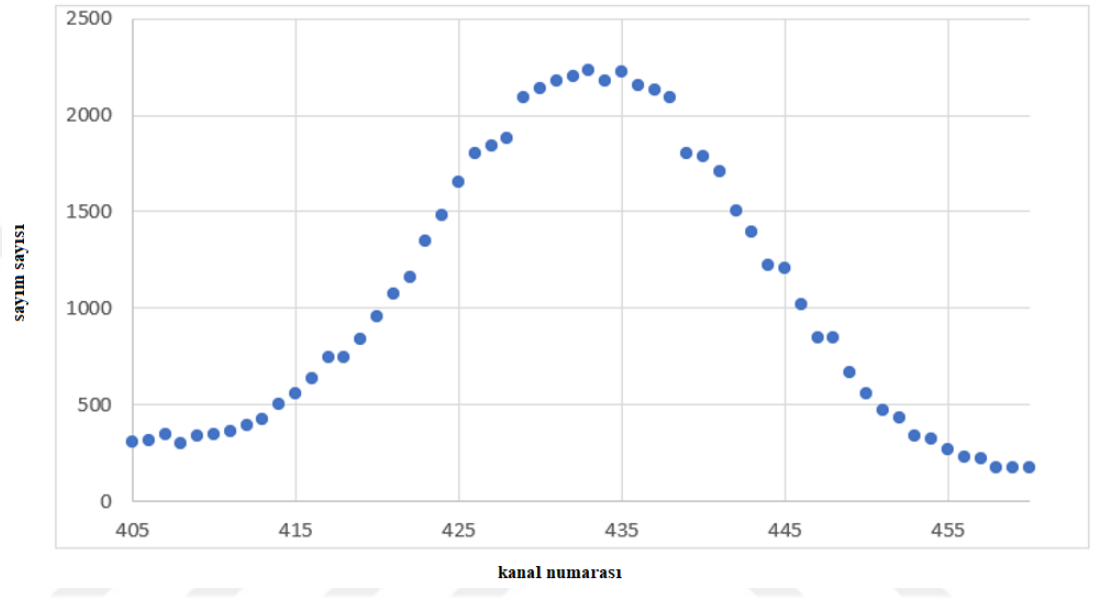
Şekil 3.1. ^{60}Co'dan elde edilen enerji kalibrasyonu yapılmamış spektrum.

^{60}Co radyoaktif maddesinin 1173 keV ve 1332 keV enerjilerinde olmak üzere iki adet piki vardır (Browne ve Tuli, 2013).

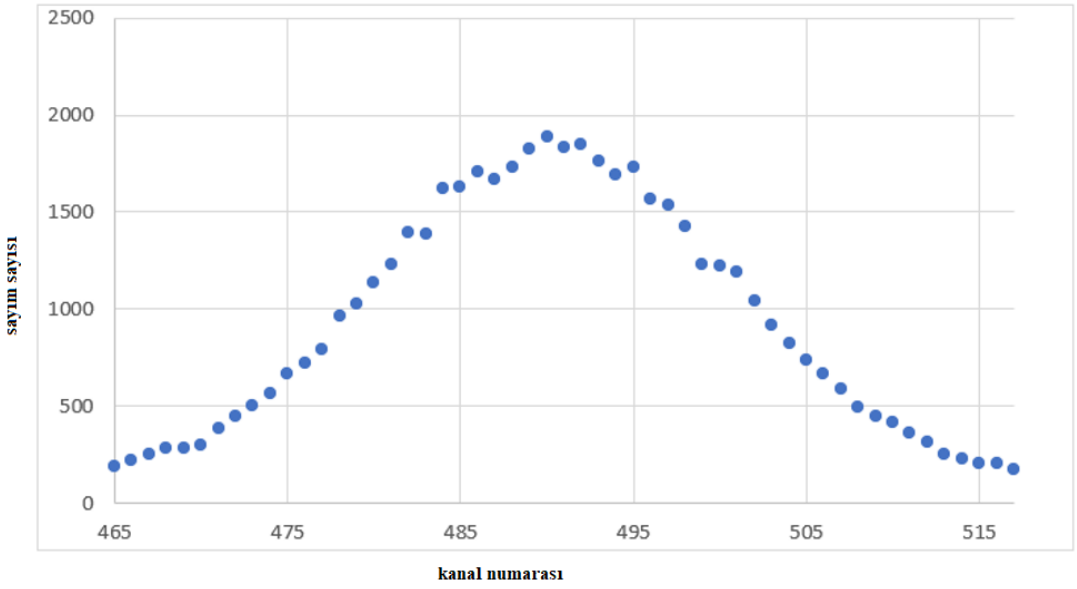
Elbette ki dedektöre birçok farklı enerjiye sahip fotonlar gelecek ve bunlar da spektrumdaki yerini alacaktır. Yapacağımız bu çalışmada gerekli olan bölgelerin yani

bu iki pikin net alanlarının bulunması aracılığıyla yöntemlerin karşılaştırılması hedeflenmektedir.

^{60}Co radyoaktif maddesini analizlerimizde kullanmamızın nedeni; dedektörler için en çok kullanılan kalibre malzemelerinden biri olması ve birbirine çok yakın neredeyse iç içe geçmiş iki enerji pikinin bulunmasıdır.



Şekil 3.2. ^{60}Co'dan elde edilen enerji kalibrasyonu yapılmamış spektrumda 1332 keV civarında oluşan gama ışını piki.



Şekil 3.3. ^{60}Co'dan elde edilen enerji kalibrasyonu yapılmamış spektrumda 1173 keV civarında oluşan gama ışını piki

Şekil 3.2 ve şekil 3.3'te ^{60}Co maddesinin pikleri ayrı ayrı histogram olarak verilmiştir.

Elbette ki farklı materyaller de kullanmak mümkündür. Farklı radyoaktif maddelerden elde edilebilecek spektrumlarda bulunan pikler de aynı yöntemler kullanarak analiz edilebilir.

3.2. Yöntem

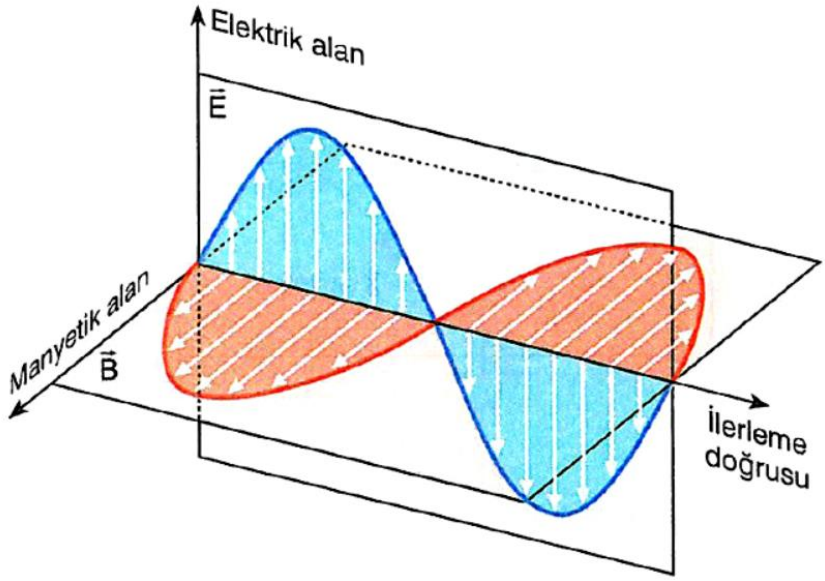
Yapılan bu çalışmada analitik bir analiz yöntemi kullanılmıştır. Nümerik analiz yapılan durumlarda histogram hücrelerinde yer alan sayım sayıları tıpkı Covell, TPA v.b. metotlarda olduğu gibi tek tek toplanmakta ve toplam pik alanı bu şekilde bulunmaktadır. Yapılacak çalışmada analitik bir yöntem kullanılacak olup pikteki toplam sayım ve tabansayım değerleri bağıntılar yardımı ile hesaplanacaktır.

4.ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Elektromanyetik Dalga Spektrumu

4.1.1. Elektromanyetik Dalga ve Elektromanyetik Dalga Spektrumu

Elektromanyetik dalgalar birbirine dik olan elektrik ve manyetik alanların hareketidir. Elektromanyetik dalgaların hareket doğrultusu da elektrik ve manyetik alana diktir. Elektromanyetik dalgalar fotonlardan meydana gelmiştir. Aynı zamanda hem parçacık hem de dalga özelliği gösterirler. Enerji taşırlar ve madde ile etkileşime girebilirler.

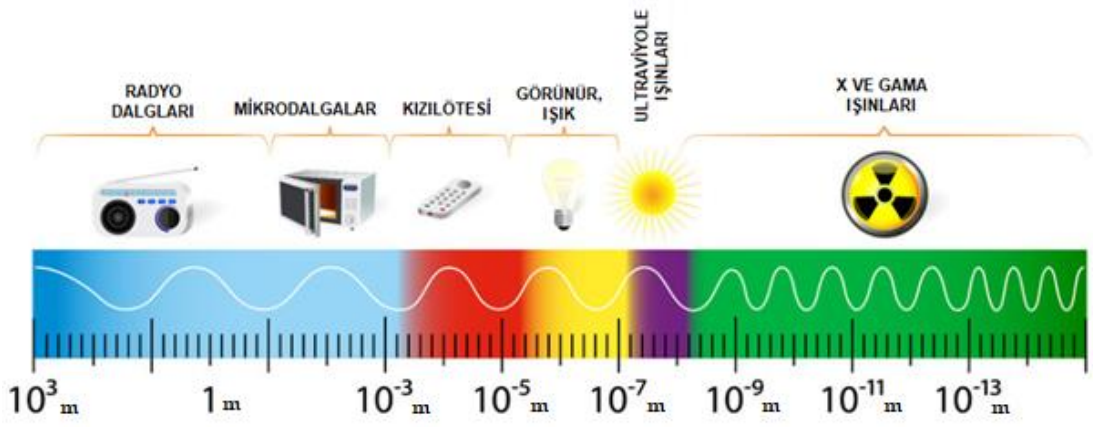


Şekil 4.1. Elektromanyetik dalga gösterimi

Radyasyon kelimesi 1900'lü yılların başına kadar bütün elektromanyetik dalgaları tanımlamak için kullanıldı. X ışınları ve doğal radyoaktivite keşfedildikten sonra radyasyon terimi kapsamı içerisine alınmıştır. 1924'te Louis de Broglie, dalga-parçacık ikiliği teorisini geliştirdi ve doktora tezinde önermiştir. Bu teori, kısa süre sonra elektron kırınım deneyleriyle doğrulandı ve parçacıklar ile dalgalar arasındaki ayrım artık önemini yitirdi. Günümüzde radyasyon, tüm elektromanyetik spektrumun

yanı sıra keşfedilen tüm atomik ve atom altı parçacıkları ifade eder. Farklı radyasyon türlerinin bir arada gruplandırılmasının yollarından biride onları iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon açısından ayırmaktır. İyonlaştırma kelimesi, radyasyonun geçtiği ortamın bir atomunu veya molekülünü iyonize etme yeteneğini ifade eder. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon, dalga boyu yaklaşık 10 nm veya daha büyük olan elektromanyetik radyasyondur. Elektromanyetik spektrumun bu kısmı radyo dalgalarını, mikrodalgaları, görünür ışığı (λ = 770 - 390 nm) ve morötesi ışığı (λ = 390 - 10 nm) içerir. İyonlaştırıcı radyasyon, elektromanyetik spektrumun geri kalanını (x-ışınları, λ ≈ 0.01 − 10 nm) ve dalga boyu x-ışınlarından daha kısa olan gama ışınlarını içerir. Ayrıca elektronlar, pozitronlar, protonlar, alfalar, nötronlar, ağır iyonlar ve mezonlar gibi tüm atomik ve atom altı parçacıklarda iyonlaştırıcı radyasyon kategorisinde sayılmaktadır (Tsoulfanidis ve Landsberger, 2015).

Elektromanyetik dalga spektrumu çevremizde görebildiğimiz veya göremediğimiz tüm elektromanyetik dalgaları dalga boylarına göre sınıflandıran bir araçtır. Düşük enerjiden yüksek enerjiye doğru; radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi, görünür bölge, ultraviyole, X ışınları, gama ışınları olarak sıralanabilir.



Şekil 4.2. Elektromanyetik dalga spektrumu

Elektromanyetik spektrumda radyo dalgalarından gama ışınlarına doğru gidildikçe fotonların sahip olduğu enerji miktarında artış gözlenir. Bunun nedeni dalga boyunun azalması ve frekansın artmasıdır. Aşağıda bir fotonun sahip olduğu enerjiyi veren bağıntı verilmiştir. Bağıntıdan enerji ve frekans arasındaki ilişki, denklem 4.1'deki gibi bulunabilir (Gilmore, 2008).

$$E = h \times f \tag{4.1}$$

4.1 denkleminde E foton enerjisini, h Planck sabitini, f ise fotonun sahip olduğu frekansı vermektedir. Planck sabitinin değeri (h = $6{,}63\times10^{-34}$ J.s) olarak bilinmektedir.

4.2 denkleminde ise fotonun sahip olduğu enerji ile dalgaboyu arasındaki ilişkiyi veren bağıntı verilmiştir. Pay kısmındaki terimlerin sabit sayılar olduğuna dikkat ediniz. 4.2 bağıntısında c ışığın vakumdaki hızını ($c \approx 3 \times 10^8$ m/s) temsil ederken λ ise fotonun dalgaboyunu temsil etmektedir (Gilmore, 2008).

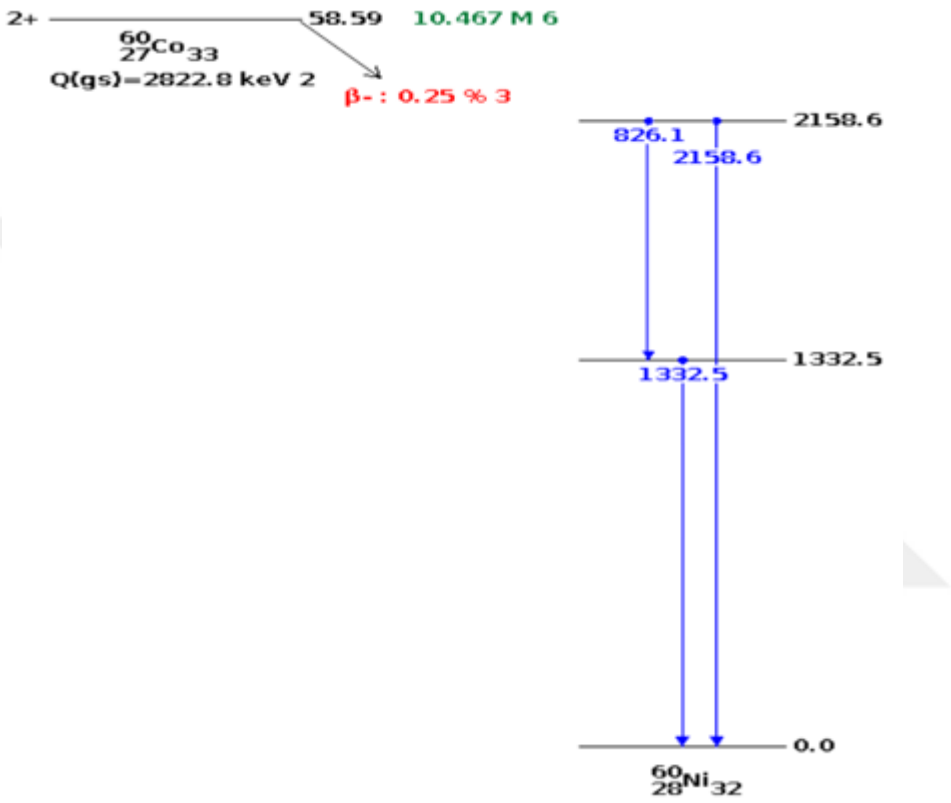
$$E = \frac{h \times c}{\lambda} \tag{4.2}$$

4.1 ve 4.2 bağıntılarından da anlaşıldığı gibi ışığın frekansı arttıkça yani dalgaboyu azaldıkça taşıdığı enerji miktarı artmaktadır. Enerjisi yüksek olan ışınların giricilik miktarı artar, madde içerisinde alınan yol arttıkça madde ile olan etkileşiminde de artış olacağından maddeyi oluşturan atomlar üzerinde iyonlaştırma veya uyarmaya sebep olabilirler.

4.1.2. Gama Işını Nedir ve Nasıl Oluşur?

Elektromanyetik dalga spektrumunda, dalga boyları en düşük ve haliyle enerjisi en yüksek olan ışınlar "gama ışınları" olarak isimlendirilmiştir. Gama ışınları da bütün diğer elektromanyetik dalgalar gibi fotonlardan oluşmaktadır. Genellikle diğer elektromanyetik dalgalara göre daha yüksek enerjiye sahiptirler ve bu nedenle madde içerisinde daha fazla yol alabilirler.

Gama ışınları (simge: γ) doğal veya yapay yollarla oluşabilirler. Bu yapay yollardan biri de nükleer reaksiyonlardır. Nükleer reaksiyonlar sonucunda oluşan yeni çekirdekler genellikle kararlı durumda olmadığından, uyarılmış seviyede bulunan çekirdekler fazla enerjilerini etrafa gama ışını yayarak azaltmayı seçebilirler. Böylece temel hal enerji seviyesine dönebilirler. Örneğin; denklem 4.3'de radyoaktif ^{60}Co çekirdeğinin bozunma şeklini görmekteyiz.



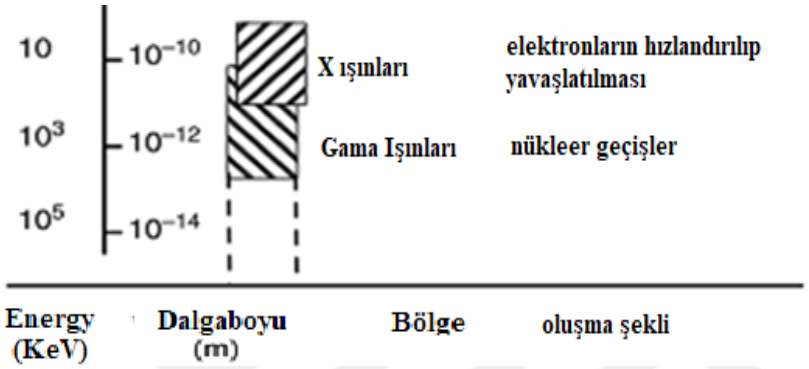
Şekil 4.3. Radyoaktif ^{60}Co çekirdeğinin bozunum diyagramı

$$^{60}_{27}\mathrm{Co}_{33} \rightarrow {}^{60}_{28}\mathrm{Ni}_{32} + \beta^{-} + \gamma_1 + \gamma_2 \qquad (4.3)$$

Denklem 4.3'de gerçekleşen bozunumda ortaya çıkan gama ışınlarının enerjileri $\gamma_1 \approx 1173\ keV$ ve $\gamma_2 \approx 1332\ keV$ olarak tespit edilmiştir (Browne ve Tuli, 2013).

