

**T.C.**  
**FIRAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**$^{222}\text{Rn}$  SEVİYELERİNİ TAYİN ETMEK AMACIYLA GÖRELİ  
SAYIM YAPABİLEN VE DÜŞÜK ENERJİ TÜKETEN BİR  
SPEKTROSKOPİ SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Muhammed Fatih KULUÖZTÜRK**

**Anabilim Dalı: Fizik**  
**Programı: Nükleer Fizik**  
**Danışman: Prof. Dr. Mahmut DOĞRU**

**Nisan-2015**

**T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**$^{222}\text{Rn}$  SEVİYELERİNİ TAYİN ETMEK AMACIYLA GÖRELİ SAYIM  
YAPABİLEN VE DÜŞÜK ENERJİ TÜKETEN BİR SPEKTROSKOPİ SİSTEMİ  
GELİŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Muhammed Fatih KULUÖZTÜRK**

**091114203**

**Anabilim Dalı: Fizik**

**Programı: Nükleer Fizik**

**Danışman: Prof.Dr. Mahmut DOĞRU**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14 Nisan 2015**

**Nisan-2015**

T.C  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**$^{222}\text{Rn}$  SEVİYELERİNİ TAYİN ETMEK AMACIYLA GÖRELİ SAYIM  
YAPABİLEN VE DÜŞÜK ENERJİ TÜKETEN BİR SPEKTROSKOPİ SİSTEMİ  
GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Muhammed Fatih KULUÖZTÜRK

091114203

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14 Nisan 2015

Tezin Savunulduğu Tarih : 08 Mayıs 2015

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mahmut DOĞRU (Fırat Üniv.)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Soner ÖZGEN (Fırat Üniv.)

Prof.Dr. Naci İNCİ (Boğaziçi Üniv.)

Prof.Dr. Sezai YALÇIN (Bitlis Eren Üniv.)

Prof.Dr. Sinan AKPINAR (Fırat Üniv.)

Nisan-2015

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanması sürecinde engin bilgi ve tecrübelerini hiçbir zaman paylaşmaktan kaçınmayarak bana her zaman destek olan, yol gösteren, benim için örnek alınacak bir insan olan değerli tez danışman hocam Prof.Dr. Mahmut DOĞRU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bana özellikle elektronik konusunda bütün bildiklerimi sabırla öğreten, elektronik çalışmalar aşamasında uzun mesailer harcadığımız kıymetli hocam Prof.Dr. Soner ÖZGEN'e teşekkür ediyorum. Ayrıca tez izleme kurulunda bulunan Prof.Dr. Oktay BAYKARA hocama da teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez süresince maddi manevi desteklerini hep hissettiğim eşim Zehra Nur KULUÖZTÜRK'e ve aileme teşekkür ediyorum. Ayrıca her zaman fikirlerine saygı duyduğum kıymetli hocam ve arkadaşım Arş. Gör. Dr. Köksal YILDIZ'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmalarımın büyük kısmını gerçekleştirdiğim Bitlis Eren Üniversitesi İleri Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürlüğü'ne ve Bitlis Eren Üniversitesi Rektörlüğü'ne teşekkürlerimi sunuyorum. Tez çalışması kapsamında Nemrut Krater Gölü'nden numune toplama sürecinde bot tahsisi gerçekleştiren Bitlis Gençlik Hizmetleri ve Spor İl Müdürlüğü'ne teşekkürlerimi sunuyorum.

Nükleer elektronik çalışmalarında 5057001 nolu “Türkiye'nin Deprem Riski Yüksek Jeo-Stratejik -Ancak Tektonik Rejimleri Farklı-Bölgelerinde Deprem Davranışının Çok Disiplinli Yaklaşımlarla Araştırılması” isimli proje kapsamındaki desteğinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkür ederim. Ayrıca Nemrut Krater Gölü (Bitlis) yüzey suyu örneklerinin toplanması ve analizlerinin gerçekleştirilmesi konularında FÜBAP FF.13.01 nolu proje ile destek olan Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

**Muhammed Fatih KULUÖZTÜRK**  
**ELAZIĞ – 2015**

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

|                                                    |           |
|----------------------------------------------------|-----------|
| ÖNSÖZ.....                                         | I         |
| İÇİNDEKİLER .....                                  | II        |
| ÖZET .....                                         | IV        |
| SUMMARY.....                                       | V         |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....                              | VI        |
| TABLolar LİSTESİ.....                              | IX        |
| SEMBOLLER ve KISALTMALAR .....                     | X         |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                              | <b>1</b>  |
| 1.2. Radyasyon ve Radyoaktivite.....               | 5         |
| 1.2.1. Radyoaktif Bozunum.....                     | 5         |
| 1.2.2. Radyoaktif Bozunum Kanunu .....             | 8         |
| 1.2.3. Radyoaktivite Birimleri .....               | 9         |
| 1.2.4. Yapay Radyoaktivite .....                   | 12        |
| 1.2.5. Doğal Radyoaktivite .....                   | 12        |
| 1.2.6. Radon Gazı.....                             | 14        |
| 1.3. Radyasyon Deteksiyonu ve Radon Algılama.....  | 16        |
| 1.3.1. Pasif Radyasyon Deteksiyonu.....            | 17        |
| 1.3.2. Aktif Deteksiyon Metotları .....            | 18        |
| 1.3.3. Radon Deteksiyon Metotları .....            | 22        |
| 1.4. Nükleer Elektronik .....                      | 24        |
| 1.4.1. Ön Yükselteç.....                           | 25        |
| 1.4.2. Ana Yükselteç ve Sinyal Şekillendirme ..... | 27        |
| 1.4.3. Analizörler .....                           | 31        |
| <b>2. MATERYAL ve METOT.....</b>                   | <b>35</b> |
| 2.1. Elektronik Tasarım .....                      | 36        |
| 2.2. Testler .....                                 | 37        |
| 2.2.1. Vakum Testi.....                            | 37        |
| 2.2.2. Kazanç Testi.....                           | 38        |
| 2.2.3. Sinyal/Gürültü Oranı Ölçümleri .....        | 40        |

|           |                                                      |           |
|-----------|------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.4.    | Enerji Çözünürlüğü (FWHM) Ölçümleri.....             | 41        |
| 2.3.      | Kalibrasyon .....                                    | 42        |
| 2.3.1.    | Elektronik Kalibrasyon .....                         | 43        |
| 2.3.2.    | Enerji Kalibrasyonu .....                            | 43        |
| 2.3.3.    | Verim Kalibrasyonu .....                             | 44        |
| 2.4.      | Nemrut Krater Gölü Yüzey Suyu Analizleri.....        | 45        |
| 2.4.1.    | Yüzey Suyu Örnekleri .....                           | 46        |
| 2.4.2.    | Suda Ağır Metal Tayini .....                         | 48        |
| 2.4.3.    | Suda Toplam $\alpha/\beta$ Tayini .....              | 49        |
| 2.5.      | FUAMP-ORTEC Sistemleri İle Karşılıklı Sayımlar ..... | 51        |
| <b>3.</b> | <b>BULGULAR</b> .....                                | <b>52</b> |
| 3.1.      | Vakum Testi .....                                    | 52        |
| 3.2.      | Kazanç Testi.....                                    | 53        |
| 3.3.      | Sinyal/Gürültü Oranı Ölçümleri .....                 | 55        |
| 3.4.      | Enerji Çözünürlüğü (FWHM) Ölçümleri.....             | 56        |
| 3.5.      | Elektronik Kalibrasyon .....                         | 57        |
| 3.6.      | Enerji Kalibrasyonu .....                            | 59        |
| 3.7.      | Verim Kalibrasyonu .....                             | 61        |
| 3.8.      | Yüzey Suyunda Ağır Metal Analizi .....               | 62        |
| 3.9.      | Yüzey Sularında Toplam $\alpha/\beta$ Tayini .....   | 64        |
| 3.10.     | FUAMP-ORTEC Sistemlerinin Karşılıklı Sayımları ..... | 66        |
| <b>4.</b> | <b>SONUÇLAR ve TARTIŞMA</b> .....                    | <b>68</b> |
| <b>5.</b> | <b>ÖNERİLER</b> .....                                | <b>75</b> |
|           | <b>KAYNAKLAR</b> .....                               | <b>76</b> |
|           | <b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....                                | <b>80</b> |

## ÖZET

Bu çalışmada  $^{222}\text{Rn}$  gazı ve ürün çekirdeklerinin yayınladığı  $\alpha$  radyasyonlarını algılamak amacıyla görelî sayım yapabilen nükleer spektroskopik bir algılama sistemi geliştirilmesi hedeflenmiştir. Nükleer elektronik metotlar kullanılarak geliştirilen yükseltme ve sinyal şekillendirme katmanı, bir dizi elektronik ve radyoaktif testlere tabi tutularak çalışma performansları ortaya konulmuştur. Ayrıca oluşturulan bu sistemin başka bir alfa spektroskopi sistemi ile karşılaştırılması için, Nemrut Krater Gölü'nden toplanan yüzey suyu örnekleri ve standart alfa kaynakları kullanılarak nükleer spektroskopik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan sistemin analog sinyal kalitesinin ve spektroskopik performansının, bu çalışmada kullanılan ticari bir alfa spektroskopi sistemine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Geometrik olarak çok daha ergonomik olması ve daha düşük enerji tüketimine sahip olması, oluşturulan sistemin avantajları olarak göze çarpmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:**  $^{222}\text{Rn}$ ,  $\alpha$  radyasyonu, nükleer elektronik, nükleer spektroskopi, Nemrut Krater Gölü.

## SUMMARY

### **Development of an Energy Saving Spectroscopic System Capable of Taking Relative Counts for Detection of $^{222}\text{Rn}$ Levels**

In this work, a spectroscopic system for detection of  $\alpha$  radiation released from  $^{222}\text{Rn}$  and its daughters is developed. Operating performance of amplifying and pulse shaping stages are demonstrated with a series of electronic and radioactive tests. Amplifying and pulse shaping stages are developed with nuclear electronic methods. Additionally, nuclear spectroscopic studies are performed to compare our system with a commercial alpha spectroscopy system using surface water samples of Nemrut Crater Lake and standard alpha sources. It is observed that the analog signal quality and spectroscopic performance of the system give similar results with an commercial alpha spectroscopic system. It is demonstrated that the developed spectroscopic system is geometrically more ergonomic and is low-cost in energy consumption.

**Keywords:**  $^{222}\text{Rn}$ ,  $\alpha$  radiation, nuclear electronics, nuclear spectroscopy, Nemrut Crater Lake surface water.

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Alfa bozunumu ve alfa parçacığının çekirdek Coulomb potansiyelini aşması. ....                                                                                                                                                          | 6  |
| Şekil 1.2. (a) $\beta^-$ bozumu, (b) $\beta^+$ bozumu ve (c) $\beta$ bozum reaksiyonları. ....                                                                                                                                                     | 6  |
| Şekil 1.3. $^{238}\text{U}$ bozunum zinciri. ....                                                                                                                                                                                                  | 13 |
| Şekil 1.4. $^{235}\text{U}$ bozunum zinciri. ....                                                                                                                                                                                                  | 13 |
| Şekil 1.5. $^{232}\text{Th}$ bozunum zinciri. ....                                                                                                                                                                                                 | 14 |
| Şekil 1.6. Radon gazı bozunum serisi (Fişne, 2004). ....                                                                                                                                                                                           | 15 |
| Şekil 1.7. Radonun doğal radyoaktivitedeki yeri. ....                                                                                                                                                                                              | 16 |
| Şekil 1.8.(a) Polimerdeki ağır parçacıkların yolu üzerinde meydana gelen kopmaların şematik gösterimi, (b) Kimyasal kazıma işlemi sonrasında optik mikroskop altında elde edilen parçacık izleri (Durrani, 1987). ....                             | 17 |
| Şekil 1.9. Gaz doldurulmuş detektörde radyasyon algılama. ....                                                                                                                                                                                     | 19 |
| Şekil 1.10. Sintilasyon detektörü. ....                                                                                                                                                                                                            | 20 |
| Şekil 1.11. P ve N tipi yarıiletken maddelerin birleştirilmesi, ters besleme yapılması ve radyasyon ile etkileşimi. ....                                                                                                                           | 22 |
| Şekil 1.12. Voltaj duyarlı ön yükselteç şematik gösterimi. ....                                                                                                                                                                                    | 26 |
| Şekil 1.13. Yük duyarlı ön yükseltecin şematik gösterimi. ....                                                                                                                                                                                     | 26 |
| Şekil 1.14. (a) Sıfır kutup düzeltmesi (pole-zero cancellation) öncesinde sinyal şekli, (b) sıfır kutup düzeltmesi yapıldıktan sonra sinyal şekli (IAEA, 1989). ....                                                                               | 28 |
| Şekil 1.15. Sıfır kutup düzeltmesinin yapılmadığı durumda radyasyon sinyalleri. ....                                                                                                                                                               | 28 |
| Şekil 1.16.(a) Üst üste yığılma giderici (pile-up rejector) devre şeması ve giriş-çıkış sinyalleri, (b) üst üste yığılan sinyallerin görünümü, (c) üst üste yığılma giderici kullanıldıktan sonra bu sinyallerin görünümü (Kuluöztürk, 2009). .... | 29 |
| Şekil 1.17. Temel seviye düzeltici (baseline-restorer) devre şeması ve bu devrenin giriş-çıkış puls şekilleri. ....                                                                                                                                | 30 |
| Şekil 1.18. Ana yükselteç çıkışındaki pulslar ve seçilen E, E + $\Delta E$ seviyeleri. ....                                                                                                                                                        | 32 |

|                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 1.19.</b> Çok kanallı analizör çıkışında spektrum oluşumu. ....                                                                                                                                            | 33 |
| <b>Şekil 1.20.</b> HPGe ve NaI(Tl) detektörleri ile elde edilen gama spektrumları.....                                                                                                                              | 34 |
| <b>Şekil 2.1</b> FUAMP yükselteç katmanlı devre şeması (TÜRDEP). ....                                                                                                                                               | 36 |
| <b>Şekil 2.2.a)</b> FUAMP ön yükselteç, ana yükselteç ve sinyal şekillendirme katmanları için baskılı devre tasarımı, b) montajı yapılmış yükselteç devresi, c) alüminyum koruma haznesi ve yükselteç (TÜRDEP)..... | 37 |
| <b>Şekil 2.3.</b> Vakum ortamında standart radyoizotop ile kalibrasyon düzeneği. ....                                                                                                                               | 38 |
| <b>Şekil 2.4.</b> Yükselteç devresinde kazanç tespiti. ....                                                                                                                                                         | 39 |
| <b>Şekil 2.5.</b> Yükselteç çıkışındaki analog sinyalde sinyal ve gürültü genlikleri. ....                                                                                                                          | 41 |
| <b>Şekil 2.6.</b> FWHM değerinin spektrum üzerindeki pikte gösterilmesi. ....                                                                                                                                       | 41 |
| <b>Şekil 2.7.</b> Elektronik kalibrasyon deney düzeneği.....                                                                                                                                                        | 43 |
| <b>Şekil 2.8.</b> Nemrut Krater Gölü'nün Türkiye haritasındaki konumu ve örnek alma noktaları. ....                                                                                                                 | 46 |
| <b>Şekil 2.9.</b> Göl yüzeyinden su numunesi toplanması. ....                                                                                                                                                       | 47 |
| <b>Şekil 2.10.</b> ICP-MS ağır metal tayin cihazı. ....                                                                                                                                                             | 48 |
| <b>Şekil 2.11.</b> Toplam $\alpha/\beta$ sayım sistemi. ....                                                                                                                                                        | 49 |
| <b>Şekil 2.12.</b> ICP-MS sistemi için standart çözeltiler ile elde edilen kalibrasyon eğrileri                                                                                                                     | 49 |
| <b>Şekil 3.1.</b> Farklı vakum değerleri için FUAMP ve ORTEC sistemlerinin verim değerleri. ....                                                                                                                    | 53 |
| <b>Şekil 3.2.</b> FUAMP yükselteci için kazanç grafiği. ....                                                                                                                                                        | 54 |
| <b>Şekil 3.3.</b> ORTEC yükselteci için kazanç grafiği. ....                                                                                                                                                        | 55 |
| <b>Şekil 3.4.</b> $^{244}\text{Cm}$ radyoizotopu için elde edilen spektrum ve bu spektruma ait Gauss fit eğrisi.....                                                                                                | 56 |
| <b>Şekil 3.5.</b> ORTEC sistemi için elektronik kalibrasyon eğrisi. ....                                                                                                                                            | 58 |
| <b>Şekil 3.6.</b> FUAMP sistemi için elektronik kalibrasyon eğrisi. ....                                                                                                                                            | 58 |
| <b>Şekil 3.7.</b> ORTEC alfa spektroskopi sistemi enerji kalibrasyonu.....                                                                                                                                          | 60 |
| <b>Şekil 3.8.</b> FUAMP alfa spektroskopi sistemi enerji kalibrasyonu. ....                                                                                                                                         | 60 |
| <b>Şekil 3.9.</b> ORTEC ve FUAMP sistemleri için verim kalibrasyon eğrileri. ....                                                                                                                                   | 61 |
| <b>Şekil 3.10.</b> Nemrut Krater Gölü yüzey sularında (a) toplam alfa ve (b) toplam beta seviyeleri. ....                                                                                                           | 64 |
| <b>Şekil 3.11.</b> Nemrut Krater Gölü (a) toplam alfa ve (b) toplam beta frekans dağılımları. ....                                                                                                                  | 64 |

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.12.</b> FUAMP ve ORTEC sistemleri ile N-27 nolu örneğin karşılıklı sayımları. ....     | 66 |
| <b>Şekil 3.13.</b> FUAMP ve ORTEC sistemleri ile standart alfa kaynaklarının karşılıklı sayımları | 66 |
| <b>Şekil 4.1.</b> FUAMP ve ORTEC yükseltme katmanlarının ölçekli resimleri. ....                  | 69 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 1.1.</b> Radyoaktivite birimleri ve dönüşümleri (Canbazoğlu, 2004). .....               | 11 |
| <b>Tablo 1.2.</b> Radyasyon türüne göre kalite faktörleri (Canbazoğlu, 2004).....                | 11 |
| <b>Tablo 1.3.</b> Radyoaktif bozunum serileri. ....                                              | 12 |
| <b>Tablo 1.4.</b> Radon deteksiyon metotları (EPA, 1996). ....                                   | 24 |
| <b>Tablo 2.1.</b> Bu çalışmada kullanılan standart alfa kalibrasyon kaynakları listesi.....      | 44 |
| <b>Tablo 3.1.</b> FUAMP ve ORTEC sistemleri için FWHM ve sinyal/gürültü oranı değerleri. ....    | 57 |
| <b>Tablo 3.2.</b> Nemrut Krater Gölü ağır metal konsantrasyonları.....                           | 63 |
| <b>Tablo 3.3.</b> Nemrut Krater Gölü yüzey suyu toplam $\alpha/\beta$ ölçüm sonuçları. ....      | 65 |
| <b>Tablo 4.1.</b> Türkiye’de göl sularında radyoaktivite tayini ile ilgili bazı çalışmalar. .... | 73 |

## SEMBOLLER ve KISALTMALAR

|                              |                                                                          |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| <b>A</b>                     | : Aktivite                                                               |
| <b>As</b>                    | : Arsenik elementi                                                       |
| <b>Bq</b>                    | : Becquerel                                                              |
| <b>C</b>                     | : Kondansatör                                                            |
| <b>Ci</b>                    | : Curie                                                                  |
| <b>CR-39</b>                 | : Allil-diglikol karbonat – Katıhal iz detektörü                         |
| <b>Cu</b>                    | : Bakır elementi                                                         |
| <b>EPA</b>                   | : Environmental Protection Agency – Çevre Koruma Ajansı                  |
| <b>Fe</b>                    | : Demir elementi                                                         |
| <b>FUAMP</b>                 | : Geliştirilen spektroskopik yükselteç sisteminin adı                    |
| <b>FWHM</b>                  | : Full Width at Half Maximum – Pik yarısındaki tam genişlik              |
| <b>HNO<sub>3</sub></b>       | : Nitrik asit                                                            |
| <b>HPGe</b>                  | : Yüksek saflıkta germanyum detektörü                                    |
| <b>IAEA</b>                  | : International Atomic Energy Agency – Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı |
| <b>k<sub>a</sub></b>         | : Dallanma oranı                                                         |
| <b>MCA</b>                   | : Multi Channel Analyzer - Çok Kanallı Analizör                          |
| <b>Mn</b>                    | : Mangan elementi                                                        |
| <b>NaI(Tl)</b>               | : Sodyum iyodür sintilasyon detektörü                                    |
| <b>NaOH</b>                  | : Sodyum hidroksit                                                       |
| <b>NIM</b>                   | : Nuclear Instrumentation Module                                         |
| <b>Ni</b>                    | : Nikel elementi                                                         |
| <b>ORTEC</b>                 | : Deteksiyon sistemleri üreten dünya çapında çok yaygın bir firma        |
| <b>R</b>                     | : Direnç                                                                 |
| <b>SCA</b>                   | : Single Channel Analyzer - Tek Kanallı Analizör                         |
| <b>Se</b>                    | : Selenyum elementi                                                      |
| <b>SNR</b>                   | : Signal to Noise Ratio – Sinyal/Gürültü oranı                           |
| <b>WHO</b>                   | : World Health Organisation – Dünya Sağlık Örgütü                        |
| <b>Z</b>                     | : Atom numarası                                                          |
| <b>Zn</b>                    | : Çinko elementi                                                         |
| <b><math>\alpha</math></b>   | : Alfa radyasyonu                                                        |
| <b><math>\gamma</math></b>   | : Gama radyasyonu                                                        |
| <b><math>\epsilon</math></b> | : Detektör verimi                                                        |
| <b><math>\lambda</math></b>  | : Radyoaktif bozunum sabiti                                              |
| <b><math>\beta</math></b>    | : Beta radyasyonu                                                        |

|            |                                                         |
|------------|---------------------------------------------------------|
| $He_2^4$   | : Helyum çekirdeği ( $\alpha$ radyasyonunu temsil eder) |
| $t_{1/2}$  | : Yarılanma süresi                                      |
| $^{218}Po$ | : Polonyum elementinin 218 atom numaralı izotopu        |
| $^{222}Rn$ | : Radon elementinin 222 atom numaralı izotopu           |
| $^{232}Th$ | : Toryum elementinin 232 atom numaralı izotopu          |
| $^{235}U$  | : Uranyum elementinin 235 atom numaralı izotopu         |
| $^{237}Np$ | : Neptinyum elementinin 237 atom numaralı izotopu       |
| $^{238}U$  | : Uranyum elementinin 238 atom numaralı izotopu         |
| $^{239}Pu$ | : Plutonyum elementinin 239 atom numaralı izotopu       |
| $^{241}Am$ | : Amerisyum elementinin 241 atom numaralı izotopu       |
| $^{244}Cm$ | : Semeryum elementinin 244 atom numaralı izotopu        |

## 1. GİRİŞ

Radyasyon, enerjinin elektromanyetik dalga paketleri veya yüklü ya da yüksüz parçacıklar aracılığı ile uzayda taşınması olarak tanımlanır. Radyasyon, iç dönüşüm geçiren atomlar tarafından yayınlanan, boşlukta ve madde içerisinde hareket edebilen enerji olarak da tanımlanır. Elektromanyetik radyasyon çeşitlerine örnek olarak gama ( $\gamma$ ) ve x-ışınları, parçacık radyasyon çeşitlerine ise alfa ( $\alpha$  -  $He_2^4$ ), beta ( $\beta^-$   $e^-$ ,  $e^+$ ), nötron (n), müon ( $\mu$ ) ve nötrinolar ( $\nu$ ) örnek olarak gösterilebilir. Radyasyonun kaynağı çekirdek olabileceği gibi, hızlandırılmış parçacıkların madde ile etkileşimi neticesinde de meydana gelebilir. Bu anlamda radyasyon doğal ve yapay radyasyon olarak sınıflandırılmaktadır. Doğada var olan radyoaktif bozunum zincirlerinin ara ürünleri tarafından yayınlanan radyasyona doğal radyasyon, hızlandırılmış parçacık ya da çekirdek reaksiyonları sonucu elde edilen radyasyona ise yapay radyasyon denir.

Dünyada günlük hayatın bir parçası olan radyasyonla bütün canlılar sürekli olarak etkileşim halindedirler. Bu radyasyonun kaynağı; hava, su ve topraktaki doğal radyoaktif bozunumlar, uzaydan gelen kozmik ışınlar, yapay olarak elde edilmiş radyasyon ve gelişen teknolojinin ürünü olarak iletişim cihazları olabilir. Doğal radyasyonun büyük bir kısmını radon gazı ( $^{222}\text{Rn}$ ) oluşturmaktadır. Renksiz ve kokusuz bir soygaz olan radon gazı, 3,82 günlük yarılanma süresi ile 5,49 MeV enerjili  $\alpha$  bozunumu gerçekleştirir. Radon gazının tek gaz radyoaktif ara ürün olması ve bozunumu sonucu açığa çıkan yine  $\alpha$  bozunumu gerçekleştiren ürün çekirdeklerin nispeten daha kısa ömürlü olması dolayısıyla insan sağlığını etkileyebilmektedir. Canlıların yaşamını sağlıklı bir şekilde sürdürebilmeleri için bu radyasyonların belirlenmesi, ulusal ve uluslararası bilimsel örgütler tarafından belirlenen sınır değerlere göre değerlendirilmesi ve gerek duyulduğunda bilimsel metotlarla giderilmesi gerekmektedir. Bir ortamdaki radyasyon miktarı, birim süredeki bozunum sayısı olarak tanımlanan radyoaktivite ile temsil edilir.

Radyasyon insan duyu organları ile algılanabilecek bir olgu olmadığından, miktarının ve türünün belirlenebilmesi için çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Bunun için radyasyonun madde ile etkileşimi sonucu meydana gelen hasar oluşumu, atomik uyarılma ve iyonlaşma

olaylarından faydalanılmıştır. Radyasyonun türünü, enerjisini, birim zamandaki bozunum sayısını (aktivite) ve belirli bir madde miktarı tarafından soğurulan enerjisini ölçmek için yapılan ön işlemlere genel olarak deteksiyon (algılama) adı verilir (Özgen, 1992). Algılanması istenen radyasyona veya ortamına uygun olarak kullanılabilecek farklı detektörler ve bunlara uygun olarak deteksiyon metotları bulunmaktadır.

Deteksiyon metotları aktif ve pasif deteksiyon metotları olarak iki ana başlık altında değerlendirilmektedir. Pasif deteksiyon metotlarında, radyasyonun madde ile etkileşimi sonucu meydana gelen hasar oluşumlarının bir dizi kimyasal işlemler sonucunda optik mikroskop altında görülebilir hale getirilerek sayılması prensibinden faydalanılmaktadır. Katıhal nükleer iz detektörleri bu sınıfa girmektedir. Polimer malzemelerden yapılan bu detektörlere yüklü parçacıklar girdiğinde polimer zinciri ile etkileşerek hasar oluşturur, daha sonra nanometre boyutlarındaki bu hasar kimyasal kazıma işlemi ile  $\mu\text{m}$  boyutlarına büyütülerek optik mikroskop altında sayılır. Bu deteksiyon metodunda radyasyon hakkında anlık olarak bilgi alınamadığından dolayı pasif deteksiyon metodu olarak adlandırılır. Aktif deteksiyon metotlarında ise, radyasyon enerjisini elektrik sinyaline dönüştüren detektör ve bu detektöre uygun nükleer elektronik sistemler kullanılarak radyasyon hakkında anlık olarak bilgi elde edilir. Bu deteksiyon metoduna gaz doldurulmuş tüp detektörler, sintilasyon (parıldama) detektörleri ve yarıiletken detektörler örnek verilebilir.

Gaz doldurulmuş tüp detektörlerde, gaz molekülleri ile etkileşen radyasyonun meydana getirdiği iyonlaşma sonucu oluşan elektronların elektrik alanda hızlandırılarak çoğaltılması ve anotta toplanması ile elde edilen yüklerin oluşturduğu sinyalin işlenerek sayılması prensibinden faydalanılmaktadır. İyon odaları, orantılı sayaçlar ve Geiger-Müller detektörleri bu detektör sınıfına girmektedir. Sintilasyon detektörlerinde, sintilatör (parıldayıcı) ile etkileşen radyasyon sintilatörde atomik uyarılmalara neden olur. Uyarılan elektronlar temel seviyelerine dönerken dalga boyu görünür bölgede olan fotonlar yayarlar ve bu fotonlar fotokatot üzerine yönlendirilerek burada fotoelektrik olayı sonucu fotoelektronların oluşumuna neden olur ve oluşan elektronlar çoğaltılarak çıkışta algılanabilir bir sinyal oluşur. İnorganik ve organik sintilatörlerden yapılmış farklı tip detektörler bulunmaktadır. Yarı iletken detektörlerde ise radyasyonun meydana getirdiği elektron-deşik çiftlerinin oluşturduğu sinyallerin elektronik süreçlerden geçirilerek analiz edilmesi prensibinden faydalanılır. Gaz doldurulmuş detektörlerin bazı tiplerinin haricinde,

radyasyonun oluşturduğu sinyalin analog olarak yukseltilmesi, şekillendirilmesi ve sayısal sinyallere dönüştürülüp sayılması için elektronik metotların kullanılması gerekmektedir.

Günümüzde kullanılan radyasyon deteksiyon sistemleri bir detektör ve bu detektöre uygun nükleer elektronik elemanlardan oluşur. Detektörden elde edilen elektrik sinyallerinin doğrudan ölçmek ya da analizini yapmak mümkün değildir.  nce sinyallerin analog olarak genliklerinin belli oranlarda yukseltilerek Gausyen bir sinyal şekline getirilmesi gerekmektedir. Nükleer elektronik cihazlar parçacık veya elektromanyetik radyasyon akısının şiddetini ölçer ve radyoaktif kaynakların bileşenlerini tipine, enerjisine ve birbirlerine nazaran meydana geliş zamanlarına göre analiz eder (Kuluöztürk, 2009). Nükleer elektronik sistemler genellikle  n-yükselteç, ana-yükselteç ve sinyal (atma) şekillendirme, analizör ve çıkış elemanlarından oluşmaktadır.

