

**T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**ANTALYA İLİ BOĞAÇAY SEDİMENT ÖRNEKLERİNDE DOĞAL VE YAPAY  
RADYONÜKLEOTİTLERİN AKTİVİTE KONSANTRASYONUNUN  
BELİRLENMESİ VE ELEMENTEL ANALİZİ**

**Reyhan ÖZAYDIN ÖZKARA**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**ARALIK 2023**

**ANTALYA**

**T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**ANTALYA İLİ BOĞAÇAY SEDİMENT ÖRNEKLERİNDE DOĞAL VE  
YAPAY RADYONÜKLEOTİTLERİN AKTİVİTE KONSANTRASYONUNUN  
BELİRLENMESİ VE ELEMENTEL ANALİZİ**

**Reyhan ÖZAYDIN ÖZKARA**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**ARALIK 2023**

**ANTALYA**

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ANTALYA İLİ BOĞAÇAY SEDİMENT ÖRNEKLERİNDE DOĞAL VE YAPAY  
RADYONÜKLEOTİTLERİN AKTİVİTE KONSANTRASYONUNUN  
BELİRLENMESİ VE ELEMENTEL ANALİZİ

Reyhan ÖZAYDIN ÖZKARA  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI  
DOKTORA TEZİ

Bu tez 22/12/2023 tarihinde jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

|                           |        |
|---------------------------|--------|
| Prof. Dr. İsmail BOZTOSUN | [imza] |
| Prof. Dr. Orhan BAYRAK    | [imza] |
| Prof. Dr. Mehmet ERDOĞAN  | [imza] |
| Prof. Dr. Kaan MANİSA     | [imza] |
| Doç. Dr. Gökhan KOÇAK     | [imza] |

## ÖZET

### ANTALYA İLİ BOĞAÇAY SEDİMENT ÖRNEKLERİNDE DOĞAL VE YAPAY RADYONÜKLEOTİTLERİN AKTİVİTE KONSANTRASYONUNUN BELİRLENMESİ VE ELEMENTEL ANALİZİ

**Reyhan ÖZAYDIN ÖZKARA**

**Doktora Tezi, Fizik Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. İsmail BOZTOSUN**

**İkinci Danışman: Doç. Dr. Canel EKE**

**Aralık 2023; 107 sayfa**

Boğaçay, 25 kilometre uzunluğunda ve 830 kilometrekarelik bir alandan su toplayarak Antalya'da su temini ve tarım sulamasında önemli rol oynayan bir nehirdir. Boğaçay, suyunu dünyaca ünlü Konyaaltı plajına ulaştırır ve debisi yıl içinde değişir; özellikle yağışlı dönemlerde taşkın riski bulunmaktadır. Tez çalışması kapsamında, Antalya Boğaçay'dan Temmuz ve Mart aylarında toplanan toplam 40 sediment örneği üzerinde, yüksek saflıkta germanyum (HPGe) gama spektrometre sistemi kullanılarak elde edilen veriler detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Temmuz ayında toplanan örneklerde, doğal  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  ile yapay  $^{137}\text{Cs}$  radyonükleotitlerinin aktivite konsantrasyonlarının ortalamaları sırasıyla 12,92 (5,62 - 22,40) Bq/kg, 14,78 (7,98 - 25,29) Bq/kg, 194,52 (91,81 - 392,82) Bq/kg ve 3,76 (3,16 - 4,99) Bq/kg olarak belirlenmiştir. Mart ayında toplanan örneklerde ise, aynı sırayla 9,45 (4,25 - 18,36) Bq/kg, 8,06 (3,34 - 14,07) Bq/kg, 104,54 (53,57 - 173,16) Bq/kg ve 1,72 (0,00 - 3,42) Bq/kg olarak tespit edilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  için UNSCEAR (2000) raporunda belirtilen ortalama değerlere ( $^{226}\text{Ra}$  için 32 Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  için 45 Bq/kg ve  $^{40}\text{K}$  için 420 Bq/kg) kıyasla daha düşük seviyelerde olduğunu göstermektedir.

Radyolojik tehlike parametreleri incelendiğinde, Temmuz ayında soğurulan gama doz hızı (D) 23,01 nGy/h, radyum eşdeğer aktivitesi ( $R_{\text{eq}}$ ) 49,04 Bq/kg, yıllık gonadal doz eşdeğeri (AGDE) 162,79  $\mu\text{Sv/y}$ , maruziyet oranı (ER) 101,05  $\mu\text{R/h}$ , yıllık etkin doz eşdeğeri toplamı ( $\text{AEDE}_{\text{toplam}}$ ) 0,85 mSv/y ve toplam yaşam boyu kanser riski ( $\text{ELCR}_{\text{toplam}}$ ) 2,96 olarak hesaplanmıştır. Mart ayında ise bu değerler sırasıyla D: 13,60 nGy/h,  $R_{\text{eq}}$ : 29,03 Bq/kg, AGDE: 95,74  $\mu\text{Sv/y}$ , ER: 59,41  $\mu\text{R/h}$ ,  $\text{AEDE}_{\text{toplam}}$ : 0,50 mSv/y ve  $\text{ELCR}_{\text{toplam}}$ : 1,75'tir. Elde edilen bu sonuçlar, bölgedeki radyoaktivite konsantrasyonlarının ve radyolojik tehlike parametrelerinin genel olarak dünya ortalama değerlerinin altında olduğunu göstermektedir. Ancak, yaşam boyu kanser riski ve yıllık etkin doz eşdeğeri toplamı gibi parametrelerde, bölgedeki sedimentlerin dünya ortalamasının üzerinde olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, bölgedeki radyasyon etkilerinin detaylı bir şekilde değerlendirilmesi için önemli bir kaynak sağlamaktadır.

Ayrıca, Boğaçay'ın sediment yapısı XRF yöntemi ile incelenmiş ve ana oksitlerin  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  olduğu belirlenmiştir. Ana oksitlere ek olarak;  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{CoO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{As}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Rb}_2\text{O}$ ,  $\text{SrO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{PbO}$  oksitleri de tespit edilmiştir. Çalışma

kapsamında belirlenen iz elementlerin (Cl, Ga, Se, Br, Y, Mo, Ag, Te, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Hf, Hg, Tl, Th) konsantrasyonları da değerlendirilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Doğal radyoaktivite, Gama doz oranı, Gama spektrometrisi, Sediment, Toplam yaşam boyu kanser riski, XRF

**JÜRİ:** Prof. Dr. İsmail BOZTOSUN

Prof. Dr. Orhan BAYRAK

Prof. Dr. Mehmet ERDOĞAN

Prof. Dr. Kaan MANİSA

Doç. Dr. Gökhan KOÇAK



## ABSTRACT

### DETERMINATION OF ACTIVITY CONCENTRATION OF NATURAL AND ARTIFICIAL RADIONUCLIDES AND ELEMENTAL ANALYSIS IN BOĞAÇAY SEDIMENT SAMPLES OF ANTALYA PROVINCE

Reyhan ÖZAYDIN ÖZKARA

PhD Thesis in Physics

Supervisor: Prof. Dr. İsmail BOZTOSUN

Second Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Canel EKE

December 2023, 107 pages

Boğaçay is a river that is 25 kilometers long and collects water from an area of 830 square kilometers, playing an important role in water supply and agricultural irrigation in Antalya. Boğaçay carries its water to the world-famous Konyaaltı beach and its flow rate changes throughout the year; There is a risk of floods, especially during rainy periods. In the thesis study, the data obtained using a high-purity germanium (HPGe) gamma spectrometer system on a total of 40 sediment samples collected from Antalya Boğaçay in July and March were analyzed in detail. In the samples collected in July, the average activity concentrations of natural radionuclides  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  and artificial  $^{137}\text{Cs}$  radionuclides were determined; 12.92 (5.62 - 22.40) Bq/kg, 14.78 (7.98 - 25.29) Bq/kg, 194.52 (91.81 - 392.82) Bq/kg and 3.76 (3.16 - 4.99) Bq/kg, respectively. In the samples collected in March, in the same order, 9.45 (4.25 - 18.36) Bq/kg, 8.06 (3.34 - 14.07) Bq/kg, 104.54 (53.57 - 173, 16) Bq/kg and 1.72 (0.00 - 3.42) Bq/kg. The measurement results obtained show that  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$  are at lower levels compared to the average values stated in the UNSCEAR (2000) report (32 Bq/kg for  $^{226}\text{Ra}$ , 45 Bq/kg for  $^{232}\text{Th}$  and 420 Bq/kg for  $^{40}\text{K}$ ).

When radiological hazard parameters are examined, absorbed gamma dose rate (D) is 23.01 nGy/h, radium equivalent activity ( $\text{Ra}_{\text{eq}}$ ) is 49.04 Bq/kg, annual gonadal dose equivalent (AGDE) is 162.79  $\mu\text{Sv/y}$ , exposure rate (ER) was calculated as 101.05  $\mu\text{R/h}$ , annual effective dose equivalent total ( $\text{AEDE}_{\text{total}}$ ) as 0.85 mSv/y, and total lifetime cancer risk ( $\text{ELCR}_{\text{total}}$ ) as 2.96 in July. In March, these values are respectively: D: 13.60 nGy/h,  $\text{Ra}_{\text{eq}}$ : 29.03 Bq/kg, AGDE: 95.74  $\mu\text{Sv/y}$ , ER: 59.41  $\mu\text{R/h}$ ,  $\text{AEDE}_{\text{total}}$ : 0.50 mSv/y. and  $\text{ELCR}_{\text{total}}$ : 1.75. These results show that radioactivity concentrations and radiological hazard parameters in the region are generally below the world average values. However, it has been determined that the sediments in the region are above the world average in parameters such as lifetime cancer risk and annual effective dose equivalent total. These findings provide an important resource for detailed evaluation of radiation effects in the region.

Additionally, the sediment structure of Boğaçay was examined by the XRF method and the main oxides were determined to be  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . In addition to the main oxides  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{CoO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{As}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Rb}_2\text{O}$ ,  $\text{SrO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{PbO}$  oxides

were also detected. Concentrations of trace elements (Cl, Ga, Se, Br, Y, Mo, Ag, Te, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Hf, Hg, Tl, Th) determined within the scope of the study were also evaluated.

**KEYWORDS:** Natural radioactivity, Gamma dose rate, Gamma spectrometry, Sediment, total lifetime cancer risk, XRF

**COMMITTEE:** Prof.Dr. İsmail BOZTOSUN

Prof. Dr. Orhan BAYRAK

Prof. Dr. Mehmet ERDOĞAN

Prof. Dr. Kaan MANİSA

Assoc. Prof. Dr. Gökhan KOÇAK

## ÖNSÖZ

Doktora eğitim sürecimde bana her zaman tecrübesiyle yön veren, tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail BOZTOSUN'a,

Tez çalışmam boyunca bana destek olan ve yol gösteren, tezimin toparlanması ve bitirilmesinde yönlendirmeleri ile önemli katkılar sağlayan, bilgi ve tecrübelerini her fırsatta aktaran ikinci danışman hocam Sayın Doç. Dr. Canel EKE'ye

Tez çalışmamda yardımlarını benden esirgemeyen Tez İzleme Kurulu Üyeleri Sayın Prof. Dr. Orhan BAYRAK'a ve Sayın Prof. Dr. Mehmet ERDOĞAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan varlıklarından güç aldığım; değerli eşim Ahmet ÖZKARA'ya, biricik oğlum Yiğithan ÖZKARA'ya, babam Cahit ÖZAYDIN'a, annem Dudu ÖZAYDIN'a sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.



## İÇİNDEKİLER

|                                               |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| ÖZET.....                                     | i     |
| ABSTRACT.....                                 | iii   |
| ÖNSÖZ .....                                   | v     |
| AKADEMİK BEYAN .....                          | ix    |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                  | x     |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                          | xvi   |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                       | xviii |
| 1. GİRİŞ .....                                | 1     |
| 1.1. Radyasyon ve Radyoaktivite .....         | 2     |
| 1.2. Radyasyon Türleri .....                  | 3     |
| 1.2.1. Alfa bozunumu .....                    | 5     |
| 1.2.2. Beta bozunumu .....                    | 7     |
| 1.2.3. Gama bozunumu .....                    | 8     |
| 1.3. Gama Işınlının Madde ile Etkileşimi..... | 9     |
| 1.3.1. Fotoelektrik etki .....                | 10    |
| 1.3.2. Compton saçılması.....                 | 11    |
| 1.3.3. Çift oluşumu .....                     | 13    |
| 1.4. Radyoaktif Bozunma Kanunu .....          | 13    |
| 1.5. Yarı Ömür.....                           | 14    |
| 1.6. Ortalama Ömür.....                       | 15    |
| 1.7. Peş Peşe Bozunumlar .....                | 16    |
| 1.8. Radyoaktif Bozunum Denge Durumları.....  | 18    |
| 1.8.1. Geçici denge .....                     | 18    |
| 1.8.2. Kalıcı denge .....                     | 18    |
| 1.9. Radyoaktif Seriler.....                  | 18    |
| 1.9.1. Toryum serisi .....                    | 19    |
| 1.9.2. Neptinyum serisi .....                 | 19    |
| 1.9.3. Uranyum serisi.....                    | 20    |
| 1.9.4. Aktinyum serisi.....                   | 20    |
| 1.10. Radyasyon Birimleri.....                | 21    |
| 1.11. Radyasyonun Biyolojik Etkileri .....    | 22    |

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.12. Radyasyon Ölçüm Metotları .....                                                             | 23 |
| 1.12.1. Gaz dolu dedektörler.....                                                                 | 24 |
| 1.12.2. Sintilasyon dedektörleri .....                                                            | 26 |
| 1.12.3. Yarı iletken dedektörler .....                                                            | 28 |
| 1.12.3.1. HPGe dedektörleri.....                                                                  | 29 |
| 1.13. Radyasyon Ölçüm Cihazlarının Genel Özellikleri.....                                         | 32 |
| 1.13.1. Dedektör verimi .....                                                                     | 32 |
| 1.13.2. Dedektör ölü zamanı.....                                                                  | 34 |
| 1.13.3. Dedektör enerji rezolüsyonu.....                                                          | 34 |
| 1.14. Radyasyon Kaynakları.....                                                                   | 35 |
| 1.14.1. Doğal radyasyon kaynakları .....                                                          | 35 |
| 1.14.2. Yapay radyasyon kaynakları.....                                                           | 36 |
| 1.15. X-Işını Floresans (XRF) Spektrometresi Tekniği .....                                        | 37 |
| 1.15.1. Dalga boyu ayırmalı Dalga boyu ayırmalı X-Işını Floresans Spektrometresi (WD-XRF).....    | 37 |
| 1.15.2. X-Işını Floresans (XRF) Spektrometresi Tekniği kullanım alanları ve kimyasal analiz ..... | 38 |
| 1.16. Ağır Metaller ve Makro, Mikro, İz, Ultra-İz Elementler .....                                | 39 |
| 2. KAYNAK TARAMASI .....                                                                          | 41 |
| 3. MATERYAL VE METOT .....                                                                        | 49 |
| 3.1. Çalışma Bölgesinin Tanıtılması .....                                                         | 49 |
| 3.2. Numune Toplanması ve Sayım İçin Hazırlanması.....                                            | 50 |
| 3.3. Sediment Örneklerinin Gama Spektrometresinde Analizi ve Kullanılan Yöntemler.....            | 56 |
| 3.4. Sediment Örneklerinin Doğal ve Yapay Radyonükleotit Analizinde Kullanılan Sayım Sistemi..... | 56 |
| 3.5. Aktivite Konsantrasyonlarının Hesaplanması .....                                             | 59 |
| 3.6. Minimum Dedekte Edilebilen Aktivite (MDA) .....                                              | 59 |
| 3.7. Radyolojik Tehlike Değerlendirme Parametreleri .....                                         | 59 |
| 3.8. Sediment Örneklerinin XRF Elementel Analizinde Kullanılan Sayım Sistemi...                   | 61 |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....                                                                     | 63 |
| 4.1. Sediment Örneklerinin Doğal ve Yapay Radyoaktivite Konsantrasyonları.....                    | 63 |

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2. Sediment Örneklerinin Aktivite Konsantrasyonlarının İstatistiksel Analizi ..... | 69 |
| 4.3. Sediment Örnekleri İçin Radyasyon Tehlike Değerleri .....                       | 72 |
| 4.4. Sediment Örneklerinin WD-XRF Yöntemi ile Elementel Analizi.....                 | 80 |
| 4.5. WD-XRF Yöntemi ile Elde Edilen Verilerin İstatistiksel Analizi .....            | 93 |
| 5. SONUÇLAR .....                                                                    | 96 |
| 6. KAYNAKLAR .....                                                                   | 98 |
| ÖZGEÇMİŞ                                                                             |    |



## AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Antalya İli Boğaçay Sediment Örneklerinde Doğal ve Yapay Radyonükleotitlerin Aktivite Konsantrasyonunun Belirlenmesi ve Elementel Analizi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerkere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

22/12/2023

Reyhan ÖZAYDIN ÖZKARA

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|                         |                       |
|-------------------------|-----------------------|
| $\bar{\nu}_e$           | : Antinötrino         |
| $\mu$                   | : Medyan değeri       |
| $\mu\text{g}$           | : Mikrogram           |
| $\text{\AA}$            | : Angstrom            |
| Ac                      | : Aktinyum            |
| Ag                      | : Gümüş               |
| Al                      | : Alüminyum           |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | : Alüminyum Trioksit  |
| As                      | : Arsenik             |
| $\text{As}_2\text{O}_3$ | : Arsenik Trioksittir |
| B                       | : Bor                 |
| Ba                      | : Baryum              |
| Bi                      | : Bizmut              |
| Bq                      | : Becquerel           |
| Br                      | : Brom                |
| C                       | : Karbon              |
| Ca                      | : Kalsiyum            |
| CaO                     | : Kalsiyum Oksit      |
| Cd                      | : Kadmiyum            |
| Ce                      | : Seryum              |
| Ci                      | : Curie               |
| Cl                      | : Klorür              |
| Co                      | : Kobalt              |

|                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| CoO                            | : Kobaltoksit                  |
| Cr                             | : Krom                         |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | : Kromyum (III) Oksit          |
| Cs                             | : Sezyum                       |
| Cu                             | : Bakır                        |
| CuO                            | : Bakır (II) Oksit             |
| D                              | : Düzeltme Faktörü             |
| e <sup>-</sup>                 | : Elektron                     |
| $\mathcal{E}$                  | : Elektron Yakalama            |
| E <sub>b</sub>                 | : Elektronun Bağlanma Enerjisi |
| E <sub>e</sub>                 | : Fotoelektron Enerjisi        |
| E <sub>γ</sub>                 | : Gelen Foton Enerjisi         |
| Fe                             | : Demir                        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | : Hematit, Demir (III) Oksit   |
| Ga                             | : Galyum                       |
| Ge                             | : Germanyum                    |
| gr                             | : Gram                         |
| Gy                             | : Gray                         |
| h                              | : Saat                         |
| Hf                             | : Hafniyum                     |
| Hg                             | : Civa                         |
| I                              | : İyot                         |
| IQR                            | : 75 ve 25'lik Percentil Farkı |
| K                              | : Potasyum                     |
| K <sub>2</sub> O               | : Potasyum Hidroksit           |
| keV                            | : Kilo Elektron Volt           |

|                                |                       |
|--------------------------------|-----------------------|
| kg                             | : Kilogram            |
| km                             | : Kilometre           |
| La                             | : Lantan              |
| Li                             | : Lityum              |
| MeV                            | : Mega Elektron Volt  |
| Mg                             | : Magnezyum           |
| MgO                            | : Magnezyum Oksit     |
| mm                             | : Milimetre           |
| Mn                             | : Mangan              |
| MnO                            | : Mangan Oksit        |
| Mo                             | : Molibden            |
| mSv                            | : Milisievert         |
| n                              | : Nötron              |
| Na                             | : Sodyum              |
| Na <sub>2</sub> O              | : Sodyum Oksit        |
| Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | : Niyobyum Pentaoksit |
| Nd                             | : Neodimyum           |
| nGy                            | : Nanogrey            |
| Ni                             | : Nikel               |
| NiO                            | : Azot monoksit       |
| nm                             | : Nanometre           |
| p                              | : Anlamlılık Düzeyi   |
| P                              | : Fosfor              |
| p <sup>+</sup>                 | : Proton              |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | : Fosfor Pentoksit    |
| Pb                             | : Kurşun              |

|                                |                                                |
|--------------------------------|------------------------------------------------|
| PbO                            | : Kurşun Monoksit                              |
| Po                             | : Polonyum                                     |
| ppm                            | : Milyonda bir                                 |
| Pr                             | : Praseodim                                    |
| R(E <sub>0</sub> )             | : Dedektör Enerji Çözünürlüğü                  |
| Ra                             | : Radyum                                       |
| Rb <sub>2</sub> O              | : Rubidyum Peroksit                            |
| Rn                             | : Radon                                        |
| S                              | : Kükürt                                       |
| s                              | : Saniye                                       |
| s.s.                           | : Standart Sapma (Ortalamanın Değişim Aralığı) |
| Sb                             | : Antimon                                      |
| Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | : Antimon Pentaoksit                           |
| Se                             | : Selenyum                                     |
| Si                             | : Silikon                                      |
| Si                             | : Silisyum                                     |
| SiO <sub>2</sub>               | : Silisyum Dioksit                             |
| SnO <sub>2</sub>               | : Kalay Dioksit                                |
| SO <sub>3</sub>                | : Kükürt Trioksit                              |
| SrO                            | : Stronsiyum Oksit                             |
| Sv                             | : Sievert                                      |
| Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | : Tantal Pentaoksit                            |
| Te                             | : Tellür                                       |
| Th                             | : Toryum                                       |
| Ti                             | : Titanyum                                     |
| TiO <sub>2</sub>               | : Titanyum Dioksit                             |



|                               |                                              |
|-------------------------------|----------------------------------------------|
| Tl                            | : Talyum                                     |
| U                             | : Uranyum                                    |
| V                             | : Vanadyum                                   |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | : Vanadyum pentoksit                         |
| WO <sub>3</sub>               | : Tungsten trioksit                          |
| X                             | : Ortalama (Aritmetik Ortalama) $X \pm s.s.$ |
| Y                             | : İtiryum                                    |
| Z                             | : Elementin Atom Numarası                    |
| Zn                            | : Çinko                                      |
| ZnO                           | : Çinko Oksit                                |
| ZrO <sub>2</sub>              | : Zirkonyum Dioksit                          |
| $\alpha$                      | : Alfa Işınları                              |
| $\beta^-$                     | : Beta Işınları                              |
| $\beta^+$                     | : Pozitron                                   |
| $\gamma$                      | : Gama Işınları                              |
| $\varepsilon$                 | : Verim                                      |
| $\lambda$                     | : Dalga Boyu                                 |
| $\mu Sv$                      | : Mikrosievert                               |
| $\nu$                         | : Frekans                                    |
| $\nu_e$                       | : Nötrino                                    |

### **Kısaltmalar**

|                        |                                                   |
|------------------------|---------------------------------------------------|
| ADC                    | : Analog Dijital Dönüştürücü                      |
| AEDE <sub>toplam</sub> | : Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri Toplamı               |
| AGDE                   | : Yıllık Gonodal Doz Eşdeğeri                     |
| D                      | : Soğurulan Gama Doz Hızı                         |
| ED-XRF                 | : Enerji Ayrımlı X-Işını Floresans Spektrometresi |

|                        |                                                                                                                                                |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ELRC <sub>toplam</sub> | : Yaşam Boyu Kanser Riski Toplamı                                                                                                              |
| ER                     | : Maruziyet Oranı                                                                                                                              |
| FEPE                   | : Toplam Enerji Pik Verimi                                                                                                                     |
| FWHM                   | : Yarı Değer Tam Genişlik (Full Width Half Maximum)                                                                                            |
| GRL                    | : Gama Temsilcisi Seviyesi                                                                                                                     |
| H <sub>ex</sub>        | : Dış Tehlike İndeksi                                                                                                                          |
| H <sub>in</sub>        | : İç Tehlike İndeksi                                                                                                                           |
| HPGe                   | : Gama Spektrometre Sistemi                                                                                                                    |
| IAEA                   | : Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (International Atomic Energy Agency)                                                                       |
| ICRP                   | : Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu (International Commission on Radiological Protection)                                            |
| MCA                    | : Çok Kanallı Analizör (Multi Channel Analyzer)                                                                                                |
| MDA                    | : Minimum Dedekte Edilebilen Aktivite (Minimum Detectable Activity)                                                                            |
| NEA-OECD               | : Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (Organisation for Economic Cooperation and Development)                                                |
| Ra <sub>eq</sub>       | : Radium Eşdeğer Aktivitesi (Radium Equivalent Activity)                                                                                       |
| UNSCEAR                | : Atomik radyasyon etkileri üzerinde Birleşmiş Milletler bilim kurulu (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) |
| WD-XRF                 | : Dalga Boyu Ayrılı X-Işını Floresans Spektrometresi                                                                                           |
| XRF                    | : X-Işını Floresans Spektrometresi                                                                                                             |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Çekirdek kararlılığının nötron/proton oranına bağlılığı.....                      | 3  |
| Şekil 1.2. Alfa parçacıklarının menzilinın enerjisine bağlı değişimi.....                    | 6  |
| Şekil 1.3. Foton enerjisinin soğurucu atom numarasına göre gama etkileşim türleri.....       | 10 |
| Şekil 1.4. Fotoelektrik soğurma .....                                                        | 11 |
| Şekil 1.5. Compton saçılması .....                                                           | 12 |
| Şekil 1.6. Radyoaktif çekirdek sayısının yarı ömürle değişimi .....                          | 15 |
| Şekil 1.7. Yarı ömürün bozunum sabiti üzerine etkisi.....                                    | 15 |
| Şekil 1.8. Radyasyonun (a) stokastik ve (b) deterministik etkileri arasındaki farklar ....   | 23 |
| Şekil 1.9. Radyasyon dedektör sisteminin temel bileşenlerinin şematik diyagramı.....         | 24 |
| Şekil 1.10. Gaz dolu dedektörlerde akım modu (a), puls modu (b) devre şematik gösterimi..... | 25 |
| Şekil 1.11. Dedektöre uygulanan voltaj ile toplanan yük arasındaki ilişki .....              | 25 |
| Şekil 1.12. Sintilasyon dedektöründe gerçekleşen süreçler .....                              | 27 |
| Şekil 1.13. Sintilasyon detektörünün şematik diyagramı .....                                 | 27 |
| Şekil 1.14. n ve p eklemi bant diyagramı .....                                               | 29 |
| Şekil 1.15. Gama ışını ölçümlerinde meydana gelen olaylar .....                              | 30 |
| Şekil 1.16. Farklı boyutlardaki dedektörlerden beklenen spektrumlar .....                    | 31 |
| Şekil 1.17. Radyasyonun dedektör tarafından tespit edilme durumu .....                       | 32 |
| Şekil 1.18. Gama ışını spektrometresinin enerji çözünürlüğü grafiği .....                    | 35 |
| Şekil 1.19. WD-XRF spektrometresi şematik gösterimi .....                                    | 38 |
| Şekil 3.1. Sediment örneklerinin toplandığı bölgenin fotoğrafları .....                      | 50 |
| Şekil 3.2. Temmuz ayı Boğaçay numune koordinatları haritası.....                             | 52 |
| Şekil 3.3. Mart ayı Boğaçay numune koordinatları haritası .....                              | 52 |
| Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan numune öğütücü.....                                          | 53 |
| Şekil 3.5. Sediment örnekleri için etüvde kurutma öncesi hazırlık fotoğrafları .....         | 53 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.6.</b> Sediment örneklerinin etüv ile kurutma işlemi fotoğrafı.....                                                                                                                                                                                                                                   | 54 |
| <b>Şekil 3.7.</b> Sediment kütle tartımlarında kullanılan hassas terazi .....                                                                                                                                                                                                                                    | 55 |
| <b>Şekil 3.8.</b> Temmuz ayı (a), Mart ayı (b) Radyoaktivite ölçümüne hazır sediment örnekleri .....                                                                                                                                                                                                             | 55 |
| <b>Şekil 3.9.</b> WD-XRF analizi için numune hazırlığı.....                                                                                                                                                                                                                                                      | 56 |
| <b>Şekil 3.10.</b> Gama Spektrometre sistemi şeması .....                                                                                                                                                                                                                                                        | 57 |
| <b>Şekil 4.1.</b> Temmuz ayı sediment örneklerinin $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ ve $^{137}\text{Cs}$ aktivite konsantrasyonları .....                                                                                                                                                 | 65 |
| <b>Şekil 4.2.</b> Mart ayı sediment örneklerinin $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ ve $^{137}\text{Cs}$ aktivite konsantrasyonları .....                                                                                                                                                   | 66 |
| <b>Şekil 4.3.</b> Temmuz ve Mart ayı $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ ve $^{137}\text{Cs}$ ortalama aktivite konsantrasyonlarının istatistiksel değişimi.....                                                                                                                                               | 71 |
| <b>Şekil 4.4.</b> Temmuz ve Mart ayı $^{40}\text{K}$ ortalama aktivite konsantrasyonu istatistiksel değişimi .....                                                                                                                                                                                               | 72 |
| <b>Şekil 4.5.</b> Temmuz ayı sediment örneklerindeki soğurulan gama doz hızı (D), Radium eşdeğer aktivitesi ( $\text{Ra}_{\text{eq}}$ ), Yıllık gonadal doz eşdeğeri (AGDE), Maruziyet oranı (ER) değerleri değişimi.....                                                                                        | 75 |
| <b>Şekil 4.6.</b> Mart ayı sediment örneklerindeki soğurulan gama doz hızı (D), Radium eşdeğer aktivitesi ( $\text{Ra}_{\text{eq}}$ ), Yıllık gonadal doz eşdeğeri (AGDE), Maruziyet oranı (ER) değerleri değişimi.....                                                                                          | 76 |
| <b>Şekil 4.7.</b> Temmuz ayı sediment örneklerindeki yıllık etkin doz eşdeğeri toplamı ( $\text{AEDE}_{\text{toplaml}}$ ), Yaşam boyu kanser riski toplamı ( $\text{ELRC}_{\text{toplaml}}$ ), Gama temsilcisi seviyesi (GRL), iç ve dış tehlike indeksleri ( $H_{\text{in}}$ ve $H_{\text{ex}}$ ) değişimi..... | 77 |
| <b>Şekil 4.8.</b> Mart ayı sediment örneklerindeki yıllık etkin doz eşdeğeri toplamı ( $\text{AEDE}_{\text{toplaml}}$ ), Yaşam boyu kanser riski toplamı ( $\text{ELRC}_{\text{toplaml}}$ ), Gama temsilcisi seviyesi (GRL), iç ve dış tehlike indeksleri ( $H_{\text{in}}$ ve $H_{\text{ex}}$ ) değişimi .....  | 78 |
| <b>Şekil 4.9.</b> Temmuz ve Mart ayı $\text{P}_2\text{O}_5$ ve $\text{SO}_3$ % konsantrasyon ortalamalarının istatistiksel değişimi .....                                                                                                                                                                        | 94 |
| <b>Şekil 4.10.</b> Temmuz ve Mart ayı $\text{NiO}$ % konsantrasyon ortalamalarının istatistiksel değişimi.....                                                                                                                                                                                                   | 95 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Çizelge 1.1.</b> Alfa parçacığı yayımlayan bazı izotoplar ve özellikleri .....                                                                                                         | 6  |
| <b>Çizelge 1.2.</b> Toryum, Neptinyum, Uranyum ve Aktinyum serilerine ait bazı özellikler .....                                                                                           | 19 |
| <b>Çizelge 1.3.</b> $^{232}\text{Th}$ (Toryum) serisi üyelerinin bazı özellikleri .....                                                                                                   | 19 |
| <b>Çizelge 1.4.</b> $^{237}\text{Np}$ (Neptinyum) serisi üyelerinin bazı özellikleri .....                                                                                                | 20 |
| <b>Çizelge 1.5.</b> $^{238}\text{U}$ (Uranyum) serisi üyelerinin bazı özellikleri .....                                                                                                   | 20 |
| <b>Çizelge 1.6.</b> $^{235}\text{U}$ (Aktinyum) serisi üyelerinin bazı özellikleri .....                                                                                                  | 21 |
| <b>Çizelge 3.1.</b> Temmuz ve Mart ayları Boğaçay numune koordinatları .....                                                                                                              | 51 |
| <b>Çizelge 3.2.</b> Temmuz ve Mart ayı Sediment Kütle tartım değerleri .....                                                                                                              | 54 |
| <b>Çizelge 3.3.</b> Enerji kalibrasyonunda kullanılan kaynaklarının özellikleri .....                                                                                                     | 58 |
| <b>Çizelge 4.1.</b> Temmuz ayı sediment örneklerinin $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ ve $^{137}\text{Cs}$ aktivite konsantrasyonları (Bq/kg) .....                | 63 |
| <b>Çizelge 4.2.</b> Mart ayı sediment örneklerinin $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ ve $^{137}\text{Cs}$ aktivite konsantrasyonları (Bq/kg) .....                  | 64 |
| <b>Çizelge 4.3.</b> Dünya çapındaki sediment örneklerinde $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ ve $^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg) aktivite konsantrasyonu ortalamaları ..... | 68 |
| <b>Çizelge 4.4.</b> Temmuz ayı $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ ve $^{137}\text{Cs}$ konsantrasyonlarının istatistiksel incelenmesi .....                          | 70 |
| <b>Çizelge 4.5.</b> Mart ayı $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ ve $^{137}\text{Cs}$ konsantrasyonlarının istatistiksel incelenmesi .....                            | 70 |
| <b>Çizelge 4.6.</b> Sediment örneklerinin temmuz ve Mart aylarındaki aktivite konsantrasyonlarının istatistiksel incelenmesi .....                                                        | 70 |
| <b>Çizelge 4.7.</b> Temmuz ayı sediment örnekleri radyolojik tehlike parametreleri .....                                                                                                  | 72 |
| <b>Çizelge 4.8.</b> Mart ayı sediment örnekleri radyolojik tehlike parametreleri .....                                                                                                    | 73 |
| <b>Çizelge 4.9.</b> Sediment numunelerinde radyolojik tehlike parametrelerinin belirlenmesine ilişkin çalışmalar .....                                                                    | 79 |
| <b>Çizelge 4.10.</b> Temmuz ayı S1-S7 numaralı sediment numunelerinin WD-XRF tekniği ile tayin edilen element konsantrasyonları .....                                                     | 82 |
| <b>Çizelge 4.11.</b> Temmuz ayı S8-S14 numaralı sediment numunelerinin WD-XRF tekniği ile tayin edilen element konsantrasyonları .....                                                    | 83 |

|                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Çizelge 4.12.</b> Temmuz ayı S15-S20 numaralı sediment numunelerinin WD-XRF tekniği ile tayin edilen element konsantrasyonları..... | 84 |
| <b>Çizelge 4.13.</b> Mart ayı B1-B7 numaralı sediment numunelerinin WD-XRF tekniği ile tayin edilen element konsantrasyonları.....     | 85 |
| <b>Çizelge 4.14.</b> Mart ayı B8-B14 numaralı sediment numunelerinin WD-XRF tekniği ile tayin edilen element konsantrasyonları.....    | 86 |
| <b>Çizelge 4.15.</b> Mart ayı B15-B20 numaralı sediment numunelerinin WD-XRF tekniği ile tayin edilen element konsantrasyonları.....   | 87 |
| <b>Çizelge 4.16.</b> Sediment numunelerinde tespit edilen oksit değerlerinin literatür sonuçlarıyla karşılaştırılması (%).....         | 90 |
| <b>Çizelge 4.17.</b> Sediment numunelerinde tespit edilen İz element değerlerinin litertür sonuçlarıyla karşılaştırılması (ppm).....   | 92 |
| <b>Çizelge 4.18.</b> WD-XRF Analizi Sonucu Elde Edilen Element Konsantrasyonlarının İstatistiksel İncelenmesi (%) .....                | 93 |

## 1. GİRİŞ

Nükleer bozunumlar, atom çekirdeklerinin dönüşerek enerji ve parçacıklar yaymasına neden olan doğal bir olaydır. Bu bozunumlar neticesinde meydana gelen radyonükleotitler, çeşitli tiplerde iyonlaştırıcı radyasyon üretirler. Oluşum kaynaklarına bağlı olarak radyonükleotitler, doğal ve yapay olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Doğal radyonükleotitler, doğal çevrede bulunan mineraller, toprak, su ve atmosferdeki gazlardan türemektedir. Örneğin, radyum ve uranyum gibi elementler, doğal radyonükleotitlerin örnekleridir. Yapay radyonükleotitler ise genellikle nükleer reaktörlerde üretilir veya nükleer testler sırasında ortaya çıkar. Bu kategoride yer alan örnekler arasında tıbbi amaçlarla üretilen radyofarmasötikler ve endüstriyel uygulamalardan kaynaklanan radyonükleotitler bulunmaktadır.

İnsanlar, çevreleriyle etkileşimde bulunarak bu radyonükleotitlere maruz kalırlar. Doğal radyasyon kaynakları arasında güneş ışınları, yer altı ve yer üstü kaynaklı radyoaktif maddeler, radyoaktif gazlar ve kozmik ışınlar yer almaktadır. Yapay radyasyon kaynakları ise nükleer enerji santralleri, nükleer silah denemeleri, radyoterapi ve nükleer atık depolama alanlarından kaynaklanabilir.

Çevresel radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesi, izlenmesi ve değerlendirilmesi, toplumun bireylerinin doğal veya yapay radyonükleotitlere maruz kalma düzeylerinin değerlendirilmesini sağlamaktadır. Radyasyon arka plan seviyelerinin tahmin edilmesi için temel bir veri tabanının oluşturulması da büyük önem taşımaktadır. Bu veri tabanı, farklı bölgelerdeki radyoaktivite düzeylerini belirleyerek, nükleer faaliyetlerin etkisini ve çevresel değişimleri izlemeye yardımcı olmaktadır. Aynı zamanda, nükleer enerji santrallerinin güvenlik denetimleri ve radyasyon koruma önlemleri gibi alanlarda bilimsel temele dayalı kararlar alınmasına katkı sağlamaktadır. Bu süreçler ayrıca nükleer kazalar veya radyolojik olaylar gibi acil durumlarda radyolojik değerlendirme yapılabilmesine de yardımcı olmaktadır.

Bu çalışma, Boğaçay nehir sedimentlerinde bulunan doğal ve antropojenik radyonükleotitlerin ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve  $^{137}\text{Cs}$ ) düzeylerini belirlemeyi ve aynı zamanda sediment örneklerinin elementel analizini içermektedir. Bu araştırma, bölgedeki radyoaktivite ve metal kirliliği durumunu değerlendirmeyi hedefleyerek, önceki çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırmaktadır. Boğaçay sedimentlerindeki doğal radyonükleotit konsantrasyonlarının belirlenmesi, bölgeye turist olarak gelen insanların ve yerel halkın radyasyon doz maruziyetini anlamak ve korunma önlemleri geliştirmek açısından büyük öneme sahiptir.

Çalışma kapsamında, Boğaçay boyunca belirlenen koordinatlardan toplanan sediment örnekleri üzerinde kapsamlı bir doğal ve yapay radyoaktivite ile elementel analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Türkiye ve diğer ülkelerdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bu değerlendirme, Boğaçay sedimentleri için temel bir radyoaktivite veri tabanının oluşturulmasına katkı sağlamış ve bölgedeki yerel radyasyon düzeyleri hakkında bilgi sunmuştur.

Sediment örneklerinde tespit edilen doğal ve yapay radyonükleotit aktivite konsantrasyonları, insan sağlığına yönelik radyolojik tehlike parametrelerinin belirlenmesinde kullanılarak bölgenin genel radyolojik durumu hakkında bilgi

edinilmiştir. Elde edilen veriler, bölgenin radyolojik açıdan değerlendirilmesini ve gelecekteki çalışmalara temel oluşturmayı amaçlayarak literatürde yayınlanmıştır.

Bunun yanı sıra, Türkiye’de yapımı devam eden ve gelecekte yapılması planlanan nükleer santraller öncesinde bölgenin radyolojik açıdan analiz edilmesi, potansiyel etkilerin belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, nükleer enerji projelerinin çevresel etkilerini değerlendirmek için önemli bir veri kaynağı sağlamaktadır ve böylece bölgenin nükleer santrallerden kaynaklanan etkilere maruz kalma potansiyelini değerlendirebilmemize yardımcı olacaktır.

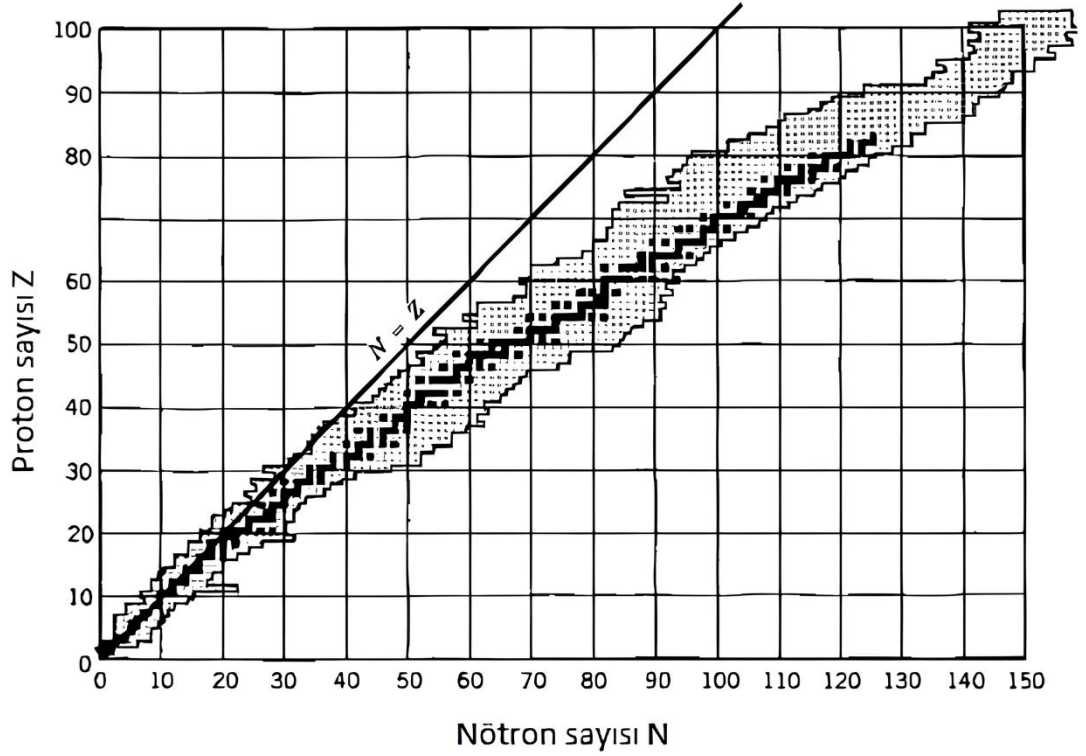
Bu tez altı ana bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümü, tezin konusunu, yazılma gerekçesini ve amacını özetleyerek başlamakta, ardından tezle ilgili teorik temel sağlanmaktadır. İkinci bölümde, Türkiye ve Dünya genelinde benzer çalışmalara dair literatür örneklerine yer verilmektedir. Üçüncü bölümde, çalışmanın kapsamı, malzeme temini, deney düzenekleri ve analiz yöntemleri detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Dördüncü bölümde, çalışmada kullanılan analiz yöntemi ve elde edilen bulgular detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen veriler, literatürdeki önceki çalışmalarda rapor edilen bulgularla karşılaştırılmış ve bu karşılaştırma, bölgedeki radyoaktivite ve metal kirliliği durumunu daha kapsamlı bir şekilde değerlendirmemizi sağlamıştır. Beşinci bölümde, bu analizler sonucunda ulaşılan sonuçlar sunulmuştur. Altıncı ve son bölümde ise, tez çalışması sırasında başvuru kaynakları listelenmiştir.

### 1.1. Radyasyon ve Radyoaktivite

Radyasyon, boşlukta ve madde içerisinde hareket edebilen enerji olarak tanımlanır. Elektromanyetik radyasyon ise elektromanyetik alanlar aracılığıyla enerjinin yayılmasını temsil ederken, nükleer radyasyon kararsız çekirdeklerin kararlı hale geçmek için yaptıkları iç dönüşümler sonucunda ortaya çıkar. Bu iç dönüşüm olayına, atom çekirdeğinin elektromanyetik dalga ya da hızlı parçacık salınımı ile sonuçlanmasından dolayı radyoaktivite veya radyoaktif parçalanma adı verilir. Kararlı çekirdeklerde proton ve nötron arasındaki nükleer kuvvet dengededir; ancak kararsız çekirdeklerde bu dengesizlik görülür (Gündoğdu 2019).

Bilinen en ağır kararlı nükleotit,  ${}_{83}\text{Bi}^{207}$ ’dir. Proton sayısı 83’ten büyük olan elementler radyoaktif özellik gösterirler (Kurnaz 2009). Bizmut atomu için nötron ve proton oranı yaklaşık olarak 1,5’tir. Diğer tüm çekirdekler ise nötron ve proton oranları 1,5’ten büyük ( $N/Z > 1,5$ ) olduğunda kararsız, yani radyoaktiftir (Özseven 2019). Şekil 1.1, kararlılık eğrisini göstermektedir (Krane 1998). Kararlı çekirdekler koyu bölgede, bilinen radyoaktif çekirdekler ise açık bölgededir.  $Z < 20$  bölgesinde  $Z=N$ ,  $Z > 20$  bölgesinde ise  $N/Z > 1$  olur ve giderek 1’den uzaklaşır.





**Şekil 1.1.** Çekirdek kararlılığının nötron/proton oranına bağlılığı (Krane 1998)

## 1.2. Radyasyon Türleri

Radyasyon, bir dizi önemli parametreyle tanımlanır ve bu parametreler, radyasyonun özellikleri ve etkileri üzerine derin bir anlayış sağlar. Radyasyonun temel parametreleri enerjisi, türü ve kaynağıdır.

Radyasyonun enerjisi, radyasyonun etkilerini ve etkileşimlerini belirlemede önemli bir faktördür. Enerjisi, radyasyonun sahip olduğu kinetik enerji miktarını ifade eder. Enerjisine göre radyasyon, düşük enerjili ve yüksek enerjili radyasyon şeklinde iki ana grupta sınıflandırılabilir. Düşük enerjili radyasyon, karşılaştığı atom veya moleküllerde iyonlaşmaya neden olmayan bir radyasyon türüdür. Atom veya molekülün çeşitli enerji seviyelerinde uyarılmalarına yol açabilir. Bu tür radyasyon, etkileştiği maddeyi iyonize etmez ve dolayısıyla yüklü parçacıklar oluşturmaz. Radyo dalgaları, mikro dalgalar, kızılötesi dalgalar ve görülebilir ışık, iyonlaştırıcı olmayan radyasyon örnekleridir ve bu tür radyasyonlar yaygın olarak günlük yaşamda kullanılır.

Öte yandan, yüksek enerjili radyasyonlar, karşılaştığı atom veya molekülden elektron kopartabilme yeteneğine sahiptir ve böylece atomu veya molekülü iyonize edebilir. Bu tür radyasyonlar, yüksek enerji taşıyan parçacıklardan veya elektromanyetik dalgaların belirli türlerinden oluşur. Bu radyasyon türü, iyonlaştırıcı radyasyon olarak adlandırılır ve etkileştiği maddeye iyon adı verilir. İyonlaştırıcı radyasyon örnekleri alfa parçacıkları, beta parçacıkları, nötronlar, X-ışınları ve gamma ışınlarıdır. Bu tür radyasyonlar, tıp, endüstri ve araştırma alanlarında önemli uygulamalara sahiptir.

Radyasyonun bir diğer önemli parametresi ise kaynağıdır. Kaynağına göre radyasyon doğal ve yapay radyasyon olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Doğal radyasyon,

çevremizde doğal olarak bulunan radyoaktif maddelerden kaynaklanır. Bu tür radyasyon, yer kabuğundaki doğal radyoaktif materyallerden, kozmik ışınlardan ve güneşten gelen radyasyonlardan oluşur. Doğal radyasyon, insanları sürekli olarak etkileyen bir kaynaktır ve çeşitli sağlık riskleriyle ilişkilidir. Yapay radyasyon ise insan faaliyetleri sonucu oluşan radyasyon kaynaklarından gelir. Tıbbi teşhis ve tedavi, endüstriyel uygulamalar ve nükleer enerji üretimi gibi alanlarda yapay radyasyon üretilir.

Sonuç olarak, radyasyonun enerjisi, türü ve kaynağı, radyasyon fiziği ve uygulamaları açısından önemli bilgiler içerir. Radyasyonun doğru bir şekilde anlaşılması ve kontrollü bir şekilde kullanılması, insan sağlığı ve çevre güvenliği açısından kritik öneme sahiptir.

Doğal radyoaktivite, atom çekirdeklerinin dış etki olmadan kararsız durumdan kararlı duruma geçişini ifade eden bir süreçtir. Bu olay, çevresel koşullardan bağımsız olarak gerçekleşir ve yeryüzünde bulunan doğal olarak oluşan radyoaktif materyallerin varlığına bağlıdır. Bu materyallere "Naturally Occurring Radioactive Material" (NORM) denir. Doğal radyoaktivite, bazı koşullar altında radyolojik olarak tehlikeli seviyelere ulaşabilir.

Toprakta bulunan doğal radyoaktivite, temel olarak  $^{238}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$  serileri ile  $^{40}\text{K}$  çekirdeklerinden kaynaklanır. Kozmik ışınlar ve primordial radyoizotoplar, doğal radyoaktivitenin büyük bir kısmını oluşturan faktörlerdir (Kılıçaslan 2016). Kozmik ışınlar, uzaydan gelen yüksek enerjili parçacıklardır ve Dünya'ya ulaştıklarında radyoaktif materyallerle etkileşime girerler. Primordial radyoizotoplar ise yeryüzündeki materyallerin oluşumu sırasında var olan radyoaktif izotoplardır.

Yapay radyoaktivite insan faaliyetleri sonucu oluşan radyoaktif materyallerin varlığına işaret eder. Bu tür radyasyon, dışarıdan bir müdahale sonucu meydana gelir. Tıpta kullanılan röntgen cihazları ve nükleer tıp uygulamaları, yapay radyoaktivitenin bir örneğidir. Ayrıca, nükleer bomba denemeleri, nükleer reaktör kazaları ve diğer nükleer olaylar sonucunda atmosferik yollarla yayılan fisyon ürünleri, yapay radyoaktif çekirdeklerin çevresel radyasyon dozuna katkıda bulunabilir (Hafizoğlu Alkan 2019).

Radyasyon, temelde parçacık radyasyonu ve elektromanyetik radyasyon olarak sınıflandırılabilir. Alfa parçacıkları, beta parçacıkları ve nötronlar gibi parçacıklar özellikle tanecikli yapısıyla bilinir ve bu nedenle parçacık radyasyonu olarak adlandırılır. Alfa parçacıkları, iki proton ve iki nötrondan oluşan ağır parçacıklardır. Beta parçacıkları ise elektronlar veya pozitronlar olabilir ve alfa parçacıklarına göre daha yüksek hızlarda hareket ederler. Nötronlar ise atom çekirdeklerinde bulunan yüksüz parçacıklardır ve nükleer reaksiyonlara katılırlar.