4.1.3. Gama Işınlarının X Işınlarından Farkları

Gama ve X ışınları elektromanyetik spektrumun en yüksek enerjili ışınlarıdır. Genel itibariyle gama ışınlarının sahip olduğu enerjinin X ışınlarının sahip olduğu enerjiye göre daha yüksek olduğunu söylemek her zaman mümkün olmayabilir. Bunun nedeni bu iki ışının elektromanyetik spektrumda bazı bölgelerde kesişmesidir. Bu şekil 4.4'te de bariz olarak görülmektedir (Gilmore, 2008).

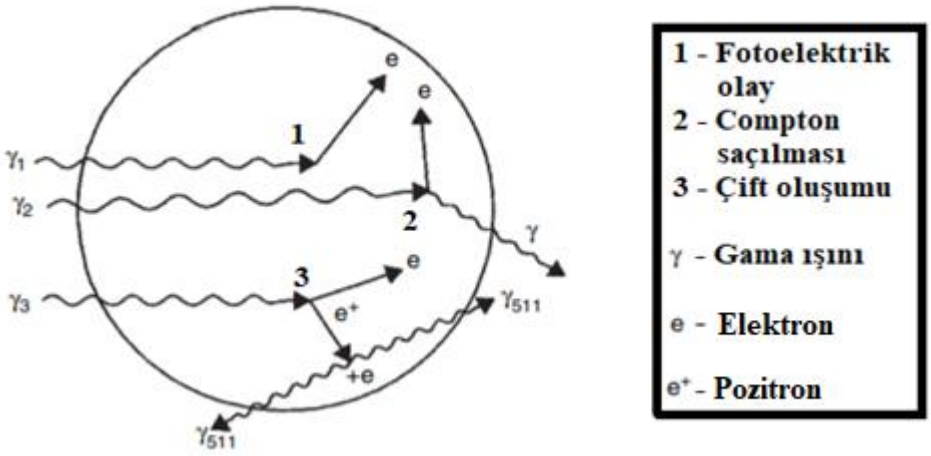


Şekil 4.4. Gama ve X ışınlarının grafiksel gösterimi (Gilmore, 2008)

X ışınları ve gama ışınları aralarındaki en önemli fark nasıl oluştuklarıdır. X ışınları, çekirdek dışındaki elektronların elektron yakalama veya iç dönüşüm (internal conversion) gibi olaylarla yeniden bir enerji düzenlemesine girmesiyle gerçekleşirler. Örneğin, alt yörüngeden kopan elektronun yerini, eğer üst yörüngedeki yüksek enerjili elektron doldurursa, atomik elektronların enerji seviyeleri kadar bir X ışını ortaya çıkacaktır. Burada, çekirdeğin geri tepme enerjisi ihmal edilebilir. Gama ışınları ise genellikle kararsız atom çekirdeği tarafından üretilirler. Yani, temel hal düzeyden farklı bir proton nötron dizilimine sahip olan çekirdek fazla enerjisini gama ışını olarak verebilmektedir. Aynı dalga boyuna sahip ışınların X ışını mı gama ışını mı olduğunu belirlerken sadece dalgaboyunu bilmek yeterli olmayabilir zira sağlıklı bir isimlendirme yapılabilmesi için ışının kaynağının ne olduğunu bilmek gereklidir. X ışını ölçümleri bize olayın hangi elementte olduğu hakkında bir bilgi verebilirken, o elementin hangi izotopu olduğu hakkında bir bilgi vermez. (Gilmore, 2008)

4.2. Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi

Radyoaktif bir kaynaktan yayılan gama ışınları, uyarılmış çekirdeğin yapısı hakkında bilgi edinebileceğimiz önemli bir araçtır. Gamma ışınının, yani elektromanyetik dalganın madde ile etkileşmesi spektrum analizinde büyük bir önem arz eder. Eğer dedektöre giren belirli bir enerji üzerindeki elektromanyetik dalganın (X ışınları ve daha önemlisi gama ışını) dedektörü meydana getiren veya etrafındaki zırhı meydana getiren atomların elektronlarıyla nasıl etkileşime girdiğini anlarsak, hangi koşullarda gelen gamma ışını enerjisinin dedektörde toplanan elektronların oluşturduğu toplam akım ve potansiyelle ilişkilendirilebileceğini de anlayabiliriz. Bunun nedeni çoğu durumda gamma ışını madde ile etkileşmeyecekken bazı durumlarda enerjisinin hepsi, diğer durumlarda enerjisinin sadece bir kısmı dedektörde sinyale dönüştürecektir. Önemli olan dedektör tarafından algılanan kısımdır. Bu yüzden spektrum olarak gördüğümüz sinyalin neyi temsil ettiğini bilmek elzemdir.



Şekil 4.5. Bir dedektör içerisinde gerçekleşen olayların gösterimi (Krane, 1988)

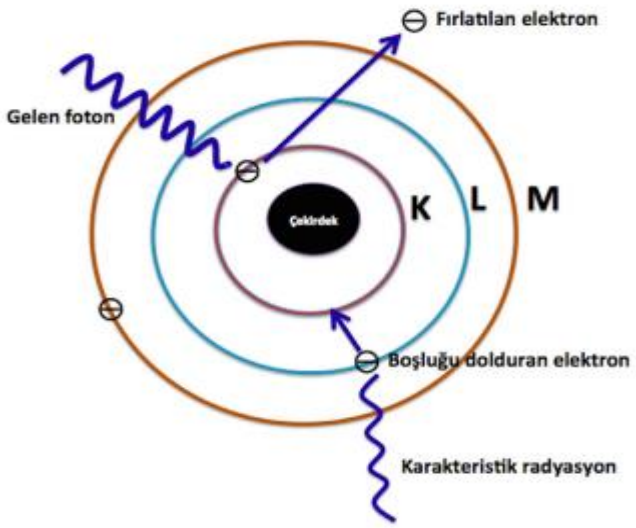
4.2.1. Fotoelektrik Soğurma (Fotoelektrik Olay)

Fotoelektrik olay bir gama fotonunun atomda bulunan elektronlardan biri ile etkileşerek elektronu kabuktan koparması olayıdır. Bu olay sonucunda foton soğurulur. Elektron ise serbest hale gelerek bir kinetik enerjiye sahip olabilir. Bu kinetik enerjiyi (E_e) 4.4'deki denklem yardımı ile bulabiliriz. Burada; E_γ gelen gama fotonunun sahip

olduğu enerji, E_b ise atoma bağlı bir elektronu koparmak için gereken minimum enerji miktarıdır (Gilmore, 2008).

$$E_\gamma = E_e + E_b \tag{4.4}$$

Fotoelektrik soğurma sonrasında ilgili elektron orbitalinden kopan fotoelektronun yerini başka bir elektronun doldurması muhtemeldir. Bu olay sırasında karakteristik X ışınları yayımlanır. Şekil 4.6'da gelen foton soğurularak bir adet fotoelektron yayınlanmıştır. Boş kalan elektronun yerine başka bir elektron geçtiği sırada karakteristik X ışınlarının yayınlandığı şekilde görülmektedir.



Şekil 4.6. Fotoelektrik soğurma olayı ve karakteristik X ışını salınımı

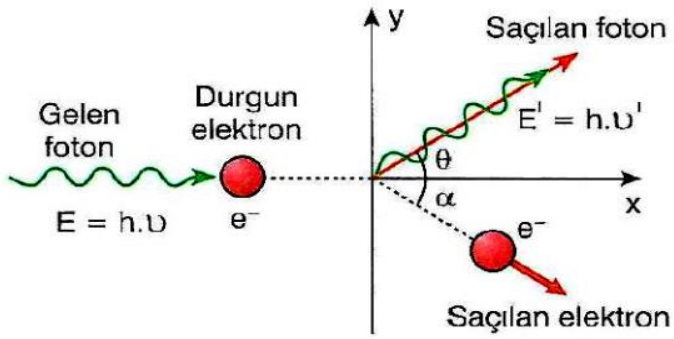
4.2.2. Compton Saçılması

Dedektör malzemesinin atomunun elektronuyla etkileşen gama ışını sahip olduğu enerjinin bir bölümünü bu elektrona aktararak saçılabilir. Bu saçılmada gama fotonuna ait enerjinin bir kısmı elektrona kinetik enerji olarak aktarılacağından saçılan gama fotonunun enerjisi ve frekansı azalırken, dalgaboyunda artış gözlemlenecektir.

Gama fotonu soğurulmayacak ve saçılmaya uğrayıp harekete devam edeceğinden enerjisinin tamamını kaybetmeyecektir. Aşağıdaki 4.5 denkleminde gama ışınının dalgaboyundaki değişim Δλ olarak verilmiştir. Dalga boyundaki değişim miktarı sadece saçılma açısına bağlıdır, çünkü diğer parametreler sabit değerlerdir (Gilmore, 2008).

$$\Delta\lambda = (\lambda' - \lambda) = \left(\frac{h}{m_e c}\right)(1 - \cos\theta) \tag{4.5}$$

Bu denklemde, λ' saçılmadan sonraki fotonun dalgaboyu iken, λ saçılmadan önceki fotonun dalgaboyudur. Sabitler ise sırasıyla, h = Planck sabiti (6,63 x 10^{-34} J.s), m_e = elektronun kütlesi (9,11 x 10^{-31} kg) ve c = boşluktaki ışık hızı (3 x 10^8 m/s) şeklindedir. Tek değişken de görüldüğü üzere saçılma açısı θ'dır (Gilmore, 2008).



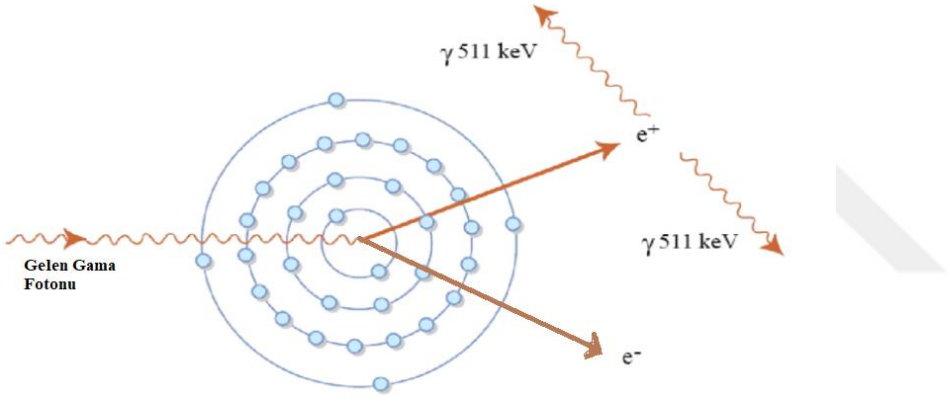
Şekil 4.7. Compton saçılması olayının çarpışma öncesi ve sonrası şematize edilmesi

Compton saçılması gerçekleştikten sonra saçılan gama fotonunun başka etkileşimlere girme ihtimali veya hiçbir etkileşime girmeden dedektörü terk etme ihtimali de vardır. Kristal çekirdeği içerisinde yoluna devam eden gama fotonu fotoelektrik soğurma ile enerjisinin tamamını kaybetme veya tekrardan bir Compton saçılmasına uğrama ihtimali de söz konusudur. Bu yüzden dedektör kristalinin

büyüklüğünün seçimi veya dedektör etrafındaki ekstra zırhlamalar veya dedektörler, toplam enerjinin hesaplamasında çok büyük bir önem arz eder.

4.2.3. Çift Oluşumu

Çift oluşumu işlemi Compton saçılması ve fotoelektrik soğurmanın aksine gama fotonunun, atomun bir elektronu ile etkileşmesi sonucu meydana gelen bir olay değildir. Teoride, bir elektron alanının etkisi altında da çift oluşumu meydana gelebilir, ancak olasılık çok daha düşüktür ve enerji eşiği 4 elektron durgun kütlesidir, bu durum çok ender rastlanılan bir durum olduğundan dikkate alınmaz. Çift oluşumu, fotonun atom çekirdeğinin Coulomb alanı içerisinde çekirdekle etkileşmesiyle meydana gelir. Yani bu olay boşlukta kendiliğinden oluşamaz.



Şekil 4.8. Çift oluşumu ve yok olma olayının şematize edilmesi

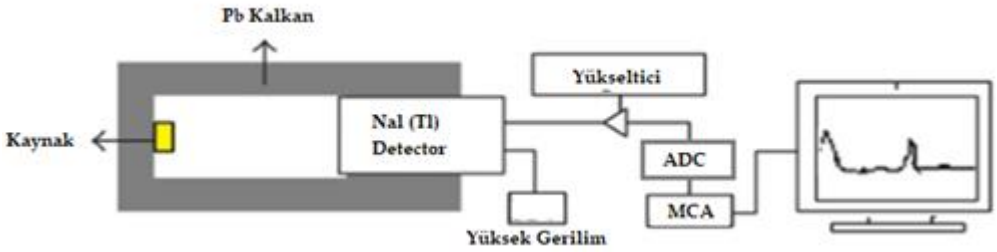
Şekil 4.8'deki olay sonucunda enerjinin korunumundan 4.6 denklemi elde edilir (Gilmore, 2008).

$$E_\gamma = T_+ + mc^2 + T_- + mc^2 \qquad (4.6)$$

Bu eşitlikte E_γ gelen fotonun enerjisi, T_+ oluşan pozitronun kinetik enerjisi, T_- oluşan elektronun kinetik enerjisini vermektedir. Bu enerji denkleminden yola çıkarak çift oluşumunun meydana gelebilmesi için dedektör içerisine gelen foton enerjisinin en az $2mc^2$ yani $E_\gamma = 1.022\ MeV$ olması gerektiği sonucuna varabiliriz. Gelen gama fotonunun enerjisinin $1.022\ MeV$ olduğunu farz ettiğimiz durumlarda T_+ ve T_- kinetik enerjilerini sıfır olarak kabul etmiş oluruz.

4.3. Dedektörler

4.3.1. Dedektörlerin Çalışma Prensibi



Şekil 4.9. NaI dedektörü ve bileşenlerinin şeması

Dedektör tarafından algılanan fotonlar yükselticiler yardımıyla güçlendirilerek önce ADC'ye (analogdan dijitale dönüştürücü) daha sonra bir elektrik sinyali olarak MCA'ya (çok kanallı analizör) gönderilir. Gelen voltajın büyüklüğüne göre ayırılan sinyaller sınıflandırılarak histogram adı verilen grafiksel ifadelere dönüştürülür. Gama spektrumu genel anlamda bu şekilde analiz yapılabilecek spektrumlara dönüştürülür. Genel itibariyle, enerji kalibrasyonundan önceki yatay eksen kanal numarasını, dikey eksen ise sayım sayısını yani olay frekansını (olma sıklığını) göstermektedir.

Dedektörler, içlerine giren parçacık veya elektromanyetik dalgaları dedektör maddesi içinde kısmi veya bütün enerjilerini kaybettikleri sürece algılamak üzere geliştirilmiş aygıtlardır. Dedektörden kaçan veya dedektör içinde enerjisini kısmen kaybeden bir parçacık veya elektromanyetik dalga için dedektörle temastan önceki toplam enerjiye ulaşmak ise mümkün olmayacaktır. Asıl arzulanan ise toplam enerjinin hesap edilmesidir. Bu durum büyük veya yeterince kalın bir dedektör tasarlanıp, parçacığın veya elektromanyetik dalganın bütün enerjisinin dedektör içinde durdurulması ve algılanması ile sağlanabilir. Diğer bir olasılıkta çok katmanlı ve yeterince kalınca olmayan dedektörler yapılarak, her bir dedektörde kaybedilen ΔE enerji kayıplarının toplamıyla dedektöre ilk giren radyasyonun toplam enerjisine ulaşılabilir. Bu işlemde, sistemin yaptığı aslında etkileşim adımlarını geriye sararak arada dedektörde algılanan enerjinin gerisin geriye hesaplanıp, ilk giren parçacığın

enerjisini hesaplamaktır. Ancak o zaman, dedektöre giren her parçacık veya parçacılar bütünün toplam enerjisini temsil eden bir sinyal oluşturulabilir.

Bu bilgiden yola çıkarak dedektörleri iki ana başlıkta inceleyebiliriz:

1. Sinyal tipi sistemler: Bu tip sistemler içerisine giren her parçacık için ayrı bir voltaj oluşturur ve her parçacığı ayrı ayrı algılar.

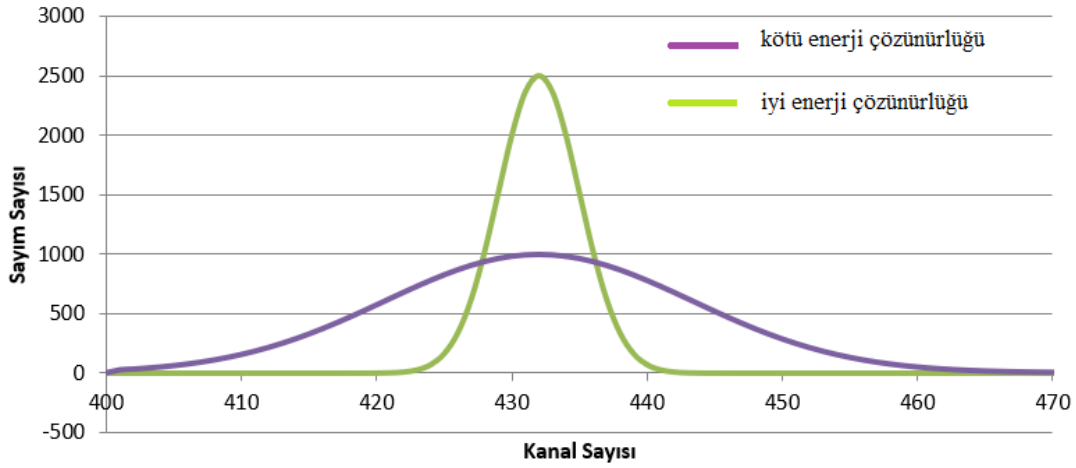
2. Akım tipi sistemler: Bu tip sistemlerde çıkış akımı ortalama bir değerdedir. Çıkış akımı birçok parçacığın oluşturduğu voltaj değerlerinin ortalama değeridir (Tsoulfanidis ve Landsberger, 2015).

Sinyal tipi sistemler akım tipi sistemlere göre çok daha avantajlıdır. Çünkü sinyal tipi sistemlerde elde edilen çıktı, dedektör ile etkileşen her parçacık için ayrı bir sonuç elde etmemizi sağlar. Bu da enerji çözünürlüğünde sinyal tipi sistemleri öne geçirmektedir. Bu nedenlerden dolayı günümüzde sinyal tipi sistemler kullanılmaktadır.

Sinyal tipi sistemlerin karşılaması gereken özellikler aşağıda listelenmiştir.

1- Dedektör içerisine giren her parçacık sayaç çıkışında bir sinyal oluşturacaktır. Bu oluşan voltaj sinyalinin değeri elektronik gürültüden daha yüksek olmalıdır. Bu işlem, yükselteç (preamplifier) tarafından yapılır. Dedektör tarafından algılanan parçacıkların, sayaca iletilen parçacıklara oranı dedektörün verimini belirleyecektir (Tsoulfanidis ve Landsberger, 2015).
2- Dedektöre birbiri ardınca giren parçacıkların hepsinin algılanabilmesi için sinyal süresi olabildiğince kısa olmalıdır. Böylece dedektöre giren her parçacık ayrı ayrı değerlendirilebilir. Sinyal süresi sayacın ölü zamanının bir ölçüsüdür. Sinyal süresinin uzun olması dedektöre çok parçacık giriyorsa bazı parçacıkların kaybolmasına neden olabilir (Tsoulfanidis ve Landsberger, 2015).
3- Dedektörde algılanan parçacıkların oluşturduğu voltaj ile parçacığın enerjisi arasında bilinen bir ilişki olmalıdır. Bu ilişkiyi belirlemek için dedektörün boyutunun ve parçacığın dedektör içerisinde tüm enerjisini aktarıp aktaramayacağının bilinmesi gereklidir (Tsoulfanidis ve Landsberger, 2015).