Gaz doldurulmuş t p detektörlerin bazı tipleri haricinde bütün deteksiyon sistemleri detektör çıkışında bir  n yükseltme ve şekillendirme işlemine gereksinim duyarlar.  n-yükselteçler çalışma şekillerine göre akım duyarlı, gerilim duyarlı ve y k duyarlı olmak üzere üç ana başlık altında incelenir (Gilmore, 2008). Radyasyon detektörleri yüksek empedanslı aygıtlar olduğundan genellikle y k duyarlı  n-yükselteçler tercih edilirler (Leo, 1994). Detektör çıkışında bir sinyal şeklinde gelen radyasyon sinyali  n-yükselteç katmanında şekillendirilip yukseltilerek ana yükselteç katmanına iletilir. Bu katmanda sinyaller yarı Gausyen (Semi-Gaussian) şekle getirilir ve analizör katmanına iletilir. Analizör sinyalin önceden kullanıcı tarafından belirlenen genlik değerlerine sahip olanlarını ayırt eder. Analizörler tek kanallı (Single Channel Analyzer-SCA) ve çok kanallı (Multi Channel Analyzer-MCA) olmak üzere iki tipte bulunmaktadır. Tek kanallı analizörde iki adet ayırıcı (diskriminatör) kullanılarak, biri enerji aralığının alt sınırını ve diğeri ise enerji üst sınırını belirleyecek şekilde ayarlanır ve oluşturulan enerji aralığındaki radyasyon miktarı belirlenir. Çok kanallı analizörlerde ise radyasyon tarafından oluşturulan analog sinyalin genliği analog-dijital dönüştürücüler tarafından sayısal değere dönüştürülür ve her bir sayısal voltaj değeri bir kanal olarak kaydedilir.  ıkış katmanlarında ise analizörden elde edilen sayısal sinyaller sıralanıp işlenerek kullanıcıya sunulur. Bu şekilde elde edilmiş veriler ışığında spektroskopik analizler gerçekleştirmek ve analizi yapılan örnekteki radyoizotopları tanımlamak mümkün olabilmektedir.

Birçok alanda kullanılmak üzere üretilmiş nükleer algılama sistemlerinde, belirlenmesi istenilen radyasyona göre farklı detektörler ve deteksiyon metotları bulunmaktadır. Radon

gazını algılamak için aktif ve pasif deteksiyon metotları kullanılmaktadır. Pasif yöntem, katihal iz detektörlerinde radon gazının yayınladığı  $\alpha$  parçacıklarının oluşturduğu izlerin sayılması işlemidir. Polimer malzemelerden üretilen bu detektörlerin en yaygın olanı ticari adı CR-39 olan allil-diglikol karbonat polimer iz detektörüdür. Yaklaşık olarak 5 MeV ve üzerindeki enerjilere sahip yüklü parçacık radyasyonlar bu polimerde iz bırakır, oluşan iz derişik NaOH çözeltisi kullanılarak optik mikroskop altında görülebilecek boyutlara getirilir ve daha sonra el yordamıyla ya da otomatik olarak sayımı yapılır. Sayım sonuçları, daha önceden bu detektör için elde edilen kalibrasyon katsayısı ile çarpılarak ortamdaki radon konsantrasyonu  $\text{KBq/m}^3$  cinsinden bulunur. Aktif yöntem ile radon gazı deteksiyonu iki temel metotla gerçekleştirilir. Birinde radon gazının yaydığı 5,49 MeV enerjili  $\alpha$  radyasyonu algılanırken diğer metotta radon gazının kız çekirdeği olan  $^{218}\text{Po}$  çekirdeğinin yayımladığı 6,11 MeV enerjili  $\alpha$  radyasyonu algılanır. Bu algılama prensiplerinden yola çıkılarak kullanılan detektör ve elektroniğe bağı olarak toplam 14 aktif radon deteksiyon metodu kullanılmaktadır (EPA, 1996). Bu metotların hiçbirinde spektroskopik olarak  $^{222}\text{Rn}$  ve  $^{218}\text{Po}$  çekirdekleri eşzamanlı olarak algılanmamıştır.

Bu çalışmada  $^{222}\text{Rn}$  ve  $^{218}\text{Po}$  çekirdeklerini eşzamanlı olarak algılayabilen spektroskopik bir algılama sistemi geliştirilmesi planlanmıştır. Bu amaçla vakum ortamı oluşturulmuş ve bu ortama örnek ile detektör yerleştirilmiştir. Detektör çıkışına tarafımızca geliştirilen ön yükselteç ve ana yükselteç katmanlarını içeren elektronik yükselteç katmanı bağlanmıştır. Yükselteç çıkışında elde edilen analog sinyaller MCA katmanında sıralanarak sayılmıştır. Karşılaştırmalı sayımlar standart alfa spektroskopi sistemi (ORTEC) ve tarafımızca geliştirilen algılama sistemleri ile gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırmalı sayımlarda kullanılan doğal örnekler Nemrut Krater Gölü (Bitlis) yüzey sularından elde edilmiştir.

Bu çalışma, nükleer elektronik çalışmalarda “Türkiye’nin Deprem Riski Yüksek Jeo-Stratejik -Ancak Tektonik Rejimleri Farklı-Bölgelerinde Deprem Davranışının Çok Disiplinli Yaklaşımlarla Araştırılması” adlı proje (Proje No: 5057001) ile desteklenmiştir. Nemrut Krater Gölü (Bitlis) yüzey suyu örneklerinin toplanması ve analizlerinin gerçekleştirilmesi konularında ise FÜBAP FF.13.01 nolu proje ile desteklenmiştir.

## 1.2. Radyasyon ve Radyoaktivite

Radyasyon, iç dönüşüm geçiren atomlar tarafından yayınlanan, boşlukta ve madde içerisinde hareket edebilen enerji olarak da tanımlanır. Radyasyon, elektromanyetik dalga'nın temelini teşkil eden enerji paketlerinden (gama, x-ışınları, kozmik ışınlar) ya da maddenin yapı taşları olan kütleli, yüklü veya yüksüz (proton, nötron, elektron, alfa parçacıkları ile daha temel düzeyde müonlar, pionlar, hadronlar vb.) taneciklerden oluşur. Yayınlayan kaynağın karakteristiğine bağlı olarak taşınan bu enerjinin taşıyıcıları, parçacıklar veya elektromanyetik dalgalar olabilir (Görür Ş. , 2006). Radyasyon tanımlanırken şu üç temel parametre kullanılır; enerjisi (düşük ya da yüksek), türü (parçacık ya da elektromanyetik) ve kaynağı (doğal ya da yapay).

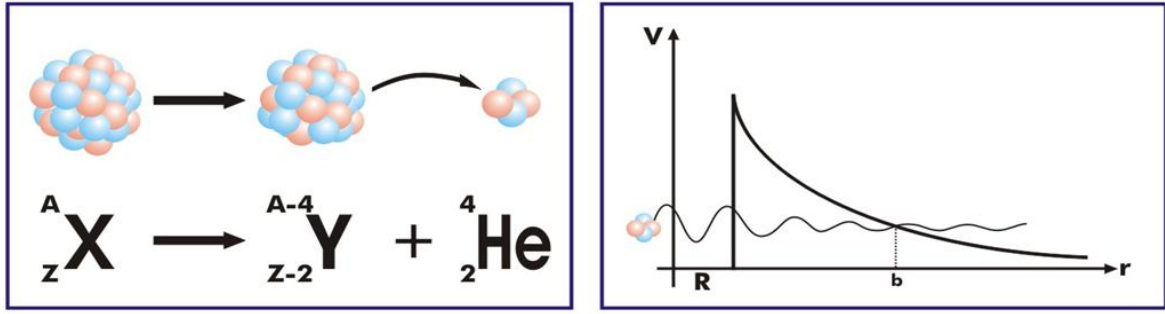
Radyasyon, madde ile etkileşimine bağlı olarak iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak iki ana başlık altında değerlendirilir. İyonlaştırıcı radyasyona örnek olarak; alfa, beta, gama, x-ışınları ve hızlı elektronlar sayılabilir. İyonlaştırıcı olmayan radyasyona mikrodalga, görünür ışık, kızılötesi, televizyon ve radyo dalgaları örnek olarak sayılabilir (Değerlier, 2007).

### 1.2.1. Radyoaktif Bozunum

Radyasyonun çekirdekten parçacık veya elektromanyetik olarak atılması olayına radyoaktif bozunum denir. Genel olarak bilinen radyoaktif bozunum türleri alfa, beta, elektron yakalama ve gama bozunumlarıdır.

#### Alfa Bozunumu

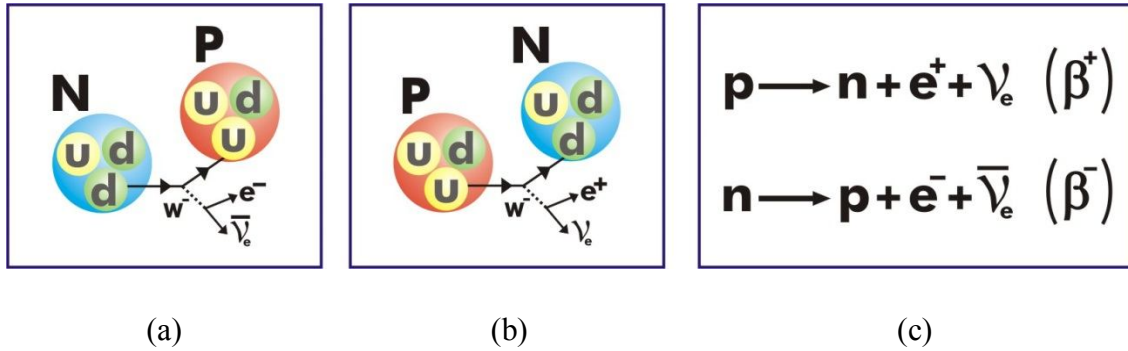
Çekirdekten, 2 proton ve 2 nötrondan oluşan Helyum çekirdeğinin ( ${}^4_2\text{He}$ ) tünelleme yolu ile dışarı çıkması olayıdır (Şekil 1.1). Bu olay genellikle  $Z \geq 83$  olan çekirdeklerde daha rahat gerçekleşir. Alfa radyasyonu nispeten büyük ve ağır bir parçacık radyasyonu olduğundan bir kâğıt parçası tarafından durdurulabilir. Alfa radyasyonu sahip olduğu enerjinin çoğunu, etkileştiği yüzey içerisinde vardığı son noktada bırakır.



Şekil 1.1. Alfa bozunumu ve alfa parçacığının çekirdek Coulomb potansiyelini aşması.

### Beta Bozunumu

Beta bozunumu, çekirdekteki bir protonun nötrona dönüşmesi ( $\beta^+$ ) veya bir nötronun protona dönüşmesi ( $\beta^-$ ) olmak üzere iki şekilde oluşur. Bu olayın temeli proton ve nötronların yapısında bulunan up ve down kuarkların birbirlerine dönüşmesi ve bu arada  $e^-$  veya  $e^+$  ile  $\bar{\nu}_e$  veya  $\nu_e$  oluşmasıdır. Beta radyasyonu elektronlardan oluşur ve ince bir alüminyum levha bu elektronları durdurmak için yeterlidir. Beta ışıması şematik olarak Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. (a)  $\beta^-$  bozumu, (b)  $\beta^+$  bozumu ve (c)  $\beta$  bozum reaksiyonları.

### Elektron Yakalama

Elektron yakalanması olayında atomun çekirdeği yörünge elektronlarından birini yakalar. Bu elektron çekirdekteki protonlardan biri ile birleşerek nötron haline gelir. Bu olay atomun  $Z$ ’sinin  $Z-1$  haline gelmesine sebep olur ( $p + e^- \rightarrow n$ ). Yani  $\beta^+$  bozunmasına benzer. Elektron yakalanması iki safhalı bir olaydır. Birinci kısımda elektron çekirdek

tarafından yakalanır ve bu atomu uyarılmış halde bırakır, ikinci kısımda ise elektromanyetik radyasyon yayınlanır.

Elektronun çekirdek tarafından yakalanması yörüngede bir elektron boşluğu meydana getirir, bundan dolayı yörüngeler arasındaki elektron geçişleri baslar ve bunun sonucunda da X-ışınları meydana gelir. Yani birinci ürünler X-ışınları salarak ikinci ürün haline gelirler. Bu sebeple bu olayda yakalanan elektron genellikle iç tabaka yani K tabakası elektronlarıdır ve bu sebeple bu olaya çoğunlukla “K yakalanması” denir. Bu olay genellikle  $\beta^+$  bozunmasına uğrayan atomlar için alternatif bir bozunma şeklidir ve proton fazlalığı olan kararsız atomlar genellikle bu iki yoldan birine göre bozunma şansına sahiptir (Özdemir, 2006).

## **Nötronlar**

Kütleleri proton kütlesine eşit ve elektrik yükleri olmayan parçacıklardır. Nötronlar doğal radyoaktif bozunum sonucu meydana gelmezler. Atom çekirdeğinden nötron çıkışı ‘Fisyon Olayı’ sonucu meydana gelir. Fisyon olayı, ağır bir çekirdeğin nötron bombardımanı sonucunda çekirdeğin ikiye bölünmesi ve bu esnada birden fazla nötron ve büyük bir enerjinin açığa çıkması olayıdır (Krane, 1988).

## **Gama Işınması**

Gama ışını yayınlanması, çekirdeğin A ve Z’sini değiştirmeksizin uyarılmış haldeki çekirdeğin enerjisini dışarı vermesidir ve enerji fazlalığı olan çekirdekler tarafından yayınlanan elektromanyetik radyasyonlardır.

Gama ışınları çıkış şekline göre x-ışınlarından farklıdır ve atom çekirdeğinin yeniden düzenlenmesiyle meydana gelir.  $\gamma$  ışınlarının enerjileri yaklaşık olarak 0,1 MeV ile 3 MeV arasında değişir. Radyoaktif bozunma, Nükleer fisyon ve çekirdeğe nötron girmesiyle oluşan yakalama reaksiyonları sonucunda  $\gamma$  ışınları meydana gelebilir.

Gama ışınları çok yüksek enerjili elektromanyetik dalgalardır. Genel olarak gama ışınları tek başlarına meydana gelmezler. Bir takım radyoaktif bozunma veya çekirdek tepkimelerinin ardından meydana gelirler. Örneğin  $\alpha$  ve  $\beta$  parçacıkları oluşturan bazı radyoaktif bozunumlar sonucunda çekirdek uyarılmış hale gelir. Bu yüksek enerjili çekirdek gama ışını yayarak daha düşük enerjili çekirdeğe dönüşür (Özdemir, 2006).

### 1.2.2. Radyoaktif Bozunum Kanunu

Bütün kararsız çekirdekler bir ya da birden fazla bozunum gerçekleştirerek kararlı hale geçmeye çalışırlar. Bir atom çekirdeğinin radyoaktif bozunma biçimlerinden herhangi birisiyle bozunması sonucu başlangıçtaki çekirdek sayısının üstel olarak azalacağı deneysel çalışmalarla gösterilmiştir. Her bir çekirdek için karakteristik olan bu durum radyoaktif bozunum kanunu olarak adlandırılır (Krane, 1988). Bu kanuna göre  $t$  süre sonra bozunan çekirdek sayısı ile başlangıçtaki çekirdek sayısının oranı her çekirdeğe has bir sabit değere eşittir.

$$\lambda = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} \quad (1.1)$$

Burada  $\lambda$  radyoaktif bozunum sabiti,  $dN/dt$   $t$  süre sonunda bozunan çekirdek sayısı ve  $N_0$  başlangıçtaki çekirdek sayısıdır. Bu denklem aşağıdaki gibi düzenlenirse,

$$\frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt \quad (1.2)$$

Her iki tarafın 0-t aralığında integrali alınırsa,

$$\int_0^t \frac{dN}{N} = -\int_0^t \lambda \cdot dt \quad (1.3)$$

$$\ln\left(\frac{N(t)}{N_0}\right) = -\lambda \cdot t \quad (1.4)$$

Bu integral sonucunun her iki tarafı  $e$  üzeri şeklinde yazılırsa,

$$\frac{N(t)}{N_0} = e^{-\lambda \cdot t} \quad (1.5)$$

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (1.6)$$

Denklem 1.6 radyoaktif bozunum kanunu olarak adlandırılır.

Radyoaktif çekirdekler tanımlanırken hangi tip radyasyonu hangi enerjiyle yaydığının yanı sıra yarılanma süresi kavramı da belirtilmelidir. Yarılanma süresi bir radyoaktif çekirdeğin başlangıçtaki sayısının yarıya düşmesi için gerekli süre olarak adlandırılır ve

her bir çekirdek için karakteristik bir değerdir. Bunu hesaplamak için Denklem 1.6 da  $N(t)$  yerine  $N_0/2$  konursa,

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (1.7)$$

$$e^{\lambda t} = 2 \quad (1.8)$$

bulunur. Her iki tarafın doğal logaritması alınır,

$$\lambda \cdot t = \ln 2 \quad (1.9)$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1.10)$$

elde edilir. Aktivite birim zamandaki bozunum sayısı olarak adlandırılır. Denklem 1.6 nın iki tarafının zamana göre türevi alınır,

$$A(t) = \frac{dN(t)}{dt} = \frac{d(N_0 \cdot e^{-\lambda t})}{dt} \quad (1.11)$$

$$A(t) = -\lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (1.12)$$

$$A(t) = -\lambda \cdot N(t) \quad (1.13)$$

Başlangıç aktivitesini bulmak için  $t=0$  alınıp Denklem 1.13 hesaplanırsa,

$$A_0 = -\lambda \cdot N_0 \quad (1.14)$$

elde edilir. Bu durumda bir önceki denklem aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (1.15)$$

### 1.2.3. Radyoaktivite Birimleri

Bir ortamda bulunan radyasyonun oluşturduğu yoğunluğun bilinmesi için ortamdaki radyoaktivitenin belirlenmesi gerekmektedir. Radyoaktivite belirleme çalışmaları ile ortamda hangi tip radyasyondan hangi miktarda olduğu belirlenebilir. Daha sonra yapılacak bir dizi işlemler ile daha önceden belirlenmiş limitler kullanılarak insan sağlığına

ne kadar zararlı olabileceği hesaplanabilir. Bütün bu işlemler yapılırken kullanılan radyoaktivite birimleri ve kendi aralarındaki dönüşümleri Tablo 1.1 de verilmiştir.

### **Aktivite Birimi**

Aktivitenin eski birim sistemindeki birimi Curie (Ci) dir ve 1 gr radyumun 1 saniyedeki bozunum sayısı olarak adlandırılır. Aktivitenin SI birim sistemindeki karşılığı Becquerel (Bq) olup, saniyede bir bozunma meydana getiren herhangi bir radyoaktif madde miktarı olarak tarif edilir (Özdemir, 2006). Radyum 1 saniyede  $3,7 \times 10^{10}$  bozunum gerçekleştirir. Bu halde bu iki birimin birbirine dönüşümü;

$$1Ci = 3,7 \times 10^{10} Bq \quad (1.16)$$

$$1Bq = 2,7 \times 10^{-11} Ci \quad (1.17)$$

### **Işınlama Dozu Birimi**

Radyasyonun birim hava kütlesi içerisinde meydana getirdiği iyonlaşma miktarıdır. Eski birim sisteminde Röntgen (R) olarak gösterilen ışınlama dozu SI birim sisteminde Coulomb / kilogram (C/kg) ile gösterilir.

$$1R = 2,58 \times 10^{-4} C/kg \quad (1.18)$$

### **Soğurulmuş Doz Birimi**

Soğurulan doz her ortam ve türdeki iyonlaştırıcı radyasyonlar için tanımlanmıştır. Radyasyona maruz kalan bir maddenin birim miktarındaki soğurulan radyasyon enerjisidir. SI birim sisteminde soğurulan doz birimi Gray (Gy) olup, Gray; 1 kg'lık bir maddeye 1 Joule (J)'lük enerji veren herhangi bir iyonlaştırıcı radyasyonun dozudur. Eski birim sistemindeki birimi rad (**r**adiation **a**bsorbed **d**ose) olup, 1 rad, herhangi bir maddenin gramı başına 100 erg'lik enerji soğurumuna eşdeğerdir (Özdemir, 2006) (Canbazoğlu, 2004).

$$Gy = 100 rad \quad (1.19)$$

## Eşdeğer Doz Birimi

Soğurulan dozun oluşturduğu zararlı biyolojik etkilerin, iyonlaştırıcı radyasyonların çeşitlerine ve oluşturdukları iyonlaşma yoğunluğuna bağlı olarak değiştiği yapılan biyolojik deneylerle gösterilmiştir. Bu nedenle eşdeğer doz birimi, iyonlaştırıcı radyasyonların oluşturduğu zararlı biyolojik etkilerin bir ölçüsü olmalı ve buna bağlı olarak bazı faktörleri kapsamalıdır. Eşdeğer doz birimi SI birim sisteminde, joule/kg olup Sievert (Sv) adı verilmiştir ve soğurulmuş doz ile kalite faktörünün çarpımı olarak tanımlanmıştır. Eski birim sistemindeki karşılığı rem (röntgen equivalent man)'dir.

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem} \quad (1.20)$$

$$\text{rem} = \text{rad} \times W_R \quad (1.21)$$

$$\text{Sv} = \text{Gy} \times W_R \quad (1.22)$$

**Tablo 1.1.** Radyoaktivite birimleri ve dönüşümleri (Canbazoğlu, 2004).

| TERİM          | BİRİMİ      |                | DÖNÜŞÜM                        |
|----------------|-------------|----------------|--------------------------------|
|                | ESKİ        | SI             |                                |
| Aktivite       | Curie (Ci)  | Becquerel (Bq) | 1 Ci=3,7x10 <sup>10</sup> Bq   |
| Işınlama Dozu  | Röntgen (R) | C/kg           | 1 R=2,58x10 <sup>-4</sup> C/kg |
| Soğurulmuş Doz | rad         | Gray (Gy)      | 1 rad=10 <sup>-2</sup> Gy      |
| Doz Eşdeğeri   | rem         | Sievert (Sv)   | 1 rem=10 <sup>-2</sup> Sv      |

**Tablo 1.2.** Radyasyon türüne göre kalite faktörleri (Canbazoğlu, 2004).

| Radyasyon Türü                   | Kalite Faktörü (W <sub>R</sub> ) |
|----------------------------------|----------------------------------|
| X ve Gama Işınları               | 1                                |
| Elektronlar ve Beta Parçacıkları | 1                                |
| Nötronlar (E < 10 keV)           | 3                                |
| Nötronlar (E > 10 keV)           | 10                               |
| Alfa Parçacıkları                | 20                               |

#### 1.2.4. Yapay Radyoaktivite

Radyasyonun çekirdekten yayılımı, doğal bozunumlar sonucu olabileceği gibi yapay yollarla da elde edilebilmektedir. Radyoaktif olmayan bir çekirdeğin, temel taneciklerle (alfa, nötron, proton v.b.) bombardıman edilmesiyle kararsız çekirdek haline dönüştürülmesi olayına yapay radyoaktivite denir. Yapay radyoaktivite bilimsel çalışmalar, sağlık, tarım, gıda, enerji ve savunma gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

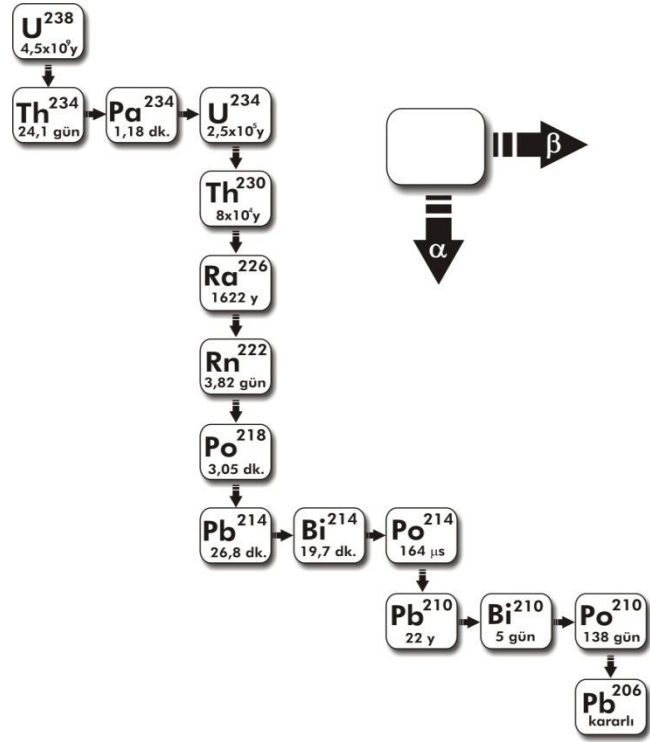
Tıbbi, zirai ve endüstriyel amaçla kullanılan x-ışınları ve radyoaktif maddeler, nükleer bomba denemeleri sonucu meydana gelen nükleer serpintiler, çok az da olsa nükleer güç üretiminden salınan radyoaktif maddeler ile bazı tüketici ürünlerinde kullanılan radyoaktif maddeler bilinen başlıca yapay radyasyon kaynaklarıdır. Yapay radyasyon kaynakları da doğal radyasyon kaynakları gibi belli miktarlarda radyasyon dozuna maruz kalınmasına sebep olurlar. Ancak bu doz miktarı talebe bağlı olarak artsa da, doğal kaynaklardan alınan doza göre çok daha düşüktür. Doğal radyasyon kaynaklarının aksine tamamen kontrol altında olmaları maruz kalınacak radyasyon miktarını asgariye indirmektedir.

#### 1.2.5. Doğal Radyoaktivite

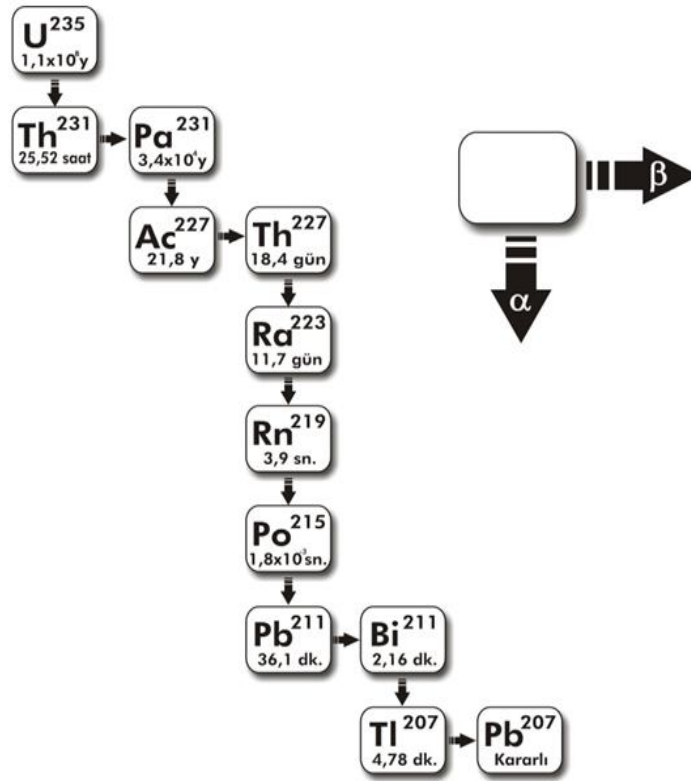
Doğal radyasyon yeryüzünde bulunan bazı elementlerin oluşturduğu bozunum zincirlerinden ya da uzay kaynaklı kozmik ışınlardan kaynaklanmaktadır. Dört adet doğal bozunum zinciri bulunmaktadır ancak  $^{237}\text{Np}$  serisi yarılanma süresi dünyanın yaşına göre kısa olmasından dolayı günümüzde tükenmiştir. Bu nedenle doğada üç adet bozunum zinciri mevcuttur ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ). Bu bozunum zincirlerinin ara ürünleri oluşturdukları konsantrasyonlar ile doğal radyoaktiviteyi teşkil etmektedirler.

**Tablo 1.3.** Radyoaktif bozunum serileri.

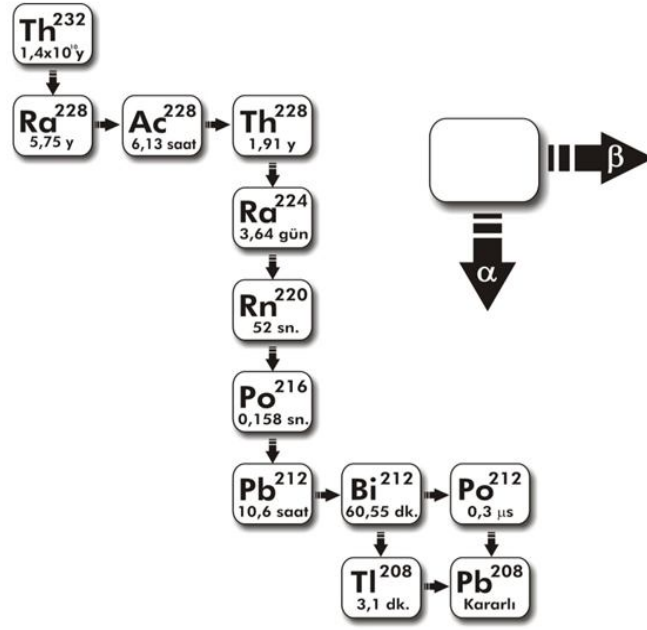
| Ana Çekirdek      | $T_{1/2}$ Yarıömür (yıl) | Kararlı Çekirdek  | Seri |
|-------------------|--------------------------|-------------------|------|
| $^{232}\text{Th}$ | $1.4 \times 10^{10}$     | $^{208}\text{Pb}$ | 4n   |
| $^{237}\text{Np}$ | $2.1 \times 10^6$        | $^{209}\text{Bi}$ | 4n+1 |
| $^{238}\text{U}$  | $4.5 \times 10^9$        | $^{206}\text{Pb}$ | 4n+2 |
| $^{235}\text{U}$  | $7.0 \times 10^8$        | $^{207}\text{Pb}$ | 4n+3 |



Şekil 1.3.  $^{238}\text{U}$  bozunum zinciri.



Şekil 1.4.  $^{235}\text{U}$  bozunum zinciri.



Şekil 1.5.  $^{232}\text{Th}$  bozunum zinciri.

#### 1.2.6. Radon Gazı

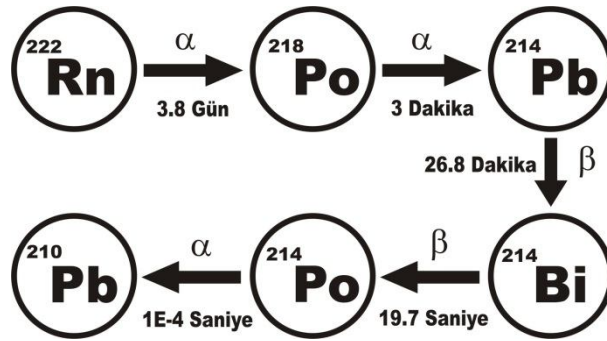
Radon 1900 yılında Darn tarafından keşfedilmiş ve havadaki varlığı ilk olarak 1901 yılında Elster ve Geiter tarafından bulunmuştur (Kumbur, 1997). Radon çevrede doğal olarak bulunan renksiz, kokusuz, tatsız ve radyoaktif bir gazdır. Helyum, neon, argon gibi soygazlar grubuna dâhildir ve soygazların en ağır olanıdır. Doğada var olan 3 temel radyoaktif bozunma serisinin tek gaz ürünüdür (yapay olarak elde edilebilen 27 izotopu vardır). Radonun  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  ve  $^{219}\text{Rn}$  olmak üzere üç tane izotopu vardır. Bunlar sırasıyla  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{235}\text{U}$  bozunum serilerine ait radyoaktif gazlardır. Bu izotopların yarı ömürleri sırasıyla 3,82 gün, 55,6 sn ve 3,96 sn'dir (Durrani, 1997), (Evans, 1968).  $^{220}\text{Rn}$  ve  $^{219}\text{Rn}$ 'un yarı ömürlerinin çok kısa olması nedeniyle ortam havasına karışarak oluşturabilecekleri konsantrasyonlar düşüktür. Ayrıca,  $^{238}\text{U}$  elementinin doğadaki bolluk miktarının  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{235}\text{U}$  elementlerinden daha fazla olması nedeniyle sadece  $^{222}\text{Rn}$  atmosferde önemli yoğunluklar oluşturabilir. Radonun bu izotopik özellikleri nedeni ile konsantrasyon ölçümlerinde  $^{222}\text{Rn}$  ön planda tutulmaktadır (Fişne, 2004). Doğada  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  izotopundan 20 kat daha bol bulunmaktadır.