X-ışınları ve gama ışınları, elektromanyetik dalga yapısıyla bilinen radyasyon türleridir. Elektromanyetik radyasyon, elektromanyetik spektrumun farklı bölgelerinde bulunabilir. X-ışınları, tıp alanında yaygın olarak kullanılan görüntüleme tekniğidir ve yüksek enerji taşırlar. Gamma ışınları ise nükleer reaksiyonlar ve radyoaktif bozunma süreçleri sonucu ortaya çıkan yüksek enerjili fotonlardır.

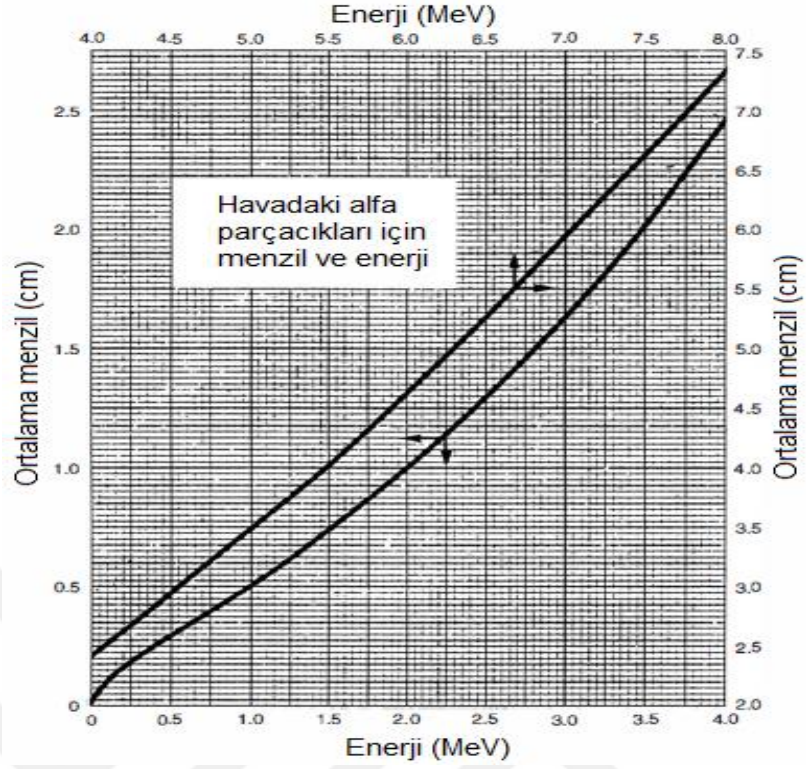
### 1.2.1. Alfa bozunumu

Alfa parçacığı iki proton ve iki nötrondan oluşan (bağlı bir sistem) helyum çekirdeğidir (Gilmore 2008). Çok fazla sayıda nükleon içeren çok ağır çekirdekler dengede kalabilmek için iki proton ve iki nötrondan oluşan bir alfa parçacığı yayımlayarak bozunur. Böyle bir nükleon kümesinin tek tek emisyonu yerine bir bütün olarak emisyonu, özellikle parçacığın bağlanma enerjisi yüksek olması nedeniyle enerji açısından daha avantajlıdır. Bu bozunumda proton ve nötron sayıları ayrı ayrı korunur. Helyum çekirdeği 4-9 MeV enerjilerinde ve monoenerjetik bir enerji spektrumu gösterir. Radyoaktif atom çekirdeklerinden fırlatılan alfaların sahip olacağı en fazla enerji 9 MeV civarında olup hızı ışık hızının 20’de biri kadardır. İçinden geçtikleri ortamda enerjilerini cm başına neredeyse sabit bir miktarda bırakarak yollarına devam ederler. Ana çekirdek (Z,A) kendiliğinden Denklem 1.1’deki şekilde alfa parçacığı yayınlar (Knoll 2000).



burada X ana çekirdek ve Y kız çekirdeği göstermektedir.

Alfa bozunumu öncesi,  $\alpha$  parçacığının çekirdeğin içinde önceden oluştuğu ve çekirdek içinde bir potansiyel kuyuda tutulduğu varsayılır (Krane 2001). Bozulma sürecinin gerçekleşebilmesi için  $\alpha$  parçacığının kinetik enerjisinin pozitif olması gereklidir. Ancak çekirdekte var olduğu düşünülen alfa parçacığının kinetik enerjisi, çekirdek dışına çıkabilmek için yeterli olmaz. Bunun yerine,  $\alpha$  parçacığının çekirdek potansiyel bariyerini tünelleme yöntemiyle aşarak çekirdekten yayınlanması gerçekleşir. Bu durum,  $\alpha$  parçacığının dalga doğasının bir sonucudur ve kuantum mekaniksel bir süreci ifade eder. Ayrıca bariyer olduğundan iletim enerjiye bağlıdır, tüm  $\alpha$  kaynakları genellikle menzile ile sınırlıdır. Alfa parçacığının menzili enerjisine, içinden geçtiği maddenin cinsine ve yoğunluğuna bağlıdır. Diğer radyasyon çeşitlerine kıyasla çok kısa menzile sahip olan alfalar hava ortamında sadece birkaç cm, insan derisinde ise bir iki mikron hareket edebilirler. Dolayısıyla dış radyasyon tehlikesi yoktur. İnce bir kağıt tabaka ile bile durdurulmaları mümkündür (Shimboyo 2013). Şekil 1.2’ de 15°C ve 760 mm Hg’de havadaki alfa parçacıklarının menzile-enerji grafiği gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Alfa parçacıklarının menzilinın enerjisine bağlı değişimi (Knoll 2000)

Bu kuantum mekaniksel süreç, çekirdeklerin kararlılık durumunu değiştiren ve elementlerin doğal bozunma zincirlerini belirleyen önemli bir fenomendir. Alfa parçacığı yayımlayan bazı izotoplar ve özellikleri Çizelge 1.1’de gösterilmiştir (Knoll 2000).

Çizelge 1.1. Alfa parçacığı yayımlayan bazı izotoplar ve özellikleri (Knoll 2000)

| Radyoizotop       | Yarılama Ömrü            | Alfa parçacığı kinetik enerjisi (MeV)     | (Oluşma yüzdesi)          |
|-------------------|--------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|
| $^{232}\text{Th}$ | $1,4 \times 10^{10}$ yıl | 4,012<br>3,953                            | 77<br>23                  |
| $^{238}\text{U}$  | $4,5 \times 10^9$ yıl    | 4,196<br>4,149                            | 77<br>23                  |
| $^{235}\text{U}$  | $7,1 \times 10^8$ yıl    | 4,598<br>4,401<br>4,374<br>4,365<br>4,219 | 4,6<br>56<br>6<br>12<br>6 |
| $^{230}\text{Th}$ | $7,7 \times 10^4$ y      | 4,6875<br>4,6210                          | 76,3<br>23,4              |
| $^{241}\text{Am}$ | 433 y                    | 5,48574<br>5,44298                        | 85,2<br>12,8              |
| $^{238}\text{Pu}$ | 88 y                     | 5,49921<br>5,4565                         | 71,1<br>28,7              |

Alfa bozunumunda, elektriksel yük, enerji ve momentum korunur. Özellikle kütle numarası 190'dan büyük olan çekirdeklerde alfa bozunumu daha sık gözlenir. Alfa parçacığının enerjisi ile yarı ömrü arasında çok güçlü bir ilişki vardır. Alfa bozunumu, enerji açığa çıkaran bir süreç olduğu için en yüksek enerjiye sahip olan alfalar, genellikle ana izotopu en kısa yarı ömre sahip olanlardır.

### 1.2.2. Beta bozunumu

Beta parçacığı ( $\beta$ ), nötronca veya protonca zengin kararsız çekirdeklerin bozunumu sonucunda meydana gelir. Beta bozunumu çeşitleri, bir çekirdeğin toplam kütle numarası  $A=N+Z$  sabit kalırken, atom numarası ( $Z$ ) ve nötron numarası ( $N$ ) her biri kendi içinde bir birim değişir. Bu tür bozunum, nükleer dengeyi sağlamak ve daha kararlı bir duruma geçmek için gerçekleşir. Beta bozunumu, üç farklı tipe ayrılır (Shimboyo 2013).

$\beta^-$  Bozunumu (Negatif Beta Bozunumu): Nötron fazlalığına sahip olan bir çekirdek, bir nötronunu bir protona ve bir anti-nötrinoya dönüştürür. Bu olay sonucunda, çekirdek  $\beta^-$  ışıması veya negatron adı verilen bir elektron yayınlar. Nötronunun yerine bir proton kazanan çekirdek, artık bir proton fazlalığına sahiptir ve atom numarası 1 birim artmış olur. Bu tip beta bozunumu özellikle nötron zengini çekirdeklerde gözlenir.  $\beta^-$  ışıması bağıntısı Denklem 1.2'de gösterilmiştir.



İlgili bozunma enerjisi, yani son durum parçacıklarının kinetik enerjisi olarak salınan enerji Denklem 1.3 'te verilmiştir.

$$Q_{\beta^-} = m_n c^2 - m_p c^2 - m_e c^2 > 0 \quad (1.3)$$

$\beta^+$  Bozunumu (Pozitif Beta Bozunumu veya Pozitron Bozunumu): Proton fazlalığına sahip olan bir çekirdek, bir protonunu bir nötron ve bir pozitrona dönüştürür. Bu olayda, çekirdek pozitron adı verilen bir pozitif yüklü parçacık yayınlar. Bir proton kaybeden çekirdek, artık bir proton eksikliği taşır ve atom numarası 1 birim azalır.  $\beta^+$  bozunumu özellikle proton zengini çekirdeklerde gözlenir.  $\beta^+$  ışıması bağıntısı Denklem 1.4'te gösterilmiştir.



İlgili bozunma enerjisi, yani son durum parçacıklarının kinetik enerjisi olarak salınan enerji Denklem 1.5 'te verilmiştir.

$$Q_{\beta^+} = m_p c^2 - m_n c^2 - m_e c^2 < 0 \quad (1.5)$$

Serbest protonlar için bu bozunum biçimi mümkün değildir. Ancak, bu durum; nötron-proton kütle farkının ve pozitron oluşturmak için gereken ekstra enerjinin çekirdek tarafından karşılandığı durumlar için geçerlidir.

Denklem 1.2 ve 1.4 yazılırken çizgisel momentumun ve enerjinin korunumu dikkate alınarak negatif beta bozunumuna anti-nötrino, pozitif beta bozunumuna ise nötrino parçacıkları eklenmiştir. Her ikisine de aynı zayıf etkileşim aracılık eder.

Proton fazlalığı olan kararsız çekirdek, pozitif beta bozunumu yapamadığı zaman, genellikle enerji fazlalığının pozitif beta bozunumu yapmaya yetmediği durumlarda, atomun çekirdeğine yakın K ya da L yörüngesinden bir elektron yakalayabilir. Çekirdekteki proton ile bu elektron birleşerek; bir nötrona ve bir nötrinoya dönüşür. Bu olay elektron yakalaması ( $\epsilon$ ) olarak bilinir. Elektronlar yeniden düzenlenmeye girer yakalanan elektronun yeri başka bir elektron tarafından doldurulması sırasında ikincil fotonlar ( $X$  ve  $\gamma$ ) yayınlanır. Elektron yakalama ( $\epsilon$ ) bağıntısı Denklem 1.6'da gösterilmiştir.

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e \quad (1.6)$$

$${}^A_ZX_N + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1}Y_{N+1} + \nu_e$$

İlgili bozunma enerjisi, yani son durum parçacıklarının kinetik enerjisi olarak salınan enerji Denklem 1.7 'de verilmiştir.

$$Q_{EC} = m_p c^2 + m_e c^2 - m_n c^2 < 0 \quad (1.7)$$

olur. Bundan dolayı elektron yakalaması sadece nükleer ortamda ekstra enerji verilirse gerçekleşir.

Beta bozunma sürecinin temel bir özelliği  $\beta$  parçacığının sürekli enerji spektrumuna sahip olmasıdır. Beta bozunumunda sıfır ile maksimum değer arasında değişen bir enerji dağılımı gözlemleriz. Çoğu beta kaynağı için bu maksimum değer birkaç on keV'den birkaç MeV değerine kadar değişir.  $\beta$  bozunmasında açığa çıkan enerjinin çoğu,  $\beta$  parçacığı ve nötrininin (ya da antinötrininin) kinetik enerjisini oluşturmaktadır. Eğer ki nötrino (ya da antinötrino)'nun kinetik enerjisi sıfır olursa,  $\beta$  parçacığının kinetik enerjisi maksimum olmuş olur. Bozunmada kız çekirdeğin küçük bir geri tepme enerjisi varsa bu ihmal edilir. Birçok beta kaynağında kız çekirdek uyarılmış durumda kalır ve hemen bir ya da daha fazla gama fotonu yayınlarak durgun hale gelir. Bu kaynaklar aynı zamanda bu nedenle gama radyasyonu yayıcılarıdır ( Leo 1987; Yılmaz 2019).

### 1.2.3. Gama bozunumu

Gama bozunması, radyoaktif bozunma süreçlerinin üçüncü tipidir ve  $\alpha$  ile  $\beta$  bozunma türlerinden farklı özelliklere sahiptir. Gama bozunması sonucunda yeni bir kız nükleotit oluşmaz. Bunun yerine, atom çekirdekleri uyarılmış durumdan daha düşük bir enerji durumuna geçerken, bu enerji farkını karakteristik özelliklerde gama ışınları üreterek açığa çıkarır. Gama ışınları, elektromanyetik dalgalardır ve atom çekirdeklerinin

yüksek enerji seviyelerden daha düşük enerji seviyelere geçerken saldığı fotonlardan oluşur (Tsoufanidis 1995).

Atom fiziği alanında da benzer süreçler meydana gelir, ancak buradaki enerji değişiklikleri genellikle çok daha küçüktür ve ortaya çıkan fotonlar genellikle görünür spektrumunda veya x-ışınları mertebesindeir. Oysa gama ışınları, daha büyük enerjilere sahiptir ve bu nedenle yüksek giriciliğe sahiptirler. Gama ışınları, kısa dalga boylu ve yüksek enerjili elektromanyetik ışınlardır (Gilmore 2008).

Gama ışınları genellikle enerji spektrumu olarak 100 keV ile 10 MeV aralığında bulunur (Gilmore 2008). Bu aralık, gama ışınlarının yüksek enerjili olmasını ve çekirdeklerin enerji düzeyleri arasındaki farkı yüksek hassasiyetle taşımasını sağlar. Bu özellik, gama ışınlarının nükleer fizik ve radyasyon tıbbı gibi alanlarda etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanır. Örneğin, radyoterapi tedavisinde kanser hücrelerinin hedeflenmesi için gama ışınlarından faydalanılır. Aynı zamanda, gama spektroskopisi ve nükleer fizik araştırmalarında da gama ışınlarının enerjilerinin analiz edilmesi ve nükleer yapı ve etkileşimlerin anlaşıması için kullanılması önemli bir araştırma alanıdır.

Gama bozunmasını tanımlayan nükleer reaksiyon Denklem 1.8’de gösterildiği gibidir,

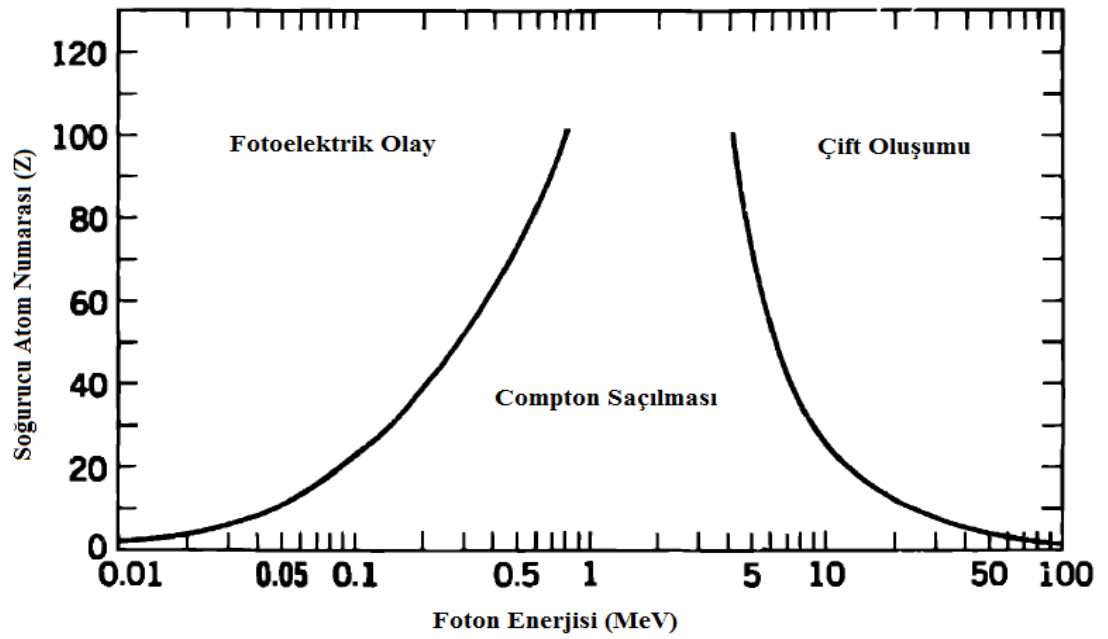


Burada ana çekirdeğin üzerindeki \* simge, uyarılmış bir nükleer durumu gösterir. Gama bozunumunda toplam enerji (nükleon başına iç bağlanma enerjisi) değişirken kimyasal izotop değişmez, nükleer izomeri diye adlandırılan farklı enerjiye sahip eşdeğer çekirdek oluşmuştur. Gama bozunumu çoğunlukla alfa ya da beta bozunumunu takiben yayınlanır.

### 1.3. Gama Işınlarının Madde ile Etkileşimi

Elektromanyetik kuvvet taşıyıcıları olan gama ışınlarının madde ile birçok olası etkileşimi bilinmesine rağmen, temel de üç etkileşim mekanizması vardır. Bunlar; fotoelektrik soğurma, Compton saçılması ve çift oluşumudur (Knoll 2000). Gama ışınları, Fotoelektrik etki ve Compton etkisi yoluyla atomları doğrudan (elektriksel olarak nötr olmalarına rağmen) iyonize edebilirler, ancak ikincil (dolaylı) iyonizasyon çok daha önemlidir.

Gama ışınlarının madde ile etkileşiminde gama ışın enerjileri ve etkileştiği maddenin atom numarası önemlidir. Fotoelektrik soğurma, düşük gama enerjisi ve büyük atom numaralı atomlarla etkileşim de önemliyken, çift oluşumu yüksek gama enerjisi ve büyük atom numaralı atomlarla etkileşimde önemlidir. Compton saçılması ise orta gama enerjisi ve tüm atom numaralarındaki etkileşimlerde baskındır (Evans 1955). Gama ışınlarının madde ile etkileşimi enerjilerine ve atom numaralarına göre Şekil 1.3’de gösterilmektedir.



**Şekil 1.3.** Foton enerjisinin soğurucu atom numarasına göre gama etkileşim türleri (Evans 1955)

### 1.3.1. Fotoelektrik etki

Fotoelektrik etki, ışık ve madde arasındaki temel etkileşimlerden biridir ve ışığın parçacık doğasının bir kanıtıdır. Olayın temel özelliği, gama ışını atomdaki bağlı elektronlardan birine çarptığında; gama ışını enerjisinin atomdaki elektronların enerji seviyesini aşabilmesi durumunda, bir elektronun serbestleşmesine ve fotoelektron olarak adlandırılan serbest elektronun ortaya çıkmasına yol açmasıdır. Atom ile etkileşime giren gama ışını enerjisinin bir kısmı o elektronun bağlama enerjisi için kullanırken, kalan kısmını serbest kalan elektrona kinetik enerji olarak aktarır. Serbest kalan elektron fotoelektron olarak adlandırılır. Fotoelektrik etkide, gelen foton enerjisini  $E_\gamma$ , atom yörüngesine bağlı bir elektron bağlama enerjisini  $E_b$  ile ifade edersek, fotoelektronun enerji  $E_e$  Denklem (1.9)'da gösterildiği gibi olacaktır.

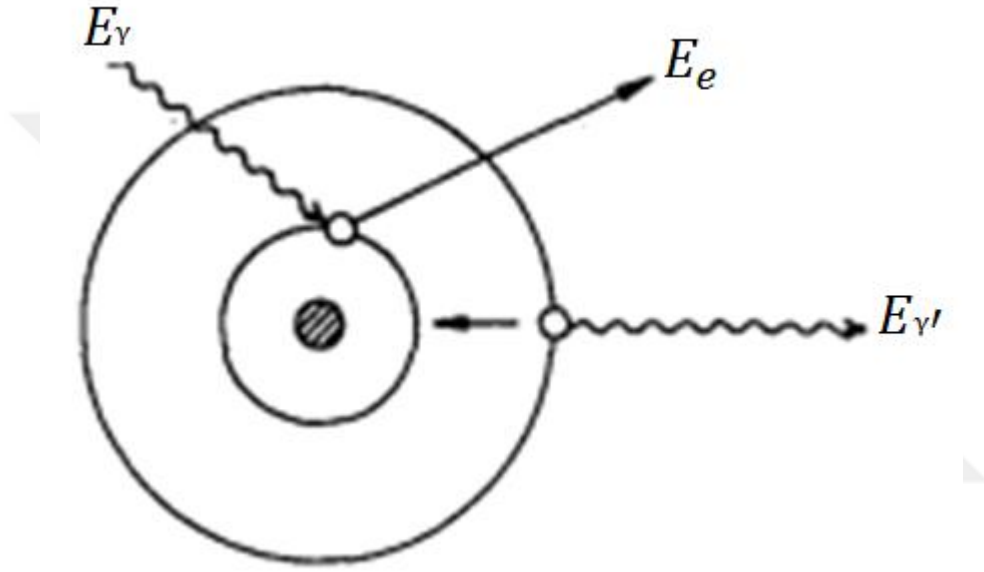
$$E_e = E_\gamma - E_b \quad (1.9)$$

Fotoelektrik olasılık için tek bir analitik ifade geçerli değildir. Fotoelektrik olay olasılığının, kabaca bir yaklaşım ile fotonun  $E$  enerjisine ve malzemenin  $Z$  atom numarasına bağlılığı yaklaşık olarak Denklem 1.10 ifadesi ile tanımlanabilir (Knoll 2000).

$$\tau \cong \text{sabit} x \frac{Z^n}{E_\gamma^{3,5}} \quad (1.10)$$



burada  $n$  üssü ilgilenilen gama ışını enerji bölgesi boyunca 4 ile 5 arasında değişmektedir (Knoll 2000). Fotoelektrik etkinin meydana gelme olasılığı, radyasyon soğuran malzemenin atom numarası ile doğru, gama ışını enerjisi ile ters orantılıdır (Das ve Ferbel 2003). En sık olarak fotoelektrik soğurma, yüksek atom numaralı ve düşük enerjili gama ışınlarının soğurulmasında meydana gelir. Fotoelektronun yörüngesinden ayrılması sebebiyle oluşan boşluğa başka yörünge elektronlarından birinin geçmesiyle, yörüngeler arası enerji farkına sahip karakteristik x ışınları oluşur. Genelde fotoelektronun en olası kaynağı, atoma en sıkı bağlı olduğu iç kabuk elektronudur (Knoll 2000). Şekil (1.4)'de  $E_\gamma$  gelen gama ışını enerjisi,  $E_e$  fotoelektron,  $E_{\gamma'}$  kopan elektronun yerine üst yörünge elektronun geçmesi sonucu seviyeler arasındaki enerji farkından dolayı yayınlanan karakteristik x ışını enerjisi gösterilmektedir.



Şekil 1.4. Fotoelektrik soğurma (Das ve Ferbel 2003)

### 1.3.2. Compton saçılması

Compton saçılması, bir fotonun yarı serbest elektronlarla elastik saçılma sürecidir. Bu etkileşim sonucunda gelen fotonun yolu saptırılır ve çarpışma bölgesinden yeni bir yöne doğru saçılır. Saçılan fotonun enerjisi, gelen fotonun enerjisi ile geri tepme elektronu tarafından kazanılan kinetik enerjinin ve bağlanma enerjisinin toplamına eşittir.

Compton saçılması, aslında serbest bir elektron üzerinde gerçekleşen fotoelektrik etkiyle benzerlik gösterir. Fotoelektrik soğurmada olduğu gibi, Compton saçılması da bir elektronun kaybedilmesine ve soğurucu atomunun iyonlaşmasına neden olur. Saçılma olayının olasılığı, soğurucu malzemenin elektron yoğunluğuyla doğru orantılıdır (Knoll 2000).

Fotonun enerjisi, Compton saçılmasının kinematiğinde önemli bir rol oynar. Eğer gelen fotonun enerjisi, elektronun bağlanma enerjisinden çok daha yüksekse, bağlanma enerjisi göz ardı edilerek hedef elektron serbest olarak kabul edilebilir. Ancak düşük enerjili (100 keV'nin altında) fotonlar için bu sonuçların geçerli olmayacağı anlamına

gelir. Çünkü bu düşük enerjilerde atomik bağlanma enerjileri önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, Compton saçılmasının çeşitli enerji seviyelerindeki davranışını anlamak için fotonun enerjisi dikkate alınmalıdır.

Yeterince yüksek enerjide gelen fotonu  $E=h\nu$  enerjili ve  $p=E/c$  momentuma sahip kütsüz bir enerji parçacığı ve elektron için de tamamen görel momentum enerji ifadeleri kullanarak saçılan fotonun frekansı ile saçılan cisim arasındaki kinematik ilişki Denklem (1.11)'de gösterilmiştir.

$$\nu' = \frac{\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (1.11)$$

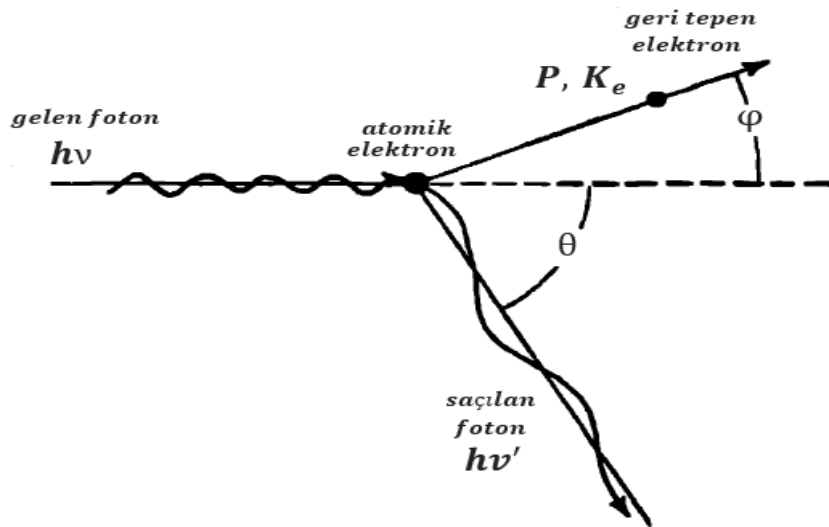
ifade de  $\nu'$  saçılan fotonun frekansını,  $m_e$  elektronun kütesini,  $\theta$  saçılan fotonun geliş doğrultusundan sapma açısını,  $\nu$  gelen foton frekansını belirtmektedir.

Saçılan foton enerjisi ise ve saçılan elektron enerjisi; Denklem (1.12) ve (1.13)'de verilmiştir (Knoll 2000).

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (1.12)$$

$$K_e = h\nu - h\nu' = h\nu \frac{\frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (1.13)$$

Compton saçılması ışığın kuantizasyonunu (yani fotonların parçacık özelliğini) da örneklenmektedir (Das ve Ferbel 2003). Şekil (1.5)'de Compton saçılmasının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.5. Compton saçılması (Evans 1955)

### 1.3.3. Çift oluşumu

Yeterince yüksek enerjideki foton atomun çekirdeğinin yakınından geçtiğinde ve çekirdeğin güçlü alanına maruz kaldığında, pozitif ve negatif elektron çiftine dönüşebilir. Gelen foton enerjisi, elektron durgun kütesine karşılık gelen enerjinin iki katını aştığından, yani  $E_\gamma = m_e c^2 = 1,02 \text{ MeV}$ , bir elektron ve pozitron üretim çifti mümkün hale gelir. Pozitron, madde içerisinde ilerlerken elektronlar gibi iyonlaşma ile enerji kaybettikten sonra pratik olarak sıfır kinetik enerjiye yavaşladıktan sonra maddede bol miktarda bulunan ortam elektronlarından biriyle birleşir ve her biri  $0,511 \text{ MeV}$ 'lik enerjili zıt yönlerde hareket eden iki fotonun yaratılmasıyla yok olur (Shultis ve Faw 2002; Penner-Hahn 2019).

### 1.4. Radyoaktif Bozunma Kanunu

Radyoaktif bozunma, atomların istatistiksel bir süreçle kararsız halden kararlı hale geçmesidir. Bir numunenin içinde bulunan çok sayıda özdeş radyoaktif atom için, hangi atomun ne zaman bozunacağını önceden tahmin etmek mümkün değildir. Ancak tüm numunenin bozunma özelliklerini olası olarak belirleyebiliriz. Bu süreçte, her radyoaktif bozunmanın belirli bir oranda,  $\lambda$  (lambda) sabitiyle bozulacağını varsayabiliriz. Bu durumda, numunenin aktivitesi, yani birim zamandaki toplam parçalanma sayısı (kısa bir zaman dilimi içinde  $1/\lambda$  ile karşılaştırıldığında), basitçe  $N\lambda$  olarak ifade edilecektir. Aktivite, bir numunedeki radyoaktif çekirdeklerin bozunma hızını ölçer ve bu da numunenin radyoaktif özelliklerinin bir göstergesidir. Herhangi bir  $t$  zamanda ortama dışarıdan herhangi yeni radyoaktif atom kaynağı sağlamadığımız sürece,  $dt$  sürede aktivite  $dN$ ,  $N$  ile bağıntı (1.14)'deki gibi orantılıdır (Evans 1955).

$$\frac{dN}{dt} = -N\lambda \quad (1.14)$$

burada  $N$ , radyoaktif atomların sayısı ve  $\lambda$  bozunma sabitidir.  $\lambda$  değeri her radyonükleotit türü için farklıdır. Radyoaktif çekirdek bozunum hesaplamaları için, Denklem (1.14)'ü aşağıdaki gibi daha uygun bir forma dönüştürmek gerekmektedir.

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (1.15)$$

Bir atomun aktivitesi, atomun yaşından bağımsızdır. Öyleyse  $\lambda$  da  $t$ 'den bağımsız ve sabitse, denklemi integre edebiliriz. Bu temel ilişkiyi değişkenlere ayrılmış biçimde integral formunda tekrar yazarsak;

$$\int \frac{dN}{N} = - \int \lambda dt \quad (1.16)$$

Eğer  $t = 0$ 'da aktiviteyi  $N_0$  ve  $t = t$  zamanında aktiviteyi  $N$  alırsak, Denklem (1.16) bu integral sınırlarında integre edilirse; sırasıyla Denklem (1.17) ve Denklem (1.18) ifadeleri elde edilir.

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \quad (1.17)$$

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t \quad (1.18)$$

Buradan üstel formda, bir radyonükleotitin aktivitesinin zamana bağımlılığını açıklayan Denklem (1.19)'dan elde edilir.

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.19)$$

Denklem (1.18)'de tanımlandığı gibi yasanın veya radyoaktivitenin üstel davranışı, radyoaktif dönüşümlerin rastgele olmasından kaynaklanmaktadır. Denklem (1.18); bozunma olasılığı  $\lambda$ , türün tüm atomları için aynıdır ve belirli bir nesnenin atomlarının yaşından bağımsızdır varsayımları ile türetilmiş bozunum denklemidir (Evans 1955). İfadeye göre aktivite, radyoaktif atomların sayısı ile orantılı olduğundan, zamanla katlanarak azalır.

### 1.5. Yarı Ömür

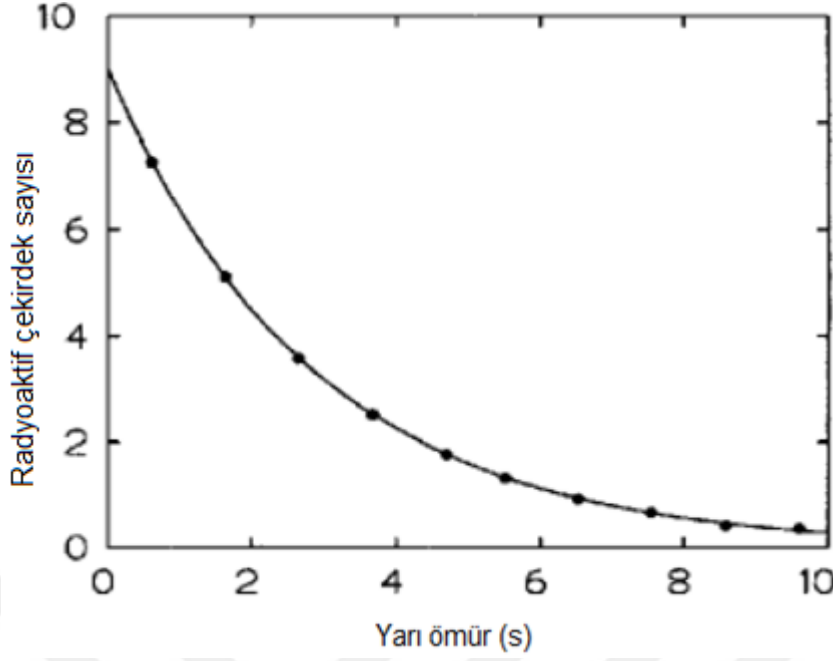
Herhangi bir radyonüklidin orijinal atomlarının yarısının parçalandığı süre yarı ömür olarak bilinir. Tanım olarak, yarı-ömüre karşılık gelen bir zaman aralığından sonra radyoaktif çekirdeğin başlangıçtaki aktivitesinin yarıya düşmesi sebebiyle başlangıçtaki aktiviteyi  $N_0=1$  olarak, bir yarı-ömürden sonra kalan aktivite ise  $N(t)=1/2$  olacağından Denklem (1.19) artık Denklem (1.20) şeklini alacaktır.

$$\ln \frac{1}{1/2} = \lambda t_{1/2} \quad (1.20)$$

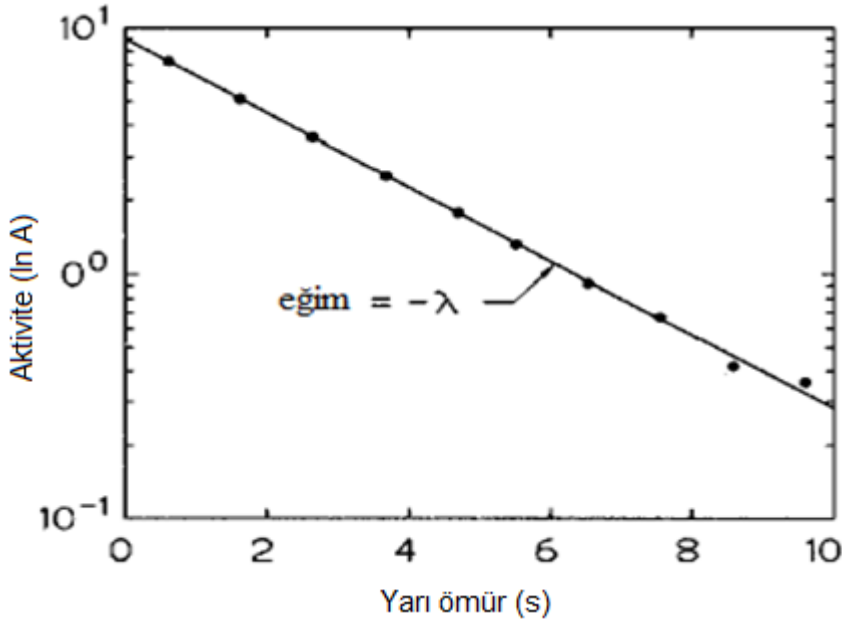
Buradan T bozunum sabiti denklem (1.21) şeklinde elde edilir.

$$T = t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1.21)$$

Atomik çekirdekler için yarı ömür karakteristik bir özelliktir. Çevreden bağımsızdır ve kozmolojik zaman içinde değişmez (Airey 2012). Yarı ömür, Denklem (1.20)'de görüldüğü gibi bozunma sabiti ile ilgilidir. İki saatlik yarı ömre sahip bir radyoaktif maddenin, radyoaktif çekirdek sayısının yarı ömrüne göre değişimi ve yarı ömürün bozunma reaksiyon oran sabiti üzerine etkisi Şekil (1.6) ve (1.7)'de gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Radyoaktif çekirdek sayısının yarı ömürle değişimi (Shultis ve Faw 2002)



Şekil 1.7. Yarı ömürün bozunum sabiti üzerine etkisi (Shultis ve Faw 2002)

### 1.6. Ortalama Ömür

Radyoaktif bozunumlar olasılık kanunlarına uyduğu için, göz önüne alınan belli bir atomun ne zaman bozunuma uğrayacağını söylemek mümkün değildir. Ancak çok sayıda atomun ortalama ömrü tanımlanabilir.

Başlangıçtaki radyoaktif çekirdek sayısına  $N_0$  olarak kabul edelim, sonraki bir  $t$  zamanda bozulmadan kalan çekirdek sayısı  $N$  olarak alalım. Bu atomların her biri  $t$ 'den daha uzun bir ömre sahiptir. Her biri  $t$  ile  $t + dt$  arasında bozunanların arasında da ömrü  $t$  kadar olan atom çekirdekleri vardır. Ömrü  $t$  olan atomların mutlak sayısı bu nedenle Denklem 1.22'deki gibi olacaktır.

$$N\lambda dt = N_0\lambda e^{-\lambda t} dt \quad (1.22)$$

Böylece tüm atomların toplam ömrüne  $L$  dersek;

$$L = \int_0^\infty t N \lambda dt = \int_0^\infty t N_0 \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{N_0}{\lambda} \quad (1.23)$$

olur. Herbir radyonükleotit için ortalama ömür ise

$$\tau = \frac{L}{N_0} = \frac{\frac{N_0}{\lambda}}{N_0} = \frac{1}{\lambda} \quad (1.24)$$

Şeklinde ifade edilir (Evans 1955).

### 1.7. Peş Peşe Bozunumlar

Radyoaktif izotoplarda bozunma, şayet ürün çekirdekte radyoaktifse peş peşe bozunumlar şeklinde meydana gelebilir. Bu bozunumlar, kararlı bir nüklide ulaşılan kadar devam eder. Basitlik için, biz önce üç bileşenli bir bozunum zinciri ele alırsak, bu bozunma zincirini şematik olarak Denklem (1.25) gibi yazılabilir.



$t = 0$ 'da, örnekte herhangi bir kayıp veya üretim olmadığı varsayılarak söz konusu numunedeki her türden atom sayısı  $N_i(0)$ ,  $i=1, 2$  ve  $3$  ile gösterilsin. Her tür için diferansiyel bozunma denklemleri:

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -\lambda_1 N_1(t) \quad (1.26)$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = -\lambda_2 N_2(t) + \lambda_1 N_1(t) \quad (1.27)$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt} + \lambda_2 N_2(t) = \lambda_1 N_1(t) \quad (1.28)$$

$$\frac{dN_3(t)}{dt} = \lambda_2 N_2(t) \quad (1.29)$$

(1.26), (1.28) ve (1.29) deki denklemleri üstel formda yazarsak:

$$N_1(t) = N_1(0)e^{-\lambda_1 t} \quad (1.30)$$

Denklem 1.28'deki diferansiyel denklem çözülürse, peş peşe önce Denklem 1.31 sonra Denklem 1.32 elde edilir.

$$\frac{dN_2(t)}{dt} + \lambda_2 N_2(t) = \lambda_1 N_1(0)e^{-\lambda_1 t} \quad (1.31)$$

elde edilir. Bu bağıntının her iki tarafı  $e^{\lambda_2 t}$  ile çarpılırsa ve gerekli işlemler yapılırsa,

$$\frac{d}{dt}(N_2 e^{\lambda_2 t}) = \lambda_1 N_1(0)e^{-\lambda_1 t} \quad (1.32)$$

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1 N_1(0)}{\lambda_2 - \lambda_1} [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}] \quad (1.33)$$

Denklem 1.29 torun çekirdek sayısı içinde gerekli integrasyon işlemi yapılarak üstel formda yazılabilir.

$$N_3(t) = N_3(0) + \lambda_2 \int_0^t dt' N_2(t') \quad (1.34)$$

$$\begin{aligned} N_3(t) &= N_3(0) + \lambda_2 N_2(0) \int_0^t dt' e^{-\lambda_2 t'} \\ &+ \frac{\lambda_2 \lambda_1 N_1(0)}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_0^t dt' [e^{-\lambda_1 t'} - e^{-\lambda_2 t'}] \end{aligned} \quad (1.35)$$

$$\begin{aligned} N_3(t) &= N_3(0) + N_2(0) [1 - e^{-\lambda_2 t}] \\ &+ \frac{\lambda_2 \lambda_1 N_1(0)}{\lambda_2 - \lambda_1} [\lambda_2 (1 - e^{-\lambda_1 t}) - \lambda_1 (1 - e^{-\lambda_2 t})] \end{aligned} \quad (1.36)$$

Aktiflik A, numunede birim zamanda bozunma sayısı, yani bozunma hızı olarak tanımlanır.  $t = 0$  'daki başlangıç aktifliği  $A_0 = \lambda N_0$  'dır (Krane, 2001). Ana, kız ve çekirdeğin aktiviteleri sırasıyla Denklem 1.37, 1.38' de verildiği gibidir.

$$A_1(t) = A_1(0)e^{-\lambda_1 t} \quad t > 0 \quad (1.37)$$

Başlangıç aktivitesini sıfır olarak aldığımızda kız çekirdeğin aktivitesi Denklem (1.38)'de gösterildiği gibi olacaktır.

$$A_2(t) = \lambda_2 N_2(t) = A_1(0) + \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}] \quad (1.38)$$

Kız çekirdeğin aktivitesinin ne büyüklüğü anne çekirdeğin yarı ömür değerine bağlıdır (Shultis ve Faw 2002).

## 1.8. Radyoaktif Bozunum Denge Durumları

Peş peşe gerçekleşen radyoaktif bozunumlarda her bozunma ürünü kendi karakteristik bozunma sabitine ve dolayısıyla farklı bir yarı ömre sahiptir. Belirli zaman sonra, bu bozunum zincirindeki herhangi bir üyenin çekirdek sayısı bu üyelerin bozunum sabitleri ve yarı ömürlerine bağlı olarak denge durumuna ulaşabilir. Radyoaktif denge geçici ve kalıcı denge olarak iki kısımda incelenmiştir.

### 1.8.1. Geçici denge

$\lambda_1$  ana çekirdeğin bozunum sabitini,  $\lambda_2$  kız çekirdeğin bozunum sabiti olmak üzere, eğer ana çekirdeğin bozunum sabiti, kız çekirdeğin bozunum sabitinden küçük ( $\lambda_1 < \lambda_2$ ) ise, Denklem 1.38'deki ifade;

$$A_2(t) = A_1(0) \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} [1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}] \quad (1.39)$$

yazılabilir. Bu ifade de, yeterince uzun bir zaman sonunda;

$$A_2(t) \rightarrow A_1(0) \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \quad (1.40)$$

kız çekirdeğin asimptotik aktivitesi olacaktır (Shultis ve Faw 2002). Bu durum, belirli bir süre sonra ana çekirdek bitecek ve kız çekirdeğin de kendisi için belirlenmiş olan  $\lambda_2$  bozunma sabiti ile bozunacağı anlamına gelir ve ana çekirdek kız çekirdek ile geçici olarak dengededir denir.

### 1.8.2. Kalıcı denge

Bozunum sabitleri arasında  $\lambda_1 \ll \lambda_2$  şeklinde bir ilişki olan radyoaktif zincirde; Denklem 1.40, Denklem 1.41 şekline dönüşecektir.

$$A_2(t) \rightarrow A_1(0) \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \cong A_1(0) e^{-\lambda_1 t} \quad (1.41)$$

Bu durumda, ana çekirdeklerin sayısı nadiren bazı küçük zaman aralığında değişir. Kız çekirdekler ise, nispeten hızlı bir şekilde bozunacaktır. Belli bir zaman aradan sonra, hem ana hem de kız çekirdek sayısının olduğu bir durum gelişebilir. Böylece bozunum zincirinin değişimi durur. Böyle bir durumda sürekli veya kalıcı radyoaktif dengenin kurulduğu söylenir. Kalıcı denge durumu doğal bozunum zincirlerinin karakteristiğidir (Shultis ve Faw 2002).

## 1.9. Radyoaktif Seriler

Radyoaktif izotoplar doğal olarak kararsız bir yapıya sahip olduklarından, bozunmaya uğradıklarında farklı türde radyoizotoplar oluşur ve bu süreç, en sonunda kararlı bir izotop meydana gelene kadar devam eder. İlk bozunmaya uğrayan kararsız çekirdeğe ana çekirdek denir. Ana çekirdeğin radyoaktif bozunmaya uğraması sonucu kararlı hale döneşene kadar oluşturduğu çekirdeklere ise yavru, ürün çekirdek adı verilir.



Doğada üç temel bozunma serisi bulunmaktadır. Bu doğal radyoaktif seriler ana çekirdekleri sırasıyla  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{235}\text{U}$  olan; uranyum serisi, toryum serisi ve aktinyum serisidir. Bunların yanı sıra, yapay kaynaklı ana çekirdeği  $^{237}\text{Np}$  olan neptinyum serisi bulunmaktadır. Bu dört radyoaktif seriye ait bazı özellikler Çizelge 1.2’de verilmiştir.

**Çizelge 1.2.** Toryum, Neptinyum, Uranyum ve Aktinyum serilerine ait bazı özellikler (Krane 2001)

| Seri Adı  | Son Çekirdek (Kararlı) | Başlangıç Radyonüklidleri | Yarı ömür (yıl)       |
|-----------|------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Toryum    | $^{208}\text{Pb}$      | $^{232}\text{Th}$         | $1,41 \times 10^{10}$ |
| Neptinyum | $^{209}\text{Bi}$      | $^{237}\text{Np}$         | $2,14 \times 10^6$    |
| Uranyum   | $^{206}\text{Pb}$      | $^{238}\text{U}$          | $4,47 \times 10^9$    |
| Aktinyum  | $^{207}\text{Pb}$      | $^{235}\text{U}$          | $7,04 \times 10^8$    |

### 1.9.1. Toryum serisi

Doğada bulunan en uzun yarı ömürlü serilerden birisi olan Toryum serisi  $^{232}\text{Th}$  izotopu ile başlar ve 11 aşamada bozunarak; kararlı  $^{208}\text{Pb}$  izotopu ile sonlanır. Toryum serisindeki çekirdeklere ait bazı özellikler Çizelge 1.3’te verilmiştir.

**Çizelge 1.3.**  $^{232}\text{Th}$  (Toryum) serisi üyelerinin bazı özellikleri (Lapp ve Andrews 1972; Hodgson vd. 1997)

| Element – Z   | Sembol            | Alfa ( $\alpha$ )(MeV) | Beta ( $\beta$ )(MeV) | Gamma ( $\gamma$ )(MeV) | $\gamma$ ışını yüzdesi | Yarı ömrü               |
|---------------|-------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| Toryum – 90   | $^{232}\text{Th}$ | 4,00                   | -                     | 0,06                    | 23                     | $1,40 \times 10^{10}$ y |
| Radyum - 88   | $^{228}\text{Ra}$ | -                      | 0,054                 | -                       | -                      | 5,8 y                   |
| Aktinyum - 89 | $^{228}\text{Ac}$ | -                      | 1.11                  | 0,09                    | 30                     | 6,13 sa                 |
| Toryum - 90   | $^{228}\text{Th}$ | 5,43                   | -                     | 0,08                    | 28                     | 1,91 y                  |
| Radyum - 88   | $^{224}\text{Ra}$ | 5,68                   | -                     | 0,24                    | 5                      | 3,7 gün                 |
| Radon – 86    | $^{220}\text{Rn}$ | 6,29                   | -                     | -                       | -                      | 55,6 s                  |
| Polonyum - 84 | $^{216}\text{Po}$ | 6,78                   | -                     | -                       | -                      | 145 ms                  |
| Kurşun - 82   | $^{212}\text{Pb}$ | -                      | 0,36                  | 0,238                   | 81                     | 10,6 sa                 |
| Bizmut - 83   | $^{212}\text{Bi}$ | 6,05                   | 2.20                  | 0,04                    | 17                     | 60,6 dk                 |
| Polonyum - 84 | $^{212}\text{Po}$ | 8,78                   | -                     | -                       | -                      | 300 ns                  |
| Talyum - 81   | $^{208}\text{Tl}$ | -                      | 1,79                  | 2,62                    | 100                    | 3,1 dk                  |
| Kurşun - 82   | $^{208}\text{Pb}$ | -                      | -                     | -                       | -                      | Kararlı                 |

### 1.9.2. Neptinyum serisi

$^{237}\text{Np}$  izotopu ile başlayan bu seri kararlı  $^{209}\text{Bi}$  izotopu ile son bulur. Neptinyum serisindeki çekirdeklere ait bazı özellikler Çizelge 1.4’te verilmiştir.

**Çizelge 1.4.**  $^{237}\text{Np}$  (Neptinyum) serisi üyelerinin bazı özellikleri (Lapp ve Andrews 1972; Hodgson vd. 1997)

| Element – Z       | Sembol            | Alfa<br>( $\alpha$ )(MeV) | Beta<br>( $\beta$ )(MeV) | Gamma<br>( $\gamma$ )(MeV) | $\gamma$ ışını<br>yüzdesi | Yarı ömrü           |
|-------------------|-------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------|
| Neptinyum – 93    | $^{237}\text{Np}$ | 4,8                       | -                        | 0,09                       | 50                        | $2,1 \times 10^6$ y |
| Protaktinyum – 91 | $^{233}\text{Pa}$ | -                         | 0,26                     | 0,06                       | 0,20                      | 27 gün              |
| Uranyum – 92      | $^{233}\text{U}$  | 4,8                       | -                        | 0,04                       | 14                        | $1,6 \times 10^5$ y |
| Toryum – 90       | $^{229}\text{Th}$ | 4,8                       | -                        | 0,11                       | 6                         | $7,9 \times 10^3$ y |
| Radyum – 88       | $^{225}\text{Ra}$ | -                         | 0,32                     | 0,04                       | 33                        | 14,9 gün            |
| Aktinyum-89       | $^{225}\text{Ac}$ | 5,8                       | -                        | 0,03                       | 28                        | 10 gün              |
| Fransiyum-87      | $^{221}\text{Fr}$ | 6,3                       | -                        | 0,22                       | 14                        | 4,9 dk              |
| Astatin-85        | $^{217}\text{At}$ | 7,0                       | -                        | 0,22                       | 15                        | 0,03 s              |
| Bizmut-83         | $^{213}\text{Bi}$ | 6,0                       | 1,39                     | 0,44                       | -                         | 45,6 dk             |
| Polonyum – 83     | $^{213}\text{Po}$ | 8,4                       | -                        | -                          | -                         | 4,2 $\mu\text{s}$   |
| Kurşun – 82       | $^{209}\text{Pb}$ | -                         | 0,63                     | -                          | -                         | 3,3 sa              |
| Bizmut – 83       | $^{209}\text{Bi}$ | -                         | -                        | -                          | -                         | Kararlı             |

### 1.9.3. Uranyum serisi

Uranyum serisi radyoaktif  $^{238}\text{U}$  izotopu ile başlar ve 14 aşamada bozunarak nihayetinde kararlı kurşun izotopu  $^{206}\text{Pb}$ 'ya ulaşır. Uranyum bozunma serisindeki çekirdeklere ait bazı özellikler Çizelge 1.5'te gösterilmiştir.