4- İki veya daha fazla parçacık dedektörde aynı enerjiyi bırakıyorsa elde edilen voltaj da aynı olmalıdır. Bu durum dedektörün çözünürlüğü ile ilgilidir. Enerji çözünürlüğü bir dedektör için son derece önemlidir. Şekil 4.10 dedektör enerji çözünürlüğü ile ilgili bize öngörü sağlamaktadır (Tsoulfanidis ve Landsberger, 2015)..



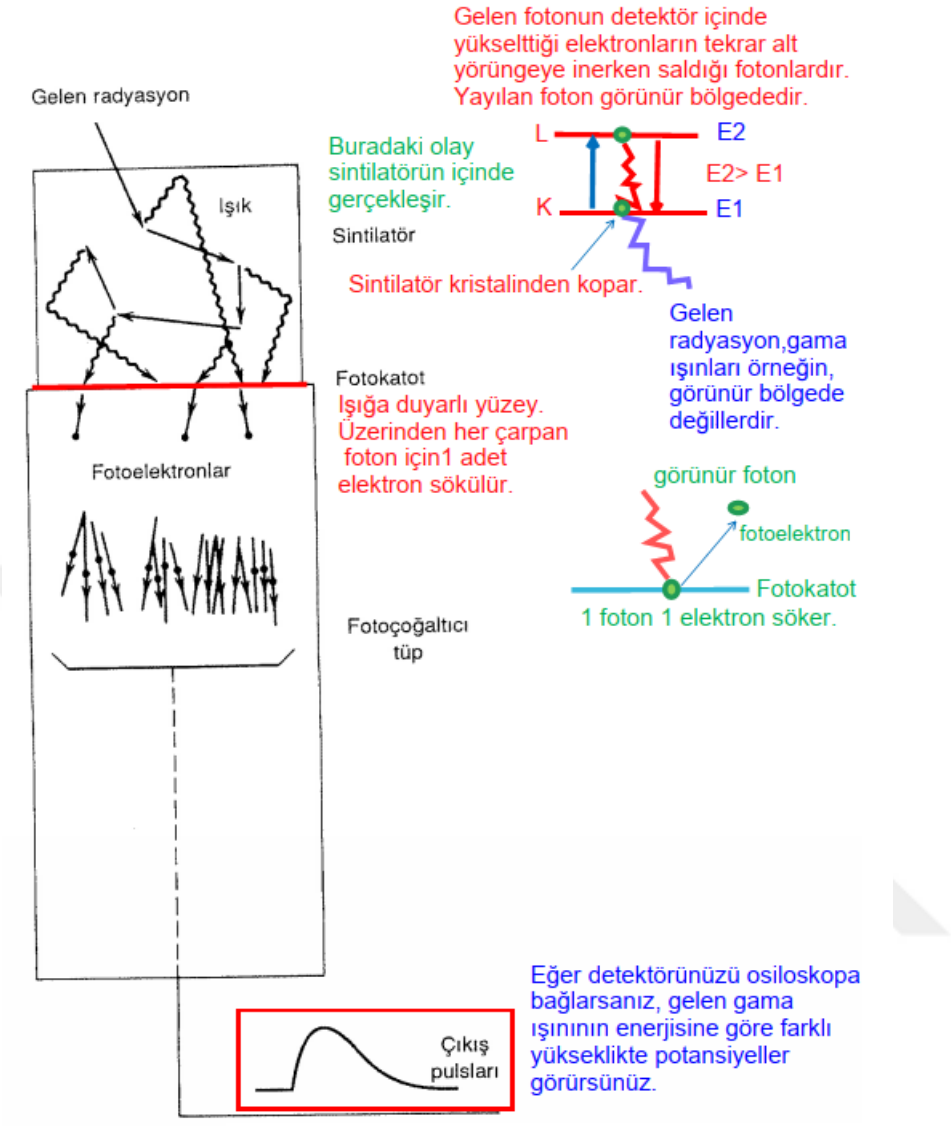
Şekil 4.10. Dedektörlerde iyi ve kötü enerji çözünürlüklerinin Gauss fonksiyonu genişliği ile gösterilmesi.

Elbette ki bu gereksinimlerin tamamını karşılayan bir dedektör yoktur. Çok az dedektör %100 ‘e yakın oranda verimliliğe sahiptir. Deney özelliklerine ve eldeki koşullara ve deney bütçesine göre bu gereksinimlerin çoğunluğunu karşılayan dedektörler seçilmeye çalışılır.

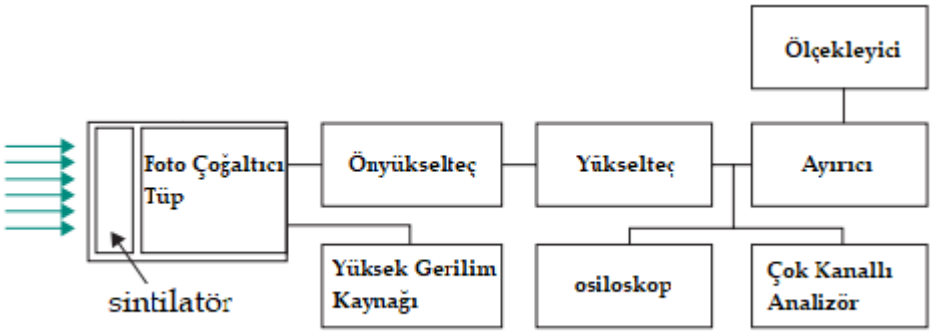
4.3.2. Sintilasyon Dedektörleri

Dedektör seçiminde dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Dedektör materyalinde, dedektöre giren radyasyonun kopardığı elektronları toplamak için yaratılacak yüksek elektrik alanlara dayanabilecek bir materyalden yapılmaları gereklidir. Aynı zamanda, tabansayımı minimuma indirmek için ise, dedektöre radyasyon girmediği zamanlarda oluşacak sinyal yani akım az veya hiç olmamalıdır. Diğer bir husus ise, gönderilen radyasyon dedektör materyalindeki atomlardan bir veya birçok elektronu kolaylıkla koparabilmelidir. Buradaki sorun ise şöyledir: 1. Şarta uyması gereken katı madde yalıtkan türevi olup, ikinci şarta uyabilecek madde

türü ise iletken türündedir. Her ne kadar bu bir çelişki gibi görünse de bu sorun yarı-iletken maddelerin varlığı ile çözülmüştür. Sintilasyon sayaçların bu konuda getirdiği çözüm ise sinyali oluşturan elektronlarla, dedektör materyalinin atomunda iyonlaşma sonucu oluşan elektronları birbirinden ayrıştırmaktır. Yani, bu iki elektron grubu kaynak olarak aynı değildirler. Bu iki elektron arasında bir aracı kullanılır ki, biz buna elektromanyetik radyasyon diyeceğiz. Yani, özetle fotonlardır. Bu süreçte gerçekleşecek olan işlemler aşağıdaki şekil 4.11'da özetlenmiştir. İlk adımda gelen radyasyon dedektöre giriş yapacaktır. Bu radyasyon, dedektör atomlarındaki elektronları uyarıp, bir üst yörüngelere çıkmalarını sağlayabildiği gibi, bağlı oldukları yörüngelerden kopmalarını da sağlayabilir. Sonrasında, bu uyarılmış durumlara geçen atomlardan görünür bölgede veya görünür bölgeye yakın frekanslarda floresans dediğimiz ışıklar yayınlanacaktır. Burada bahsedilen olayın olması atomlardaki elektronların tekrardan düzenlenmesi sayesinde olur ki, bu elektronlar bizim bahsettiğimiz birinci elektron grubudur. Dedektör materyalinde ışığa duyarlı olacak şekilde tasarlanan ve ışığı toplayan mekanizmalar sayesinde bu bölgeye çarpan fotonlar, her foton başına bir elektron sökeceklerdir. Bu bölgelere özel bir isim olan fotokatot denilmektedir. Fotokatot malzemenin yüzey atomlarından kolaylıkla sökülen bu ikincil grup elektronlar ise fotoçoğaltıcı tüpe yönlendirilirler. Bu elektronlar, sırasıyla çoğaltılıp, hızlandırılıp, enerjileri yükseltilerek osiloskoplarda sinyal olarak görülebilecek düzeylere getirilirler. Fotokatotlardan kopan bu elektronlara da ayrıca fotoelektron özel ismi verilir. Buradaki en önemli nokta, fotoelektronları oluşturacak maddede aranan özelliklerdir. Sintilasyon maddesinde aranan özellikler şöyle sıralanabilir: ışık çıkışı yani miktarı, radyasyonun soğurma olasılığı yani verimi, zamanlama ve enerjideki çözünürlüğü yüksek olmalıdır. Ayrıca kullanılacak sintilatörün kolay elde edilebilir ve fiyatının uygun olması da önem teşkil eder. Bu çalışmada, hem fiyat performans olarak iyi bir durumda olan, hem de sıvı hidrojenle soğutmaya ihtiyaç olmadan sadece oda koşullarında, karanlık veya loş, nemsiz ve kuru bir ortamda, sıradan bir elektrik düzeneği ile çalıştırılabilecek ve kısmen portatif olan NaI(Tl) dedektörünü kullanıldı. Şekil 4.11'da ise bu düzeneğin bağlantı şemasını inceleyebilirsiniz.



Şekil 4.11. Sintilasyon dedektörü bileşenleri ve bağlantı şeması (Krane, 1988)



Şekil 4.12. Sintilasyon dedektörü bileşenleri ve bağlantı şeması

4.4. Çok Kanallı Analizör (MCA) İşlem Basamakları

Çok kanallı analizörler (MCA) gerçek zamanlı olarak deney süresince dedektörde gerçekleşen etkileşimleri sayıp, belli bir kurala göre onları kategorilere ayıran bir aygıttır. Şekil 4.13'de basit bir görünümü gösterilmektedir. Bu gruplandırma olayı bazı karakteristiksel özelliklere bağlı olmakla beraber, aynı grup altında değerlendirilen olaylar aynı binler yani kanallar altında depolanırlar. Bu binlere veya kanallara şekil 4.14 bir örnek görülebilir. Nükleer fizikte en çok uygulama alanı olan MCA potansiyel yükseklik analizörü (PHA) denilen bir tiptir. Bu türde, sinyal Y ekseni olarak sistemde oluşan elektronların oluşturduğu akımın potansiyel karşılığı kullanılmaktadır. Bu olayları anlamak için daha önceden de bahsettiğimiz dedektörlerin çalışma prensipleri ve oluşan elektronların nasıl sisteme akım olarak katıldığını bilmek gerekmektedir. Radyasyonların dedektör atomlarının elektronlarıyla yaptığı etkileşimler sonucu oluşan sinyaller, gelen radyasyonların enerjileriyle doğru orantılıdır. Sayım sistemlerinin bir diğer parçası ise analogdan dijitale dönüştürücü (ADC) kısmıdır. Bu parçaların amacı dedektöre gelen ve oluşan her bir sinyali bir kanala atayarak depolamaktır. Böylelikle her bir kanal, dar bir dikdörtgen ile sembolize edilen ve bin dediğimiz sinyal yüksekliği yani frekansı (sayım sayısı) veya potansiyeline karşılık gelir. Dedektördeki radyasyonu algılama süresince, her yeni gelen ve oluşan sinyale karşılık MCA tarafından hafızada farklı sinyal yüksekliklerine yani frekanslarına veya sayım sayılarına karşılık gelen bir sıra sayım dağılımı kaydedilir. Buna bir örnek ise şekil 4.17'de görülebilir. Bu hafızada, aynı enerjiye denk gelen radyasyon sinyalleri aynı kanallarda toplanacak şekilde gruplanırlar. Oluşan bu dağılım grafiğinde sinyalleri oluşturan veri noktaları düşük enerjiden yüksek enerjiye doğru, ilk kanaldan sistemin son kanalına doğru bir sırlamaya konulur. MCA sistemleri genelde 1024 ve onun katları kadar kanal sayısı içerirler. En yaygın olanları genelde 1024 ve 2048 olanlarıdır. Bu ayarlamalar yapılacak işlemin özelliğine ve istenen pik çözünürlüklerine göre seçilmelidir. MAESTRO gibi bazı programlarda bu kanal sayıları sabittir ve sonradan değiştirilemez. Bu yüzden başka programlar kullanmak ve bilmek analiz yapmada elimizi kolaylaştıracak ve bize esneklik kazandıracaktır. Oluşan bu grafiksel gösterime spektrum adı verilmektedir ve dediğimiz gibi kanal sayısı arttıkça, onun temsil ettiği enerji miktarı da o veri noktası için artar. Bu spektrumun MAESTRO veya

SCINTIVISION gibi programlarca kullanıcıya sayım sonrası text formatında kaydetme olasılığı vermesi analiz yapmak açısından çok önemlidir. Bu kayıt işlemi ayrıca programın kendi kayıt formatlarında da yapılıp, tekrar tekrar sonradan açılıp, analize devam edilebilmektedir. Kaydedilen bu spektrumlara aynı zamanda histogram adı da verilmektedir. Şekil 4.33'de ilerleyen bölümlerde bu histogramın MAESTRO programındaki veri noktası şeklindeki farklı bir görünümünü inceleyebilirsiniz (A65 – B32 Maestro Manual).

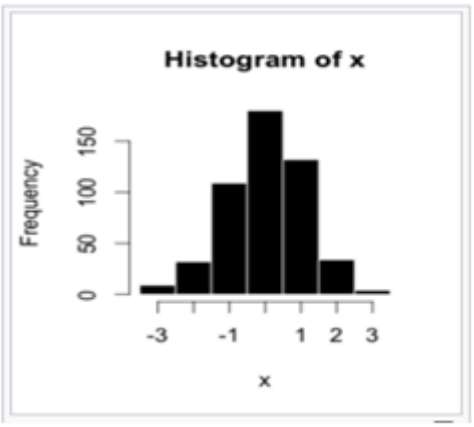


Şekil 4.13. ORTEC Firmasına ait bir MCA ünitesi cihazı görüntüsü

4.5. Histogram

Histogram sayısal verilerin dağılım şeklinde bir gösterim biçimidir. Aşağıda hücre aralıkları eşit bir histogram verilmiştir.

kanal numarası	sayım sayısı
−3,5 ila −2,51	9
−2,5 ila −1,51	32
−1,5 ila −0,51	109
−0,5 ila 0,49	180
0,5 ila 1,49	132
1,5 ila 2,49	34
2,5 ila 3,49	4



Şekil 4.14. Histogram gösterimi

Histogramı oluşturabilmek için öncelikle hücre aralıklarının belirlenmesi gerekir ve ölçümü yapılan veriler ilgili hücre aralığına yerleştirilir. Bu hücre aralıkları kanal veya bin genişliği olarak isimlendirilir. Hücre aralıklarının belirlenmesi histogram oluşturmada hassas önem taşır. Hücre aralıklarının yanlış belirlenmesi histogramdan verilerin okunamamasına ya da çok zor okunmasına neden olacaktır.



Şekil 4.15. Hücre aralıkları çok geniş belirlenen histogram



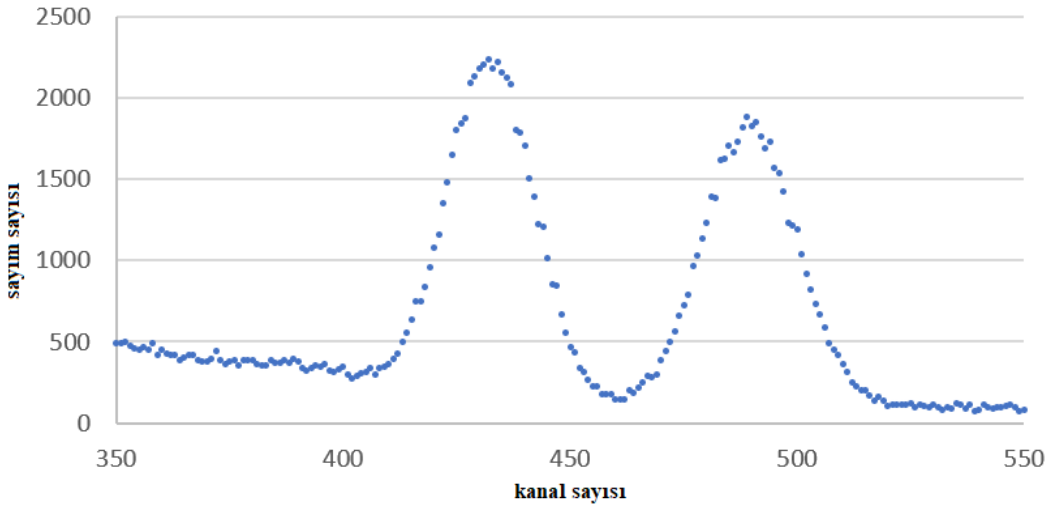
Şekil 4.16. Hücre aralıkları çok dar belirlenen histogram

Hücre aralığı çok geniş olan histogramlarda, sayımlar belli başlı kanallara birikecek ayrıca veriden anlam çıkarılması çok güç olacaktır. Hücre aralığının çok dar olması durumunda her hücre aralığına az miktarda sayım geleceğinden piklerin oluşmamasına yol açabilir. Bu nedenledir ki gama pik analizi yapılırken dedektörün çözünürlüğü ve binlerin genişliği dikkate alınarak en kullanışlı histogram oluşturmak gerekir.

Elbette, hücre aralıklarının eşit olması zorunlu değildir. Yapılan ölçümün özelliklerine ve istenen sonuca göre hücre aralık değerleri belirlenebilir. Ölçüme karşılık gelen hücre aralığına yerleştirilen sayımlar istiflendikçe o hücrenin yüksekliğinde artış meydana gelecektir. Böylece histogram oluşturulmuş olacaktır.

Histogramları istatistiki verilerin işlenmesinde veya gelecekteki ölçümlerin tahmin edilmesinde de kullanabiliriz. Bir histogramın oluşabilmesi için yeterli miktarda veri gereklidir. Yapılan ölçümlerin (istatistiğin) yetersiz olması durumlarında histogramlardan kabul edilebilir veriler elde edebilmek zorlaşır.