Radon ürünlerinin solunum sistemindeki davranışları üzerine yapılan çalışmalar, ürünlerin akciğerdeki biyolojik yarı ömrünün birkaç saatten bir güne kadar olabileceğini

göstermiştir. Bu nedenle radonun bozunma ürünleri akciğer kanseri yönünden radon gazından daha tehlikelidir. Radonun en ağır soygaz olması, doğada en bol bulunan radyoaktif serinin bir ara ürünü olması, bu doğal seriler içerisindeki tek gaz olması ve doğada yüksek konsantrasyonlarda bulunmasından dolayı doğal radyoaktivitenin çok önemli bir parametresidir.

### **<sup>222</sup>Rn ve Bozunum Ürünleri**

<sup>222</sup>Rn 3,82 günlük bir yarı ömüre sahiptir ve 5,49 MeV enerjili  $\alpha$  radyasyonu yayarak <sup>218</sup>Po'a bozunur. Radon gazı bozunduğu zaman kısa yarı ömürlü radon ürünleri olarak bilinen dört radyoaktif izotop (<sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Pb, <sup>214</sup>Bi, <sup>214</sup>Po) oluşmaktadır. Bunların yarı ömürleri  $1,5 \times 10^{-4}$  sn ile 26,8 dk arasında değişmektedir. Bu radyoaktif izotopların bozunma şeması Şekil 1.6'da görülmektedir.



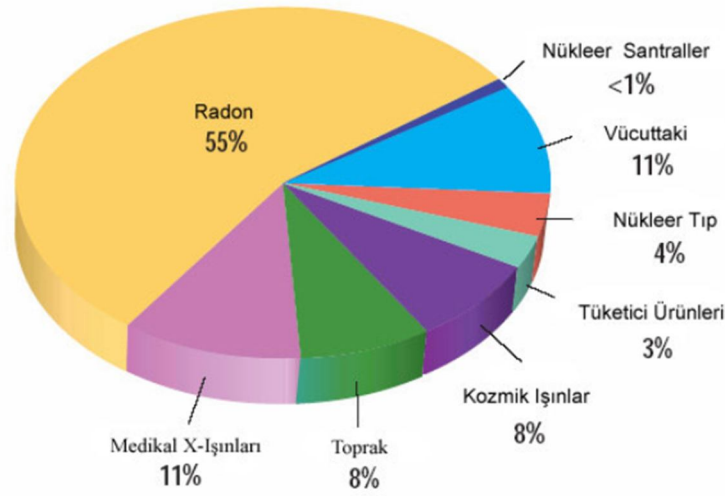
Şekil 1.6. Radon gazı bozunum serisi (Fişne, 2004).

Radon ürünlerinin solunum sistemindeki davranışları üzerine yapılan çalışmalar, ürünlerin akciğerdeki biyolojik yarı ömrünün birkaç saatten bir güne kadar olabileceğini göstermiştir. Bu nedenle radonun bozunma ürünleri akciğer kanseri yönünden radon gazından daha tehlikelidir (Fişne, 2004).

### **<sup>222</sup>Rn'nin Doğal Radyoaktivitedeki Yeri ve Önemi**

Radonun en ağır soygaz olması, doğada en bol bulunan radyoaktif serinin bir ara ürünü olması, bu doğal seriler içerisindeki tek gaz olması ve doğada yüksek konsantrasyonlarda bulunmasından dolayı doğal radyoaktivitenin çok önemli bir parametresidir.

Radonun soygaz olması radyoaktivite çalışmalarındaki önemli avantajlardan biridir. Herhangi başka bir elementle kendiliğinden tepkime vermemesi, doğada saf olarak bulunabilmesi açısından önemli bir artıdır. Bunun yanında normal şartlarda gaz fazında bulunması da çalışmalarda büyük avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca doğada en bol bulunan radyoaktif serinin bir ara ürünü olmasından dolayı doğada yüksek konsantrasyonlar oluşturması, çalışılacak malzemenin bolluğu açısından bir başka önemli avantajdır. Radon gazı doğal radyoaktivitenin yaklaşık %55'i gibi büyük bir kısmını oluşturmaktadır (Şekil 1.7).



Şekil 1.7. Radonun doğal radyoaktivitedeki yeri.

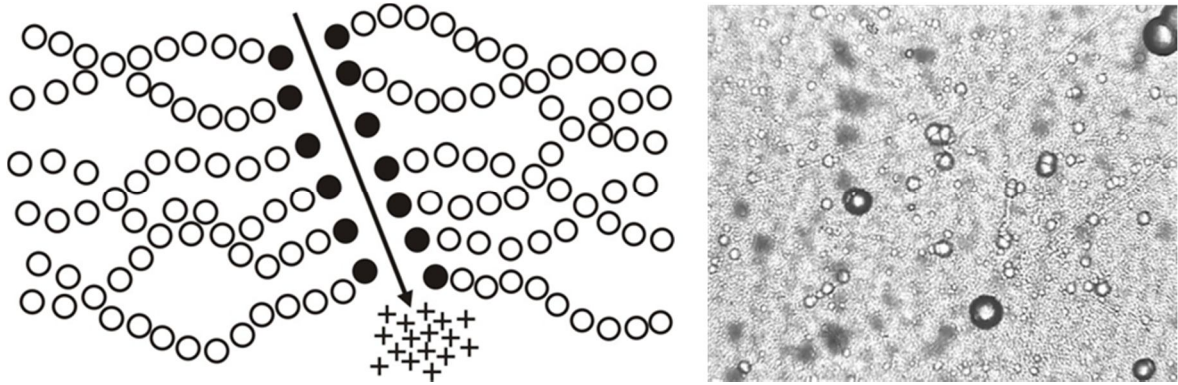
### 1.3. Radyasyon Deteksiyonu ve Radon Algılama

Radyasyon, duyu organları ile algılanması mümkün olmayan bir kavramdır. Ayrıca radyasyon parçacık ya da elektromanyetik dalga formunda ve değişik enerji ya da boyutlarda yayınlandığından algılanması için bazı özel metotların kullanılmasını gerektirmektedir. Bu amaçla radyasyonun madde ile etkileşimlerinden faydalanılarak gerçekleştirilen deteksiyon metotları bulunmaktadır. Radyasyon madde ile etkileştiğinde meydana gelen hasar oluşumu, atomik uyarılmalar, iyonlaşma ve elektron-deşik çifti oluşumu olaylarından faydalanılarak gerçekleştirilen deteksiyon metotları, aktif ve pasif metotlar olarak iki ana başlık altında incelenmektedir.

### 1.3.1. Pasif Radyasyon Deteksiyonu

Bu deteksiyon metodunda, radyasyonun madde ile etkileşimi sonucu hasar oluşumundan faydalanılarak deteksiyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Pasif detektörler, herhangi bir elektronik gerektirmez ve anlık olarak veri alışverişi gerçekleştiremediğinden dolayı pasif detektörler olarak adlandırılırlar. Bu tip detektörler ile bir ortamdaki radyasyonun aktivite yoğunluğu belirlenebilir. Prensip olarak parçacık radyasyonların polimer içerisinde iz bırakması ve bu izlerin sayımı esasına dayanır (Durrani, 1997). Selüloz asetat, polikarbonat ve allil diglikol karbonat gibi plastik maddelerden yapılmış katı hal nükleer iz detektörleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Plastik iz detektörü içerisine bir alfa radyasyonu girdiğinde, lineer yolu boyunca enerjisini kaybeder ve vardığı son noktada kalan enerjisinin tamamını bırakır. Bu olay esnasında polimer zincirlerde kopmalar ve hasarlar meydana gelir (Şekil 1.8). Bu hasar izleri nm boyutlarında olduğundan, bu izlerin büyütülüp belirginleştirilmesi gerekir. Bunun için uygun bir kimyasal kazıyıcı ile (NaOH) kazıma işlemi gerçekleştirilir ve sonrasında  $\mu\text{m}$  boyutlarına gelen bu izler optik mikroskop altında el yordamıyla ya da otomatik olarak sayılır. Bulunan sonuç iz/gün cinsindendir. Bu sonucu  $\text{kBq/m}^3$ 'e çevirmek için ise, kullanılan detektörlerin aktivitesi bilinen bir ortamda gerçekleştirilen kalibrasyonu sonucu hesaplanan kalibrasyon çarpanı ile bulunan sayım sonuçları çarpılır.



**Şekil 1.8.**(a) Polimerdeki ağır parçacıkların yolu üzerinde meydana gelen kopmaların şematik gösterimi, (b) Kimyasal kazıma işlemi sonrasında optik mikroskop altında elde edilen parçacık izleri (Durrani, 1987).

### **1.3.2. Aktif Deteksiyon Metotları**

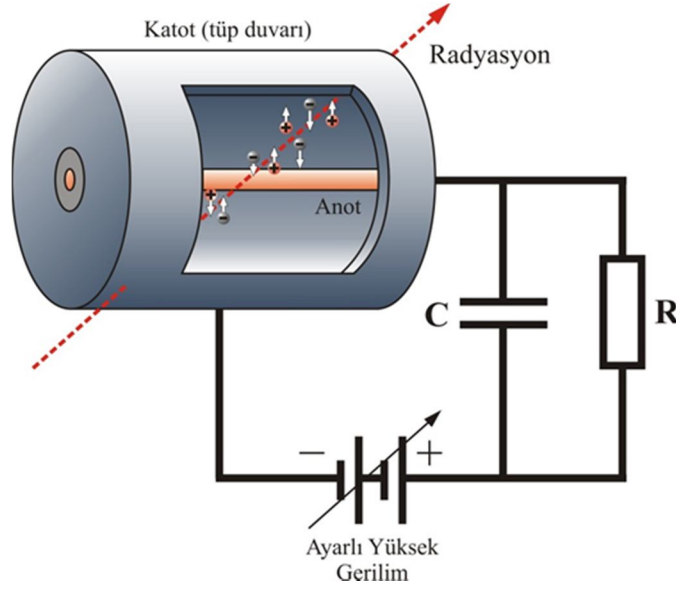
Aktif sayım sistemleri, amaca uygun seçilmiş detektörler ile bunların en verimli çalıştırılabileceği bir elektronik sistemle birleştirilmesiyle elde edilir. Aktif sayım sistemleri anlık ya da toplam spektrum elde etmek ya da basit sayımlar yapmak için kullanılmaktadırlar. Ölçülmek istenen radyasyona göre detektör seçimi yapılır ve bu oldukça önemlidir. Aynı şekilde belirlenmek istenilen radyasyona göre elektronik sistemin seçimi de önemlidir. Algılanacak radyasyonun enerjisine, aktivitesine ve kullanılacak detektörün tipine bağlı olarak farklı şekillerde elektronik tasarım gerçekleştirilebilir. Ortamdaki farklı enerjilere sahip radyasyonlar içerisinde, hangi enerjili radyasyonun ne kadar bulunduğu ya da istenilen enerjiye sahip radyasyonun hangi konsantrasyonlara sahip olduğu belirlenebilir.

Radyasyon madde ile etkileştiğinde madde içerisinde iyonlaşmalara, atomik uyarımlara veya elektron-deşik çiftleri oluşumuna sebep olabilir. Bu etkileşimler sonucu elde edilen elektronlar, iyonlar ve fotonlar elektrik sinyallerine dönüştürülüp sayılarak aktif olarak deteksiyon işlemi gerçekleştirilir.

Aktif detektörler; gaz doldurulmuş detektörler, sintilasyon detektörleri ve yarıiletken detektörler olmak üzere üç ana başlık altında incelenebilirler.

#### **Gaz Doldurulmuş Tüp Detektörler**

Gaz doldurulmuş detektörlerde radyasyon gaz molekülleri ile etkileşerek iyonlaşmalara yol açar. İyonizasyon sonucunda oluşan serbest elektronlar ve pozitif iyonlar, elektrotlar arasında uygulanan elektrik alanın etkisiyle anot ve katoda ulaşarak bir iyon akımı meydana getirirler (Tsoulfanidis, 1995). Oluşan bu iyon akımı sinyalleri işlenerek deteksiyon gerçekleştirilir (Şekil 1.9).



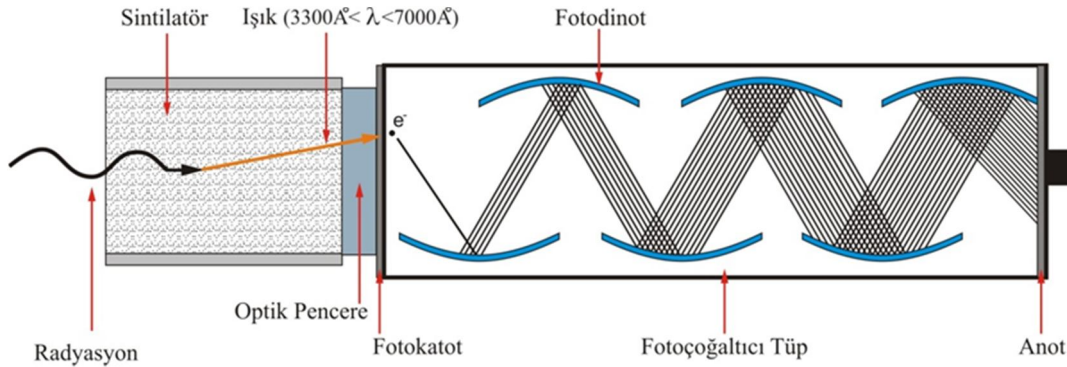
**Şekil 1.9.** Gaz doldurulmuş detektörde radyasyon algılama.

Detektörlerin çıkışında iyonların oluşturduğu akım doğrudan bir kondansatöre gönderilebilir ve buradan da ana-yükseltece daha sonra sayım kayıt ünitesine gönderilir. Bu şekilde radyasyon dozu, kondansatörde biriken yük miktarından yola çıkılarak hesaplanabilir. Ya da çıkışta oluşan akım bir direnç üzerinden geçirilir ve bu direnç üzerindeki gerilimin genliği analiz edilerek radyasyonun enerjisi hakkında bilgi edinilebilir. Gaz doldurulmuş tüp detektörlerin çıkışında elde edilen yük miktarı değeri yeterince yüksek olduğundan bir ön-yükselteç devresine ihtiyaç duyulmaz. Radyasyona ait sinyal, doğrudan ana-yükselteç kısmında şekillendirilip büyütülerek sayısal kısımda analiz edilir (Yazgan, 1988).

Gaz doldurulmuş tüp detektörler kendi içinde üç başlıkta incelenir. İyon odaları, orantılı sayaçlar ve Geiger-Müller (G-M) detektörler. İyon odaları ve orantılı sayaçlar birbirine benzemektedir. Orantılı sayaçlar daha yüksek gerilimde çalışırlar ve oluşan sinyali belli oranda yükseltirler. Ancak G-M detektörlerinde çalışma gerilimi çok daha yüksektir ve tüp içerisinde oluşan tek bir iyonlaşma bütün tüpü saran bir iyonlaşma çığına sebep olur. Bundan dolayı oluşan bütün pulsların genlikleri eşit olur ki bu sadece radyasyonun basit sayımlarına olanak verir.

### 1.3.2.1.Sintilasyon Detektörleri

Radyasyon ile etkileştiğinde farklı dalga boylarında parıldama yapan maddelere sintilatör denir. Sintilatörde oluşan parıldamanın elektriksel sinyale dönüştürüldüğü sistemlere de sintilasyon detektörleri denir. Çalışma prensibi kısaca; radyasyonun sintilatörde meydana getirdiği atomik uyarma sonucu oluşan parıltının fotokatot üzerinden fotoelektrik olay sonucu elektron koparması, sonrasında bu elektronların artan potansiyel farklarla hızlandırılıp çoğaltılması ile belli oranda büyütülmüş bir sinyal elde edilmesidir (Perez-Andujara, 2004). Sintilatör kendi salınımının dalga boyuna geçirgendir. Yani oluşan parıltı sintilatör içerisinde ikincil bir parıltı oluşturmaz ki bu, ideal bir sintilatörde aranan özelliktir. Sintilasyon detektörünün şematik yapısı Şekil 1.10’da verilmiştir.



Şekil 1.10. Sintilasyon detektörü.

Şekilde gösterilen ilk bölge, sintilatörün bulunduğu ve parıldamanın meydana geldiği radyasyon-sintilatör etkileşme bölgesidir. Bu bölgeyi, oluşan parıldamanın fotoelektrik olaya yol açtığı fotokatot bölgesi takip eder. Daha sonra oluşan bu elektronlar artan potansiyel farklara sahip dinotlar yardımıyla çoğaltılır. Bu fotoelektronların çoğaltıldığı bölge, fotoçoğaltıcı tüp bölgesidir (Bor, 2001).

Sintilasyon detektörlerinde oluşan sinyal, orantılı olarak büyütülmüş ve gelen radyasyonun enerjisine bağlı olan bir akım olduğundan radyasyonun enerjisi hakkında bilgi verebilmektedir. Pek çok sintilatör çıkışında elde edilen akım değeri yeterince büyük olduğundan, ön-yükselteç devresine ihtiyaç yoktur. Burada da yine elde edilen akımın nükleer elektronik sistemlerde analizi ile radyasyon deteksiyonu gerçekleştirilir.

Detektör çıkışında elde edilen puls isteğe ve amaca bağlı olarak farklı analiz yöntemleri ile değerlendirilebilir. Örneğin; sadece bir eşik değerinin üzerinde gelen

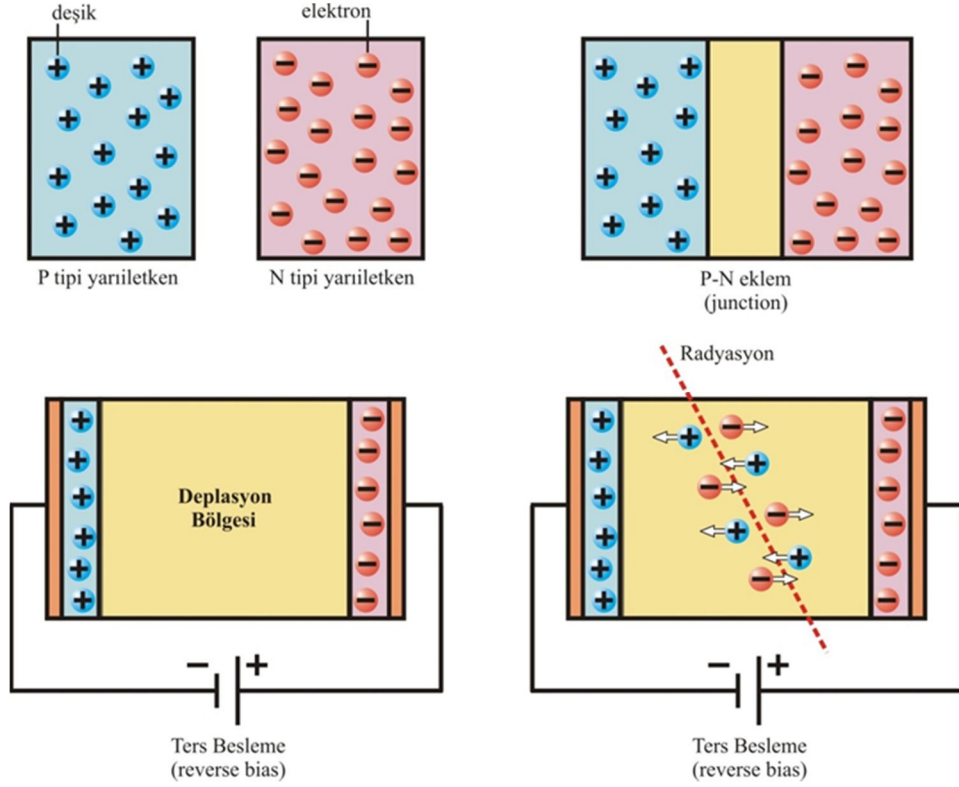
pulsların sayımları yapılabilir, iki eşik değeri kullanılarak bir tek kanallı analizör oluşturulup sadece belirli bir enerji aralığında gelen radyasyonlar sayılabilir veya belirli bir enerji aralığı birden çok kanal ile ayrılarak oluşan çok kanallı analizör ile farklı enerjilerdeki radyasyonların eş zamanlı sayımı gerçekleştirilebilir.

Sintilatörler inorganik (NaI(Tl), CsI(Tl), BaF<sub>2</sub> v.b.) ve organik (antrasen, stilben, sitren v.b.) sintilatörler olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan sintilatör, inorganik bir sintilatör olan NaI(Tl) 'dür.

### **Yarıiletken Detektörler**

Yarıiletken detektörler, p ve n tipi yarıiletkenlerin birleştirilmesi ile elde edilir. Bu iki tip yarıiletkenin birleşme noktasında (junction) elektriksel olarak nötr olan ve deplasyon bölgesi denilen bir bölge meydana gelir. Radyasyonun algılandığı bu bölge ters besleme (reverse bias) yapılarak genişletilir. Radyasyon bu deplasyon bölgesine geldiğinde elektron-deşik çiftlerinin oluşmasına sebep olur. Ters besleme esnasında oluşturulan elektrik alan etkisiyle elektron-deşik çiftleri anot ve katotta toplanarak bir radyasyonun enerjisiyle orantılı bir elektrik sinyali oluştururlar. Genliği birkaç milivolt mertebesindeki bu sinyal ön yükselteç ve ana yükselteç katmanları kullanılarak yükseltilir ve şekillendirilir. Daha sonra sayısal sinyallere dönüştürülüp sayılarak deteksiyon gerçekleştirilir.

Bir yarıiletken detektörün radyasyon soğurması sırasında ortaya çıkan elektron-deşik çiftlerinin sayısı, yarıiletken maddenin özelliklerine ve soğurulan radyasyonun niteliklerine bağlıdır. Bu nedenle, radyasyonun tipine ve enerjisine göre farklı yarıiletken maddeler seçilir veya çeşitli bölgelerinin özellikleri değiştirilerek daha aktif ve kullanışlı hale getirilen yarıiletken maddeler kullanılır (Özgen, 1992).



**Şekil 1.11.** P ve N tipi yarıiletken maddelerin birleştirilmesi, ters besleme yapılması ve radyasyon ile etkileşimi.

Yarıiletken detektörler genel olarak P-N eklem, yüzey engelli ve lityum sürüklemeli detektörler şeklinde üç farklı grupta kullanılır. Kullanılmak istenilen yarıiletken tipine ve detektör geometrisine bağlı olarak detektör seçimi yapılır. Yarıiletken detektörlerin çıkışında elde edilen radyasyon sinyalinin genliği çok düşük olduğundan, yükseltme ve puls şekillendirme işlemlerini gerçekleştirecek elektronik katmanlara gereksinim oluşmaktadır.

### 1.3.3. Radon Deteksiyon Metotları

$^{222}\text{Rn}$  3,82 gün gibi kısa bir yarı ömre sahiptir. 5,49 MeV enerjili  $\alpha$  radyasyonu yayarak  $^{218}\text{Po}$ 'a bozunduktan sonra yarı ömürleri  $1,5 \times 10^{-4}$  sn ile 26,8 dk arasında değişen dört radyoaktif izotop ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$ ) oluşmaktadır. Bu bozunumlar çok kısa sürede ardışık olarak iki  $\alpha$  ve iki de  $\beta$  bozunumu şeklinde gerçekleşerek ortamda  $^{210}\text{Pb}$  kalır.  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  ve aradaki bozunum ürünlerine oranla çok daha uzun bir yarı ömre sahiptir (22,40 yıl).  $^{210}\text{Pb}$ ,  $\beta$  bozunumu ile  $^{210}\text{Bi}$  çekirdeğine ve bu da yine  $\beta$  bozunumu ile  $^{210}\text{Po}$

çekirdeğine dönüşür.  $^{210}\text{Po}$   $\alpha$  bozunumu gerçekleştiren zehirli bir radyoizotoptur. İnsan vücudunda  $^{222}\text{Rn}$  kaynaklı akciğer kanserinin en önemli sebebi  $^{210}\text{Pb}$  ve  $^{210}\text{Po}$  çekirdeklerinin bu davranışlarıdır (Demir, 2014). Doğada yüksek konsantrasyonlarda bulunabilmesi de göz önüne alındığında  $^{222}\text{Rn}$  gazı doğal radyoaktivitenin önemli bir parametresidir.

Radon gazı deteksiyonu için aktif ve pasif birçok detektör tipi farklı uygulama metotlarıyla kullanılmaktadır. Bu metotlar temelde radon algılama ve radon ürün çekirdeklerini algılama metotları olarak iki temel başlık altında değerlendirilir. Radon ürün çekirdekleri radondan farklı olarak kolayca toz parçacıkları veya diğer yüzeyler üzerinde tutunabilir. Ortamdaki havanın bir filtre üzerinden geçirilmesi ile radonun ürün çekirdeklerinin toplanması yüksek bir verimle gerçekleştirilebilir.

Radon algılama metotları algılanması istenilen çekirdeğe, kullanılan detektöre, örnekleme sürelerine ve örnek toplamada kullanılan aparatlara göre çeşitlilik göstermektedir. 14 farklı metot ve bu metotlarda kullanılan detektör, algılanan çekirdek, örnekleme aparatı ve örnekleme süreleri Tablo 1.4'te verilmiştir.

**Tablo 1.4.** Radon deteksiyon metotları (EPA, 1996).

| No | Metot Adı                                | Çekirdek       | Detektör                     | Örnekleme Aparatı              | Örnekleme Süresi |
|----|------------------------------------------|----------------|------------------------------|--------------------------------|------------------|
| 1  | Aktif kömür yüzeyinde tutma              | Radon gazı     | Sintilasyon                  | Aktif Kömür                    | 2-7 gün          |
| 2  | İz detektörü (filtrelenmiş)              | Radon gazı     | İz detektörü                 | Filtreli difüzyon kabı         | 3-12 ay          |
| 3  | İz detektörü (filtrelenmemiş)            | Radon gazı     | İz detektörü                 | Filtresiz difüzyon kabı        | 2-12 hafta       |
| 4  | Kömür/Sıvı sintilasyon                   | Radon gazı     | Sintilasyon                  | Aktif kömür                    | 2-7 gün          |
| 5  | Sürekli radon sayımı                     | Radon gazı     | Sintilasyon/İyon odası       | Sayım odası/Pompa              | Anlık            |
| 6  | Elektrostatik disk detektör/İyon odası   | Radon gazı     | Yarıiletken disk detektör    | Filtreli iyon odası            | 1-12 ay          |
| 7  | Radon toplama/Aktif kömür                | Radon gazı     | Sintilasyon                  | Pompa/Vana                     | 15-60 dakika     |
| 8  | Radon toplama/Pompa-katlanır çanta       | Radon gazı     | Sintilasyon                  | Katlanır çanta/Filtre          | 15-30 dakika     |
| 9  | Radon toplama/Sintilasyon hücresi        | Radon gazı     | Sintilasyon                  | Pompa/Filtre                   | 15-30 dakika     |
| 10 | 3 Gün toplama/Sintilasyon hücresi        | Radon gazı     | Sintilasyon                  | Negatif basınç göstergesi/vana | 3 gün            |
| 11 | Pompa/Katlanır çanta                     | Radon gazı     | Sintilasyon                  | Katlanır çanta/Pompa/Filtre    | 24 saat          |
| 12 | Sürekli seviye belirleme                 | Radon ürünleri | Yarıiletken                  | Pompa/Filtre                   | 24 saat          |
| 13 | Toplama seviye belirleme                 | Radon ürünleri | Yarıiletken                  | Pompa/Filtre                   | 5 dakika         |
| 14 | Radon ürünleri toplama örnekleme ünitesi | Radon ürünleri | TLD dozimetre, iz detektörü, | Pompa/Filtre                   | 72 saat          |

#### 1.4. Nükleer Elektronik

Aktif detektörler radyasyonla etkileşim sonucu radyasyonun enerjisi ile orantılı elektrik sinyalleri üretirler. Detektörden elde edilen bu sinyalleri doğrudan analiz etmek mümkün

değildir. Bu nedenle bir atma şeklindeki sinyallerin uygun elektronik metotlar kullanılarak şekillendirme ve yükseltme süreçlerinden geçirilmesi gerekmektedir.

Aktif sayım sistemleri, amaca uygun seçilmiş detektörler ile bunların en verimli çalıştırılabileceği bir elektronik sistemle birleştirilmesiyle elde edilir. Aktif sayım sistemleri anlık ya da toplam spektrum elde etmek ya da basit sayımlar yapmak için kullanılmaktadırlar. Ölçülmesi istenilen radyasyona göre detektör seçimi yapılır ve bu oldukça önemlidir. Aynı şekilde belirlenmesi istenilen radyasyona uygun seçilen detektörden en iyi şekilde verim alabilecek elektronik sistemin seçimi ve uygulanması da önemlidir (Pennicard, 2009). Algılanacak radyasyonun enerjisine, aktivitesine ve kullanılacak detektörün tipine bağlı olarak farklı şekillerde elektronik tasarım gerçekleştirilebilir (Delagnes, 2007). Detektöre farklı enerjilerde gelen radyasyonlar içerisinde detektörün, hangi enerjili radyasyon ile ne kadar etkileştiği ya da istenilen enerjiye sahip radyasyona ne kadar maruz kaldığı belirlenebilir. Öncelikle detektör çıkışında meydana gelen atma analog yükseltme ve şekillendirme süreçlerinden geçirilip dijital sinyallere dönüştürülür. Daha sonra bu sayısal sinyaller, aşağıdaki kısımlarda açıklanacak olan çok kanallı analizör (Multi Channel Analyser-MCA) ve tek kanallı analizörler (Single Channel Analyser-SCA) kullanılarak analiz edilir.

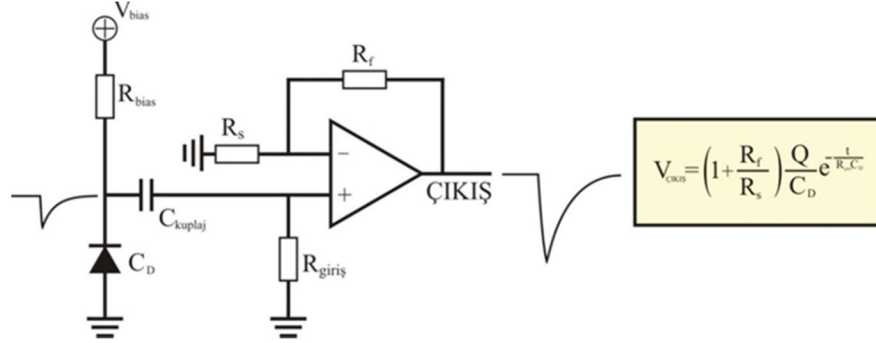
Nükleer elektronik sistemler, ön yükselteç, ana yükselteç, sinyal şekillendirme, analog-dijital dönüştürme (ADC) ve kayıt birimlerinden meydana gelmektedir.