**Çizelge 1.5.**  $^{238}\text{U}$  (Uranyum) serisi üyelerinin bazı özellikleri (Lapp ve Andrews 1972; Hodgson vd. 1997)

| Element – Z       | Sembol            | Alfa<br>( $\alpha$ )(MeV) | Beta<br>( $\beta$ )(MeV) | Gamma<br>( $\gamma$ )(MeV) | $\gamma$ ışını<br>yüzdesi | Yarı<br>ömrü        |
|-------------------|-------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------|
| Uranyum – 92      | $^{238}\text{U}$  | 4,2                       | -                        | 0,048                      | 23                        | $4,5 \times 10^9$ y |
| Toryum – 90       | $^{234}\text{Th}$ | -                         | 0,19                     | 0,09                       | 4                         | 24,1 gün            |
| Protaktinyum – 91 | $^{234}\text{Pa}$ | -                         | 2,29                     | 1,0                        | 0,6                       | 1,17 dk             |
| Uranyum – 92      | $^{234}\text{U}$  | 4,8                       | -                        | 0,05                       | 28                        | $2,5 \times 10^5$ y |
| Toryum – 90       | $^{230}\text{Th}$ | 4,8                       | -                        | 0,068                      | 24                        | $7,5 \times 10^4$ y |
| Radyum – 88       | $^{226}\text{Ra}$ | 4,8                       | -                        | 0,186                      | 4                         | 1600 y              |
| Radon – 86        | $^{222}\text{Rn}$ | 5,49                      | -                        | 0,5                        | 0,07                      | 3,82 gün            |
| Polonyum – 84     | $^{218}\text{Po}$ | 6,00                      | -                        | -                          | -                         | 3,05 dk             |
| Kurşun – 82       | $^{214}\text{Pb}$ | -                         | 0,65                     | 0,24                       | 4                         | 26,8 dk             |
| Bizmut – 83       | $^{214}\text{Bi}$ | 5,5                       | 1,5                      | 0,61                       | 47                        | 19,9 dk             |
| Polonyum – 84     | $^{214}\text{Po}$ | 7,7                       | -                        | 0,8                        | 0,014                     | 164 $\mu\text{s}$   |
| Kurşun – 82       | $^{210}\text{Pb}$ | -                         | 0,016                    | 0,046                      | 81                        | 22,3 y              |
| Bizmut – 83       | $^{210}\text{Bi}$ | -                         | 1,16                     | -                          | -                         | 5,0 gün             |
| Polonyum – 84     | $^{210}\text{Po}$ | 5,30                      | -                        | 0,80                       | 0,001                     | 138 gün             |
| Kurşun – 82       | $^{206}\text{Pb}$ | -                         | -                        | -                          | -                         | Kararlı             |

### 1.9.4. Aktinyum serisi

$^{235}\text{U}$  izotopu ile başlayan aktinyum serisi 11 aşamada bozunarak  $^{207}\text{Pb}$  izotopu ile son bulur. Aktinyum bozunma serisindeki çekirdeklere ait bazı özellikler çizelge 1.6'da verilmiştir.

**Çizelge 1.6.**  $^{235}\text{U}$  (Aktinyum) serisi üyelerinin bazı özellikleri (Lapp ve Andrews 1972; Hodgson vd. 1997)

| Element – Z       | Sembol            | Alfa<br>( $\alpha$ )(MeV) | Beta<br>( $\beta$ )(MeV) | Gamma<br>( $\gamma$ )(MeV) | $\gamma$ ışını<br>yüzdesi | Yarı ömrü           |
|-------------------|-------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------|
| Uranyum – 92      | $^{235}\text{U}$  | 4,38                      | -                        | 0,185                      | 12                        | $7,0 \times 10^8$ y |
| Toryum - 90       | $^{231}\text{Th}$ | -                         | 0,30                     | 0,25                       | 90                        | 25,5 sa             |
| Protaktinyum - 91 | $^{231}\text{Pa}$ | 5,06                      | -                        | Çok                        | -                         | $3,3 \times 10^4$ y |
| Aktinyum – 89     | $^{227}\text{Ac}$ | 4,95                      | 0,046                    | Çok                        | -                         | 21,8 gün            |
| Toryum - 90       | $^{227}\text{Th}$ | 6,04                      | -                        | Çok                        | -                         | 18,7 gün            |
| Radyum – 88       | $^{223}\text{Ra}$ | 5,86                      | -                        | Çok                        | -                         | 11,4 gün            |
| Radon – 86        | $^{219}\text{Rn}$ | 6,82                      | -                        | 0,27                       | 11                        | 4,0 s               |
| Polonyum – 84     | $^{215}\text{Po}$ | 7,38                      | -                        | -                          | -                         | 1,78 ms             |
| Kurşun – 82       | $^{211}\text{Pb}$ | -                         | 1,36                     | 0,83                       | 20                        | 36,1 dk             |
| Bizmut - 83       | $^{211}\text{Bi}$ | 6,62                      | 0,59                     | 0,35                       | -                         | 2,15 dk             |
| Talyum - 81       | $^{207}\text{Tl}$ | -                         | 1,44                     | 2,90                       | 0,16                      | 4,79 dk             |
| Kurşun - 82       | $^{207}\text{Pb}$ | -                         | -                        | -                          | -                         | Kararlı             |

### 1.10. Radyasyon Birimleri

Radyasyon dozu hedef kütle tarafından belirli bir sürede soğurulan veya alınan radyasyon miktarıdır. Radyasyon dozunun büyüklüğü, olay radyasyonu tarafından depo edilen enerji miktarı belirtilerek ifade edilir. Radyasyon dozunun temel ölçüsü soğurulmuş doz olarak adlandırılır ve bu, vücuda yüklenen enerji miktarının vücut kütle miktarına bölünmesiyle elde edilir. Bir organda veya dokuda alınan soğurulmuş doz birimi Gray (Gy) olarak adlandırılır ve  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg'a}$  eşittir. Gerekli önlemler alınmadığında, belli bir süre içinde belli bir miktarın üzerinde radyasyon enerjisi soğuran yani radyasyon dozu alan canlılarda zararlı etkiler meydana gelmesi kaçınılmazdır.

Soğurulmuş dozun eski birimi rad olup,

$$100 \text{ rad} = 1 \text{ gray}$$

$$1 \text{ gray} = 1 \text{ J/kg'dır.}$$

Radyasyon maruziyetinin genel değerlendirmesi için kullanılan "etkili doz eşdeğer" miktarı, en önemli radyasyon koruma ölçüsüdür. Bir joule enerjisi küçük bir miktar olsa da, bir gray oldukça büyük bir dozdur. Bu gerçek, insanların radyasyona maruz kaldıklarında, yüksek radyasyon dozlarının bile insan duyuları tarafından hissedilemeyeceği konusunda düşündürücü bir perspektif sunar (Tykva ve Berg 2004). Doz eşdeğerinin SI birimi Sievert (Joule/kg) dir. "Sv" ile sembolize edilir ve soğurulan doz ile kalite faktörünün çarpımı olarak tanımlanır.

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$$

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

Aktivite birim zamanda bozunma gerçekleştiren atomların toplam sayısı şeklinde tanımlanır. Bir saniyede  $3,7 \times 10^{10}$  parçalanma gösteren radyoaktif madde miktarının aktivitesi 1 Curie şeklinde tanımlanmıştır. SI birim sisteminde aktivite birimi Becquerel

(Bq)'dir. Bir Bq, bir saniyede bir parçalanma gerçekleştiren maddenin aktivitesi olarak tanımlanır. Ci ve Bq arasında bir dönüştürme işlemi gerekmektedir.

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ bozunma/saniye}$$

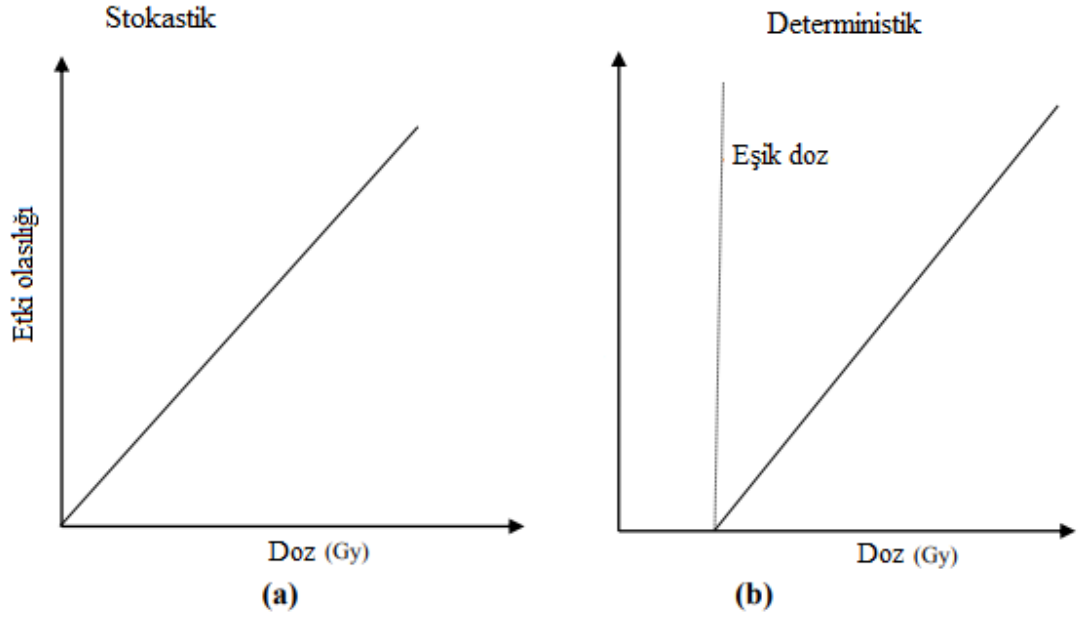
$$1 \text{ Bq} = 2,7 \times 10^{-11} \text{ Ci} = 27 \text{ pCi}$$

$$\text{Yüzeydeki aktivite ise, } 1 \text{ Bq/m}^2 = 2,7 \times 10^{-15} \text{ Ci/cm}^2 \text{ dir.}$$

### 1.11. Radyasyonun Biyolojik Etkileri

İyonlaştırıcı radyasyonun biyolojik etkileri stokastik ve deterministik olmak üzere genellikle iki kategoriye ayrılır. Stokastik etkiler genellikle uzun bir süre boyunca düşük düzeyde radyasyona maruziyetle ilişkilidir ve istatistiksel bir şekilde meydana gelir. Bu etkilerin olasılığı, Şekil 1.8 (a)'da gösterildiği gibi radyasyon dozuyla birlikte artar. Bu nedenle "stokastik" adı, rastlantıya ilişkin anlamına gelir. Kanseri ve genetik kusurların indüksiyonu, stokastik etkilere atfedilen en tanınmış sonuçlardır. Ayrıca, kanser veya genetik kusurun kesinlikle meydana gelmeyeceği kesin bir düşük radyasyon maruziyeti eşiği yoktur ve radyasyon dozu ikiye katlandığında kanser veya genetik kusur olasılığı ikiye katlanır.

Deterministik etkiler, kısa bir süre içinde alınan çok daha yüksek düzeyde radyasyon maruziyeti ile ilişkilidir. Doz ile etki arasında neden-sonuç ilişkisi vardır. Bu, etkilerin radyasyona yüksek dozda kısa bir süre içinde maruz kalan kişide erken (ve/veya geç) olarak ortaya çıkması anlamına gelir. Şiddet, radyasyon dozunun büyüklüğüyle beklenildiği gibi artar ve Şekil 1.8 (b)'de gösterildiği gibi etki görülmeyen bir eşik vardır. Radyasyonun biyolojik etkileri, doz-tavır ilişkisi olarak nicel olarak tanımlanabilir; yani, belirli bir etkinin görülme sıklığı veya şiddeti, dozun bir fonksiyonu olarak ifade edilir (Turner 2004; Shimboyo 2013). Şekil 1.8 (a)'da gösterildiği gibi Stokastik etkide (örneğin kanser), etki olasılığı dozla birlikte artar ve bir eşik dozu yoktur. Şekil 1.8 (b)'de gösterildiği gibi Deterministik etkide (örneğin yanıklar), etkinin şiddeti dozla birlikte artar ancak bir eşik doz bulunur (Shimboyo 2013).

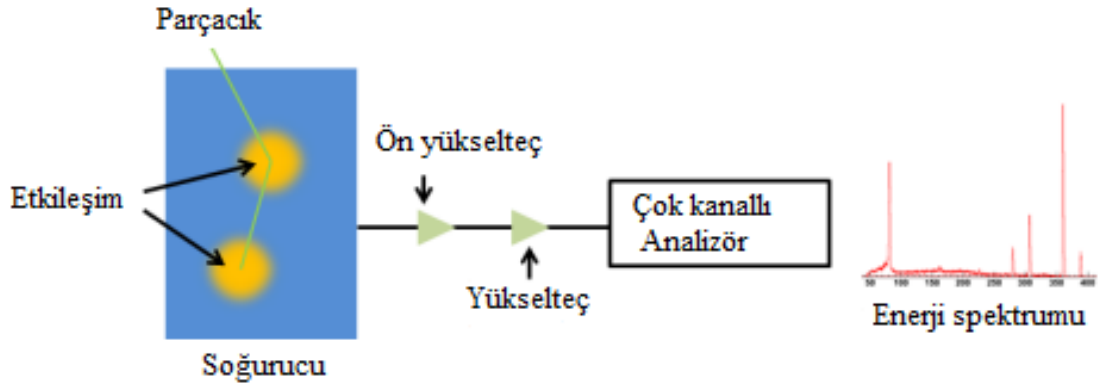


**Şekil 1.8.** Radyasyonun (a) stokastik ve (b) deterministik etkileri arasındaki farklar (Shimboyo 2013)

Radyasyonun biyolojik etkilerini etkileyen faktörler; toplam doz, doz hızı, radyasyon türü, maruz kalan vücudun alanı ve yeri, hücre duyarlılığı ve bireyin duyarlılığıdır (Cerrito 2017).

### 1.12. Radyasyon Ölçüm Metotları

Radyasyon dedektör sistemleri, gama ışınları, iyonlar, elektronlar, nötrinolar ve diğer enerji parçacıkları gibi parçacık ve dalga radyasyonu hakkında bilgi toplamak için kullanılır. Bu ölçümler, gelen parçacıkların hızı, enerjileri, zamanlama ve etkileşim pozisyonu gibi temel bilgileri içerir. Radyasyon dedektör sistemleri, bir soğurucu ve bir elektronik okuma sistemi olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Farklı fizik prensiplerine dayanan çeşitli dedektör türleri mevcuttur, ancak hepsi bir parçacığın soğurucu ile etkileşimini gerektirir. Radyasyon dedektöre girer, dedektör materyalinin atomları ile etkileşir ve bu etkileşim sonucunda atomun yörüngesinden düşük enerjili elektronların salınmasına sebep olur. Bu elektronlar daha sonra dedektörün elektronik bileşenleri tarafından analiz için bir gerilim veya akım pulsuna dönüştürülür (Krane 2001). Radyasyon dedektör sistemlerinin temel bileşenlerinin şematik diyagramı Şekil 1.9'da gösterilmiştir.

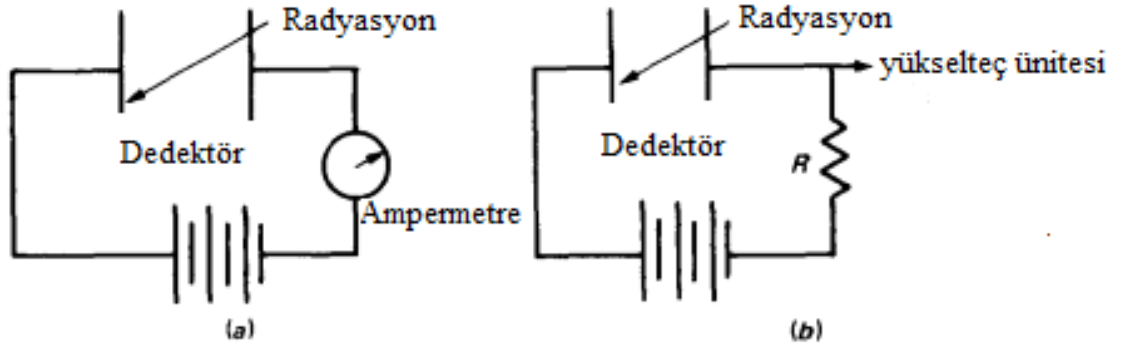


**Şekil 1.9.** Radyasyon dedektör sisteminin temel bileşenlerinin şematik diyagramı (Looker 2014)

Ölçümü gerçekleştirilecek olan radyasyonun çeşidine göre dedektör seçimi yapılır. Nükleer radyasyon ölçümünde yaygın olarak kullanılan dedektör türleri; Gaz dolgu dedektörler, Sintilasyon dedektörleri, Yarı iletken dedektörlerdir.

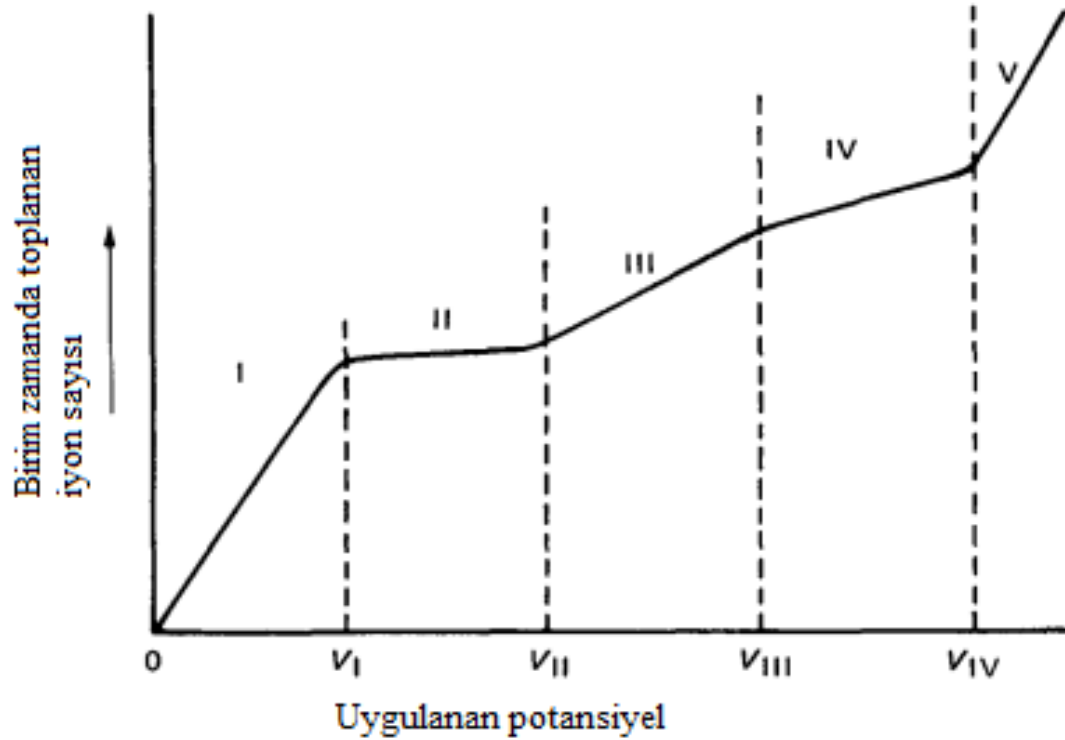
#### 1.12.1. Gaz dolu dedektörler

Gaz dolu dedektörler, içinden geçen radyasyonun gaz içinde iyonizasyonunu kullanarak çalışır. Sayaç, üzerine belirli bir elektrik potansiyeli uygulanan iki elektrot içerir. Elektrotlar arasındaki boşluk, bir gazla doldurulmuştur. İyonlaştırıcı radyasyon, elektrotlar arasındaki boşluktan geçerken enerjisinin bir kısmını veya tamamını elektron-iyon çiftleri oluşturarak dağıtır. Elektronlar ve iyonlar, elektrik alanının etkisi altında hareket eden yük taşıyıcılarıdır. Bu hareket, elektrotlarda bir akıma neden olur ve bu akım ölçülebilir. Uygun elektronikler aracılığıyla, radyasyon tarafından üretilen yük bir pulsa dönüştürülerek parçacıkların ayrı ayrı sayılması sağlanır (Tsoulfanidis 1995). Bu tür dedektörler genellikle akım modu (Şekil 1.10 (a)) ve puls modu (Şekil 1.10 (b)) olarak adlandırılır. Akım modu; Elektrik akımının bir ampermetre ile okunmasıdır. Dedektör içerisinde belli bir zaman aralığında etkileşimle oluşan elektriksel yükün ortalamasını kullanır. Bu modda çalışan cihazlar, dedektörün cevap verme süresi boyunca meydana gelen akımların ortalamasını alarak değer verir. Puls modunda; Dedekte edilen her bir parçacık veya ışın başına tek bir voltaj sinyali yükseltilerek ölçülür. Radyasyon şiddeti yeterince düşük olduğunda her bir etkileşimin neden olduğu akımları puls'lar halinde ayrı ayrı dedekte etmek mümkün olur. Çoğu uygulamada her bir etkileşim ile meydana gelen akım, gelen radyasyonun bıraktığı enerji ile orantılıdır. Gelen radyasyonun enerjisi ölçülmek istendiğinde bu mod kullanılır (Donmez 2017).



**Şekil 1.10.** Gaz dolu dedektörlerde akım modu (a), puls modu (b) devre şematik gösterimi (Tsoulfanidis 1995)

Gaz dolu dedektörlerde akım modu ve puls Bu tip dedektörler; pozitif ve negatif elektrotlar arasındaki uygulanan gerilim farkına göre; iyon odası, orantılı sayaç ve Geiger-Müller dedektörleri olarak üçe ayrılır. Dedektöre uygulanan voltaj ile toplanan yük arasındaki ilişki Şekil 1.11’de gösterildiği gibidir.



**Şekil 1.11.** Dedektöre uygulanan voltaj ile toplanan yük arasındaki ilişki (Tsoulfanidis 1995)

I. bölgede voltaj çok düşük olduğunda, sayacın içindeki elektrik alan güçlü değildir, elektronlar ve iyonlar nispeten yavaş hızlarda hareket eder ve rekombinasyon hızları oldukça yüksektir. Voltaj arttıkça, alan daha da güçlenir, taşıyıcılar daha hızlı hareket eder ve rekombinasyon hızları sıfıra yaklaşıncaya kadar azalır. Ardından,

iyonlaştırıcı radyasyon tarafından oluşturulan tüm yük toplanır. Bölge I, rekombinasyon bölgesi olarak adlandırılır.

II. bölgede ise voltajdaki bir değişime rağmen toplanan yük sabit kalır çünkü rekombinasyon hızı sıfırdır ve yeni yük oluşmaz. Bu, iyonizasyon bölgesi olarak adlandırılır.

III bölgede, toplanan yük artmaya başlar çünkü elektronlar ikincil iyonizasyon üreterek yükselme sağlar. Elektrik alan, sayacın belirli bir hacminde o kadar güçlüdür ki, birincil iyonizasyondan gelen elektronlar çarpışmalar arasında ek iyonizasyon üretmek için yeterli enerjiyi kazanır. Gaz çoğalma faktörü, belirli bir voltaj için birincil iyonizasyondan bağımsız olarak, toplam iyonizasyonun birincil iyonizasyona bölünmesi ile elde edilir. Bu nedenle sayacın çıkışı birincil iyonizasyona orantılıdır. Çıkıştaki darbe yüksekliği, sayacın içinde dağılan enerji ile orantılıdır; bu nedenle parçacık tanımlama ve enerji ölçümü mümkündür. Bu bölge, orantılı bölge olarak adlandırılır.

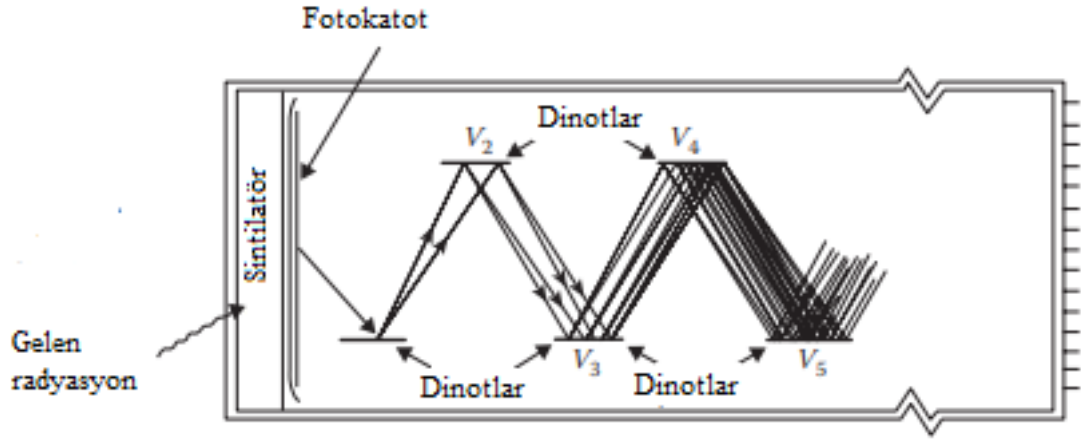
IV. bölgede, sayacın içindeki elektrik alan o kadar güçlüdür ki, odada üretilen tek bir elektron-iyon çifti, bir elektron-iyon çifti zincirini başlatmak için yeterlidir. Bu zincir, birincil iyonizasyon ve parçacık türünden bağımsız olarak, yalnızca sayacın elektroniği tarafından belirlenen güçlü ve şekli sabit bir sinyal üretecektir. IV. bölge, Geiger-Müller (GM) bölgesi olarak adlandırılır.

V. bölge de uygulanan voltaj daha da yükseltilirse tek bir iyonlaştırıcı olay gazda sürekli bir deşarjı başlatır ve cihaz artık bir parçacık dedektörü değildir (Tsoulfanidis 1995).

### 1.12.2. Sintilasyon dedektörleri

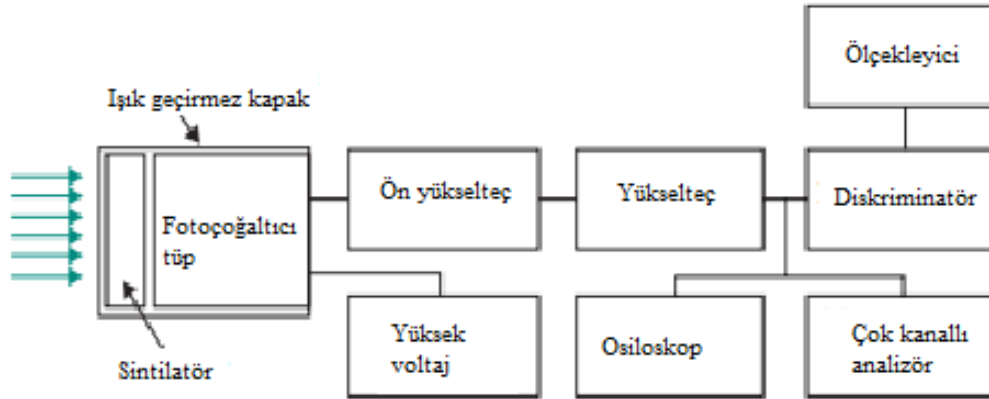
Radyasyon, bir luminesan malzeme olarak adlandırılan sintilatör veya fosfor içine girdiğinde ve enerji kaybettiğinde, malzemede uyarılmış hallerde elektronik geçişlere yol açar. Bu uyarılmış atomlar görünür ışık bölgesinde fotonlar yayar. Bu yayılan fotonlar gözlemlenebilir ve radyasyon hakkında nicel bilgi sağlarlar. Yayılan foton, bir fotoçoğaltıcı tüpü tarafından algılanır ve fotoçoğaltıcı tüpte bulunan fotokatoda çarparak foton başına en çok bir fotoelektron salınmasına neden olur. Fotokatot tarafından yayılan elektronlar, bir elektrik alanın yardımıyla üzerine çarpan elektron durumunda ikincil elektronlar yayımlayan bir madde ile kaplanmış olan ilk dinoda doğru yönlendirilir. İlk dinottan yayılan ikincil elektronlar ikinci dinota doğru hareket eder böylece ardışık dinotlar tarafından ikincil elektronların üretilmesi, elektron sayısının son amplifikasyonuna neden olur. Bu süreç sayesinde  $10^7$  ila  $10^{10}$  arasında elektron çoğalması elde edilir. Çoğalan bu fotoelektronlar tüpün katotundan anota doğru elektrik alanda hızlandırılır. Anota ulaşan fotoelektronlar, toplanır ve bir gerilim pulsu üretilmiş olur. Sintilasyon süreci Şekil 1.12’de gösterilmiştir.





**Şekil 1.12.** Sintilasyon dedektöründe gerçekleşen süreçler (Tsoulfanidis ve Landsberger 2015)

Gerilim pulsu önce bir önyükselticiye girer. Burada pulsun boyu büyür ve kare dalga şekline dönüştürülür. Pulsun eni, bu pulsun oluşmasına neden olan yüklü parçacığın menziline bağlıdır. Bu nedenle pulsun eninde bir değişme olmaz. Bu puls önyükselticiden yükselticiye gelir. Burada pulsun boyu daha da yükseltilir ve seçici (diskriminatör) sistemine ulaşır. Her bir diskriminatör yalnız belirli enerji aralığındaki pulsarı geçirir. Gelen fotonların enerjisi ile anotta elde edilen pulsun genliği orantılıdır. Sintilasyon dedektörünün şematik diyagramı Şekil 1.13’de gösterilmiştir. Bir sintilatörü uygun bir foto çoğaltıcı tüple eşleştirmek için dalga boyu bilgisi gereklidir. Ayrıca, sintilatörün ışık çıktısı sıcaklığa bağlı olarak değişiklik gösterebilir (Tsoulfanidis 1995).



**Şekil 1.13.** Sintilasyon detektörünün şematik diyagramı (Tsoulfanidis ve Landsberger 2015)

Bir sintilatörün ışıldama verimi, olay parçacığının enerjisinin görünür ışıığa dönüştürme oranı olarak tanımlanır ve bu verim mümkün olan en yüksek değerde olmalıdır. Alkali halojenler gibi sodyum iyodür, iyi sintilatör örneklerindendir. Sintilasyon dedektörleri genellikle düşük enerji çözünürlüğüne sahiptirler (Shimboyo

2013). Sintilatör bileşiminin yapısı gaz, sıvı ve katı halde olabilir. Organik, inorganik (kristal) ve gazlı sintilatörler olmak üzere üç tür sintilasyon dedektörü bulunmaktadır.

### 1.12.3. Yarı iletken dedektörler

Yarıiletken dedektörler, temel olarak iyonlaşma odaları gibi çalışan katı hal cihazlarıdır. Yarıiletkenlerdeki yük taşıyıcıları, gaz dolu dedektörlerdeki gibi elektronlar ve iyonlar değil, elektronlar ve "boşluklardır".

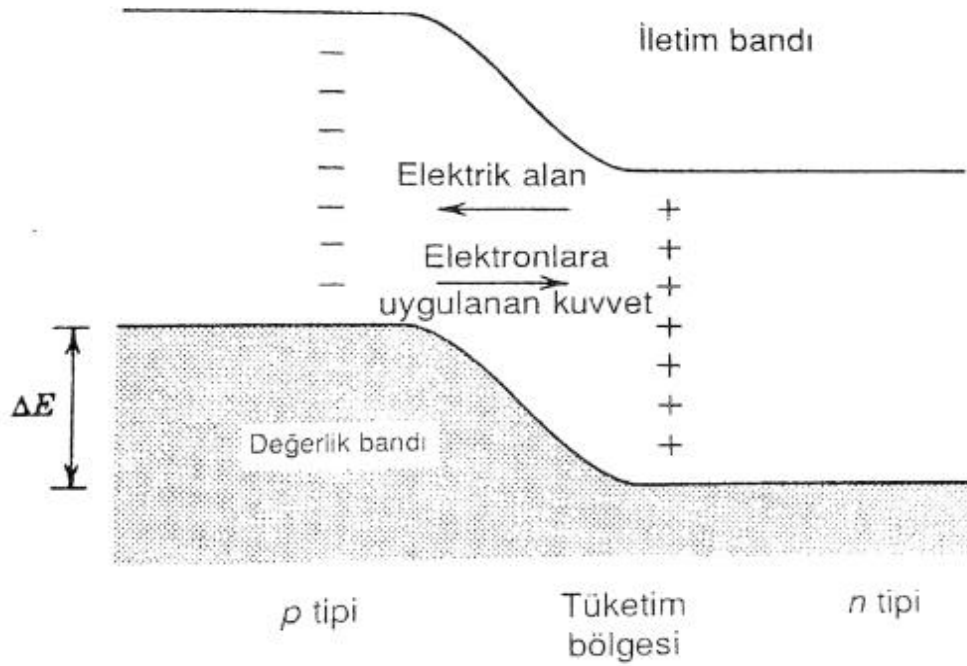
Yarıiletken dedektörlerin diğer radyasyon sayacı türlerine göre en önemli avantajı (polienenerjetik enerji spektrumundan parçacıkların enerjisini ayırt etme yeteneği) üstün enerji çözünürlüğüdür. Diğer avantajlar ise şunlardır:

- Geniş enerji aralığında doğrusal tepki (parçacık enerjisine karşı puls yüksekliği)
- Gaz dolu dedektörlere göre katının gazın yoğunluğuna kıyasla yüksek yoğunluğundan kaynaklı, verilen boyut için daha yüksek dedektasyon verimi
- Özel geometrik konfigürasyonlara olanak sağlama
- Gaz dolu dedektörlere göre daha hızlı puls yükselme süresi
- Vakumda çalışabilme yeteneği
- Manyetik alanlara karşı duyarsızlık

Bir yarıiletken dedektörün özellikleri, sadece kullanılan malzeme türüne değil (örneğin Si veya Ge) aynı zamanda yarıiletkenin nasıl üretildiğine, şekillendirildiğine ve işlendiğine de bağlıdır. Kristalin türü, boyutu, şekli ve işlenme şekli, bir yarıiletken dedektörün işleyişi ve performansında rol oynar (Tsoulfanidis ve Landsberger 2015).

Ge ve Si yarıiletkenleri, 4 değerlikli atomların birbirine dört kovalent bağ oluşturduğu kristal yapıya sahiptirler. Bu nedenle, tüm değerlik elektronları kovalent bağlar içinde bulunur, bu da bant yapısını bir dolu valans bandı ve bir boş iletim bandı ile şekillendirir. Bu malzemelerde, bir elektron, en az yasak enerji aralığı kadar enerji ile valans bandından iletim bandına geçebilir. İletim bandındaki elektronlar, dış elektrik alanın etkisi altında serbestçe hareket edebilir ve bir elektrotta toplanabilirler.

Yarıiletken dedektörler, n-p birleşimi olarak adlandırılan bir yapı içerir. Bu yapıda, n tipi yarıiletken ve p tipi yarıiletken, termodinamik açıdan iyi bir temas sağlayacak şekilde birleştirilir. Yarıiletken dedektörlerinde, iyonlaştırıcı radyasyon üzerine düştüğünde veya onlardan geçtiğinde, yarıiletken malzemenin tükenmiş bölgesinde elektron ve deşik adı verilen boşluk çiftleri oluşturulur. Bu elektron-deşik çiftleri, bir elektrik alan tarafından bölgeden uzaklaştırılır ve hareketleri, olay radyasyonu hakkında bilgi sağlayan temel bir elektriksel sinyal oluşturur. Şekil 1.14'de n tip ve p tipi metaryallerin temas ettirilmesi durumunda eklem yakınındaki elektron ve deşiklerin birleşerek yük taşıyıcılarının tükendiği bölge gösterilmektedir. Yüksek saflıkta germanyum dedektörü (HPGe), yarıiletken bir dedektörün iyi bir örneğidir (Shimboyo 2013).



**Şekil 1.14.** n ve p eklemi bant diyagramı (Krane 2001)

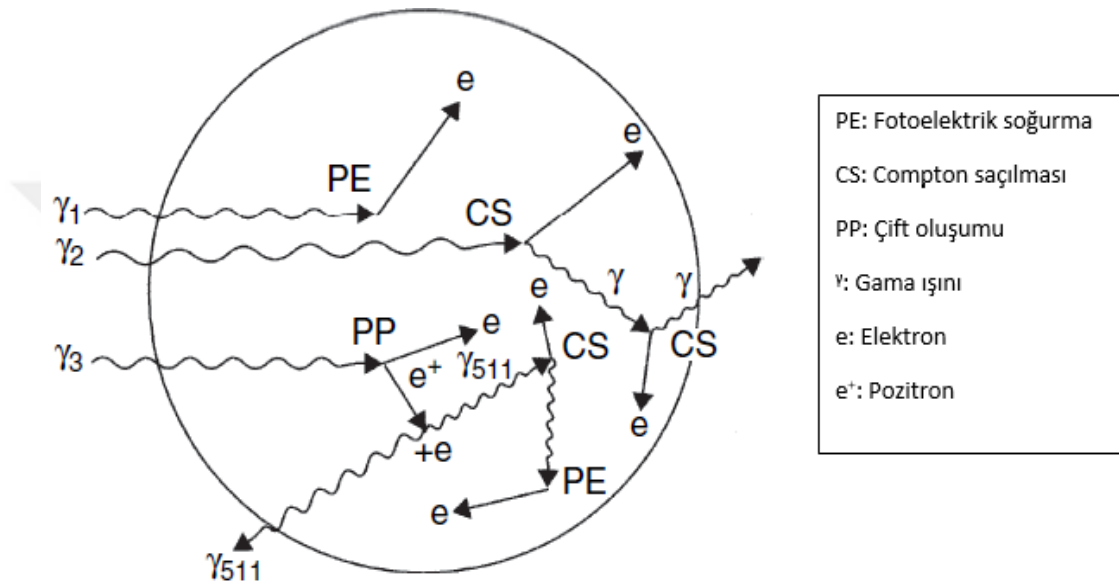
#### 1.12.3.1. HPGe dedektörleri

Germanyum dedektörleri, özellikle X-ışınları ve gama ışınları olmak üzere iyonlaştırıcı radyasyona duyarlı olan bir içsel bölgeye sahip p-n yapısına sahip yarı iletken diyetotlardır. HPGe dedektör diyetotları, ters gerilim uygulaması ile çalışırlar. Fotonlar yarı iletken yapının tükenmiş hacmi içinde malzeme ile etkileşime girdiğinde, yük taşıyıcıları (deşikler ve elektronlar) üretilir. Elektrik alan tarafından elektronlar bir tarafadeşikler diğer tarafa sürüklenir. Bu yük, gelen foton tarafından dedektöre aktarılan enerjiyle orantılıdır ve entegre yük duyarlı ön yükselteç tarafından bir gerilim pulsuna dönüştürülür. Ön yükselteç çıkışındaki küçük genlikli sinyaller, puls işleme sistemlerinde işlenemez. Bu nedenle, ön yükselteç çıkışındaki sinyaller yükselteçle şekillendirilir ve sinyal işleme sistemine uygun hale getirilir. Analog dijital dönüştürücü de gelen her puls, sayısal hale çevrilir ve çok kanallı analizörde genliği ile orantılı olarak bir hafıza kanalına yerleştirilir. Her kanal belli bir enerjiye karşılık gelir ve sayım süresince gelen pulsların birikmesiyle pikler oluşur.

Germanyumun nispeten düşük enerji boşluğu olduğundan, bu dedektörlerin şarj taşıyıcılarının termal üretimini (böylece ters sızdırmazlık akımını) kabul edilebilir bir seviyeye indirmek için soğutulmaları gerekmektedir. Aksi takdirde, sızıntı akımına bağlı gürültü dedektörün enerji çözünürlüğünü bozar. -196.15 °C sıcaklığına sahip sıvı azot, bu tür dedektörler için yaygın bir soğutma ortamıdır. Bu dedektörlerin enerji çözünürlüğü çok yüksektir, ancak küçük hacimleri nedeniyle duyarlılıkları düşüktür ve bir spektrum kaydetmek için birkaç dakika sürebilir (Shimboyo 2013).

Gelen gama enerjisine bağlı olarak dedektörle gama etkileşimleri; 1 Å-0.005 Å dalga boyu bölgesini kapsayan gama ışınları, üç cins etkileşim sonucu soğurulurlar. Bunların ilki tüm gama enerjisinin elektrona aktarıldığı fotoelektrik soğurmadır. İkincisi

gama ışınının bir atom elektronu tarafından Compton saçılmasına uğramasıdır. Böyle bir saçılma olayında gama ışını elektrona geri tepme enerjisi aktarırken kendisi demetin dışına saçılır. Her bir ardışık saçılma sonrasında, saçılan gama ışınının taşıdığı enerji azalır. Sonunda, enerji o kadar düşük olur ki fotoelektrik soğurmanın kaçınılmaz hale geleceği ve kalan gama ışını enerjisinin fotoelektronlara aktarılacağı bir durum oluşur. Sonuncusu ise, gamaların 1,022 MeV sınır enerjisi değerinden sonra kendini gösteren elektron-pozitron çiftinin yaratılması olayıdır. Düşük enerjilerde fotoelektrik saçılma en baskındır. Compton saçılmasının önemli olduğu 1 MeV' lik bir ara bölge bulunmaktadır. Gama enerjilerinin daha büyük değerleri için ise, çift oluşması daha çok görülmektedir. Şekil 1.15 her bir süreçle etkileşen gama ışınlarının etkileşimlerini göstermektedir.



**Şekil 1.15.** Gama ışını ölçümlerinde meydana gelen olaylar (Gilmore 2008)

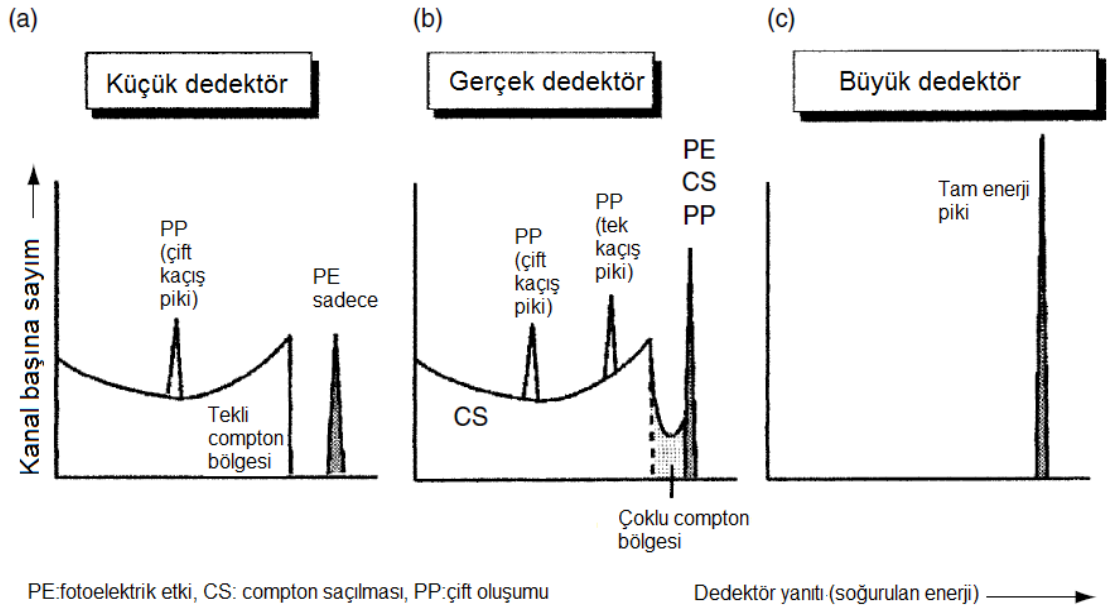
Çift oluşumu gerçekleştiğinde, gama ışını enerjisi, etkileşim sonucu oluşan elektron ve pozitron arasında ilk olarak eşit şekilde paylaşılır. Hem elektron hem de pozitron enerji kaybeder ve süreç içerisinde elektron-ışın çiftleri oluşturur. Pozitron, termal veya yakın termal enerjilere ulaştığında bir elektronla birleşerek 511 keV enerjili iki yok olma fotonunu açığa çıkararak yok edilir. Şekil 1.15, bu olayın Compton saçılması ve fotoelektrik soğurma kombinasyonu ile absorbe edildiğini gösterir.

Gama ışınları tek tek etkileşim geçmişlerine bağlı olarak farklılık gösterebilir, ancak aynı enerjideki gama ışınlarına karşı dedektör tepkisi sabit kalacaktır. Her gama ışını için, etkileşimin başlangıcına bakılmaksızın aynı dedektör tepkisi beklenir. Bu nedenle, böyle bir dedektörden gelen gama ışını spektrumu, kaynaktan yayılan her bir bireysel gama ışını enerjisiyle ilişkilendirilen tek bir tepe noktası içerecektir. Bu tepe noktaları "foto-tepeleri" olarak adlandırılır ve sadece fotoelektrik etkilerin sonucu olarak ortaya çıkar. Aynı şekilde, tam soğurum sonuçları aynı zamanda Compton saçılma ve çift oluşumu olaylarını içerebilir ve sonuç olarak bu tepe noktalarını tanımlamak için "tam enerji tepe noktası" terimi kullanılır (Gilmore 2008).

Dedektörün sınırlı hacmi nedeniyle, çift oluşumu olayları sonucunda ortaya çıkan yok olma (annihilasyon) fotonlarından birinin dedektörden dışarı çıkması mümkündür.

Bu durum gerçekleştiğinde, tam enerji pikinde gözlenen değer 511 keV eksik olur. Bu eksiklik spektrumda belirgin bir şekilde görülür ve bu pik tek kaçış piki olarak adlandırılır. Benzer şekilde, iki yok olma fotonu da dedektörden çıkarsa, tam enerji pikinde gözlenen değer 1022 keV eksik olur ve buna çift kaçış piki adı verilir. Her iki yok olma fotonu da tamamen absorbe olursa, bu durumda spektrumda tam enerji piki (foto-pik) gözlenir.

Compton saçılması sonucu dedektör içinde saçılan fotonlar, kalan enerjileriyle birlikte dedektörden dışarı çıkacaktır. Bu nedenle, dedektör, saçılma açısı  $0^\circ$  ile  $180^\circ$  arasında olan Compton bölgesinden, sıfır enerjiden pik yaparak Compton sınırı enerjisine kadar uzanan karakteristik Compton sürekliliği ile ilgili gama spektrumunu sergileyecektir. Spektrumda gözlenen bu bölgeye Compton bölgesi denir. Gama ışınları dedektöre girerken birden fazla Compton saçılması geçirebilirse, Compton sınırı ile foto-pik arasındaki enerji boşluğu doldurulur. Foto-pik, Compton bölgesi ve kaçma piklerinin yükseklikleri, dedektörün şekline ve boyutlarına bağlı olarak değişebilir. Büyük bir dedektörde, Compton saçılması sonucu meydana gelen fotonlar veya 511 keV'lik yok olma fotonları dışarı kaçma olasılığı daha düşüktür. Bu nedenle, düşük enerji bölgesinde çeşitli pikler oluşabilir. Farklı boyutlardaki dedektörlerden beklenen spektrumlar (Şekil 1.16(a)), (Şekil 1.16(b)) ve (Şekil 1.16(c)) gösterilmiştir.



**Şekil 1.16.** Farklı boyutlardaki dedektörlerden beklenen spektrumlar (Gilmore 2008)

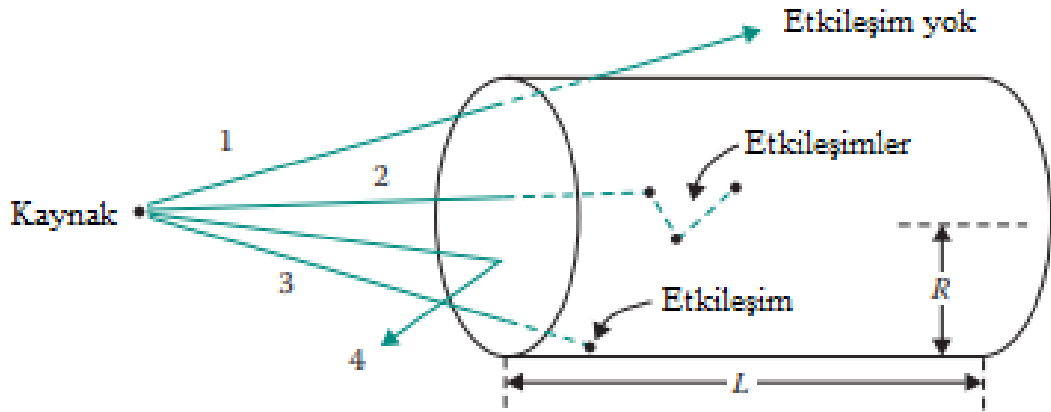
Bir diğer durum, geri-saçılma pikidir. Yayımlanan gama ışınları dedektörü çevreleyen materyaller ile de etkileşebilir bu durumda da gama spektrumunda geri saçılma pikleri gözlenir (Knoll 2000). Kaynaktan gelen gama ışınları, dedektör çevresindeki materyallerde Compton saçılması yapabilir ve enerjisinin düşmesiyle tekrar dedektöre girebilir.

### 1.13. Radyasyon Ölçüm Cihazlarının Genel Özellikleri

Bir dedektör, radyasyonun varlığını ve bazı özelliklerini ölçme yeteneğine sahip bir araçtır. Hiçbir dedektör tüm radyasyon tiplerine ve tüm enerji aralıklarına duyarlı değildir. Dedektörler genellikle bir veya daha fazla radyasyon türüne ve genellikle belirli bir enerji aralığına optimize edilmiştir. Uygulama için ideal algılayıcı, içsel verimlilik (duyarlık), elde edilebilir geometriler, tepki süresi, kullanılabilirlik, sinyal-gürültü oranı, çok yönlülük ve maliyet gibi önemli özelliklerin en iyi genel kombinasyonuna sahip olacak şekilde belirlenmelidir.

#### 1.13.1. Dedektör verimi

Bir parçacığın bir dedektöre girdiğinde sayılacağı kesin değildir. Parçacığın türüne ve enerjisine, dedektörün türüne ve boyutuna bağlı olarak etkileşim olmadan geçebilir (Şekil 1.17'deki parçacık 1); mevcut elektronik cihazlarla kaydedilmesi imkansız olan çok küçük bir sinyal üretebilir (parçacık 3); veya pencere tarafından dedektöre girişi engellenebilir (parçacık 4). Şekil 1.17'de, tespit edilme şansının en yüksek olduğu durum, parçacık 2'dir (Tsoulfanidis ve Landsberger 2015).



**Şekil 1.17.** Radyasyonun dedektör tarafından tespit edilme durumu (Tsoulfanidis ve Landsberger 2015)

Dedektör verimi, dedektörün radyasyonla etkileşime giren olayları tespit etme yeteneğini ifade eder ve dedektörlerin çeşitli parametrelerinin etkileşimi sonucu belirlenen önemli bir ölçüttür. Bu etkileşimler, dedektör hacmi, şekli, boyutları, kullanılan dedektör türü, kristal yoğunluğu gibi faktörlerin yanında radyoaktif kaynağın dedektöre olan uzaklığından etkilenir. Bu faktörlerin karmaşık etkileşimi, dedektör veriminin kesin bir şekilde hesaplanmasını gerektirir ve farklı radyasyon enerji seviyeleri ve türleri için farklı sonuçlar elde edilebilir (Smith ve Johnson 2018).