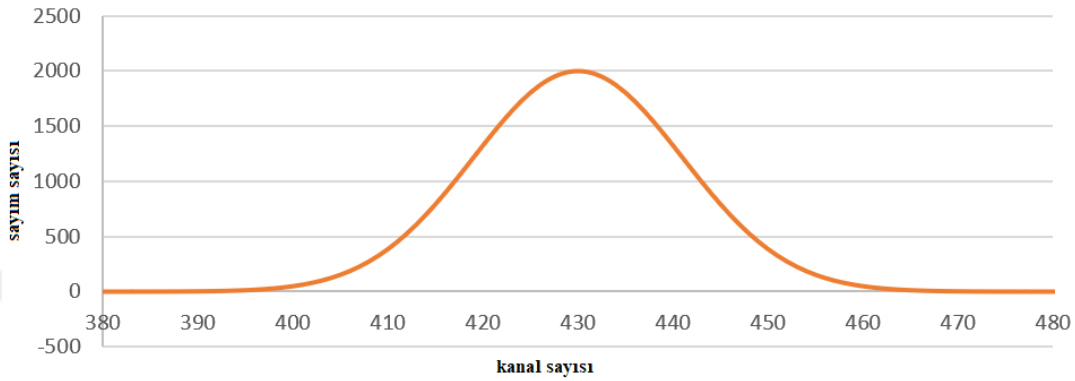
Gama pik analizi yapılırken hücre aralığını belirlemede en önemli etken dedektörün çözünürlüğü olacaktır. Dedektörün çözünürlüğünün yüksek olması, hücre aralıklarının yani kanal adını verdiğimiz bölmelerin daha dar olmasını sağlar. Gama piklerine ait histogramlar oluşturulurken, kaynaktan gelerek dedektör ile etkileşen ve enerjisi ölçülen her bir foton için bir sayım, o fotonun enerjisine denk gelen kanala yerleştirilecektir. Bu nedenle, sayım sayıları arttıkça aynı enerjili kanala denk gelen ve sayım sayısını gösteren Y ekseni yüksekliklerinde artış görülecektir. Sonuç olarak ise, elimizde analiz etmek için histogram formatında bir gama spektrumu belirecektir. Aşağıdaki şekil 4.17'de farklı bin (kanal) sayılarına denk gelen sayım sayıları noktalarla gösterilmiştir.



Şekil 4.17. ^{60}Co radyoaktif kaynağına ait 1173keV ve 1332keV enerjilerindeki piklerin denk geldiği kanalları gösteren bir gama spektrumun gösterimi

4.6. Gauss Dağılım Fonksiyonu

Radyoaktif bozunum spektrumlarında pikleri incelediğimizde Gauss dağılımına uygun olduğunu gözlemleriz. Gauss dağılımı olarak da bilinen normal dağılım istatistikte sıkça karşımıza çıkar.



Şekil 4.18. Gauss dağılım fonksiyonuna bir örnek.

$$y = f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\, e^{\left[\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \tag{4.7}$$

Denklem 4.7'de verilen Gauss formülünde $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ değeri yüksekliği olasılık fonksiyonunda yüksekliği temsil etmektedir. Sigma (σ) standart sapmayı yani pikin genişliğini veren parametreyi açıklarken, μ ise orta değeri göstermektedir.

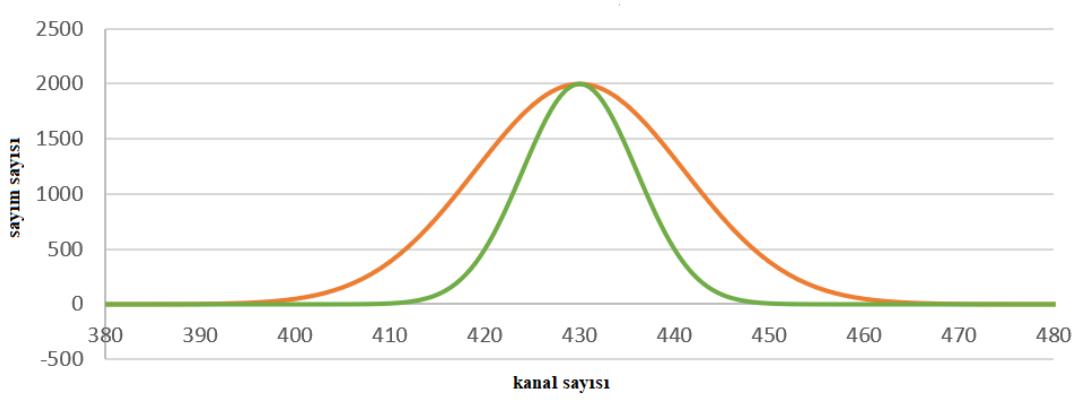
Tesadüfi değişkenlerden oluşan bir histogramda veriler simetrik ve sürekli bir fonksiyon üzerinden incelenebilir. Elbette ki her durumda elde edilen veriler normal dağılım ile uyum göstermeyebilir. Binom ve Poisson dağılımları da verileri incelemek açısından faydalı olabilir. Eldeki verilerin hangi dağılıma uygun olduğunu belirlemek amacıyla veriler görsel olarak incelenebilir veya bazı testler yapılabilir. Testler sonucunda hangi dağılıma uygun olduğu bulunur. Verilerin incelenmesinde, histogramlar yerine Gauss fonksiyonu gibi sürekli bir fonksiyon kullanmanın birtakım avantajları olacaktır. Örneğin; histogramda bazı hücrelerde hiç sayım olmamış olabilir. Böyle durumlarda fonksiyon üzerinden bilinmeyen bu veriyi kolaylıkla, formül ve fit parametreleri vasıtasıyla çekebiliriz. Yani, bilinen bir x değeri için, bilinmeyen bir y

değerini, veri üzerine yapılan fitten bulduğumuz fit parametreleri yardımyla kolaylıkla bulabiliriz.

Normal dağılımla uyumlu bir veri grubunu ele alırsak, elde edilen veriler arttıkça oluşan histogramın şeklinin çan eğrisine (normal dağılım) benzerlik göstermesi beklenir. Nükleer fizikte, radyoaktif maddelerden çıkan gama radyasyonunun verilerinin Gauss fonksiyonuna uyduğu genel kabul gören bir kanıdır.

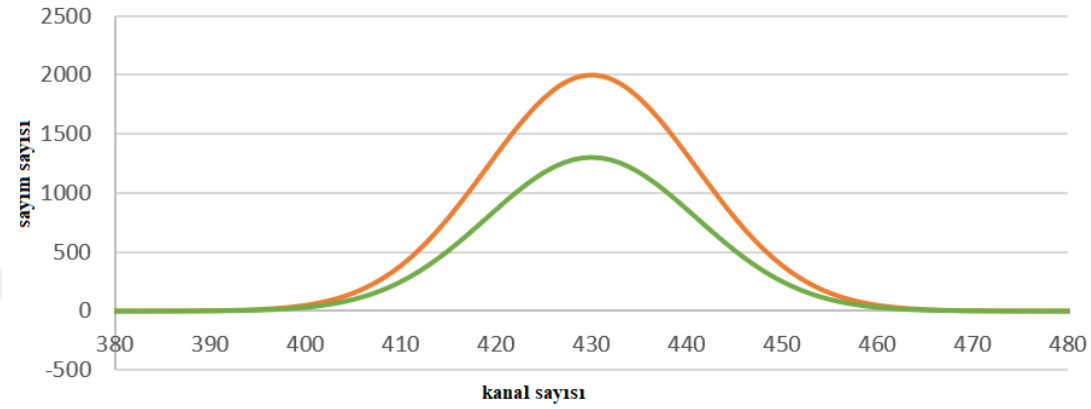
Normal dağılımın sağ tarafındaki ve sol tarafındaki eğriler simetrik olup, gerçek verilerde bu simetriyi yakalamak oldukça zordur. Normal dağılımın incelenebilmesi için standart sapma, orta değer ve yükseklik gibi parametrelere ihtiyaç duyulur. Gelişmiş bilgisayar programlarıyla yapılacak fitler yardımı ile bu değerleri hesaplamak mümkündür.

Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21'da vurgulanmak istenen, fit fonksiyonu için kullanılacak olan Gauss fonksiyonunun parametrelerindeki değişikliklerin spektrumda nasıl gözleneceğini görsel hale getirmektir. İlk grafikte aslında sigmaların dedektör çözünürlüklerini değerlendirmede nasıl etkin olduğu görülmektedir. Dar pikler genelde HPGe dediğimiz, saf Germanyum dedektörlerinde gözlenirken, geniş pikler NaI dediğimiz sodyum iyodür sintilasyon dedektörlerinde görebileceğimiz piklere birer örnektir. Pikleri ne kadar dar olursa, dedektörümüzün enerji çözme gücü o kadar iyi olacak demektir ve pikleri birbirinden ayırmak o kadar kolaylaşacaktır.

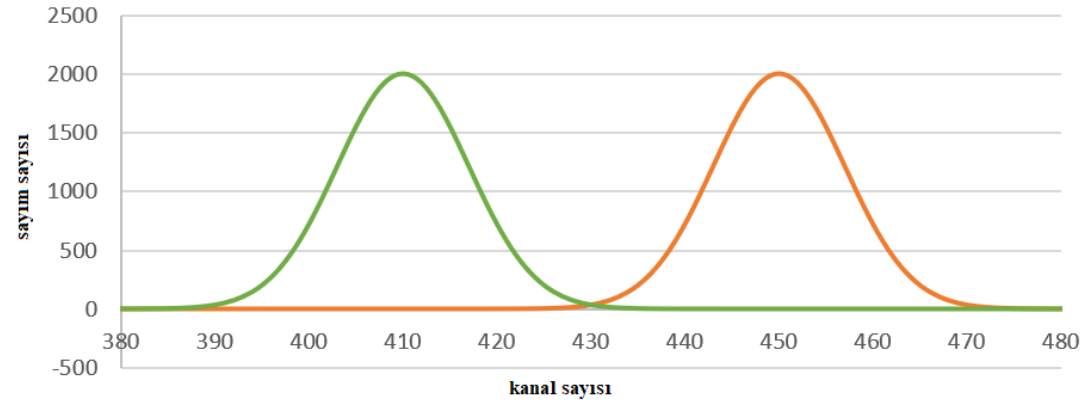


Şekil 4.19. Yükseklikleri ve orta değerleri eşit, standart sapmaları birbirinden farklı iki Gauss fonksiyonu

Şekil 4.20'de ise orta değer ve pik genişlikleri aynı olan; fakat pik sayım yükseklikleri birbirinden farklı iki pik görülmektedir. Bunun bir sebebi, aynı kaynak için veri toplama sürelerindeki farklılıklar olabilir. Bir diğer sebep ise, aktiviteleri farklı iki kaynaktan yayınlanan ve aynı enerjiye denk gelen iki pikin üst üste gelmesi olarak yorumlanabilir.



Şekil 4.20. Orta değerleri ve standart sapmaları eşit, yükseklikleri birbirinden farklı iki Gauss fonksiyonu



Şekil 4.21. Standart sapmaları ve yükseklikleri eşit, orta değerleri birbirinden farklı iki Gauss fonksiyonu

Şekil 4.21'de ise tek bir kaynaktan yayınlanan ve tamamen farklı enerjilere denk gelen ve dolayısıyla farklı kanallara kaydedilmiş iki pik görmekteyiz. Tesadüfen, sayım sayılarının aynı olduğu yorumun ise yapabiliriz. Bu bilgiler sadece yukarıdaki 3 farklı grafiği biraz olsun daha anlaşılır kılmaktır.

4.7. Gama Pik Analizinin Yapılış Nedenlerine Bir Örnek

Aktivite hesabında gama pik analizi yapılır ve net pik alanı formülde kullanılır.

$$A = \frac{N_{E\gamma}}{\varepsilon_{E\gamma} P_{E\gamma} t} \tag{4.8}$$

4.8'de verilen denklemde semboller aşağıda karşılarında verilen değişkenleri temsil etmektedir (Krane, 1988)

A = Aktivite (Bq)

$N_{E\gamma}$= Belli bir pikin net sayım sayısı

$P_{E\gamma}$= Belli bir fotopik enerjisine denk gelen gama ışınının yayımlanma olasılığı

t = Sayım süresi (saniye)

$\varepsilon_{E\gamma}$= Belli bir fotopik enerjisine denk gelen dedektör verimi

4.8. Gama Piki Sayım Sayılarının Bulunması

4.8.1. Toplam Sayım Sayısı ve Net Sayım Sayısı Bulunması

Dedektörler yardımı ile bulunan enerji kalibrasyonu yapılmamış bir gama spektrumunu ele alırsak bu spektrumun tamamının ölçüm yapmak istediğimiz radyoaktif kaynaktan geldiğini söylemek mümkün değildir. Spektrum, radyoaktif kaynaktan gelen gama ışınlarının yanı sıra, radyoaktif kaynak dışından gelerek dedektör ile etkileşime giren ışınları da gösterecektir. Radyoaktif kaynaktan gelerek pike ait olmayan bir kısım gama ışınları vardır. İşte bu bahsettiğimiz sayımların tamamına tabansayım denir. Ölçümü yapılan Gama pik alanı analizi yapılırken net pik alanını bulmak için öncesinde tabansayım alanının bulunması gerekir. Toplam alan diye isimlendirdiğimiz pikin bütün alanı bulunur ve önceden elde edilen tabansayım alanı bu toplam alandan çıkarılarak net alan bulunabilir. Tabansayım alanının farklı kaynakları olabilir. Çoğu durumda tabansayım dedektör içindeki diğer gama ışını

etkileşmelerden Compton sürekliliğini temsil edecektir. (Gilmore, 2008). Elbette ki tabansayım sadece Compton sürekliliğinden gelmeyecektir. Dedektör çevresinde kalkan olarak kullanılan malzemeden tutun dedektör içerisinde olan diğer etkileşmeler de tabansayım oluşumunda etkili olacaktır. Bunlara uzaydan gelen kozmik ışınları da ekleyebiliriz. Bunun üzerine tabansayım alanının birden çok kaynağı olduğunu söylemek mümkündür.

Pik alanı analizinde en önemli detay tabansayım değerini bulmaktır. Bunun için birkaç klasik yöntem belirtmek gerekirse, Covell yöntemi, TPA (Toplam pik alanı) yöntemi ve Gilmore TPA (Toplam Pik Alanı) yöntemlerinin sıralayabiliriz. Modern bilgisayarlar aracılığı ile işlem yapmak istersek ise Maestro Software programı bütün dünyada en yaygın kullanılan programlardan biri olarak karşımıza çıkacaktır. Modern bilgisayarlar aracılığı ile net alan hesabı yapmak istersek başka yöntemler de kullanılabilir. Şunu da unutmamalıyız ki hangi yöntemi kullanırsak kullanalım, tabansayım değerlerini kesin olarak bulmamız imkansızdır. Çünkü kanalın içerisindeki sayımların hangisinin tabansayım olduğunu asla kesin olarak tahmin edemeyiz. Elimizdeki veriler ve istatistiki bilgilerden faydalanarak gerçeğe yakın tabansayım değerini tahmin etmeye çalışırız.

4.8.2. Gama Pik Analizinde Hata Miktarı Hesabı

Gama pik analizlerinde bulunan toplam sayım sayısı, tabansayım sayısı ve net sayım sayılarının her biri için hata miktarı hesabı yapmak elzemdir. Hata miktarını hesaplamak için varyans ve standart sapma bulmak gerekir. Nükleer fizikte varyans yapılan sayım sayısına eşit olarak kabul edilir (Gilmore, 2008).

Eğer N_1 ve N_2 gibi iki değerin toplamının varyansı bulunacaksa denklem 4.9'dan faydalanılır (Gilmore, 2008).

$$Var(N_1 + N_2) = Var(N_1) + Var(N_2) \tag{4.9}$$

Eğer k.N gibi sayım sayısının bir sabit ile çarpılmış halinin varyansı bulunacaksa denklem 4.10'dan faydalanılır (Gilmore, 2008).

$$Var(k \times N) = k^2 Var(N) \tag{4.10}$$

Varyans değeri denklem 4.11'de görüldüğü gibi standart sapmanın karesine eşittir (Gilmore, 2008).

$$Var(x) = \sigma_x^2 \tag{4.11}$$

Standart sapmanın bulunması için 4.11 denkleminden faydalanarak 4.12 yazılabilir (Gilmore, 2008).

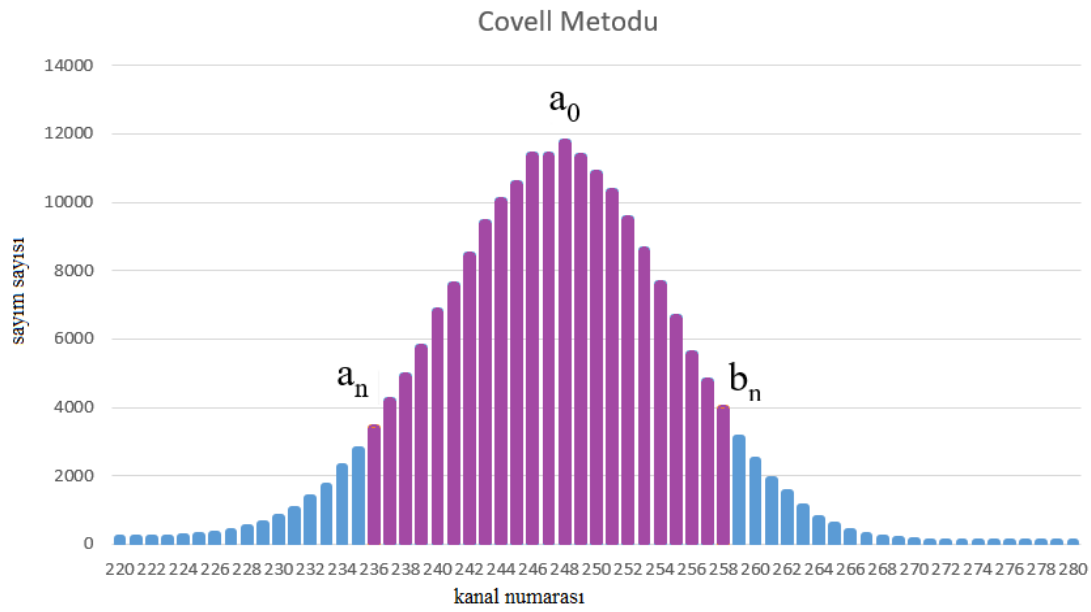
$$\sqrt{Var(x)} = \sigma_x \tag{4.12}$$

4.9. Covell Yöntemi

Bilgisayarla analiz yapmanın mümkün olmadığı yıllarda bir dizi basit yöntem kullanılmıştır. Bunlardan bir tanesi de Covell yöntemidir. Covell yönteminde amaç; gama pikinin merkezi olarak kabul edilen a_0 bininin -n kanal kadar solundaki ve +n kanal kadar sağındaki bölge arasında kalan alanın net sayım sayısını bulmaktır**.**

4.9.1. Covell Yöntemi Toplam Sayım Bulma

Bu metotta merkez olarak kabul edilen a_0 kanalı Covell tarafından hem ortanca kanal hem de en çok sayım sayısına sahip olan kanal olarak tanımlanmıştır. Daha sonraki yöntemlerden ve özellikle fit yöntemlerinde de göreceğimiz üzere, aslında bu pek de doğru bir yaklaşım olmamakla beraber, Covell yöntemiyle alınan cevapların en pratik ve doğruya en yakın olduğu aslında hem diğer akademisyenlerce hem de deney sonuçlarıyla da kanıtlanmıştır. Bu yöntemde orta kanalın sağından ve solundan n adet eşit sayıda kanal seçilir, bu Covell yöntemini diğer yöntemlerden farklı kılan bir noktadır. Toplam sayım sayısı ise a_n ve b_n kanalları da dahil olmak üzere bu kanal aralığında kalan tüm sayım sayılarının toplanmasıyla bulunur.