#### **1.4.1. Ön Yükselteç**

Bir katıhal detektörde tıpkı bir iyonizasyon odasında olduğu gibi radyasyon, enerjisini yük taşıyıcıları üreterek kaybeder. Detektör sıgasında bir gerilim sinyaline neden olacak bu yükler detektörden gelen ilk bilgiyi teşkil eder (IAEA, 1989). Detektör çıkışında elde edilen bu Q yükü G-M tüpü ve bazı sintilasyon sayıcılarında yeterince büyüktür, ancak birçok farklı detektör için Q değeri hayli küçüktür ve bir ara yükseltme işlemine ihtiyaç duyulur. Ön yükselteçler bu amaçla kullanılırlar (Kuluöztürk, 2009).

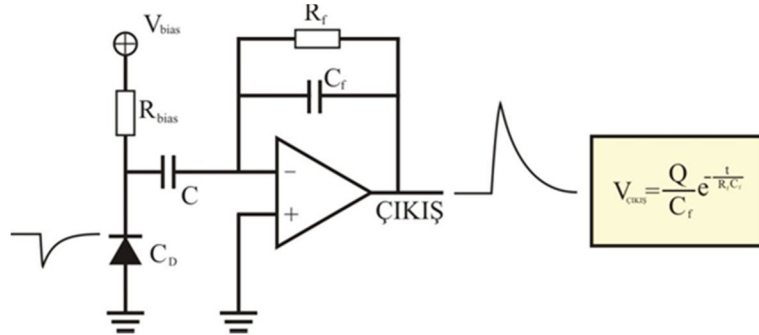
Ön yükselteçler voltaja ve yüke duyarlı olmak üzere iki farklı yöntemle kullanılmak üzere tasarlanabilirler. Bu iki yöntem birbirine çok benzer, aralarındaki tek fark geri besleme (feedback) elemanının bir direnç yerine kapasitör olmasıdır. Şekil 1.12’de voltaj

duyarlı ön yükselteç devresi ve bu yükseltecin giriş-çıkış sinyalleri gösterilmiştir. Voltaj duyarlı ön yükselteçte detektörden gelen radyasyon sinyali işlevsel yükseltecin (opamp) pozitif girişinden alınmıştır (evirmeyen yükselteç).



Şekil 1.12. Voltaj duyarlı ön yükselteç şematik gösterimi.

Şekil 1.13'te yük duyarlı ön yükselteç devresi ve bu yükseltecin giriş-çıkış sinyalleri gösterilmiştir. Yük duyarlı ön yükselteçte geri besleme elemanı bir kondansatördür ve detektörden gelen radyasyon sinyali işlevsel yükseltecin (opamp) negatif girişinden alınmıştır (eviren yükselteç).



Şekil 1.13. Yük duyarlı ön yükseltecin şematik gösterimi.

Sayısal sinyallere dönüştürülecek analog sinyallerin olabildiğince yüksek genlikli, düşük azalım zamanlı ve düşük gürültülü olması gerekmektedir. Devre elemanlarının oluşturduğu elektronik gürültü dışında meydana gelen gürültüler büyük ölçüde ön yükselteç katmanından kaynaklanmaktadır. Elektromanyetik gürültü, deteksiyon sonuçlarının doğruluğunu ve hassasiyetini olumsuz olarak etkilemektedir. Bunu önlemek için, detektör ile ön yükselteç arasındaki mesafenin olabildiğince kısa tutulması ve analog katmanların dışarıdan gelecek elektromanyetik gürültülere karşı iyi izole edilmesi (ekranlama) gerekmektedir.

#### 1.4.2. Ana Yükselteç ve Sinyal Şekillendirme

Nükleer spektroskopik çalışmalarda elde edilecek sonuçların doğruluğu ve hassasiyetinin üst düzeyde olması istenmektedir. Bunun için analog sinyallerin, sayısal sinyallere dönüştürülmesinden önce olabildiğince gausyen şekilli ve yükseltilmiş olması gerekmektedir. Sonuçların doğruluğunu etkileyebilecek elektronik gürültü, yüksek aktiviteli radyasyon ortamı, uzun sinyal azalım kuyruğu ve negatif yönlü azalım kuyruğu gibi durumların giderilmesi için bir dizi nükleer elektronik metotlar yükselteç katmanında uygulanmaktadır.

Yükselteçler, ön-yükselteçten gelen genliği artırılmış sinyallerin genliklerinin artırıldığı ve şekillendirildiği analog katmandır. Kullanım amacına göre farklı tiplerde yükselteçler vardır (Tsoulfanidis, 1995); (Arnaboldi, 2003). Bunlar; sadece genliği büyütüp sinyal süresini kısaltan doğrusal yükselteçler, belirli bir eşik (treshold) değerinin üzerindeki sinyallerin genliğini artıran beslemeli yükselteçler ve sinyallerin toplamının tek bir sinyal olarak verildiği toplam ya da fark yükselteçleri şeklinde üç ana başlık altında incelenebilir.

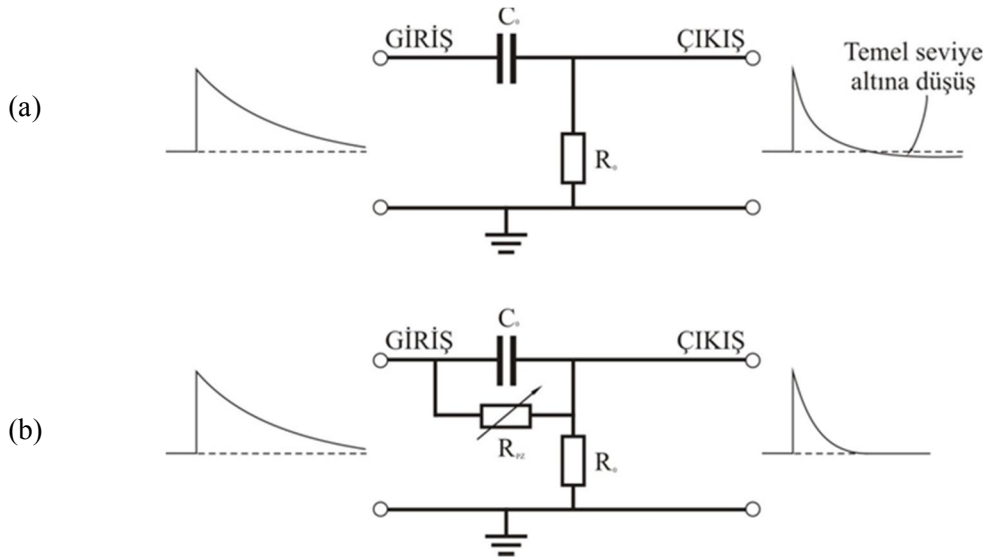
Opamplar (OPerational-AMPLifier) kullanılarak yükseltilecek ve türev-integral devreleri ile şekillendirilen sinyallerde meydana gelebilecek istenmeyen bazı durumlar (negatif yönlü azalım kuyruğu, üst üste yığılma, temel seviye kayması) yine türev-integral devreleri ve opamplar kullanılarak giderilir.

#### Sıfır Kutup Düzeltici (Pole Zero Cancellation)

Sıfır kutup düzeltmesi; sinyal başlangıcı referans alındığında, sinyal azalım kısmının sonunda yatay eksenin altına düşen kuyruğun sıfır seviyesine çekilmesi için gerçekleştirilir.

Şekil 1.14.a'da görüldüğü gibi sıfır kutup düzeltmesi yapılmadan önce bir CR şekillendirmesinden geçen sinyalde hızlı azalım sonucu kuyruk kısmı sıfır seviyesinin altına düşer. Bu olay, yüksek aktiviteli bir ortamda oluşan ilk sinyalin sıfır seviye altında kalan kuyruk bölgesinde gelebilecek diğer bir radyasyona ait sinyalin genliğinin eksik analiz edilmesine yol açacağından istenmeyen bir durumdur (Şekil 1.15). Bu durumu gidermek için CR şekillendirmenin kondansatörüne bir ayarlı direnç (potansiyometre) paralel bağlanır (Grybos, 2006). Böylece çıkışta sıfır seviye düzeltmesi büyük oranda

gerçekleştirilmiş ve sinyal azalım süresi de kısaltılmış olur. Sıfır kutup düzeltmesinin yapılmadığı durumda, Şekil 1.15'te görüldüğü gibi ilk radyasyonun detektöre ulaşmasından kısa bir süre sonra gelecek olan bir diğer radyasyonun enerjisi eksik ölçülecektir. Bu nedenle elde edilecek spektrumda enerji pikinde kayma ya da genişleme meydana gelecektir.



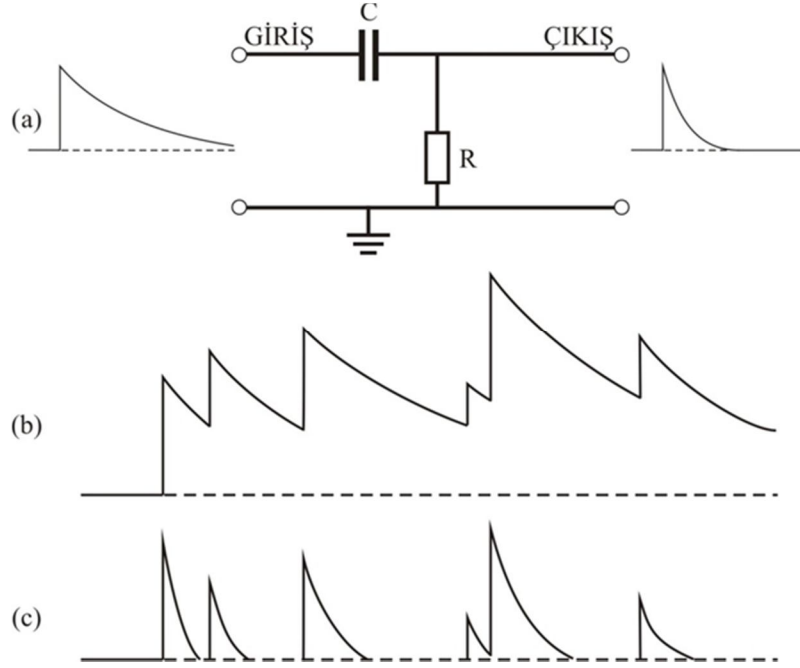
**Şekil 1.14.** (a) Sıfır kutup düzeltmesi (pole-zero cancellation) öncesinde sinyal şekli, (b) sıfır kutup düzeltmesi yapıldıktan sonra sinyal şekli (IAEA, 1989).



**Şekil 1.15.** Sıfır kutup düzeltmesinin yapılmadığı durumda radyasyon sinyalleri.

### Üst Üste Yığılma Giderici (Pile Up Rejector)

Detektöre yakın zamanlı gelen sinyallerin meydana getirdiği bir durum olan üst üste yığılma, sisteme bir türev devresi (CR) eklenmesi ile giderilir. Üst üste yığılma, detektöre ilk radyasyon geldikten sonra oluşturduğu sinyal azalırken bir başka radyasyonun detektöre çarparak yeni bir sinyal oluşturmasıdır. Bu durum giderilmezse ölçülen radyasyon sinyalleri olduğundan büyük olarak algılanacaktır (Raad, 2006).



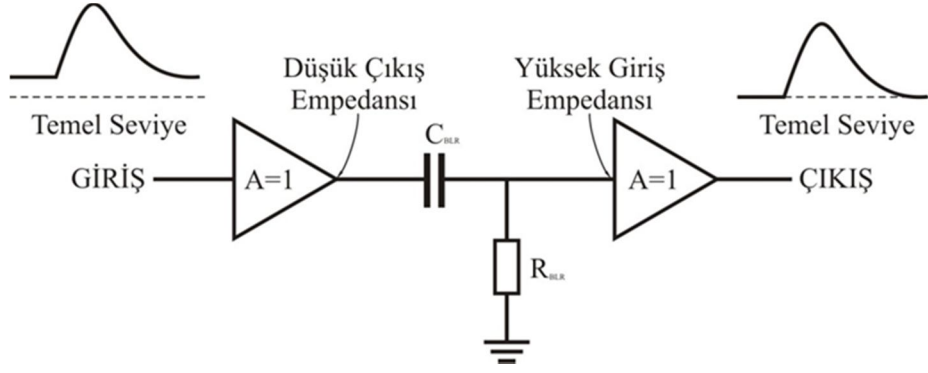
**Şekil 1.16.**(a) Üst üste yığılma giderici (pile-up rejector) devre şeması ve giriş-çıkış sinyalleri, (b) üst üste yığılan sinyallerin görünümü, (c) üst üste yığılma giderici kullanıldıktan sonra bu sinyallerin görünümü (Kuluöztürk, 2009).

Şekilde görüldüğü gibi sisteme eklenen türev devresi sinyal azalım süresini kısaltarak, yakın zamanlı gelen radyasyonlara ait sinyallerin doğru bir şekilde ayırt edilebilmesini sağlar. Yüksek aktiviteli radyasyon ortamlarında doğru ve kesin analiz yapabilmek için bu tip sinyal şekillendirme işlemlerinin iyi yapılması gerekmektedir.

### Temel Seviye Düzeltici (Baseline Restorer)

Yükselteç devresinde üst üste yığılmalar ya da elektronik gürültü sebebiyle temel seviyenin üzerinde olan sinyalleri temel seviyeye getirmek amacıyla gerçekleştirilir.

Şekil 1.17’de görüldüğü gibi, temel seviye düzeltici bir kondansatör ve bir direnç ile gerçekleştirilebilir. Ön-yükselteç çıkışında temel seviyenin üzerinde olan sinyaller, CR devresi gibi davranan temel seviye düzeltici aracılığıyla temel seviyeye getirilir. Bu işlem ana yükselteç içerisinde ya da çıkışında gerçekleştirilir (Arnaboldi, 2003). Temel seviye düzeltici devre uygulanmadığında, analiz edilecek genlik değerleri fazla ölçülecektir.



**Şekil 1.17.** Temel seviye düzeltici (baseline-restorer) devre şeması ve bu devrenin giriş-çıkış puls şekilleri.

## Yükselteç

Yükselteçler, ön-yükselteçten gelen genliği artırılmış ve şekillendirilmiş olan sinyallerin genliklerinin daha artırıldığı, son olarak şekillendirildiği ve analog değerlendirmelerin yapıldığı birimdir. Kullanım amacına göre farklı tiplerde yükselteçler vardır (Tsoulfanidis, 1995). Bunlar; sadece genliği büyütüp sinyal süresini kısaltan doğrusal yükselteçler, belirli bir eşik (threshold) değerinin üzerindeki sinyallerin genliğini artıran beslemeli yükselteçler ve sinyallerin toplamının tek bir sinyal olarak verildiği toplam ya da fark yükselteçleri şeklinde üç ana başlık altında incelenebilir.

Doğrusal yükselteç ya da bir başka deyişle voltaja duyarlı yükselteç, ön yükselteçten gelen sinyalleri daha da büyütür. Büyütme mertebesi birkaç bine çıkabilir. Diğer önemli fonksiyonu ise ön yükselteçten gelen kuyruklu sinyalleri daha kısa doğma zamanlı ve çok daha hızlı azalım zamanı olan çok dar bir sinyal şekline çevirir.

Beslemeli yükselteçlerde giriş, genelde normal bir doğrusal yükselteç çıkışında elde edilen şekillendirilmiş bir doğrusal sinyaldir. Beslemeli yükselteç belirli bir besleme seviyesinin (threshold) altında kalan giriş sinyalleri için hiçbir çıkış üretmez. Bu yükselteçlerin çıkış sinyallerinin dinamik aralığı besleme seviyesi ile belirli bir maksimum seviye arasındaki giriş sinyallerine karşılık gelmektedir.

Sonuçta giriş genliklerinin sınırlı bir aralığı yükseltilerek tüm çıkış aralığına dağılır, böylelikle spektrumun küçük bir bölgesi daha detaylı incelenir.

Bazı uygulamalarda birçok detektörün çıkışları toplanarak daha sonraki bir analiz için tek bir sinyal istenebilir. Toplam yükselteçleri genelde doğrusal yükselteçlerin birçok çıkışını giriş olarak alarak tek bir toplam sinyal verir. Bu yükselteç toplama öncesinde sinyallerden birini ters çevirerek fark yükselteci olarak kullanılabilir.

### **1.4.3. Analizörler**

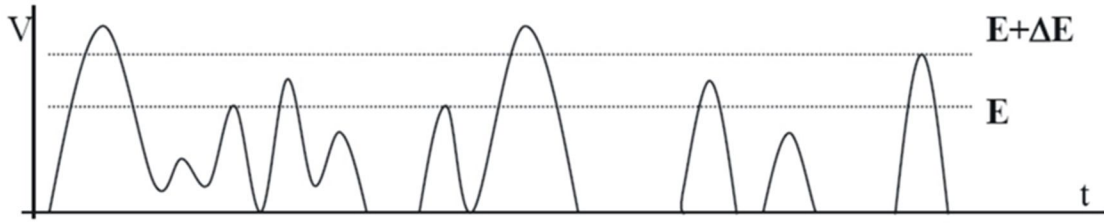
Analizörler, analog sinyallerin istenilen şekilde bir dizi elektronik işlemlerden geçirilerek analiz edildiği elektronik katmandır. Bu katman çıkışında elde edilen sinyal dijital bir sinyaldir. Dolayısıyla analizörler, analog-dijital çeviricilerdir (ADC-Analog to Digital Converter). Nükleer elektronik sistemlerde yükselteç katmanından alınan şekillendirilmiş ve genliği yükseltilmiş radyasyon enerjisiyle orantılı analog sinyaller, analizör katmanında radyasyon enerjisine göre sayısal sinyallere dönüştürülür. Analizörler çalışma prensiplerine göre tek kanallı analizörler (SCA-Single Channel Analyser) ve çok kanallı analizörler (MCA-Multi Channel Analyser) olarak iki ana başlık altında incelenmektedir.

#### **Tek Kanallı Analizör (SCA-Single Channel Analyzer)**

Radyasyon, detektör ile etkileşimi sonucunda detektör uçlarında genliği radyasyon enerjisiyle orantılı elektriksel sinyal oluşumuna yol açacaktır. Böylece, yükselteç çıkış uçları arasında oluşan sinyal genliklerinin analiz edilmesi, detektör içinde bırakılan enerjinin analiz edilmesi anlamına gelecektir (Kuluöztürk, 2009). Sadece belirli bir enerji aralığındaki radyasyon türünün algılanması istendiğinde, yükselteç çıkışına bir pencere detektör devresi eklemek yeterli olur. Bu şekilde belirli bir aralıktaki genlik değerindeki analog sinyalleri dijital sinyallere dönüştüren devrelere tek kanallı analizör (SCA) denmektedir.

Bu amaçla, biri enerji aralığının alt sınırını ve diğeri ise enerji üst sınırını belirlemek üzere iki adet ayırıcı (diskriminatör) kullanılır. Herhangi bir sinyal devreye uygulandığında, eğer sinyal seviyesi bu pencerenin içinde kalıyorsa devre çıkışında lojik (mantıksal) 1 seviyesi görülür. Bu pencerenin altında ve üstünde gelen sinyaller dikkate alınmaz. Şekil 1.18’de farklı zaman aralıklarıyla, farklı enerjilerde gelen sinyaller ve

seçilen  $E$ ,  $E + \Delta E$  seviyeleri görülmektedir. Tek Kanallı Analizör sistemlerinde iki tane fark yükselteci vardır (Op-Amp). Bu fark yükselteçlerinden biri alçak (alt) seviye ayırıcısını ( $E$ )(Lower Level Discriminator-LLD) oluşturur ve diğeri ise yüksek seviye ayırıcısını ( $E + \Delta E$ )(Upper Level Discriminator-ULD) oluşturur. İkisi arasında kalan bölgeyi oluşturmak için ise çakışmazlık (anti-coincidence) kapısı gereklidir. Bunun için üst seviyenin tersi alınarak VE kapısına verilir. Gösterilen  $E$  ve  $E + \Delta E$  seviyeleri,  $\Delta E$  genişliğinde bir pencere oluşturulur ve buna da kanal denir. Sistemin hassasiyeti kanal sayısına bağlıdır. Kanal sayısı ne kadar fazla ise genel spektrumdaki maksimum sinyal seviyesi bu sayıya bölünecek ve her bir kanala düşecek enerji değeri belirlenecektir (Bayburt, 2005).



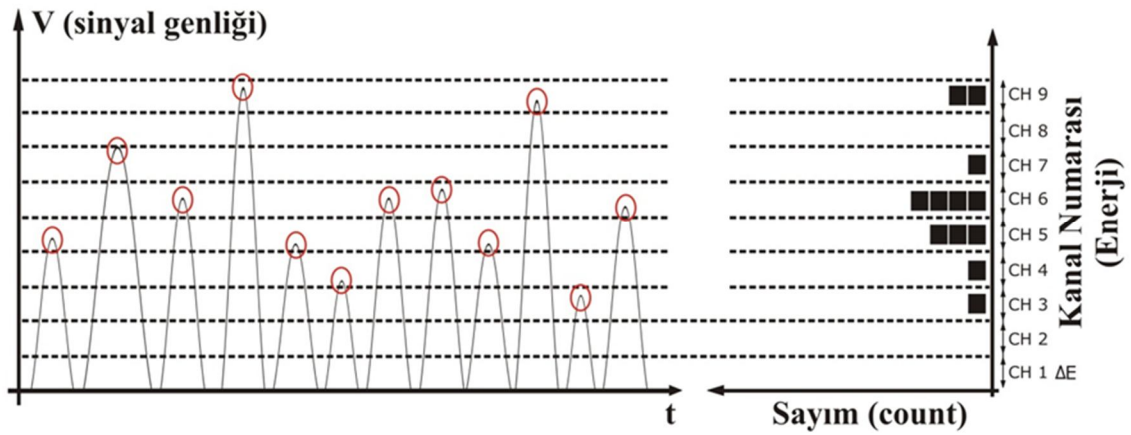
**Şekil 1.18.** Ana yükselteç çıkışındaki pulslar ve seçilen  $E$ ,  $E + \Delta E$  seviyeleri.

İki ayrı ayırma seviyesi tek kanallı analizör ile gerçekleştirilir ve çıkış mantık pulsu ancak giriş doğrusal sinyallerinin genliği iki seviye arasında ise oluşturulur. Bu sistemin fonksiyonu bir çıkış pulsunun oluşturulabilmesi için giriş sinyal genliklerinin içine alınacağı bir pencere ya da genlik bandı seçmesidir. Bazı sistemlerde alçak seviye ayırıcısı (Lower Level Discriminator-LLD) ve yüksek seviye ayırıcı (Upper Level Discriminator-ULD) birbirinden bağımsız olarak ayarlanabilir. Bazılarında ise genlik bandının genişliği sabittir ve seçilen bir alt seviyeden itibaren bu aralık içerisinde gelen sinyalleri ayırt eder.

Uygulamalarda  $\Delta E$  penceresi, detektörde tüm enerjileri soğurulan olaylara ait sinyallerin ayırımı yapılacak şekilde ayarlanarak diğerlerinin arasında belirli bir enerjinin algılanması sağlanır. Zamanlama yöntemlerinden bir tanesi analizöre ilave edilerek çıkış mantık sinyallerinin, olayların gerçek zamanı ile daha iyi uyum içerisinde olması sağlanır.

## Çok Kanallı Analizör (MCA-Multi Channel Analyzer)

Çok kanallı analizör, yükselteçten gelen analog sinyalleri kendi girişinden alarak gelen sinyal yüksekliklerini sayısal sinyallere dönüştürür. Daha sonra toplanan bu verileri hafızaya kaydederek sinyal yükseklik dağılımlarını bir histogram eğrisi ile gösterir. Bu histogramın yatay eksenini sinyal genliğine karşılık gelen kanal numarasını (enerji) ve dikey eksenini ise sayım miktarını temsil etmektedir. Çok kanallı analizörün kanal sayısı, sistemin radyasyon enerjisini belirleme hassasiyetinin (enerji çözünürlüğü - energy resolution) bir ölçüsüdür. Ancak çok kanallı analizörün kanal sayısı enerji aralığına (energy range) ve detektör tipine uygun olarak seçilmelidir. Her bir kanalın enerji hassasiyeti, detektörün enerji hassasiyetinden daha fazla olacak şekilde kanal sayısı ayarlamak sistemin enerji hassasiyetini artırmayacaktır. Ayrıca enerji hassasiyetinin yanı sıra sistemin elektronik olarak hızlı olması, radyasyon sayımı yapılan ortamdaki radyoaktivite miktarına bağlı olarak ölü zaman (dead time) değerinin düşük olmasını sağlayacağından zaman hassasiyetini etkileyecektir.



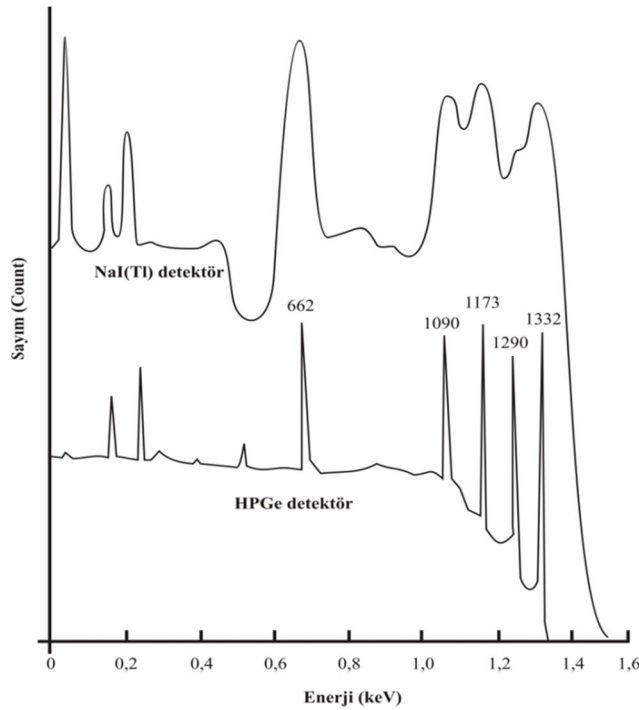
Şekil 1.19. Çok kanallı analizör çıkışında spektrum oluşumu.

Şekil 1.19'da görüldüğü gibi yükselteçten gelen ve genlikleri radyasyon enerjisi ile orantılı analog sinyaller, çok kanallı analizörde kanalların algılama sınırlarında kalan genlikler birer dijital sinyal olarak ilgili kanala eklenir.

Çok kanallı analizörün çalışma prensibi; belirli bir gerilim aralığını, sahip olduğu kanal sayısına bölmektir. Her bir kanal aralığında kalan gerilim değerine bir enerji değeri tekbül etmektedir. Bir çok kanallı analizörün sahip olduğu kanal sayısı bünyesindeki

sayıcı entegrenin kaç bitlik olduğuyla orantılıdır (Cromaz, 2008; Delagnes, 2007; Karabıdak, 2009). Sayıcı entegrenin sahip olduğu bit sayısı  $n$  ise, çok kanallı analizörün kanal sayısı  $2^n$  ile verilir. Yani 10 bitlik bir analizörün  $2^{10}=1024$  kanalı vardır.

Radyasyon deteksiyonunda enerji hassasiyeti kullanılan detektörün materyaline bağlıdır. Örneğin 300°K sıcaklığında NaI(Tl) sintilasyon detektöründe bir parıldama meydana getirmek için gerekli minimum enerji ortalama 20-30 eV civarındadır. Bu enerji değeri NaI(Tl) detektörünün enerji hassasiyetini temsil etmektedir. HPGe yarıiletken detektöründe ise 77°K sıcaklığında bir elektron deşik çifti oluşturmak için gerekli minimum enerji değeri ortalama 2-3 eV civarındadır (Hastings, 1991). Şekil 1.20’de görüldüğü gibi bu iki tip detektörden elde edilen spektrumlar incelendiğinde HPGe detektöre ait spektrumun NaI(Tl) detektörden elde edilene göre çok daha hassas olduğu görülmektedir.



**Şekil 1.20.** HPGe ve NaI(Tl) detektörleri ile elde edilen gama spektrumları.

## 2. MATERYAL ve METOT

Bu çalışmada  $^{222}\text{Rn}$  (radon gazı) ölçümü için nükleer spektroskopik bir sayım sistemi geliştirilmesi amaçlanmıştır. 5057001 nolu “Türkiye’nin Deprem Riski Yüksek Jeo-Stratejik -Ancak Tektonik Rejimleri Farklı-Bölgelerinde Deprem Davranışının Çok Disiplinli Yaklaşımlarla Araştırılması” adlı proje kapsamında geliştirilen sistemin (FUAMP – Fırat Üniversitesi AMPlifikatörü), arzu edildiğinde arazi koşullarında uzun süreli radon sayımları yapabilmesi amacıyla düşük enerji tüketmesi göz önünde bulundurulmuştur. Sistem oluşturulduktan sonra bir dizi elektronik ve radyoaktivite test ve kalibrasyonları süreçlerinden geçirilmiştir. Ticari olan eşdeğer bir sistemle de aynı süreçler tekrarlanmış ve son olarak karşılıklı sayımlar ile karşılaştırılmaları sağlanmıştır. Nemrut Krater Gölü yüzey suyu örneklerinde bu iki sistemin doğal örnek analizleri gerçekleştirmeleri planlanmıştır.

Radon gazı algılama sistemleri genellikle radon gazına ait 5,49 MeV enerjili alfa radyasyonlarını ya da kız çekirdeği olan  $^{218}\text{Po}$  radyoizotopuna ait 6,11 MeV enerjili alfa radyasyonlarını algılayarak bu işlemi gerçekleştirirler. Bu algılama işlemi için genellikle analizör katmanında bir eşik (threshold) devresi ya da SCA kullanılmaktadır.

Tasarlanan nükleer spektroskopik sistem yük duyarlı ön yükselteç, sinyal şekillendirme, ana yükselteç ve MCA katmanlarından oluşmaktadır. Oluşturulan elektronik devreler yüzey montaj elemanları (Surface Mount Device - SMD) kullanılarak ve tasarlanan baskılı devre kartları üzerine monte edilerek yapılmıştır.

Oluşturulan yükselteç katmanı ORTEC firmasına ait MCA modülüne bağlanarak Maestro32 yazılımından elde edilen spektrumlar gözlenmiştir. Geliştirilen analog devreler ile ORTEC marka standart analog modüller için elektronik ve radyoaktif test ve kalibrasyonlar gerçekleştirilmiştir (ORTEC, 2015). Sistemin vakum ortamındaki ölçüm tepkileri, enerji çözünürlüğü ve sinyal/gürültü oranları ölçülmüştür.