Gama ışını dedektörleri, çeşitli verim tanımları ile değerlendirilir.

**Mutlak Verim:** Kaynak tarafından yayılan gama ışınlarının dedektörde meydana getirdiği olay sayısının dedektör tarafından tespit edilen olay sayısına oranı. Dedektör verimliliği  $\epsilon$  olarak adlandırılır ve Denklem 1.42 gibi ifade edilir:

$$\varepsilon = \frac{\text{Birim zamanda kaydedilen parçacık sayısı}}{\text{Birim zamanda dedektöre çarpan parçacık sayısı}} \quad (1.42)$$

Bağıl verim (relative efficiency): Bir  $^{60}\text{Co}$  kaynağının 1332,5 keV gama ışın pikinin, 3"×3" boyutlarında NaI(Tl) ve HPGe dedektörlerinin uç kabından 25 cm mesafeye yerleştirildiği durumda, net sayım hızlarının  $^{60}\text{Co}$  kaynağının aktivitesine oranını ifade eder. Denklem 1.43'den belirlenir.

$$\text{Bağıl verim} = \frac{1332,5 \text{ keV pikinin net sayım hızı} * 100}{^{60}\text{Co kaynağının aktivitesi (Bq)} * 0,0012} (\%) \quad (1.43)$$

Bu oran, standart NaI(Tl) dedektörünün verimine göre hesaplanır; aynı mesafe ve enerjideki ölçülen verim yüzdesi, Ge veya başka bir dedektör için ifade edilir. Spektrumlar, 1332,5 keV pikinde en az 20000 sayım alınincaya kadar toplanmalıdır. 3"×3" boyutlarındaki NaI(Tl) dedektörleri, tekrarlanabilir şekilde üretilebildiği için 25 cm mesafede  $^{60}\text{Co}$  kaynağı ile yapılan ölçümlerde 1332,5 keV'deki sayım hızının Bq başına 0,0012 cps (saniye başına sayım) olduğu bilinmektedir. Bağıl verim ifadesi, geniş enerji aralığına sahip eş-ksenli dedektörlerle sınırlıdır. Düzlemsel ve diğer düşük enerjili dedektörler, 1332,5 keV'e kadar olan enerji aralığını kapsamak için tasarlanmadığından böyle bir ifade kullanılamaz (Uyar 2022).

Toplam verim (total efficiency): Spektrumda tespit edilen toplam sayımın kaynaktan yayınlanan gama ışını sayısına oranını ifade eder. Toplam verimin bilinmesi, özellikle gerçek zamanlı çakışma düzeltmesinin hesaplanmasında kritik bir parametredir.

Gama spektrometrisinde nicel analizler için gerekli olan ve dedektör performansını yansıtan en önemli parametre, deney verimliliği (Toplam Enerji Pik Verimi-FEPE) olarak bilinir. FEPE, belirli bir enerjideki fotopikin altındaki sayım sayısının kaynaktan yayılan sayıya oranını ifade eder. Gama spektrometresindeki enerji piklerinin analizi için gereken toplam enerji pik verimi (FEPE) değeri belirlenmelidir. FEPE değeri, radyoaktif çekirdek standartları kullanılarak Denklem 1.44 ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon(E) = \frac{\left[ \frac{N_p}{t_c} - \frac{N_b}{t_b} \right]}{A \cdot I_\gamma(E)} \cdot D \quad (1.44)$$

$N_p$  ifadesi, ilgilenilen fotopikin Compton sürekliliği çıkarılmış net sayımını temsil eder,  $t_c$  sayım süresini (s) belirtir.  $N_b$  ifadesi ise doğal fon spektrumundan elde edilen fotopikin Compton sürekliliği çıkarılmış net sayımını içerir ve  $t_b$  doğal fon sayım süresini (s) ifade eder.  $I_\gamma(E)$  ilgilenilen enerjinin gama ışını yayınlanma olasılığını gösterir;  $A$ , standart kaynağın aktivitesini (Bq) belirtir ve  $D$  kaynağın özelliklerine ve ölçüm düzenine bağlı farklı etkileri içeren düzeltme faktörlerinin bileşimini ifade eden katsayıdır (Uyar 2022).

### 1.13.2. Dedektör ölü zamanı

Neredeyse tüm dedektör sistemlerinde, iki olayın ayrı olarak kaydedilmesi için aralarında geçmesi gereken minimum bir zaman miktarının bulunması gerekmektedir. Bu minimum zaman ayırımı genellikle sayım sisteminin ölü zamanı olarak adlandırılmaktadır. Bu ölü zaman durumu, dedektörün kendisi ve sayma sisteminde kullanılan elektronik aygıtlar aracılığıyla belirlenir. Ölü zaman periyodunda meydana gelen sayım kayıpları, sistem tarafından birim zaman başına yapılan sayımlarda bir azalmaya yol açabilir ve ölü zaman kaynaklı kayıplar, yüksek sayım oranlarına ulaşıldıkça önemli ölçüde artış gösterebilir. Radyoaktif bozunumun rastgele doğası nedeniyle, bir gerçek olayın önceki bir olayı hızla takip etmesi durumunda kaybedilme olasılığı her zaman mevcuttur. Bu koşullar altında yapılan herhangi bir doğru sayım ölçümü, bu kayıpları hesaba katan düzeltmeleri içermelidir.

Sayma sistemlerinin ölü zaman davranışını anlamak için genellikle iki model kullanılmaktadır: uzatılan (paralyzable) ve uzatılmayan (non-paralyzable) modeller (Knoll 2000). Uzatılan modelde, ardışık iki doğru olay arasında en az bir  $\tau$  zaman aralığı bulunmazsa, ikinci bir çıkış pulsu sağlamak mümkün değildir. İlk olaya verilen cevap zamanı ( $\tau$ ), tam geri alma gerçekleşmeden önceki herhangi bir doğru olayla birlikte ek bir  $\tau$  zamanıyla daha da uzatılır. Bu modelde,  $\tau$  zamanının başlangıcındaki ve en sonundaki olaylar kaydedilir. Uzatılmayan modelde ise, bir  $\tau$  ölü zamanı boyunca meydana gelen olaylar elektronik aygıtı herhangi bir şekilde etkilemez. Bu durumda, aygıt her bir kaydedilen olayın ardından ölü zaman kadar işlem yapmaz (Evans 1955).

### 1.13.3. Dedektör enerji rezolüsyonu

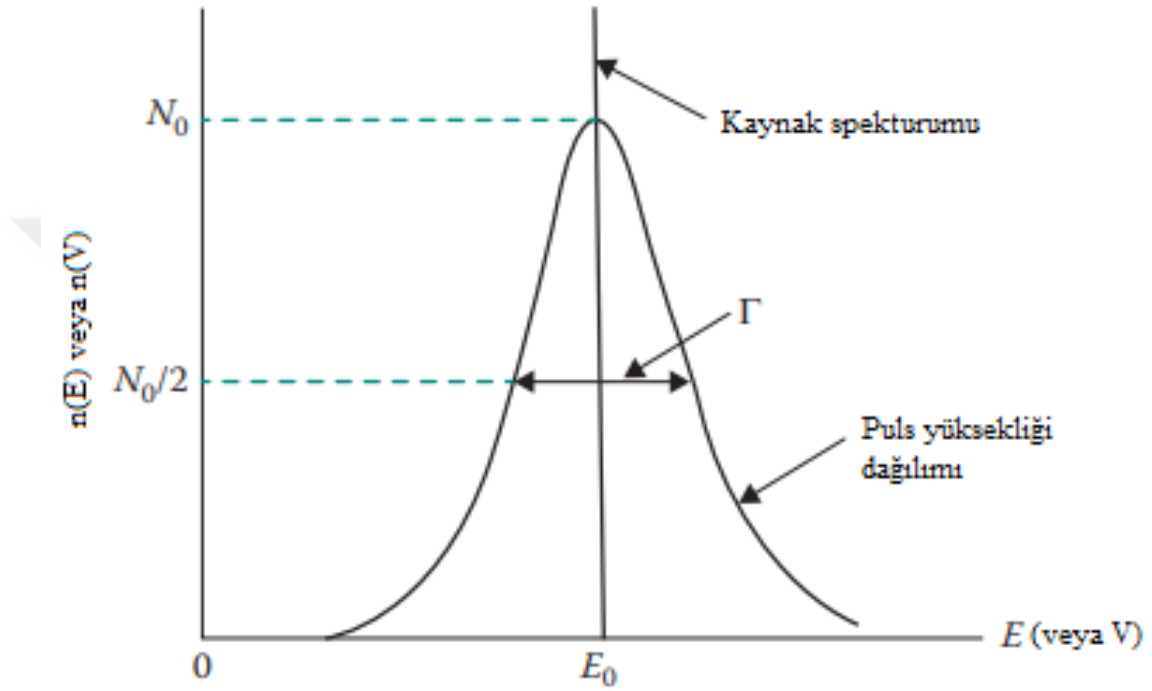
Enerji ölçümleri için kullanılan bir tespit sisteminin performans kalitesi, aynı enerjiye sahip parçacıklarla (monoenerjetik kaynak) elde edilen puls yüksekliği dağılımının genişliği ile karakterize edilir. Her bir parçacığın dedektöre tam olarak aynı enerjiyi depo ettiği durumda bile, puls yüksekliği dağılımı tek bir çizgi değil, bunun yerine belirli bir sonlu genişliğe sahip olacaktır. Bu durumun sebebi, dedektörde üretilen yük taşıyıcılarının sayısındaki istatistiksel dalgalanmalar, dedektörün kendisinden kaynaklanan elektronik gürültü, ön yükselteçten kaynaklanan elektronik gürültü ve yükselteçten kaynaklanan elektronik gürültü ile dedektörde üretilen yükün eksik toplanmasıdır.

Bir spektroskopik sistemin çözünürlüğü önemlidir. Bu, spektrumda oluşturulan piklerin genişliği ile belirlenir. Yüksek çözünürlük, sistemin birbirine çok yakın olan iki gama çizgisini ayırmasını sağlar (yani spektrumdaki tüm pikler ayrı ve belirgin olur). Bir dedektörün çözünürlüğünü ifade eden spektroskopik sistemlerin en yaygın özelliği, tam yüksekliğin yarısında olan genişliktir; bu, bir gama ışını pikinin en yüksek noktasının yarısında genişliğidir. Gauss dağılımı şeklindeki eğrinin maksimumunun yarısında ölçülen genişlik, FWHM veya  $\Gamma$  gösterilir. Bir dedektörün farklı enerjilere sahip parçacıkları tanıma yeteneği, enerji çözünürlüğü olarak adlandırılır ve  $R(E_0)$  ile gösterilir. Dedektör enerji çözünürlüğü ifadesi Denklem 1.45'den elde edilir.

$$R(E_0) = \frac{FWHM}{E_0} \quad (1.45)$$



FWHM, enerji birimlerinde verilirken,  $R(E_0)$  yüzde olarak verilir. Bir radyasyon tespit sisteminin enerji çözünürlüğünü etkileyen en önemli faktörler, yukarıda genişlik FWHM ile ilgili olarak bahsedilen üç istatistiksel faktördür. Enerji ölçümlerinde önemli olan, sadece dedektörün değil, sayma sisteminin (dedektör-ön yükselteç-yükselteç) enerji çözünürlüğüdür ve istatistiksel dağılımın bir ölçüsüdür. FWHM değeri ne kadar küçük olursa dedektörün birbirine yakın enerjilere sahip iki radyasyonu ayırabilme yeteneği o kadar iyi olacaktır. (Tsoulfanidis ve Landsberger 2015). Gama ışını spektrometresinin enerji çözünürlüğünü gösteren diyagram Şekil 1.18’de verilmiştir.



**Şekil 1.18.** Gama ışını spektrometresinin enerji çözünürlüğü grafiği (Tsoulfanidis ve Landsberger 2015)

#### 1.14. Radyasyon Kaynakları

Radyasyon kaynakları genel olarak doğal ve yapay olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir.

##### 1.14.1. Doğal radyasyon kaynakları

Radyasyonun üç tür doğal kaynağı bulunmaktadır: kozmik, yerel ve içsel kaynaklar. Bu kaynaklardan gelen maruziyet genellikle oldukça düşüktür ve dolayısıyla vücudumuza ölçülebilir bir zarar vermez. Ancak, çevremizde potansiyel olarak tehlikeli olabilecek maddeler, örneğin radyon gibi, bulunmaktadır ve bu maddeler yüksek entegre dozlar sağlama yetenekleri nedeniyle endişe kaynağı olabilir.

Kozmik Radyasyonun kaynağı, uzaydan gelen, yanmış (örneğin güneşimiz) ve patlamış (örneğin süpernova) yıldızlar gibi çeşitli kaynaklardan gelen radyasyondur. Bu cisimler büyük miktarda radyasyon üretir; dünya atmosferi, güneşin ultraviyole ışınlarını

engelleyen bir zırh görevi görür. Ancak, zararlı radyasyonun tamamı engellenmez ve bazıları yeryüzüne ulaşır. Uzun süre güneş ışığına maruz kalan insanlarda cilt yanıklarına ve kansere neden olabilir. Bu yerel kaynakların yanı sıra, düşük enerjili fotonlardan oluşan bir arka plan radyasyonu da bulunur. Bu radyasyon, bu evrenin oluşumundan kalma Büyük Patlama'nın kalıntısı olarak kabul edilir. Elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde en yüksek seviyede olan foton spektrumu nedeniyle kozmik mikrodalga arka plan radyasyonu olarak bilinir. Bu fotonlar dünya yüzeyine ulaşsa da düşük enerjileri nedeniyle zararlı olarak kabul edilmez. Uzayda parlak cisimler tarafından doğrudan ya da diğer kozmik parçacıkların üst atmosferdeki atomlarla etkileşime girdiğinde üretilen muonlar ve nötrinolar da düşük etkileşim yetenekleri nedeniyle dünyaya ulaşmayı başarır, ancak aşırı düşük etkileşim kesitleri nedeniyle sağlık açısından tehlikeli olarak kabul edilmez.

Yerel radyasyon, etrafımızda küçük miktarlarda bulunur ve neredeyse kaçınılmazdır. Çevremizde, içtiğimiz su, soluduğumuz hava ve tükettiğimiz yiyecekler, hepsi radyasyon yayıcı izotopların az miktarlarıyla kirletilmiştir. Bu izotoplar genellikle oldukça tehlikeli olabilirler, ancak normal konsantrasyonlardan daha yüksek seviyelerde bulunmadıkça vücudumuza ciddi zarar vermezler. Yerel radyasyonun başlıca kaynağı uranyum elementi ve uranyumun bozunma ürünleri olan toryum, radyum ve radon'dur. Bu radyoaktif maddelerin doğal konsantrasyonu, genellikle insanlar için kabul edilebilir seviyelerdedir. Ancak, dünya genelinde bazı bölgelerde yüzey toprağında daha yüksek uranyum ve toryum seviyelerine rastlanması, radyasyon seviyelerini tehlikeli bir düzeye çıkarmıştır. Malesef, nükleer kazalar, nükleer silah denemeleri ve nükleer atıkların salınımı gibi etkiler, doğal radyasyon seviyelerinde artışa yol açmıştır. Radon'un iki izotopu,  $^{222}\text{Rn}$  ve  $^{220}\text{Rn}$ , ve bunların kız izotopları, çevremizde en yaygın olarak bulunan tehlikeli radyoaktif elementlerdir. Bu  $\alpha$  yayıcı izotoplarla ilgili en büyük endişe noktası, bu izotopların solunum veya sindirilme yoluyla alınmasıdır; bu durumda kısa menzilli  $\alpha$  parçacıkları iç organlara zarar vererek kansere yol açabilir.

İçsel radyasyon, vücuttaki izotopların dokulara sürekli olarak düşük seviyede radyasyon yaydığı radyasyondur. Bununla birlikte, bu radyasyon nedeniyle absorbe edilen doz ve dokulara verilen zarar minimaldir. İçsel radyasyonun ana kaynağı  $^{40}\text{K}$  ve  $^{14}\text{C}$  izotoplarıdır.

#### 1.14.2. Yapay radyasyon kaynakları

Radyasyonun keşfi ve potansiyellerinin farkına varılmasının hemen ardından, bilim insanları laboratuvar ortamlarında kontrol edilerek radyasyon üretebilecek kaynaklar geliştirmeye başladılar. Bu kaynaklar belirli amaçlar için yapılmıştır ve genellikle bir tür radyasyon yaymaktadır. Bu tür kaynaklara tıbbi röntgen cihazları, havalimanı x-ışını tarayıcıları, nükleer ilaçlar, parçacık hızlandırıcılar ve lazerler örnek olarak verilebilir. Tüm bu kaynaklar arasında, tıbbi teşhis ve tedavide kullanılanlar halkı en büyük radyasyon miktarına maruz bırakır. Ayrıca asıl amacı farklı olsa da televizyon, duman dedektörleri ve yapı malzemeleri gibi, bazı tüketici ürünleri de radyasyon yayabilir (Ahmed 2007).

### 1.15. X-Işını Floresans (XRF) Spektrometresi Tekniği

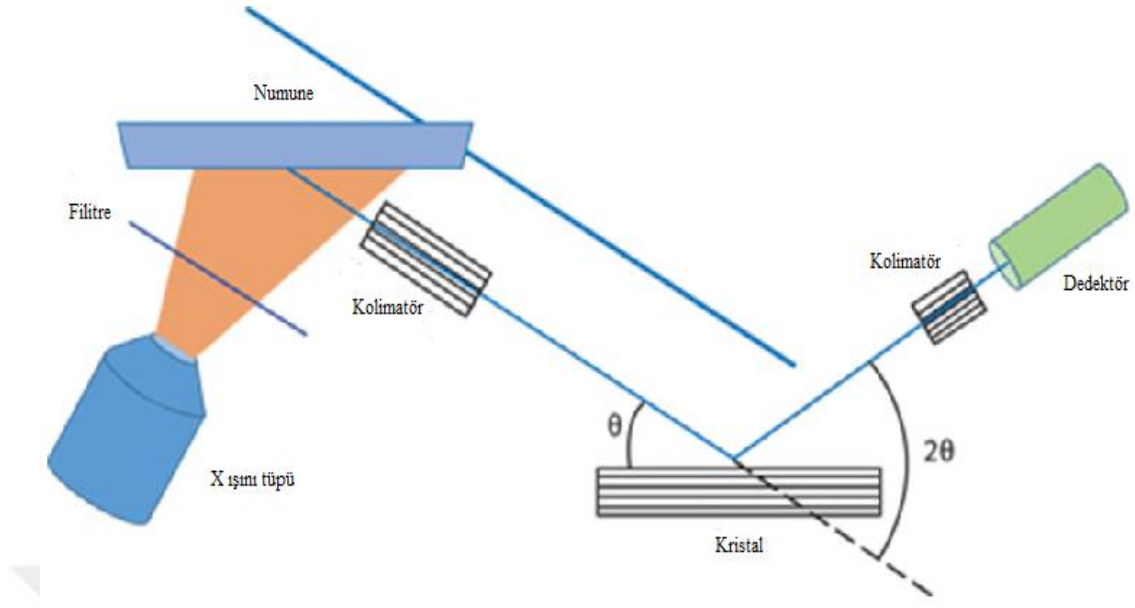
Bir maddeyi geçen X ışını demeti, saçılma ve fotoelektrik soğurma sonucu zayıflatılır. Bu iki etkiden daha büyük olanı genellikle soğurmadır ve soğurma işleminin büyüklüğü, yani absorban madde içinden geçerken kaybedilen gelen X ışını fotonlarının oranı, absorbe eden ortamın ortalama atom numarasının artışıyla önemli ölçüde artar. Birinci yaklaşıma göre, kütle soğurma katsayısı absorban maddenin atom numarasının üçüncü kuvvetine göre değişir. Bu nedenle, polikromatik bir X ışını demeti heterojen bir malzemeden geçirildiğinde, daha yüksek ortalama atom numarasına sahip bölgeler, daha düşük atom numarasına sahip bölgelere göre demeti daha fazla zayıflatacaktır. Bu nedenle absorban maddeden çıkan radyasyon demeti, örneğin alan boyunca yoğunluk dağılımına sahip olacaktır ve bu da aynı alandaki ortalama atom numarası dağılımıyla ilişkilidir. Tüm X ışını radyografisi yöntemlerinin temelinde bu prensip yatmaktadır. X ışınları kullanarak malzemelerin incelenmesi, kullanılan tüm x ışını yöntemlerinin en eski olanıdır.

Bireysel karakteristik dalga boylarını izole etmek ve ölçmek için kullanılan teknik x ışını spektrometrisi olarak adlandırılır. Bu teknik, ya dar dalga boylu bantları izole etmek için bir tek kristalin kırınım gücünü ya da örnekte uyarılmış polikromatik ışın karakteristik radyasyonunun dar enerji bantlarını izole etmek için bir orantılı dedektörü kullanır. İlk yöntem Dalga Boyu Ayrımlı Spektrometri (WD-XRF) denirken ikincisi Enerji Ayrımlı Spektrometri (ED-XRF) olarak adlandırılır. Yayınlanan dalga boyu ile atom numarası arasındaki bağlantı bilindiğinden, özel karakteristik çizgilerin ayrıştırılması, bir elementin tanısının konulmasına olanak sağlar ve karakteristik çizgi yoğunluklarından element konsantrasyonları tahmin edilebilir.

#### 1.15.1. Dalga boyu ayrımlı X-Işını Floresans Spektrometresi (WD-XRF)

WD-XRF spektrometre birincil x-ışınlarının ilk önce numune üzerine, daha sonra numuneden çıkan ikincil ışınları da özel kristallerde yansıtıldıktan sonra ışınları dedektöre göndermesi esasına dayanır. WD-XRF spektrometrelerinde çözünürlük kristalin ayırma gücüne ve kolimatörlerin demet sapmalarını kontrol edebilme (X-ışını demeti paralel hale getirebilme) yeteneğine bağlıdır.

ED-XRF spektrometrelerinde çözünürlük tamamen detektörün ve detektör amplifikatörünün ayırma gücüne bağlıdır. WD-XRF spektrometrelerinin çözünürlüğü 10 ila 100 eV arasında değişirken, ED-XRF spektrometrelerinin çözünürlüğü 150 ila 200 eV aralığındadır (Jenkins 1999). Bu durumda, WD-XRF spektrometreleri, yakın iki çizgiyi daha iyi ayırabilirken, ED-XRF spektrometrelerine göre daha kontrol edilebilir çözünürlük sunar ve farklı kristal/kolimatör kombinasyonlarıyla daha esnek bir ayırma gücü sağlar. WD-XRF spektrometresi şematik gösterimi Şekil 1.19'da gösterilmiştir.



**Şekil 1.19.** WD-XRF spektrometresi şematik gösterimi (Schramm 2016)

Şekil 1.19’da gösterilen, analiz kristali, Bragg Yasası ( $n\lambda = 2d \sin\theta$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$  burada  $d$ , kristal kafes aralığına eşittir) uyarınca gelen  $\lambda$  dalga boyundaki radyasyonu açısal olarak saçar. Genel olarak kristalin  $d$ -uzaklığı ne kadar küçükse, çizgilerin ayrışması o kadar iyi olur, ancak kapsanabilecek dalga boyu aralığı o kadar küçülür. Bu uygulamada kristal ve dedektör  $\theta$  ve  $2\theta$  açılarına ayarlanarak yeterli sayıda sayım alınır. Bu düzende, analiz kristali, olası dalga boylarını taramak için etrafında dönen detektör düzeneği ile birlikte eş zamanlı olarak döndürülebilir. Farklı bölgelerdeki dalga boylarını çözebilmek için farklı kristaller kullanmak gereklidir, çünkü uzun dalga boyları için geniş aralıklı kristaller tercih edilirken, düşük  $\theta$  değerlerinde (düşük açısal değerlerde) kısa dalga boylarını çözmek zorlaşır ve bu tür durumlar için özel çözümler gerekebilir (Jenkins 1999).

#### **1.15.2. X-Işını Floresans (XRF) Spektrometresi Tekniği kullanım alanları ve kimyasal analiz**

Kimyasal analiz, maddelerin bileşimini ve özelliklerini belirlemek için temel bir yöntemdir. XRF (X-ray Floresans) tekniği, malzemelerin kimyasal bileşimini hızlı, hassas ve tahribatsız bir şekilde belirlemek için geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Bu teknik, örnekler üzerine yüksek enerjili X-ışınlarının gönderilmesi ve bu ışınların örnek içindeki atomlarla etkileşerek karakteristik X-ışını ışınları yayması prensibine dayanır. Yayılan bu karakteristik X-ışınları, örnek içinde bulunan elementlerin varlığını ve yoğunluğunu belirlemek için analiz edilir. Bu yöntemin en büyük avantajlarından biri, numunelerin özel bir hazırlık gerektirmeden analiz edilebilmesidir, bu da hızlı sonuçlar elde etmeyi mümkün kılar.

XRF tekniği oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu teknik, endüstriyel sektörde madenlerden metalurjiye, çevre analizinden gıda kontrolüne kadar birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Metalurjik analizlerde, farklı elementlerin alaşım bileşimleri hızlı bir şekilde tespit edilebilir. Çevre analizinde ise toprak ve su örneklerindeki

kirleticiler belirlenebilir. Arkeoloji ve sanat tarihi çalışmalarında, tarihi objelerin bileşimi ve kökeni hakkında bilgi edinme imkanı sağlar. Ayrıca, ilaç, gıda ve malzeme endüstrilerinde kalite kontrol ve sahtecilik tespiti için kullanılmaktadır.

XRF tekniğinin önemli bir avantajı, çoklu element analizine olanak tanınmasıdır. Aynı örneğin içerisinde bulunan birçok farklı elementin aynı anda analiz edilmesi mümkündür. Bu durum, zaman tasarrufu sağlar ve birden fazla özelliğin aynı anda belirlenmesine imkan verir.

X-ışını floresans analizi ile incelenebilecek birçok örnek türü bulunmaktadır ve incelenecek örneğin yapısı genellikle analizden önceki ön işlem yöntemini belirleyecektir. Örnekler genellikle üç kategoriye ayrılabilir: Basit pelletleme veya yüzey hazırlama gibi bazı basit ön işlemler sonrasında doğrudan işlenebilecek örnekler; önemli ön işlem gerektiren heterojen malzemeler ve özel işlem gerektiren radyoaktif örnekler. Çoğu zaman belirli malzemelerin doğrudan analizi mümkün olup, böylece analiz öncesi ön işlem sırasında ortaya çıkabilecek sorunlar ve örnek kontaminasyonu riski önlenir. Ancak bazı durumlarda analiz öncesi numune için ön işlem gereklidir, bu adım numune hazırlığı olarak adlandırılır. Pratikte, ideal durumun gerçekleştirilmesini engelleyebilecek iki ana sınırlama bulunmaktadır: numune boyutu ve numune heterojenliği. Özellikle metaller ve büyük kaya parçaları gibi toplu malzemelerde numune boyutuyla ilgili sorunlar sıkça yaşanır. Numune heterojenliği sorunları ise genellikle bu tür durumlarda ortaya çıkar ve toz halindeki malzemelerin analizinde numune heterojenliği her zaman göz önünde bulundurulmalıdır (Jenkins 1999).

#### **1.16. Ağır Metaller ve Makro, Mikro, İz, Ultra-İz Elementler**

Ağır metaller olarak adlandırılan elementlerin çoğunun özgül ağırlıkları beşten büyük olmasına rağmen, bu kuralın büyük istisnaları bulunmaktadır. Ağır metal terimi, genellikle çevresel sorunlarla ilişkilendirilen ve düşük konsantrasyonlarda bile toksik veya zehirleyici etkileri olan metalleri ifade etmektedir. Bu gruba Ag, As, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, V, Zn gibi en yaygın bilinen 60'tan fazla metal dahildir. Bu elementler, genellikle doğal olarak yerkürede karbonat, oksit, silikat ve sülfür gibi stabil bileşikler halinde veya silikatlar içinde bağlı olarak bulunurlar (Bingöldağ 2017). Şekil 1.23, çevresel açıdan önemli ağır metal elementlerini içeren periyodik tabloyu göstermektedir. Aynı şekilde, sıkça rastlanan hafif alkali ve alkali toprak metalleri de aynı tabloda yer almaktadır. Kimyasal açıdan bakıldığında, ağır metaller geçiş ve son geçiş elementleri ile arsenik ve selenyum gibi yarı metal elementlerini içerirler. Aslında, sodyum, kalsiyum ve diğer hafif metallerden belirgin şekilde daha ağırdırlar (yani daha yüksek özgül ağırlığa sahiptirler).

Bu ağır metal elementleri genellikle toprak, su ve havada farklı oksidasyon hallerinde bulunurlar. Bu metallerin su içindeki tepkime yetenekleri, iyon yükleri ve su içindeki çözünürlükleri büyük ölçüde değişkenlik gösterir. Kurşun, kadmiyum, arsenik, krom ve cıva gibi ağır metaller, düşük konsantrasyonlarda bile tehlikeli bileşikler olarak kabul edilir. Öte yandan, demir, kobalt, çinko ve bakır gibi ağır metaller, düşük konsantrasyonlarda canlı yaşamsal hücre bileşenleri olan mikro besin maddeleri olarak gereklidir. Ancak yüksek konsantrasyonları toksik etkilere neden olabilir. Bu elementlerin toksisite etkileri, bu nedenle büyük ölçüde konsantrasyona bağlıdır.

Buna karşılık, gereksiz ağır metal elementleri ise tüm konsantrasyonlarda inhibe edicidir. Bu metaller doğada kolayca bulunabilir ve parçalanabilirlikleri düşük olduğundan deniz suyu, toprak ve temiz su kaynaklarında birikme eğilimi gösterirler. Bu birikim sonucunda çevresel ağır metal kirliliği ortaya çıkar ve ekosistem dengesine zarar verebilir. Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı tarafından belirlenen hafif metaller arasında Na, Mg, K, Ca ve Al, ağır metaller kategorisinde Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Cd, Hg, Tl ve Pb, ayrıca metaloidler sınıfında ise As, Se ve Sb bulunmaktadır (SenGupta, 2001).

Makro elementler, genellikle yetişkinlerin günlük olarak 100 mg'dan daha fazla miktarda ihtiyaç duyduğu veya vücut ağırlığının %1'inden azını temsil eden elementler olarak tanımlanır. Bu makro elementler arasında magnezyum (Mg), kalsiyum (Ca), sodyum (Na), klorür (Cl), potasyum (K) ve fosfor (P) bulunmaktadır.

Mikro elementler adı verilen başka bir element grubu, genellikle yetişkinlerin günlük olarak 1 ila 100 mg arasında ihtiyaç duyduğu veya vücut ağırlığının %0.01'inden daha azında bulunan elementlerdir. Bu kategoriye çinko (Zn), bakır (Cu) ve demir (Fe) gibi elementler dahildir.

İz elementlerin temel yayılım kaynağı doğal kaynaklardır. Rüzgarla taşınan tozlar (Cr, Co, Mn, Zn, Pb, Cu, V, As, Ni), deniz tuzu spreyi (Na, Cl, V, As), volkanlar (Cu, Zn, V), vahşi orman yangınları (Cu, Zn), biyogenik kıtasal parçacıklar (Cu), biyogenik kıtasal uçucular (As, Se, Zn) ve deniz (As, Zn) bu iz elementleri ve yayılım kaynaklarını içermektedir. Antropojenik kaynaklar, iz elementlerinin ikinci büyük kaynağı olarak ortaya çıkar ve endüstriyel süreçlerin, fosil yakıtların yanması, araç emisyonları, madencilik ve metal eritme, endüstriyel işlemler ve yerel yönetimlerin atık yakma gibi faaliyetleri, çeşitli iz elementlerini atmosfere salmaktadır. Bu iz elementleri arasında karayolu taşımacılığı, motorlu araç emisyonları (Br, Pb, Ba, Cl, Zn, V, Ni, Se, Sb, As), motor aşınması (Fe, Al), lastik aşınması (Zn), yol kenarı tozu (Al, Si, K, Ca, Ti, Fe, Zn), endüstriyel tesisler, kömür yanması (Se, As, Cl, Cu, Al, S, P, Ca), rafineriler (V), demir ve çelik fabrikaları (As, In, Cu, Zn, Pb), bakır endüstrisi (Cu), küçük ölçekli yanma endüstrileri, atık yakma tesisleri (Zn, Sb, Cu, Cd, Hg, K, Pb), odun yakımı (Ca, Na, K, Fe, Br, Cl, Cu, Zn), mineralizasyon ve hammadde işleme (Mg, Al, K, Mn, Fe, Se) bulunmaktadır. Bu faaliyetler neticesinde Cu, Pb, Zn ve Fe gibi iz elementler en yaygın şekilde atmosfere salınmaktadır (Goli 2017).

Ultra-iz elementler, ise genellikle ( $\leq 1$ ) mg/gün miktarında ihtiyaç duyulan elementleri ifade eder. Bu grupta ise manganez (Mn), florür (F), krom (Cr), selenyum (Se), kobalt (Co), silikon (Si), iyot (I), bor (B), molibden (Mo), nikel (Ni), lityum (Li), kadmiyum (Cd), arsenik (As), kurşun (Pb) ve vanadyum (V) gibi elementler bulunmaktadır (Ramadhan 2017).

## 2. KAYNAK TARAMASI

Radyasyona maruz kalma değerinin belirlenmesinde, doğal ve yapay radyonükleotitlerin etkileri toprak, su ve gıda üzerinde yapılan uzun yıllara dayanan çalışmalarla araştırılmaktadır. Son yıllarda ise bu çalışmalar sediment örnekleri üzerinde de yoğunlaşmıştır.

Topraktaki doğal ve yapay radyonükleotitlerin belirlenmesine yönelik çalışmalardan bazıları aşağıda örnek olarak verilmiştir:

Kaya vd. (2020) çalışmalarında, Gümüşhane ilindeki ortam radyasyon düzeyini belirlemeyi hedeflemişlerdir. Çalışma kapsamında, taşınabilir bir gama dedektörü kullanarak havada soğurulan gama doz oranlarını ölçmüşlerdir. Jeolojik yapı dikkate alınarak 62 farklı noktadan toprak örnekleri almışlar ve toprak numunelerindeki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  aktivite konsantrasyonlarını gama spektrometrik analiz sistemiyle ölçmüşlerdir. Ayrıca, Gümüşhane İli'nin farklı noktalarından 77 adet doğal ve musluk suyu numunesi toplamışlardır. İzme suyundaki brüt alfa ve beta aktivite konsantrasyonlarını da alfa ve beta sayım sistemiyle belirlemişlerdir. Toprak örneklerindeki aktivite konsantrasyonlarının,  $^{226}\text{Ra}$  için 1,23 ila 120,34 Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  için 1,86 ila 159,5 Bq/kg,  $^{40}\text{K}$  için 50,89 ila 1223,  $^{137}\text{Cs}$  için ise 0,1 ila 21,47 Bq/kg aralığında değiştiğini belirtmişlerdir. Elde ettikleri verilere göre, ortalama radyum eşdeğer aktivitesinin ( $R_{\text{eq}}$ ) 7,45 ila 434 Bq/kg arasında olduğunu, havada gama soğurulan doz hızlarının (D) 3,7-202,9 nGy/h aralığında ve aritmetik ortalamasının 61 nGy/h olduğunu, yıllık etkili doz hızlarının (AEDR) 4,67-248,8  $\mu\text{Sv/y}$  aralığında ve dış tehlike indeksinin ( $H_{\text{ex}}$ ) ise 0,02-1,19 arasında olduğunu belirtmişlerdir (Kaya vd. 2020).

Abojassim ve Rasheed (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Bağdat valiliği içindeki çeşitli yerleşim alanlarından 114 toprak örneği toplanmıştır. Toprak numunelerinin spesifik gama ışını aktivitesi için doğal olarak oluşan  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonükleotitlerini NaI(Tl) detektörü kullanarak spektroskopik olarak ölçmüşlerdir. Karasal gama radyasyonunun spesifik aktivitesinin Karkh tarafında ( $^{238}\text{U}$  için  $(16,5 \pm 0,9)$  Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  için  $(9,7 \pm 0,4)$  Bq/kg ve  $^{40}\text{K}$  için  $(368 \pm 11)$  Bq/kg), Rasafa tarafında ise sırasıyla  $(17,4 \pm 1,0)$  Bq/kg,  $(9,1 \pm 0,3)$  Bq/kg ve  $(381 \pm 22)$  Bq/kg olduğunu belirlemişlerdir (Abojassim ve Rasheed 2021).

Jananee vd. (2021) çalışmalarında, Hindistan'ın Tamil Nadu eyaletinde bulunan Elephant Hills topraklarında doğal radyonükleotitlerin aktivite konsantrasyonlarını ve ilişkili radyasyon risklerini gama ışını spektrometrisi kullanarak belirlemişlerdir.  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'nin ortalama aktivite konsantrasyonlarını sırasıyla 52, 48 ve 840 Bq/kg olarak tespit etmişlerdir. Ayrıca, ortalama doz hızının 89 nGy/h olduğunu ve dünya ortalamasından yaklaşık 1,5 kat daha yüksek olduğunu, ancak ortalama yıllık etkili doz eşdeğerinin (AEDE) önerilen sınırının altında olduğunu belirtmişlerdir (Jananee vd. 2021).

Alasadi ve Abojassim (2022) çalışmalarında, Irak'ın Necef Valiliği, Kufa ilçesinden alınan toprak örneklerinde  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  'in doğal radyoaktivite düzeylerini belirlemeyi ve haritalamayı amaçlamışlardır. Tüm örneklerde  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  için spesifik aktiviteye dayanarak radyolojik parametreleri hesaplamışlardır. Çalışmada,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve  $^{235}\text{U}$  için tüm örneklerin standart hata ile ortalama

değerinin sırasıyla  $6,2 \pm 0,74$ ,  $6,41 \pm 0,82$ ,  $278,10 \pm 19,43$  ve  $0,28 \pm 0,03$  Bq/kg olduğunu belirtmişlerdir. Tüm toprak örneklerinde  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve  $^{235}\text{U}$  'in spesifik aktivitesinin UNSCEAR tarafından rapor edilen güvenlik sınırı içinde olduğunu ( $^{238}\text{U}$  için 33 Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  için 45 Bq/kg ve  $^{40}\text{K}$  için 420 Bq/kg) ancak üç örnekte  $^{40}\text{K}$  'ın güvenlik sınırının üzerinde olduğunu belirtmişlerdir (Alasadi ve Abojassim 2022).

Ozaydin Ozkara vd. (2021), Konya ili Seydişehir ve Beyşehir ilçelerinden alınan toprak örneklerinde  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve  $^{137}\text{Cs}$ 'nin aktivite konsantrasyonlarını gama ışıını spektrometresi kullanarak belirlemişlerdir.  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonlarından radyolojik risk parametrelerini hesaplamışlardır. Elde edilen verilere göre, toprak numunelerinin  $^{226}\text{Ra}$  için  $18 \pm 1$  Bq/kg ile  $64 \pm 1$  Bq/kg arasında değiştiği ve ortalama değerin  $42 \pm 1$  Bq/kg olduğu,  $^{232}\text{Th}$  için  $22 \pm 1$  Bq/kg ile  $83 \pm 2$  Bq/kg arasında değiştiği ve ortalama değerin  $54 \pm 2$  Bq/kg olduğu,  $^{40}\text{K}$  için  $119 \pm 4$  Bq/kg ile  $654 \pm 10$  Bq/kg arasında değiştiği ve ortalama değerin  $338 \pm 7$  Bq/kg olduğu,  $^{137}\text{Cs}$  için  $3,9 \pm 0,2$  ile  $13,3 \pm 0,4$  Bq/kg arasında değiştiği ve ortalama değerin  $8,5 \pm 0,3$  Bq/kg olduğu raporlanmıştır. Ayrıca, çalışmada  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{232}\text{Th}$  ortalama radyoaktivite konsantrasyonlarının dünya ortalamasından yüksek,  $^{40}\text{K}$  ortalama radyoaktivite konsantrasyonunun ise dünya ortalamasından düşük olduğu belirtilmiştir. Absorbe edilen gama doz hızı ve yıllık etkin doz eşdeğerinin ortalama değerlerinin dünya ortalamasının üzerinde olduğu, ancak radyum eşdeğer aktivitesinin ortalama değerinin dünya ortalamasının altında tespit edildiğini bildirmişlerdir (Ozaydin Ozkara vd. 2021).

Ozdemir vd. (2021) çalışmalarında, Bartın ilinden alınan toprak örneklerinin radyoaktivite seviyelerini HPGe dedektörü kullanarak belirlemiş ve tehlike parametrelerini hesaplamışlardır. Ortalama konsantrasyon değerlerinin  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  ve  $^{226}\text{Ra}$  için sırasıyla  $6 \pm 2$ ,  $7 \pm 3$ ,  $136 \pm 15$ ,  $2 \pm 1$  ve  $8 \pm 3$  Bq/kg olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, ortalama radyum eşdeğerini, emilen gama doz hızını, yıllık etkin doz eşdeğerini, dış tehlike indeksini ve yaşam boyu kanser riskini sırasıyla 26.74 Bq/kg,  $12 \pm 3$  nGy/h,  $15 \pm 3$   $\mu\text{Sv/y}$ ,  $0.1 \pm 0.02$  ve  $0.053 \pm 0.011$  olarak belirlemişlerdir. Ölçülen ve hesaplanan tüm değerlerin limit değerlerin altında olduğu sonucuna varmışlardır (Ozdemir vd. 2021).

Rosianna vd. (2020) çalışmalarının, Endonezya'nın yüksek doğal radyasyona maruz kalan Mamuju bölgesindeki kayaları sınıflandırmak ve bölgenin potansiyel bir maden alanı olarak keşfedilmesi için radyonükleotitlerin özelliklerini ve diğer mineral ölçümlerini belirlemek amacıyla yapılan ilk çalışma olduğunu belirtmişlerdir. Araştırma kapsamında, laterit ve volkanik kayaların radyoaktivite ölçümleri, bölgeden toplanan örneklerin yüksek saflıkta bir germanyum (HPGe) dedektörü kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca, kaya mineral bileşimini belirlemek için X-ışını floresansı (XRF) yöntemi kullanılmıştır. Mamuju bölgesindeki kayalardan elde edilen  $^{238}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$  konsantrasyonları sırasıyla 539-128,699 Bq/kg (ortalama: 22,882 Bq/kg) ve 471-288,639 Bq/kg (ortalama: 33,549 Bq/kg) olarak bulunmuş ve bu değerlerin kabul edilebilir değerlerden yüksek olduğu belirtilmiştir. Ayrıca,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Na}_2\text{O}$  gibi bazı ana elementlerin yanı sıra  $\text{MnO}$ ,  $\text{TiO}_2$  ve  $\text{CaO}$  gibi diğer bazı elementlerin de baskın olduğu sonucuna varılmıştır (Rosianna vd. 2020).

Topcuoglu vd. (2022) çalışmalarında, Antalya ilinden toplanan 63 sera toprağının doğal ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) ve yapay ( $^{137}\text{Cs}$ ) radyonükleotit aktivite konsantrasyon seviyelerini Yüksek Saflıkta Germanyum Dedektörü kullanarak Gama Spektroskopisi



teknikleriyle belirlemişlerdir. Sera topraklarında doğal ve yapay radyonükleotitlerin gama spektrometrik analiz sonuçlarına göre,  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonlarının  $1,8 \pm 0,18$  Bq/kg (Kumluca) ile  $66,8 \pm 5,30$  Bq/kg (Antalya İl Merkezi) arasında değiştiği ve ortalama değerinin  $22,5 \pm 1,81$  Bq/kg olduğu,  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonlarının ise  $6,0 \pm 0,52$  Bq/kg (Kas) ile  $64,9 \pm 6,14$  Bq/kg (Antalya İl Merkezi) arasında değiştiği ve ortalama değerinin  $24,8 \pm 1,63$  Bq/kg olduğu,  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonlarının  $104 \pm 5,20$  Bq/kg arasında değiştiği belirtilmiştir. Ayrıca,  $^{137}\text{Cs}$  ortalama aktivite konsantrasyonunun  $3,2 \pm 0,38$  Bq/kg olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada, radyoizotoplar ve toprak parametreleri arasında dikkate değer korelasyonlar belirlendiği belirtilmiştir. Bununla birlikte, toprak örneklerinin ürettiği doz miktarlarının, IAEA tarafından belirlenen izin verilen seviyelerin oldukça altında olduğu ve bu nedenle sera topraklarının insanlar için herhangi bir radyolojik risk oluşturmadığı bildirilmiştir (Topcuoğlu vd. 2022).

Toprağın doğal ve yapay radyonükleotitlerinin belirlenmesine yönelik çalışmaların yanı sıra, tarımsal faaliyetlerde toprağın alternatifi olarak tercih edilen inorganik minerallerin doğal ve yapay radyonükleotit konsantrasyonları da belirlenmiştir. Eke ve Ozaydin Ozkara (2023) tarafından yürütülen araştırmada, topraksız tarımda kullanılan perlit, vermikülit, pomza, kaya yünü, zeolit, genişletilmiş kil agregası, volkanik tüf ve sepiolit gibi inorganik malzemelerin doğal ve yapay radyonükleotitleri gama ışını spektrometresi kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışmada incelenen inorganik malzemeler arasında pomza en yüksek  $^{226}\text{Ra}$  ( $589.71 \pm 21.50$  Bq/kg),  $^{232}\text{Th}$  ( $2518.82 \pm 88.48$  Bq/kg) ve  $^{40}\text{K}$  ( $277.08 \pm 10.40$  Bq/kg) aktivite konsantrasyonlarına sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, perlit ( $2.68 \pm 0.40$  Bq/kg) için  $^{137}\text{Cs}$  aktivite konsantrasyonu maksimum iken, genişletilmiş kil agregası ( $0.39 \pm 0.06$  Bq/kg) için minimumdur. Zeolit en yüksek radyolojik tehlike parametrelerine sahipken, kaya yünü için bu parametreler en düşük seviyededir. İncelenen inorganik malzemelerin element içerikleri ise endüktif olarak eşleşmiş plazma-optik emisyon spektrometresi (ICP-OES) kullanılarak elde edilmiş olup, Fe, Na, B, Ca, K, Si, P, S ve Mn'nin topraksız tarımda kullanılan inorganik maddelerin ana bileşenleri olduğu raporlanmıştır (Eke ve Ozaydin Ozkara 2023).

Sulardaki doğal ve yapay radyonükleotitlerin belirlenmesine yönelik çalışmalardan bazıları aşağıda örnek olarak verilmiştir:

Calin vd. (2020) çalışmalarında, Romanya'dan Techirghiol Gölü'ndeki on farklı noktadan alınan peloid ve tuzlu su numunelerinin kimyasal bileşimi, doğal radyoaktivite konsantrasyonları ve radyolojik tehlike değerlendirmişlerdir. Numunelerde gama ışını spektrometrisi kullanılarak  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  gibi doğal radyonükleotitler belirlenmiştir. Çalışmada, ortalama aktivite konsantrasyonlarının  $^{238}\text{U}$  için  $0,48 \pm 0,10$  Bq/kg,  $^{226}\text{Ra}$  için  $0,60 \pm 0,10$  Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  için  $0,30 \pm 0,08$  Bq/kg ve tuzlu su numuneleri için  $^{40}\text{K}$  için  $17,5 \pm 1,3$  Bq/kg olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, peloidler için ortalama aktivite konsantrasyonlarının  $^{238}\text{U}$  için  $5,70 \pm 1,00$  Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  için  $6,85 \pm 1,60$  Bq/kg,  $^{226}\text{Ra}$  için  $15,3 \pm 3,7$  Bq/kg ve  $^{40}\text{K}$  için  $95,8 \pm 5,5$  Bq/kg olduğu açıklanmıştır. Ölçülen  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  bozunma serisi ve  $^{40}\text{K}$  için spesifik aktivite konsantrasyonları ve radyasyon tehlikesi parametreleri, UNSCEAR ve ICRP tarafından belirlenen maksimum izin verilen seviyelerden daha düşük olduğu bildirilmiştir. Techirghiol Gölü'nden analiz edilen tuzlu su ve peloid örneklerinin halk sağlığı açısından radyolojik bir tehdit oluşturmadığı sonucuna varılmıştır (Calin vd. 2020).

Manisa vd. (2021) yaptıkları çalışmada, Çorlu yöresinin doğal radyoaktivite düzeyini değerlendirmek için farklı derinliklere sahip kuyularda ve doğal kaynak sularında AlphaGUARD sistemi ile  $^{222}\text{Rn}$  aktivite konsantrasyonlarını ölçmüşlerdir. Ölçülen konsantrasyonların 6 kuyu suyu numunesi için 22,04 ila 63,92 Bq/L, 6 kaynak suyu numunesi için 15,38–24,33 Bq/L arasında değiştiğini bildirmişlerdir. Ayrıca aynı bölgeden alınan 11 toprak örneğinde de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonlarını belirlemişlerdir ve aynı örneklemme noktalarında yüzeyden 1 m yükseklikte dış mekan gama doz oranları ölçmüşlerdir.  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'ın sırasıyla ortalama spesifik aktivitelerini 13,8 Bq/kg, 10,24 Bq/kg ve 680 Bq/kg olarak belirlemişlerdir (Manisa vd. 2021).

Mohuba vd. (2022) yaptıkları çalışmada, bir nükleer santralin geliştirilmesi için potansiyel bir alan olarak seçilen Güney Afrika'nın Eastern Cape Eyaletinin Thyspunt bölgesindeki kayalarda, toprakta ve sudaki temel radyonükleotit ve metal içeriğini belirlemeyi amaçlamışlardır. Çalışma bölgesinden kaya, toprak, yeraltı suyu ve yüzey suyu örnekleri alıp, ICP-MS, gama ışıını spektrometresi (RS 230) ve hızlandırıcı kütle spektrometrisi gibi analiz yöntemleri kullanarak örnek analizlerini yapmışlardır. Sonuç olarak, Table Mountain Group'un (TMG) Ceres Alt Grubu şeyl ve Skurwberg formasyonu kuvarsitin, çoğu radyonükleotitin yüksek aktivite içerdiğini belirtmişlerdir. Radyotoksik ve kanserojen uranyum ( $^{238}\text{U}$  ve  $^{235}\text{U}$ ) ve radyumun ( $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{224}\text{Ra}$ ) Sudaki izotoplarının aktivitesi, sırasıyla 0,03 ve 1 Bq/L'lik WHO yönergesinin oldukça üzerinde olduğu bulunduğunu bildirmişlerdir. Maruz kalma dozu oranının Ceres Alt Grubu şeyllerinde (185,7 nS/h) en yüksek olduğunu ve bunun kayalardaki yüksek doğal radyoaktivite ile bağlantılı olduğunu belirtmişlerdir. Yutma ile ilgili etkili dozun tahmini, uranyum ve radyum izotoplarıyla ilişkili yüksek dozları gösterdiğini, bu nedenle bölgede yaygın olarak kullanılan yeraltı suyunun yutulmasıyla bağlantılı olarak insan sağlığı üzerindeki potansiyel olumsuz etki gösterdiğini tespit etmişlerdir (Mohuba vd. 2022).