Şekil 4.22. Covell yönteminde toplam sayım sayısını bulma

$$A_{toplam} = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i + \sum_{i=1}^{n} b_i \qquad (4.13)$$

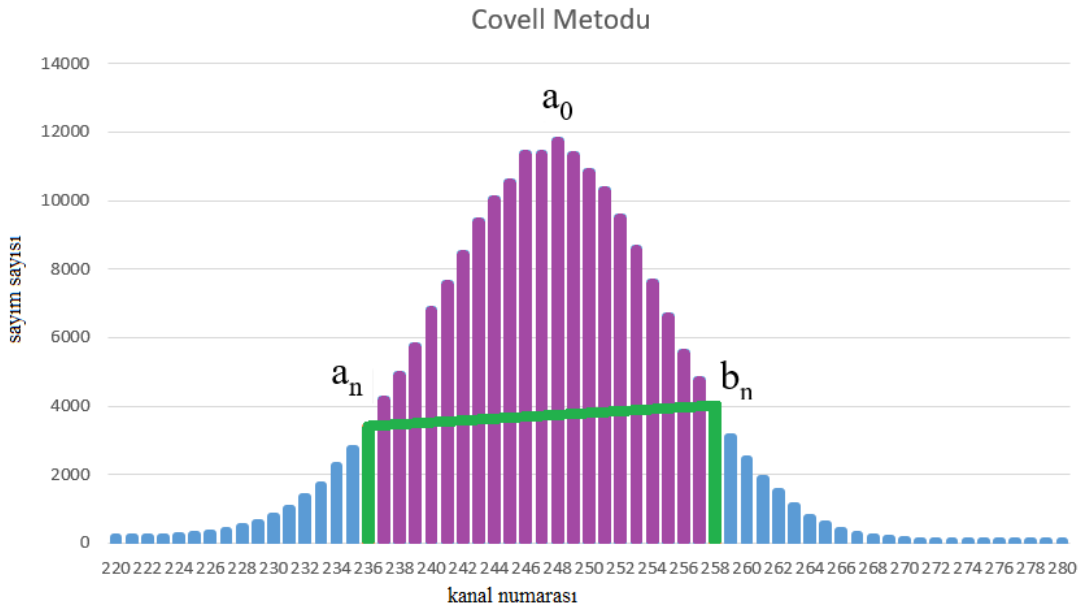
4.13 denkleminde; a_0 = gama pikinin merkezi olarak kabul edilen ve en çok sayım sayılı kanalını temsil eder, a_i = merkez kanalın sol tarafında kalan bölgedeki i. sıradaki kanalın sayım sayısını temsil eder, b_i = merkez kanalın sağ tarafında kalan bölgedeki i. kanalın sayım sayısını temsil ermektedir (Covell, 1959).

Toplam alanın varyansının karekökü toplam sayım sayısının hata miktarını verir (Covell, 1959).

$$\sigma_{A_{toplam}} = \sqrt{\mathrm{Var}(A_{toplam})} = \sqrt{a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i + \sum_{i=1}^{n} b_i} \quad (4.14)$$

4.9.2.Covell Yöntemi Tabansayımı Bulma

Bu yönteme göre tabansayımı; a_n ve b_n kanallarının tepe noktalarının birleştirilmesi ile oluşturulan çizginin altında kalan yamuk şeklindeki bölgenin sayım sayısıdır (Covell, 1959). Denklem 4.15'de n ifadesi merkez kanalın sağ ve sol tarafında kalan bölgedeki eşit sayıdaki kanalların sayısıdır, a_n merkez kanalın solunda seçilen en son kanala denk gelen sayım sayısı iken, b_n merkez kanalın sağında seçilen en son kanala denk gelen sayım sayısıdır (Covell, 1959). Taban sayım sayısı hesabı şöyle de yorumlanabilir: $\left(\frac{a_n+b_n}{2}\right)$ ifadesi aslında bize seçili pik alanın en uç noktalarındaki binlerdeki ortalama sayım sayısını vermektedir. Bu işlem tabansayımı temsil eden bölgeye denk gelen bir kanal başına düşen ortalama sayım sayısını verir. Bu ifadenin $(2n + 1)$ terimiyle çarpılması ise, seçili bütün bir pik alanının altına düşen temsili tabansayımını bize verecektir.



Şekil 4.23. Covell yönteminde tabansayım sayısını bulma

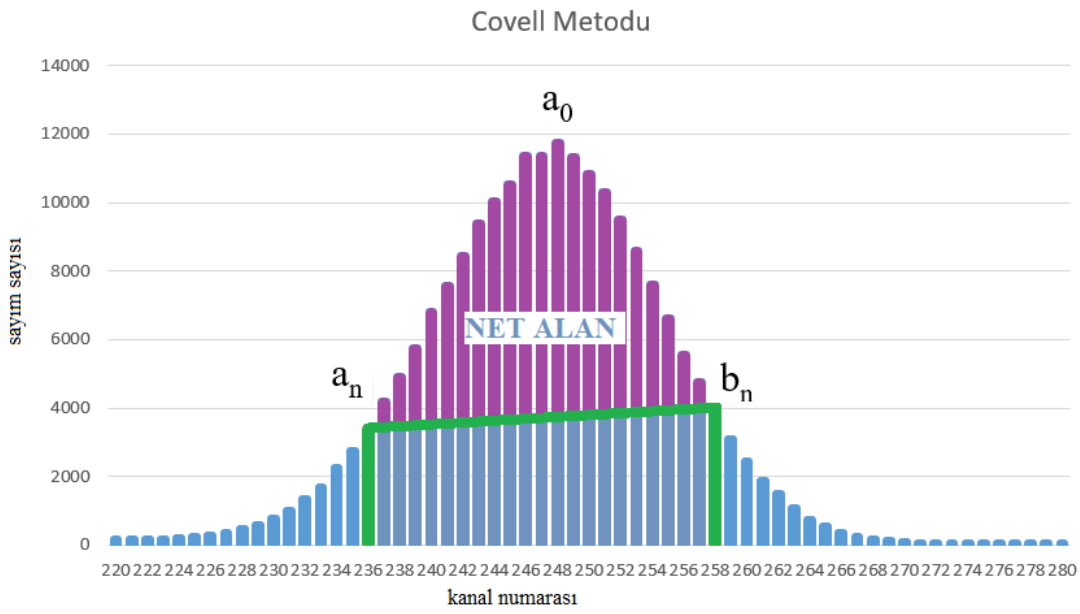
$$A_{tabansayım} = (2n + 1) \times \left(\frac{a_n + b_n}{2}\right) \quad (4.15)$$

4.10 ve 4.12 denklemlerinden faydalanarak tabansayım varyans değeri bulunur ve varyans değerinin karekökü 4.16 denklemindeki tabansayım hata miktarını verir (Covell, 1959).

$$\sigma_{Tabansayım} = \sqrt{\mathrm{Var}(T)} = \sqrt{((n - {}^{1}/_{2})^{2} - 1) \times (a_n + b_n)} \quad (4.16)$$

4.9.3.Covell Yöntemi Net Sayım Bulma

Toplam sayım sayısından tabansayım olarak ifade edilen bölgenin çıkarılmasıyla bulunan bölgedir. Bütün pik analizi yöntemlerinde asıl bulunmak istenen bölge net alan bölgesidir. Fakat her yöntem için tabansayımı hesaplamaları farklılaştığı için, net sayımlarda farklı çıkabilmektedir. Önemli olan hata paylarıyla beraber, aynı aralık değerlerinde çıkmaları ve tutarlı olmalarıdır.



Şekil 4.24. Covell yönteminde net sayım sayısını bulma

4.17 denkleminde Covell yönteminde net sayım sayısı olarak ifade edilen bölgenin alanı verilmiştir (Covell, 1959).

$$A_{net} = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i + \sum_{i=1}^{n} b_i - \left[(2n+1) \times \left(\frac{a_n + b_n}{2}\right)\right] \quad (4.17)$$

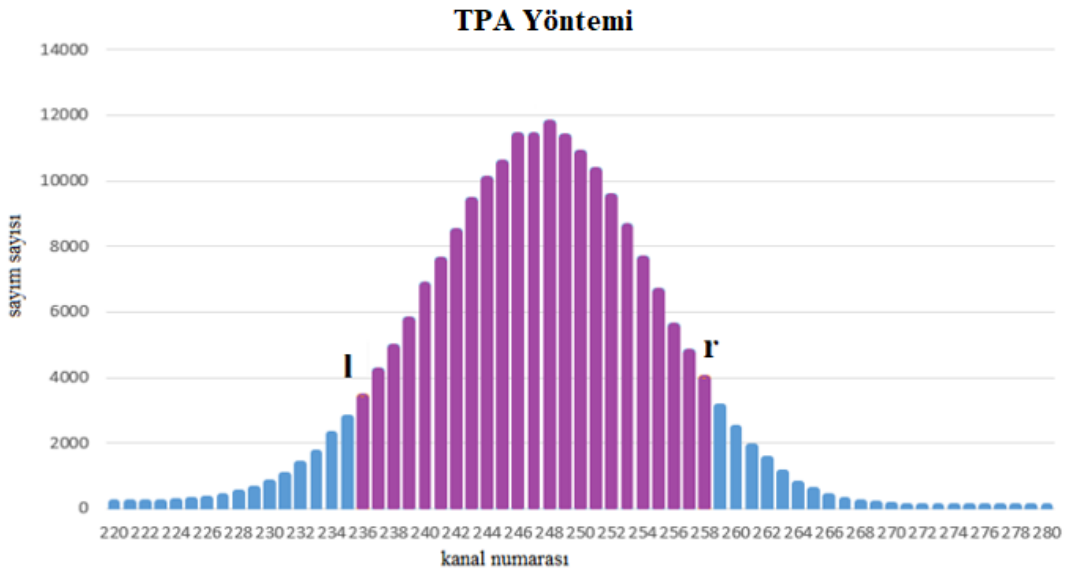
4.10 ve 4.12'dan faydalanılarak 4.18 denklemi elde edilir.

$$\sigma_{A_{net}} = \mathrm{Var}(A_{net}) = \sqrt{A_{net} - \left[\left(n - {}^{1}/_{2}\right) \times \left(n + {}^{1}/_{2}\right) \times (a_n + b_n)\right]} \quad (4.18)$$

4.10. Toplam Pik Alanı Yöntemi (TPA Yöntemi)

4.10.1. TPA Yöntemiyle Toplam Sayım Bulma

Toplam alan bulunurken, seçili pik alanının en solundan en sağına bütün binlerdeki sayım sayıları toplanır. Bu ifade basitçe denklem 4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4.25. TPA yöntemiyle toplam sayım sayısının bulunmasının temsili grafiği.

$$A_{toplam} = \sum_{i=l}^{r} a_i \tag{4.19}$$

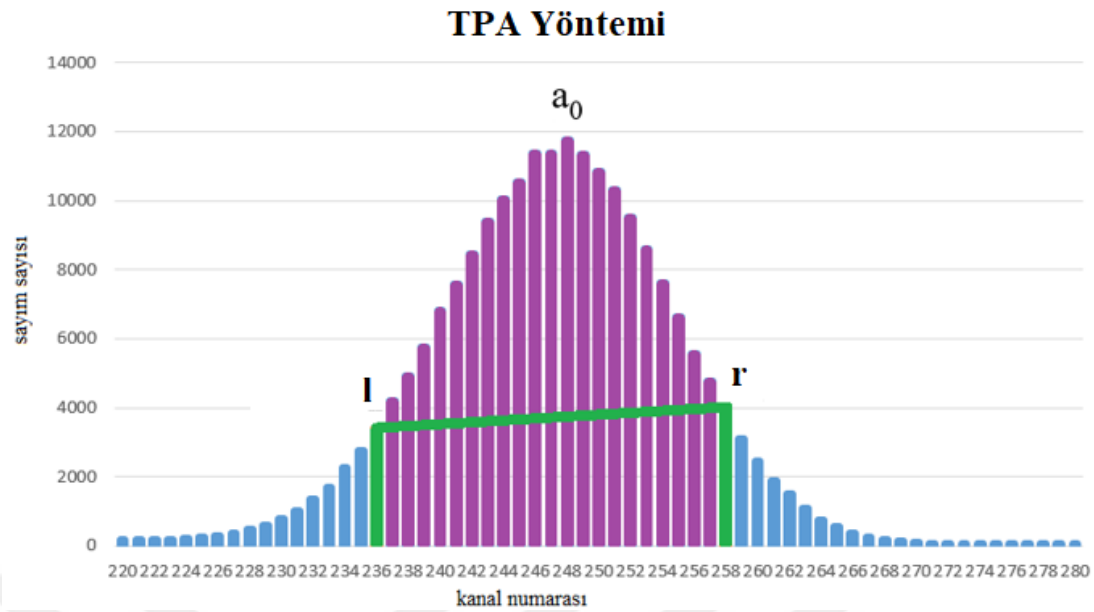
4.19 denkleminde l harfi pikin sol limitindeki kanal sayısını, r harfi pikin sağ limitindeki kanal sayısını, a_i i. kanala ait sayım sayısını vermektedir (Baedecker, 1971).

Denklem 4.10 ve denklem 4.12'den toplam alanın varyansının karekökü toplam sayım sayısının hata miktarını verir.

$$\sigma_{A_{toplam}} = \sqrt{Var(A_{toplam})} = \sqrt{\sum_{i=l}^{r} a_i} \tag{4.20}$$

4.10.2. TPA Yöntemiyle Tabansayımı Bulma

TPA yönteminin farklı yazılış şekilleri farklı makalelerde mevcut olsa dahi, notasyon farkı dışında aslında hepsi formül 4.21 ve 4.22 değerlerini vermektedir (Baedecker, 1971; Kokta, 1973; Loska, 1988). Buradaki tabansayımı formülünde anlatılmak istenen iki adımda açıklanabilir. Birinci adımda, seçili pik alanının sınırlarını belirleyen l ve r harfleri yani sol ve sağ uç kanal numaraları ve bunlara denk gelen sayım sayıları a_l ve a_r değerlerinin ortalamaları bulunur. İkinci adımda ise bu kanallar arasındaki toplam kanal (bin) sayısını ifade eden "$r - l + 1$" terimi ile ilk bulduğumuz ortalama sayım sayısı çarpılarak, seçili pik bölgesini temsil eden tabansayım değerinin temsili ifadesine ulaşılmış olunur (Baedecker, 1971).



Şekil 4.26. TPA yöntemiyle tabansayımı hesabının görsel bir şeması.

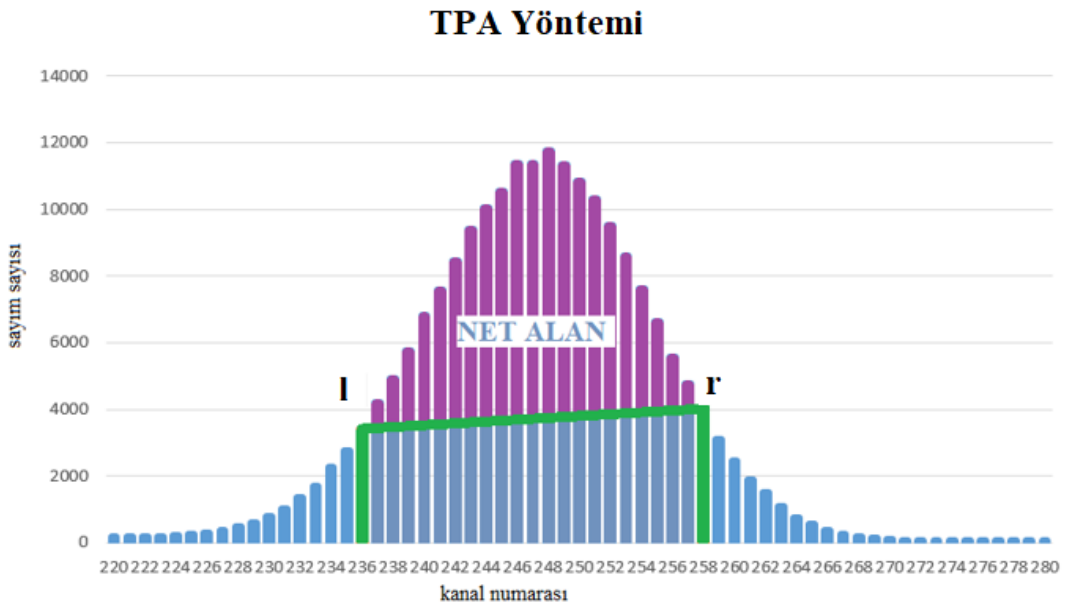
$$A_{tabansayım} = (a_l + a_r) \times \left(\frac{r - l + 1}{2}\right) \quad (4.21)$$

4.10 ve 4.12'den yola çıkılarak tabansayım varyans değeri bulunur ve bulunan değerin karekökü tabansayım hata miktarını verir.

$$\sigma_{Tabansayım} = \sqrt{\mathrm{Var}\left(A_{tabansayım}\right)} = \sqrt{(a_l + a_r) \times \left[\frac{(r - l + 1)}{2}\right]^2} \quad (4.22)$$

4.10.3. TPA Yöntemiyle Net Sayım Bulma

Net sayım sayısını bulmak için toplam sayım sayısından taban sayım değerini çıkarırız. Bulunan değer net sayım sayısını verir.



Şekil 4.27. TPA Yöntemi Net Sayım Sayısı Bulma.

$$A_{net} = A_{toplam} - A_{tabansayım} \tag{4.23}$$

4.23'den yola çıkılarak 4.24 denklemi elde edilmiştir.

$$A_{net} = \sum_{i=l}^{r} a_i - [(a_l + a_r) \times (\frac{r - l + 1}{2})] \tag{4.24}$$

4.24 denkleminde a_l = sol taraftan seçilen kanalın sayım sayısı, a_r = sağ tarafta seçilen kanalın sayım sayısıdır (Baedecker, 1971).

Denklem 4.10 ve 4.12 yardımıyla net alanın varyans değerinin karekökü ile net alanın hata miktarı denklem 4.25'teki gibi bulunur.

$$\sigma_{A_{net}} = \sqrt{Var(A_{net})} = \sqrt{\sum_{i=l}^{r} a_i + (a_l + a_r) \times \left[\frac{r - l + 1}{2}\right]^2} \tag{4.25}$$

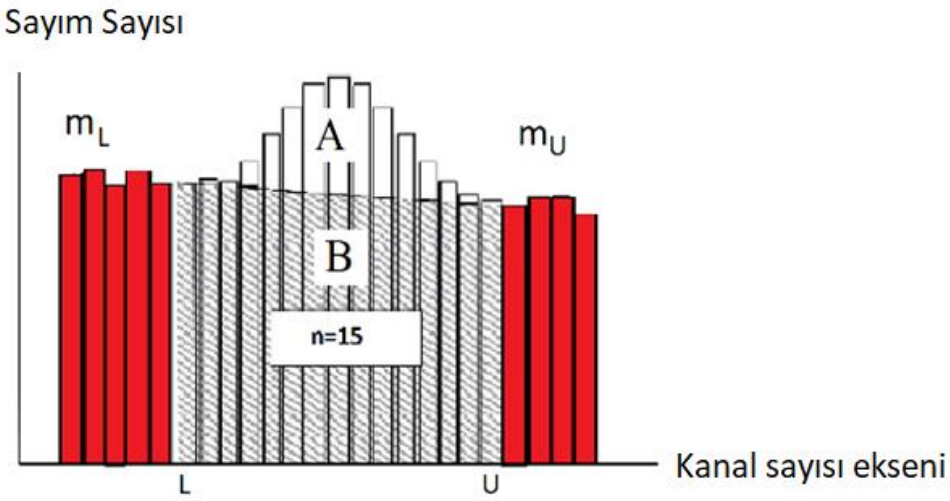
4.11. Gilmore TPA Yöntemi

4.11.1. Gilmore TPA Yöntemi Toplam Sayım Bulma

Bu yöntemde toplam sayım sayısı seçilen L ve U kanalları arasında kalan tüm sayım değerlerinin toplamıyla bulunur. Bu L ve U değerleri, seçili pik bölgesinin en soldaki minimum ve en sağdaki maksimum kanal numaralarını temsilen kullanılmaktadır. Şekil 4.28'de Gilmore'un uyguladığı yöntemin bir temsili görülmektedir.