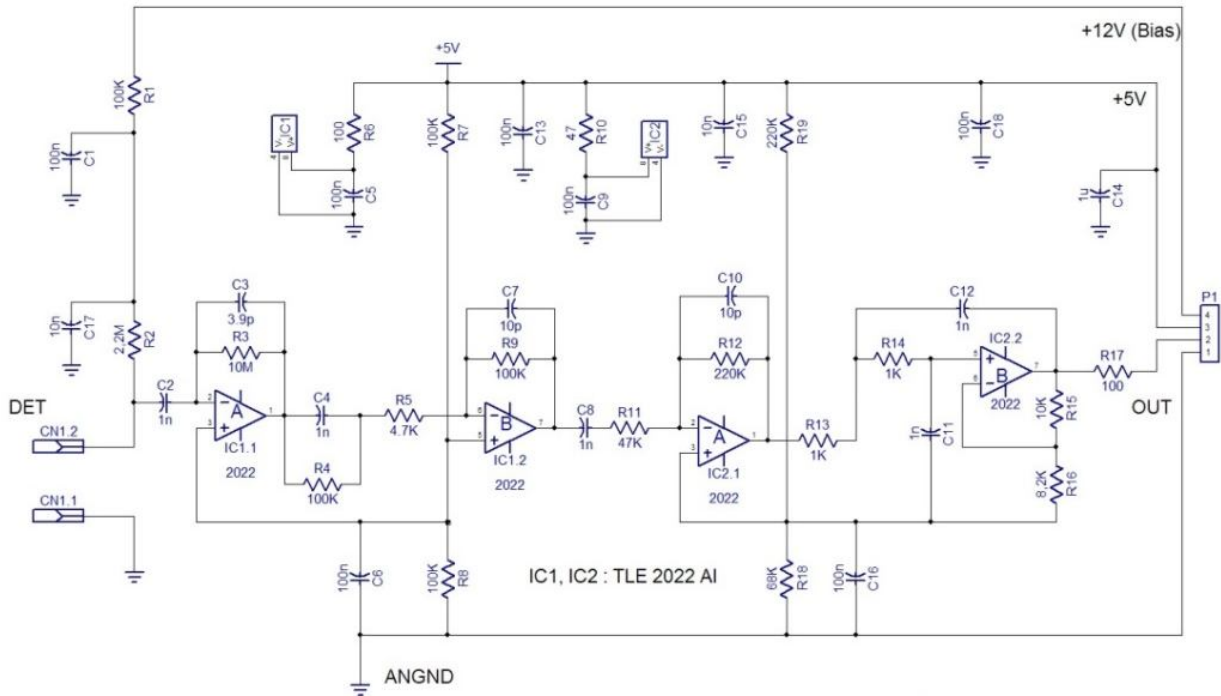
Nemrut Krater Gölü yüzey suyu örnekleri, göl yüzeyinde toplam 33 farklı noktadan alınmıştır. Ağır metal tayini, toplam alfa-beta sayımları ve ORTEC sistemi ile karşılıklı

sayımların yapılabilmesi için örnekler hazırlanmıştır. Bu analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

## 2.1. Elektronik Tasarım

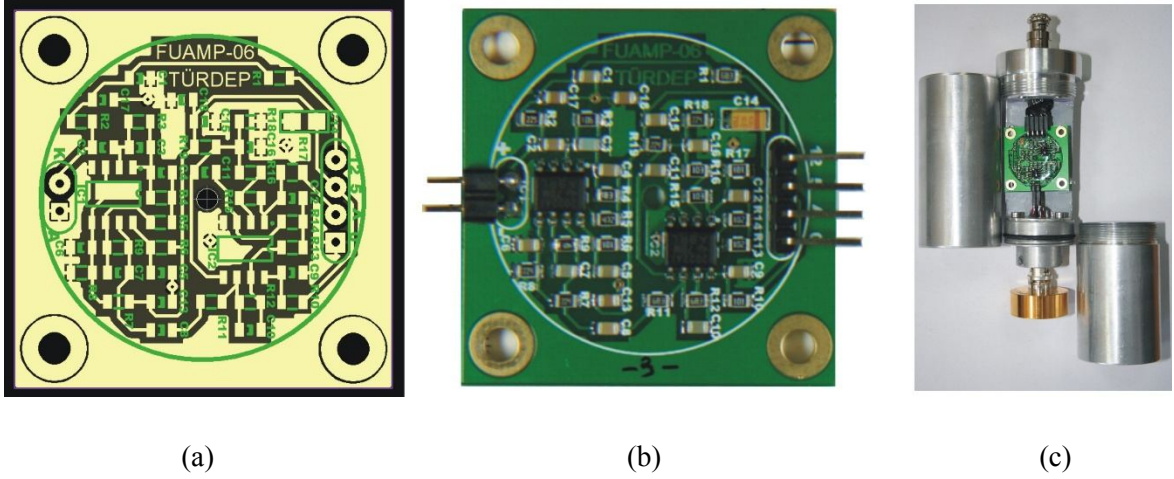
Tasarlanan radon algılama sistemi nükleer spektroskopik ön yükselteç, ana yükselteç, sinyal şekillendirme ve SCA (tek kanallı analizör) katmanlarından oluşmaktadır. Bu sistemin arazi koşullarında uzun süreli sayımlar yapabilmesi ve bu süre zarfında sadece bir akü ile beslenebilmesi istenildiğinden dolayı, düşük gerilimlerde çalışabilen ve düşük akım çeken bir sistem olması gerekmektedir. Bunun için elektronik devrelerde kullanılan entegre devrelerin düşük akım çekenleri ve düşük gerilimlerde çalışabilenleri tercih edilmiştir.

Elektronik devrelerin tasarımları PCB DipTrace yazılımında gerçekleştirilmiştir (DipTrace, 2015) (Şekil 2.2.a). Baskılı devre kartlarının nihai tasarımları profesyonel olarak hazırlatılarak yüzey montaj devre elemanları bu kartların üzerine lehimlenmiştir. Montajı tamamlanan katmanların her biri elektronik testlerden geçirilerek performansları



Şekil 2.1 FUAMP yükselteç katmanı devre şeması (TÜRDEP).

belirlenmiştir.



**Şekil 2.2.a)** FUAMP ön yükselteç, ana yükselteç ve sinyal şekillendirme katmanları için baskılı devre tasarımı, b) montajı yapılmış yükselteç devresi, c) alüminyum koruma haznesi ve yükselteç (TÜRDEP).

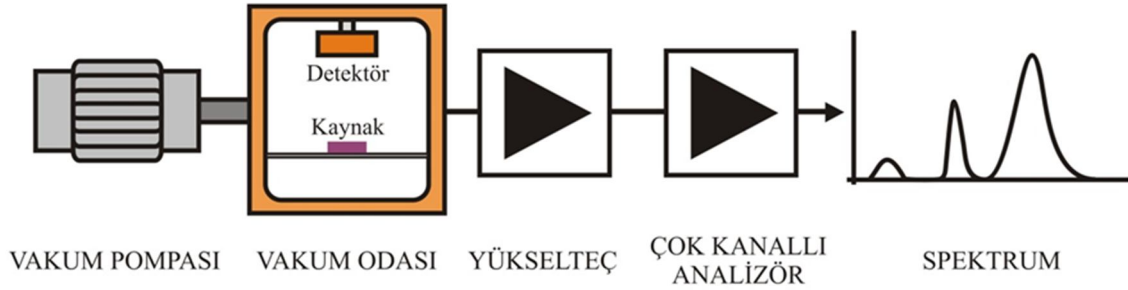
## 2.2. Testler

Radyasyon algılama sistemlerinin, algılama işlemi gerçekleştirilmeden önce bütün karakteristiklerinin belirlenmesi gerekir. Radyasyona ve ortam parametrelerine nasıl tepkiler vereceği önceden belirlenerek, algılama işleminin doğru bir şekilde yapılması sağlanır. Bu nedenle algılama sisteminin elektronik ve radyoaktif bir dizi test ve kalibrasyon işlemine tabi tutulması gerekir. Bu çalışmada tasarlanan FUAMP ve ORTEC radyasyon algılama sistemlerinin vakum testleri, FWHM ölçümü, sinyal/gürültü oranı ölçümü, yükselteç kazanç testleri, elektronik kalibrasyon, enerji kalibrasyonu ve verim kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir.

### 2.2.1. Vakum Testi

Alfa radyasyonu nispeten ağır bir parçacık olmasından dolayı hava ortamında alabildiği yol enerjisine de bağlı olarak 3-7 cm arasında değişmektedir (Yu, 2003). Bundan dolayı sağlıklı bir alfa spektroskopi çalışması gerçekleştirebilmek için örnek analizlerinin vakum ortamında yapılması gerekmektedir. Çalışma vakumsuz doğal ortamda yapılacaksa,

sistemin vakumsuz ve farklı vakum koşullarındaki davranışının ortaya konulması gerekmektedir. Bu nedenle, FUAMP ve ORTEC sistemleri ile farklı vakum değerlerinde radyoizotop sayımları gerçekleştirilerek bu davranışları ortaya konulmuştur.

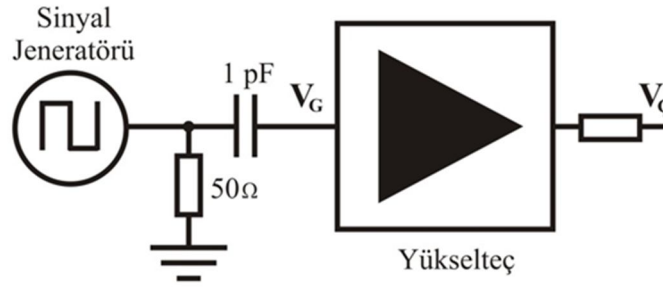


**Şekil 2.3.** Vakum ortamında standart radyoizotop ile kalibrasyon düzeneği.

Vakum miktarına bağlı olarak nükleer elektronik sistemlerin performanslarını belirlemek için Şekil 2.3'deki sistem kurulmuştur. Bu düzenedeki vakum pompası azami  $25 \times 10^{-6}$  atm değerinde vakum yapabilmektedir. Vakum odası olarak ORTEC 808 (vacuum chamber) kullanılmıştır. Detektör olarak yine ORTEC firmasının Si detektörü kullanılmıştır ve +50 V DC gerilim ile çalıştırılmıştır. Alfa radyasyon kaynağı olarak kullanılan standart radyoaktif kaynak listesi Tablo 2.1'de verilmiştir. Kullanılan radyoaktif kaynaklar ile detektör arasındaki mesafe 3,5 cm olarak ayarlanmıştır.

### 2.2.2. Kazanç Testi

Kazanç testi; yükselteç girişine, değeri bilinen seri bir kondansatör üzerinden farklı genlikli kare dalga uygulanarak çıkış sinyal genliğinin ölçülmesiyle yapılır (Şekil 2.4) (IAEA, 1989). İstenilen değerdeki radyasyon enerjisi, kullanılan detektör materyalinde bir elektron-deşik çifti oluşturmak için gerekli enerji değerine bölünerek testte kullanılan sığa değerinde oluşacak yük miktarı hesaplanır. Böylece hangi enerjili radyasyonun, ön yükselteç girişinde hangi miktarda yük oluşturacağı önceden belirlenebilir. Bu şekilde yükseltme sisteminin elektronik olarak kazanç miktarı tespit edilmektedir.



**Şekil 2.4.** Yükselteç devresinde kazanç tespiti.

Oda sıcaklığında Si detektöründe bir elektron-deşik çifti oluşturmak için 3,62 eV’luk enerji gereklidir. Buna göre 1 MeV enerjili bir radyasyon için detektörde oluşacak elektron yükü miktarı;

$$Q = \frac{1 \times 10^6 (eV) \times 1,6 \times 10^{-19} C}{3,62 (eV)} = 0,442 \times 10^{-13} C \quad (2.1)$$

olur. Oluşan bu yükün, detektörün 1pF lık sığasında oluşturacağı gerilim düşüşü,

$$Q = C \cdot V \quad (2.2)$$

$$0,442 \times 10^{-13} C = 1 \times 10^{-12} F \times V \quad (2.3)$$

$$V = \frac{0,442 \times 10^{-13} C}{1 \times 10^{-12} F} = 44,2 mV \quad (2.4)$$

Buna göre gelen radyasyonun her 1 MeV’lik enerjisi başına oluşturacağı gerilim düşüşü 44,2 mV olacaktır. <sup>222</sup>Rn gazının yayınladığı 5,49 MeV enerjili alfa parçacıkları 1 pF sığalı bir kondansatörde 5,49 x 44,2 = 242,6 mV gerilim düşüşüne sebep olacaktır.

FUAMP ve ORTEC yükselteç sistemleri için kazanç testleri Şekil 2.4’teki devreler oluşturularak giriş ve çıkış sinyalleri osiloskop yardımı ile ölçülerek yapılmıştır. 1 kHz frekanslı kare dalgalar Keithley 3390 sinyal jeneratörüyle sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar yardımıyla kazanç grafikleri ve kazanç denklemleri elde edilmiştir.

### 2.2.3. Sinyal/Gürültü Oranı Ölçümleri

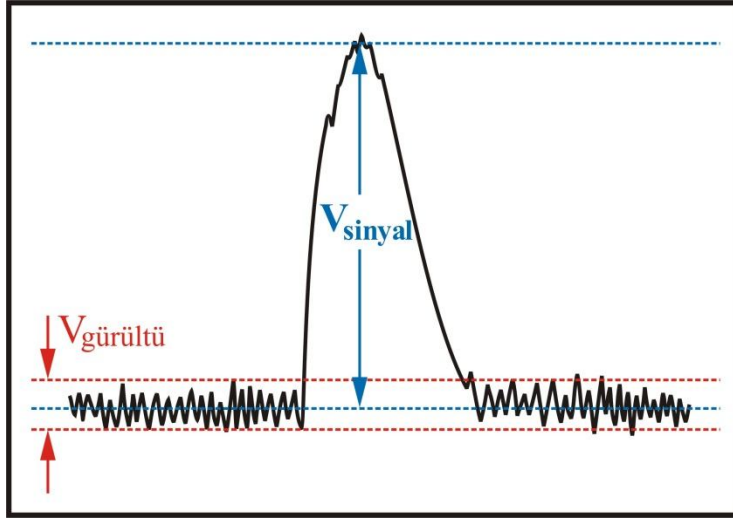
Sinyal/gürültü oranı (SNR - Signal to Noise Ratio), elektronik bir sistemin analog sinyal kalitesinin en önemli ölçülerinden biridir. Bu oran kabaca iletilmek istenen sinyal ile elektronik gürültü sinyali arasındaki oran olarak ya da analog sinyal genliklerinin çoklu ölçümleri sonucu hesaplanan standart sapma miktarı olarak tanımlanır. Nükleer spektroskopik sistemlerde ölçüm doğruluğunu ve enerji çözünürlüğünü etkileyen önemli bir parametredir. Bu oranı yükseltmek için, çevresel ya da dâhili elektronik gürültünün önüne geçilmesi gerekmektedir.

Elektronik gürültü kaynakları oldukça çeşitlilik göstermektedir ve sisteme yansıyan gürültülerin kaynağının belirlenmesi zordur. Bu elektronik gürültüler doğa olayları (uzay, atmosferik), çevredeki elektrikli cihazlar, elektronik sistemde sıcaklık değişimleri (termal), devre içerisindeki aktif devre elemanları ve elektrik şebekesi kaynaklı olabilmektedirler. Elektronik gürültüyü gidermek için sistemin iyi topraklanması gerekmektedir. Elektronik devrelerin ekranlanması gürültüyü büyük oranda gidermektedir. Sinyal iletim kablolarının koruma ve izolasyonlarının iyi bir şekilde yapılması da oldukça önemlidir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen FUAMP nükleer spektroskopik yükselteç devresi iletken silindirik bir kutuya yerleştirilerek hem topraklanmış hem de ekranlanmıştır. Sinyal iletim kablolarının gürültüye karşı korumalı olabilmesi için uygun kablolar (koaksiyel) kullanılmıştır. Sinyal/gürültü oranının belirlenmesi için Şekil 2.4'teki sistem kurulmuş ve yükselteç çıkışındaki analog sinyal genlikleri her iki sistem için 100'er defa ölçülmüştür. Elde edilen ölçüm sonuçlarından ortalama sinyal genliği ( $\mu$ ) ve standart sapma ( $\sigma$ ) değerleri hesaplanarak Denklem 2.5'te verildiği gibi birbirine oranlanmış ve logaritması hesaplanmıştır. Sinyal/gürültü oranı hesaplamaları ayrıca Denklem 2.6'da verildiği gibi sinyal ve gürültü genliklerini kullanarak logaritmik bir ifadeyle de yapılabilmektedir (Schroeder, 1999).

$$SNR_{dB} = 10 \log \left( \frac{\mu}{\sigma} \right) \quad (2.5)$$

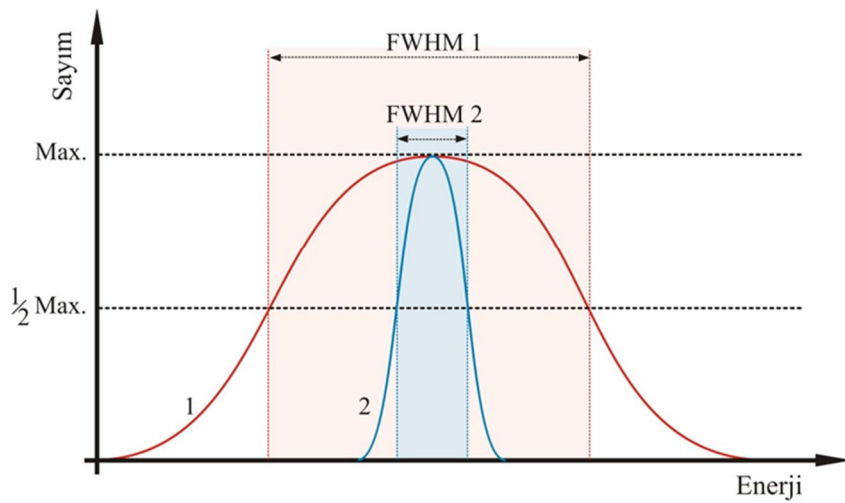
$$SNR_{dB} = 20 \log \left( \frac{V_{sinyal}}{V_{gürültü}} \right) \quad (2.6)$$



Şekil 2.5. Yükselteç çıkışındaki analog sinyalde sinyal ve gürültü genlikleri.

#### 2.2.4. Enerji Çözünürlüğü (FWHM) Ölçümleri

Spektroskopik sistemlerin enerji çözünürlüğü veya elde edilen spektrumların kalitesi FWHM (Full Width at Half Maximum) ile ifade edilir. Türkçe karşılığı yarı maksimum tam genişliği olarak geçen bu kavram, elde edilen bir pikin en üst değerinin yarısı hizasındaki yatay genişliği olarak ölçülür.



Şekil 2.6. FWHM değerinin spektrum üzerindeki pikte gösterilmesi.

Şekil 2.6’da maksimum değerleri aynı, FWHM değerleri farklı olan iki pik görülmektedir. 1 numaralı pik daha yüksek FWHM değerine sahiptir ve 2 numaralı pike göre daha yayvandır. Bu nedenle 1 numaralı pikin hassasiyet ya da doğruluk değeri 2 numaralı pike göre daha düşüktür. Nükleer spektroskopi sistemi üretici firmaları ürettikleri sistemin hassasiyetini, genellikle belirli enerjilerdeki FWHM değeri olarak vermektedirler.

Vakum ortamında standart radyasyon kaynakları kullanılarak Şekil 2.3’teki düzenek kurulmuştur.  $25 \times 10^{-6}$  atm vakumda her iki algılama sistemi ile elde edilen spektrumlar kullanılarak FWHM değerleri bulunmuştur.

### **2.3. Kalibrasyon**

Kalibrasyon; bir ölçü aleti veya ölçme sisteminin gösterdiği veya bir ölçüt ya da ölçeğin ifade ettiği değerler ile ölçülenin bilinen değerleri arasındaki ilişkinin belli koşullar altında belirlenmesi için yapılan işlemler dizisidir. Kalibrasyon, kullanılan ölçü aletlerinin istenilen doğrulukta ölçüm yapıp yapmadığının belirlenmesini sağlar. İstenen kalitenin sağlanması için, kaliteyi doğrudan etkileyen noktalarda yapılan ölçümlerin her zaman belli bir doğrulukta olması gerekir. Kullanıcı, kullandığı ölçü aletinin amaçladığı kalite için gereken doğruluğa sahip olup olmadığını ise ancak kalibrasyon testleri ile belirleyebilir. Kalibrasyon sonucu, ölçüt ya da ölçeğin, ölçü aletinin veya ölçme sisteminin hatasını kestirmeye veya alelade bir skalanın işaretlerine değer atanmasına olanak sağlar.

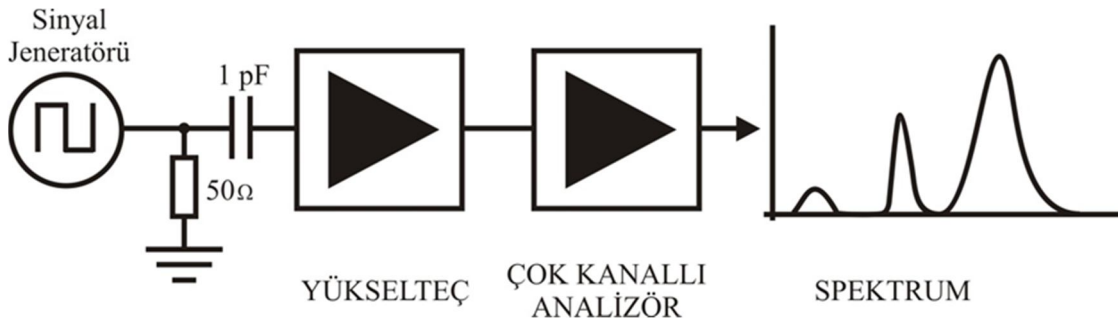
Nükleer spektroskopi sistemlerin radyasyon deteksiyonunun yüksek doğrulukta gerçekleştirilebilmesi için, elektronik ve radyoaktif bir dizi test ve kalibrasyonların yapılması gereklidir. Günümüzde nükleer spektroskopi sistemlerini oluşturan detektör ve elektronik katmanların ayrı ayrı bütün karakteristik bilgileri katalog olarak sunulmaktadır. Yapılması gereken test ve kalibrasyonlar, standart analiz metotlarında belirtilen prosedüre göre yapılır. Bu şekilde sistemin radyasyona vereceği tepki net bir şekilde belirlenmiş ve ölçeklendirilmiş olur.

Bu çalışmada tasarlanan spektroskopi sisteminin ve ticari muadilinin elektronik ve radyoaktif kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.

### 2.3.1. Elektronik Kalibrasyon

Elektronik test sürecinde, yükselteç katmanının bilinen bir sığa üzerinden istenilen yük miktarlarında vereceği tepkiler kazanç testi ile belirlenir. Kalibrasyon sürecinde ise aynı yük değerleri ile sistemin tamamı beslenerek bu yüklerin temsil ettiği enerji değerlerinin çok kanallı analizörde tekabül ettiği kanal belirlenir.

Bu çalışmada her iki spektroskopi sistemi için kazanç testinde kullanılan devre çok kanallı analizöre bağlanarak Şekil 2.7’deki düzenek kurulmuştur. 1 kHz kare dalga sinyalinin genliği değiştirilerek spektrumda oluşan pikin kanal numarası kaydedilmiştir. Uygulanan sinyalin genliğinin karşılık geldiği enerji değeri, Denklem 2.4’te elde edilen 44,2 mV/MeV değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu şekilde elde edilen enerji değerleri ve kanal numaraları kullanılarak  $Enerji=f(Kanal\ Numarası)$  grafiği her iki sistem için çizilmiştir.



Şekil 2.7. Elektronik kalibrasyon deney düzeneği.

### 2.3.2. Enerji Kalibrasyonu

Radyoaktif kalibrasyon, detektör ve nükleer spektroskopi sistemine göre çeşitlilik gösterir. Genel olarak hemen hemen bütün sistemlerde enerjisi ve aktivitesi bilinen standart radyasyon kaynakları kullanılarak enerji kalibrasyonu yapılır. Bu şekilde bilinen radyasyon enerjilerinin tekabül ettiği kanal numarası belirlenerek kalibrasyon eğrisi elde edilir. Eğer bir ortamda radyasyon miktarının belirlenmesi isteniyorsa, sistemin verim kalibrasyonunun yapılması gereklidir. Bu da yine standart radyasyon kaynakları kullanılarak gerçekleştirilir. Aktivitesi ve enerjisi bilinen radyasyonların sistemde oluşturduğu piklerden yola çıkarak bilinen aktivitenin algılanabilen miktarına bir oranı ile verim kalibrasyonu yapılır.

Bu çalışmada her iki spektroskopi sisteminin enerji kalibrasyonlarını gerçekleştirmek üzere Şekil 2.3'teki düzenek hazırlanmıştır. Tablo 2.1'de enerji ve aktivite değerleri de verilen radyoaktif kaynaklar kullanılarak  $25 \times 10^{-6}$  atm vakumda 900 saniyelik sayımlar yapılmış ve elde edilen spektrumlar yardımıyla bu enerjilerin karşılık geldikleri kanal numaraları belirlenmiştir. Bu kalibrasyonla her iki sistem kalitatif analiz yapabilecek seviyeye gelir. Kantitatif (nicel) analiz yapabilmek için verim kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir.

**Tablo 2.1.** Bu çalışmada kullanılan standart alfa kalibrasyon kaynakları listesi.

| Radyoizotop Adı   | Enerji (MeV) | Aktivite (Bq) |
|-------------------|--------------|---------------|
| $^{237}\text{Np}$ | 4,788        | 219           |
| $^{239}\text{Pu}$ | 5,157        | 2974          |
| $^{241}\text{Am}$ | 5,486        | 185           |
| $^{244}\text{Cm}$ | 5,902        | 4143          |

### 2.3.3. Verim Kalibrasyonu

Detektörlerin performansı birçok parametreye bağlıdır ve bunlardan birisi de radyasyon enerjisidir. Detektörün verimi, radyasyonun enerjisine bağlı olarak değişir. Verim, deteksiyon öncesinde seçilen elektronik sistem ile belirlenen ortam koşullarında aktivitesi bilinen standart radyasyon kaynaklar kullanılarak tespit edilmelidir. Böylece tespiti yapılan herhangi bir enerjideki radyasyon pikinin miktarı doğru bir şekilde belirlenebilir. En genel ifade ile verim aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

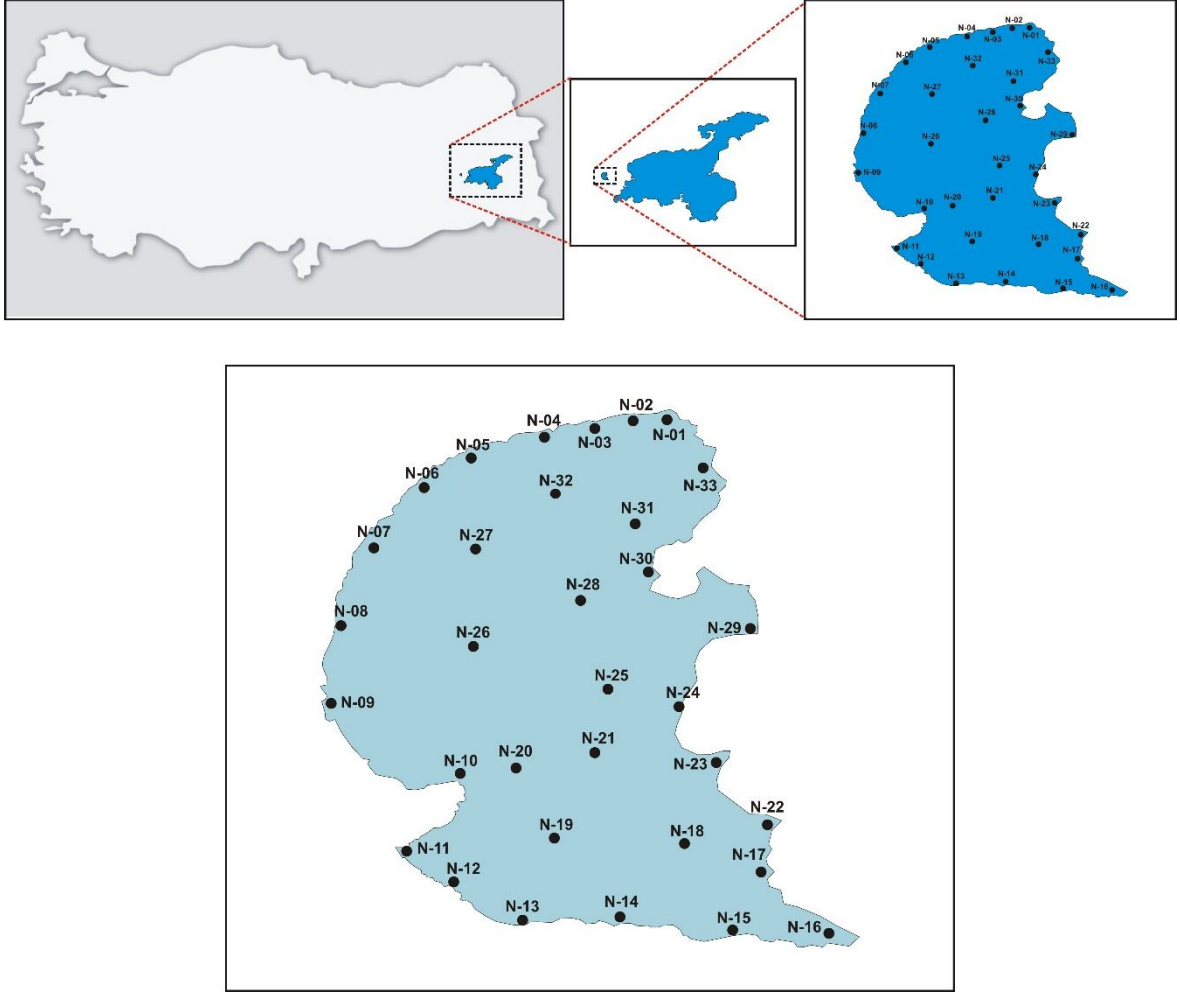
$$\varepsilon = \frac{N}{A \times k_{\alpha} \times t} \quad (2.7)$$

Bu denklemde  $N$ ,  $A$ ,  $k_{\alpha}$  ve  $t$  değerleri sırası ile standart alfa kaynağı ile gerçekleştirilen sayım değeri, standart kaynağın aktivitesi (Bq), dallanma oranı (%) ve sayım süresidir (s). Bu çalışmada verim kalibrasyonu, enerji kalibrasyonu için elde edilen spektrumlar kullanılarak yapılmıştır. Alfa spektroskopisinde ortam vakumunun mümkün olan en düşük değerlere getirilmesi önerilir (EPA, 1996). Bu nedenle  $25 \times 10^{-6}$  atm vakum değerinde her iki sistem için verim değerleri hesaplanarak grafik üzerinde gösterilmiştir.

#### **2.4. Nemrut Krater Gölü Yüzey Suyu Analizleri**

Nemrut Krater Gölü, Bitlis il sınırları içerisinde ve dünyanın ikinci Türkiye'nin en büyük krater gölüdür. Uyuyan volkanik krater içerisinde oluşmuş bu göl haricinde mevsimsel olarak 20 civarında gölet oluşmaktadır. Ancak yaz ayları sonunda krater gölü ve ılıca gölü haricindeki bütün göller kurumaktadır. Bu çalışmada krater gölü incelenmiştir.