Gıdalardaki doğal ve yapay radyonükleotitlerin belirlenmesine yönelik çalışmalardan bazıları aşağıda örnek olarak verilmiştir:

Kadhim vd. (2021) çalışmalarında, Irak'ta yaygın olarak kullanılan bazı baharat örneklerinde  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'ın doğal radyoaktivitesini ölçmeyi amaçladıklarını belirtmişlerdir. Yaptıkları ölçümlere dayanarak, ilgili radyolojik tehlikeli parametreler değerlendirmişlerdir. Radyometrik değerlendirme için gama spektrometrisi NaI (TI) reaktifi kullanarak Irak genelinde perakende olarak satılan on çeşit baharat analiz etmişlerdir.  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  ortalama aktivite konsantrasyonu değerleri sırasıyla 0,43–1,7, 0,16–0,67 ve 18,7–220,4 Bq/kg arasında değişmekte olduğunu belirlemişlerdir. Her bir radyonükleotit için maruz kalmaya bağlı yıllık harici etkili dozlar ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ ) bu baharatlarda sırasıyla; 14,7  $\mu\text{Sv}$  (karabiber) ile 110,4  $\mu\text{Sv}$  (kekik), 11,9  $\mu\text{Sv}$  (karabiber) 106,3  $\mu\text{Sv}$  (kimyon) ve 16,7  $\mu\text{Sv}$  (karabiber) ile 181  $\mu\text{Sv}$  (Mercanköşk) arasında değişmekte olduğunu tespit etmişlerdir.  $^{226}\text{Ra}$ 'nın yıllık etkin alımı, küpte 0,48  $\mu\text{Sv/y}$  ile 0,12  $\mu\text{Sv/y}$  arasında karabiberde değiştiğini açıklamışlardır. Tüm numunelerde  $^{40}\text{K}$  alımından kaynaklanan doz, UNSCEAR doz seviyesi (170  $\mu\text{Sv/y}$ ) ile karşılaştırıldığında düşük olarak kabul edilebilir düzeyde olduğunu belirtmişlerdir. Çalışma sonucunda çalışılan baharatların ciddi bir tehlike oluşturmadığını ve insan tüketimi için radyolojik olarak güvenli kabul edildiğini ifade etmişlerdir (Kadhim vd. 2021).

Kamislioglu vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, Balıkesir ilinde yetiştirilen dokuz farklı şifalı bitkinin (Tatlı mercanköşk, Biberiye, Lavanta, Kekik, Adaçayı, Nane, Kutsal fesleğen, Çalı fesleğeni ve Melisa), doğal ve yapay radyonükleotit konsantrasyonları gama ışını spektrometrisi ile incelenmiştir. Elde edilen verilere göre, bitkilerdeki  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonları dünya ortalamasının altında iken,  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonları dünya ortalamasının üzerinde tespit edilmiştir. Çalışmada yapılan radyolojik doz değerlendirmesine göre, Lavandula x intermedia için absorbe gama doz hızı, radyum eşdeğer aktivitesi, yıllık gonadal doz eşdeğeri, maruz kalma dozu, yıllık etkin doz ve yaşam boyu aşırı kanser riski değerleri en yüksek; Rosmarinus officinalis L. için ise en düşük bulunmuştur. İç ve dış tehlike indeksi değerleri izin verilen sınırların altında iken, gama temsili düzeyi izin verilen sınırların üzerinde olduğu belirtilmiştir (Kamislioglu vd. 2021).

Caridi vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada, İtalya'da üretilen ve İtalyan büyük perakendecilerinde satılan erken çocukluk (iki yaşına kadar) gıdaların dört farklı tipolojisinde, yani homojenize meyve, homojenize et, çocukluk bisküvileri ve bebek makarnalarında doğal ( $^{40}\text{K}$ ) ve antropojenik ( $^{137}\text{Cs}$ ) radyoaktivite konsantrasyonu, Yüksek Safılıkta Germanyum (HPGe) gama spektrometrisi ile araştırmışlardır. Çalışmalarında, analiz edilen erken çocukluk dönemi gıdalarında araştırılan radyonükleotitlerin arka plan seviyelerinin değerlendirildiğini, analiz edilen yirmi örneğin bebek tüketimi için uygun olup olmadığının belirlendiğini ve İtalya'da satılan erken çocukluk dönemi gıdalarının radyoaktivitesine ilişkin bir veri tabanının oluşturulmasına katkıda bulunmak amacıyla yürütüldüğünü belirtmişlerdir.  $^{137}\text{Cs}$ 'ye özgü aktivite durumunda, elde ettikleri sonuçların yapay radyoaktiviteden hiçbir kalıntı kontaminasyon ortaya çıkarmadığını, radyosezyum aktivite konsantrasyonunun her durumda minimum saptanabilir aktiviteden daha düşük olduğunu,  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonunun ise çalışma kapsamındaki tüm yaş grupları için önerilen sınır değerlerin altında olduğunu belirtmişlerdir (Caridi vd. 2022).

Dizman vd. (2020) çalışmalarında, Kosova'dan çeşitli bal örneklerinde doğal olarak oluşan radyonükleotitleri ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{232}\text{Th}$ ) ve yapay radyonükleotit  $^{137}\text{Cs}$ 'yi belirlemişlerdir. Bu çalışmanın, bal örneklerinin radyoaktivite ile kontaminasyonunu ülke düzeyinde değerlendirmeye yönelik ilk çalışma olması nedeniyle özellikle önemli olduğunu bildirmişlerdir. Bal örneklerindeki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonükleotitlerin ortalama radyoaktivite konsantrasyonlarını sırasıyla  $0,49\pm0,15$ ,  $1,28\pm0,18$ ,  $1,03\pm0,11$  ve  $20,44\pm0,69$  Bq/kg olarak belirlemişlerdir. Ayrıca örneklerdeki  $^{137}\text{Cs}$  aktivite değerlerini, ICRP tarafından gıda maddelerinde önerilen sınır değerin (1000 B/kg) oldukça altında olduğunu bildirmişlerdir (Dizman vd. 2020).

Sedimentler, genellikle su ekosistemlerinde (su kaynakları, göller, nehirler ve okyanuslar gibi) biriken tortul malzemelerdir. Bu tortul malzemelerde bulunan mineraller, radyoaktif elementler içerebilir ve doğal olarak radyasyon yayabilirler. Sedimentlerde bulunan doğal radyasyon, doğal radyasyon kaynaklarından biridir ve sürekli olarak yeryüzünde ve çevremizde bulunur. Sedimentlerde doğal olarak bulunan radyasyon, özellikle uranyum, toryum ve potasyum gibi elementlerin radyoaktif bozunmasıyla oluşan alfa, beta ve gama ışınlarından kaynaklanır. Bu elementlerin kaynakları, yer kabuğunun doğal bileşimi veya insan etkisiyle oluşan endüstriyel faaliyetler gibi olabilir. Ağır metal kirleticileri ve deniz ortamındaki doğal radyoaktivite konsantrasyonu, ciddi kirlilik sorunları olarak kabul edilir. Bu elementler deniz

ortamındaki partiküllere bağlanır ve çökeltilerde birikir. Bu nedenle, sediment su ortamlarında potansiyel kirlenme kaynaklarını gösteren önemli bir kirlilik yatağıdır. Sedimentlerdeki doğal ve yapay radyasyon seviyeleri, insan sağlığı üzerinde etkili olabilecek düzeylere ulaşabilir. Bu yüzden, bu tür sediment bölgeleri, radyasyon güvenliği açısından düzenli olarak izlenmelidir. Deniz ortamındaki doğal radyoaktivite kaynakları  $^{40}\text{K}$  ve doğal bozunma serisi  $^{238}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$ 'dir. Sedimentlerdeki doğal ve yapay radyonükleotitlerin belirlenmesine yönelik çalışmalardan bazıları aşağıda örnek olarak verilmiştir:

Caridi vd. (2021), Güney İtalya'daki nehir sedimenti numuneleri için doğal radyoaktivitenin kapsamlı bir radyolojik değerlendirmesini yapmak ve bir radyasyon haritasında, alan için temel bir arka plan tanımlamak için yaptıkları çalışmalarında, Calabria'nın İyonya ve Tiren kıyı şeridinde seçtikleri dokuz kıyı örnekleme noktasından, her nokta için 10 örnek olacak şekilde doksan nehir sedimenti örneği toplamışlardır. Numunelerin analizi için, yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörü ile donatılmış bir gama ışını spektrometresi kullanmışlardır. Çalışmalarında, İncelenen numuneler için ölçülen ortalama aktivite konsantrasyonlarının değerlerini  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  için sırasıyla  $(21,3 \pm 6,3)$  Bq/kg,  $(30,3 \pm 4,5)$  Bq/kg ve  $(849 \pm 79)$  Bq/kg tespit etmişlerdir. Ayrıca radyolojik tehlike indeksleri ortalama değerlerini, 63 nGy/h (absorbe edilen doz hızı), 0,078 mSv/y (dış mekanda etkin doz), 0,111 mSv/y (iç mekanda etkin doz), 63 Bq/kg (radyum eşdeğeri), 0,35 ( $H_{\text{ex}}$ ), 0,41 ( $H_{\text{in}}$ ), 0,50 (aktivite konsantrasyon indeksi) ve 458  $\mu\text{Sv/y}$  (Yıllık Gonadal Eşdeğer Doz) olarak belirlemişlerdir (Caridi vd. 2021).

Thangam vd. (2022) çalışmalarında, Thamirabarani nehir kuşağı, Tamilnadu, Hindistan'dan sediment örnekleri toplamışlardır. Sediment örneklerinin analizi için Gama ışını spektrometrisi kullanmışlardır. Çalışma kapsamında  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  gibi doğal radyonükleotitlerin aktivite konsantrasyonlarını belirleyerek, radyolojik parametreleri hesaplamışlardır.  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  için ortalama aktivite konsantrasyonu değerleri sırasıyla 40,85, 51,87 ve 838,19 Bq/kg olarak belirlendiğini bildirmişlerdir. Radyum eşdeğeri ( $R_{\text{eq}}$ ), emilen doz hızı ( $D_R$ ), yıllık etkili doz eşdeğeri (AEDE), tehlike indeksleri ( $H_{\text{ex}}$  ve  $H_{\text{in}}$ ) ve aktivite kullanım indeksi (AUI) de hesaplamış ve dünya ortalama değerleriyle karşılaştırmışlardır. Radyolojik parametrelerin ortalama değerleri önerilen limitin altında olduğunu açıklamışlardır. Çalışma sonucunu, bu çalışma alanından nehir sedimentlerinin inşaat için kullanılmasında herhangi bir radyolojik tehlike bulunmamaktadır şeklinde yorumlamışlardır (Thangam vd. 2022).

Dizman vd. (2022) yaptıkları çalışmada, Artvin ili Tabiat Parkı içerisinde yer alan Borçka Kara Gölü'nden aldıkları sediment örneklerindeki doğal ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) ve yapay ( $^{137}\text{Cs}$ ) radyoaktivite konsantrasyonlarını yüksek saflıkta bir germanyum dedektörü (HPGe) kullanarak belirlemişlerdir. Sediment numunelerindeki ortalama radyoaktivite konsantrasyonlarının  $^{238}\text{U}$  için  $14,99 \pm 0,89$  Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  için  $13,85 \pm 1,10$  Bq/kg,  $^{40}\text{K}$  için  $473,67 \pm 14,21$  Bq/kg ve  $^{137}\text{Cs}$  için  $35,06 \pm 0,96$  Bq/kg olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, radyolojik tehlikeleri değerlendirmek için radyum eşdeğer aktivite, dış tehlike indeksi, havada soğurulan doz hızı, yıllık efektif doz hızı ve yaşam boyu kanser riski hesaplanmışlar ve uluslararası kuruluşlar tarafından önerilen değerlerle karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, incelenen radyoizotopların neden olduğu radyoaktivitenin Borçka Karagöl ziyaretçileri için herhangi bir sağlık riski oluşturmadığını ifade etmişlerdir (Dizman vd. 2022).

Zakary vd. (2021) yaptıkları çalışmada, Mısır Kızıldeniz sahil şeridi boyunca dört şehirde (Quseir, Safaga, Hurghada ve Ras Gharib) on iki noktadan yaklaşık 84 deniz sediment örneği toplamışlardır. Toplanan sediment örneklerinin doğal radyoaktivite seviyelerini ölçmek için NaI (Tl) sintilasyon dedektörü ( $3 \times 3$  inç) kullanmışlardır.  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  için ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla 23,8, 19,6, 374,9 Bq/kg olarak belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda, Kızıldeniz sahil sedimentlerinin doğal radyoaktivite açısından güvenli olduğunu belirtmişlerdir. Mısır Kızıldeniz kıyılarında rekreasyon amaçlı plajlara giden turistler veya ekonomik faaliyetlerde bulunan denizciler ve balıkçılar için risk oluşturmadıklarını bildirmişlerdir (Zakary vd. 2021).

Venunathan vd. (2016) çalışmalarında, Kallada nehrinden alınan sediment örneklerinde doğal radyoaktivite aktivite, GSPEC gama spektroskopi sistemine bağlı yüksek verimli  $5'' \times 5''$  NaI (Tl) detektörü kullanarak belirlemişler ve ortalama  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  konsantrasyonlarını sırasıyla  $48,6 \pm 1,0$  Bq/kg,  $88,0 \pm 0,4$  Bq/kg ve  $423,2 \pm 2,0$  Bq/kg olarak elde etmişlerdir (Venunathan vd. 2016).

Badawy vd. (2018) yaptıkları çalışmada, Mısır Nil Nehri'nden topladıkları 84 sediment örneğinde doğal  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyoizotoplarının konsantrasyonlarını araştırmışlar ve çalışma sonucunda ortalama aktivite konsantrasyonlarını sırasıyla  $15,3 \pm 6,6$ ,  $15,6 \pm 11,1$  ve  $220 \pm 31$  Bq/kg olarak belirlemişlerdir (Badawy vd. 2018).

Thomas vd. (2022) tarafından yürütülen araştırmada, Kuzey İsveç'teki uranyum dışı madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan ocak göllerinden elde edilen yüzey sedimenti örneklerindeki kararlı elementler ve doğal radyonükleotitlerin konsantrasyonu incelenmiştir. Sediment örneklerindeki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'nin aktivite konsantrasyonları sırasıyla 12–170 Bq/kg, 14–94 Bq/kg ve 560–1150 Bq/kg olarak belirlenmiştir. XRF elementel analiz sonuçlarına göre, sediment bileşimindeki oksit değerleri  $\text{SiO}_2$  (%6–92),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (%0.4–55),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (%1.5–13),  $\text{K}_2\text{O}$  (%0.4–4),  $\text{CaO}$  (%0.1–14),  $\text{Na}_2\text{O}$  (%0.2–3) ve  $\text{MgO}$  (%0.2–4)'dir. Ayrıca, belirli bölgelerde göreceli olarak yüksek Cu, As, Cr ve Pb seviyelerinin tespit edildiği bildirilmiştir (Thomas vd. 2022).

Sedimentler, akarsu havzasındaki erozyon ve akarsu yatağındaki aşınma sonucunda oluşur ve bölgenin jeolojik formasyonunu yansıtır. Bu nedenle, sedimentler jeolojik formasyon kaynaklı radyasyonun önemli bir göstergesidir (Aytas vd. 2012). Kayaçlar su tarafından parçalandığında kimyasal bileşimlerinde değişiklik olmadığı için sedimentlerde radyoaktivite içeriği bulunur (Gnanasaravanan vd. 2013; Yasmin vd. 2018). Sedimentlerde bulunan radyonükleotitler genellikle su ortamında sediment üzerinde etkili olan yerçekimi kombinasyonu veya taşıyan sıvının hareketiyle lito-küre dışındaki doğal ekosistemlere yayılır. Bu nedenle, sucul radyoekolojide önemli bir rol oynarlar.

Sedimentler, göletlerin, nehirlerin ve deniz sistemlerinin temel bileşenleridir. Uzun bir süre boyunca geniş bir alanda kirlenmeye maruz kalabilirler. Sucul ortamdaki sedimentlerin araştırılması, çevre kirliliği ve radyoaktivite ile ilgili değerli bilgiler sağlar ve dolayısıyla insan sağlığıyla doğrudan ilişkilidir. Farklı ortamlar tarafından taşınan doğal ve antropojenik radyonükleotitler çözünmüş halde kalabilir veya biyolojik veya kimyasal süreçlerle sedimentte birikebilir.

Deniz ve nehir ortamında uranyum ve toryum radyonüklidlerinin farklı davranışları vardır. Uranyum genellikle suda çözünmüş halde kalırken, toryum doğal suların katı maddeleriyle ilişkilidir (El-Taher ve Madkour 2011). Bu farklılık, toryumun düşük jeokimyasal hareketliliği ve çözünmezliğiyle ilişkilendirilebilir (UNSCEAR 2008). Su ortamındaki radyoaktivite izleme, belirli nükleotitlerin, askıda kalan partiküllerin ve sedimentin analizine dayanır.

Sediment kalitesi, radyonükleotitler ve ağır metaller gibi kirlilik kaynaklarından gelen maddelerin analiziyle değerlendirilebilir. Bu analizler, sedimentlerde biriken maddelerin miktarını ve dağılımını belirlemek için yapılır. Radyonükleotitler doğal kaynaklarla birlikte nükleer santraller, radyoaktif atıklar ve diğer endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanırken, ağır metaller genellikle endüstriyel atıklar, madencilik ve tarım gibi faaliyetlerden kaynaklanır.

Sedimentlerde biriken radyonükleotitlerin ve ağır metallerin sediment yapısı ve deniz kirliliği hakkında önemli bilgiler sağlar. Sedimentler, radyoaktif maddelerin ve ağır metallerin biriktikleri yerlerdir ve çevredeki kirlilik kaynaklarının etkisini ve yayılımını gösteren bir gösterge olarak kullanılabilir. Sediment analizi, sediment yapısının incelenmesi ve kirlilik kaynaklarının belirlenmesi için önemli bir araçtır. Sedimentlerin mineralojisi, tekstürü ve kimyasal bileşimi, sediment kaynağı, taşınma süreçleri ve sedimentasyon hızı gibi faktörler hakkında bilgi sağlar. Bu analizler, sediment kalitesinin ve çevresel durumunun değerlendirilmesine yardımcı olur. Sediment kalitesinin belirlenmesi, ekosistem sağlığı açısından önemlidir ve çevresel yönetim stratejileri ve kirlilik kontrol önlemlerinin geliştirilmesine yardımcı olur. Ayrıca, radyonükleotitlerin ve ağır metallerin tortul birikimleri, bölgesel ve küresel ölçekte çevresel değişikliklerin ve insan faaliyetlerinin etkilerini anlamak için kullanılabilir.

### 3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, Temmuz ve Mart aylarında Boğaçay'dan alınan 20'şer adet sediment örneğinin toplama süreci, doğal ve yapay radyonükleotitlerle elementel içeriklerinin belirlenmesi için gereken örnek hazırlık adımları ve sayım süreci detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

#### 3.1. Çalışma Bölgesinin Tanıtılması

Boğaçay, Türkiye'nin Akdeniz kıyısında yer alan ve 25 kilometre boyunca akan ve Akdeniz'e dökülen bir nehirdir (Özcelik 2022). Boğaçay, Konyaaltı Bölgesi'nin batısından gelen Doyran ve Çandır Çayları ile kuzeyden gelen Karaman Çayı'nın birleşmesinden oluşmuştur. Özellikle denize döküldüğü bölgede yüzme ve balık tutma gibi aktivitelerin sıklıkla gerçekleştiği Boğaçay sadece bu özelliğinden dolayı değil, aynı zamanda konumu, içme ve kullanma sularının ihtiyacının karşılanmasında ve tarım arazilerinin sulanmasında kullanılması açısından Antalya ili için büyük önem taşır (Yirmibeşoğlu 2020).

Boğaçay yaklaşık 25 km uzunluğunda yatağı ile 830 km<sup>2</sup> 'lik bir alandan su toplamaktadır. Çandır Çayı, 1350 m kotunda doğar, kuzeye doğru akarak vadi boyunca küçük yan derelerle birleşerek Çakırlar mevkiine ulaşır. Küçükdağ Tepe kuzeyinde Karaman Çayı ile birleşir. Doyran Çayı, 2000 m kotlarında doğar, Doyran yerleşim yerine ulaşır, doğuya doğru akarak Karaman Çayı ile birleşir. Karaman Çayı, 1845 m kotunda doğar, Aşağı Karaman ve Doyran arazilerinden güneye doğru akarak Doyran Çayı ile birleşir (Dipova 2020).

Boğaçay'ın debisi yıl içinde değişiklik göstermektedir. Kış döneminde yağmur şeklindeki yağışlar, ilkbahar döneminde de kar erimelerinin etkisiyle Boğaçay'ın debisi en yüksek değerlere ulaşmaktadır. Yaz aylarında Karaman, Doyran ve Çandır çayı sularının yok denecek kadar azalması Boğaçay'ın su kapasitesini etkilemesine rağmen ovanın doğusundaki travertenlerden çıkan kaynak sularının yer altı suyu rezervuarını beslemesiyle Boğaçay yazın da bir miktar su ihtiva etmektedir. Doyran Çayı'nın suları yaz aylarında sulama amaçlı kullanıldığından Haziran-Aralık aylar arasında akarsu yatağında su kalmamaktadır. Boğaçay'ı besleyen çayların rejimlerine bakıldığında Çandır çayının genel olarak Yağmurlu-Akdeniz rejimine sahip olduğu ancak kar yağışlarının etkisinden dolayı ilkbahar döneminde kabarmaların sonbahara göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Doyran çayı, Yağmurlu-Akdeniz rejimi etkisini göstermekle birlikte, en yüksek akıma ilkbahar döneminde sahip olduğu için kar rejimli akarsu özelliğini de taşımaktadır. Karaman çayı, yağmurlu-Akdeniz rejimine sahiptir. Çandır, Doyran ve Karaman çaylarının oluşturduğu Boğaçay'ın akarsu rejimi Yağmurlu-Akdeniz rejimini özelliğini gösterirken, aynı zamanda Mart ayındaki debinin yükselmesi ve ilkbahar dönemindeki hafif kabarmalar Kar rejimi özelliğini taşıdığını göstermektedir. Boğaçay'ın akarsu rejimini, akarsu havzasında etkili olan iklim faktörleri, önemli ölçüde etkilemektedir. Yazları sıcak ve yağışsız geçen Akdeniz iklimi şartlarının etkili olduğu sahada, Boğaçay'ın çekildiği ve kollarının da neredeyse tamamen kurudukları görülmektedir. Kışın ise artan yağış şartlarına bağlı olarak akım artmaktadır. Bunun yanı sıra, yüksek dağlık alanlardaki kar yağışlarının ilkbahar döneminde tamamen erimesi ile akım yükselmeleri görülür. Özellikle uzun süren sağanak yağışların olduğu kış

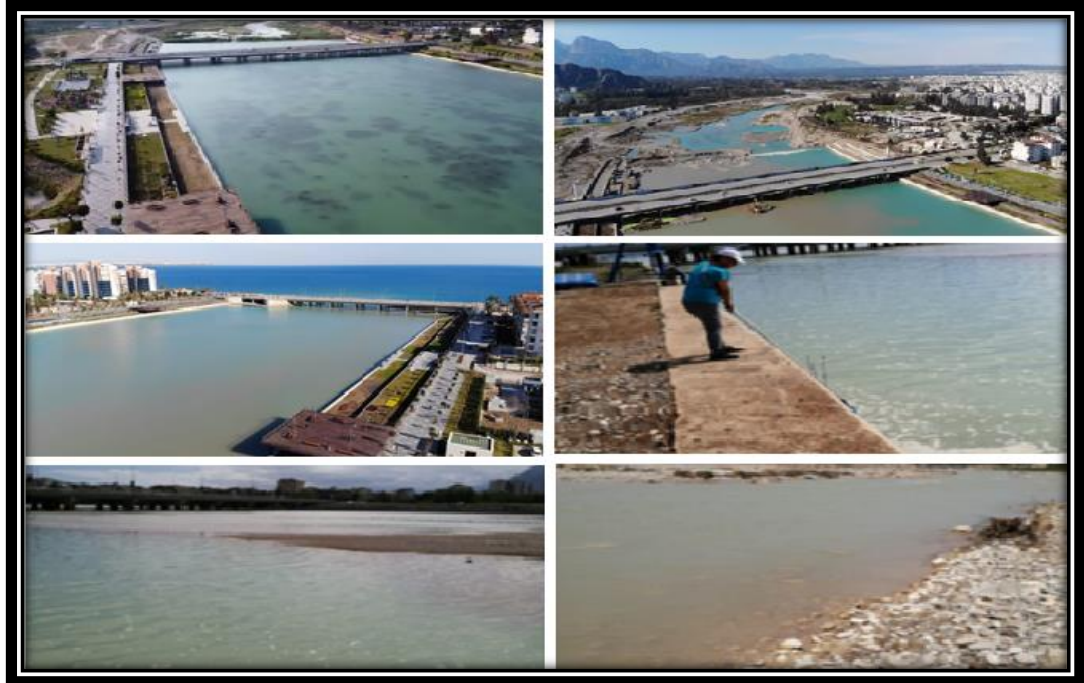
döneminde, akım aniden yükselerek Boğaçay’da sel veya taşkınlar meydana gelmektedir (Çınar 2011).

Boğaçay’ın taşıdığı sediment, ağırlıklı olarak havzanın batısından taşınan kireçtaşı ve kuzey vadilerdeki ofiyolitik birimlerden taşınan serpantin, çört ve bazalt tanelerinden oluşmaktadır. Boğaçay havzası küçük olduğundan taşınım mesafesi kısa olmakta ve taşınan malzemenin aşınarak küreselleşmesi mümkün olmamaktadır (Dipova 2020).

Çalışma alanını içine alan ve Boğaçay’ın denize döküldüğü alan dünyaca ünlü Konyaaltı plaj alanını oluşturmakta, yerli ve yabancı pek çok turiste ev sahipliği yapmaktadır. Konyaaltı plajının oluşumunda Boğaçay’ın beraberinde getirdiği malzemeler önemli rol oynamaktadır. Boğaçay ile taşınan ve çakıl, kum, kil ve milden oluşan malzeme Antalya’nın dünyaca ünlü Konyaaltı kumsalı için önemli bir beslenme kaynağını oluşturmaktadır (Çınar 2011).

### 3.2. Numune Toplanması ve Sayım İçin Hazırlanması

Tez çalışmamın kapsamında, Boğaçay’da ve tabanında bulunan sedimentlerin taşkınlar sonucu değişebileceği hipotezi doğrultusunda, doğal ve yapay radyoaktivite değerlerinin iki farklı dönemde belirlenmesi ve karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, Boğaçay’ın debi değişim ayları göz önünde bulundurularak, Temmuz 2021 dönemi gibi düşük debi dönemlerinde belirli koordinatlardan alınan 20 sediment örneğine ek olarak, Mart 2022 dönemi gibi yüksek debi dönemlerinde, mümkün olduğunca yakın noktalardan ilk toplanan 20 numunenin koordinatlarına uygun şekilde 20 sediment örneği daha toplanmıştır. Sediment örneklerinin toplanma çalışması ve toplandığı bölgenin fotoğrafları Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



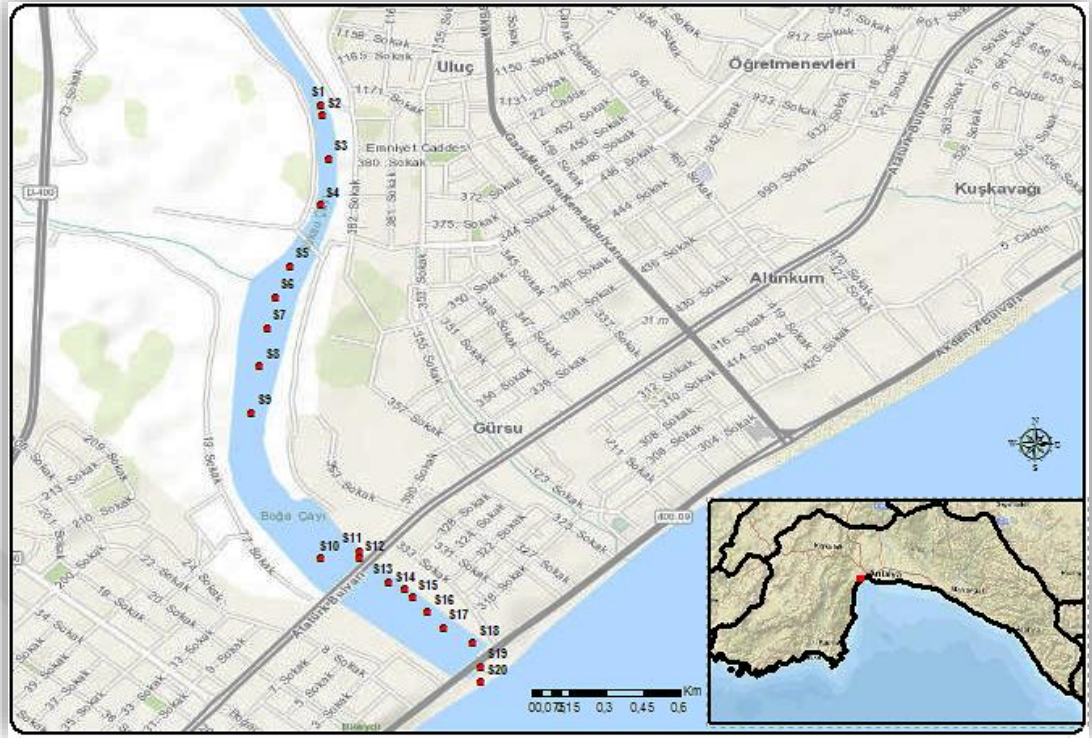
**Şekil 3.1.** Sediment örneklerinin toplandığı bölgenin fotoğrafları



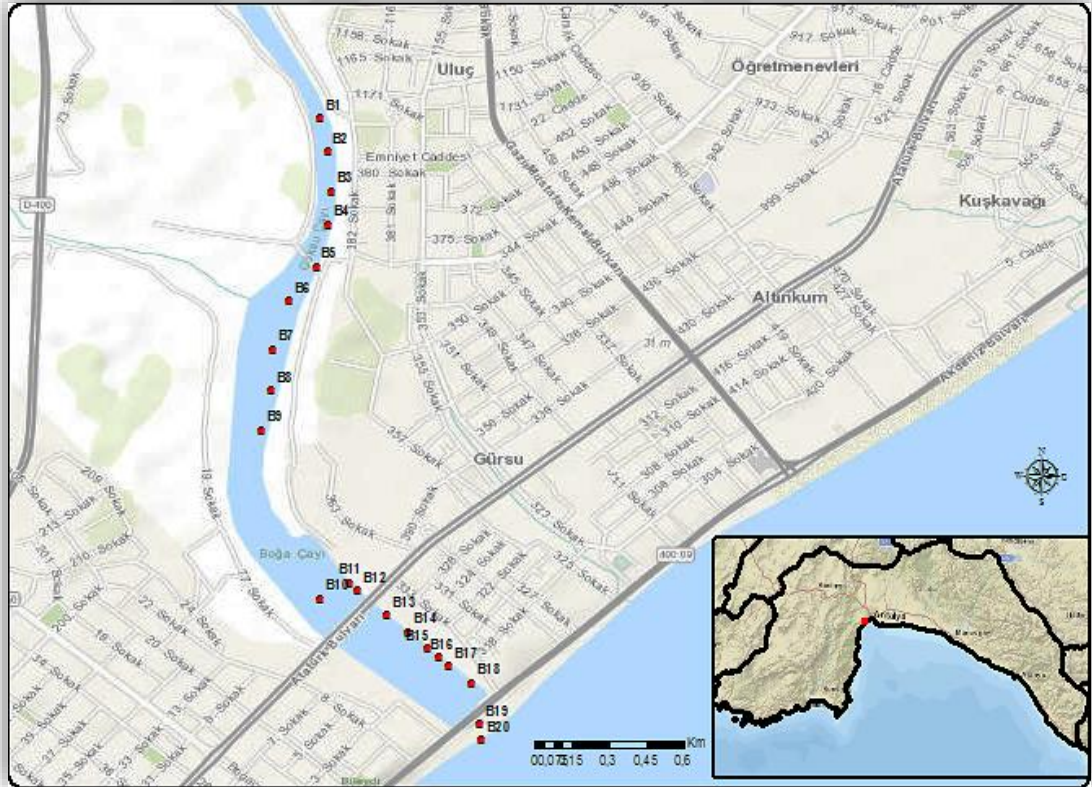
Temmuz ayı ve Mart ayında Boğaçay'dan koordinatları belirli noktalardan alınan 20 sediment örneği önceden etiketlenmiş temiz, ağızları kapanabilen naylon torbalara konularak çalışma bölgesinden alınıp Fen Fakültesi Nükleer Fizik laboratuvarına getirilmiştir. Çizelge 3.1'de numune koordinatları, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te koordinatlara bağlı çalışılan bölgenin haritalaması verilmiştir. Çalışma alanının haritalamasında ArcGIS (10.7 versiyon) yazılımı kullanılmıştır.

**Çizelge 3.1.** Temmuz ve Mart ayları Boğaçay numune koordinatları

| Numune No<br>Temmuz Ayı | Enlem       | Boylam      | Numune No<br>Mart Ayı | Enlem         | Boylam        |
|-------------------------|-------------|-------------|-----------------------|---------------|---------------|
| <b>S1</b>               | 36°52'24.1" | 30°37'13.2" | <b>B1</b>             | 36° 52' 23.0" | 30° 37' 13.0" |
| <b>S2</b>               | 36°52'22.6" | 30°37'13.2" | <b>B2</b>             | 36° 52' 19.0" | 30° 37' 14.0" |
| <b>S3</b>               | 36°52'17.7" | 30°37'14.1" | <b>B3</b>             | 36° 52' 14.2" | 30° 37' 14.5" |
| <b>S4</b>               | 36°52'11.0" | 30°37'13.9" | <b>B4</b>             | 36° 52' 10.2" | 30° 37' 14.1" |
| <b>S5</b>               | 36°52'03.9" | 30°37'09.7" | <b>B5</b>             | 36° 52' 05.2" | 30° 37' 12.5" |
| <b>S6</b>               | 36°51'59.1" | 30°37'07.8" | <b>B6</b>             | 36° 52' 01.0" | 30° 37' 09.0" |
| <b>S7</b>               | 36°51'55.1" | 30°37'06.2" | <b>B7</b>             | 36° 52' 55.2" | 30° 37' 06.9" |
| <b>S8</b>               | 36°51'50.8" | 30°37'05.3" | <b>B8</b>             | 36° 51' 50.2" | 30° 37' 06.7" |
| <b>S9</b>               | 36°51'44.4" | 30°37'04.8" | <b>B9</b>             | 36° 51' 45.5" | 30° 37' 05.4" |
| <b>S10</b>              | 36°51'25.8" | 30°37'13.2" | <b>B10</b>            | 36° 51' 25.1" | 30° 37' 13.1" |
| <b>S11</b>              | 36°51'26.0" | 30°37'18.2" | <b>B11</b>            | 36° 51' 27.1" | 30° 37' 16.9" |
| <b>S12</b>              | 36°51'25.2" | 30°37'18.8" | <b>B12</b>            | 36° 51' 26.1" | 30° 37' 17.9" |
| <b>S13</b>              | 36°51'22.5" | 30°37'22.3" | <b>B13</b>            | 36° 51' 23.1" | 30° 37' 21.7" |
| <b>S14</b>              | 36°51'21.2" | 30°37'24.1" | <b>B14</b>            | 36° 51' 21.1" | 30° 37' 24.5" |
| <b>S15</b>              | 36°51'20.1" | 30°37'25.8" | <b>B15</b>            | 36° 51' 19.1" | 30° 37' 26.9" |
| <b>S16</b>              | 36°51'18.5" | 30°37'27.8" | <b>B16</b>            | 36° 51' 18.0" | 30° 37' 28.4" |
| <b>S17</b>              | 36°51'16.9" | 30°37'29.9" | <b>B17</b>            | 36° 51' 17.0" | 30° 37' 29.7" |
| <b>S18</b>              | 36°51'14.8" | 30°37'33.0" | <b>B18</b>            | 36° 51' 15.0" | 30° 37' 32.7" |
| <b>S19</b>              | 36°51'11.2" | 30°37'34.4" | <b>B19</b>            | 36° 51' 10.1" | 30° 37' 33.7" |
| <b>S20</b>              | 36°51'09.8" | 30°37'34.4" | <b>B20</b>            | 36° 51' 08.1" | 30° 37'33.9"  |



Şekil 3.2. Temmuz ayı Boğaçay numune koordinatları haritası



Şekil 3.3. Mart ayı Boğaçay numune koordinatları haritası

Temmuz ve Mart aylarında Boğaçay'dan koordinatları belirli noktalardan toplanan 20 şer sediment örneği laboratuvar ortamında kurutulduktan sonra, birbirlerine karışmayacak şekilde ayrı ayrı öğütülmüştür. Numune öğütme işleminde kullanılan öğütücü Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



**Şekil 3.4.** Çalışmada kullanılan numune öğütücü

Öğütülmüş olan numuneler, 2 mm'lik elekten geçirilerek, net kütle ölçümünü hesaplayabilmek için Akdeniz Üniversitesi Kimya Labaratuvarı'ndaki EV 018 Vacuum Oven cihazı ile nemden arındırılmıştır. Numune kurutma işlemi vakum ortamında 130<sup>0</sup> C'de 24 saat olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5'te numune kurutma işlemi öncesi hazırlık ve Şekil 3.6'da etüv olarak adlandırılan kurutma amaçlı kullanılan laboratuvar cihazı gösterilmiştir.



**Şekil 3.5.** Sediment örnekleri için etüvde kurutma öncesi hazırlık fotoğrafları



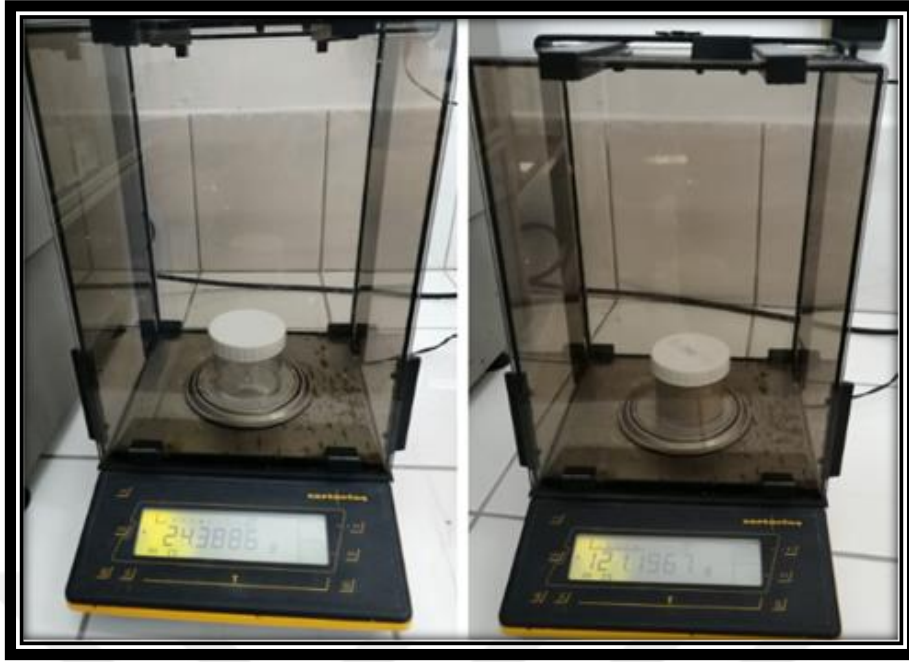


**Şekil 3.6.** Sediment örneklerinin etüv ile kurutma işlemi fotoğrafı

Etüv ile kurutma sonrası numuneler darası alınmış 100 ml'lik kaplara konulmuş ve kütle tartımı hassas terazi kullanarak belirlenmiştir. Temmuz ve Mart aylarında Boğaçay'dan alınan 20'şer sediment örneği için kütle tartım değerleri Çizelge 3.2'de, tartım işleminde kullanılan hassas terazi Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

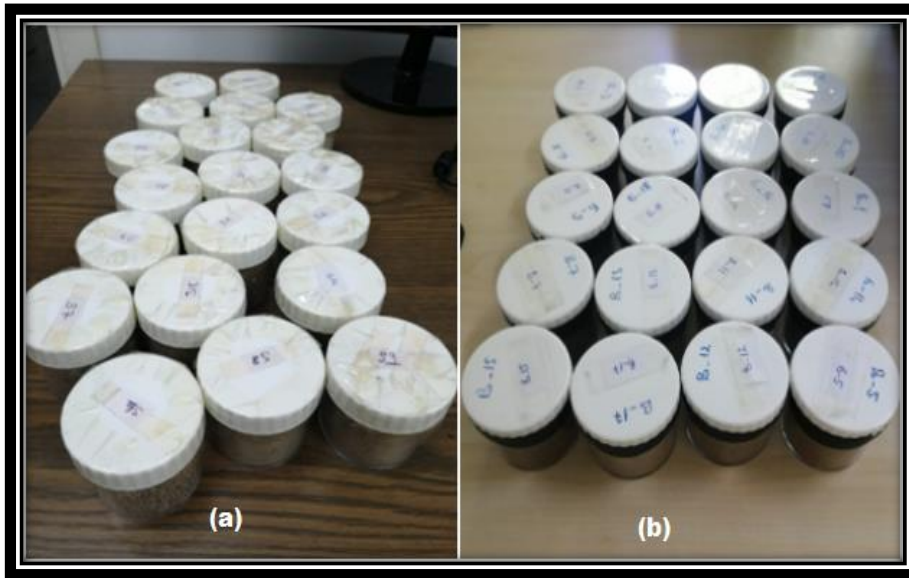
**Çizelge 3.2.** Temmuz ve Mart ayı Sediment Kütle tartım değerleri

| NUMUNE NO<br>(Temmuz Ayı) | NET KÜTLE (gr) | NUMUNE NO<br>(Mart Ayı) | NET KÜTLE (gr) |
|---------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| S1                        | 161,8872052    | B1                      | 155,8105439    |
| S2                        | 149,9076094    | B2                      | 131,807755     |
| S3                        | 171,83309      | B3                      | 111,860873     |
| S4                        | 133,0578602    | B4                      | 188,7274056    |
| S5                        | 161,0739687    | B5                      | 144,6608676    |
| S6                        | 177,2653661    | B6                      | 166,9876199    |
| S7                        | 177,4244193    | B7                      | 169,3361643    |
| S8                        | 162,3510829    | B8                      | 175,3498988    |
| S9                        | 163,671063     | B9                      | 183,7965916    |
| S10                       | 100,8293785    | B10                     | 110,1128499    |
| S11                       | 105,8685366    | B11                     | 282,1680688    |
| S12                       | 112,2118647    | B12                     | 174,6240819    |
| S13                       | 108,2296245    | B13                     | 154,3777007    |
| S14                       | 113,6899543    | B14                     | 177,9341854    |
| S15                       | 121,4343974    | B15                     | 142,2200734    |
| S16                       | 98,46890638    | B16                     | 121,7024688    |
| S17                       | 113,3414398    | B17                     | 118,899402     |
| S18                       | 95,73193278    | B18                     | 122,2407223    |
| S19                       | 159,2648432    | B19                     | 194,6850649    |
| S20                       | 175,6279052    | B20                     | 190,2447147    |



**Şekil 3.7.** Sediment kütle tartımlarında kullanılan hassas terazi

Temmuz ve Mart ayı kütle tartım değerlerinin belirlenmesinden sonra 100 ml'lik kaplar etiketlenerek, numune kutularının kapak çevresi bantlanıp;  $^{226}\text{Ra}$  -  $^{222}\text{Rn}$  dengesi için beklemeye alınmıştır. Radyoaktivite ölçümüne hazır sediment örnekleri Şekil 3.8'de gösterilmektedir.



**Şekil 3.8.** Temmuz ayı (a), Mart ayı (b) Radyoaktivite ölçümüne hazır sediment örnekleri

XRF analizi için önce kurutulmuş daha sonra öğütücünden ve 2 mm'lik gözenekli çelik elekten geçirilmiştir. Toplam 40 sediment örneğinden yaklaşık 50'şer g kadar alınarak küçük kilitli poşetlere konulmuştur. Her bir poşet üzerine ilgili numuneye ait

barkot numaraları yazılarak kaydedilmiştir. Numuneler XRF için özel olan numune kaplarında toz formda 3gr kullanılarak ölçülmüştür. Analize hazır numuneler Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



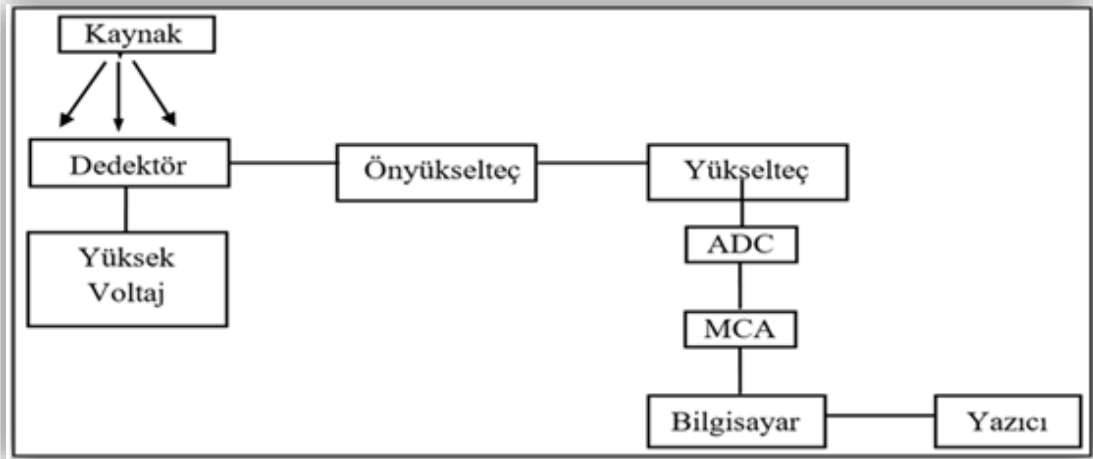
Şekil 3.9. WD-XRF analizi için numune hazırlığı

### 3.3. Sediment Örneklerinin Gama Spektrometresinde Analizi ve Kullanılan Yöntemler

Numune hazırlığı sürecinin sonucunda sayıma hazır hale getirilen sediment örneklerinin, uygun sayım sistemleri kullanılarak doğal ve yapay radyonükleotit konsantrasyonları belirlenmiştir. Sayım sistemi ve kullanılan analiz yöntemleri aşağıda detaylı bir şekilde sunulmuştur.

### 3.4. Sediment Örneklerinin Doğal ve Yapay Radyonükleotit Analizinde Kullanılan Sayım Sistemi

Çalışmada, sediment örneklerinin radyoaktivite analizleri için Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda çok kanallı gama spektroskopisi kullanılmıştır. Gama spektroskopik ölçümler, ORTEC GEM50P4-83 model yüksek saflıkta koaksiyel Germanyum (Ge) dedektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu dedektör, 1332,5 keV enerji seviyesinde 1,9 keV çözünürlüğe ve %50 relatif verime sahiptir. Çalışmada kullanılan Gama Spektrometre sisteminin şeması Şekil 3.10'da gösterilmektedir.



**Şekil 3.10.** Gama Spektrometre sistemi şeması (Kurnaz 2009)

Gama Spektrometre sistemi; Dedektör, ön yükselteç, spektroskopi yükselteci, analog sayımları elektronik sinyallere dönüştüren ADC sistemi ve çok kanallı analizörden (MCA) oluşmaktadır.

- Dedektör:** Gama ışınlarını ölçmek amacıyla kullanılan dedektörler, gelen fotonların kristal ile etkileşime girmesi sonucu enerji kaybetmektedir. Bu etkileşim sonucunda kristal içinde elektron deşik çiftleri oluşur ve bu çiftler, dedektöre uygulanan yüksek voltaj aracılığıyla eklem bölgesine sürüklenir. Radyasyonun enerjisi ile doğru orantılı olan bu yük, analizörde ölçülebilen bir voltaj pulsu oluşturur.
- Yüksek Voltaj Ünitesi:** Dedektörün yük birikimi için gerekli elektrik alanını üretmek için voltaj sağlayan ünedir.
- Ön Yükselteç (Preamplifikatör):** Ön yükselteç, dedektörden gelen pulsarı, biriken yük ile orantılı olarak voltaj sinyaline dönüştüren bir bileşendir. Elektronik devreler için gelen sinyalleri şekillendirir ve genişletir. Ayrıca, dedektör ile elektronik devre arasında empedans uyumunu sağlar. Ön yükselticinin ilk aşaması, etkili bir transistör içerir ve dedektöre yakın bir konumda yer alır. Çoğu dedektör, düşük genlikte pulsar ürettikleri için ve uzun kablolar kullanıldığında sinyallerin kapasitif yüklenme gürültüsü içinde kaybolabileceği için, ön yükselticiler, gerçek sinyalleri düşük gürültüyle elde etmek için dedektöre çok kısa kablolarla bağlanır. Ayrıca, ön yükselticinin girişi dedektörle aynı şekilde soğutulur, yani sıvı azot sıcaklığında tutulur.
- Yükselteç (Amplifikatör):** Yükselteç, ön yükseltici tarafından üretilen pulsarın yüksekliğini artırarak, enerji ayrımını en iyi şekilde sağlayacak bir seviyeye yükseltir. Modern sistemler için maksimum çıkış pulsarının genliği genellikle 2 V ile 10 V arasında değişir. Birçok yükselteç, sinyalin hem tek kutuplu çıkış (sinyalin tepe noktasının tamamen pozitif veya tamamen negatif olduğu) hem de bipolar çıkışa (sinyalin hem pozitif hem de negatif bileşenlere sahip olduğu) sahiptir. En iyi sinyal-gürültü oranını elde etmek için, yükselteç genellikle tek kutuplu çıkış modunda kullanılır.

- e) Analog-Dijital Dönüştürücü (ADC): Spektroskopi yükselteçlerinden gelen sinyalleri, genlikleriyle orantılı olarak dijital bir sistemde temsil etmek üzere dönüştüren bir bileşendir. Özellikle ölü zaman, birim zamanda kazanç veya dönüşüm artışı ile ilişkilendirildiği için önemlidir. Ölü puls yüksekliği analizi için kullanılır.
- f) Çok Kanallı Analiz Cihazı (MCA): Çok Kanallı Analiz Cihazları genellikle puls yüksekliklerini incelemek için kullanılan cihazlardır. MCA'nın en önemli devresi veya bileşeni, analog-dijital dönüştürücüdür (ADC). Burada, her gelen puls sayısal olarak temsil edilir ve genliklerine orantılı bir hafıza kanalına atanır. Her kanal, belirli bir enerji seviyesini temsil eder ve pulsların birikimleri ile zirveler üretilir.

Bilgisayar hafızasında saklanan spektrumların analiz edilebilmesi için, her kanalın karşılık geldiği enerji seviyesinin bilinmesi gereklidir. Bu bilgi, örnekte bulunan radyoaktif çekirdek türlerini tanımlamamıza yardımcı olur. Enerji kalibrasyonunun gerçekleştirilebilmesi için, önceden enerjileri bilinen çekirdeklerden oluşan bir standart kaynağa ihtiyaç vardır. Enerji ve verim kalibrasyonu için, enerjileri 80–1400 keV arasında değişen  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  ve  $^{60}\text{Co}$ 'ın piklerini içeren standart nokta kaynakları kullanılmıştır. Enerji kalibrasyonu için kullanılan standart kaynaklara ait bilgiler, Çizelge 3.3'te sunulmaktadır.