4.26 denkleminde L ve U kanalları arasında kalan bütün değerler toplanarak toplam sayım sayısı elde edilmiştir (Gilmore,2008).

$$A_{toplam} = \sum_{i=L}^{U} C_i \tag{4.26}$$



Şekil 4.28. Gilmore TPA yönteminin temsili şeması

4.26 denkleminde C_i ifadesi i. kanala ait sayım sayısını vermektedir. L ve U ise alt ve üst toplam sınırlarını veren kanal sayılarıdır. (Gilmore, 2008).

Denklem 4.10 ve 4.12'de gösterdiğimiz gibi toplam alanın varyansının karekökü toplam alanın hata miktarını verir.

$$\sigma_{A_{toplam}} = \sqrt{\mathrm{Var}(A_{toplam})} = \sqrt{\sum_{\mathrm{i=L}}^{\mathrm{U}} \mathrm{C_i}} \tag{4.27}$$

4.11.2. Gilmore TPA Yöntemi Tabansayım Bulma

Tabansayım değerini bulmak için L ve U olarak seçilen binlerden sola ve sağa doğru $\mathrm{m_L}$ ve $\mathrm{m_U}$ kadar isteğe bağlı olarak seçilerek buradaki toplam binlerdeki sayım sayılarının aritmetik ortalaması alınır. Pik bölgesi limitleri dışında kalan bu $\mathrm{m_L}$ ve $\mathrm{m_U}$ kanal sayıları tamamen gözlem sonucu karar verilen sayılardır. Eğer seçili pikin sağ veya sol tarafında hiçbir pik yoksa bu sayılarda oldukça serbest olunabilir. Ama daha önceden (Gilmore 2008) tarafından ve bizim de (Çelik ve Dağlı, 2022) kanıtladığımız üzere bu bin sayılarının seçiminde 3 veya 5 ten fazla seçim yapmak bize pek bir avantaj sağlamamaktadır. Hatta Maestro yazılımında bu başlangıç değeri 3 olarak ayarlanmıştır. Karşılaşılabilecek diğer durumlar ise şöyle özetlenebilir. Seçtiğimiz pikin sağ tarafında, sol tarafında veya her iki tarafında da gerek çok yakın mesafelerde gerekse iç içe geçecek şekilde pikler olabilir. Bu durum bizim $\mathrm{m_L}$ ve $\mathrm{m_U}$ için seçtiğimiz kanal sayılarında sınırlamaya gitmemize sebep olacaktır. Bu değerlerin seçimi bu yüzden, tamimiyle kullanıcıya, analizi yapana veya kodlamaya işlem yapanlara bırakılmıştır. Bu detay ise Gilmore'un yöntemini önceki yöntemlerden tamamen ayırmakta ve analiz eden kişiye daha fazla esneklik tanımaktadır.

Gilmore TPA yönteminde sağ ve sol taraftan farklı kanal sayıları alındığında tabansayımı hesabının nasıl yapılacağı aşağıda denklem 4.28'de verilmiştir (Gilmore, 2008).

$$B = A_{tabansayım} = \mathrm{n} \times \left[\frac{\sum_{\mathrm{i=L-m_L}}^{\mathrm{L-1}} \mathrm{C_i} + \sum_{\mathrm{i=U+1}}^{\mathrm{U+m_U}} \mathrm{C_i}}{(\mathrm{m_L} + \mathrm{m_U})} \right] \tag{4.28}$$

Yukarıdaki denklemdeki çarpımın solundaki ikinci kısım, aslında tabansayımı için belirlenen ve toplamda $m_L + m_U$ sayıdaki kanaldaki toplam sayım sayısının ortalama değerini bize vermektedir. Daha sonrasında çarpılan ve n harfiyle gösterilen toplam kanal sayısı ile de, tabansayımını temsil eden toplam sayım sayısını bulmuş oluruz. Bu formüldeki n terimi daha öncekilerdeki n teriminden farklıdır ve karıştırılmamalıdır.

Denklem 4.10 ve 4.12 kullanılarak tabansayım hatası aşağıdaki gibi bulunur.

$$\sigma_{A_{tabansayım}} = \sqrt{\mathrm{Var(B)}} = \sqrt{\left[\frac{n}{(m_L + m_U)}\right]^2 \times \left[\sum_{i=L-m_L}^{L-1} C_i + \sum_{i=U+1}^{U+m_U} C_i\right]} \qquad (4.29)$$

4.11.3. Gilmore TPA Yöntemi Net Sayım Bulma

Net sayım sayısı; toplam sayım sayısından tabansayım olarak ifade edilen alanın çıkarılmasıyla bulunan alandır. Böylece net alanı veren denklem 4.30'daki gibi yazılabilir (Gilmore, 2008).

$$A_{net} = \sum_{\mathrm{i=L}}^{\mathrm{U}} \mathrm{C_i} - \left\{ \mathrm{n} \times \left[\frac{\left(\sum_{\mathrm{i=L-m_L}}^{\mathrm{L-1}} \mathrm{C_i} + \sum_{\mathrm{i=U+1}}^{\mathrm{U+m_U}} \mathrm{C_i} \right)}{(\mathrm{m_L} + \mathrm{m_U})} \right] \right\} \qquad (4.30)$$

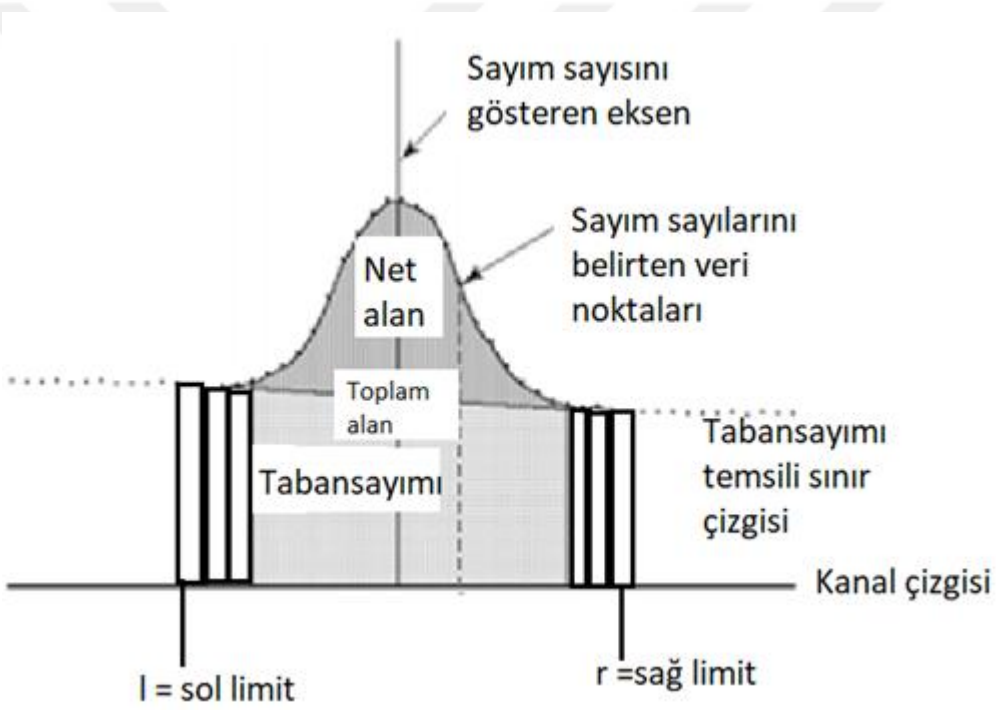
Denklem 4.10 ve 4.12'den net alanın varyans değerinin karekökü net alanın hata miktarını verir.

$$\sigma_{A_{net}} = \sqrt{Var(A_{net})} = \sqrt{\sum_{i=L}^{U} C_i + \left\{ \left[\frac{n}{(m_l + m_u)}\right]^2 \times \left[\sum_{i=L-m_l}^{L-1} C_i + \sum_{i=U+1}^{U+m_u} C_i\right] \right\}} \qquad (4.31)$$

4.12. Maestro Yazılımının Kullandığı Yöntem

Gelişmiş bilgisayarlar insan yaşantısına girmeye başladıktan sonra Maestro Software gibi programları kullanılarak kolaylıkla pik analizi yapılabilmektedir. Bu yazılım sayesinde elimizde olan bir spektrum verisini de analiz etmemiz mümkündür. Program tabansayım bulmak için, nispeten Covell ve TPA yöntemlerinden daha farklı bir yöntem kullanmaktadır. Belirlenen alanda bir pik olup olmadığını bulmak için öncelikle bu alanı Gauss fonksiyonu ile fit etmektedir. Eğer fit edilemezse hesaplama yapılamamaktadır.

4.12.1. Maestro Yazılımı Toplam Sayım Bulma



Şekil 4.29. Maestro yazılımı yöntemiyle toplam alan bulma

Program, pike Gauss fonksiyonu fiti uyguladıktan sonra eğer başarılı olursa bir pik algılayabilmekte ve toplam alan hesaplamasına geçebilmektedir. Aksi halde fit yapılamadı şeklinde uyarı vermektedir. Bunun anlamı seçilen bölgede Gauss fiti yapabilmek için yeterince istatistiğin yani verinin olmamasıdır. Maestro programı analiz yapılması istenen bölge seçilip, fotopik alanı belirli sol ve sağ limitler arasında sınırlandırıldıktan sonra, kullanıcıya sonuç raporu sunabilmektedir. Bu sonuç

raporunda, eğer spektrumun enerji kalibrasyonu yapılmamışsa kanal sayısı bilgisi mevcutken, kalibrasyon (ölçümleme) yapılmışsa enerji verileri bulunacaktır. Bu rapor sonucunun bir özeti şekil 4.31'de görülmektedir. Sistem kullanıcıya toplam alanı, FWHM değerini, net alan ve hatasını verirken, diğer hataların hesaplanmasını kullanıcıya bırakmaktadır. Ayrıca, seçilen bölgelerin kanal aralığını ve toplam ile net alanın sayım hızını da toplam sayım süresini göz önünde bulundurarak kullanıcıya sunmaktadır. Yalnız, yazılım sadece profesyonel versiyonlarında fitlerin görsel sunumunu yapmaktadır, bu yüzden harici programlar veri aktarımı ve görselleştirilmesi için kullanılmalıdır. Bu çalışmada normal text editörleri, EXCEL ve ROOT program ve yazılımları kullanılmıştır. Kod yazımları ise gerektiğinde C++ kullanılarak yapılmış ve ROOT için verinin görselleştirilmesi sağlamıştır. (A65 – B32 Maestro Manual).

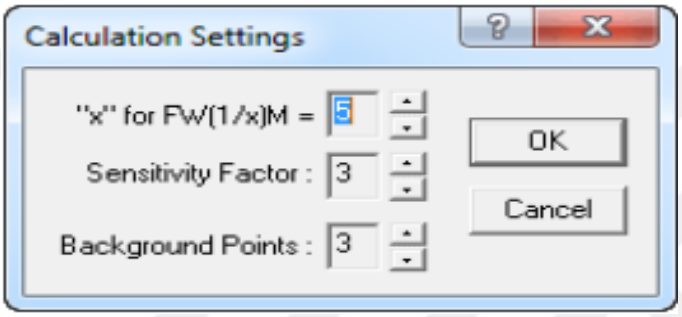
$$A_{toplam} = \sum_{i=l}^{h} C_i \tag{4.32}$$

$$A_{ag} = A_{toplam_düzeltilmiş} = \sum_{i=l+n}^{h-n} C_i \tag{4.33}$$

Denklem 4.32 ve 4.33'de, A_{ag} terimi revize edilmiş toplam alanı, A terimi toplam alanı, L (l) harfi pik alt limitini, h harfi pik üst limitini, n sembolü ise tabansayım hesaplamalarında kullanılmak üzere sağ ve soldan seçilen bin sayısı olarak verilmiştir (A65 – B32 Maestro Manual). Bu denkleme göre n kanal sayısı, seçilen pik bölgesi için sağdan ve soldan eşit olacak şekilde seçilmiştir. Bu ise Gilmore'un yönteminde kullanılan m_L ve m_U terimlerinin farklı seçilebilmesi faktöründen farklı bir yaklaşımdır. Denklem 4.32 ve 4.33'te dikkat edilmesi gereken bir noktada, güncellenip revize edilen toplam sayım sayısı hesabında MAESTRO, asıl seçili alan sınırları olan L ve U kanallar arasını değil, $L + 3$ ve $U - 3$ kanalları arasını kullanmıştır.

4.12.2. Maestro Yazılımı Tabansayım Bulma

Tabansayım alanını hesaplamak için belirlenen alanın sağında ve solunda eşit olmak üzere 1 ile 5 arasında olmak kaydıyla hesaplama bölgesi seçilir. Bu değer ön tanımlı olarak n=3 tür ama isteğe göre değiştirilebilir. Hesaplama ayarlarının 3 olarak seçilmesi pikin sağında ve solunda 3 er adet tabansayım bölgesi alınacağı anlamına gelir. Yazılımda 5'ten daha büyük bir değer alınamıyor olmasının nedeni daha büyük değerler alınsa da sonuca etkisinin önemsenmeyecek kadar az olmasıdır (A65 – B32 Maestro Manual).



Şekil 4.30. Maestro yazılımında tabansayım değerleri ayarlama

Tabansayım alanı bulunurken (l+n) ile (h-n) arasında kalan kanal sayım sayılarının toplamları hesaplanır fakat bu değer hesaplanırken l ile l+n ve h ile h-n kanallarının arasında kalan bölgenin ortalama değerleri hesaplanarak pik altında kalan kanal sayısı değeri ile çarpılır (A65 – B32 Maestro Manual).

$$B = A_{tabansayım} = \left[\frac{\left(\sum_{i=l}^{l+(n-1)} C_i + \sum_{i=h-(n+1)}^{h} C_i\right)}{2n} \times (h - l + 1)\right] \quad (4.34)$$

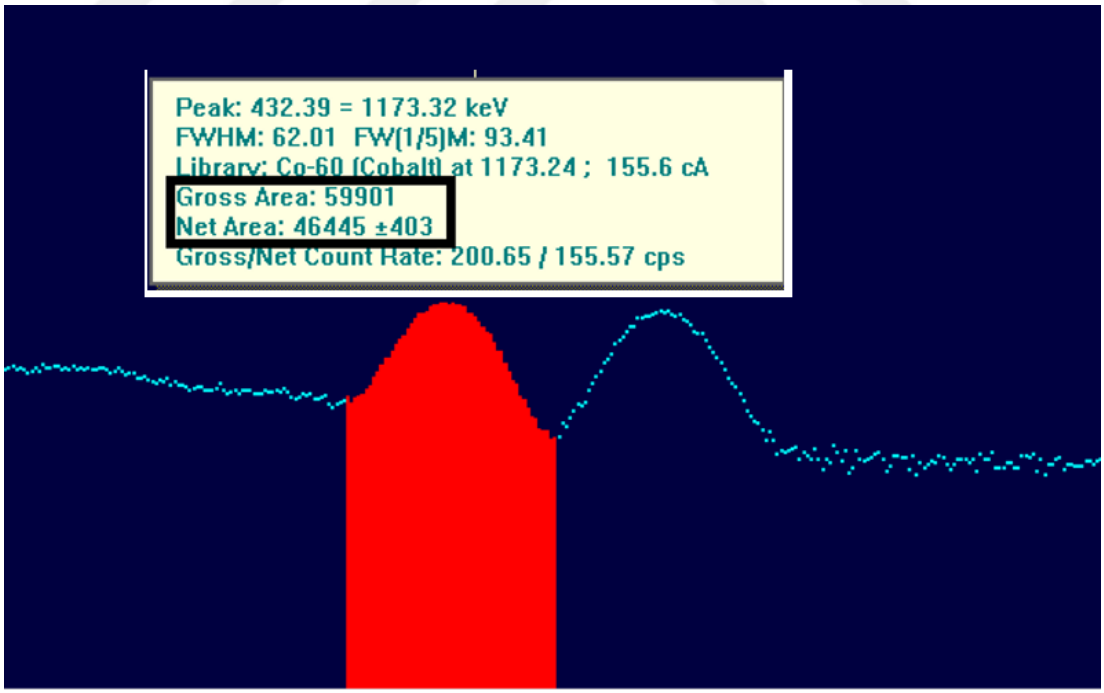
$$B_{ab} = A_{tabansayım_düzeltilmiş} = B\frac{(h - l - 2n + 1)}{h - l + 1} \quad (4.35)$$

Denklem 4.34 ve denklem 4.35'de verildiği üzere; B = Tabansayım Alanı ve B_{ab} = Revize Edilmiş Tabansayım Alanıdır (A65 – B32 Maestro Manual).

4.12.3. Maestro Yazılımı Net Sayım Bulma

Net alan denklem 4.36'da verildiği gibi toplam alandan tabansayım alanı çıkarılarak bulunur. Maestro yazılımında revize edilmiş toplam alan değerinden yine revize edilmiş tabansayım alanının çıkarılması ile bulunmaktadır (A65 – B32 Maestro Manual).

$$A_{net} = A_{ag} - \left[B \times \frac{(h - l - 2n + 1)}{h - l + 1}\right] \quad (4.36)$$



Şekil 4.31. Maestro yazılımı gösterimiyle sonuç bilgilerinin ekranda gösterilmesi

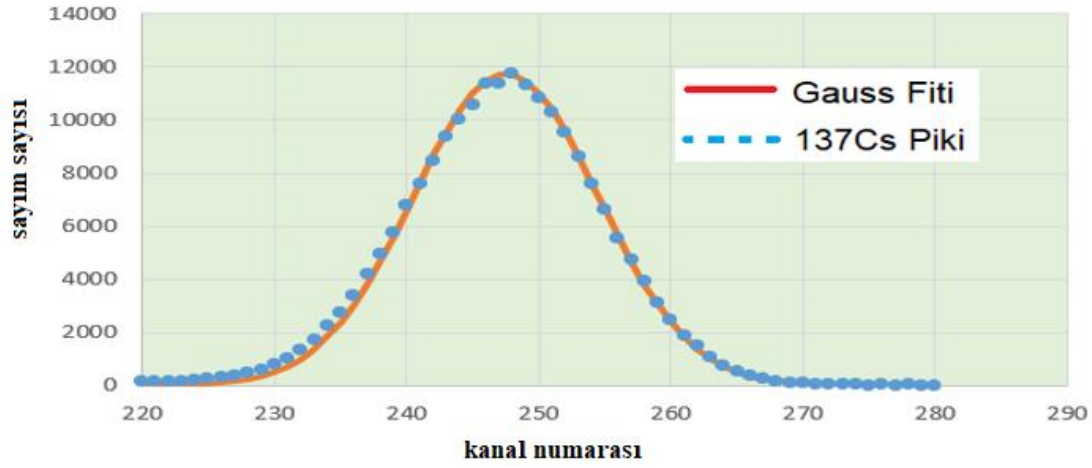
Şekil 4.31 Maestro yazılımında ^{60}Co spektrumunun 1173 keV enerjili 1.pikinin analizinin incelemesidir. Toplam alan olarak geçen değer toplam sayım sayısı, net alan olarak verilen değer ise net sayım sayısı olarak program tarafından hesaplanmıştır.