Nemrut Krater Gölü, Türkiye'nin en büyük gölü olan Van Gölü'nün 15 km batısında  $42^{\circ}12'00''$ - $42^{\circ}15'00''$  doğu boylamları ve  $38^{\circ}36'00''$ - $38^{\circ}38'40''$  kuzey paralelleri arasında bulunmaktadır (Şekil 2.8). Göl yüzeyi 2250 m rakıma ve gölün en derin noktası 176 m derinliğe sahiptir. Gölün su seviyesindeki değişimler iklimsel şartlara bağlıdır. Göl yüzey suyunda meydana gelebilecek farklılık sebebi ise, gölün güney kısmının belirli noktalarından gaz çıkışının olmasıdır.



Şekil 2.8. Nemrut Krater Gölü'nün Türkiye haritasındaki konumu ve örnek alma noktaları.

#### 2.4.1. Yüzey Suyu Örnekleri

Nemrut Krater Gölü yüzey suyu numunelerini toplamak amacıyla, Bitlis Gençlik Hizmetleri ve Spor İl Müdürlüğü'nün Tatvan Su Sporları Merkezi'nden 6 kişilik Zodyak bot temin edilerek göle taşınmıştır. Su numuneleri 0,5 ve 1 litrelik polipropilen numune kapları kullanılarak toplanmıştır (Şekil 2.10). Her bir numune içerisine 3 M  $\text{HNO}_3$  (Nitrik asit) eklenerek numunelerin pH değeri 2'nin altına düşürülmüş, biyolojik oluşumlar önlenmiş, kap duvarları ile etkileşim ve çökelmelerin önüne geçilmiştir.



**Şekil 2.9.** Göl yüzeyinden su numunesi toplanması.

Göl yüzeyinden numune alınan toplam 33 farklı noktanın koordinatları, küresel konumlama sistemi (GPS-Global Positioning System) yardımıyla Magellan Triton 400 cihazı kullanılarak belirlenmiştir.

Toplanan numuneler hızlıca laboratuvara götürülerek soğuk bir ortamda saklamaya alınmıştır. Nitrik asit eklenmiş numunelerde radyoaktivite analizi (toplam alfa-beta) yapmak için bir dizi işlem yapılmıştır. Her bir numuneden 500 ml alınarak beherlere konulup etüvde 80°C sıcaklıkta kaynatmadan buharlaştırma işlemine tabi tutulmuştur. Beherde biriken tortu kazınarak 5,1 cm çapında alüminyum planşetlere konulmuş ve üzerine birkaç damla saf su damlatılarak tekrar etüvde kurutulmuştur. Böylece tortunun planşete yapışması sağlanmış ve bu işlemler yapılırken her bir ara süreçte tartım işlemleri yapılarak sayımı yapılacak tortu miktarı net olarak belirlenmiştir.

#### 2.4.2. Suda Ağır Metal Tayini

Nemrut krater gölünden toplanan 33 numunenin kimyasal analizleri Bitlis Eren Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Thermo Scientific ICP-MS (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry) sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.10). Bu sistem ile sıvı bir numune içerisindeki elementer madde içeriği ppb mertebesinde bulunabilir. Azot gazı kullanılarak oluşturulan indüksiyon plazmasına ( $\sim 10000^\circ\text{K}$ ) püskürtülen numune burada iyonlaştırılır ve quadropol magnet kullanılarak sapıtılır. Böylece kütlesine bağlı olarak elementler ayrıştırılarak madde içerisindeki miktarı tespit edilmektedir.



Şekil 2.10. ICP-MS ağır metal tayin cihazı.

Toplanan numunelere hızlı bir şekilde 3 M nitrik asit eklenmiştir. Ağır metal tayinini yapmak üzere öncelikle 1000 ppm çoklu element standart çözeltisinden bir miktar alınarak 2 ppm'lik ara stok çözeltisi hazırlanmıştır. Daha sonra 20-200 ppb aralığında farklı konsantrasyonlarda standart kalibrasyon çözeltileri hazırlanır. Standart çözeltiler ve numuneler otomatik örnekleme birimine yerleştirildikten sonra Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As ve Se elementleri için önce kalibrasyon ve sonrasında numune analizi gerçekleştirilmiştir.

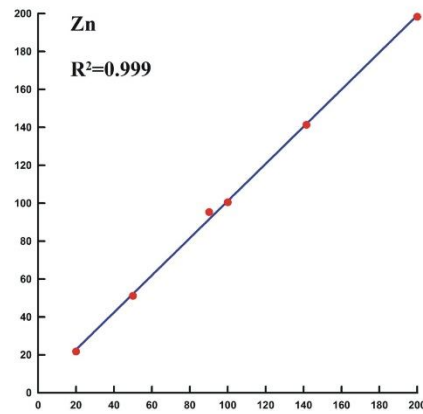
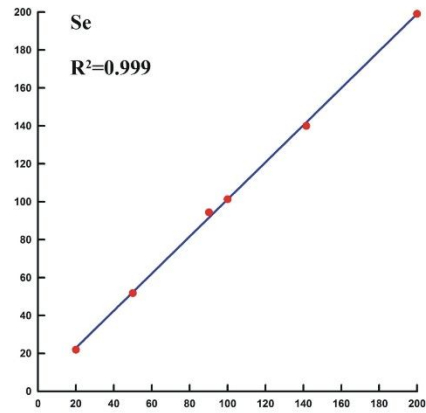
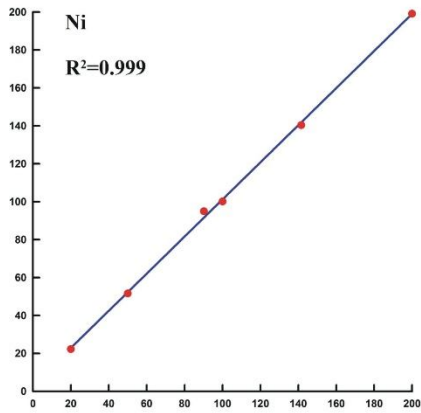
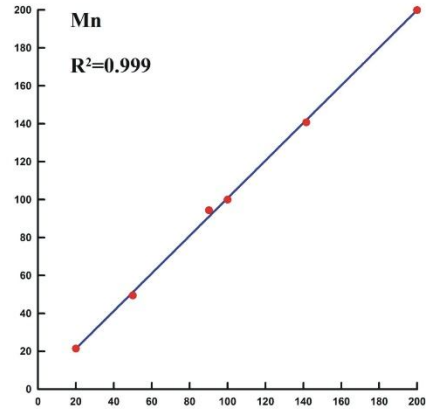
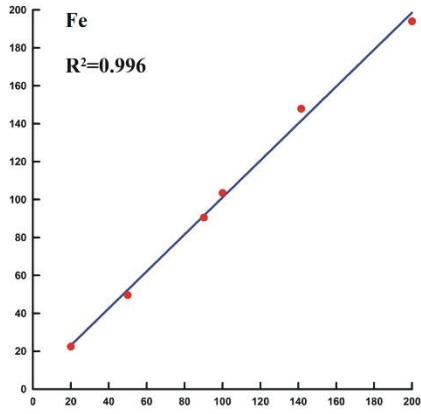
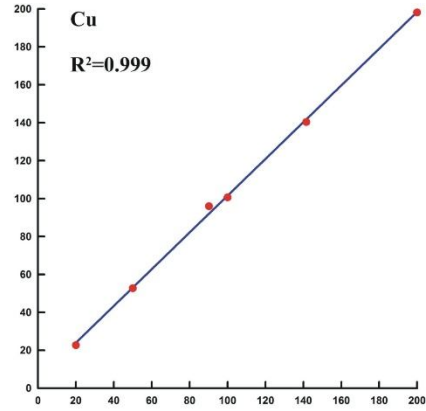
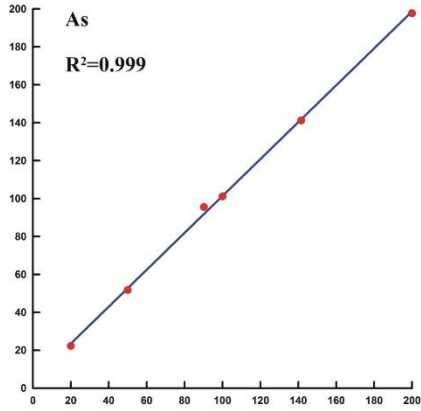
(Şekil 2.12). Çözeltileri seyreltmek için %2'lik  $\text{HNO}_3$  (Nitrik asit) çözeltisi kullanılmıştır. Ayrıca referans çözeltisi (blank) olarak da yine bu asit çözeltisi kullanılmıştır.

#### 2.4.3. Suda Toplam $\alpha/\beta$ Tayini

Nemrut krater gölü yüzey sularının toplam alfa-beta analizleri Protean Instruments Corporation (PIC) firmasının üretimi olan MPC 9604-1 ultra low level  $\alpha/\beta$  counter kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.11). Bu sistem P-10 adı verilen %90 argon %10 metan birleşiminden oluşan gaz ile doldurulmuş 4 adet orantılı sayaçtan meydana gelmektedir. 10,2 cm kurşun zırhlamaya sahip detektörlerin çalışma gerilimleri 1515 volt olarak ayarlanmıştır.



Şekil 2.11. Toplam  $\alpha/\beta$  sayım sistemi.



Şekil 2.12 ICP-MS sistemi için standart çözeltiler ile elde edilen kalibrasyon eğrileri.

## 2.5. FUAMP-ORTEC Sistemleri İle Karşılıklı Sayımlar

Radon algılamak için tasarlanan FUAMP sisteminin elektronik ve radyoaktif performansları yapılan test ve ölçümler ile ortaya konulmuştur. Sayım performansını ortaya koyabilmek için dünya çapında kabul gören ORTEC alfa spektroskopi sistemi ile aynı ortamda karşılıklı  $\alpha$  radyasyon sayımları yapılmıştır.

Bu iki sistemin karşılıklı sayımlarının, Nemrut Krater Gölü yüzey suyu örnekleri üzerinde yapılması planlanmıştır. Bunun için toplam  $\alpha/\beta$  sayımları için hazırlanan tortu örneklerinden en yüksek toplam alfa değerine sahip N-27 nolu örnek, spektrum elde etmek üzere vakum odasına yerleştirilmiştir. Daha sonra her iki sistem ile 48'er saatlik sayımlar gerçekleştirilerek spektrumlar elde edilmiştir. Ayrıca standart  $\alpha$  radyasyon kaynakları vakum odasına konularak ortam vakumlanmış ve her iki sistem için ayrı ayrı 3600 saniyelik sayımlar gerçekleştirilmiştir.

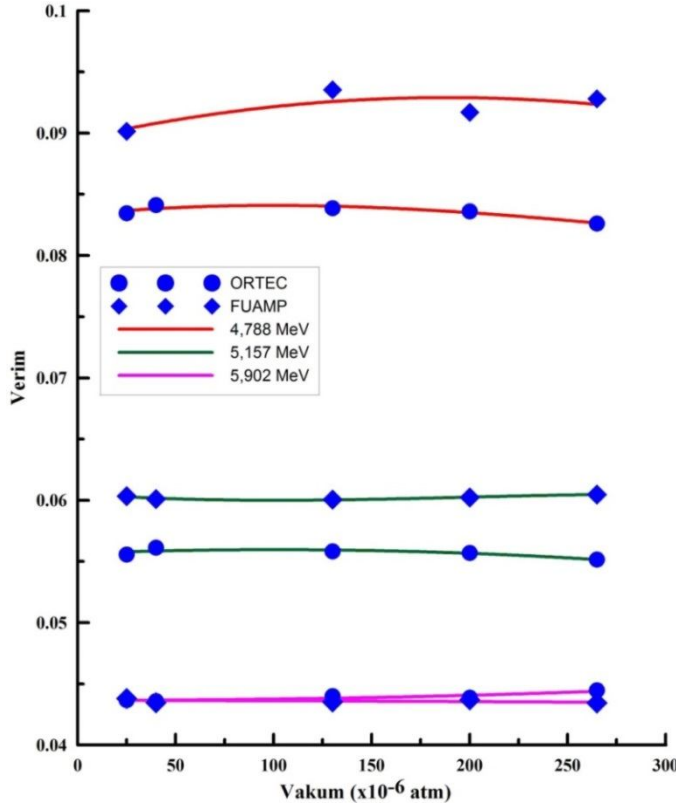
### 3. BULGULAR

Bu çalışmada geliştirilen radon algılama sisteminin (FUAMP) performansı, ticari eşdeğer başka bir sistem ile karşılıklı test ve sayımlar ile ortaya konulmuştur. Her iki sistem için vakum testi, kazanç testi, sinyal/gürültü oranı ölçümleri, enerji çözünürlüğü (FWHM) ölçümleri, elektronik kalibrasyon, enerji kalibrasyonu, verim kalibrasyonu ve  $^{222}\text{Rn}$  sayımları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Nemrut Krater Gölü yüzey suyu örneklerinde ağır metal ve toplam  $\alpha/\beta$  analizleri de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlar ışığında çizilen grafikler bu bölümde sunulmuştur.

#### 3.1. Vakum Testi

Radon gazının ve yayınladığı alfa radyasyonunun hava ortamındaki yayılımı, bu radyasyonun algılanması için büyük önem taşımaktadır. Şekil 2.3'teki deney düzeneği kurularak gerçekleştirilen vakum testlerinde, FUAMP ve ORTEC sistemlerinin farklı vakum değerlerindeki verimleri bulunmuştur.

Şekil 3.1'de göze çarpan ilk sonuç verim değerinin daha çok düşük enerjilerde vakumdan etkilendiğidir. Geliştirilen FUAMP sisteminin verim değerleri genel olarak ORTEC sisteminden yüksektir. 5,902 MeV enerji değerinde her iki sistemin verim değerleri neredeyse aynı ve bu aralıktaki vakum değerlerinden bağımsız gibi görülmektedir. Bu test sonucunda nispeten düşük enerjili ( $<5$  MeV) alfa radyasyonlarının daha yüksek doğrulukta algılanabilmesi için ortamın iyi vakumlanması gerektiğini her iki sistem için de söylemek mümkündür.



Şekil 3.1. Farklı vakum değerleri için FUAMP ve ORTEC sistemlerinin verim değerleri.

### 3.2. Kazanç Testi

FUAMP-06 yükselteç devresine Şekil 2.4'te gösterildiği gibi 1 pF değerinde bir kondansatör ve 50  $\Omega$  değerinde bir direnç bağlanarak 1 kHz frekanslı kare dalga ile çalıştırılmıştır. Buna göre  $V_{\text{çıkış}} = f(V_{\text{giriş}})$  grafiği çizilerek, hesaplanan giriş sinyal genliğine karşı radyasyon enerjisi değerleri de eksen olarak eklenmiştir (Şekil 3.2).

Grafik incelendiğinde 5,49 MeV enerjili <sup>222</sup>Rn gazına ait alfa radyasyonunun 1 pF'lık sığa değerine sahip Si detektörde oluşturacağı sinyal genliği ve FUAMP-06 yükseltecinin bu radyasyonuna ait giriş sinyaline verdiği tepki görülmektedir. Bu radyasyonun detektörde oluşturduğu 242,6 mV'luk genliğe sahip sinyal, FUAMP-06 yükselteci tarafından yükseltilerek çıkışta yaklaşık 590 mV genlik değerine yükseltilmiştir. Elde edilen grafikten FUAMP-06 yükselteci için kazanç denklemi,

$$V_{\text{çıkış}} = 2,380 \times V_{\text{giriş}} + 10,27 \quad (3.1)$$

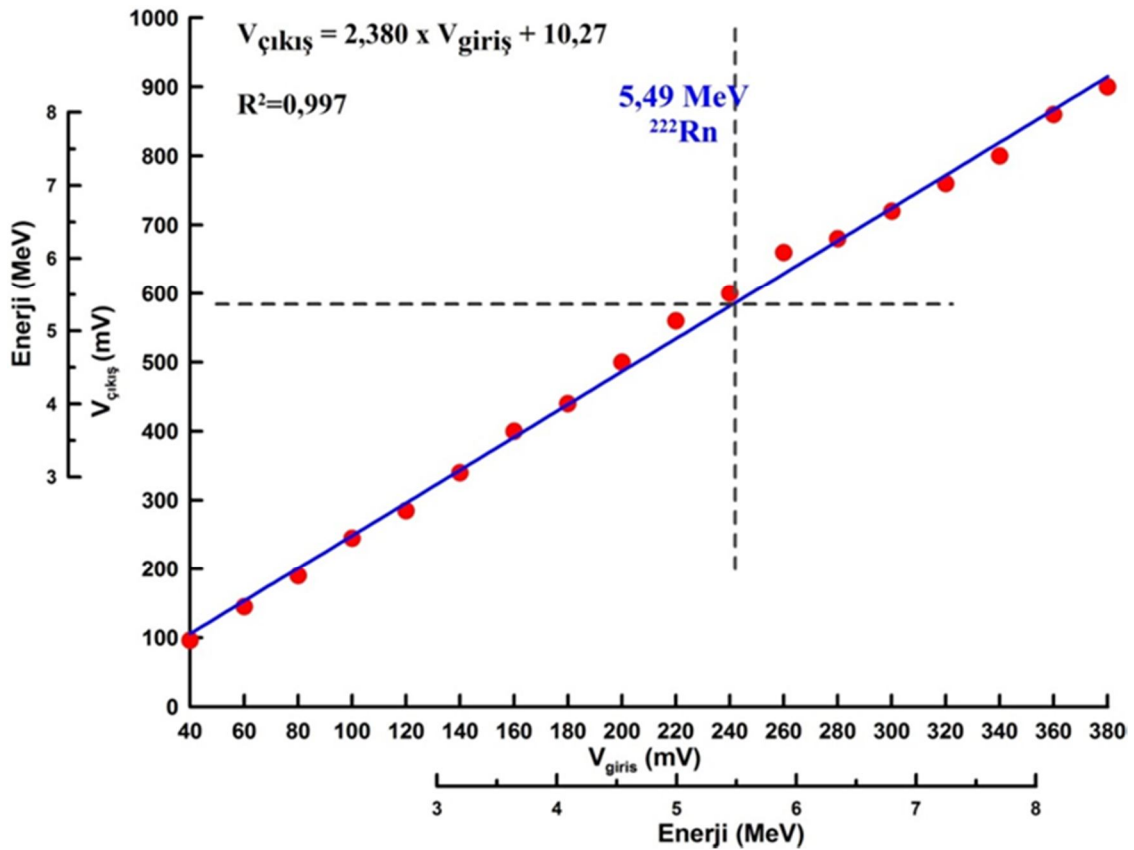
Olarak hesaplanmıştır. Bu kazanç değeri ve gelen radyasyonun her 1 MeV enerjiye karşılık 44,2 mV'luk sinyaller oluşturacağı dikkate alınarak yapılan hesaplamalar sonucu grafikte enerji eksenleri hem giriş hem de çıkış eksenlerine eklenmiştir.

ORTEC yükselteç devresinin kazanç testini gerçekleştirmek için, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi 1 pF değerinde bir kondansatör ve 93  $\Omega$  değerinde bir dirence sahip TEST girişine sinyal jeneratörü bağlanarak 1 kHz frekanslı kare dalga ile çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre  $V_{\text{çıkış}} = f(V_{\text{giriş}})$  grafiği çizilmiştir (Şekil 3.3).

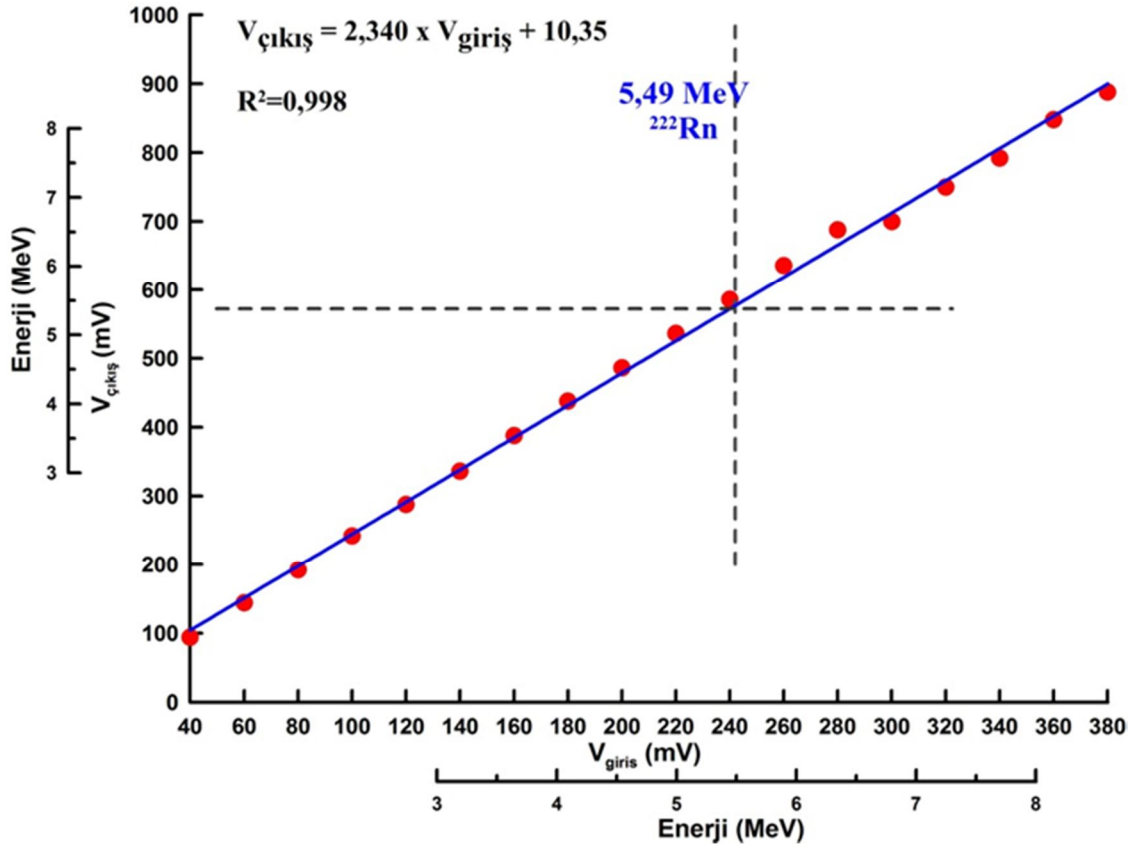
Grafik incelendiğinde 5,49 MeV enerjili  $^{222}\text{Rn}$  gazına ait alfa radyasyonunun 1 pF'lık detektörde oluşturduğu 242,6 mV'luk genliğe sahip sinyal, ORTEC yükselteci tarafından yükseltilerek çıkışta yaklaşık 580 mV genlik değerine yükseltilmiştir. Elde edilen grafikten ORTEC yükselteci için kazanç denklemi,

$$V_{\text{çıkış}} = 2,340 \times V_{\text{giriş}} + 10,35 \quad (3.2)$$

olarak bulunmuştur.



Şekil 3.2. FUAMP yükselteci için kazanç grafiği.



Şekil 3.3. ORTEC yükselteci için kazanç grafiği.

### 3.3. Sinyal/Gürültü Oranı Ölçümleri

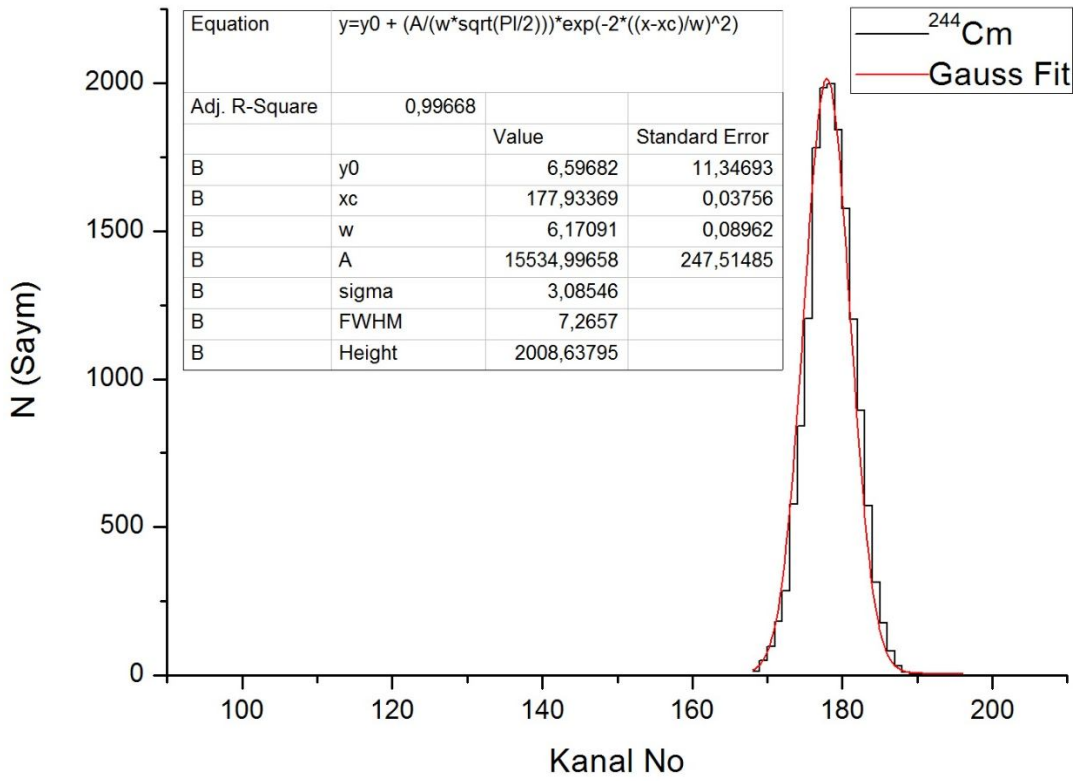
Şekil 2.4'teki düzenek her iki sistem için kurularak yükselteç çıkışındaki sinyal osiloskop ekranından gözlemlenmiştir. Çıkış sinyal genlikleri her bir sistem için 100'er defa ölçülerek ortalama ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Denklem 2.5 kullanılarak dB (desibel) cinsinden sinyal/gürültü oranı bulunmuş ve Tablo 3.1'de yerine konulmuştur.

Hesaplamalar sonucunda sinyal/gürültü oranı FUAMP sistemi için 22,452 dB, ORTEC sistemi için ise 24,695 dB olarak bulunmuştur. Hesaplama sonuçlarına göre ORTEC sisteminin daha iyi bir sinyal/gürültü oranına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum ORTEC sisteminin sinyal kalitesinin FUAMP sistemine göre daha iyi olduğu anlamına gelmektedir. Bu oranın yüksek olması FWHM değerini de olumlu yönde etkilemektedir.

### 3.4. Enerji Çözünürlüğü (FWHM) Ölçümleri

Vakum ortamında standart radyasyon kaynakları kullanılarak her iki algılama sistemi ile gerçekleştirilen sayımlardan elde edilen spektrumlar normal dağılıma göre  $R^2$  değeri (korelasyon katsayısı) 0,995'in üzerinde olacak şekilde fit edilmiş ve net alan, standart sapma ve FWHM gibi parametreleri hesaplatılmıştır (Şekil 3.4).

$25 \times 10^{-6}$  atm vakumda gerçekleştirilen sayımlar sonucu bulunan FWHM değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.4.  $^{244}\text{Cm}$  radyoizotopu için elde edilen spektrum ve bu spektruma ait Gauss fit eğrisi.

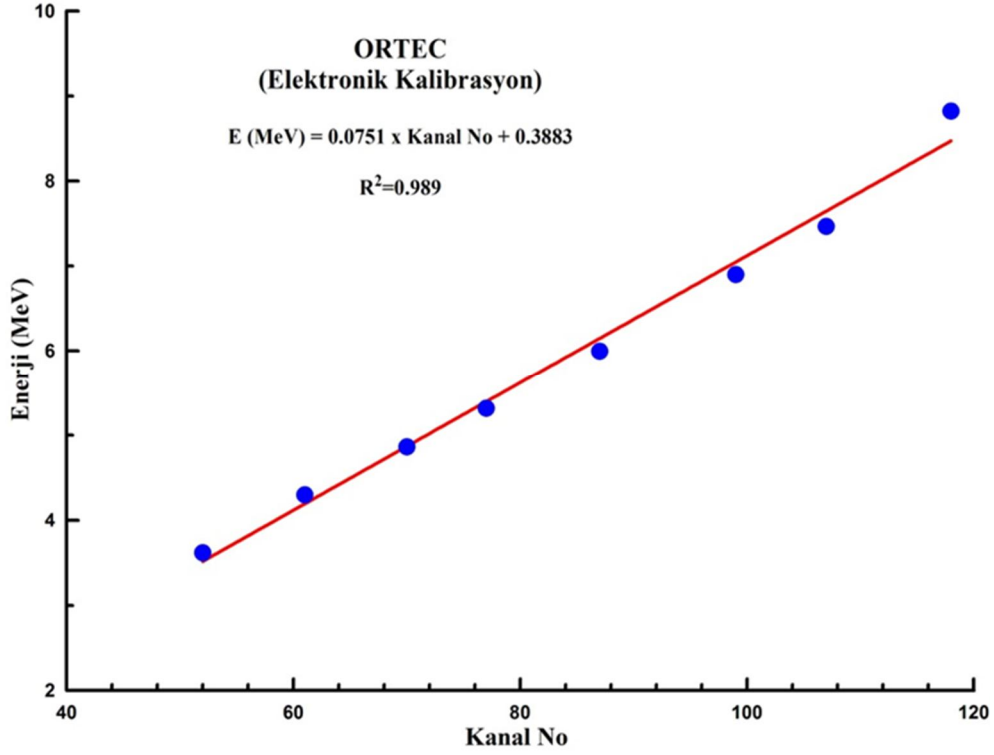
**Tablo 3.1.** FUAMP ve ORTEC sistemleri için FWHM ve sinyal/gürültü oranı değerleri.

| FWHM<br>keV) |       | Enerji (MeV) |        |        |       | SNR <sub>dB</sub> |
|--------------|-------|--------------|--------|--------|-------|-------------------|
|              |       | 4,788        | 5,157  | 5,486  | 5,902 |                   |
|              | ORTEC | 86,84        | 77,81  | 110,84 | 61,04 | 24,695            |
|              | FUAMP | 104,32       | 110,57 | 107,25 | 90,21 | 22,452            |

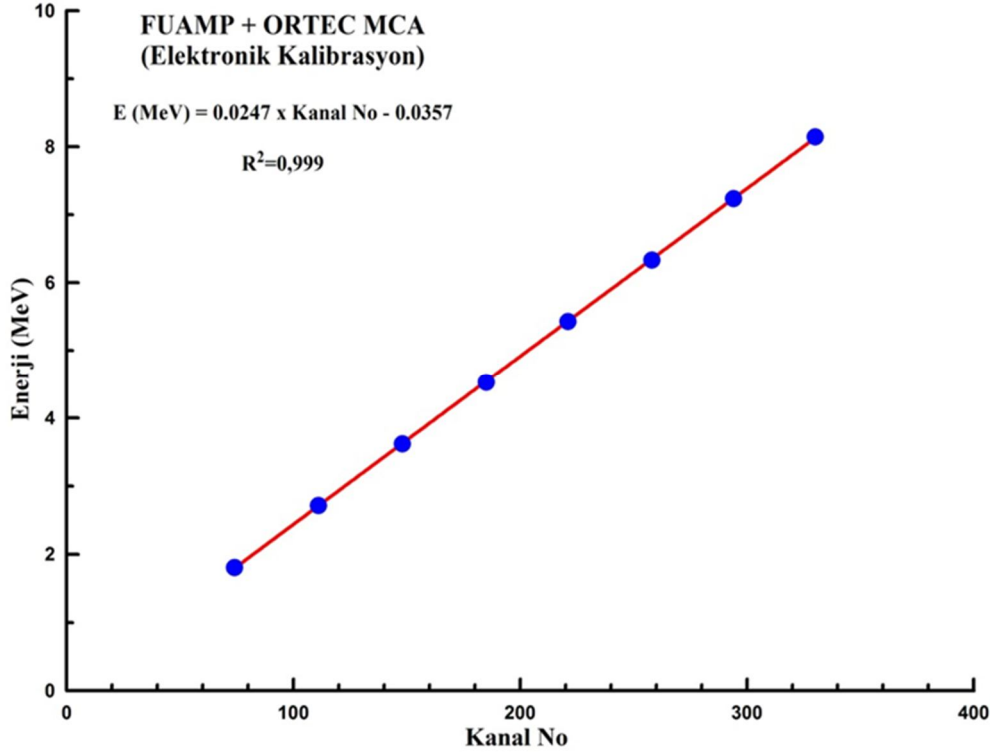
Elde edilen FWHM ölçüm sonuçlarına bakıldığında FUAMP sisteminin enerji çözünürlüğünün daha kötü olduğu görülmektedir. Bu durumun başlıca sebebi, FUAMP sisteminin vakum odasına bağlandığı BNC soket bölgesinin ve çıkış sinyali bölgesinin dışarıdan gelecek elektromanyetik gürültülere karşı ORTEC sistemi kadar iyi yalıtılamamasından kaynaklanmaktadır. Bu durum sinyal/gürültü oranını dolayısıyla FWHM değerini kötü yönde etkileyecektir. Ayrıca ORTEC sisteminde sıfır kutup düzeltmesi (pole-zero cancellation) ve temel seviye düzeltici (baseline restorer) yükselteç üzerinde aktif elemanlarla yapılmaktadır. Bu işlemler FUAMP sisteminde pasif elemanlarla yapılmaktadır.