**Çizelge 3.3.** Enerji kalibrasyonunda kullanılan kaynaklarının özellikleri

| İzotoplar         | Enerji (keV) | Yarı-ömür (gün) | Bolluk (%) |
|-------------------|--------------|-----------------|------------|
| $^{133}\text{Ba}$ | 81           | 3830            | 33         |
| $^{109}\text{Cd}$ | 88           | 464             | 3,72       |
| $^{57}\text{Co}$  | 122,1        | 271             | 86         |
| $^{57}\text{Co}$  | 136,5        | 271             | 11         |
| $^{133}\text{Ba}$ | 276,4        | 3830            | 6,9        |
| $^{133}\text{Ba}$ | 302,8        | 3830            | 19         |
| $^{133}\text{Ba}$ | 356          | 3830            | 62         |
| $^{133}\text{Ba}$ | 383,8        | 3830            | 8,7        |
| $^{22}\text{Na}$  | 511          | 946             | 180        |
| $^{137}\text{Cs}$ | 661,6        | 11022           | 85         |
| $^{54}\text{Mn}$  | 834,8        | 313             | 100        |
| $^{60}\text{Co}$  | 1173,2       | 1922            | 100        |
| $^{22}\text{Na}$  | 1274,5       | 946             | 100        |
| $^{60}\text{Co}$  | 1332,5       | 1922            | 100        |

Dedektör verimi, dedektörde sayılabilir büyüklükte pulslar üreten fotonların sayısının dedektöre gelen fotonların sayısına oranı olarak ya da dedektörde sayılabilir büyüklükte pulslar üreten fotonların yüzdesi olarak tanımlanır. Dedektörün kaydettiği gama ışını sayılarının gerçek değerini hesaplayabilmek için dedektörün özgül verim düzeltilmesi yapılması gerekmektedir. Verim değerlendirmesi için IAEA-RGK-1 (Potasyum Sülfat), IAEA-RGTh-1 (Toryum Cevheri) ve IAEA-RGU-1 (Uranyum Cevheri) gibi standart kaynaklar kullanılmıştır. Analizler için ORTEC'in GAMMAVISION programı kullanılmıştır.



### 3.5. Aktivite Konsantrasyonlarının Hesaplanması

Elde edilen spektrumlarda,  $^{226}\text{Ra}$  (186 keV) gama piki;  $^{232}\text{Th}$  serisinin bozunma ürünü olan  $^{208}\text{Tl}$  (583,2 keV),  $^{228}\text{Ac}$  (338,2 keV),  $^{228}\text{Ac}$  (911 keV) gama geçişi ile;  $^{40}\text{K}$  (1460 keV) ve  $^{137}\text{Cs}$  (662 keV) pikleri dikkate alınmıştır.

Analiz edilen örneklerde aktivite konsantrasyonlarının hesaplanması için Denklem 3.1 kullanılmıştır:

$$A = \frac{N_{\text{net}}}{\varepsilon \cdot t \cdot I_{\gamma} \cdot m} \quad (3.1)$$

Burada,

A; hesaplanan aktivite (Bq/kg),  $N_{\text{net}}$ ; net pik alanı,  $\varepsilon$ ; ilgilenilen pik için dedektör verimi,  $t$ ; sayım süresi,  $m$ ; numunenin kütlesi (kg),  $I_{\gamma}$ ; gama ışını enerjisinin yayınlanma olasılığıdır (Ibraheem vd. 2018; Emad vd. 2022).

### 3.6. Minimum Dedekte Edilebilen Aktivite (MDA)

Minimum dedekte edilebilen aktivite, bir ölçüm sisteminin belirli koşullar altında en düşük aktivite seviyesini ifade eden bir terimdir. Bu terim, ölçüm sisteminin doğruluğunu ve güvenilirliğini belirler.  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  için Minimum Tespit Edilebilir Aktivite (MDA), Denklem (3.2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$MDA = \frac{2.71 + 4.65\sigma}{\varepsilon \cdot t \cdot m \cdot I_{\gamma}} \quad (3.2)$$

Burada,  $\sigma$  background standart sapması,  $t$  sayım zamanı,  $\varepsilon$  tam enerji pik verimi,  $I_{\gamma}$  ilgili gama ışını enerjisinin yayınlanma olasılığı ve  $m$  numune kütlesidir (Currie 1968).

Çalışma da MDA değerleri  $^{226}\text{Ra}$  için 0,2,  $^{232}\text{Th}$  için 0,3,  $^{40}\text{K}$  için 2,1 ve  $^{137}\text{Cs}$  için 0,0 olarak belirlenmiştir.

### 3.7. Radyolojik Tehlike Değerlendirme Parametreleri

Vücudumuza etki eden radyoaktivite, hem içsel ışınlamadan kaynaklanan faktörlerden hem de dışsal kaynaklardan gelen etkenlerden kaynaklanmaktadır. Radyasyon maruziyeti arttıkça, vücudumuza ulaşan radyasyon dozları da artış gösterir. Radyasyona maruz kalmanın sonuçları, birçok değişkeni içinde barındırır ve radyolojik risk tahminlerini yaparken çeşitli parametreler dikkate alınır. Bu parametreler, radyasyon kaynağına içsel veya dışsal maruz kalma süresi, radyasyonun türü, enerjisi, gibi faktörleri içerir. Radyolojik riski tahmin etmek için yaygın olarak kullanılan radyasyon riski parametreleri aşağıda açıklanmıştır.

Soğurulan gama doz oranı (D), iyonize radyasyon kaynağına 1 metre mesafedeki bir malzeme tarafından soğurulan gama radyasyonunun etkisini belirlemek için kullanılan bir orandır. Denklem 3.3'teki şekilde ifade edilir.

$$D = 0,462A_{Ra} + 0,604A_{Th} + 0,0417A_K \quad (3.3)$$

Burada:  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$  ve  $A_K$  sırasıyla,  $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$  ve  $^{40}K$ 'ın özgül aktiviteLERİDİR. Soğurulan gama doz oranı (D), doğal radyonükleotitlerin ( $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$  ve  $^{40}K$ ) aktivite değerlerine bağlıdır. Bu aktivite konsantrasyonlarını dönüştürmek için kullanılan dönüşüm faktörleri sırasıyla 0,462, 0,604 ve 0,0417'dir (Suman vd. 2022).

Radyum eşdeğer aktivitesi ( $Ra_{eq}$ ),  $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$  ve  $^{40}K$ 'nın nükleotitlerinin konsantrasyonları ve çevresel örneklerdeki dağılımları her yerde aynı değildir. Radyasyona maruz kalma, farklı miktarda  $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$  ve  $^{40}K$  içeren örneklerin özgül aktiviteLERİNİ karşılaştırmak için radium eşdeğer aktivite  $Ra_{eq}$  olarak Bq/kg olarak standartlaştırılmıştır (Almeqbalı 2022). Radyum eşdeğer dozu ( $Ra_{eq}$ ),  $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$  ve  $^{40}K$  gibi materyallerden kaynaklanan radyasyon tehlikelerini değerlendirmek için Bq/Kg cinsinden kullanılır ve Denklem (3.4)'deki şekilde tanımlanır:

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1,43A_{Th} + 0,077A_K \quad (3.4)$$

Burada:  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$  ve  $A_K$  sırasıyla  $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$  ve  $^{40}K$ 'nın özgül aktiviteLERİDİR. Radyum eşdeğer aktivitesi ( $Ra_{eq}$ ),  $^{226}Ra$ 'nın 370 Bq/kg,  $^{232}Th$ 'nin 259 Bq/kg ve  $^{40}K$ 'nın 4810 Bq/kg aynı gama ışını dozu üretmesi ilkesine dayandırılarak  $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$  ve  $^{40}K$  aktiviteLERİNİN ağırlıklı toplamıyla elde edilmiştir.  $Ra_{eq}$  için müsaade edilen maksimum değer 370 Bq/ kg 'dir (NEA-OECD 1979; Abdel Gawad vd. 2022).

Yıllık gonadal doz eşdeğeri (AGDE), başta gonadlar olmak üzere genel organlar tarafından yıllık soğurulan doz miktarının tespit etmek için kullanılan parametredir. Gonadlar, aktif kemik iliği ve kemik yüzey hücreleri, ilgilenilen organlar olarak düşünülür (UNSCEAR 1988). Yıllık gonodal doz eşdeğeri Denklem 3.5'ten belirlenir.

$$AGDE = 3,09A_{Ra} + 4,18A_{Th} + 0,314A_K \quad (3.5)$$

$^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$  ve  $^{40}K$  aktivite konsantrasyonlarını dönüştürmek için kullanılan dönüşüm faktörleri sırasıyla 3,09, 4,18 ve 0,314 olarak kullanılmıştır (Abd El-Azeem ve Mansour 2021).

Maruz kalma oranı (ER), radyasyona maruziyetin belirlenmesinde kullanılan radyolojik parametredir ve Denklem (3.6)'daki şekilde tanımlanır:

$$ER = 1,90A_{Ra} + 2,82A_{Th} + 0,179A_K \quad (3.6)$$

$^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$  ve  $^{40}K$  aktivite konsantrasyonlarını dönüştürmek için sırasıyla 1,90, 2,82 ve 0,179 dönüşüm faktörleri kullanılmıştır (Sathish vd. 2022).

Yıllık etkin doz eşdeğeri toplamı ( $AEDE_{toplam}$ ), insanların 1 yıl süresince maruz kaldıkları toplam radyasyon doz miktarlarını belirtmektedir (Thangam vd. 2022). Absorbe Edilen Doz Hızı (nGy/h), Doz Dönüşüm Faktörü (Sv/Gy), Maruziyet Faktörü ve Zaman (h/y)' ın çarpımıyla belirlenir. Yıllık etkin doz eşdeğerinin önerilen değeri 0,48 mSv/ yıl dır (UNSCEAR 2000). Yıllık etkin doz eşdeğer toplamı kapalı alan ve açık alan yıllık etkin doz eşdeğerlerinin toplamı şeklinde Denklem 3.7 ve 3.8 toplamından 3.9'daki gibi ifade edilir.

$$AEDE_{\text{kapalı alan}} = D \times 8760 \text{ h} \times 0,8 \times 0,7 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 10^{-6} \quad (3.7)$$

$$AEDE_{\text{açık alan}} = D \times 8760 \text{ h} \times 0,2 \times 0,7 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 10^{-6} \quad (3.8)$$

$$AEDE_{\text{toplam}} = AEDE_{\text{kapalı alan}} + AEDE_{\text{açık alan}} \quad (3.9)$$

Burada D; Soğurulan gama doz oranıdır. Çevresel gama ışınlamaları için doz dönüşüm faktörü değeri 0,7 Sv/Gy alınmaktadır. Kapalı ortamda geçirilen zamana ilişkin maruziyet faktörü; bir insanın zamanının yaklaşık % 80'ini kapalı alanlarda, % 20'sini de açık alanlarda geçireceği düşünülerek kullanılır. Hesaplanan süre ise 12 ay düşünülerek 8760 saat/yıl alınmıştır (UNSCEAR 1988).

Yaşam boyu kanser riski toplamı ( $ELRC_{\text{toplam}}$ ), insanların yaşamı boyunca belirli bir radyasyon dozuna maruz kalması durumunda kansere yakalanma olasılığını tahmininde kullanılan radyolojik tehlike parametresidir ve Denklem 3.10'da verilmiştir.

$$ELRC_{\text{toplam}} = AEDE_{\text{toplam}} \times 70 \times 0,05 \quad (3.10)$$

Ortalama yaşam süresi 70 yıl ve risk faktörü 0,05  $\text{Sv}^{-1}$  olarak alınmıştır (Senthil Kumar vd. 2022).

Gama temsili seviyesi (GRL), doğal radyonüklidlerin farklı konsantrasyonları ile ilişkili  $\gamma$  radyasyon seviyesini tahmin etmek için kullanılan radyasyon tehlike indeksidir. Gama temsili seviyesi Denklem 3.11'deki gibi ifade edilir (Najam vd. 2022).

$$GRL = \frac{A_{Ra}}{150} + \frac{A_{Th}}{100} + \frac{A_K}{1500} \quad (3.11)$$

Dış ve iç tehlikeler ( $H_{\text{ex}}$  ve  $H_{\text{in}}$ ), yüzey malzemelerinden kaynaklanan radyasyonun insan sağlığı üzerindeki etkilerini tahmin etmek için kullanılan parametrelerdir ve bu değerlerin 1'den büyük olması önerilmez (Jasaitis vd. 2020; Abd El Rahman vd. 2022). Dış ve iç tehlikeler Denklem 3.12 ve 3.13'den belirlenir.

$$H_{\text{in}} = \frac{A_{Ra}}{185} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (3.12)$$

$$H_{\text{ex}} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (3.13)$$

### 3.8. Sediment Örneklerinin XRF Elementel Analizinde Kullanılan Sayım Sistemi

Toz formdaki numunelerin XRF analizleri, numunenin oksidasyonunu önlemek ve numune yüzeyini korumak amacıyla Ar gazı akışında gerçekleştirilmiştir. Sediment örneklerindeki  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CoO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{As}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Rb}_2\text{O}$ ,  $\text{SrO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{PbO}$  oksitleri ile C, Ga, Ge, Se, Br, Y, Mo, Ag, Cd, Te, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd,

Hf, Hg, Tl, Bi, Th, U elementlerinin konsantrasyon seviyeleri belirlenmesinde Şekil 3.12’de gösterilen Kastamonu Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde bulunan Spectro marka Xepos II model WD-XRF Spektrometre cihazı kullanılmıştır.



#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Antalya Boğaçay çevresinde yaşayan insanların sağlığı üzerinde olası etkileri incelemek amacıyla gerçekleştirilen bu araştırmada, sediment örneklerinin doğal ve yapay radyonükleotit aktivite seviyeleri ile element içerikleri belirlenmiştir. Temmuz ve Mart aylarında her iki dönemde benzer konumlardan toplanan 20 şer sediment örneği üzerinde yapılan doğal ve yapay radyoaktivite ile element analizlerinden elde edilen sonuçlar, bu bölgenin radyasyon ve element kirliliği açısından mevcut durumunu ayrıntılı bir şekilde açıklamaktadır. Bu veriler, bölgeye özgü çevresel risklerin daha iyi anlaşılmasına ve etkili koruma önlemlerinin alınmasına katkı sağlayacaktır.

Bu bölümde, sediment örneklerinin doğal ve yapay radyoaktivite konsantrasyonlarını belirleme süreci ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Bu konsantrasyonlardan türetilen radyolojik tehlike parametre değerleri ve WD-XRF tekniği ile elde edilen sediment örneklerinin elementel içerik bulguları detaylı bir şekilde incelenmektedir. Bununla birlikte, sedimentlerin doğal ve yapay radyonükleotitleri ile birlikte hesaplanan radyolojik tehlike parametreleri ve elementel içerikleri, Türkiye ve diğer ülkelerde yapılan benzer çalışmaların rapor edilen değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaların yanı sıra, radyoaktivite konsantrasyonları, radyolojik tehlike parametreleri ve elementel analiz bulgularının istatistiksel değerlendirmesi SPSS programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde sunulmuştur.

##### 4.1. Sediment Örneklerinin Doğal ve Yapay Radyoaktivite Konsantrasyonları

Çalışma kapsamında, bölgenin temsilini sağlamak amacıyla sistemli bir şekilde Temmuz ve Mart aylarında benzer noktalardan toplanan 20 şer adet sediment örneği üzerinde yüksek saflıkta germanyum (HPGe) gama spektrometre sistemi kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Temmuz ayında toplanan 20 sediment örneğinde, doğal radyonükleotitlerden  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  ile yapay  $^{137}\text{Cs}$  radyonükleotitlerinin aktivite konsantrasyonlarının ortalamaları sırasıyla  $^{226}\text{Ra}$  için 12,92 (5,62 - 22,40) Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  için 14,78 (7,98 - 25,29) Bq/kg,  $^{40}\text{K}$  için 194,52 (91,81 - 392,82) Bq/kg ve  $^{137}\text{Cs}$  için 3,76 (3,16 - 4,99) Bq/kg olarak belirlenmiştir. Mart ayında toplanan 20 sediment örneğinde ise, doğal radyonükleotitlerden  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  ile yapay  $^{137}\text{Cs}$  radyonükleotitlerinin aktivite konsantrasyonlarının ortalamaları sırasıyla  $^{226}\text{Ra}$  için 9,45 (4,25 - 18,36) Bq/kg, Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  için 8,06 (3,34 - 14,07) Bq/kg,  $^{40}\text{K}$  için 104,54 (53,57 - 173,16) Bq/kg ve  $^{137}\text{Cs}$  için 1,72 (0,00 - 3,42) Bq/kg olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.1 ve 4.2’de sırasıyla Temmuz ve Mart aylarında sediment örneklerinin  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonları verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Temmuz ayı sediment örneklerinin  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  aktivite konsantrasyonları (Bq/kg)

| Numune No | $^{226}\text{Ra}$ | $^{232}\text{Th}$ | $^{40}\text{K}$ | $^{137}\text{Cs}$ |
|-----------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| S1        | 5,62±0,16         | 10,00±0,29        | 104,72±3,04     | 3,42±0,08         |
| S2        | 7,80±0,22         | 8,73±0,25         | 91,81±2,65      | 3,26±0,07         |
| S3        | 12,08±0,35        | 10,48±0,30        | 109,44±3,16     | 3,35±0,08         |
| S4        | 18,81±0,5         | 13,16±0,38        | 117,15±3,39     | 3,70±0,10         |

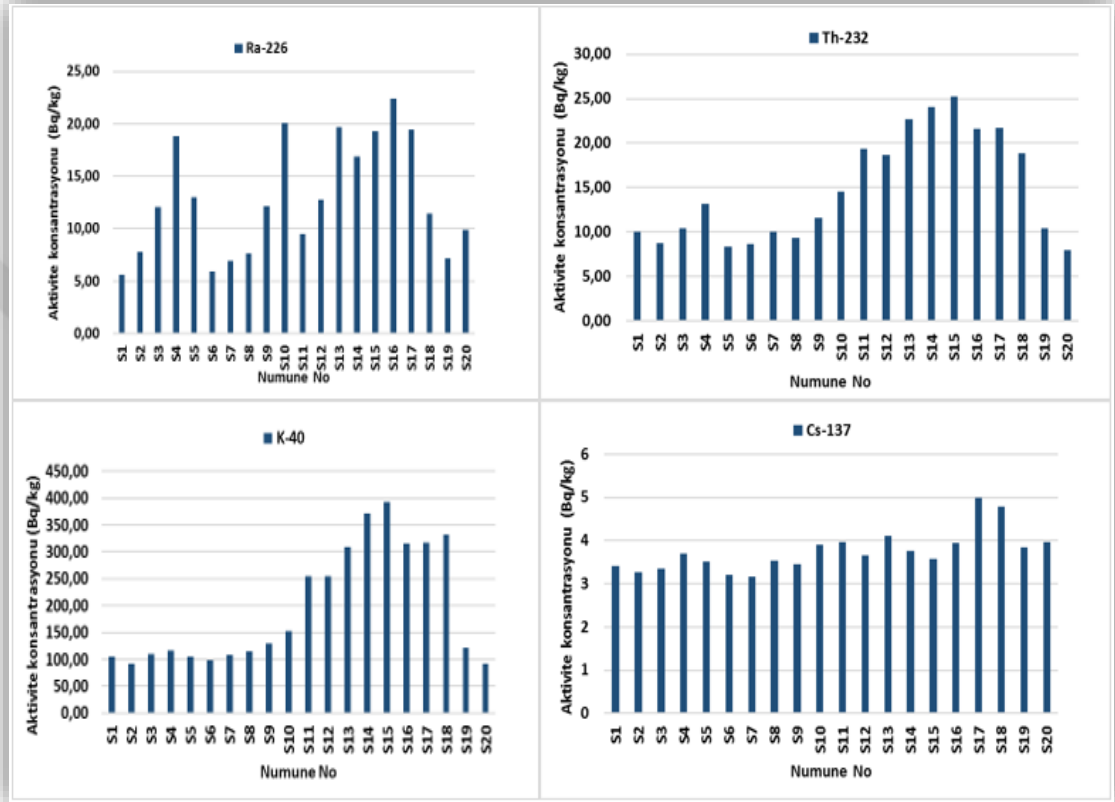
Çizelge 4.1'in devamı

|             |                   |                  |                    |                  |
|-------------|-------------------|------------------|--------------------|------------------|
| <b>S5</b>   | <b>12,96±0,39</b> | <b>8,35±0,24</b> | <b>104,46±3,02</b> | <b>3,52±0,08</b> |
| <b>S6</b>   | 5,95±0,17         | 8,66±0,50        | 98,69±2,84         | 3,20±0,07        |
| <b>S7</b>   | 6,89±0,21         | 10,07±0,30       | 108,33±3,11        | 3,16±0,07        |
| <b>S8</b>   | 7,62±0,23         | 9,34±0,28        | 114,29±3,29        | 3,54±0,09        |
| <b>S9</b>   | 12,17±0,36        | 11,58±0,33       | 129,16±3,74        | 3,46±0,08        |
| <b>S10</b>  | 20,03±0,59        | 14,58±0,42       | 152,37±4,41        | 3,90±0,10        |
| <b>S11</b>  | 9,52±0,28         | 19,36±0,57       | 254,11±7,35        | 3,96±0,11        |
| <b>S12</b>  | 12,73±0,26        | 18,65±0,48       | 254,41±7,38        | 3,66±0,10        |
| <b>S13</b>  | 19,70±0,59        | 22,67±0,65       | 309,43±8,96        | 4,12±0,11        |
| <b>S14</b>  | 16,90±0,51        | 24,09±0,70       | 371,41±10,76       | 3,77±0,10        |
| <b>S15</b>  | 19,30±0,56        | 25,29±0,74       | 392,82±11,37       | 3,57±0,08        |
| <b>S16</b>  | 22,40±0,65        | 21,58±0,63       | 315,66±9,13        | 3,94±0,10        |
| <b>S17</b>  | 19,46±0,55        | 21,74±0,64       | 316,85±9,18        | 4,99±0,12        |
| <b>S18</b>  | 11,45±0,34        | 18,87±0,56       | 331,25±9,62        | 4,79±0,11        |
| <b>S19</b>  | 7,15±0,21         | 10,43±0,31       | 122,20±3,53        | 3,85±0,10        |
| <b>S20</b>  | 9,91±0,29         | 7,98±0,23        | 91,88±2,63         | 3,97±0,10        |
| <b>Ort.</b> | 12,92±0,37        | 14,78±0,44       | 194,52±5,63        | 3,76±0,09        |
| <b>Min.</b> | 5,62±0,16         | 7,98±0,23        | 91,81±2,63         | 3,16±0,07        |
| <b>Max.</b> | 22,40±0,65        | 25,29±0,74       | 392,82±11,37       | 4,99±0,12        |

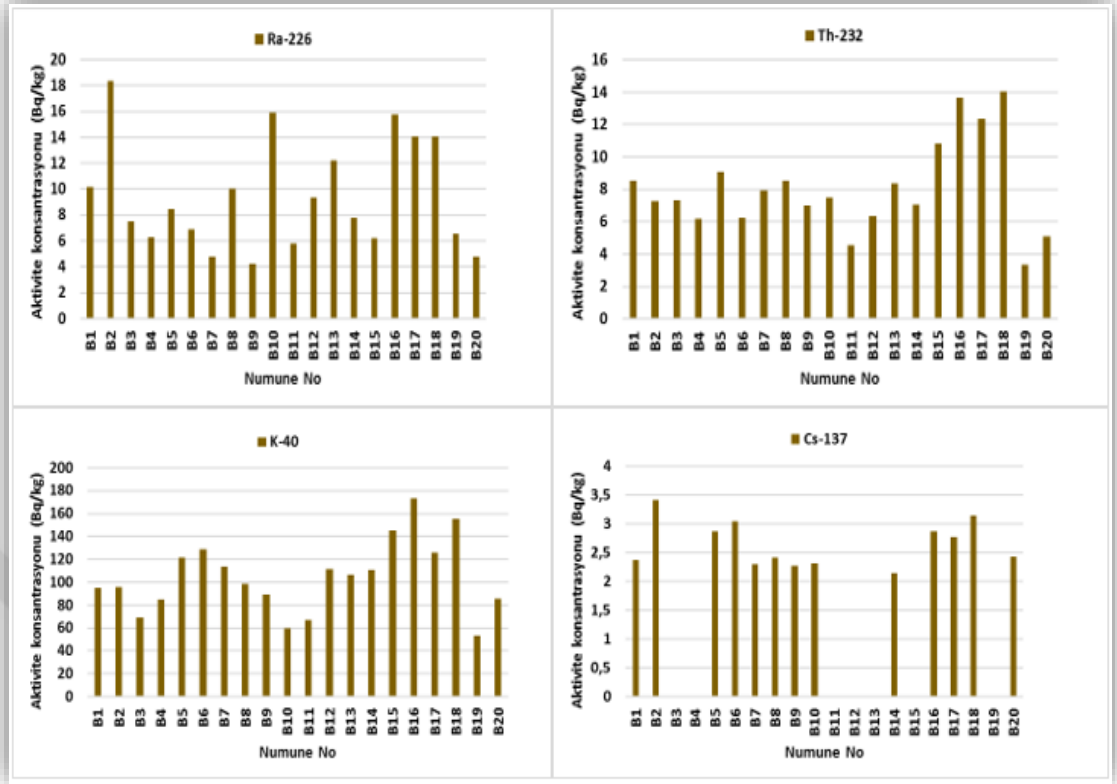
Çizelge 4.2. Mart ayı sediment örneklerinin <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K ve <sup>137</sup>Cs aktivite konsantrasyonları (Bq/kg)

| Numune No   | <sup>226</sup> Ra | <sup>232</sup> Th | <sup>40</sup> K | <sup>137</sup> Cs |
|-------------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| <b>B1</b>   | 10,17±0,22        | 8,55±0,23         | 95,23±1,65      | 2,37±0,05         |
| <b>B2</b>   | 18,36±0,40        | 7,26±0,17         | 95,51±1,62      | 3,42±0,07         |
| <b>B3</b>   | 7,47±0,16         | 7,35±0,16         | 68,78±1,19      | 0±0               |
| <b>B4</b>   | 6,29±0,14         | 6,2±0,14          | 85,23±1,45      | 0±0               |
| <b>B5</b>   | 8,48±0,19         | 9,06±0,21         | 121,24±2,02     | 2,87±0,07         |
| <b>B6</b>   | 6,90±0,15         | 6,23±0,15         | 128,75±2,16     | 3,05±0,06         |
| <b>B7</b>   | 4,74±0,10         | 7,92±0,18         | 113,65±1,93     | 2,31±0,05         |
| <b>B8</b>   | 10,00±0,22        | 8,51±0,20         | 98,49±1,67      | 2,42±0,06         |
| <b>B9</b>   | 4,25±0,09         | 6,98±0,16         | 88,96±1,51      | 2,28±0,05         |
| <b>B10</b>  | 15,90±0,35        | 7,51±0,17         | 59,88±1,08      | 2,32±0,05         |
| <b>B11</b>  | 5,81±0,13         | 4,54±0,12         | 66,81±1,13      | 0±0               |
| <b>B12</b>  | 9,32±0,21         | 6,35±0,15         | 111,75±1,94     | 0±0               |
| <b>B13</b>  | 12,19±0,27        | 8,39±0,21         | 106,52±1,81     | 0±0               |
| <b>B14</b>  | 7,78±0,17         | 7,05±0,16         | 111,06±1,89     | 2,15±0,04         |
| <b>B15</b>  | 6,23±0,14         | 10,84±0,23        | 145,55±2,47     | 0±0               |
| <b>B16</b>  | 15,80±0,35        | 13,67±0,32        | 173,16±2,93     | 2,88±0,07         |
| <b>B17</b>  | 14,04±0,31        | 12,36±0,28        | 125,84±2,14     | 2,77±0,06         |
| <b>B18</b>  | 14,04±0,31        | 14,07±0,33        | 155,17±2,62     | 3,14±0,07         |
| <b>B19</b>  | 6,52±0,14         | 3,34±0,09         | 53,57±1,04      | 0±0               |
| <b>B20</b>  | 4,75±0,10         | 5,11±0,12         | 85,69±1,46      | 2,43±0,06         |
| <b>Ort.</b> | 9,45±0,21         | 8,06±0,19         | 104,54±1,79     | 1,72±0,04         |
| <b>Min.</b> | 4,25±0,09         | 3,34±0,09         | 53,57±1,04      | 0±0               |
| <b>Max.</b> | 18,36±0,40        | 14,07±0,33        | 173,16±2,93     | 3,42±0,07         |

Elde edilen ölçüm sonuçları,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  için UNSCEAR (2000) raporunda belirtilen  $^{226}\text{Ra}$  için 32 Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  için 45 Bq/kg ve  $^{40}\text{K}$  için 420 Bq/kg olan dünya ortalamalarının altında olduğunu açık bir şekilde yansıtmaktadır. Bu durum, bölge sedimentlerinin radyoaktif özelliklerinin genel dünya standardına uygun olduğunu ve çevresel olarak daha az radyasyon riski taşıdığını göstermektedir. Şekil 4.1 ve 4.2’de sırasıyla Temmuz ve Mart ayları sediment örneklerindeki doğal ve yapay radyonükleotit konsantrasyonlarının grafiksel gösterimi yapılmıştır.



**Şekil 4.1.** Temmuz ayı sediment örneklerinin  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  aktivite konsantrasyonları



**Şekil 4.2.** Mart ayı sediment örneklerinin  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  aktivite konsantrasyonları

Temmuz ayı örneklerinde, Boğaçay projesi kapsamındaki müdahalelerin etkisiyle Boğaçay'ın akış hızının azaldığı ve derinliğinin arttığı bölgelerde (özellikle S11 koordinatındaki örnek konumu ile S19 arasındaki sediment örneklerinde),  $^{232}\text{Th}$  konsantrasyonları, aynı örneklerdeki  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonu değerlerinden belirgin şekilde yüksektir. Bu durumun arkasında düşük jeokimyasal hareketlilik ve suda çözünmeyen doğal toryumun etkisi olabilir. Bununla birlikte, S20 numunesinde  $^{232}\text{Th}$  konsantrasyonu,  $^{226}\text{Ra}$  konsantrasyonu değerinden düşük olarak belirlenmiştir. Bu durum, S20 numunesi konumunun, Boğaçay'ın Akdeniz ile birleştiği nokta olması nedeniyle, bu alandaki radyoaktif içeriğin denizdeki dalgalanma etkisiyle deniz tarafına taşındığını düşündürmektedir.

Mart ayı örneklerinde, (B5, B7, B9, B15, B18, B20 hariç)  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyon değerleri aynı örneklerdeki  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonlarından daha düşüktür. Bu durum Mart ayı yağış artışı ve yaşanan taşkınlar nedeniyle Boğaçayda akışın artması ile radyoaktif içeriğin denize taşınmasında ve  $^{232}\text{Th}$ 'nin  $^{238}\text{U}$ 'dan ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$  bozunum serisinden belirlenmiştir) daha düşük yoğunluğa sahip olduğundan su içerisinde  $^{238}\text{U}$ 'a göre daha az dibe çökme eğilimi göstermiş olabileceğine atfedilmiştir.

$^{137}\text{Cs}$ 'nin Temmuz ayı sediment örneklerindeki aktivite konsantrasyonu 3,76 Bq/kg iken, Mart ayı sediment örneklerinde (1,72 Bq/kg) düşmüştür. Bu durum,  $^{137}\text{Cs}$ 'nin yüksek hareket kabiliyeti ve hafifliği nedeniyle, bu radyonüklidin daha yüksek



konsantrasyonun ilkbaharda bölgenin aşırı yağış alması sonucu Boğaçay'ın karakteristik özelliği olan taşkınlar sonrası Boğaçay'dan Akdeniz'e taşındığını düşündürmüştür. <sup>40</sup>K konsantrasyonu tüm numunelerde belirlenen dünya ortalama değerlerinden düşük elde edilmiştir.

Radyonükleotitlerin sediment örneklerindeki artış ve azalışı, organik madde içeriği, adsorpsiyon kinetiği ve ortamın pH seviyesine bağlıdır. Analiz sonuçları, kumlu sedimentlerde en düşük ortalama değerlerin, kumlu balçıklı sedimentlerde ise en yüksek ortalama değerlerin bulunduğunu göstermektedir; bu durum, tane boyutu dokusundaki farklılıklara bağlanabilir. Radyonükleotit aktivite konsantrasyonları, parçacık boyutu azaldıkça birim kütleye düşen yüzey alanındaki artış nedeniyle artmaktadır (Alfonso vd. 2014; Caridi vd. 2016). Boğaçay göleti, çayın sahil ile birleştiği alanda 2019 yılında oluşturulmuş ve şu anda çökeltme havuzu olarak işlev görmektedir. Göletin kuzeyinde büyük kum ve çakıl tanecikleri birikirken, ince taneli malzemeler gölet içinde çökmeye eğilimlidir. Aynı süreçte, göletin kuzeyinde çay yatağında iri taneli sediment çökelmiştir (Dipova 2019). Bu durum, sediment örneklerindeki aktivite konsantrasyonlarındaki değişimi desteklemektedir. Çalışmada, Boğaçay göleti tarafından alınan sediment örneklerinin, balçıklı sedimentler olduğu için radyonükleotit aktivite konsantrasyonlarının çay yatağından alınan iri taneli örneklerdeki aktivite konsantrasyonundan daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Antalya'da uzun yıllar boyunca şehir merkezine en yakın kum-çakıl ihtiyacı, Boğaçay yatağından karşılanmıştır (Dipova 2019). Bu kullanımın yoğunluğu, sediment taşınımındaki azalmayla doğrudan ilişkilidir. Çalışma sonuçları değerlendirilirken; Temmuz ve Mart aylarında sediment taşınımındaki azlığın, radyonükleotit konsantrasyonunda belirgin bir değişim olmamasının nedeni olarak düşünülmüştür.

Çalışmada <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K, <sup>137</sup>Cs aktivite konsantrasyonlarında Temmuz ayında elde edilen değerlerin Mart dönemine göre istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu genel durum, Mart ayında Boğaçay'ın akış hızının yüksekliğine ve dip birikiminin azlığına bağlanmıştır. Bu durum aynı zamanda; Boğaçay'ı besleyen nehirler tarafından yüksek rakımlardan taşınan sürüntünün de radyoaktivite açısından önemli bir miktarda teşkil etmediği sonucuna varılmasına olanak sağlamıştır. Çünkü sedimentler aynı zamanda kirleticilerin bir coğrafi alan içinde taşınmasında ve birikmesinde de önemli bir rol oynar.

Çalışmada bulunan doğal radyonüklid konsantrasyonları literatürde yapılan başka çalışmalarla karşılaştırıldığında; Çizelge 4.3'e göre, Temmuz ve Mart ayları için belirlenen <sup>226</sup>Ra konsantrasyonu ortalamaları, Güney Çin Denizi kıyısı (Al Shaaibi vd. 2023) için belirlenen <sup>226</sup>Ra aktivite konsantrasyon ortalama değerlerinden yüksektir. Ancak Gana Kıyı şeridi (Akua-ko vd. 2023) için belirlenen <sup>226</sup>Ra aktivite konsantrasyon ortalama değerlerinden yaklaşık 4 kat daha düşüktür.

Temmuz ve Mart ayları numunelerinde <sup>232</sup>Th aktivite konsantrasyonu ortalama değerleri Umman kıyıları (Al Shaaibi vd. 2021), Namal Gölü (Afzal vd. 2022), İstanbul Boğazı (İsel vd. 2023), Dukan Barajı, (Smail vd. 2023), Güney Çin Denizi kıyısı (Al Shaaibi vd. 2023) için belirlenen <sup>232</sup>Th aktivite konsantrasyon ortalama değerlerinden yüksek, Muzaffarabad (Rafique vd. 2020) için belirlenen <sup>232</sup>Th aktivite konsantrasyon ortalama değerininin yaklaşık ¼ ünden daha düşüktür.

Bu çalışmadan elde edilen Temmuz ve Mart ayı sediment  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonu ortalama değeri, St. Martin Adası (Islam vd. 2019), Muscat Şehri'nin kıyı kesimi (Suliman ve Alsafi 2021), Umman kıyıları (Al Shaaibi vd. 2021), Güney Çin Denizi kıyısı (Al Shaaibi vd. 2023) için belirlenen  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyon ortalama değerleri ile çalışmalarında dünya ortalama değerinden (420 Bq/kg) düşük olarak belirlendiği belirtilen Hurghada (Zakaly vd. 2019), Van Gölü (Kayakökü ve Doğru 2020), Kızıldeniz kesimleri (Zakaly vd. 2021), Namal Gölü (Afzal vd. 2022), Dicle Nehri (Najam ve Wais 2022), İstanbul (İsel vd. 2023), Dukan Barajı (Smail vd. 2023), Gana Kıyı şeridi (Akua-ko vd. 2023) için elde edilen değerlerin arasındadır.

Temmuz ve Mart ayları sediment örnekleri için belirlenen  $^{137}\text{Cs}$  aktivitesi ortalama değerleri Muscat Şehri'nin kıyısı (Suliman ve Alsafi 2021), Namal Gölü (Afzal vd. 2022), Dukan Barajı (Smail vd. 2023) için belirlenen değerler ile Boka Kotorska Körfezi (Radomirović vd. 2021), Gorgan Körfezi (Mohsen vd. 2022), Borçka Karagöl (Dizman vd. 2022), İstanbul Boğazı (İsel vd. 2023), Gana Kıyı şeridi (Akua-ko vd. 2023), için belirlenen değerler arasındadır. Çizelge 4.3'te sediment numunelerindeki radyoaktivite konsantrasyonlarının belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalar ve dünya ortalama değerleri verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Dünya çapındaki sediment örneklerinde  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  (Bq/kg) aktivite konsantrasyonu ortalamaları

| Ülke      | Konumu                       | $^{226}\text{Ra}$ | $^{232}\text{Th}$ | $^{40}\text{K}$ | $^{137}\text{Cs}$ | Referans                    |
|-----------|------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------------------|
| Kıbrıs    | Akdeniz kıyısı               | 20,1              | 18,34             | 467,3           | -                 | (Abbasi ve Mirekhtary 2020) |
| İtalya    | Calabria                     | 21,3 ± 6,3        | 30,3 ± 4,5        | 849 ± 79        | -                 | (Caridi vd. 2021)           |
| Hindistan | Thamirabarani Nehri          | 40,85             | 51,87             | 838,19          | -                 | (Thangam vd. 2022)          |
| Türkiye   | Borçka Karagöl               | -                 | 13,85 ± 1,10      | 473,67 ± 14,21  | 35,06 ± 0,96      | (Dizman vd. 2022)           |
| Mısır     | Kızıldeniz kesimleri         | 23,8              | 19,6              | 374,9           | -                 | (Zakaly vd. 2021)           |
| Bangladeş | St. Martin Adası             | 30,7              | 30,7              | 30,7            | -                 | (Islam vd. 2019)            |
| Umman     | Muscat Şehri'nin kıyı kesimi | 16,2              | 34,5              | 54,7            | 0,08              | (Suliman ve Alsafi 2021)    |
| Umman     | Umman kıyıları               | 20,49 ± 3,50      | 2,26 ± 0,60       | 44,83 ± 4,60    | -                 | (Al Shaaibi vd. 2021)       |
| Pakistan  | Namal Gölü                   | 25,06 ± 4,74      | 1,73 ± 0,33       | 237,26 ± 37,97  | 0,74 ± 0,29       | (Afzal vd. 2022)            |
| Türkiye   | İstanbul Boğazı              |                   | 6,87 ± 0,16       | 369,61 ± 3,41   | 6,54 ± 0,11       | (İsel vd. 2023)             |
| Irak      | Dukan Barajı                 | 10,65 ± 0,41      | 3,89 ± 0,12       | 198,05 ± 3,37   | 1,56 ± 0,09       | (Smail vd. 2023)            |
| Çin       | Güney Çin Denizi kıyısı      | 7,01 ± 0,87       | 1,67 ± 0,15       | 21,44 ± 1,23    | -                 | (Al Shaaibi vd. 2023)       |
| Gana      | Gana Kıyı şeridi             | 43 ± 6            | 22 ± 1            | 393 ± 74        | 8,4 ± 0,5         | (Akua-ko vd. 2023)          |

## Çizelge 4.3'ün devamı

|                         |                               |              |              |                |             |                             |
|-------------------------|-------------------------------|--------------|--------------|----------------|-------------|-----------------------------|
| <b>Irak</b>             | <b>Dicle Nehri</b>            | <b>9,86</b>  | <b>23,05</b> | <b>232,91</b>  | <b>-</b>    | <b>(Najam ve Wais 2022)</b> |
| <b>Bangladeş</b>        | Karnaphuli ve Halda nehirleri | 23,74        | 37,22        | 445,09         | -           | (Islam vd. 2023)            |
| <b>Mısır</b>            | Hurghada                      | 13 ± 1       | 14 ± 2       | 341 ± 20       | -           | (Zakaly vd. 2019)           |
| <b>Karadağ</b>          | Boka Kotorska Körfezi         | 20           | 35           | 580            | 6,1         | (Radomirović vd. 2021)      |
| <b>Rusya</b>            | Barents Denizi                | 14,2         | 21,1         | 439,1          | 3,2         | (Yakovlev ve Puchkov 2020)  |
| <b>Mısır</b>            | Burullus Gölü                 | 12,43        | 15,28        | 124,38         | -           | (El-Alfy vd. 2023)          |
| <b>Van</b>              | Van Gölü                      | 25,92        | 27,38        | 290,88         | -           | (Kayakökü ve Doğru 2020)    |
| <b>Pakistan</b>         | Muzaffarabad                  | 36,91 ± 1.12 | 61,57 ± 2.81 | 557.33 ± 19.81 | -           | (Rafique vd. 2020)          |
| <b>İran</b>             | Gorgan Körfezi                | 16,30        | 29,88        | 324,39         | 6,32        | (Mohsen vd. 2022)           |
| <b>Türkiye</b>          | Boğaçay                       | 12,92 ± 0,37 | 14,78 ± 0,44 | 194,52 ± 5,63  | 3,76 ± 0,09 | Bu çalışma (Temmuz ayı)     |
| <b>Türkiye</b>          | Boğaçay                       | 9,45 ± 0,21  | 8,06 ± 0,19  | 104,54 ± 1,79  | 1,72 ± 0,04 | Bu çalışma (Mart Ayı)       |
| <b>Dünya Ortalaması</b> |                               | <b>32</b>    | <b>45</b>    | <b>420</b>     | <b>-</b>    | <b>(UNSCEAR 2000)</b>       |

## 4.2. Sediment Örneklerinin Aktivite Konsantrasyonlarının İstatistiksel Analizi

Radyonükleotit düzeylerine göre istatistikler sürekli değişkenler için ortalama ± standart sapma değer şeklinde gösterilmiştir. Verilerin normal dağılıma uygunluğu Kolmogorov-Smirnov testi ile değerlendirilmiştir. Çalışma verilerinin normal dağılıma uygun olmasına rağmen ( $p > 0,05$ ) veri sayısının gruplarda 30'un altında olması nedeni ile parametrik olmayan yöntemler kullanılmıştır. Temmuz ayı sediment örneklerinin aktivite konsantrasyonları arasındaki ilişki Spearman korelasyon katsayısı ile değerlendirilmiştir, benzer şekilde Mart ayı sediment örneklerinin aktivite konsantrasyonları arasındaki ilişki Spearman korelasyon katsayısı ile değerlendirilmiştir. Temmuz ve Mart ayları sediment örneklerinin aktivite konsantrasyonları arasındaki kıyaslamalarda Mann Whitney U testi kullanılmıştır. Araştırmada  $p < 0,05$  kritik karar verme değeri olarak kabul edilmiştir. Veriler bilgisayarda SPSS 25.0 (Statistical Packages of Social Sciences) programı kullanılarak analiz edilmiştir. Aşağıda Temmuz ve Mart ayları sediment örneklerinin aktivite konsantrasyonlarının SPSS analizi sonucu elde edilen bulgular detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Temmuz ayı sediment örneklerindeki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  aktivite konsantrasyonları arasında anlamlı pozitif yönde ve güçlü sayılabilecek düzeyde bir ilişki olduğu görülmüştür ( $p = 0,01$ ). Fakat  $^{40}\text{K}$  ve  $^{232}\text{Th}$  arasındaki ilişki diğer radyonükleotitler arasındaki ilişkilere göre çok daha güçlüdür ( $r = 0,949$ ,  $p = 0,01$ ). Çizelge 4.4'de Temmuz ayı sediment örneklerinin Sperman korelasyon analizi sunulmuştur.

**Çizelge 4.4.** Temmuz ayı  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  konsantrasyonlarının istatistiksel incelenmesi

| Temmuz            |   | $^{226}\text{Ra}$ | $^{232}\text{Th}$ | $^{40}\text{K}$ | $^{137}\text{Cs}$ |
|-------------------|---|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| $^{226}\text{Ra}$ | r | 1,00              |                   |                 |                   |
|                   | p |                   |                   |                 |                   |
| $^{232}\text{Th}$ | r | ,665*             | 1,00              |                 |                   |
|                   | p | 0,01              |                   |                 |                   |
| $^{40}\text{K}$   | r | ,629*             | ,949*             | 1,00            |                   |
|                   | p | 0,01              | 0,01              |                 |                   |
| $^{137}\text{Cs}$ | r | ,541*             | ,538*             | ,602*           | 1,00              |
|                   | p | 0,01              | 0,01              | 0,01            |                   |

\*\*Spearman korelasyon analizi \*0,05 düzeyinde anlamlı ilişki

Mart ayı sediment örneklerindeki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  aktivite konsantrasyonları arasında anlamlı pozitif yönde ve orta seviyede güçlü sayılabilecek düzeyde bir ilişki olduğu görülmüştür ( $p=0,01$ ). Fakat  $^{40}\text{K}$  ve  $^{232}\text{Th}$  arasındaki ilişki diğer radyonükleotitler arasındaki ilişkilere göre çok daha güçlüdür ( $r=0,68$ ,  $p=0,01$ ). Çizelge 4.5'te Mart ayı sediment örneklerinin Spearman korelasyon analizi sunulmuştur.

**Çizelge 4.5.** Mart ayı  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  konsantrasyonlarının istatistiksel incelenmesi

| Mart              |   | $^{226}\text{Ra}$ | $^{232}\text{Th}$ | $^{40}\text{K}$ | $^{137}\text{Cs}$ |
|-------------------|---|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| $^{226}\text{Ra}$ | r | 1,00              |                   |                 |                   |
|                   | p |                   |                   |                 |                   |
| $^{232}\text{Th}$ | r | 0,55*             | 1,00              |                 |                   |
|                   | p | 0,01              |                   |                 |                   |
| $^{40}\text{K}$   | r | 0,24              | 0,68*             | 1,00            |                   |
|                   | p | 0,30              | 0,01              |                 |                   |
| $^{137}\text{Cs}$ | r | 0,48*             | 0,43*             | 0,48*           | 1,00              |
|                   | p | 0,03              | 0,04              | 0,03            |                   |

\*\*Spearman korelasyon analizi \*0,05 düzeyinde anlamlı ilişki

Temmuz ve Mart ayında alınan sediment örneklerinde belirlenen radyoaktivite konsantrasyon değerleri arasında ilişkiler benzer yönde ve anlamlı olmasına rağmen, Temmuz ayındaki ilişkilerin daha güçlü olduğu belirlenmiştir. Temmuz ve Mart ayları sediment örneklerinin aktivite konsantrasyonlarının istatistiksel incelenmesi Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

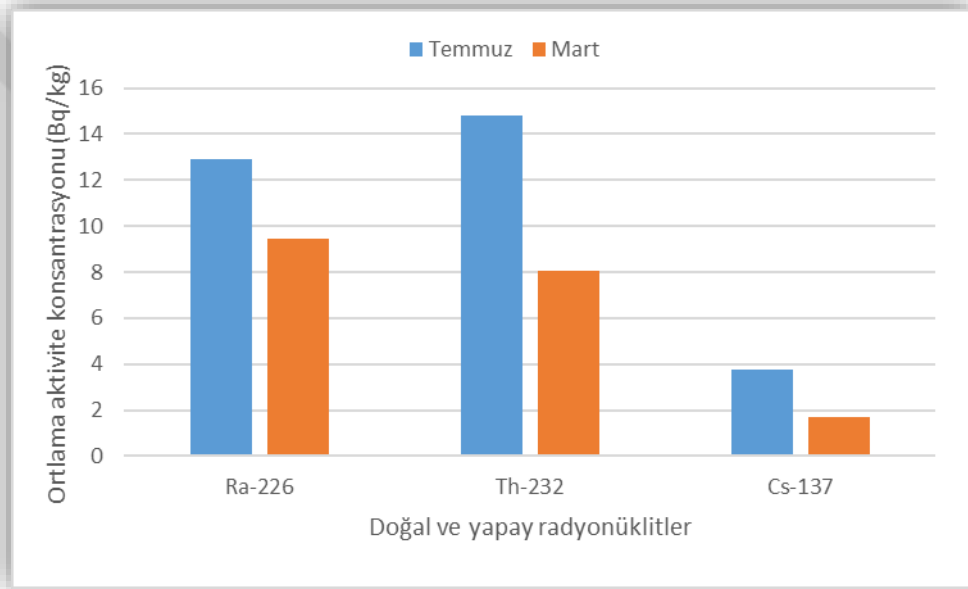
**Çizelge 4.6.** Sediment örneklerinin Temmuz ve Mart aylarındaki aktivite konsantrasyonlarının istatistiksel incelenmesi

|                   | Temmuz                            |        |        | Mart                              |         |       | p     |
|-------------------|-----------------------------------|--------|--------|-----------------------------------|---------|-------|-------|
|                   | $\bar{X} \pm s.s. (\text{Bq/kg})$ | $\mu$  | IQR    | $\bar{X} \pm s.s. (\text{Bq/kg})$ | $\mu$   | IQR   |       |
| $^{226}\text{Ra}$ | 12,9225 $\pm$ 5,4787              | 12,125 | 11,345 | 9,452 $\pm$ 4,2268                | 8,13    | 6,855 | 0,04* |
| $^{232}\text{Th}$ | 14,7805 $\pm$ 6,0408              | 12,37  | 10,8   | 8,0645 $\pm$ 2,8295               | 7,43    | 2,515 | 0,01* |
| $^{40}\text{K}$   | 194,522 $\pm$ 108,6039            | 125,68 | 206,02 | 104,542 $\pm$ 31,5599             | 102,505 | 38,08 | 0,01* |
| $^{137}\text{Cs}$ | 3,7565 $\pm$ 0,4758               | 3,68   | 0,51   | 1,7205 $\pm$ 1,3333               | 2,315   | 2,82  | 0,01* |

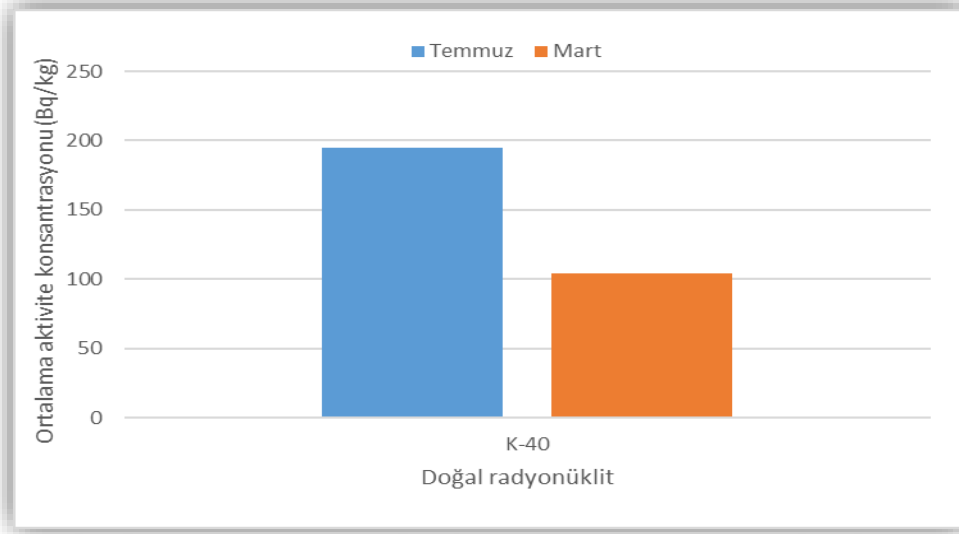
\*\* Mann Whitney U testi, \*0,05 düzeyinde anlamlı farklılık

$^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonlarının sediment örneklerinde Temmuz ayında Mart ayına göre anlamlı olarak daha yüksek düzeyde olduğu tespit edilmiştir ( $p=0,04$ ).  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonlarının sediment örneklerinde Temmuz ayında Mart ayına göre anlamlı olarak daha yüksek düzeyde olduğu tespit edilmiştir ( $p=0,01$ ).  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonlarının sediment örneklerinde Temmuz ayında Mart ayına göre anlamlı olarak daha yüksek düzeyde olduğu tespit edilmiştir ( $p=0,01$ ).  $^{137}\text{Cs}$  aktivite konsantrasyonlarının sediment örneklerinde Temmuz ayında Mart ayına göre anlamlı olarak daha yüksek düzeyde olduğu tespit edilmiştir ( $p=0,01$ ).