Maestro yazılımı net sayımın hata miktarını 4.37'deki denklem yardımı ile hesaplamaktadır.

$$\sigma_{A_{net}} = \sqrt{A_{ag} + B\left(\frac{h-l-(n-1)}{2n}\right)\left(\frac{h-l-(n-1)}{h-l+1}\right)} \tag{4.37}$$

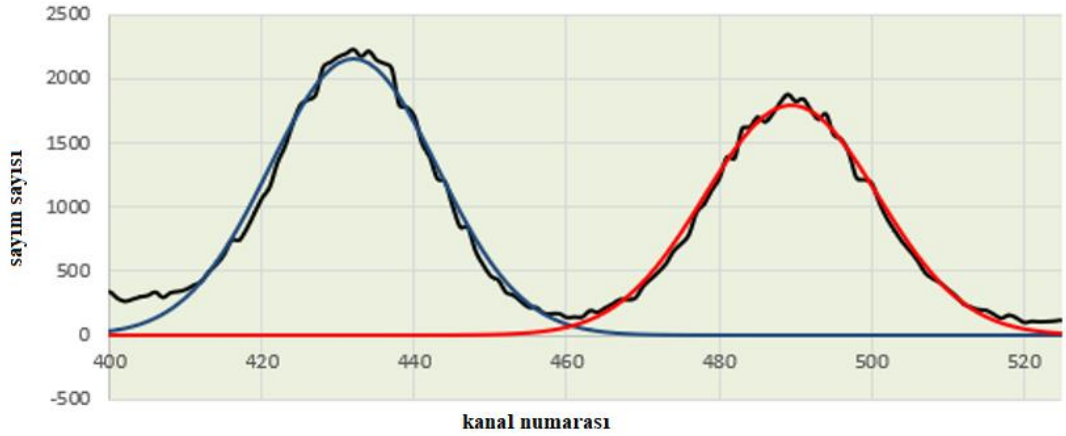
4.13. Gauss Fiti Yöntemi

Bu yöntemde diğer yöntemlerden bağımsız olarak analiz edilmek istenen veri üzerine, bilgisayar programları yardımı ile Gauss fonksiyonu fit edilir. Elde edilen Gauss eğrisi aynı zamanda eldeki verileri temsil eden bir fonksiyon özelliği taşır. Böylece veriler daha kolay bir şekilde analiz edilebilir. Gauss eğrisi, histogram şeklindeki spektrumda bulunan pik üzerine fit edildikten sonra gerekli değerler Gauss fonksiyonu üzerinden çekilebilecek ve histogram şeklinde olan spektrum bir anlamda önemini yitirecektir. Histogram verilerinin üzerine Gauss eğrisinin fit edilmesi sonucunda; gauss fonksiyonunun yükseklik, orta değer ve standart sapma değerleri otomatik olarak bulunabilmektedir. Bu değerler, bizim gerçek verimizi temsil edip, sonraki analizlerde kullanılmak üzere not edilecektir. Şekil 4.32'de basit bir Gauss fitinin nasıl gerçek veri üzerine fit edildiği gösterilmiştir.



Şekil 4.32. 661,6 keV enerjideki ^{137}Cs pikinin Gauss fonksiyonun fit edilme örneği

Gauss fitinin veri seti üzerine uygulanmasının çeşitli avantajları vardır. Bazı durumlarda pikler birbirine çok yakın olabilir. Çözünürlüğü yüksek dedektörler kullanmak pikleri birbirinden belli oranda ayırsa da piklerin nerede kesiştiğini tahmin etmenin bir yolu da her iki pike de ayrı ayrı Gauss eğrisinin fit edilmesi ile mümkün olabilir. Şekil 4.33'de ^{60}Co radyoaktif maddesinin iki pikine ayrı ayrı fit edilmiş Gauss fonksiyonu görülmektedir. Elbette ki burada asıl analiz bu Gauss fitleri üzerinden değil, tabansayımının da eklendiği ve toplamda 2 Gauss ve 1 polinom şeklinde biçimlendirilecek bir toplam fonksiyonun gerçek veri üzerine fit edilmesiyle yapılacaktır.



Şekil 4.33. ^{60}Co verisi üzerine fit edilmiş iki Gauss fonksiyonunun şematize edilmesi

4.13.1 Gauss Fiti Yöntemiyle Toplam Sayımı Bulma

Veriler üzerine fit edilen Gauss fonksiyonu verilerle uyum içerisinde bir eğri oluşturur. Bilindiği üzere fonksiyonun belirli sınırlar arasında integralini bulmak da o bölgede eğrinin altında kalan alanın bulunması anlamına gelmektedir. Belirli integrallerde integral sınırları seçilir ve eğrinin bu sınırlar arasında kalan alanı bulunur. Analiz edilmek istenen bölge için sınırlar belirlenerek integral alınması durumunda istenen bölgenin alanı bulunacaktır. Histogram kanallarının sayım sayılarının birer birer toplanmasıyla elde edilen sonuçlarla tutarlı sonuçlar elde edilmesi beklenen bu yöntemde analiz edilen bölgenin sınırları belirlenerek bu sınırlar arasında kalan eğrinin integrali alınır ve toplam alan bulunur. Daha önceki bahsedilen Covell, TPA veya MAESTRO yöntemlerinde toplam formülleri kullanıldığına, yani verinin kesikli bir yapıya sahipmiş gibi düşünüldüğüne dikkat ediniz. O yüzdendir ki, bu tip analizlere numerik analiz demekteyiz. İntegrallerle ve fit edilen fonksiyonlarla yapılan analizler ise analitik yöntemler olup, verinin sürekli bir fonksiyon görünümünde olduğu varsayılır.

Seçilen bölgeler arasında toplam alanı hesaplamak için integral hesaplaması yapılacağından ve elle hesaplamanın zorlukları da göz önünde bulundurularak integral sınırları girilerek Excel veya ROOT gibi programlar yardımı ile belirli integral hesaplamaları yapılıp istenilen bölgenin alanı bulunabilmektedir. İntegral sınırları verilirken, numerik yöntemlerde kullandığımız kanal numaralarının yerine o kanal numaralarının sahip olduğu en sol ve en sağ uçlardaki X eksenlerini kestikleri koordinatlar verilmelidir. Bu bilgi çok ayrıntı ve önemli bir bilgi olup, sonuçlarınız etkileyecektir. Yani formül 4.38'deki integral alt ve üst sınırları (h ve l koordinatları) kanal numaralı değil, onların uç noktalarının koordinatlarıdır. Bu değerler kesirli sayılarda olabilir. Dikkat ediniz ki, kanal sayıları her zaman tam sayılar olarak verilirler.

$$Seçili\ alan = \int_{l}^{h} f(x)\,dx = \int_{l}^{h} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\, e^{\left[\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} dx \qquad (4.38)$$

Denklem 4.38, sadece pikin sınırları arasında kalan Gauss fonksiyonunun altındaki alanı verecektir. Bizim asıl bulmamız gereken ise bir toplam fonksiyon tanımlayıp, bütün Gauss ve tabansayımını temsil ettiğini düşündüğümüz fonksiyonları içinde barındıran bu fonksiyonu asıl veriye fit etmek olacaktır. Yani, sadece tek bir Gauss fonksiyonunu bir pike fit etmenin hiçbir anlamı yoktur. Bu yüzden yapılması gereken eğer tek bir pik yanında ona sayım sayısı açısından hiçbir katkı sunacak başka bir şey yoksa aşağıdaki denklem 4.39 gibi toplam bir fit fonksiyonu tanımlanabilir. Denklem 4.40'da görülen toplam fonksiyonu ise sadece tek bir Gauss fonksiyonu ve denklem 4.39'daki 1. dereceden tabansayımı polinom fonksiyonu yerine, 2. dereceden polinom fonksiyonu tanımlanmış halidir.

$$\text{Seçili alan} = \int_{l}^{h} f(x)dx = \int_{l}^{h} \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} - (ax+b) \right) dx \qquad (4.39)$$

$$\text{Seçili alan} = \int_{l}^{h} \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} - (ax^2+bx+c) \right) dx \qquad (4.40)$$

Bu gibi durumlara ^{137}Cs çekirdeğinin 661keV enerjili pikinde rastlayabiliriz. Sonrasında bu toplam fonksiyonun integrali, verilen alt ve üst limit koordinatları aralığında bize toplam alanı verecektir. Burada dikkat edilmesi gereken şey şudur: normal bir dağılım fonksiyonunun yani olasılık dağılım fonksiyonunun limit aralığı eğer eksi sonsuzdan artı sonsuz aralığına değişmiyorsa, yapılacak alan hesaplaması bize toplam alanı 100% oranda vermeyecektir. Burada devreye güven aralığı dediğimiz (confidence interval) kavramı girecektir. Yani pik genişliğimizi sigma (σ) cinsinden ne kadar geniş tuttuğumuz bize alansal olarak yüzde kaçlık bir miktarı taradığımızı söylemektedir. Bu yüzden, bu aralığı kendi seçtiğimiz limitlerden bulup, onun yüzde karşılığını istatistiksel olarak hesaplatıp, bunun düzeltmesini yapmalıyız ki pike karşılık gelen alanın gerçekten tamamını hesapladığımızı iddia edebilelim. Güven aralığı tabloları hem bazı nükleer fizik kitaplarında hem de çoğu istatistik kitaplarında mevcuttur. Bu oranları hesaplamanın matematiksel metotlarından biride,

tablolara bakmaksızın bazı özel fonksiyonları kullanmaktan geçer ve aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Çelik, 2022).

- Normal dağılım fonksiyonu için geçerli olan toplam dağılım fonksiyonunun sol uç kısmının integrali (Cumulative distribution function of the normal distribution for the lower tail):

$$normal_cdf(x) = \int_{-\infty}^{x} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (4.41)$$

- Normal dağılım fonksiyonu için geçerli olan toplam dağılım fonksiyonunun tamamlayıcısı olan sağ uç kısmının integrali (Complement of the cumulative distribution function of the normal distribution for the upper tail):

$$\text{normal_cdf_c(x)} = \int_{x}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (4.42)$$

- Hata fonksiyonu (Error function):

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \times \int_{0}^{x} e^{-t^2}\, dt \quad (4.43)$$

- Tamamlayıcı hata fonksiyonu (Complementary of error function):

$$\text{erfc(x)} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \times \int_{x}^{+\infty} e^{-t^2}\, dt \quad (4.44)$$

Denklemler 4.41, 4.42, 4.43 ve 4.44 ifadelerini güven aralığından Z skor tablolarına bakılmaksızın integralin verilen X koordinatları aralıklarında yüzde kaçlık alanı taradığını bulmak için kullanabiliriz. Buradaki püf nokta, integral alt ve üst noktalarına kanal numarası değil, belirlenen pik bölgesinin X eksenini kestiği koordinatları vermektir. Diğer bir önemli nokta ise bu denklemlerdeki integrallerin sınırlarının hangi aralıklarda olduklarına dikkat etmektir. Örneğin, denklem 4.43'te integralin 0 alt değerinden bizim belirleyeceğimiz herhangi bir X koordinatına gittiği görülmektedir. Yani, alan olarak bulabileceğimiz yüzdelik bu bölgeleri temsil

edecektir. Unutulmamalıdır ki, olasılık fonksiyonlarında, toplam alan biri verecek şekilde temsil edilmiştir ki, bulunan integral birin altında çıksın ve aslında belirlenen limitler için taranan yüzdelik alanları versin.

Bizim analiz ettiğimiz ^{60}Co verisinde ise 2 Gauss fonksiyonu ve 2 polinom tabansayımı olduğu için aslında tanımlanacak toplam fonksiyonun daha uzun ve karmaşık olması gerekiyor. C++ ve ROOT kodlamada bu işlem pratik algoritmalarla ve denklemlerle yapılabiliniyor. Basit bir şekilde bu kodlamayı anlatmak istersek eğer, şekil 4.35 ve 4.36'daki örneklerimizi denklem 4.45 ve denklem 4.46 ile ifade edebiliriz.

$$\text{T. A.} = \int_{\text{l}}^{\text{h}} \left(\frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \, \text{e}^{\left[\frac{-(\text{x}-\mu_1)^2}{2{\sigma_1}^2}\right]} + \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \, \text{e}^{\left[\frac{-(\text{x}-\mu_1)^2}{2{\sigma_1}^2}\right]} - (a_1\text{x} + b_1) - (a_2\text{x} + b_2) \right) dx \qquad (4.45)$$

$$\text{T. A.} = \int_{\text{l}}^{\text{h}} \left(\frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \, \text{e}^{\left[\frac{-(\text{x}-\mu_1)^2}{2{\sigma_1}^2}\right]} + \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \, \text{e}^{\left[\frac{-(\text{x}-\mu_1)^2}{2{\sigma_1}^2}\right]} - (a_1 x^2 + b_1\text{x} + c_1) - (a_2 x^2 + b_2\text{x} + c_2) \right) \text{dx} \qquad (4.46)$$

Buradaki 4.45 ve 4.46 nolu denklemlerde ^{60}Co pikleri üzerine fit edilen gerçek toplam fonksiyonların (T.A.) bir temsilini matematiksel olarak görmektesiniz. Bu fitten elde edilecek parametreler, daha sonra her bir Gauss ve polinom fonksiyonunun her bir pik için ayrı ayrı çizilmesinde ve net alan hesaplamalarında kullanılacaktır. Bir diğer yöntem ise Gauss fonksiyonları yerine normalize edilmiş yani alansal olarak bir değerine eşitlenmiş olasılık dağılım fonksiyonlarını integrallerde kullanmak olacaktır. Eğer bu yapılırsa, normalize edilmiş Gauss fonksiyonundaki ilk parametre yükseklik yerine bize direkt olarak alanı verecektir. Normalize edilmiş Gauss fonksiyonu için oluşan yeni integral eşitliğini aşağıdaki gibi verebiliriz.

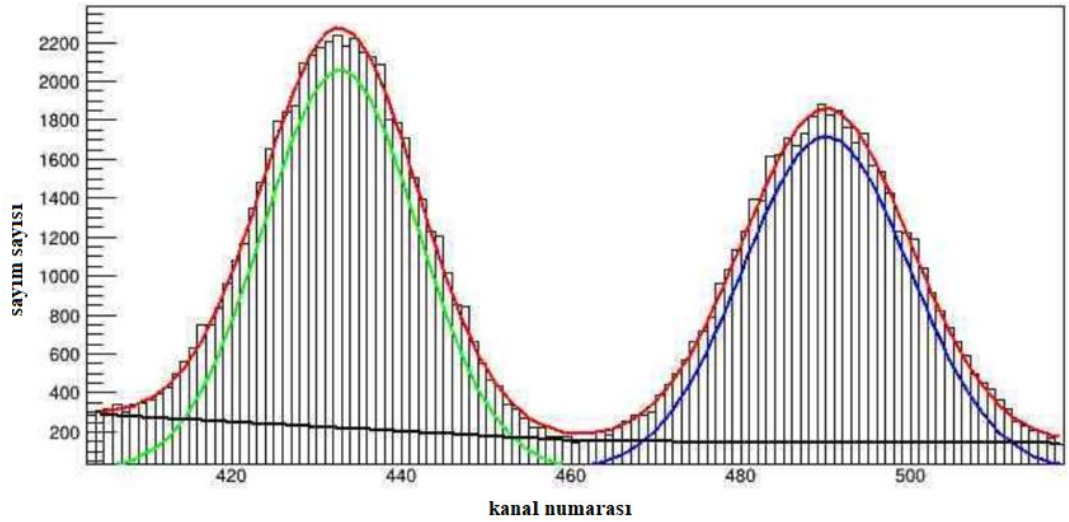
$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\,dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[d \times e^{\left[\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \right] dx = d \times \sigma \times \sqrt{2\pi} = 1 \qquad (4.47)$$

Denklem 4.47'de normalize Gauss fonksiyonu için oluşturulan yeni parametre d harfiyle isimlendirilmiş olsun ve bu parametre fit sonuçlarından bulunursa eğer bize direkt normal dağılım olasılık fonksiyonunun alansal değerini verecektir. Eğer bu fonksiyon kullanılıp da gerçek veri üzerine direkt fit edilirse, bu seferde o fotopikin alanının 100% oranındaki karşılığını bize verecektir. Bunun nedeni ise integral aralıklarının eksi sonsuz ve artı sonsuz arasında değişmesidir. Buradaki d parametresi için $\frac{1}{\sigma \times \sqrt{2\pi}}$ koşulu sağlanmalıdır. Gerekli detaylar Çelik'in referansta listelenen makalelerinde bulunabilir (Çelik, 2022).

4.13.2. Gauss Fiti Yöntemiyle Tabansayımı Bulma

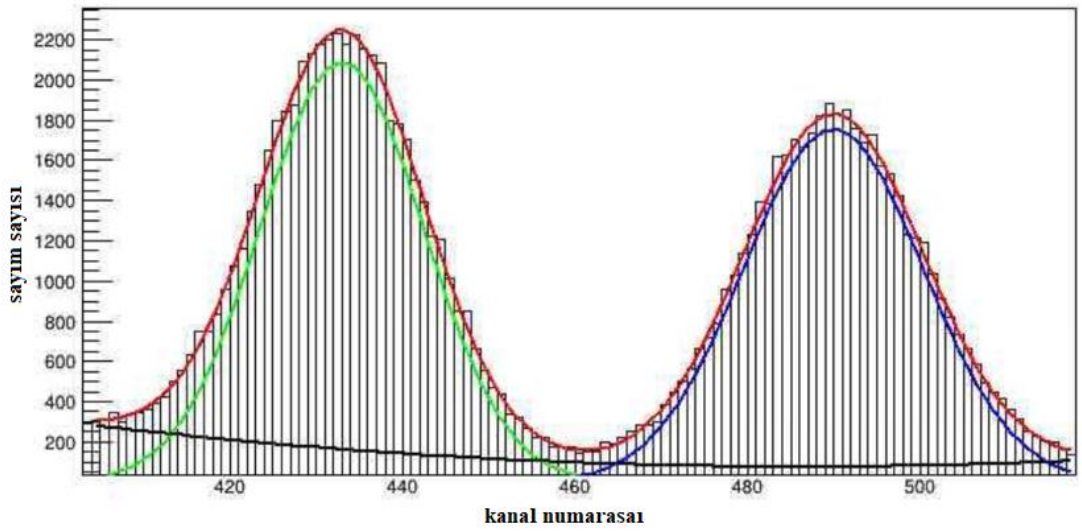
Bazı farklılıklar olsa da toplam alan bulma genel olarak tüm yöntemler için aynıdır veya büyük benzerlikler taşır. Yöntemleri birbirinden ayıran temel detay tabansayım değerlerinin nasıl bulunduğudur.