### 3.5. Elektronik Kalibrasyon

FUAMP ve ORTEC sistemleri bilinen bir sığa üzerinden beslenerek elde edilen spektrumlarla elektronik olarak enerji kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Gerçek sistemde ortam vakumu, detektör kayıpları, eşzamanlı olaylar, radyasyon yayılım doğrultusu ve mesafesi gibi etkiler dolayısı ile radyoaktif kaynakla gerçekleştirilen enerji kalibrasyonu ile farklılık gösterecektir.



Şekil 3.5. ORTEC sistemi için elektronik kalibrasyon eğrisi.



Şekil 3.6. FUAMP sistemi için elektronik kalibrasyon eğrisi.

ORTEC ve FUAMP sistemleri için elde edilen elektronik kalibrasyon denklemleri sırasıyla aşağıdaki Denklem 3.3 ve 3.4'te verilmiştir.

$$E(MeV) = 0,0751 \times kanal\ numarası + 0,3883 \quad (3.3)$$

$$E(MeV) = 0,0247 \times kanal\ numarası - 0,0357 \quad (3.4)$$

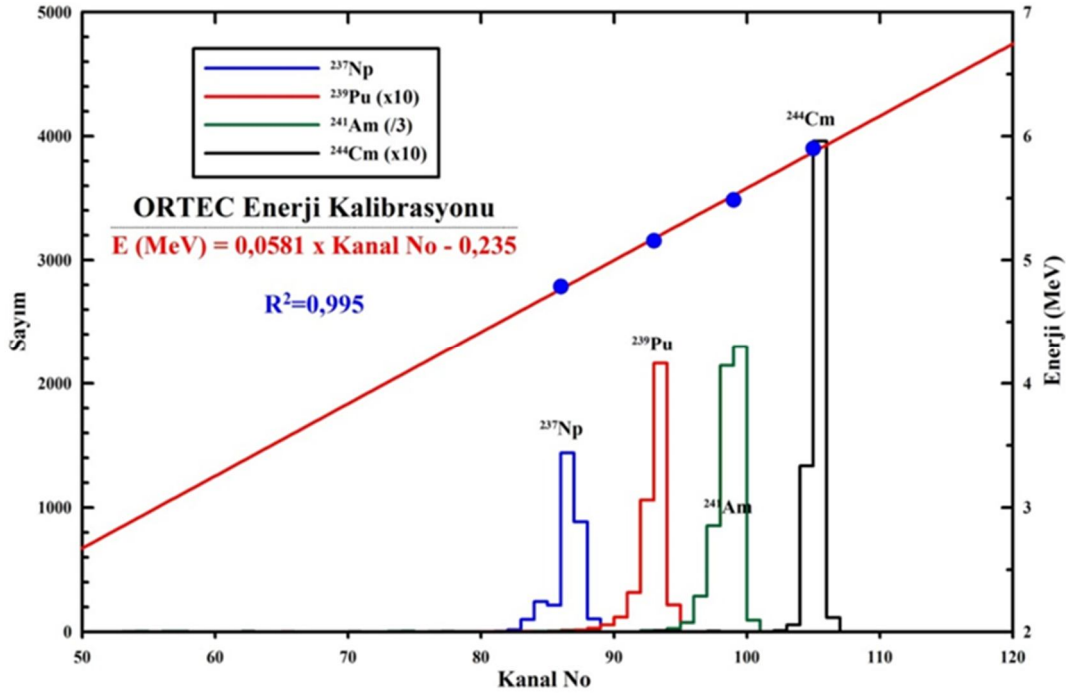
### 3.6. Enerji Kalibrasyonu

Bir numunenin kalitatif (nitel) olarak radyoaktivite analizinin yapılabilmesi için standart radyoaktif kaynaklar ile enerji kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir. Bunun için Şekil 2.3'teki düzenek her iki sistem için kurulmuş ve vakum ortamında standart radyoaktif kaynaklar kullanılarak enerji kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir.

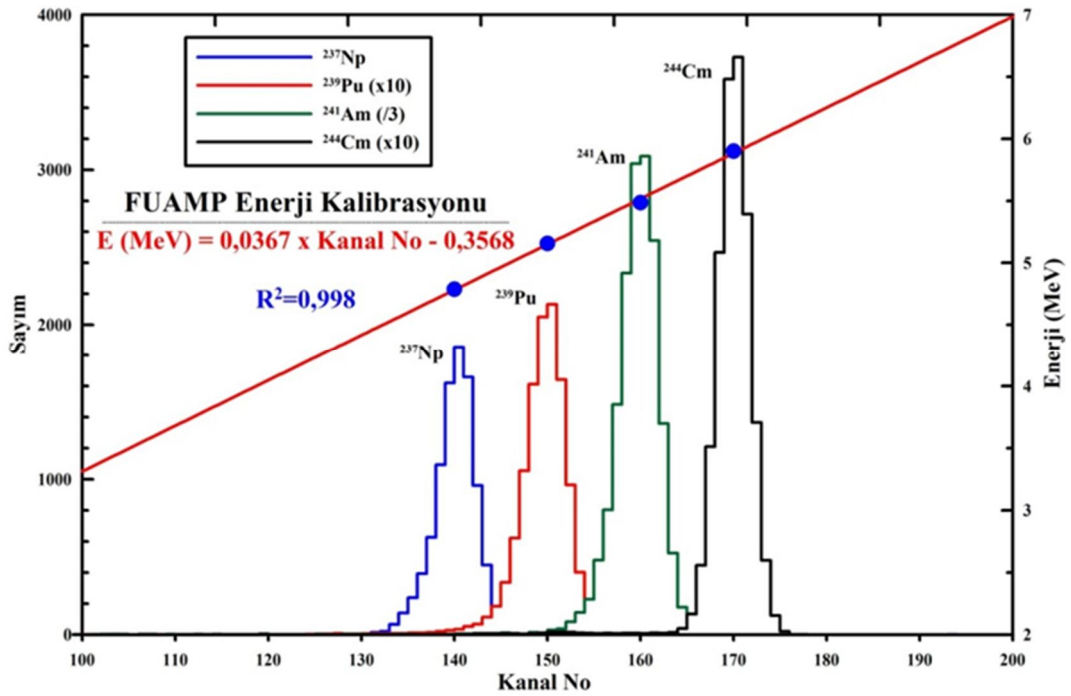
Elde edilen radyoaktif kaynaklara ait pik noktaları ile oluşan kalibrasyon eğrisi ve spektrumlar aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. ORTEC sistemi için kalibrasyon grafiği Şekil 3.7'de verilmiştir. ORTEC sistemi için kalibrasyon denklemi ise Denklem 3.5'teki gibidir. FUAMP sistemi için kalibrasyon eğrisi Şekil 3.8'de ve kalibrasyon denklemi Denklem 3.6'da verilmiştir.

$$E(MeV) = 0,0581 \times kanal\ numarası - 0,235 \quad (3.5)$$

$$E(MeV) = 0,0367 \times kanal\ numarası - 0,3568 \quad (3.6)$$



Şekil 3.7. ORTEC alfa spektroskopi sistemi enerji kalibrasyonu.

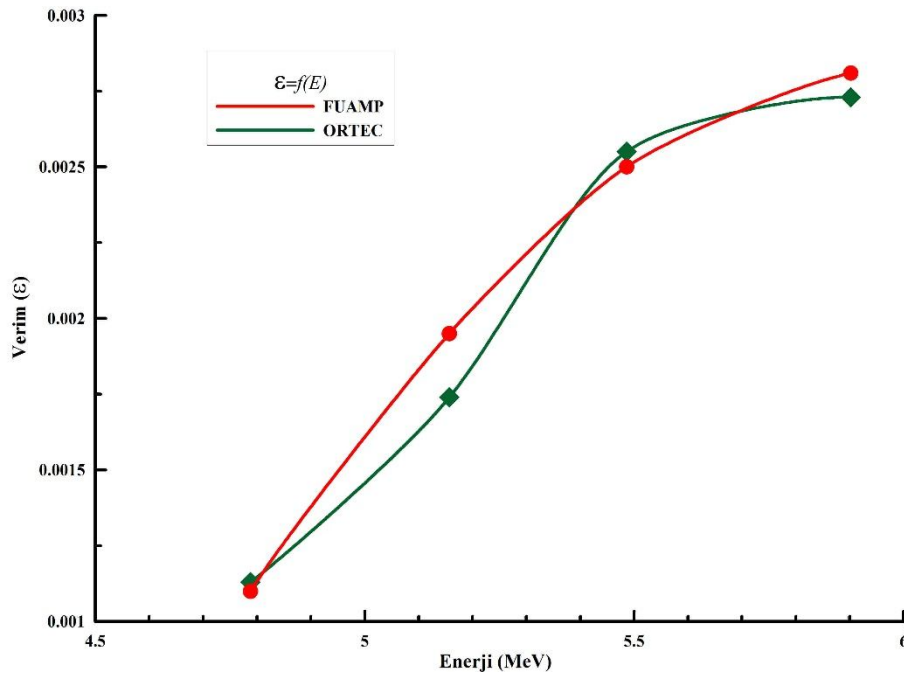


Şekil 3.8. FUAMP alfa spektroskopi sistemi enerji kalibrasyonu.

### 3.7. Verim Kalibrasyonu

Eğer bir numunede kantitatif radyoaktivite analizi yapılmak isteniyorsa, mutlaka verim kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir. Detektörlerin farklı enerjili radyasyonlara verdikleri tepkiler farklı olduğundan hangi enerjide nasıl bir tepki vereceğinin önceden bilinmesi gerekmektedir.

Verim kalibrasyonunu yapmak üzere,  $25 \times 10^{-6}$  atm vakum değerinde standart radyoizotoplar kullanılarak her iki sistem için elde edilen spektrum pikleri fit edilerek alanları hesaplanmıştır. Tablo 2.1’de verilen aktivite değerleri, kullanılan enerjilerin dallanma oranları ve sayım süreleri kullanılarak Denklem 2.7 yardımıyla verim değerleri hesaplanmış ve grafik üzerinde gösterilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. ORTEC ve FUAMP sistemleri için verim kalibrasyon eğrileri.

### 3.8. Yüzey Suyunda Ağır Metal Analizi

Nemrut Krater Gölü yüzeyinde 33 farklı noktadan toplanan yüzey suyu örneklerinde Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As ve Se ağır metallerinin tayini ICP-MS sisteminde gerçekleştirilmiştir. ppb mertebesinde tespit edilen ağır metal konsantrasyonları her bir örnek toplama noktası için ayrı ayrı Tablo 3.2’de verilmiştir. Ayrıca bu değerlerin minimum, maksimum ve ortalama değerleri de yine bu tabloda sunulmuştur. Aşağıda verilen limit değerleri aşan değerler koyu renkte gösterilmiştir.

Değerler incelendiğinde 16 ve 17 nolu örneklerin diğer örneklere göre daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Bunun nedeni bu istasyonların gölde gaz çıkışının gerçekleştiği bir bölgede olmalarıdır. Bu bölgedeki Mn, Fe, Ni ve Cu konsantrasyonları göl yüzeyinde en yüksek seviyelerdedir. Ayrıca yine bu bölgenin yakınındaki kıyı bölgesinde bulunan 22 ve 23 nolu örneklerde Mn ve Fe konsantrasyonları yüksek seviyelerdedir. 22 ve 23 numaralı örneklerde As konsantrasyonu en yüksek seviyelerdedir.

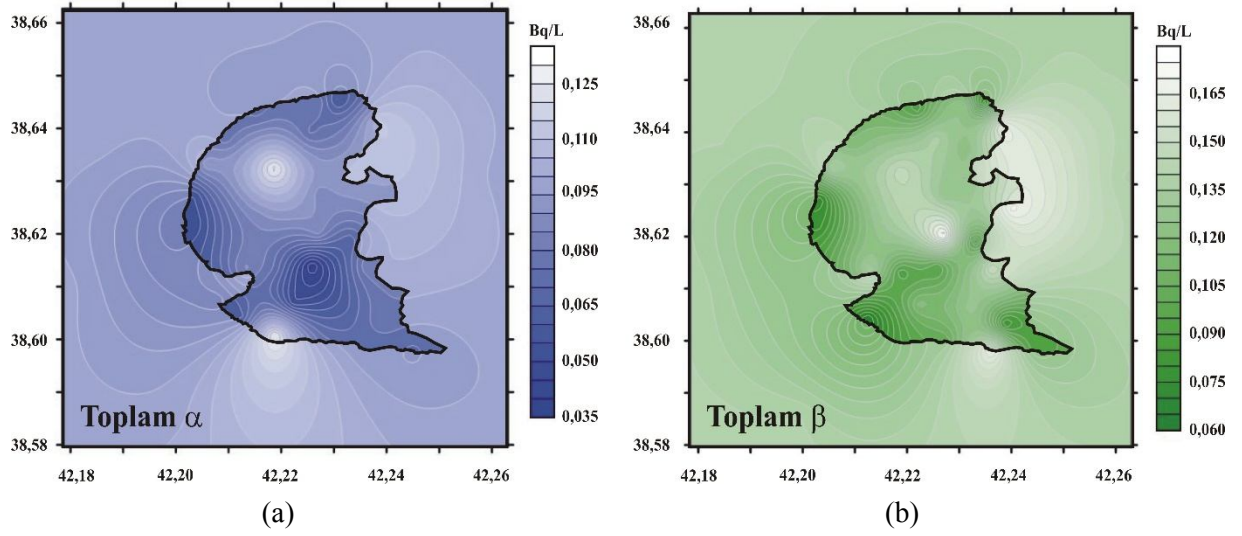
Bu çalışmada analizi gerçekleştirilen ağır metallerin içme sularındaki limitleri dünya çapında kabul gören sağlık örgütleri EPA (Environmental Protection Agency) ve WHO (World Health Organisation) tarafından belirlenmiştir. Buna göre Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As ve Se için limit değerleri sırasıyla 50, 300, 20 (WHO), 1300, 5000, 10 ve 50 ppb olarak belirlenmiştir (EPA, 2012) (WHO, 2011). Buna göre Nemrut Krater Gölü su örneklerinde limit değerler sadece Fe ve As elementlerinde aşılmıştır. Örneklerin %36,4’lük bir kısmı Fe limitinin altındadır ancak bu değerlerin de en küçüğünün 272,373 ppb olduğu düşünülürse bütün örneklerin limit değer civarlarında olduğu söylenebilir. Sadece N-16 numaralı örnek noktasında limit değer 2 katı mertebesine ulaşılmıştır. As zehirli bir elementtir ve limit değer 10 ppb’dir. Ancak örneklerin hepsi bu değerin 6-7 kat üzerinde değerlere sahiptir.

**Tablo 3.2.** Nemrut Krater Gölü ağır metal konsantrasyonları.

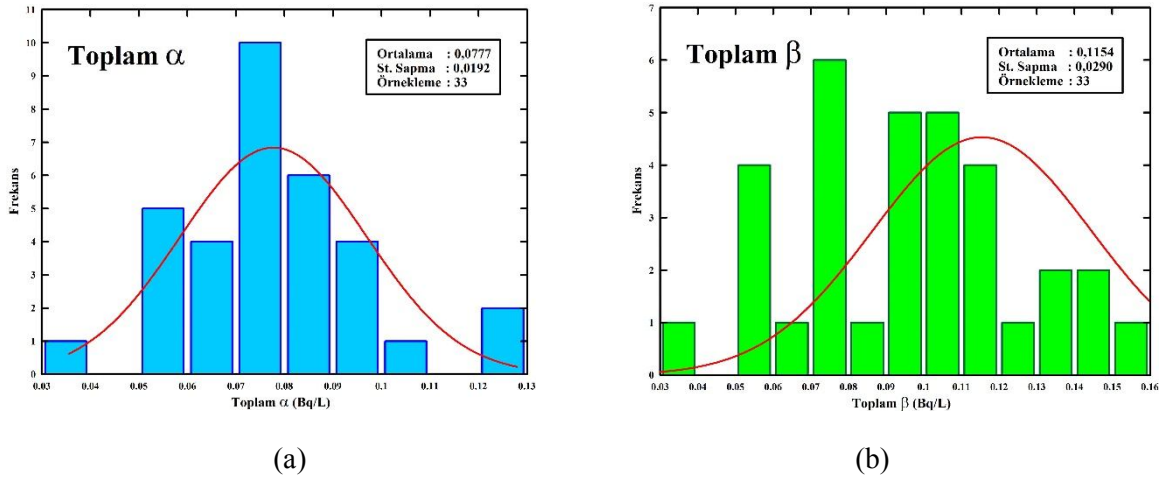
| Numune<br>Adı | Konsantrasyon (ppb) |         |       |        |       |        |       |
|---------------|---------------------|---------|-------|--------|-------|--------|-------|
|               | Mn                  | Fe      | Ni    | Cu     | Zn    | As     | Se    |
| N-01          | 1,774               | 324,784 | 0,364 | 2,253  | 2,065 | 61,929 | 1,327 |
| N-02          | 1,459               | 302,854 | 0,320 | 1,732  | 0,178 | 65,649 | 1,464 |
| N-03          | 1,651               | 327,443 | 0,361 | 2,406  | ---   | 68,352 | 1,589 |
| N-04          | 1,707               | 341,813 | 0,367 | 2,190  | ---   | 70,630 | 2,039 |
| N-05          | 1,720               | 322,542 | 0,315 | 2,156  | 6,663 | 69,460 | 1,866 |
| N-06          | 1,844               | 325,228 | 0,316 | 2,258  | ---   | 68,975 | 2,039 |
| N-07          | 1,726               | 329,237 | 0,374 | 2,536  | 0,042 | 70,042 | 2,078 |
| N-08          | 2,638               | 314,770 | 0,339 | 2,869  | ---   | 68,563 | 1,833 |
| N-09          | 1,951               | 312,280 | 0,455 | 2,538  | ---   | 69,486 | 1,657 |
| N-10          | 1,893               | 308,508 | 0,473 | 1,999  | ---   | 67,373 | 1,908 |
| N-11          | 2,119               | 315,414 | 0,357 | 2,019  | ---   | 68,663 | 1,872 |
| N-12          | 2,085               | 308,368 | 0,298 | 2,121  | ---   | 70,148 | 1,753 |
| N-13          | 1,963               | 301,145 | 0,241 | 2,249  | ---   | 67,844 | 1,896 |
| N-14          | 2,125               | 296,427 | 0,398 | 2,266  | 0,499 | 67,977 | 1,771 |
| N-15          | 2,052               | 303,365 | 0,369 | 2,032  | ---   | 68,777 | 1,809 |
| N-16          | 31,582              | 604,162 | 0,369 | 2,178  | 0,046 | 72,186 | 1,765 |
| N-17          | 3,297               | 309,918 | 0,679 | 15,879 | 8,907 | 69,069 | 1,968 |
| N-18          | 3,995               | 305,541 | 0,369 | 2,250  | ---   | 70,074 | 1,699 |
| N-19          | 2,236               | 303,664 | 0,410 | 2,242  | ---   | 68,981 | 1,827 |
| N-20          | 1,578               | 294,036 | 0,479 | 2,167  | ---   | 68,516 | 1,976 |
| N-21          | 1,641               | 292,773 | 0,491 | 2,186  | 0,354 | 66,111 | 1,833 |
| N-22          | 8,188               | 348,637 | 0,252 | 2,246  | 0,019 | 75,394 | 1,845 |
| N-23          | 7,184               | 319,479 | 0,540 | 2,513  | 0,155 | 79,059 | 1,905 |
| N-24          | 1,662               | 278,297 | 0,474 | 2,280  | ---   | 68,275 | 1,795 |
| N-25          | 1,543               | 286,186 | 0,465 | 2,462  | 0,562 | 68,772 | 1,702 |
| N-26          | 1,563               | 272,373 | 0,337 | 2,163  | ---   | 67,664 | 1,619 |
| N-27          | 2,555               | 429,463 | 0,414 | 2,563  | ---   | 69,223 | 1,768 |
| N-28          | 1,452               | 275,680 | 0,485 | 2,275  | 0,023 | 68,674 | 1,920 |
| N-29          | 1,941               | 283,058 | 0,494 | 2,349  | 0,128 | 69,327 | 1,589 |
| N-30          | 1,522               | 282,328 | 0,431 | 2,641  | ---   | 69,019 | 1,762 |
| N-31          | 1,539               | 291,777 | 0,315 | 2,569  | ---   | 70,005 | 1,708 |
| N-32          | 1,558               | 282,534 | 0,344 | 2,650  | ---   | 69,337 | 1,735 |
| N-33          | 1,642               | 276,940 | 0,413 | 2,709  | ---   | 69,713 | 1,798 |
| Minimum       | 1,452               | 272,373 | 0,241 | 1,732  | ---   | 61,929 | 1,327 |
| Maksimum      | 31,582              | 604,162 | 0,679 | 15,879 | 8,907 | 79,059 | 2,078 |
| Ortalama      | 3,193               | 317,304 | 0,397 | 2,726  | 1,511 | 69,190 | 1,791 |

### 3.9. Yüzey Sularında Toplam $\alpha/\beta$ Tayini

Göl yüzeyinden toplanan 33 örnek toplam  $\alpha/\beta$  tayini için hazırlandıktan sonra her bir örneğin 10 saatlik sayımları MPC 9604-1 ultra low level  $\alpha/\beta$  counter cihazında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.3'te verilerek bu sonuçlar ışığında toplam  $\alpha$  ve  $\beta$  radyasyonları için ayrı ayrı kontür haritaları çizilmiştir (Şekil 3.10). Daha sonra bu değerlerin histogram eğrileri çizilerek frekans dağılımları gösterilmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.10. Nemrut Krater Gölü yüzey sularında (a) toplam alfa ve (b) toplam beta seviyeleri.



Şekil 3.11. Nemrut Krater Gölü (a) toplam alfa ve (b) toplam beta frekans dağılımları.

Şekil 3.10 incelendiğinde, göl yüzeyinde toplam alfa ve toplam beta değerlerinin en yüksek seviyelerde olduğu kısımlar gölün orta bölgelerinde N-25, N-26, N-27 ve N-28 örneklerinin olduğu noktalardır. Ayrıca toplam alfa değerinin en yüksek seviyelerde olduğu bir başka nokta N-13 noktasıdır. En düşük toplam alfa değerinin elde edildiği bölge ise N-18, N-19 ve N-21 noktaları arasında kalan bölgedir. Toplam beta değerinin yine en yüksek seviyelerde bulunduğu bir başka nokta N-15 noktasıdır. Toplam beta değerinin en düşük bulunduğu yerler ise N-8, N-12 ve N-17 noktalarıdır.

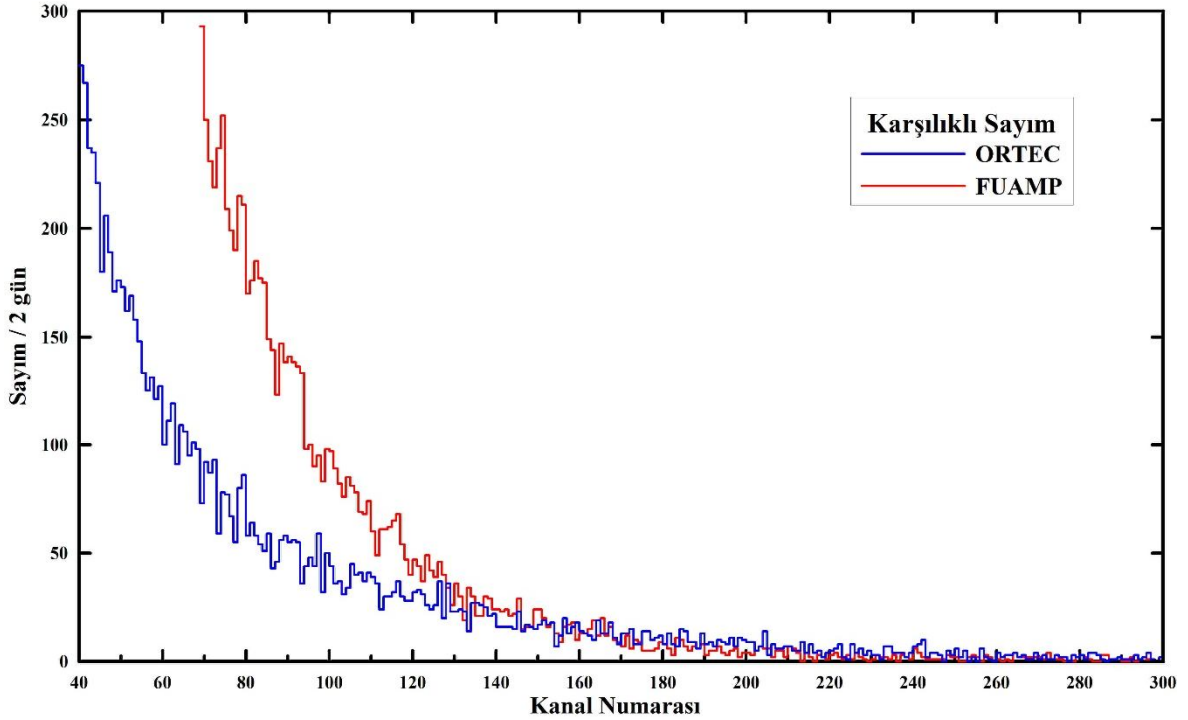
**Tablo 3.3.** Nemrut Krater Gölü yüzey suyu toplam  $\alpha/\beta$  ölçüm sonuçları.

| Numune Adı      | Toplam $\alpha$ (Bq/L) | Toplam $\beta$ (Bq/L) |
|-----------------|------------------------|-----------------------|
| N-01            | 0,071                  | 0,076                 |
| N-02            | 0,058                  | 0,126                 |
| N-03            | 0,080                  | 0,117                 |
| N-04            | 0,076                  | 0,092                 |
| N-05            | 0,074                  | 0,111                 |
| N-06            | 0,078                  | 0,115                 |
| N-07            | 0,094                  | 0,137                 |
| N-08            | 0,055                  | 0,072                 |
| N-09            | 0,050                  | 0,079                 |
| N-10            | 0,086                  | 0,134                 |
| N-11            | 0,058                  | 0,094                 |
| N-12            | 0,064                  | 0,058                 |
| N-13            | 0,127                  | 0,090                 |
| N-14            | 0,078                  | 0,101                 |
| N-15            | 0,070                  | 0,158                 |
| N-16            | 0,069                  | 0,090                 |
| N-17            | 0,079                  | 0,079                 |
| N-18            | 0,064                  | 0,128                 |
| N-19            | 0,050                  | 0,118                 |
| N-20            | 0,074                  | 0,091                 |
| N-21            | 0,036                  | 0,093                 |
| N-22            | 0,079                  | 0,116                 |
| N-23            | 0,084                  | 0,151                 |
| N-24            | 0,067                  | 0,090                 |
| N-25            | 0,088                  | 0,176                 |
| N-26            | 0,090                  | 0,135                 |
| N-27            | 0,128                  | 0,148                 |
| N-28            | 0,088                  | 0,126                 |
| N-29            | 0,092                  | 0,162                 |
| N-30            | 0,096                  | 0,125                 |
| N-31            | 0,085                  | 0,120                 |
| N-32            | 0,074                  | 0,138                 |
| N-33            | 0,102                  | 0,161                 |
| <b>Minimum</b>  | <b>0,036</b>           | <b>0,058</b>          |
| <b>Maksimum</b> | <b>0,128</b>           | <b>0,176</b>          |
| <b>Ortalama</b> | <b>0,077</b>           | <b>0,115</b>          |

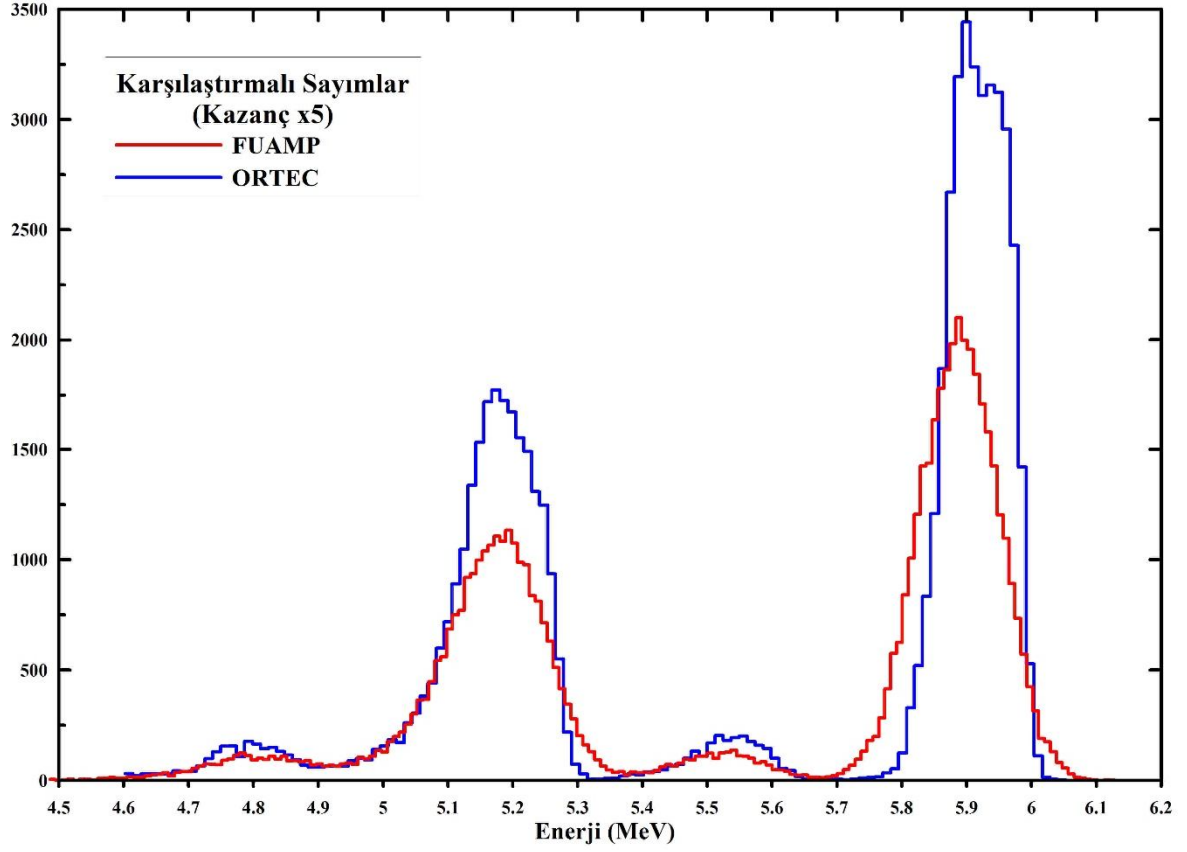
### 3.10. FUAMP-ORTEC Sistemlerinin Karşılıklı Sayımları

Gerçekleştirilen karşılıklı sayımlar sonucu elde edilen spektrumlar incelendiğinde her iki sistemin de düşük enerjilerde bir gürültü bölgesine sahip olduğu görülmüştür. Bu gürültü bölgesini bertaraf etmek için her iki sisteme ait spektrumlarda belirli bir kanaldan sonrası dikkate alınmıştır (Şekil 3.12). ORTEC sisteminde 41. kanaldan itibaren toplam alan hesaplanırken FUAMP sisteminde 70. kanaldan sonrası dikkate alınmıştır. Bunun sebebi, sayım süresi boyunca çalışan vakum pompasının sebep olduğu titreşimlerin FUAMP sisteminde gürültü sinyallerine neden olmasıdır.