Çalışmada  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  aktivite konsantrasyonlarında Temmuz ayında elde edilen değerlerin Mart dönemine göre anlamlı düzeyde daha yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 sediment örneklerinin aktivite konsantrasyonlarının istatistiksel incelenmesinin grafiksel gösterimidir.



**Şekil 4.3.** Temmuz ve Mart ayı  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  ortalama aktivite konsantrasyonlarının istatistiksel değişimi



**Şekil 4.4.** Temmuz ve Mart ayı  $^{40}\text{K}$  ortalama aktivite konsantrasyonu istatistiksel değişimi

#### 4.3. Sediment Örnekleri İçin Radyasyon Tehlike Değerleri

Sediment örneklerinde ölçülen doğal  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve yapay  $^{137}\text{Cs}$  aktiviteleri konsantrasyonlarına dayalı olarak; Soğurulan Gama Doz Hızı (D), Radium Eşdeğer Aktivitesi ( $\text{Ra}_{\text{eq}}$ ), Yıllık gonadal doz eşdeğeri (AGDE), Maruz kalma oranı (ER), Yıllık Etkili Doz Eşdeğeri ( $\text{AEDE}_{\text{toplaml}}$ ), Toplam Yaşam Boyu Kanseri Riski Toplamı ( $\text{ELCR}_{\text{toplaml}}$ ), İç Tehlike İndeksi ( $H_{\text{in}}$ ), Dış Tehlike İndeksi ( $H_{\text{ex}}$ ) ve Gama temsili seviyesi ( $I^{\gamma}$ ) gibi radyolojik parametreler hesaplanmıştır. Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8’de sediment örnekleri için hesaplanan radyolojik tehlike parametreleri değerleri gösterilmiştir.

**Çizelge 4.7.** Temmuz ayı sediment örnekleri radyolojik tehlike parametreleri

| Numune no | D (nGy/h) | $\text{Ra}_{\text{eq}}$ (Bq/kg) | AGDE ( $\mu\text{Sv/y}$ ) | ER( $\mu\text{R/h}$ ) | $\text{AEDE}_{\text{toplaml}}$ (mSv/y) | $\text{ELCR}_{\text{toplaml}}$ ( $\times 10^{-3}$ ) | GRL  | $H_{\text{in}}$ | $H_{\text{ex}}$ |
|-----------|-----------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------|------|-----------------|-----------------|
| S1        | 13,00     | 27,98                           | 92,05                     | 57,62                 | 0,48                                   | 1,67                                                | 0,21 | 0,09            | 0,08            |
| S2        | 12,70     | 27,35                           | 89,42                     | 55,87                 | 0,47                                   | 1,64                                                | 0,20 | 0,09            | 0,07            |
| S3        | 16,47     | 35,49                           | 115,50                    | 72,10                 | 0,61                                   | 2,12                                                | 0,26 | 0,13            | 0,10            |
| S4        | 21,52     | 46,65                           | 149,92                    | 93,82                 | 0,79                                   | 2,77                                                | 0,34 | 0,18            | 0,13            |
| S5        | 15,39     | 32,94                           | 107,75                    | 66,87                 | 0,57                                   | 1,98                                                | 0,24 | 0,12            | 0,09            |
| S6        | 12,09     | 25,93                           | 85,57                     | 53,39                 | 0,44                                   | 1,56                                                | 0,19 | 0,09            | 0,07            |
| S7        | 13,78     | 29,63                           | 97,40                     | 60,88                 | 0,51                                   | 1,77                                                | 0,22 | 0,10            | 0,08            |
| S8        | 13,93     | 29,78                           | 98,47                     | 61,27                 | 0,51                                   | 1,79                                                | 0,22 | 0,10            | 0,08            |
| S9        | 18,00     | 38,67                           | 126,57                    | 78,90                 | 0,66                                   | 2,32                                                | 0,28 | 0,14            | 0,10            |

Çizelge 4.7'nin devamı

|             |              |              |               |               |             |             |             |             |             |
|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>S10</b>  | <b>24,41</b> | <b>52,61</b> | <b>170,68</b> | <b>106,45</b> | <b>0,90</b> | <b>3,14</b> | <b>0,38</b> | <b>0,20</b> | <b>0,14</b> |
| <b>S11</b>  | 26,69        | 56,77        | 190,13        | 118,17        | 0,98        | 3,44        | 0,43        | 0,18        | 0,15        |
| <b>S12</b>  | 27,75        | 58,99        | 197,18        | 122,32        | 1,02        | 3,57        | 0,44        | 0,19        | 0,16        |
| <b>S13</b>  | 35,70        | 75,94        | 252,79        | 156,75        | 1,31        | 4,60        | 0,56        | 0,26        | 0,21        |
| <b>S14</b>  | 37,85        | 79,95        | 269,54        | 166,53        | 1,39        | 4,87        | 0,60        | 0,26        | 0,22        |
| <b>S15</b>  | 40,57        | 85,71        | 288,69        | 178,30        | 1,49        | 5,22        | 0,64        | 0,28        | 0,23        |
| <b>S16</b>  | 36,55        | 77,57        | 258,54        | 159,92        | 1,34        | 4,71        | 0,58        | 0,27        | 0,21        |
| <b>S17</b>  | 35,33        | 74,95        | 250,50        | 155,00        | 1,30        | 4,55        | 0,56        | 0,26        | 0,20        |
| <b>S18</b>  | 30,50        | 63,94        | 218,27        | 134,26        | 1,12        | 3,93        | 0,49        | 0,20        | 0,17        |
| <b>S19</b>  | 14,70        | 31,47        | 104,06        | 64,87         | 0,54        | 1,89        | 0,23        | 0,10        | 0,09        |
| <b>S20</b>  | 13,23        | 28,40        | 92,83         | 57,78         | 0,49        | 1,70        | 0,21        | 0,10        | 0,08        |
| <b>Ort.</b> | 23,01        | 49,04        | 162,79        | 101,05        | 0,85        | 2,96        | 0,36        | 0,17        | 0,13        |
| <b>min</b>  | 11,24        | 24,10        | 79,55         | 49,62         | 0,41        | 1,45        | 0,18        | 0,08        | 0,07        |
| <b>max</b>  | 42,00        | 88,81        | 298,27        | 184,19        | 1,55        | 5,41        | 0,66        | 0,30        | 0,24        |

Çizelge 4.8. Mart ayı sediment örnekleri radyolojik tehlike parametreleri

| Numune no   | D (nGy/h) | R <sub>aeq</sub> (Bq/kg) | AGDE (μSv/y) | ER(μR/h) | AEDE <sub>toplantı</sub> (mSv/y) | ELCR <sub>toplantı</sub> (x10 <sup>-3</sup> ) | GRL  | H <sub>in</sub> | H <sub>ex</sub> |
|-------------|-----------|--------------------------|--------------|----------|----------------------------------|-----------------------------------------------|------|-----------------|-----------------|
| <b>B1</b>   | 13,83     | 29,73                    | 97,07        | 60,48    | 0,51                             | 1,78                                          | 0,22 | 0,11            | 0,08            |
| <b>B2</b>   | 16,85     | 36,10                    | 117,07       | 72,45    | 0,62                             | 2,17                                          | 0,26 | 0,15            | 0,10            |
| <b>B3</b>   | 10,76     | 23,28                    | 75,40        | 47,23    | 0,40                             | 1,39                                          | 0,17 | 0,08            | 0,06            |
| <b>B4</b>   | 10,20     | 21,72                    | 72,11        | 44,69    | 0,38                             | 1,31                                          | 0,16 | 0,08            | 0,06            |
| <b>B5</b>   | 14,45     | 30,77                    | 102,14       | 63,36    | 0,53                             | 1,86                                          | 0,23 | 0,11            | 0,08            |
| <b>B6</b>   | 12,32     | 25,72                    | 87,79        | 53,72    | 0,45                             | 1,59                                          | 0,19 | 0,09            | 0,07            |
| <b>B7</b>   | 11,71     | 24,82                    | 83,44        | 51,68    | 0,43                             | 1,51                                          | 0,19 | 0,08            | 0,07            |
| <b>B8</b>   | 13,87     | 29,75                    | 97,40        | 60,63    | 0,51                             | 1,79                                          | 0,22 | 0,11            | 0,08            |
| <b>B9</b>   | 9,89      | 21,08                    | 70,24        | 43,68    | 0,36                             | 1,27                                          | 0,16 | 0,07            | 0,06            |
| <b>B10</b>  | 14,38     | 31,25                    | 99,33        | 62,11    | 0,53                             | 1,85                                          | 0,22 | 0,13            | 0,08            |
| <b>B11</b>  | 8,21      | 17,45                    | 57,91        | 35,80    | 0,30                             | 1,06                                          | 0,13 | 0,06            | 0,05            |
| <b>B12</b>  | 12,80     | 27,01                    | 90,43        | 55,62    | 0,47                             | 1,65                                          | 0,20 | 0,10            | 0,07            |
| <b>B13</b>  | 15,14     | 32,39                    | 106,18       | 65,89    | 0,56                             | 1,95                                          | 0,24 | 0,12            | 0,09            |
| <b>B14</b>  | 12,48     | 26,41                    | 88,38        | 54,54    | 0,46                             | 1,61                                          | 0,20 | 0,09            | 0,07            |
| <b>B15</b>  | 15,50     | 32,94                    | 110,26       | 68,46    | 0,57                             | 2,00                                          | 0,25 | 0,11            | 0,09            |
| <b>B16</b>  | 22,78     | 48,68                    | 160,33       | 99,57    | 0,84                             | 2,93                                          | 0,36 | 0,17            | 0,13            |
| <b>B17</b>  | 19,20     | 41,40                    | 134,56       | 84,06    | 0,71                             | 2,47                                          | 0,30 | 0,15            | 0,11            |
| <b>B18</b>  | 21,46     | 46,11                    | 150,92       | 94,13    | 0,79                             | 2,76                                          | 0,34 | 0,16            | 0,12            |
| <b>B19</b>  | 7,26      | 15,42                    | 50,93        | 31,40    | 0,27                             | 0,94                                          | 0,11 | 0,06            | 0,04            |
| <b>B20</b>  | 8,85      | 18,66                    | 62,94        | 38,77    | 0,33                             | 1,14                                          | 0,14 | 0,06            | 0,05            |
| <b>Ort.</b> | 13,60     | 29,03                    | 95,74        | 59,41    | 0,50                             | 1,75                                          | 0,21 | 0,10            | 0,08            |
| <b>min</b>  | 6,21      | 13,15                    | 43,91        | 27,08    | 0,23                             | 0,80                                          | 0,10 | 0,05            | 0,04            |
| <b>max</b>  | 24,20     | 51,81                    | 169,92       | 105,56   | 0,89                             | 3,12                                          | 0,38 | 0,19            | 0,14            |

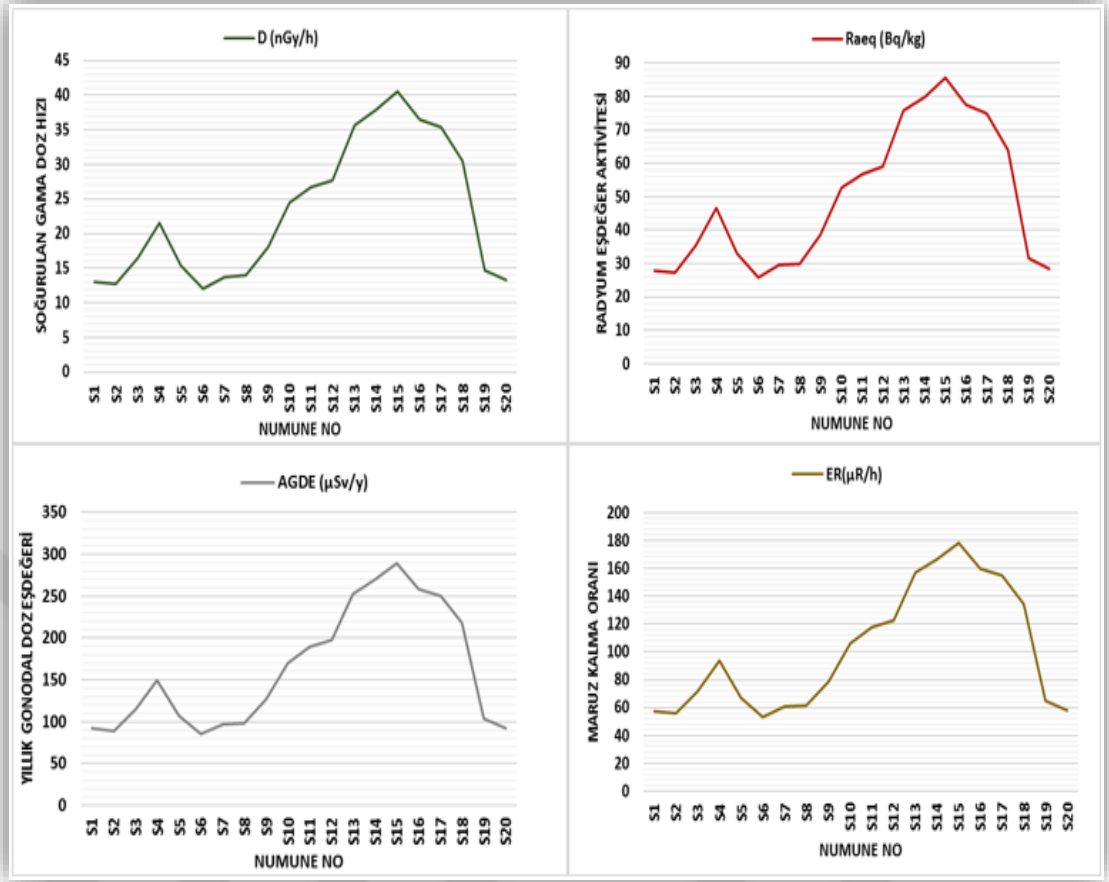
Temmuz ayı sediment örneklerinde soğurulan gama doz hızı (D) değerleri 11,24 nGy/h ile 42,00 nGy/h arasında değişirken, Mart ayı sediment örneklerinde bu değerler 6,21 nGy/h ile 24,20 nGy/h arasında değişmektedir. Temmuz ayı sediment örneklerinde ortalama D değeri 23,01 nGy/h iken, Mart ayı sediment örneklerinde ortalama D değeri 13,60 nGy/h olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar, literatürde önerilen dünya ortalama soğurulan gama doz oranı değeri olan 59 nGy/h ile karşılaştırıldığında, her iki ayda da daha düşük değerlere işaret etmektedir (UNSCEAR 2008). Çalışmada belirlenen ortalama soğurulan gama radyasyon doz hızı değerleri uluslararası kirlilik limitinin altında kalmıştır ve radyoaktif bir tehlike oluşturmamaktadır.

Radyum eşdeğer aktivitesi ( $R_{eq}$ ) açısından, Temmuz ayı sediment örneklerinde bu değerler 24,10 Bq/kg ile 88,81 Bq/kg arasında değişirken, Mart ayı sediment örneklerinde 13,15 Bq/kg ile 51,84 Bq/kg arasında değişiklik göstermektedir. Temmuz ayı sediment örneklerinde ortalama  $R_{eq}$  değeri 49,04 Bq/kg iken, Mart ayı sediment örneklerinde ortalama  $R_{eq}$  değeri 29,03 Bq/kg olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, literatürde önerilen güvenli sınıra (370 Bq/kg) göre daha düşük değerler elde edildiğini göstermektedir (NEA-OECD 1979).

Yıllık gonadal doz eşdeğeri (AGDE) bakımından, Temmuz ayı sediment örneklerinde bu değerler 79,55  $\mu$ Sv/y ile 298,27  $\mu$ Sv/y arasında değişirken, Mart ayı sediment örneklerinde 43,91  $\mu$ Sv/y ile 169,92  $\mu$ Sv/y arasında değişim göstermektedir. Temmuz ayı sediment örneklerinde ortalama AGDE değeri 162,79  $\mu$ Sv/y iken, Mart ayı sediment örneklerinde ortalama AGDE değeri 95,74  $\mu$ Sv/y olarak hesaplanmıştır. Her iki ayda da elde edilen AGDE değerleri, UNSCEAR (2008) tarafından önerilen güvenli sınır olan 300  $\mu$ Sv/y'den daha düşük olduğunu göstermektedir.

Maruziyet oranı (ER) değerleri Temmuz ayı sediment örneklerinde 49,62  $\mu$ R/h ile 184,19  $\mu$ R/h arasında değişirken, Mart ayı sediment örneklerinde 27,08  $\mu$ R/h ile 105,56  $\mu$ R/h arasında değişim göstermektedir. Temmuz ayı sediment örneklerinde ortalama ER değeri 101,05  $\mu$ R/h iken, Mart ayı sediment örneklerinde ortalama ER değeri 59,41  $\mu$ R/h olarak tespit edilmiştir. Her iki ayda da elde edilen ER değerleri, literatürde önerilen değer olan 600  $\mu$ R/h'nin altında kalmıştır (Sathish vd. 2022). Şekil 4.5 ve şekil 4.6'da sırasıyla, Temmuz ve Mart ayı sediment örneklerindeki soğurulan gama doz hızı (D), Radyum eşdeğer aktivitesi ( $R_{eq}$ ), Yıllık gonadal doz eşdeğeri (AGDE), Maruziyet oranı (ER) değerleri değişiminin grafiksel gösterimi sunulmuştur.





**Şekil 4.5.** Temmuz ayı sediment örneklerindeki soğurulan gama doz hızı (D), Radium eşdeğer aktivitesi ( $R_{eq}$ ), Yıllık gonadal doz eşdeğeri (AGDE), Maruziyet oranı (ER) değerleri değişimi



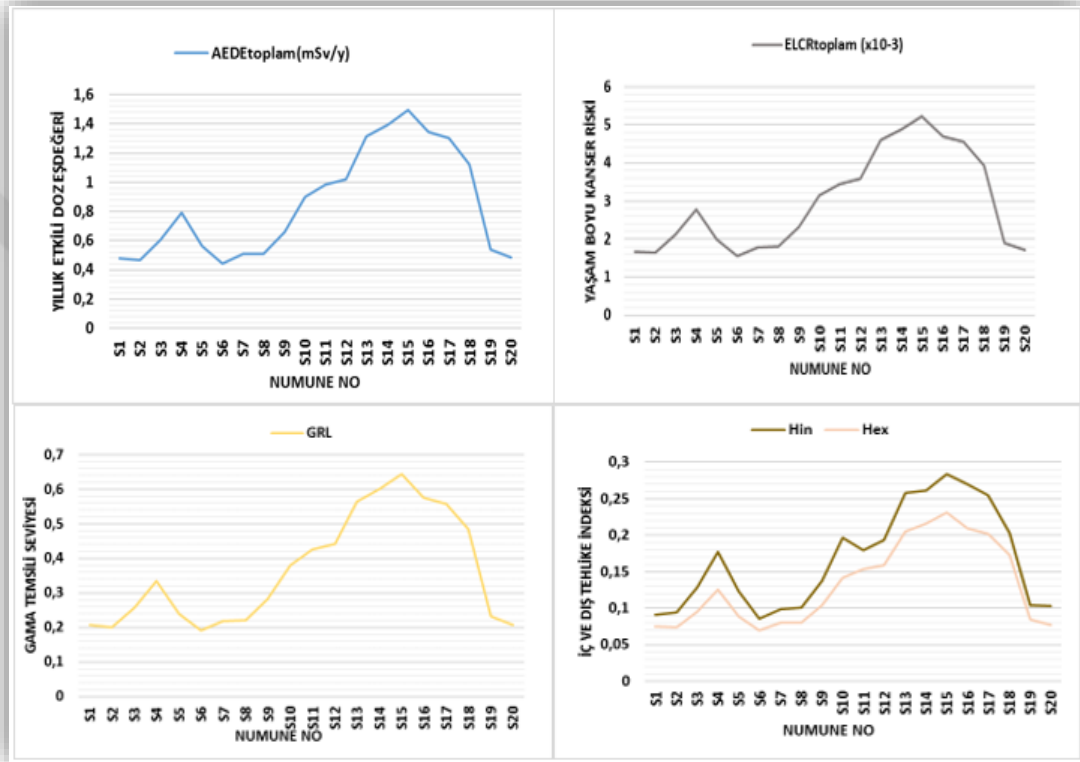
**Şekil 4.6.** Mart ayı sediment örneklerindeki soğurulan gama doz hızı (D), Radyum eşdeğer aktivitesi ( $R_{aeq}$ ), Yıllık gonadal doz eşdeğeri (AGDE), Maruziyet oranı (ER) değerleri değişimi

Temmuz ayı sediment örneklerinde Yıllık etkin doz eşdeğeri toplamı ( $AEDE_{toplam}$ ) değerleri en az 0,41 mSv/y ile en fazla 1,55 mSv/y arasında değişirken, ortalama değeri 0,85 mSv/y olarak belirlenmiştir. Mart ayı sediment örneklerinde ise Yıllık etkin doz eşdeğeri toplamı ( $AEDE_{toplam}$ ) en az 0,23 mSv/y ile en fazla 0,89 mSv/y arasında değişirken, ortalama değeri 0,50 mSv/y olarak hesaplanmıştır. Her iki ayda da elde edilen  $AEDE_{toplam}$  değerleri, UNSCEAR (2000) tarafından önerilen 0,48 mSv/y sınırının üzerindedir. Yaşam boyu kanser riski toplamı ( $ELRC_{toplam}$ ) açısından, Temmuz ayı sediment örneklerinde  $ELRC_{toplam}$  değerlerinin ortalaması  $2,96 \cdot 10^{-3}$  olarak tespit edilmiş ve bu değer UNSCEAR (2000)'de verilen dünya ortalaması olan  $0,29 \cdot 10^{-3}$  değerinden yaklaşık 10 kat daha yüksektir. Mart ayı sediment örneklerinde ise  $ELRC_{toplam}$  değerlerinin ortalaması  $1,75 \cdot 10^{-3}$  olarak bulunmuş ve bu değer UNSCEAR (2000)'de verilen dünya ortalaması olan  $0,29 \cdot 10^{-3}$  değerinden yaklaşık 6 kat daha yüksektir. Çalışmada, Yaşam boyu kanser riski toplamı ( $ELRC_{toplam}$ ) belirlenmesindeki ortalama yaşam süresini 50 ve 60 yıl olarak aldığımızda; Temmuz ayı sediment örneklerinde bu değer sırasıyla  $2,12 \cdot 10^{-3}$  ve  $2,54 \cdot 10^{-3}$ , Mart ayı sediment örneklerinde ise  $1,25 \cdot 10^{-3}$  ve  $1,50 \cdot 10^{-3}$  olmaktadır.

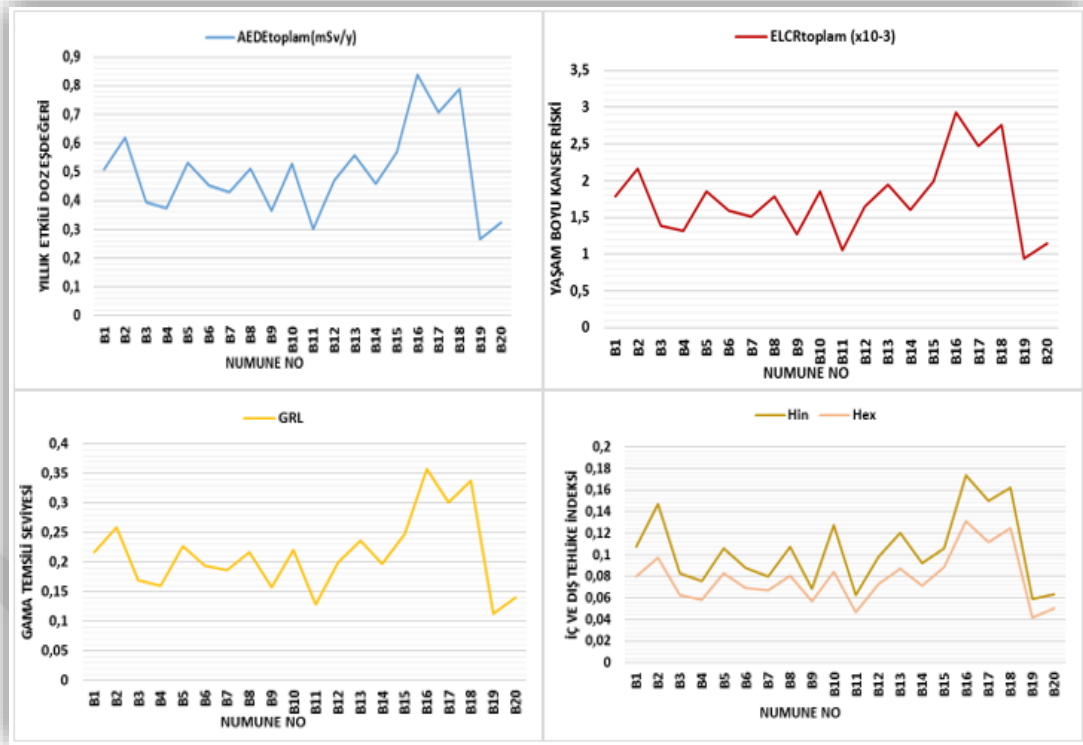
Gama temsilcisi seviyesi (GRL), iç ve dış tehlike indeksleri ( $H_{in}$  ve  $H_{ex}$ ) açısından, Temmuz ayı sediment örneklerinde bu değerlerin ortalaması sırasıyla 0,36, 0,17 ve 0,13

olarak belirlenmiştir. Aynı değişkenler Mart ayı sediment örneklerinde ise ortalama olarak sırasıyla 0,21, 0,10 ve 0,08 olarak hesaplanmıştır. Hem Temmuz hem de Mart ayı verilerine göre GRL,  $H_{in}$  ve  $H_{ex}$  değerleri 1'den düşük elde edilmiştir (NEA-OECD 1979; ICRP 1990).

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de sırasıyla; Temmuz ve Mart ayı sediment örneklerindeki yıllık etkin doz eşdeğeri toplamı ( $AEDE_{toplam}$ ), Yaşam boyu kanser riski toplamı ( $ELRC_{toplam}$ ), Gama temsilcisi seviyesi (GRL), iç ve dış tehlike indeksleri ( $H_{in}$  ve  $H_{ex}$ ) değişiminin grafiksel gösterimi sunulmuştur.



**Şekil 4.7.** Temmuz ayı sediment örneklerindeki yıllık etkin doz eşdeğeri toplamı ( $AEDE_{toplam}$ ), Yaşam boyu kanser riski toplamı ( $ELRC_{toplam}$ ), Gama temsilcisi seviyesi (GRL), iç ve dış tehlike indeksleri ( $H_{in}$  ve  $H_{ex}$ ) değişimi



**Şekil 4.8.** Mart ayı sediment örneklerindeki yıllık etkin doz eşdeğeri toplamı ( $AED_{etoplam}$ ), Yaşam boyu kanser riski toplamı ( $ELRC_{etoplam}$ ), Gama temsilcisi seviyesi (GRL), iç ve dış tehlike indeksleri ( $H_{in}$  ve  $H_{ex}$ ) değişimi

Sediment örnekleri için belirlenen doğal radyoniklit aktivite konsantrasyonları kullanılarak hesaplanan tehlike parametre değerleri; literatürde yapılan başka çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.10'da sediment numuneleri için radyolojik risk parametreleri belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalar verilmiştir. Çalışmada hesaplanan soğurulan gama doz hızı (D) Umman kıyıları (Al Shaaibi vd. 2021) için belirlenen değerden yüksek, çalışmalarında güvenli sınırın altında soğurulan gama doz hızı belirlenen; St. Martin Adası (Islam vd. 2019), Hurghada (Zakaly vd. 2019), Van Gölü (Kayakökü ve Doğru 2020), Kızıldeniz kesimleri (Zakaly vd. 2021), Boka Kotorska Körfezi (Radomirović vd. 2021), Borçka Karagöl (Dizman vd. 2022), Dicle Nehri (Najam, ve Wais 2022), Gorgan Körfezi (Mohsen vd. 2022), Gana Kıyı şeridi (Akuo-ko vd. 2023), Karnaphuli ve Halda nehirleri (Islam vd. 2023) ve Burullus Gölü (El-Alfy vd. 2023) için hesaplanan değerlerden daha düşüktür.

Temmuz ve Mart ayı sediment örnekleri için belirlenen Radyum eşdeğer aktivitesi ( $Ra_{eq}$ ) değerleri Umman kıyıları (Al Shaaibi vd. 2021) ve Gorgan Körfezi (Mohsen vd. 2022) için belirlenen değerlerden daha yüksektir.

Temmuz ayı sediment örnekleri için belirlenen yıllık gonadal doz eşdeğeri (AGDE) değerleri ortalaması, Burullus Gölü (El-Alfy vd. 2023) için hesaplanan değerden yüksektir. Mart ayı sediment örnekleri için belirlenen yıllık gonadal doz eşdeğeri (AGDE) değerleri ortalaması, çizelge 5.4'deki kıyaslanan çalışmaların tümünde daha düşüktür.

Temmuz ve Mart ayı sediment örnekleri için belirlenen Ortalama Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri Toplamı ( $AEDE_{toplam}$ ) değerleri; Muzaffarabad (Rafique vd. 2020), Calabria (Caridi vd. 2021), Muscat Şehri'nin kıyı kesimi (Suliman ve Alsafi 2021), Dicle Nehri (Najam, ve Wais 2022), Burullus Gölü (El-Alfy vd. 2023) için belirlenen değerlerden daha yüksektir.

Temmuz ayı yaşam boyu kanser riski toplamı ( $ELRC_{toplam}$ ) değerleri ortalaması Gorgan Körfezi (Mohsen vd. 2022) için belirlenen değerden düşük, çizelge 4.9'daki diğer çalışmalarda belirtilen değerlerden yüksektir. Mart ayı sediment örnekleri için belirlenen yaşam boyu kanser riski toplamı ( $ELRC_{toplam}$ ) değerleri ortalaması Gorgan Körfezi (Mohsen vd. 2022) ve Burullus Gölü (El-Alfy vd. 2023) için belirlenen değerlerden düşüktür.

Çalışmada belirlenen gama temsilcisi seviyesi (GRL), Hurghada (Zakaly vd. 2019) Kızıldeniz kesimleri (Zakaly vd. 2021), Umman kıyıları (Al Shaaibi vd. 2021) için belirlenen değerlerden daha yüksektir.

Mart ayı sedimnet numunelerinde belirlenen iç tehlike indeksi ( $H_{in}$ ) çizelge 5.4'de verilen çalışmalarda belirlenen değerlerden daha düşük, dış tehlike indeksi ( $H_{ex}$ ) ise Çizelge 4.9'daki çalışmalara kıyaslandığında sadece Umman kıyıları (Al Shaaibi vd. 2021) için belirlenen değer üstündedir.

**Çizelge 4.9.** Sediment numunelerinde radyolojik tehlike parametrelerinin belirlenmesine ilişkin çalışmalar

| Bölgeler                                     | D (nGy/h) | $Ra_{eq}$ (Bq/kg) | AGDE ( $\mu Sv/y$ ) | ER ( $\mu R/h$ ) | $AEDE_{toplam}$ (mSv/y) | $ELCR_{toplam}$ ( $\times 10^{-3}$ ) | GRL  | $H_{in}$ | $H_{ex}$ | Ref.                     |
|----------------------------------------------|-----------|-------------------|---------------------|------------------|-------------------------|--------------------------------------|------|----------|----------|--------------------------|
| Calabria (güney İtalya)                      | 63        | 63                | 458                 | -                | 0,189                   | -                                    | 0,50 | 0,41     | 0,35     | (Caridi vd. 2021)        |
| Thamirabara ni Nehri (Hindistan)             | 85,41     | 179,57            | -                   | -                | 0,52                    | --                                   | -    | 0,60     | 0,48     | (Thangam vd. 2022)       |
| Borçka Karagöl (Artvin)                      | 35,17     | 70,12             | -                   | -                | -                       | 0,151                                | -    | -        | 0,19     | (Dizman vd. 2022)        |
| Kızıldeniz kesimleri (Mısır)                 | 29,9      | 66,2              | 207,3               | -                | -                       | 0,128                                | 0,2  | 0,2      | 0,2      | (Zakaly vd. 2021)        |
| St. Martin Adası (Bangladeş)                 | 52,7      | 113               | -                   | -                | -                       | -                                    | -    | -        | 0,31     | (Islam vd. 2019)         |
| Muscat Şehri'nin kıyı kesimi (Umman Körfezi) | -         | 59,56             | 181,1               | -                | 0,275                   | 0,111                                | -    | -        | 0,16     | (Suliman ve Alsafi 2021) |
| Umman kıyıları                               | 12,59     | 26,89             | -                   | -                | -                       | -                                    | 0,09 | 0,13     | 0,07     | (Al Shaaibi vd. 2021)    |
| Dukan Barajı (Irak)                          | -         | 30,98             | -                   | -                | -                       | -                                    | -    | 0,11     | 0,08     | (Smail vd. 2023)         |
| Gana Kıyı şeridi                             | 50,1      | 104,7             | 348,1               | -                | -                       | -                                    | 0,4  | 0,4      | 0,3      | (Akua-ko vd. 2023)       |

Çizelge 4.9.'un devamı

|                                           |              |               |        |        |       |        |             |             |             |                          |
|-------------------------------------------|--------------|---------------|--------|--------|-------|--------|-------------|-------------|-------------|--------------------------|
| Dicle Nehri (Musul -Irak)                 | 33,07        | 71,96         | -      | -      | 0,172 | -      | 0,529       | 0,229       | 0,194       | (Najam, ve Wais 2022)    |
| Karnaphuli ve Halda nehirleri (Bangladeş) | 43,3         | 91            | -      | -      | -     | -      | -           | -           | 0,24        | (Islam vd. 2023)         |
| Hurghada (Mısır)                          | 28,7         | 60            | -      | -      | -     | 0,123  | 0,2         | 0,2         | 0,2         | (Zakaly vd. 2019)        |
| Boka Kotorska Körfezi (Adriyatik Denizi)  | 55           | 115           | -      | -      | -     | 0,24   | -           | -           | -           | (Radomirović vd. 2021)   |
| Burullus Gölü (Mısır)                     | 33,89        | 39,88         | 118,93 | -      | 0,061 | 0,212  | -           | 0,14        | 0,11        | (El-Alfy vd. 2023)       |
| Van Gölü                                  | 41,05        | 87,48         | -      | -      | -     | 0,18   | -           | 0,31        | 0,24        | (Kayakökü ve Doğru 2020) |
| Muzaffarabad, (Pakistan)                  | 77,49 ± 3,04 | 167,88 ± 6,66 | 546,45 | -      | 0,475 | 1,57   | 1,23 ± 0,04 | 0,55 ± 0,02 | 0,45 ± 0,02 | (Rafique vd. 2020)       |
| Gorgan Körfezi (İran)                     | 38,53        | 16,30         | 277,12 | -      | -     | 329,72 | -           | 0,74        | 0,32        | (Mohsen vd. 2022)        |
| Boğaçay (Antalya)                         | 23,01        | 49,04         | 162,79 | 101,05 | 0,85  | 2,96   | 0,36        | 0,17        | 0,13        | Bu çalışma (Temmuz Ayı)  |
| Boğaçay (Antalya)                         | 13,60        | 29,03         | 95,74  | 59,41  | 0,50  | 1,75   | 0,21        | 0,10        | 0,08        | Bu çalışma (Mart Ayı)    |

#### 4.4. Sediment Örneklerinin WD-XRF Yöntemi ile Elementel Analizi

Boğaçay'dan elde edilen sediment numunelerinin detaylı analizi, çeşitli elementlerin ve oksitlerin konsantrasyonlarını belirlemek için WD-XRF (Dalga Uzunluğu Dağılımı X-ışını Floresans) tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları aşağıda ayrıntılarıyla sunulmuştur:

Na<sub>2</sub>O, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO, TiO<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CoO, NiO, CuO, ZnO, Rb<sub>2</sub>O, SrO, ZrO<sub>2</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ve PbO oksitleri, tüm numunelerde tespit edilmiştir. Ancak As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oksiti, S19, S20 ve B19 numunelerinde tespit edilememiştir.

SnO<sub>2</sub> oksiti, S6, S7, S12, S15, S18, S20, B4, B5 ve B17 numunelerinde belirli konsantrasyonlarda tespit edilmiştir. Sb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> oksiti ise S6, S18, B4 ve B17 numunelerinde tespit edilmiştir.

WO<sub>3</sub> oksiti, S12, S13, S14, S15, S16, S17, S19, S20, B3, B5, B6, B8, B11, B12, B14, B16, B19 ve B20 numunelerinde belirgin bir konsantrasyonla tespit edilmiştir.

SiO<sub>2</sub> konsantrasyonu incelendiğinde, S15 numunesinde %40,95 olarak tespit edilmişken, B3 numunesinde bu değer %8,434 olarak saptanmıştır. Bu iki numune arasındaki SiO<sub>2</sub> konsantrasyon farkı, tüm numuneler arasında bu elementin konsantrasyonunda gözlemlenen en belirgin farklılık olarak öne çıkmaktadır. Bu da SiO<sub>2</sub>'nin konsantrasyonunun önemli ölçüde değişebildiğini göstermektedir.

MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, CaO ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oksitlerinin konsantrasyon değerleri tüm numunelerde %1'in üzerindedir. Dolayısıyla bu oksitler majör oksitlerdir.

K<sub>2</sub>O konsantrasyonlarına baktığımızda, S12 ile S17 numuneleri arasında %1'in üzerinde konsantrasyon saptanırken, diğer tüm numunelerde bu değer %1'in altında bulunmaktadır.

Ayrıca, analiz sonuçlarına göre, B3 numunesinin CaO konsantrasyonu %48,38 olarak belirlenmiştir. Bu değer, incelenen tüm numuneler arasında en yüksek konsantrasyon değerini temsil etmektedir. CaO konsantrasyonlarında, S3 ve B3 numuneleri arasında Temmuz ve Mart aylarında benzer konumlardan alınan numuneler arasında dönemsel farklılıklar gözlemlenmiştir. Özellikle, Temmuz döneminde benzer bir konumdan alınan S3 numunesi ile Mart döneminde benzer bir konumdan alınan B3 numunesi arasında %14,43 oranında konsantrasyon artışı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Temmuz ve Mart dönemlerinde benzer konumlardan alınan S7 ve B7 numuneleri arasında ise Mart döneminde %13,13 oranında konsantrasyon azalması belirlenmiştir. Bu sonuçlar, belirli dönemlerde aynı konumlardan alınan numuneler arasında CaO konsantrasyonunda önemli değişiklikler olduğunu göstermektedir.

Cl, Ga, Se, Br, Y, Ag, Te, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Hf, Hg, Tl, Th, iz elementlerdir. Analiz sonuçlarına göre: Ba, Nd, Y, Ga ve Th elementleri, incelenen tüm numunelerde tespit edilmiştir. Bu elementler, bölgedeki sedimentlerin kimyasal bileşiminde istikrarlı bir şekilde bulunmaktadır.

Pr elementi, S14, S15, S17 ve B15 numunelerinde ppm değerlerinde tespit edilmiştir. Ag elementi, S3, S6, S16, S18, B4, B8, B12 ve B13 numunelerinde ppm değerlerinde tespit edilmiştir. Ancak diğer numunelerde bu element tespit edilememiştir.

Te elementi, S2, S5, S11, S12, S15, S17, S18, B5 ve B9 numunelerinde ppm değerlerinde tespit edilmiştir.

Cs elementi, S1, S5, S6, S7, S10, S11, S12, S14, S20, B1, B16, B18 ve B20 numunelerinde ppm değerlerinde tespit edilmiştir.

La elementi, S11, S16, B8, B14, B15, B16 ve B20 numunelerinde ppm değerlerinde bulunmuştur.

Ce elementi, S1, S2, S6, S8, S12, S14, S17, S18, B3, B11, B13 ve B15 numunelerinde ppm değerlerinde bulunmaktadır.

I elementi, S1, S2, S5, S11, S12, S13, S15, S18, B3, B4, B5, B10 ve B19 numunelerinde ppm değerlerinde tespit edilmiştir.

Mo elementi sadece B10 numunesinde ppm değerinde tespit edilmiştir.

Ancak, bazı elementler numunelerde tespit edilememiştir. Örneğin, Ge, Cd, Bi ve U elementleri tüm numunelerde tespit edilememiştir. Ayrıca, Se elementi S16, S18, B2 ve B10 numunelerinde, Br elementi ise S7 ve B19 numunelerinde ppm değerlerinde tespit edilmiş, ancak diğer numunelerde tespit edilememiştir.

Çalışmada, WD-XRF yöntemi kullanılarak belirlenen element konsantrasyonları, S1 numaralı sediment örneğinde %58,65 ile en düşük konsantrasyon toplamına, S15 numaralı sediment örneğinde ise %85,23 ile en yüksek konsantrasyon toplamına ulaşmıştır. WD-XRF analizi sonuçlarındaki % konsantrasyon toplamlarındaki eksiklik, Na(11) ile U(92) arasındaki elementlerin dışındaki elementlerin analizinin tespit sınırının ötesine geçmesi, özellikle hafif elementlerin ve organik bileşiklerin tespitindeki zorluklar nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Elde edilen sonuçlar, Boğaçay sedimentlerinin element ve oksit içeriği hakkında önemli bilgiler sunmaktadır ve bu bilgiler çevresel değişikliklerin izlenmesi ve sediment yapısının anlaşılması için önemlidir. Çizelge 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 ve 4.15’de sırasıyla; Temmuz ve Mart ayları sediment numunelerinin WD-XRF tekniği ile tayin edilen element konsantrasyonları gösterilmiştir.

**Çizelge 4.10.** Temmuz ayı S1-S7 numaralı sediment numunelerinin WD-XRF tekniği ile tayin edilen element konsantrasyonları

|                                    | S1      | S2      | S3      | S4      | S5      | S6      | S7      |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Na <sub>2</sub> O (%)              | 0,868   | 0,533   | 1,124   | 0,933   | 1,166   | 1,264   | 1,013   |
| MgO (%)                            | 2,657   | 4,115   | 4,191   | 3,345   | 4,396   | 5,784   | 5,643   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 2,578   | 2,323   | 3,095   | 3,948   | 3,976   | 3,623   | 1,808   |
| SiO <sub>2</sub> (%)               | 14,12   | 20,76   | 19,29   | 17,92   | 24,99   | 30,14   | 21,17   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)  | 0,1319  | 0,1332  | 0,1449  | 0,1514  | 0,1425  | 0,1218  | 0,1355  |
| SO <sub>3</sub> (%)                | 0,2301  | 0,3211  | 0,2563  | 0,3169  | 0,1964  | 0,0852  | 0,04401 |
| K <sub>2</sub> O (%)               | 0,1769  | 0,1457  | 0,2329  | 0,3526  | 0,3455  | 0,2284  | 0,1448  |
| CaO (%)                            | 34,69   | 30,73   | 33,95   | 36,18   | 28,65   | 23,36   | 35,67   |
| TiO <sub>2</sub> (%)               | 0,2259  | 0,2149  | 0,3465  | 0,3906  | 0,393   | 0,2438  | 0,1635  |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)  | 0,00589 | 0,00777 | 0,01125 | 0,01049 | 0,01122 | 0,00813 | 0,00745 |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 0,08589 | 0,05538 | 0,136   | 0,05699 | 0,1584  | 0,06398 | 0,04233 |
| MnO (%)                            | 0,06471 | 0,09712 | 0,09264 | 0,07406 | 0,112   | 0,08438 | 0,3456  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 2,705   | 3,291   | 3,738   | 3,261   | 3,523   | 3,623   | 2,81    |
| CoO (%)                            | 0,00292 | 0,00275 | 0,0047  | 0,00277 | 0,00363 | 0,00453 | 0,0035  |
| NiO (%)                            | 0,02855 | 0,03503 | 0,03532 | 0,02797 | 0,02764 | 0,03681 | 0,03798 |
| CuO (%)                            | 0,00315 | 0,00329 | 0,00267 | 0,00408 | 0,00281 | 0,003   | 0,00222 |
| ZnO (%)                            | 0,0093  | 0,0049  | 0,00685 | 0,0112  | 0,00493 | 0,00469 | 0,00347 |
| As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 0,00037 | 0,00048 | 0,00044 | 0,00054 | 0,00037 | 0,00024 | 0,00033 |
| Rb <sub>2</sub> O (%)              | 0,00169 | 0,0015  | 0,00184 | 0,00235 | 0,00188 | 0,00172 | 0,00119 |
| SrO (%)                            | 0,02306 | 0,02436 | 0,02375 | 0,02955 | 0,02083 | 0,01696 | 0,02511 |
| ZrO <sub>2</sub> (%)               | 0,00524 | 0,0049  | 0,00694 | 0,0078  | 0,00575 | 0,00574 | 0,00432 |
| Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | 0,00055 | 0,00049 | 0,0005  | 0,00082 | 0,00074 | 0,00083 | 0,00051 |
| SnO <sub>2</sub> (%)               | -       | -       | -       | -       | -       | 0,00022 | 0,00006 |
| Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | -       | -       | -       | -       | -       | 0,00013 | -       |
| Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | 0,00297 | 0,00269 | 0,00225 | 0,00346 | 0,00308 | 0,00274 | 0,00342 |
| WO <sub>3</sub> (%)                | 0,00022 | 0,00011 | -       | 0,00022 | 0,0002  | -       | 0,00016 |
| PbO (%)                            | 0,00093 | 0,00056 | 0,00072 | 0,00123 | 0,00067 | 0,00069 | 0,00052 |
| Cl (ppm)                           | 40,2    | 89,1    | 41,7    | 16,8    | 51      | 18,6    | 48,9    |
| Ga (ppm)                           | 5,7     | 5,3     | 7,9     | 7,3     | 6,5     | 6,4     | 4,4     |
| Ge (ppm)                           | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Se (ppm)                           | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Br (ppm)                           | 7,2     | 8,5     | 6       | 7,8     | 1,4     | 0,4     | -       |
| Y (ppm)                            | 8       | 8,7     | 9,4     | 9,4     | 9,1     | 9,2     | 9,5     |
| Mo (ppm)                           | 1,1     | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Ag (ppm)                           | -       | -       | 4       | -       | -       | 3,4     | -       |
| Cd (ppm)                           | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Te (ppm)                           | -       | 1,9     | -       | -       | 1,4     | -       | -       |



Çizelge 4.10'un devamı

|                 |          |            |      |       |            |      |       |
|-----------------|----------|------------|------|-------|------------|------|-------|
| <b>I (ppm)</b>  | <b>3</b> | <b>7,8</b> | -    | -     | <b>8,1</b> | -    | -     |
| <b>Cs (ppm)</b> | 15,8     | -          | -    | -     | 14,8       | 21,9 | 27,3  |
| <b>Ba (ppm)</b> | 78,8     | 76,8       | 106  | 153,1 | 52,4       | 84,5 | 139,7 |
| <b>La (ppm)</b> | -        | -          | -    | -     | -          | -    | -     |
| <b>Ce (ppm)</b> | 63       | 72         | -    | -     | -          | 69,4 | -     |
| <b>Pr (ppm)</b> | 29,8     | 21,3       | 14,8 | 15,2  | 17         | 27,7 | 21    |
| <b>Nd (ppm)</b> | 58,7     | 52,9       | 29,6 | 43,8  | 38,8       | 51,8 | 39,4  |
| <b>Hf (ppm)</b> | -        | -          | -    | 2,4   | 1,2        | 2,5  | 3,1   |
| <b>Hg (ppm)</b> | 0,9      | 0,4        | 0,5  | 1     | 1,8        | 2,4  | 1,7   |
| <b>Tl (ppm)</b> | 0,7      | 0,7        | 0,7  | 1,1   | 0,6        | -    | 1,3   |
| <b>Bi (ppm)</b> | -        | -          | -    | -     | -          | -    | -     |
| <b>Th (ppm)</b> | 3,5      | 3          | 3,1  | 4,6   | 3,9        | 3,4  | 3,5   |
| <b>U (ppm)</b>  | -        | -          | -    | -     | -          | -    | -     |

Oksit konsantrasyonları %, iz element konsantrasyonları ppm olarak verilmiştir.