Tabansayım bölgesini pikten ayıran sınırın doğrusal olduğunu kabul edersek bu doğru (ax+b) şeklinde yazılabilen birinci dereceden polinom denklemi olarak ifade edilebilir. Şekil 4.36'de 1. dereceden bir polinomun tabansayımı temsili görülmektedir. Tabansayım bölgesini pikten ayıran bölgenin alanı genellikle doğrusal kabul edilse de bunun bir kesinliği yoktur. Pik ve tabansayım bölgesi arasındaki sınırın doğrusal olduğu gibi eğrisel olma ihtimali de vardır. Bu durumda tabansayım bölgesi (ax^2+bx+c) şeklinde yazılabilen ikinci dereceden bir polinom denklemi olarak da ifade edilebilir. Şekil 4.37'de 2. dereceden bir polinomun tabansayımı temsili görülmektedir (Çelik, 2022).



Şekil 4.34. ROOT programı ile 1. dereceden tabansayım fiti uygulama işlemi

Şekil 4.34'te ^{60}Co spektrumunda 1173 keV ve 1332 keV enerji piklerinin üzerine toplam fonksiyonu fit edilerek taban sayımı ve Gauss fonksiyonunu temsil fonksiyonlar çizdirilmiştir. Bu fonksiyonlar çizdirilirken, toplam fonksiyonun parametreleri öncelikle ilk adım olarak bulunmuştur. Daha sonrasında ise, örneğin 2 Gauss ve 2 polinoma denk gelen toplamda 10 parametre şekil 4.33 örneğinden çekilerek, ayrı ayrı Gauss ve tabansayımı fonksiyonları çizdirilebilmiştir. Burada yeşil ve mavi renkteki eğriler net sayım sayısını ifade eden Gauss fonksiyonlarıdır. Kırmızı eğri ise, toplam fonksiyonun fit eğrisidir. Eğer fit edilen tabansayımı fonksiyonu şekil 4.34'teki gibi 2. dereceden polinom olursa, bu sefer fit edilecek toplam fonksiyondaki parametre sayısı 12'ye çıkacaktır. Çünkü her bir Gauss fonksiyonundan üçer parametre gelirken, her bir polinom fonksiyonundan da üçer parametre gelecektir.



Şekil 4.35. ROOT programı ile 2. dereceden tabansayım fiti uygulama işlemi

Şekil 4.35'te ^{60}Co spektrumunda 1173 keV ve 1332 keV enerji piklerinin üzerine Gauss fonksiyonu fit edilerek taban sayımı temsil eden ikinci dereceden polinom fonksiyonu çizdirilmiştir. Yeşil ve mavi renkteki eğriler net sayım sayısını ifade eden bölgedir.

4.13.3 Gauss Fiti Yöntemiyle Net Sayımı Bulma

Bütün diğer yöntemlerde olduğu gibi net alan hesaplanırken toplam alan olarak bulunan değerden tabansayım olarak bulunan değer çıkarılır ve net alan bulunur. 4.39 denklemi tabansayım değerleri üzerine birinci dereceden polinom fit edilmesi sonucu bulunan tabansayım değerlerinin toplam sayım sayısından çıkartılmasıyla bulunan net alan değerini veren ifadedir (Çelik, 2022).

4.40'daki denklem tabansayım değerleri üzerine ikinci dereceden polinom fit edilmesi sonucu bulunan tabansayım değerlerinin toplam sayım sayısından çıkarılmasıyla bulunan net alan değerini veren ifadedir (Çelik, 2022).

Denklem 4.40'da; h = belirli integralin üst limiti, l = belirli integralin alt limiti, n = kanal sayısıdır (Çelik, 2022).

Bütün bunların yanında tabansayım alanını sınırlayan fitin altında kalan bölge bilgisayar programları yardımı ile toplam alandan çıkarılarak net alanı simgeleyen bölgenin histogram olarak veya Gauss eğrisi olarak grafiğini çizdirmek mümkündür.

4.13.4. Hata Hesabı

Bu yöntemde hatanın hesaplanması diğer yöntemlerden biraz daha farklıdır. Bunun nedeni Gauss fonksiyonunun sürekli bir fonksiyon olmasıdır.

Sterlinski, 1968'deki makalesinde tepe ve tabansayım çizgisi aralığı fazla olduğunda tabansayım çizgisinin eğri olduğunu öne sürmüştür. Bu durum bize tabansayım üst limit çizgisinin ikinci dereceden bir denkleme uygun olabileceğini gösterir.

ROOT programı kullanılarak; Minuit2 kitaplığı ve Migrad algoritması varsayılan olarak belirlendiğinde iki polinom ve Gauss fonksiyonları gerçek veriye uyacak şekilde fit edilmiştir. Fit parametreleri ROOT programının prosedürü doğru bir şekilde işletebilmesi için sabit parametreler olarak ayarlandı. Bu durum tabansayım hata değerinin sıfır olarak bulunmasını sağlamıştır. Eğer fit yapılan fonksiyona ait olan parametrelere sabit değer verilmez ve ROOT kodunun fit parametrelerini kendisi bulmasına izin verilirse, otomatik olarak bulunan değerler her zaman istenilen sonuçları vermez. Bunu veri üzerine çizilen fitlerin şekillerindeki sağa veya sola kaymalardan kolaylıkla anlayabiliriz. Bundan ötürü farklı fit yöntemleri veya manuel olarak hesaplanıp sabitlenmiş fit parametrelerini kodun içerisine entegre etmek daha doğru sonuçlar vermektedir. Tek dezavantaj sabitlenen parametreler nedeniyle o parametreye ait sonuçlarda hata hesabı program tarafından sıfır çıktısıyla belirtilmektedir. ROOT ara yüzünü kullanırken yazılan C++ kodunda, integral alan hesabı yaparken girdi verisi olarak her bir gama pikine karşılık gelen başlangıç ve bitiş kanal numaralarının koordinatları ve spektrumdaki her bir kanalın genişliği verilir. Başlangıç ve bitiş kanal numaralarının koordinatlarından kasıt, başlangıç kanalının

(bin) dikdörtgen olduğu göz önüne alındığında, bu dikdörtgenin sol koordinatı; bitiş kanalı için ise dikdörtgenin sağ koordinatı kastedilmektedir. İntegral alan hesabının hatasını hesaplarken kod girdisi olarak başlangıç ve bitiş kanal numarasının koordinatları, fitte kullanılan bütün fonksiyonların parametrelerini içinde barındıran bir vektör, fit fonksiyonunun parametrelerinin oluşturduğu kovaryans matris terimi ve spektrumda kullanılan sabit kanal genişliği kullanılır (Çelik, 2022).

5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada bahsedilen yöntemler ile ^{60}Co radyoaktif maddesi gama spektrumunun 1173 keV ve 1332 keV enerjilerinde oluşan pikler analiz edildiğinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki tablolarda verilmektedir.

5.1.1. ^{60}Co 1173 keV Enerji Piki

Çizelge 4.1. ^{60}Co 1173 keV enerji piki için çeşitli yöntemlerin karşılaştırılması.

1. Pik için sonuç tablosu						
	Toplam alan	**Hata (σ)**	**Taban sayım**	**Hata (σ)**	**Net alan**	**Hata (σ)**
Covell	59985	245	12934	618	47051	665
TPA	59985	245	12934	618	47051	665
Gilmore TPA m_l=4 m_u=2	59985	245	15690	393	44295	463
Gilmore TPA m_l=4 m_u=1	59985	245	16478	441	43508	505
Maestro	58603	242	12211	329	46392	408
Gauss fiti 1	59968	241	12868	0	46977	241
Gauss fiti 2	59867	243	10033	314	49618	368

5.1.2. ^{60}Co 1332 keV Enerji Piki

Çizelge 4.2. ^{60}Co 1332 keV enerji piki için çeşitli yöntemlerin karşılaştırılması.

2. Pik için sonuç tablosu						
	Toplam alan	**Hata (σ)**	**Taban sayım**	**Hata (σ)**	**Net alan**	**Hata (σ)**
Covell	50502	225	8291	487	42211	536
TPA	50502	225	8291	487	42211	536
Gilmore TPA m_l =4 m_u =2	50502	225	8100	278	42402	358
Gilmore TPA m_l =4 m_u =1	50502	225	7719	297	42783	373
Maestro	49488	223	8620	271	40868	351
Gauss Fiti 1	50533	224	8291	0	42210	224
Gauss Fiti 2	50574	224	4807	332	45712	387

^{60}Co radyoaktif maddesinin eldeki spektrumunda bulunan 1173 keV ve 1332 keV enerjilerindeki piklerinin analizi yapılmıştır. Tezde sıralanan ve açıklanan yöntemlerle hesaplamalar yapılmış ve tablo şeklinde verilmiştir.

Covell yöntemi, TPA yöntemi ve Gilmore TPA yönteminde toplam alanlar birbirine eşit 1173 keV enerjiye sahip pik için 59985 ve 1332 keV enerjili pik için 50502 olarak hesaplanmıştır. Bu birçok yöntemde toplam alan hesaplamasının aynı yapıldığının bir göstergesidir.

Toplam alan hesaplamasında Maestro yazılımı nispeten farlı bir yöntem kullanmaktadır. Bu nedenle toplam alan değeri farklı bulunmuştur. Her iki pik

analizinde de Maestro yazılımı diğer yazılımlara göre daha düşük bir değer bulmuştur. Bunun nedeni toplam alanın revize edilmiş olmasıdır. 1173 keV enerjiye sahip pik için 58603 ve 1332 keV enerjili pik için 49488 olarak hesaplanmıştır.

1.Gauss fiti yönteminde bulunan toplam alan değeri diğer yöntemlerdekilere çok yakın bir değerdir. 1173 keV enerjiye sahip pik için 59968 ve 1332 keV enerjili pik için 50533 olarak hesaplanmıştır. 2.Gauss fiti yönteminde de bulunan toplam alan değeri diğer yöntemlerdekilere çok yakın bir değerdir. 1173 keV enerjiye sahip pik için 59867 ve 1332 keV enerjili pik için 50574 olarak hesaplanmıştır. Bu şekilde yakın sonuçlar bulunması yöntemin geçerli yöntemler arasında sayılabileceğinin bir göstergesidir.

Toplam alan hata hesaplamaları yapılmış Covell, TPA ve Gilmore TPA yönteminde toplam alanların birbirine eşit olması sebebiyle eşit olarak bulunmuştur. Bu üç yöntem için 1173 keV enerjiye sahip pik için hata 245 ve 1332 keV enerjili pik için hata 225 olarak hesaplanmıştır.

Maestro yazılımında 1173 keV enerjiye sahip pik için toplam alan hata miktarı 242 ve 1332 keV enerjili pik için toplam alan hata miktarı 223 olarak hesaplanmıştır.

1.Gauss fiti yönteminde 1173 keV enerjiye sahip pik için hata 241 ve 1332 keV enerjili pik için hata 224 olarak hesaplanmıştır. 2.Gauss fiti yönteminde 1173 keV enerjiye sahip pik için hata 243 ve 1332 keV enerjili pik için hata 224 olarak hesaplanmıştır.

Tabansayım hesaplamaları yapılmış Covell yöntemi ve TPA yönteminde toplam alanlar birbirine eşit 1173 keV enerjiye sahip pik için 12934 ve 1332 keV enerjili pik için 8291 olarak hesaplanmıştır.

Toplam alan hesaplamalarının aksine Gilmore TPA yönteminde tabansayım alanı farklı ve 1173 keV enerjiye sahip pik için 15690 ve 1332 keV enerjili pik için 8100 olarak hesaplanmıştır.

Maestro yazılımıyla yapılan hesaplamada tabansayım değerleri 1173 keV enerjiye sahip pik için 12211 ve 1332 keV enerjili pik için 8620 olarak bulunmuştur.

1. Gauss fiti yöntemiyle yapılan hesaplamada tabansayım değerleri 1173 keV enerjiye sahip pik için 12868 ve 1332 keV enerjili pik için 8291 olarak bulunmuştur. 2. Gauss fiti yöntemiyle yapılan hesaplamada tabansayım değerleri 1173 keV enerjiye sahip pik için 10033 ve 1332 keV enerjili pik için 4807 olarak bulunmuştur.

Tabansayımlarının hata hesaplamaları yapılmış Covell yöntemi ve TPA yönteminde tabansayım alanları birbirine eşit olduğundan hata miktarları da eşit, 1173 keV enerjiye sahip pik için 618 ve 1332 keV enerjili pik için 487 olarak bulunmuştur. Gilmore TPA yönteminde 1173 keV enerjiye sahip pik için 393 ve 1332 keV enerjili pik için 278 olarak bulunmuştur. Maestro yazılımında hata miktarı 1173 keV enerjiye sahip pik için 329 ve 1332 keV enerjili pik için 271 olarak bulunmuştur. Gauss fiti 1. yönteminde hata her iki pik için de sıfır olarak hesaplanmıştır. Gauss fiti 2. yönteminde hata 1173 keV enerjiye sahip pik için 314 ve 1332 keV enerjili pik için 332 olarak hesaplanmıştır.

Net alanlar Covell yöntemi ve TPA yöntemiyle hesaplanmış, 1173 keV enerjiye sahip pik için 47051 ve 1332 keV enerjili pik için 42211 olarak bulunmuştur. Net alanlar bu iki yöntem için eşittir.

Net alan Gilmore TPA yönteminde 1173 keV enerjiye sahip pik için 44295 ve 1332 keV enerjili pik için 42402 olarak bulunmuştur.

Net alan Maestro yazılımı ile yapılan hesaplamada 1173 keV enerjiye sahip pik için 46392 ve 1332 keV enerjili pik için 40868 olarak bulunmuştur.

Net alan 1. Gauss fiti yöntemi ile yapılan hesaplamada 1173 keV enerjiye sahip pik için 46977 ve 1332 keV enerjili pik için 42210 olarak bulunmuştur. Net alan 2. Gauss fiti yöntemi ile yapılan hesaplamada 1173 keV enerjiye sahip pik için 49618 ve 1332 keV enerjili pik için 45712 olarak bulunmuştur.

Net alan hata değerleri Covell ve TPA yöntemlerinde 1173 keV enerjiye sahip pik için 665 ve 1332 keV enerjili pik için 536 olarak hesaplanmıştır. Gilmore TPA yönteminde net alanın hata değeri 1173 keV enerjiye sahip pik için 463 ve 1332 keV enerjili pik için 358 olarak hesaplanmıştır. Maestro yazılımında 1173 keV enerjiye sahip pik için 408 ve 1332 keV enerjili pik için 351 olarak hesaplanmıştır. 1.Gauss fiti

yönteminde 1173 keV enerjiye sahip pik için 241 ve 1332 keV enerjili pik için 224 olarak hesaplanmıştır. 2. Gauss fiti yönteminde 1173 keV enerjiye sahip pik için 368 ve 1332 keV enerjili pik için 387 olarak hesaplanmıştır.

5.2. Öneriler

Yapılan bu çalışmada gama piklerinin net sayım sayılarını bulmak amacıyla çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Maestro gibi yazılımlar spektrumların pik alanını vermede son derece başarılıdır. Bu programların yazılımları son derece yüksek ücretlerle satılmaktadır ve bu durum bir dezavantajdır. Ayrıca programın Gauss eğrisini pik üzerine fit etmesi fakat bu fiti kullanıcıya göstermemesi bir dezavantajdır. Covell ve TPA yöntemlerinde tamamen nümerik analiz yapılmaktadır. Bu çalışmada daha çok CERN'de yazılan ROOT arayüzü, C++ ve Microsoft Excel programları kullanılarak; Maestro, Scintivision gibi profesyonel versiyonları son derece pahalı diğer programlara bağımlı kalmaktan nasıl kaçınılabileceği üzerine çalışılmıştır. Pik alanı bulan uygulamaların lisanslı versiyonlarını kullanmadan sadece veri almak için kullanıp, elde edilen veriyi incelemek için farklı ücretsiz programların nasıl kullanılabileceği üzerine çalışılmıştır. Farklı uygulamaların taban sayımı ve net alanı nasıl etkilediği ile ilgili yapılan bu çalışma bu konuda çalışmak isteyenlere fikir verebilir. Bundan sonra farklı spektrumlar ve farklı net alan bulma bağıntıları da aynı yöntemlerle incelenerek karşılaştırması yapılabilir.

KAYNAKLAR

A65-B32 Software's User's Manual. Ortec Part No.777800. Available: https://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/manuals/a65-mnl.pdf [Access on: 1th September 2020]

BAEDECKER, P.A., 1971. Digital Methods of Photopeak Integration in Activation Analysis. Analytical Chemistry, 43(3): 405-410.

BAEDECKER, P.A., and GROSSMAN, J.N., 1989. The Computer Analysis of High Resolution Gamma-Ray Spectra from Instrumental Activation Analysis Experiments. Open-File Report:89-454. U.S. Geological Survey. DOI:10.3133/ofr89454

BECQUEREL, H., 1896. Sur les radiations émises par phosphorescence. Comptes rendus de 1'Academie des Sciences, Paris, 122, 420-421.

BROWNE, E., and TULI, J.K., 2013. Nuclear Data Sheets For A=60*, 114, 1849. Web sitesi: https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/decaysearchdirect.jsp?nuc=60Co&unc=NDS

COVELL, D. F., 1959. Determination of Gamma Ray Abundance Directly from the Total Absorbtion Peak. Analytical Chemistry, 1785-1790.

ÇELİK, İlker Can., 2022. The Usage of ROOT in Analyzing Gamma-rays with Covell and Total Peak Area Method. European Journal of Science and Technology. Special Issue 28: pp 285-289. November 2021. DOI: 10.31590/ejosat.997976

ÇELİK, İlker Can., 2022. Determination of Gamma-Ray Abundance in Photopeaks with Analytic and Numeric Approaches via CERN'S ROOT Analysis Framework. European Journal of Science and Technology. Special Issue 36: pp 160-167. May 10-13, 2022. DOI: 10.31590/ejosat.1107756

ÇELİK, İlker Can., and DAĞLI, Kadir., 2022. Case Study of ^{137}Cs: Optimizing Counting with Different Background Region Width Selection. European Journal of Science and Technology. Special Issue 36: pp 168-174. November 1-3, 2021. DOI: 10.31590/ejosat.997976

GILMORE, G.R., 2008. Practical Gamma Ray Spectrometry. John Wiley & Sons, Ltd, England, 387s.

KENNEDY, G., 1990. Comparison of photopeak integration methods. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 299(1-3), 349-353.

KOKTA, L., 1973. Determination of peak area. Nuclear Instruments and Methods, 112:245-251.

KURTMAN, C., ve ÇELEBİOĞLU B., 2000. Radyoterapi ve Radyasyonun Tarihçesi. Ankara Üniversitesi Dikimevi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Yıllığı Cilt 1 Sayı 1.

KRANE, K. S., 1988. Introductory Nuclear Physics. John Wiley & Sons, Ltd, England,404s.

LOSKA, L., 1988. A modification of the "total peak area" (TPA) method for gamma ray spectra. Appl. Radiat.Isot.,39(6):475-477

QUITTNER, P., 1969. Peak area determination for Ge (Li) detector data. Nuclear Instruments and methods, 76(1), 115-124.

RUTHERFORD, E., 1897. LIV. The velocity and rate of recombination of the ions of gases exposed to Röntgen radiation. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 44(270), 422-440.

STERLINSKI, S., 1968. Analysis of digital data from a multichannel pulse height analyzer on gamma ray total absorption peaks. Analytical Chemistry,40(13):1995-1998

STEYN, J., and REIER, M., 1973. A method for systematically analyzing Ge (Li) photopeaks. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 15(2), 669-673.

TSOULFANIDIS, N., and LANDSBERGER, S., 2015. Measurement and Detection of Radiation 4th Edition. CRC Press, England, 561s.