ORTEC ve FUAMP sistemleri için elde edilen spektrumlardan hesaplanan toplam alan değerleri sırasıyla 8480 ve 7558 olarak bulunmuştur. Sayım süresi ve sayımı yapılan tortu örneğinin ağırlığından kaynaklanan düzeltme faktörü dikkate alınarak aktivite hesaplandığında, ORTEC sistemi için 0,126 mBq/L ve FUAMP sistemi için 0,116 mBq/L değerleri elde edilmiştir. Toplam alfa analiz sonucu 0,128 mBq/L olan N-27 nolu bu örneğin aktivitesi, ORTEC sistemi ile %1,5 ve FUAMP sistemi ile %9,3'lük bir hata ile bulunmuştur.



Şekil 3.12. FUAMP ve ORTEC sistemleri ile N-27 nolu örneğin karşılıklı sayımları.



**Şekil 3.13.** FUAMP ve ORTEC sistemleri ile standart alfa kaynaklarının karşılıklı sayımları.

Şekil 3.13'te elde edilen spektrum incelendiğinde ORTEC sisteminin FWHM değerinin daha iyi olduğu açık bir şekilde görülmektedir. FUAMP sisteminde ise pik alanları daha büyük olarak bulunmuştur. Bunun sebebi FUAMP sisteminin ORTEC sistemine göre daha fazla gürültü üretmesidir.

#### 4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada  $^{222}\text{Rn}$  gazını algılamak amacıyla bir nükleer spektroskopi sistemi tasarlamak ve tasarlanan sistemin performansının literatürde sıkça kullanılan standart eşdeğer bir sistem ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Tasarlanan sistem spektroskopik bir alfa radyasyonu algılama sistemi olduğundan karşılaştırma yapmak üzere, ORTEC firması tarafından üretilen vakum odası, vakum pompası, NIM (Nuclear Instrumentation Module) modül, yüksek voltaj gerilim kaynağı, Si detektör, ön yükselteç, ana yükselteç, MCA (Multi Channel Analyzer) ve Maestro32 yazılımından oluşan alfa spektroskopi sistemi kullanılmıştır.

Bu iki sistemin elektronik ve radyoaktif performansları, yapılan bir dizi test ve kalibrasyonlarla ortaya konulmuştur. Nemrut Krater Gölü'nden toplanan yüzey suyu örnekleri içerisinde toplam  $\alpha$  değeri en yüksek olan N-27 numaralı örnek kullanılarak karşılıklı sayımlar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca standart  $\alpha$  kaynakları kullanılarak vakum ortamında yine karşılıklı sayımlar gerçekleştirilmiştir. Bütün test ve karşılaştırmalı performans sonuçları bu bölümde ana başlıklar altında sıralanmış ve tartışılmıştır.

- ***FUAMP yükselteç katmanının elektronik devre tasarımı, ORTEC ön yükselteç ve ana yükselteç katmanlarına göre çok daha küçük boyutlara sahiptir. Ayrıca enerji tüketimi oldukça düşüktür.***

Geliştirilen FUAMP ön yükselteç, sinyal şekillendirme ve ana yükselteç katmanı geometrik olarak ORTEC ön yükselteç veya ana yükselteç katmanları ile kıyaslandığında çok daha küçük boyutlardadır. ORTEC 142 ön yükselteci 3,8 x 6,1 x 13,3 cm ve ORTEC 672 spektroskopi yükselteci 6,9 x 22,1 x 34,0 cm boyutlarındadır. FUAMP elektronik devresi 3,4 x 3,4 cm boyutlarında ve içine yerleştirildiği koruyucu alüminyum şase 4,5 cm çapında ve 15 cm yüksekliğinde bir silindirdir (Şekil 4.1).



**Şekil 4.1.** FUAMP ve ORTEC yükseltme katmanlarının ölçekli resimleri.

FUAMP detektör girişi erkek BNC soket ve çıkışı 5 pinli erkek GX16-5P soketi ile gerçekleştirilmiştir. Devre kartı çift yüzölçekli baskılı devre olarak hazırlanmış ve alt yüzü ekranlama amaçlı olarak kullanılmıştır. Devre elemanları yüzey montaj (SMD-Surface Mount Devices) direnç, kondansatör ve entegre opamplardan oluşmaktadır. Devrede yükseltme ve şekillendirme işlemlerinde kullanılan bir kılıf içerisinde iki adet opamp bulunan düşük akım, düşük gerilim ve düşük gürültü değerlerine sahip TLE 2022 entegreleri kullanılmıştır (Texas, 2015). Bu yükselteç devresi, 5 V gibi düşük bir gerilim değerinde çalışabilen ve arazi koşullarında uzun süreli sayımlar yapabilecek bir sistemin yükselteç katmanı olarak tasarlanmıştır. ORTEC ön yükselteç ve yükselteç katmanları ise, 220 V AC gerilime ihtiyaç duyan NIM modülün sağladığı  $\pm 12$  V ve  $\pm 24$  V gerilimler ile çalışmaktadırlar (ORTEC, Datasheets, 2015). ORTEC Model 672 yükselteci  $+24$  V'ta 90 mA,  $-24$  V'ta 170 mA,  $+12$  V'ta 330 mA ve  $-12$  V'ta 190 mA akım çekmektedir. ORTEC Model 142 önyükselteci  $+24$  V'ta 20 mA,  $-24$  V'ta 10 mA,  $+12$  V'ta 15 mA ve  $-12$  V'ta 15 mA akım çekmektedir. FUAMP sistemi ise üzerindeki iki adet TLE2022'nin çektiği yaklaşık 1,2 mA'lık akıma ihtiyaç duymaktadır.

- ***Vakum değerine bağlı olarak <5,9 MeV enerji bölgesinde FUAMP yükseltecinin verimi ORTEC yükseltme sistemine göre daha iyidir.***

Vakum odasına yerleştirilen radyoaktif kaynakların farklı vakum değerlerindeki sayımlarından elde edilen spektrumlardan yola çıkarak her iki sistem için verim değerleri hesaplanmıştır. Genel olarak FUAMP yükseltecinin verimi ORTEC yükselteç sisteminden daha iyidir. Özellikle <5,902 MeV enerji bölgesinde bu fark açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 3.1). Bunun sebebi yükselteçlerin sinyal işleme süreleridir. ORTEC sistemi 2  $\mu$ s'lik sinyal şekillendirme süresinde çalıştırılırken, bu süre FUAMP yükselteci için 1  $\mu$ s civarındadır. Bu süre sistemin hızını temsil eder ve ne kadar kısa olursa sistemin ölü zamanı o kadar düşük olacaktır. Dolayısıyla yakın süreli gelen radyasyonlara ait sinyalleri kaçırma riski azalacaktır. Böylece sistemin sayım verimi artacaktır. FUAMP devresinde bu değeri kullanıcının yazılım üzerinden veya el yordamı ile artırıp azaltması mümkün değildir. Ancak ORTEC yükseltecinde şekillendirme süresinin 0,5, 1, 2, 3, 4 ve 10  $\mu$ s değerlerinden birine ayarlanmasına olanak verilmiştir. FUAMP sisteminde donanımsal olarak en fazla 0,6  $\mu$ s şekillendirme süresi değeri kullanılabilir. FUAMP'ta bu değer ayarlanması ancak deteksiyon yapılacak yerin öngörülen aktivitesine göre devre elemanlarının değiştirilmesi ile elde edilebilir.

- ***FUAMP yükseltecinde kazanç değeri ORTEC yükseltecinin kullanılan kazanç değerine çok yakın olarak bulunmuştur. Ancak ORTEC yükseltecinde kazanç değerini, kaba ve ince ayarlarını ayrı ayrı yaparak değiştirmek mümkündür. FUAMP sisteminde bu ancak devre üzerindeki kazanç direnci değiştirilerek yapılabilmektedir.***

Yükselteçler için kazanç testleri 1 pF'lık sığa kullanılarak ve 1 kHz kare dalga ile beslenerek gerçekleştirilmiştir. FUAMP yükseltecini test sinyali ile beslerken 1 pF'lık sığa ve 63  $\Omega$ 'luk bir direnç kullanılmıştır. ORTEC ön yükseltecinde TEST girişi BNC dişi soket ile entegredir. Bu test girişi 1 pF'lık sığa ve 93  $\Omega$ 'luk bir direnç ile sağlanmıştır. ORTEC yükselteç katmanında kazanç değeri, kaba (Coarse Gain) ve ince (Fine Gain) kazanç ayarı düğmeleri yardımıyla değiştirilebilmektedir. FUAMP yükseltecinde ise kazanç değerini değiştirmek için devre üzerindeki kazanç direncini, istenilen kazanç değerine göre daha düşük ya da daha yüksek bir direnç değeri ile değiştirmek gerekmektedir.

- ***FUAMP yükseltecinin Sinyal/Gürültü oranı (SNR - Signal-to-Noise Ratio), ORTEC yükseltecinden daha düşük olarak bulunmuştur.***

Sinyal/Gürültü oranı elektronik bir sistemin analog sinyal kalitesinin bir ölçüsüdür. Bu oranın yüksek olması elde edilecek sonuçların güvenilirliğini ve hassasiyetini arttıracaktır. Her iki sistem aynı test sinyali ile beslenerek yükseltilmiş Gausyen şekilli çıkış sinyalleri osiloskop ekranından gözlenmiş ve ölçülmüştür. Denklem 2.5 ile elde edilen Sinyal/Gürültü oranları FUAMP için 22,452 dB, ORTEC sistemi için ise 24,695 dB olarak bulunmuştur. Neredeyse aynı kazanç değerlerine sahip ve aynı koşullarda test edilen bu iki sistemden, ORTEC yükseltecinin sinyal kalitesinin FUAMP yükseltecinin sinyal kalitesinden daha iyi olduğu bulunmuştur. Bunun başlıca sebebi FUAMP yükseltecinin giriş ve çıkış soketlerinin ve bazı bağlantılarının dışarıdan elektromanyetik gürültülerden etkilenmesidir. Bir prototip olan FUAMP yükseltecinin koruma haznesi, elektromanyetik yalıtım konusunda ORTEC yükselteç katmanlarındaki yalıtımdan biraz geride kalmıştır. Ayrıca FUAMP sisteminin detektör besleme gerilimi, arazi şartlarında bir aküden sağlanacak 12-14 voltluk DC gerilimin sabit +12 V değerine düzenlenmesiyle sağlanmaktadır. Bu çalışmada ORTEC sisteminin kullandığı +50 V gerilimle beslenen detektör kullanıldığı için FUAMP sisteminde detektör beslemesi harici bir DC güç kaynağı ile sağlanmıştır. Detektör beslemesinde meydana gelebilecek gerilim dalgalanmaları (ripple), sistem gürültüsüne ve dolayısıyla FWHM değerine katkıda bulunacaktır.

- ***FUAMP sisteminin enerji çözünürlüğü (FWHM-Full Width at Half Maximum), ORTEC sisteminden daha kötü olarak bulunmuştur.***

FWHM spektroskopik sistemlerde spektrum kalitesini, radyasyon ortamında çalışan sistemin toplam gürültüsünü ve enerji çözünürlüğünü temsil eden çok önemli bir parametredir. Bu değer ne kadar küçükse, elde edilen spektrumun hassasiyeti ve doğruluğu da o kadar yüksektir. Her iki spektroskopi sistemi için radyasyon ortamında gerçekleştirilen enerji kalibrasyonu spektrumları, gauss dağılımına göre fit edilerek bu parametre hesaplatılmıştır. Buna göre 4 farklı enerjide hesaplanan FWHM değerinin FUAMP sistemi için daha yüksek olduğu görülmüştür. Sadece <sup>241</sup>Am radyoizotopuna ait 5,486 MeV enerjideki FWHM değerleri her iki sistem için birbirine yakın olarak bulunmuştur. Bu enerjide FUAMP sisteminin FWHM değeri daha düşüktür. Genel olarak

ORTEC sisteminin daha iyi FWHM değerine sahip olmasının sebeplerini şöyle sıralamak mümkündür;

- ORTEC sistemi daha düşük elektronik gürültüye sahiptir. Dolayısıyla daha iyi sinyal/gürültü oranına sahiptir. Bu nedenle sinyal piklerinin tepe noktasındaki dalgalanmalar daha düşük olacağından, spektrum pikinin sağ ve sol tarafı daha dar olacaktır. Böylece FWHM değeri daha düşük olacaktır.
- ORTEC sisteminde sıfır kutup düzeltmesi (pole zero cancellation) ve temel seviye düzeltici (baseline restorer) otomatik olarak yapılmaktadır. Bu etkilerden kaynaklanabilecek eksik ya da fazla enerji değeri ölçümlerinin bu şekilde önüne geçilmektedir. Böylece spektrum pikinin her iki tarafındaki yatay dalgalanmalar azalacağından FWHM azalacaktır.
- ORTEC sisteminin detektör besleme birimi, FUAMP sistemi için kullanılan DC güç kaynağına oranla +50 V'luk gerilimi daha kararlı bir şekilde sağlayabilmektedir. Bu durum FWHM değerinin FUAMP sistemi için daha yüksek ölçülmesine sebep olmaktadır.
- FUAMP sisteminin sayım verimi, ORTEC sisteminin kullanılan mevcut ayarları ile elde edilen verim değerinden daha büyük olarak bulunmuştur.

Her iki sistemin vakum performansı test edilirken sayım verimleri referans alınarak karşılaştırma yapılmıştır. ORTEC sisteminin mevcut kullanılan ayarları ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında FUAMP sisteminin genel olarak daha iyi bir verim değerine sahip olduğu görülmüştür. Sistemler tamamen aynı koşullarda test edildiğinden, bu durum donanım kaynaklı olarak her iki sistemin analog sinyalleri işleme özellikleri ile ilgilidir. ORTEC sistemi bunu kullanıcıya ayarlama olanağını sağlamıştır.

- ***Nemrut Krater Gölü yüzey suyu örneklerinin ağır metal analizleri sonucunda yüksek oranlarda As ve sınır değerlerde Fe içeriği tespit edilmiştir.***

Toplam 33 noktadan alınan su örneklerinin ICP-MS cihazında yapılan ağır metal tayininde Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As ve Se içerikleri belirlenmiştir. Zehirli olan ve insan sağlığı için limit değeri 10 ppb olarak belirlenmiş olan As içeriği, bütün örneklerde bu sınır değerin 6-8 katı arasında bulunmuştur. Ayrıca Fe içeriği bakımından sınır değer 300 ppb olarak belirlenmiştir. Su örneklerinin %63,6'sı bu limit değeri geçmiştir. Bu limiti

geçmeyen değerler ise yine limit değer civarındadır. Bu nedenlerden dolayı krater gölünden su içilmesi, ağır metal içeriği bakımından insan sağlığına zararlıdır.

- ***Nemrut Krater Gölü yüzey suyu örneklerinin Toplam  $\alpha/\beta$  tayini yapılmıştır. Toplam  $\alpha/\beta$  için sırasıyla 0,1 Bq/l ve 1 Bq/l olarak belirlenen sınır değerler sadece toplam  $\alpha$  için 3 noktada geçilmiştir.***

Düşük seviye  $\alpha/\beta$  sayıcı sistem kullanılarak gerçekleştirilen Nemrut Krater Gölü yüzey suyunda toplam  $\alpha/\beta$  analizleri sonucunda genel ortalama aktivite değerlerinin, Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından belirlenen limit değerlerin altında kaldığı görülmüştür. Sadece toplam  $\alpha$  sonuçlarında 3 örnekleme noktasında (13, 27, 33) limit değer olan 0,1 Bq/l değeri aşılmıştır. En yüksek değer 27 nolu örnekleme noktasında 0,128 Bq/l olarak ölçülmüştür. Bunun haricinde krater gölü yüzey suyunun, radyoaktivite bakımından risk teşkil etmediğini söylemek mümkündür. Türkiye’deki bazı göllerde yapılmış benzer çalışmalarla kıyaslandığında, bu gölün hem  $\alpha$  hem de  $\beta$  radyasyonları açısından ortalama bir değer olduğunu söylemek mümkündür (Tablo 4.1).

**Tablo 4.1.** Türkiye’de göl sularında radyoaktivite tayini ile ilgili bazı çalışmalar.

| Göl           | Toplam- $\alpha$ (mBqL <sup>-1</sup> ) | Toplam- $\beta$ (mBqL <sup>-1</sup> ) | Referans            |
|---------------|----------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|
| Hazar         | 1190                                   | 80                                    | (Özmen, 2004)       |
| Keban Barajı  | 60,5                                   | 55                                    | (Kulahci, 2006)     |
| Karagöl       | 30                                     | 2620                                  | (Akyıl, 2009)       |
| Gölcük        | 750                                    | 2350                                  | (Akyıl, 2009)       |
| Çakalboğaz    | 30                                     | 1770                                  | (Akyıl, 2009)       |
| Seyhan        | 12                                     | 42,6                                  | (Değerliler, 2010)  |
| Van           | 9                                      | 912                                   | (Zorer, 2011)       |
| Bolu          | 71,28                                  | 127,64                                | (Görür F. K., 2011) |
| Nemrut Krater | 77,69                                  | 115,36                                | Bu çalışma          |

- ***FUAMP ve ORTEC sistemlerinin karşılıklı sayımları sonucunda ORTEC sisteminin, FUAMP sistemine göre daha az gürültü aldığı görülmüştür.***

Şekil 3.12’de verilen spektrumlara bakıldığında, ORTEC sisteminde elektronik ve mekanik etkiler sonucu meydana gelen gürültü sinyallerinin FUAMP sistemine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Karşılıklı sayımlar, sürekli vakumlanan bir ortamda Nemrut Krater Gölü yüzey suyu örneklerinden en yüksek toplam alfa değerine sahip olan N-27 numaralı örnek ile yapılmıştır. Vakum pompası sürekli olarak çalışırken ortaya çıkan titreşim, vakum hortumu kanalıyla vakum odasına aktarılmaktadır. FUAMP sisteminde bu titreşim yüksek gürültü değerleri ölçülmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle gürültünün sebep olduğu bölge, belirli bir kanaldan sonrasının dikkate alınmasıyla bertaraf edilmiştir. Bu kesim kanalı ORTEC sisteminde 41 nolu, FUAMP sisteminde 70 nolu kanallara karşılık gelmektedir. Elde edilen aktivite sonuçlarının hata oranları düşük olmakla birlikte, FUAMP sisteminin titreşimlerden etkilenmesinin önüne geçilmesi durumunda daha düşük bir hata oranı elde edileceğini söylemek mümkündür.

## 5. ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen ve  $^{222}\text{Rn}$  gazı algılamaya yönelik spektroskopi yükselteç sisteminin performansları test edilmiştir. Bütün bu testler ticari olarak satılan standart bir alfa spektroskopi sistemi için de gerçekleştirilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Geliştirilen FUAMP sisteminin yapılan testler sonucunda tespit edilen bazı eksiklerinin, bu bölümde sunulan öneriler ile giderilerek iyileştirilebileceği öngörülmektedir.

- FUAMP yükselteç devresine 1 pF sığalı bir kondansatör ve 50  $\Omega$  değerinde bir dirençten oluşan bir TEST devresi eklenmeli, ve bu TEST devresi için bir çıkış pini eklenmelidir.
- FUAMP devresinde kazanç ayarının yapılabilmesi için ya ORTEC ana yükselteç modülü üzerindeki gibi çok turlu bir potansiyometre eklemek, ya da devrede yükseltme miktarını belirleyen direnç yerine 8 bitlik dijital potansiyometre eklemek gerekmektedir. Her iki durumda FUAMP çıkışına bir pin daha eklemek gerekecektir.
- FUAMP devresinde temel seviye düzeltici (baseline restorer) devresi aktif olarak çalışacak şekilde düzenlenmelidir.
- FUAMP devresinin koruma şasesi daha profesyonel hale getirilerek elektromanyetik ve mekanik etkilerin oluşturduğu gürültü sinyallerinin önüne geçilmelidir.
- FUAMP sisteminin spektroskopik özellikleri bu çalışmada ortaya konularak  $^{222}\text{Rn}$  gazı algılamaya uygun olduğu tespit edilmiştir. Ancak spektroskopi sisteminin vakum ortamı  $^{222}\text{Rn}$  gazı ölçmeye uygun değildir. Bu nedenle kullanılacak detektöre de uygun vakumlanabilecek sayım odacığı eklenmelidir.

## KAYNAKLAR

- Akyıl, S., Aytaş, S., Türközü, D., Aslani, M., (Doyurum) Yusan, S., Eral, M. (2009). Radioactivity levels in surface water of lakes around Izmir/Turkey. *Radiat. Meas.*, 44; 390–395.
- Arnaboldi, C., Pessina, G. (2003). A Very Simple Baseline Restorer For Nuclear Applications. *Nuclear Instruments and Methods In Physics Research A*, 512, 129-135.
- Bayburt, S., Bayburt, M., Akdurak, S. (2005). Eurocrate Sistemler İçin Bilgisayar Kontrollü SCA Modülü Geliştirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, Cilt 7, Sayı 3, 70-71.
- Bor, D. (2001). *Radyasyon Deteksiyon ve Ölçüm Yöntemleri*. Ankara: Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği.
- Canbazoglu, C. (2004). Elazığ Yöresinde Doğal Radyoaktivite Tayini. *Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Cromaz, M., Riot, V., Fallon, P., et. al. (2008). A Digital Signal Processing Module For Gamma-Ray Tracking Detectors. *Nuclear Instruments And Methods In Physics Research A*, 597, 233-237.
- Değerlier, M. (2007). Adana İli ve Çevresinin Çevresel Doğal Radyoaktivitesinin Saptanması ve Doğal Radyasyonların Yıllık Etkin Doz Eşdeğerinin Bulunması. *Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Değerlier, M., Karahan, G. (2010). Natural radioactivity in various surface waters in Adana, Turkey. *Desalination*, 261; 126–130.
- Delagnes, E., Breton, D., Lugiez, F., Rahmanifard, R. (2007). A Low Power Multi-Channel Single Ramp ADC With Up To 3,2 GHz Virtual Clock. *Nuclear Instruments and Methods In Physics Research A*, 54, 1735-1742.
- Demir, B., Okutan, M. (2014). Radyoaktif sigara: Tütün + Polonyum-210 + Kurşun-210. *Türk Onkoloji Dergisi*, 29(1):27-31.
- DipTrace. (2015, 05 11). <http://diptrace.com/tr/> adresinden alındı

- Durrani, S. A., Bull, R.** (1987). Solid State Nuclear Track Detection: Principles, Method and Applications. *Pergamon Pres, Oxford*.
- Durrani, S., İliç, R.** (1997). Radon Measurements by Etched Track Dedectors: Applications in Radiation Protection. *Earth Sciences and the Environment, World Scientific, New Jersey, U.S.A.*, 387.
- EPA.** (1996). *National Radon Proficiency Program Handbook*. Washington: Environmental Protection Agency.
- EPA.** (2012). *2012 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories*. Washington DC: Unites States Environmental Protection Agency.
- Evans, R. D.** (1968). Engineers' Guide to The Elementary Behavior of Radon Daughters. *Health Physics*, Vol. 38, pp. 1173-1197.
- Fişne, A., Ökten, G., Çelebi, N.** (2004). Investigation into the Radon Gas Emanation in TTK Underground Mines in Turkey. *Proceeding of the 14th Turkey Coal Congress*, (s. 190-202). Zonguldak.
- Gilmore, G.** (2008). *Practical Gamma-ray Spectrometry*. Wiley.
- Görür, F. K.** (2011). Annual effective dose and concentration levels gross alpha and gross beta in various waters from Samsun, Turkey. . *Desalination*, 279; 135–139.
- Görür, F., Keser, R., Dizman, S., Okumuşoğlu, N.** (2011). Annual effective dose and concentration levels gross alpha and gross beta in various waters from Samsun, Turkey. *Desalination*, 279; 135–139.
- Görür, Ş.** (2006). Çevresel Radyoaktivite ile Bu Çevrede Yaşayanlara Ait Diş Örneklerindeki Radyoaktivite Arasındaki İlişkinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Grybos, P.** (2006). Pole-Zero Cancellation Circuit For Change Sensitive Amplifier With Pile-Up Pulses Tracking System. *Transactions on Nuclear Science* (s. N 13-4; 226.). IEEE.
- Hastings, A., Marcia, L.** (1991). Gamma-Ray Detectors. D. E. Reilly içinde, *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials* (s. 43-64). Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- IAEA.** (1989). *Nuclear Electronics Laboratory Manual*. Vienna: International Atomic Energy Agency.

- Karabıdak, S. M., Çevik, U., Kaya, S.** (2009). A New Method To Compansate For Counting Losses Due To System Dead Time. *Nuclear Instruments and Methods In Physics Research A*, 603, 363.
- Krane, K.** (1988). *Inductory Nuclear Physics*. New York: John Wiley & Sons.
- Kulahci, F., Dogru, M.** (2006). Physical and chemical investigation of water and sediment of the Keban Dam Lake, Elazig, Turkey: Part 2: distribution of radioactivity, heavy metals and major elements. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 268;529-537.
- Kuluöztürk, M.** (2009). Mikroişlemci Destekli Radyasyon Sayım Sistemi Geliştirilmesi. *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 1-23.
- Kumbur, H., Zeren, O.** (1997). An Investigation on Radon Levels at Houses in İçel (Mersin). *ÇEV-KOR*, 7-25 , 25-31.
- Leo, W.** (1994). *Techniques for nuclear and particle physics experiments*. Berlin: Springer.
- ORTEC.** (2015, 05 11). AMETEK: <http://www.ortec-online.com/> adresinden alındı
- ORTEC.** (2015, 05 11). *Datasheets*. Preamplifier, Amplifier: <http://www.ortec-online.com/Products-Solutions/index.aspx> adresinden alındı
- Özdemir, F.** (2006). Afyon ve Çevresindeki Kuyu Sularında Rn-222 Aktivitesi Tayini. *Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Özgen, S.** (1992). *Radyasyon Sayıcı Geliştirilmesi ve Çeşitli Ortamlarda Radyasyon Ölçümü*. Elazığ: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Özmen, H. K.** (2004). Concentrations of heavy metal and radioactivity in surface water and sediment of Hazar Lake (Elazığ, Turkey). *Chemosphere* , 55; 401–408.
- Pennicard, D.** (2009). Design, Simulation, Production And Initial Characterisation Of 3D Silicon Detectors. *Nuclear Instruments and Methods In Physics Research A*, 598, 67-70.
- Perez-Andujara, A., Pibidab, L.** (2004). Performance of CdTe, HPGe and NaI(Tl) detectors for radioactivity measurements. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 60 p. 41–47.
- Raad, M., Cheded, L.** (2006). Novel Peak Detection Algorithms for Pileup Minimization in Gamma Ray Spectroscopy. *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, (s. 2240-2243). Sorrento, Italy.
- Schroeder, D. J.** (1999). *Astronomical optics (2nd edition)*. California, USA: Academic Press.

- Texas.Instruments** (2015, 05 11). <http://www.ti.com/product/tle2022> adresinden alındı
- Tsoufanidis, N.** (1995). *Measurement and Detection of Radiation*. Washington: Taylor & Francis.
- TÜRDEP.** Türkiye'nin Deprem Riski Yüksek Jeo-Stratejik - Ancak Tektonik Rejimleri Farklı - Bölgelerinde Deprem Davranışının Çok Disiplinli Yaklaşımlarla Araştırılması. *DPT 5057001 nolu proje*.
- WHO.** (2011). *Guidelines for Drinking Water Quality Fourth Edition*. Genava: World Health Organisation.
- Yazgan, E.** (1988). Nükleer Elektroniğe Genel Bir Bakış. *Elektrik Mühendisliği (UDK:839.1:621.88)*, 165-166.
- Yu, K., Yip, C., Nikezic, D., Ho, J., Koo, V.** (2003). Comparison among alpha-particle energy losses in air obtained from data of SRIM, ICRU and experiments. *Applied Radiation and Isotopes*, 59; 363–366.
- Zorer, Ö. Ş.** (2011). The concentration of <sup>238</sup>U and the levels of gross radioactivity in surface waters of the Van Lake (Turkey). . *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 288; 417-421.

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Muhammed Fatih KULUÖZTÜRK  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : 21.09.1979 - ELAZIĞ  
**Adres** : Bitlis Eren Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi  
Fizik Bölümü BİTLİS  
**Telefon** : 0539 240 34 94  
**E-mail** : fatih.fizik@gmail.com  
**Medeni Hali** : Evli  
**Yabancı Dili** : İngilizce



### EĞİTİM DURUMU (KURUM VE YIL)

**Lisans** : Fırat Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü (2003-2007)  
**Yüksek Lisans** : Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nükleer Fizik Bilim Dalı (2007-2009)  
**Tez başlığı** : "Mikroişlemci Destekli Radyasyon Sayım Sistemi Geliştirilmesi"