Çizelge 4.11. Temmuz ayı S8-S14 numaralı sediment numunelerinin WD-XRF tekniği ile tayin edilen element konsantrasyonları

|                                        | <b>S8</b> | <b>S9</b> | <b>S10</b> | <b>S11</b> | <b>S12</b> | <b>S13</b> | <b>S14</b> |
|----------------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Na<sub>2</sub>O (%)</b>             | 1,276     | 0,538     | 0,986      | 0,936      | 1,016      | 1,229      | 1,053      |
| <b>MgO (%)</b>                         | 6,592     | 4,561     | 3,084      | 3,969      | 4,712      | 5,369      | 4,644      |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b> | 4,077     | 3,794     | 3,555      | 6,304      | 7,764      | 9,187      | 8,315      |
| <b>SiO<sub>2</sub> (%)</b>             | 32,76     | 28,91     | 16,98      | 25,95      | 31,45      | 36,51      | 32,47      |
| <b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (%)</b>  | 0,1532    | 0,1354    | 0,1596     | 0,1833     | 0,1973     | 0,2111     | 0,1776     |
| <b>SO<sub>3</sub> (%)</b>              | 0,2246    | 0,1564    | 0,3303     | 0,3729     | 0,2495     | 0,3932     | 0,4211     |
| <b>K<sub>2</sub>O (%)</b>              | 0,2914    | 0,2868    | 0,3885     | 0,8312     | 1,055      | 1,205      | 1,278      |
| <b>CaO (%)</b>                         | 27,33     | 26,7      | 39,08      | 28,55      | 26,6       | 24,36      | 20,47      |
| <b>TiO<sub>2</sub> (%)</b>             | 0,26      | 0,2143    | 0,4188     | 0,5642     | 0,6485     | 0,6857     | 0,6843     |
| <b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (%)</b>  | 0,00818   | 0,00522   | 0,0093     | 0,01579    | 0,01526    | 0,01757    | 0,01919    |
| <b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b> | 0,0294    | 0,01789   | 0,04041    | 0,03163    | 0,0309     | 0,02969    | 0,023      |
| <b>MnO (%)</b>                         | 0,07948   | 0,05752   | 0,07177    | 0,09041    | 0,1082     | 0,1116     | 0,1145     |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b> | 3,399     | 2,832     | 3,056      | 4,216      | 4,835      | 5,014      | 5,437      |
| <b>CoO (%)</b>                         | 0,00429   | 0,00173   | 0,00157    | 0,0045     | 0,00501    | 0,00461    | 0,00541    |
| <b>NiO (%)</b>                         | 0,03995   | 0,03354   | 0,02338    | 0,02416    | 0,0257     | 0,02554    | 0,02546    |
| <b>CuO (%)</b>                         | 0,00296   | 0,0026    | 0,004      | 0,00532    | 0,00579    | 0,00591    | 0,00601    |
| <b>ZnO (%)</b>                         | 0,00485   | 0,00401   | 0,01219    | 0,01281    | 0,01446    | 0,01255    | 0,01227    |
| <b>As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b> | 0,00018   | 0,00006   | 0,00024    | 0,00034    | 0,00043    | 0,00034    | 0,00043    |
| <b>Rb<sub>2</sub>O (%)</b>             | 0,00179   | 0,00151   | 0,0025     | 0,00431    | 0,00545    | 0,00558    | 0,00665    |
| <b>SrO (%)</b>                         | 0,01982   | 0,01581   | 0,03463    | 0,03478    | 0,02886    | 0,03125    | 0,03063    |
| <b>ZrO<sub>2</sub> (%)</b>             | 0,00544   | 0,00596   | 0,00938    | 0,01152    | 0,01401    | 0,0135     | 0,01633    |
| <b>Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (%)</b> | 0,00055   | 0,00062   | 0,00115    | 0,00149    | 0,00191    | 0,00201    | 0,00231    |
| <b>SnO<sub>2</sub> (%)</b>             | -         | -         | -          | -          | 0,00004    | -          | -          |
| <b>Sb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (%)</b> | -         | -         | -          | -          | -          | -          | -          |
| <b>Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (%)</b> | 0,00273   | 0,00294   | 0,00298    | 0,00291    | 0,00346    | 0,00344    | 0,00353    |
| <b>WO<sub>3</sub> (%)</b>              | -         | -         | -          | -          | 0,00041    | 0,00036    | 0,00042    |
| <b>PbO (%)</b>                         | 0,00078   | 0,00063   | 0,00142    | 0,00163    | 0,00186    | 0,00192    | 0,00181    |
| <b>Cl (ppm)</b>                        | 59,6      | 68        | 30,5       | 37,3       | 67,9       | 44,3       | 21,7       |
| <b>Ga (ppm)</b>                        | 6,4       | 5         | 8          | 11,7       | 12,9       | 13,2       | 13,7       |
| <b>Ge (ppm)</b>                        | -         | -         | -          | -          | -          | -          | -          |
| <b>Se (ppm)</b>                        | -         | -         | -          | -          | -          | -          | -          |
| <b>Br (ppm)</b>                        | 2,6       | 1,4       | 7,9        | 9,5        | 7,2        | 8,2        | 6,5        |

Çizelge 4.11'nin devamı

| Y (ppm)  | 11,3 | 9,2   | 10,4  | 13,9  | 17,3  | 17,6 | 18,2  |
|----------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| Mo (ppm) | -    | -     | -     | -     | -     | -    | -     |
| Ag (ppm) | -    | -     | -     | -     | -     | -    | -     |
| Cd (ppm) | -    | -     | -     | -     | -     | -    | -     |
| Te (ppm) | -    | -     | -     | 3,2   | 2,5   | -    | -     |
| I (ppm)  | -    | -     | -     | 9,1   | 5,1   | 6    | -     |
| Cs (ppm) | -    | -     | 42,1  | 30,2  | 31,7  | -    | 31    |
| Ba (ppm) | 90,3 | 108,1 | 137,1 | 146,7 | 157,3 | 147  | 201,4 |
| La (ppm) | -    | -     | -     | 43,6  | -     | -    | -     |
| Ce (ppm) | 99   | -     | -     | -     | 108   | -    | 119   |
| Pr (ppm) | 23   | 11,2  | 25,5  | 10,1  | 28,4  | 15   | -     |
| Nd (ppm) | 48,5 | 28    | 47,4  | 59,4  | 104,4 | 62,5 | 63,8  |
| Hf (ppm) | 1    | -     | -     | 3,4   | 4     | 4    | 5,1   |
| Hg (ppm) | 1,1  | 0,7   | 1,3   | 0,9   | 2,2   | 2,2  | 2,4   |
| Tl (ppm) | 0,8  | 0,5   | 1     | 1     | 1     | 1    | 1,1   |
| Bi (ppm) | -    | -     | -     | -     | -     | -    | -     |
| Th (ppm) | 3,7  | 2,7   | 5,1   | 6,5   | 8,1   | 8,1  | 8,4   |
| U (ppm)  | -    | -     | -     | -     | -     | -    | -     |

Oksit konsantrasyonları %, iz element konsantrasyonları ppm olarak verilmiştir.

Çizelge 4.12. Temmuz ayı S15-S20 numaralı sediment numunelerinin WD-XRF tekniği ile tayin edilen element konsantrasyonları

|                                    | S15     | S16     | S17     | S18     | S19     | S20     |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Na <sub>2</sub> O (%)              | 1,201   | 0,952   | 1,06    | 0,742   | 1,09    | 1,002   |
| MgO (%)                            | 5,743   | 4,598   | 5,111   | 4,65    | 6,125   | 6,604   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 10,54   | 7,695   | 8,793   | 6,314   | 2,266   | 2,048   |
| SiO <sub>2</sub> (%)               | 40,95   | 30,75   | 35,09   | 26,95   | 21,87   | 22,12   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)  | 0,211   | 0,1822  | 0,1979  | 0,1805  | 0,1361  | 0,1291  |
| SO <sub>3</sub> (%)                | 0,1954  | 0,4925  | 0,3792  | 0,3094  | 0,06963 | 0,07303 |
| K <sub>2</sub> O (%)               | 1,604   | 1,093   | 1,222   | 0,6331  | 0,2097  | 0,1893  |
| CaO (%)                            | 17,46   | 23,06   | 21,83   | 33,31   | 33,85   | 33,24   |
| TiO <sub>2</sub> (%)               | 0,8087  | 0,656   | 0,7118  | 0,5105  | 0,1959  | 0,1924  |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)  | 0,02458 | 0,01792 | 0,01853 | 0,01278 | 0,00545 | 0,00553 |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 0,02497 | 0,03137 | 0,02953 | 0,05247 | 0,02629 | 0,0174  |
| MnO (%)                            | 0,129   | 0,1086  | 0,1189  | 0,08951 | 0,163   | 0,2782  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 6,186   | 5,023   | 5,362   | 3,856   | 2,061   | 1,883   |
| CoO (%)                            | 0,00497 | 0,00522 | 0,00643 | 0,00419 | 0,00266 | 0,0024  |
| NiO (%)                            | 0,0278  | 0,02689 | 0,02745 | 0,02889 | 0,02111 | 0,0164  |
| CuO (%)                            | 0,00644 | 0,00602 | 0,00616 | 0,00484 | 0,00178 | 0,00222 |
| ZnO (%)                            | 0,01306 | 0,01284 | 0,01261 | 0,0111  | 0,00316 | 0,00292 |
| As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 0,00043 | 0,00056 | 0,00054 | 0,00042 | -       | -       |
| Rb <sub>2</sub> O (%)              | 0,00742 | 0,0056  | 0,00597 | 0,00339 | 0,00138 | 0,00111 |
| SrO (%)                            | 0,02435 | 0,03664 | 0,03287 | 0,0283  | 0,02813 | 0,0242  |
| ZrO <sub>2</sub> (%)               | 0,01762 | 0,01439 | 0,0149  | 0,01044 | 0,0047  | 0,0042  |
| Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | 0,00261 | 0,00194 | 0,00198 | 0,00108 | 0,00044 | 0,00037 |
| SnO <sub>2</sub> (%)               | 0,0004  | -       | -       | 0,00019 | -       | 0,00007 |
| Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | -       | -       | -       | 0,00008 | -       | -       |
| Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | 0,00359 | 0,00278 | 0,00328 | 0,00305 | 0,00373 | 0,00233 |
| WO <sub>3</sub> (%)                | 0,00014 | 0,00042 | 0,00028 | -       | 0,00017 | 0,00013 |
| PbO (%)                            | 0,00194 | 0,00182 | 0,00185 | 0,00143 | 0,00075 | 0,00071 |
| Cl (ppm)                           | 47,8    | 62,8    | 72,1    | 76,4    | 45,7    | 57,3    |
| Ga (ppm)                           | 16,9    | 13,1    | 13,6    | 9,4     | 3,8     | 5,7     |

Çizelge 4.12'nin devamı

|          |       |       |       |       |      |      |
|----------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| Ge (ppm) | -     | -     | -     | -     | -    | -    |
| Se (ppm) | -     | 0,6   | -     | 0,4   | -    | -    |
| Br (ppm) | 4,7   | 8,7   | 8,3   | 7,9   | 1,3  | 2,6  |
| Y (ppm)  | 20,6  | 17,2  | 18,7  | 13,2  | 9,1  | 7,8  |
| Mo (ppm) | -     | -     | -     | -     | -    | -    |
| Ag (ppm) | -     | 4,7   | -     | 7,4   | -    | -    |
| Cd (ppm) | -     | -     | -     | -     | -    | -    |
| Te (ppm) | 8,5   | -     | 2,5   | 7,6   | -    | -    |
| I (ppm)  | 9     | -     | -     | 16,9  | -    | -    |
| Cs (ppm) | -     | -     | -     | -     | -    | 29,3 |
| Ba (ppm) | 199,9 | 179,4 | 181,9 | 146,5 | 61   | 51,1 |
| La (ppm) | -     | 43,2  | -     | -     | -    | -    |
| Ce (ppm) | -     | -     | 117   | 94    | -    | -    |
| Pr (ppm) | -     | 16,8  | -     | 10,6  | 16,8 | 14,8 |
| Nd (ppm) | 59,1  | 60,6  | 76,1  | 55,8  | 37,6 | 33,4 |
| Hf (ppm) | 7,1   | 5     | 4,7   | -     | 1,6  | 1,9  |
| Hg (ppm) | 1,1   | 1     | 2     | 1,2   | 0,5  | -    |
| Tl (ppm) | 1     | 0,9   | 1,2   | 1,4   | 0,8  | 1,1  |
| Bi (ppm) | -     | -     | -     | -     | -    | -    |
| Th (ppm) | 9,9   | 7,9   | 8,7   | 5,8   | 3,1  | 3,4  |
| U (ppm)  | -     | -     | -     | -     | -    | -    |

Oksit konsantrasyonları %, iz element konsantrasyonları ppm olarak verilmiştir.

Çizelge 4.13. Mart ayı B1-B7 numaralı sediment numunelerinin WD-XRF tekniği ile tayin edilen element konsantrasyonları

|                                    | B1      | B2      | B3      | B4      | B5      | B6      | B7      |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Na <sub>2</sub> O (%)              | 0,863   | 0,39    | 1,251   | 0,989   | 1,084   | 0,615   | 1,12    |
| MgO (%)                            | 2,945   | 3,419   | 3,356   | 4,176   | 4,578   | 5,947   | 5,777   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 2,95    | 4,021   | 3,508   | 4,106   | 5,204   | 5,498   | 5,189   |
| SiO <sub>2</sub> (%)               | 15,86   | 15,5    | 13,88   | 22,77   | 26,01   | 27,9    | 29,02   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)  | 0,1391  | 0,1638  | 0,1772  | 0,1339  | 0,1236  | 0,1366  | 0,1337  |
| SO <sub>3</sub> (%)                | 0,2026  | 0,2045  | 0,2649  | 0,1147  | 0,1149  | 0,1175  | 0,08832 |
| K <sub>2</sub> O (%)               | 0,2902  | 0,3254  | 0,2653  | 0,3159  | 0,4343  | 0,5153  | 0,448   |
| CaO (%)                            | 36,78   | 40,83   | 48,38   | 26,82   | 22,47   | 20,4    | 22,54   |
| TiO <sub>2</sub> (%)               | 0,2982  | 0,3267  | 0,2804  | 0,4686  | 0,4223  | 0,5023  | 0,5021  |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)  | 0,00885 | 0,00925 | 0,00728 | 0,01443 | 0,01459 | 0,01718 | 0,01597 |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 0,03676 | 0,04153 | 0,04021 | 0,1866  | 0,05395 | 0,1085  | 0,129   |
| MnO (%)                            | 0,09571 | 0,06026 | 0,0479  | 0,1158  | 0,1241  | 0,1411  | 0,1183  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 2,88    | 2,826   | 2,347   | 4,131   | 4,315   | 5,051   | 4,981   |
| CoO (%)                            | 0,00322 | 0,00205 | -       | 0,00381 | 0,00564 | 0,00495 | 0,00646 |
| NiO (%)                            | 0,02809 | 0,0259  | 0,02434 | 0,0371  | 0,04353 | 0,04505 | 0,04665 |
| CuO (%)                            | 0,00329 | 0,00364 | 0,00304 | 0,00341 | 0,00434 | 0,00413 | 0,00465 |
| ZnO (%)                            | 0,00917 | 0,01479 | 0,01015 | 0,00691 | 0,00708 | 0,0063  | 0,00704 |
| As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 0,00041 | 0,00103 | 0,00037 | 0,00039 | 0,0004  | 0,00033 | 0,0003  |
| Rb <sub>2</sub> O (%)              | 0,00217 | 0,0024  | 0,00176 | 0,00209 | 0,0023  | 0,00225 | 0,00229 |
| SrO (%)                            | 0,02797 | 0,03165 | 0,04169 | 0,02024 | 0,02056 | 0,01964 | 0,02053 |
| ZrO <sub>2</sub> (%)               | 0,00596 | 0,00635 | 0,00463 | 0,0068  | 0,00699 | 0,00773 | 0,00825 |
| Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | 0,00055 | 0,00065 | 0,00049 | 0,00087 | 0,0009  | 0,00095 | 0,0009  |
| SnO <sub>2</sub> (%)               | -       | -       | -       | 0,00029 | 0,00015 | -       | -       |
| Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | -       | -       | -       | 0,00026 | -       | -       | -       |
| Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | 0,00311 | 0,00325 | 0,00407 | 0,00296 | 0,00333 | 0,00321 | 0,00315 |
| WO <sub>3</sub> (%)                | -       | -       | 0,00013 | -       | 0,00025 | 0,00025 | -       |

Çizelge 4.13.'ün devamı

| PbO (%)  | 0,00095 | 0,0013 | 0,00142 | 0,00082 | 0,00112 | 0,00093 | 0,00099 |
|----------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Cl (ppm) | 20,2    | 60,1   | 31,9    | 13      | 37,3    | 84,8    | 54,5    |
| Ga (ppm) | 5,8     | 7,3    | 5,6     | 6,4     | 7,1     | 7,2     | 7,5     |
| Ge (ppm) | -       | -      | -       | -       | -       | -       | -       |
| Se (ppm) | -       | 9      | -       | -       | -       | -       | -       |
| Br (ppm) | 5       | 13,8   | 14,5    | 1,5     | 4       | 2,8     | 1,5     |
| Y (ppm)  | 9,2     | 8      | 6,9     | 10,9    | 10,2    | 11,3    | 11,7    |
| Mo (ppm) | -       | -      | -       | -       | -       | -       | -       |
| Ag (ppm) | -       | -      | -       | 3       | -       | -       | -       |
| Cd (ppm) | -       | -      | -       | -       | -       | -       | -       |
| Te (ppm) | -       | -      | -       | -       | 1,3     | -       | -       |
| I (ppm)  | -       | -      | 10,8    | 1,8     | 1,7     | -       | -       |
| Cs (ppm) | 16,7    | -      | -       | -       | -       | -       | 12,2    |
| Ba (ppm) | 106,8   | 104,2  | 108,8   | 115     | 133,5   | 171,9   | 113,5   |
| La (ppm) | -       | -      | -       | -       | -       | -       | -       |
| Ce (ppm) | -       | -      | 106     | -       | -       | -       | -       |
| Pr (ppm) | 15,4    | 17,1   | 18,9    | 20,9    | 5,9     | 16,7    | 9,2     |
| Nd (ppm) | 33,4    | 44,8   | 35,7    | 41,9    | 38      | 40,4    | 27,6    |
| Hf (ppm) | -       | -      | -       | 2,1     | 3,2     | 2,4     | 2,1     |
| Hg (ppm) | 7       | -      | -       | 2       | 1,9     | 1,5     | 2,1     |
| Tl (ppm) | 1       | 1,3    | 1,2     | 7       | 9       | 9       | 9       |
| Bi (ppm) | -       | -      | -       | -       | -       | -       | -       |
| Th (ppm) | 3,9     | 5,3    | 4       | 4       | 4,1     | 4,4     | 4,1     |
| U (ppm)  | -       | -      | -       | -       | -       | -       | -       |

Oksit konsantrasyonları %, iz element konsantrasyonları ppm olarak verilmiştir.

Çizelge 4.14. Mart ayı B8-B14 numaralı sediment numunelerinin WD-XRF tekniği ile tayin edilen element konsantrasyonları

|                                    | B8      | B9      | B10     | B11     | B12     | B13     | B14     |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Na <sub>2</sub> O (%)              | 1,245   | 1,07    | 0,838   | 1,101   | 1,118   | 1,271   | 1,232   |
| MgO (%)                            | 5,229   | 4,168   | 1,237   | 4,895   | 5,294   | 4,272   | 5,488   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 5,863   | 3,193   | 1,503   | 4,564   | 4,755   | 5,425   | 5,07    |
| SiO <sub>2</sub> (%)               | 30,94   | 25,35   | 8,434   | 28,3    | 26,38   | 24,21   | 31,74   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)  | 0,1575  | 0,1138  | 0,1091  | 0,1464  | 0,1279  | 0,1655  | 0,1352  |
| SO <sub>3</sub> (%)                | 0,1178  | 0,1028  | 0,3106  | 0,08348 | 0,08368 | 0,1693  | 0,07995 |
| K <sub>2</sub> O (%)               | 0,4667  | 0,2503  | 0,1422  | 0,3784  | 0,3344  | 0,3871  | 0,3896  |
| CaO (%)                            | 26,94   | 23,94   | 45,91   | 24,27   | 23,44   | 34,2    | 22,16   |
| TiO <sub>2</sub> (%)               | 0,3939  | 0,244   | 0,1317  | 0,3805  | 0,4282  | 0,4286  | 0,4204  |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)  | 0,01286 | 0,00897 | 0,0011  | 0,01144 | 0,0153  | 0,01037 | 0,01419 |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 0,09376 | 0,02748 | 0,01137 | 0,06716 | 0,1612  | 0,08722 | 0,07218 |
| MnO (%)                            | 0,1078  | 0,07281 | 0,03624 | 0,09936 | 0,127   | 0,1013  | 0,1165  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 4,044   | 3,447   | 1,222   | 4,12    | 4,58    | 3,774   | 4,565   |
| CoO (%)                            | 0,00649 | 0,00515 | 0,00154 | 0,00485 | 0,00551 | 0,00423 | 0,0052  |
| NiO (%)                            | 0,03892 | 0,03507 | 0,01161 | 0,03549 | 0,04121 | 0,03414 | 0,04153 |
| CuO (%)                            | 0,00345 | 0,00306 | 0,00142 | 0,00397 | 0,00375 | 0,00424 | 0,00374 |
| ZnO (%)                            | 0,00662 | 0,00499 | 0,01034 | 0,00571 | 0,00672 | 0,00989 | 0,00594 |
| As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 0,00048 | 0,00051 | 0,00056 | 0,00032 | 0,00029 | 0,00059 | 0,00024 |
| Rb <sub>2</sub> O (%)              | 0,00223 | 0,00184 | 0,00145 | 0,00212 | 0,00204 | 0,0023  | 0,00215 |
| SrO (%)                            | 0,01929 | 0,01986 | 0,03559 | 0,01913 | 0,01951 | 0,02461 | 0,01832 |
| ZrO <sub>2</sub> (%)               | 0,00649 | 0,00494 | 0,00309 | 0,00574 | 0,00629 | 0,00732 | 0,00727 |
| Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | 0,00075 | 0,00055 | 0,00036 | 0,00071 | 0,00064 | 0,00074 | 0,0009  |

Çizelge 4.14.'ün devamı

|                                    |         |         |         |         |         |         |         |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| SnO <sub>2</sub> (%)               | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | 0,00383 | 0,00325 | 0,00406 | 0,00306 | 0,00334 | 0,00307 | 0,00314 |
| WO <sub>3</sub> (%)                | 0,00036 | -       | -       | 0,00026 | 0,00022 | -       | 0,00015 |
| PbO (%)                            | 0,00084 | 0,00065 | 0,00063 | 0,00079 | 0,00088 | 0,0012  | 0,00092 |
| Cl (ppm)                           | 21,3    | 8,3     | 18,9    | 0,6     | 11,5    | 21,5    | 9,9     |
| Ga (ppm)                           | 6,6     | 5,4     | 3,5     | 6,4     | 6,8     | 8,2     | 6,7     |
| Ge (ppm)                           | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Se (ppm)                           | -       | -       | 0,8     | -       | -       | -       | -       |
| Br (ppm)                           | 2,1     | 1       | 9,6     | 0,4     | 1,4     | 5,5     | 0,5     |
| Y (ppm)                            | 10,3    | 8,3     | 4,1     | 11,7    | 10,4    | 011,1   | 11,4    |
| Mo (ppm)                           | -       | -       | 0,3     | -       | -       | -       | -       |
| Ag (ppm)                           | 4,3     | -       | -       | -       | 3,7     | 4       | -       |
| Cd (ppm)                           | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Te (ppm)                           | -       | 1,4     | -       | -       | -       | -       | -       |
| I (ppm)                            | -       | -       | 11      | -       | -       | -       | -       |
| Cs (ppm)                           | -       | -       | 27,5    | -       | 28,9    | 32,6    | -       |
| Ba (ppm)                           | 99,2    | 77,6    | 77,9    | 93,9    | 92,6    | 151,9   | 77,1    |
| La (ppm)                           | 42,5    | -       | -       | -       | -       | -       | 15,1    |
| Ce (ppm)                           | -       | -       | -       | 64,6    | -       | 72      | -       |
| Pr (ppm)                           | 24,4    | 8       | 035     | 19,4    | 18,2    | 33,8    | 9,6     |
| Nd (ppm)                           | 45,3    | 25,3    | 40,3    | 71,6    | 35,3    | 88      | 36,9    |
| Hf (ppm)                           | 4,3     | 2,4     | 3,7     | 3,2     | 3,5     | 3,6     | 3       |
| Hg (ppm)                           | 1,3     | 1,7     | -       | 1,9     | 1,7     | -       | 2       |
| Tl (ppm)                           | 0,7     | 1       | 1,1     | 0,7     | 1,1     | 0,9     | 0,8     |
| Bi (ppm)                           | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Th (ppm)                           | 4       | 2,8     | 4,3     | 3,4     | 3,7     | 4,9     | 3,6     |
| U (ppm)                            | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |

Oksit konsantrasyonları %, iz element konsantrasyonları ppm olarak verilmiştir.

Çizelge 4.15. Mart ayı B15-B20 numaralı sediment numunelerinin WD-XRF tekniği ile tayin edilen element konsantrasyonları

|                                    | B15     | B16     | B17     | B18     | B19     | B20     |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Na <sub>2</sub> O (%)              | 1,207   | 0,931   | 0,578   | 0,719   | 1,077   | 1,113   |
| MgO (%)                            | 6,162   | 3,206   | 3,616   | 3,923   | 6,447   | 6,333   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 5,919   | 4,761   | 5,272   | 5,344   | 1,85    | 5,579   |
| SiO <sub>2</sub> (%)               | 32,99   | 23,03   | 22,84   | 22,75   | 25,76   | 31,55   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)  | 0,133   | 0,1519  | 0,1541  | 0,1791  | 0,1332  | 0,1401  |
| SO <sub>3</sub> (%)                | 0,1152  | 0,1975  | 0,1769  | 0,2216  | 0,0425  | 0,09915 |
| K <sub>2</sub> O (%)               | 0,5214  | 0,5998  | 0,5557  | 0,4355  | 0,1822  | 0,5291  |
| CaO (%)                            | 20,32   | 31,97   | 31,04   | 37,94   | 33,77   | 22,57   |
| TiO <sub>2</sub> (%)               | 0,5368  | 0,3875  | 0,4826  | 0,4493  | 0,1658  | 0,3519  |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)  | 0,01749 | 0,01192 | 0,01308 | 0,01277 | 0,0059  | 0,01067 |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 0,06545 | 0,02209 | 0,04797 | 0,07277 | 0,01716 | 0,05116 |
| MnO (%)                            | 0,1419  | 0,1276  | 0,1161  | 0,1032  | 0,08772 | 0,0863  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 5,239   | 3,385   | 4,153   | 3,808   | 1,888   | 3,576   |
| CoO (%)                            | 0,00605 | 0,0047  | 0,00427 | 0,00451 | 0,00205 | 0,00338 |
| NiO (%)                            | 0,05172 | 0,02177 | 0,0322  | 0,03205 | 0,02007 | 0,03149 |
| CuO (%)                            | 0,00456 | 0,0045  | 0,00484 | 0,00719 | 0,00188 | 0,0026  |
| ZnO (%)                            | 0,00679 | 0,01037 | 0,01167 | 0,0123  | 0,00291 | 0,00434 |
| As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 0,00026 | 0,00055 | 0,00083 | 0,00066 | -       | 0,00009 |
| Rb <sub>2</sub> O (%)              | 0,00258 | 0,00393 | 0,00366 | 0,00293 | 0,00116 | 0,00166 |
| SrO (%)                            | 0,02025 | 0,02829 | 0,02707 | 0,02825 | 0,02327 | 0,02134 |

Çizelge 4.15'in devamı

|                                    |         |         |         |         |         |         |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ZrO <sub>2</sub> (%)               | 0,00887 | 0,00909 | 0,01032 | 0,00938 | 0,00427 | 0,00497 |
| Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | 0,00107 | 0,00104 | 0,00121 | 0,00108 | 0,00037 | 0,00061 |
| SnO <sub>2</sub> (%)               | -       | -       | 0,00024 | -       | -       | -       |
| Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | -       | -       | 0,00002 | -       | -       | -       |
| Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | 0,00319 | 0,00346 | 0,00322 | 0,00367 | 0,00311 | 0,00234 |
| WO <sub>3</sub> (%)                | -       | 0,0001  | -       | -       | 0,00028 | 0,00012 |
| PbO (%)                            | 0,00102 | 0,00114 | 0,00113 | 0,00159 | 0,00057 | 0,00071 |
| Cl (ppm)                           | 11,3    | 31,9    | 161,7   | 102,5   | 58      | 750,4   |
| Ga (ppm)                           | 8,4     | 9,4     | 9       | 9       | 4,3     | 7,1     |
| Ge (ppm)                           | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Se (ppm)                           | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Br (ppm)                           | 2       | 6,7     | 8       | 7,8     | -       | 3,9     |
| Y (ppm)                            | 15,5    | 11,9    | 12,8    | 12,3    | 8,5     | 8,7     |
| Mo (ppm)                           | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Ag (ppm)                           | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Cd (ppm)                           | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Te (ppm)                           | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| I (ppm)                            | -       | -       | -       | -       | 0,0005  | -       |
| Cs (ppm)                           | 32,1    | 24,3    | -       | 41,2    | -       | 18      |
| Ba (ppm)                           | 130,2   | 119     | 160,9   | 182,9   | 54,5    | 52,5    |
| La (ppm)                           | 15,4    | 020     | -       | -       | -       | 33      |
| Ce (ppm)                           | 109     | -       | -       | -       | -       | -       |
| Pr (ppm)                           | -       | 9,5     | 22,8    | 16,1    | 12,9    | 13,4    |
| Nd (ppm)                           | 57,1    | 51,6    | 49,8    | 52,1    | 41,1    | 39,1    |
| Hf (ppm)                           | 4,8     | 2,3     | 3,2     | 3,7     | -       | 2,3     |
| Hg (ppm)                           | 2,1     | 0,5     | 0,7     | 1       | -       | 1,2     |
| Tl (ppm)                           | 0,8     | 1,2     | 1       | 1,1     | 0,7     | 0,8     |
| Bi (ppm)                           | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Th (ppm)                           | 4,8     | 5,9     | 5,8     | 5,6     | 2,6     | 3,6     |
| U (ppm)                            | -       | -       | -       | -       | -       | -       |

Oksit konsantrasyonları %, iz element konsantrasyonları ppm olarak verilmiştir.

XRF yöntemi ile yapılan elementel analiz sonuçlarına göre, Boğaçay'ın spesifik topografyası ve jeokimyası, aynı zamanda tabanının hidrojeolojisi üzerinde etkili olup, yüzey çökeltisinin kompozisyonunu belirlemektedir. Sediment bileşimi genellikle biyojenik ve antropojenik materyallerden etkilenen litojen materyal tarafından belirlenir. Boğaçay'daki yüzey çökeltisi, belirgin bir şekilde organik madde ve karbonat içermektedir. Çalışma da, Temmuz ve Mart aylarına ait WD-XRF element analizi sonuçlarına göre, Boğaçay'ın sediment yapısındaki ana oksitler; MgO (%4,79 ve %4,52), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%5,10 ve %4,48), SiO<sub>2</sub> (%26,56 ve %24,26), CaO (%28,95 ve %29,83), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%3,81 ve %3,72) dir. CaO değerleri örneklerdeki karbonat mineralleri ile bağlantılıdır, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> özellikle feldspat ve kil mineral miktarıyla ilişkilidir. Bu durum, Boğaçay'ın sediment yapısının kireçtaşı, kıltaşı ve marn oluşumlarından oluştuğunu desteklemektedir (Koç vd., 2015). Kireçtaşları için belirleyici bileşik CaO'dur ve sediment örneklerinin kireçtaşları içeriğinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün yüksek olduğu gözlenmiştir. Volkanik kayalar için belirleyici bileşik ise SiO<sub>2</sub>'dir (Sert vd., 2017). Ayrıca sediment birikiminde sıcaklık önemli bir etken olup, düşük rakımlı yerlerde, yüksek sıcaklık varlığında feldispatların kile dönüştüğü gözlemlenir. Bu durum için Boğaçay konumu ve bölge iklimi çok uygundur. Çalışmadaki % konsantrasyon değerlerine göre, Boğaçay sediment yapısının temel bileşenlerinin ağırlıklı olarak SiO<sub>2</sub> (detritik kuvars ve/veya biyojenik silika) ve CaO

(karbonat içeriği) olduğu görülmektedir. Ancak, bu bileşenler dışında da diğer elementlerin katkısı bulunmaktadır.

Çalışmadaki WD-XRF analiz sonuçları, literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Temmuz ve Mart aylarındaki sediment örneklerindeki CaO konsantrasyon ortalamaları sırasıyla %28,95 ve %29,83'tir. Bu değerler, literatürdeki benzer çalışmalardan (Dean 1996; Deschamps vd. 2002; Das vd. 2006; Irmak vd. 2017; Thorpe vd. 2019; Karalük 2023; Sülünoğlu 2023) belirtilen CaO % konsantrasyonlarından belirgin şekilde yüksektir.

SiO<sub>2</sub>'nin sediment örneklerindeki konsantrasyon değerleri, Temmuz ayı için %26,56, Mart ayı için %24,26 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, literatürdeki diğer çalışmaların (Dean, 1996; Deschamps vd. 2002; Das vd. 2006; Irmak vd. 2017; Thorpe vd. 2019; Karalük 2023; Sülünoğlu 2023) rapor ettiği değerlerden daha düşüktür.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> konsantrasyon değerleri, Temmuz ayı için %5,10, Mart ayı için %4,48 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, literatürdeki benzer çalışmaların (Dean 1996; Deschamps vd. 2002; Das vd. 2006; Irmak vd. 2017; Thorpe vd. 2019; Karalük 2023; Sülünoğlu 2023) rapor ettiği değerlerden daha düşüktür.

MgO'nun sediment örneklerindeki konsantrasyon değerleri, Temmuz ayı için %4,79, Mart ayı için %4,52 olarak bulunmuştur. Bu değerler, literatürdeki diğer çalışmaların (Turekian ve Wedepohl 1961; Paropkari 1990; Wedepohl 1995; Dean 1996; Paul 2001; Deschamps vd. 2002; Das vd. 2006; Irmak vd. 2017; Thorpe vd. 2019; Karalük 2023) rapor ettiği değerlerden genellikle daha yüksektir, ancak Sülünoğlu (2023) çalışmasındaki değerden düşüktür.

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> konsantrasyon değerleri, Temmuz ayı için %3,81, Mart ayı için %3,72 olarak belirlenmiştir. Bu değer, Thorpe vd. (2019) çalışmasındaki değerden daha yüksektir. Bu sonuçlar, Boğaçay'ın sediment yapısının detaylı bir analizi için temel oluşturmakta ve literatürdeki diğer benzer çalışmalarla karşılaştırılabilirliğini sağlamaktadır. Sediment numunelerinin elementel analizine odaklanan çalışmaların sonuçları, Çizelge 4.16'da ilgili oksit değerleriyle birlikte sunulmuştur.

**Çizelge 4.16.** Sediment numunelerinde tespit edilen oksit değerlerinin literatür sonuçlarıyla karşılaştırılması (%)

[illegible]



Boğaçay sediment örneklerinde Cl, Ga, Se, Br, Y, Mo, Ag, Te, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Hf, Hg, Tl, Th iz elementleri belirlenmiştir. Yapılan kıyaslamalara göre, Y elementi Temmuz ve Mart ayı sediment örnekleri için sırasıyla 12,39 ve 10,26 ppm değerlerindedir. Bu değerler, literatürdeki benzer çalışmalardan (Dean 1996; Ozkan ve Buyukisik 2012; Demirkol Kılıç 2015; Irmak vd. 2017) daha düşüktür.

Ba elementi için Temmuz ve Mart ayı sediment örnekleri ortalamaları sırasıyla 124,95 ve 111,20 ppm olarak belirlenmiştir. Bu değerler, literatürdeki önceki çalışmalardan (Turekian and Wedepohl 1961; Wedepohl 1995; Dean 1996; Paul 2001; Ozkan ve Buyukisik 2012; Demirkol Kılıç 2015; Irmak vd. 2017; Canpolat vd. 2022) daha düşüktür.

La elementi için Temmuz ve Mart ayı sediment örnekleri ortalamaları sırasıyla 43,40 ve 25,20 ppm'dir. Bu değerler, literatürdeki önceki çalışmalardan (Turekian and Wedepohl 1961; Dean 1996; Demirkol Kılıç 2015) yüksektir, ancak Canpolat vd. (2022) tarafından yapılan çalışmadan düşüktür.

Ce elementi Temmuz ve Mart ayı sediment örnekleri için sırasıyla 92,68 ve 87,90 ppm'dir. Bu değerler, literatürdeki önceki çalışmalardan (Dean 1996; Demirkol Kılıç 2015) daha yüksektir.

Pr, Nd, Hf ve Hg elementleri için Temmuz ve Mart ayı sediment örnekleri ortalamaları, literatürdeki diğer örnek çalışmalardan daha yüksektir.

Tl elementi için Temmuz ve Mart ayı sediment örnekleri ortalamaları, Turekian and Wedepohl (1961) tarafından belirtilen değerden düşük, ancak Canpolat vd. (2022) tarafından belirtilen değerden yüksektir. Çizelge 4.17, literatürdeki sedimentlerde iz element tespiti konusunda yapılan örnek çalışmaları içermektedir.

**Çizelge 4.17.** Sediment numunelerinde tespit edilen İz element değerlerinin litertür sonuçlarıyla karşılaştırılması (ppm)

|    | (Dean 1996) | (Paul 2001) | (Turekian and Wedepohl 1961) | (Wedepohl 1995) | (Demirkol Kılıç, E. 2015) | (İrmak vd. 2017) | (Ozkan ve Buyukisik 2012) | (Canpolat vd. 2022) | Bu çalışma (Temmuz Ayı) | Bu çalışma (Mart Ayı) |
|----|-------------|-------------|------------------------------|-----------------|---------------------------|------------------|---------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|
| Cl | -           | -           | -                            | -               | -                         | -                | -                         | -                   | 49,89                   | 75,48                 |
| Ga | -           | -           | -                            | -               | -                         | -                | -                         | -                   | 8,85                    | 6,89                  |
| Se | -           | -           | -                            | -               | -                         | -                | -                         | -                   | 0,50                    | 0,85                  |
| Br | -           | -           | -                            | -               | -                         | -                | -                         | -                   | 5,69                    | 4,84                  |
| Y  | 15          | -           | -                            | -               | 11,2                      | 32               | 20,7                      | -                   | 12,39                   | 10,26                 |
| Mo | -           | -           | -                            | -               | -                         | -                | -                         | -                   | 1,10                    | 0,30                  |
| Ag | -           | -           | -                            | -               | -                         | -                | -                         | -                   | 4,88                    | 3,75                  |
| Cd | -           | -           | 0,3                          | -               | -                         | -                | 0,53                      | 0,3                 | -                       | -                     |
| Te | -           | -           | -                            | -               | -                         | -                | -                         | -                   | 3,94                    | 1,35                  |
| I  | -           | -           | -                            | -               | -                         | -                | -                         | -                   | 8,13                    | 5,06                  |
| Cs | -           | -           | -                            | -               | -                         | -                | -                         | -                   | 27,12                   | 25,94                 |
| Ba | 313         | 1156        | 580                          | 668             | -                         | 191              | 309                       | 198                 | 124,95                  | 111,20                |
| La | 12          | -           | 92                           | -               | 12,4                      | -                | -                         | 14,6                | 43,40                   | 25,20                 |
| Ce | 28          | -           | -                            | -               | 22,3                      | -                | -                         | -                   | 92,68                   | 87,90                 |
| Pr | -           | -           | -                            | -               | 2,8                       | -                | -                         | -                   | 18,76                   | 17,22                 |
| Nd | -           | -           | -                            | -               | 10,8                      | -                | -                         | -                   | 52,58                   | 44,77                 |
| Hf | -           | -           | -                            | -               | 1,9                       | -                | -                         | -                   | 3,36                    | 3,11                  |
| Hg | -           | -           | 0,4                          | -               | -                         | -                | 0,13                      | 0,03                | 1,33                    | 1,49                  |
| Tl | -           | -           | 1,4                          | -               | -                         | -                | -                         | 0,2                 | 0,94                    | 0,90                  |
| Bi | -           | -           | -                            | -               | -                         | -                | 0,38                      | -                   | -                       | -                     |
| Th | -           | -           | -                            | -               | 3,8                       | -                | -                         | -                   | 5,32                    | 4,24                  |
| U  | -           | -           | 3,7                          | -               | 1,3                       | -                | -                         | 1,6                 | -                       | -                     |

#### 4.5. WD-XRF Yöntemi ile Elde Edilen Verilerin İstatistiksel Analizi

Çalışmada WD-XRF elementel analiz değerlerinin istatistiksel olarak Temmuz ve Mart ayı sediment örneklerinin zamana bağlı değişimi incelendi. Buna göre;  $P_2O_5$  % konsantrasyonlarının Temmuz ayında Mart ayına göre anlamlı olarak daha yüksek düzeyde olduğu tespit edilmiştir ( $p=0,04$ ).  $SO_3$  % konsantrasyonlarının Temmuz ayında Mart ayına göre anlamlı olarak daha yüksek düzeyde olduğu tespit edilmiştir ( $p=0,01$ ). Şekil 4.9'da Temmuz ve Mart aylarında toplanan sediment örneklerindeki  $P_2O_5$  ve  $SO_3$  % konsantrasyonlarının istatistiksel değişimi gösterilmiştir.

NiO % konsantrasyonlarının Temmuz ayında Mart ayına göre anlamlı olarak daha düşük düzeyde olduğu tespit edilmiştir ( $p=0,04$ ). Şekil 4.10'da Temmuz ve Mart aylarındaki sediment örneklerindeki NiO % konsantrasyonlarının istatistiksel değişimi gösterilmiştir.

Diğer element % konsantrasyonlarının Temmuz ve Mart aylarında anlamlı olarak farklılık göstermediği tespit edilmiştir. Temmuz ve Mart aylarına ait sediment numunelerinin WD-XRF elementel analiz sonuçları, istatistiksel olarak incelenmiş ve elde edilen bulgular Çizelge 4.18'de sunulmuştur.

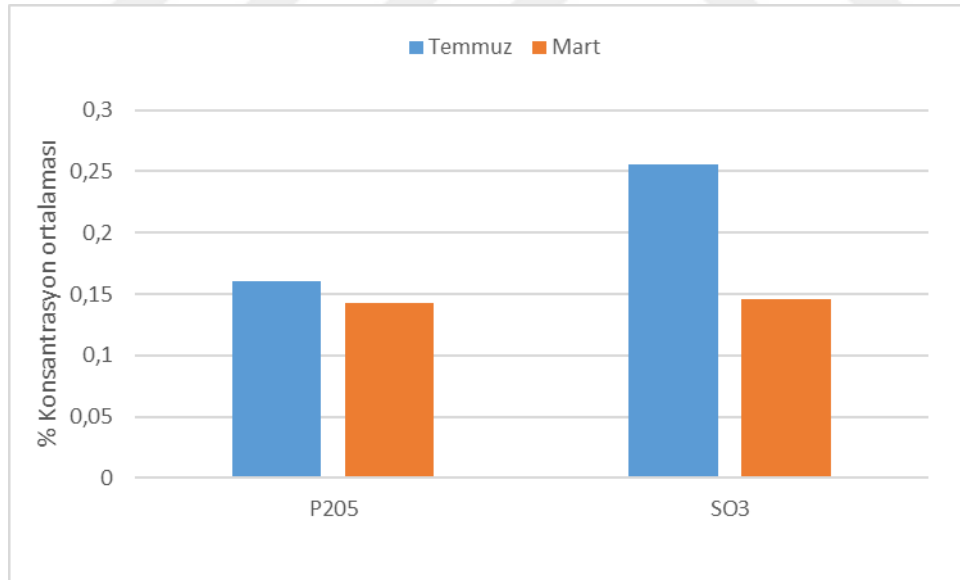
**Çizelge 4.18.** WD-XRF Analizi Sonucu Elde Edilen Element Konsantrasyonlarının İstatistiksel İncelenmesi (%)

|                                    | Temmuz         |        |        | Mart           |        |        | P     |
|------------------------------------|----------------|--------|--------|----------------|--------|--------|-------|
|                                    | X±s.s.         | $\mu$  | IQR    | X±s.s.         | $\mu$  | IQR    |       |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 0,9991±0,2081  | 1,0145 | 0,2105 | 0,9906±0,25    | 1,0805 | 0,313  | 0,81  |
| <b>MgO</b>                         | 4,7947±1,0933  | 4,647  | 1,54   | 4,5234±1,348   | 4,425  | 2,115  | 0,55  |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 5,1002±2,7455  | 3,962  | 4,893  | 4,4787±1,2795  | 4,9155 | 1,62   | 0,94  |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 26,5575±7,2309 | 26,45  | 10,995 | 24,2607±6,5159 | 25,555 | 5,9    | 0,50  |
| <b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>  | 0,1608±0,0292  | 0,1523 | 0,0473 | 0,1427±0,0191  | 0,1379 | 0,0227 | 0,04* |
| <b>SO<sub>3</sub></b>              | 0,2559±0,1274  | 0,2529 | 0,1757 | 0,1454±0,0698  | 0,1164 | 0,1064 | 0,01* |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 0,5957±0,4744  | 0,3491 | 0,8549 | 0,3883±0,1256  | 0,3884 | 0,1879 | 0,87  |
| <b>CaO</b>                         | 28,9535±5,9722 | 28,6   | 10,04  | 29,8345±8,5854 | 26,88  | 12,935 | 0,94  |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 0,4265±0,2135  | 0,3918 | 0,4319 | 0,3801±0,1106  | 0,4072 | 0,1465 | 0,81  |
| <b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>  | 0,0119±0,0056  | 0,0109 | 0,0091 | 0,0117±0,004   | 0,0123 | 0,0054 | 0,77  |
| <b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0,0492±0,0378  | 0,0315 | 0,0284 | 0,0697±0,047   | 0,0597 | 0,052  | 0,10  |
| <b>MnO</b>                         | 0,1196±0,071   | 0,1027 | 0,0348 | 0,1014±0,0291  | 0,1055 | 0,0342 | 0,85  |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 3,8056±1,1747  | 3,573  | 1,9805 | 3,7166±1,0589  | 3,926  | 1,3075 | 0,87  |
| <b>CoO</b>                         | 0,0039±0,0013  | 0,0042 | 0,002  | 0,0043±0,0015  | 0,0046 | 0,0021 | 0,34  |
| <b>NiO</b>                         | 0,0288±0,006   | 0,0277 | 0,0088 | 0,0339±0,01    | 0,0346 | 0,0144 | 0,04* |
| <b>CuO</b>                         | 0,0041±0,0016  | 0,0036 | 0,0032 | 0,0038±0,0012  | 0,0037 | 0,0012 | 0,88  |
| <b>ZnO</b>                         | 0,0087±0,0042  | 0,0102 | 0,0078 | 0,008±0,003    | 0,007  | 0,0041 | 0,63  |
| <b>As<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0,0003±0,0002  | 0,0004 | 0,0002 | 0,0004±0,0002  | 0,0004 | 0,0003 | 0,33  |
| <b>Rb<sub>2</sub>O</b>             | 0,0032±0,0021  | 0,0021 | 0,0039 | 0,0023±0,0007  | 0,0022 | 0,0005 | 0,69  |
| <b>SrO</b>                         | 0,0267±0,0059  | 0,0266 | 0,0075 | 0,0244±0,0063  | 0,021  | 0,0083 | 0,10  |
| <b>ZrO<sub>2</sub></b>             | 0,0092±0,0045  | 0,0074 | 0,0085 | 0,0067±0,0019  | 0,0066 | 0,0026 | 0,26  |
| <b>Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b> | 0,0011±0,0007  | 0,0008 | 0,0014 | 0,0008±0,0002  | 0,0007 | 0,0003 | 0,34  |
| <b>SnO<sub>2</sub></b>             | 0,0003±0,0001  | 0,0004 | 0,0001 | 0,0004±0,0001  | 0,0004 | 0,0001 | 0,53  |
| <b>Sb<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b> | 0,0004±0,0001  | 0,0004 | 0,0001 | 0,0004±0,0001  | 0,0004 | 0,0001 | 0,99  |
| <b>Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b> | 0,0031±0,0004  | 0,003  | 0,0007 | 0,0033±0,0004  | 0,0032 | 0,0003 | 0,10  |
| <b>WO<sub>3</sub></b>              | 0,0002±0,0001  | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002±0,0001  | 0,0002 | 0,0001 | 0,41  |
| <b>PbO</b>                         | 0,0012±0,0005  | 0,0011 | 0,0011 | 0,0010±0,0003  | 0,0009 | 0,0003 | 0,47  |

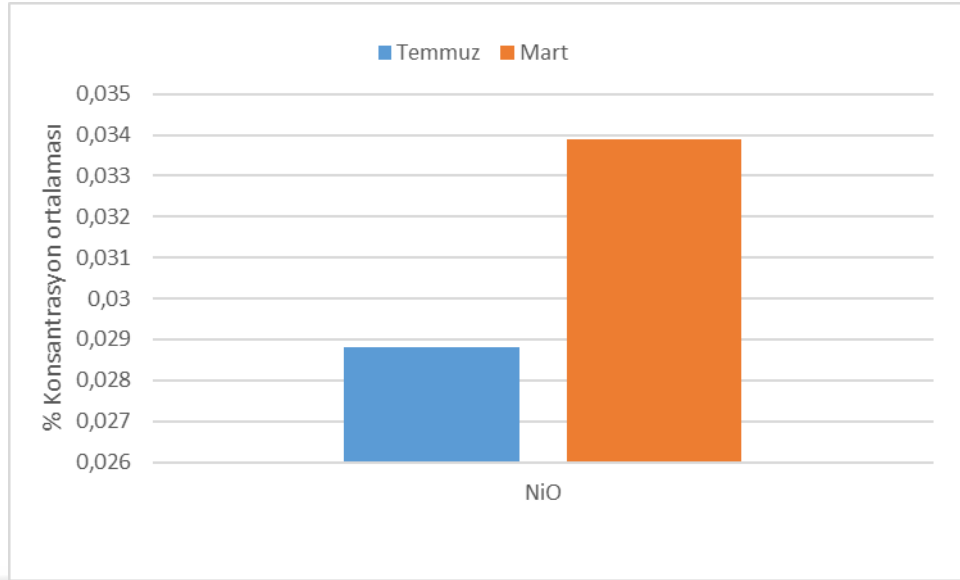
Çizlege 4.18'in devamı

|           |                    |               |               |                      |               |               |             |
|-----------|--------------------|---------------|---------------|----------------------|---------------|---------------|-------------|
| <b>Cl</b> | <b>0,005±0,002</b> | <b>0,0048</b> | <b>0,0026</b> | <b>0,0075±0,0164</b> | <b>0,0027</b> | <b>0,0047</b> | <b>0,10</b> |
| <b>Ga</b> | 0,0009±0,0004      | 0,0008        | 0,0007        | 0,0007±0,0002        | 0,0007        | 0,0002        | 0,32        |
| <b>Ge</b> | 0,0001±0,0001      | 0,0001        | 0,0001        | 0,0001±0,0001        | 0,0001        | 0,0001        | 0,99        |
| <b>Se</b> | 0,0001±0,0001      | 0,0001        | 0,0001        | 0,0001±0,0001        | 0,0001        | 0,0001        | 0,67        |
| <b>Br</b> | 0,0005±0,0003      | 0,0007        | 0,0006        | 0,0005±0,0004        | 0,0003        | 0,0006        | 0,34        |
| <b>Y</b>  | 0,0012±0,0004      | 0,001         | 0,0008        | 0,001±0,0002         | 0,0011        | 0,0003        | 0,33        |
| <b>Mo</b> | 0,0001±0,001       | 0,0001        | 0,0001        | 0,0001±0,0001        | 0,0001        | 0,0001        | 0,16        |
| <b>Ag</b> | 0,0003±0,0002      | 0,0002        | 0,0001        | 0,0002±0,0001        | 0,0002        | 0,0001        | 0,46        |
| <b>Cd</b> | 0,0002±0,0001      | 0,0002        | 0,0001        | 0,0002±0,0001        | 0,0002        | 0,0001        | 0,99        |
| <b>Te</b> | 0,0003±0,0002      | 0,0003        | 0,0001        | 0,0003±0,0001        | 0,0003        | 0,0001        | 0,70        |
| <b>I</b>  | 0,0005±0,0004      | 0,0003        | 0,0004        | 0,0004±0,0003        | 0,0003        | 0,0001        | 0,06        |
| <b>Cs</b> | 0,0014±0,0013      | 0,0004        | 0,0024        | 0,0014±0,0013        | 0,0004        | 0,0022        | 0,96        |
| <b>Ba</b> | 0,0125±0,0048      | 0,0138        | 0,0073        | 0,0111±0,0036        | 0,0108        | 0,0047        | 0,42        |
| <b>La</b> | 0,0006±0,0013      | 0,0002        | 0,0001        | 0,0008±0,0012        | 0,0002        | 0,0007        | 0,31        |
| <b>Ce</b> | 0,0038±0,0048      | 0,0002        | 0,0081        | 0,0019±0,0036        | 0,0002        | 0,0001        | 0,17        |
| <b>Pr</b> | 0,0016±0,0008      | 0,0016        | 0,0011        | 0,0016±0,0008        | 0,0016        | 0,001         | 0,88        |
| <b>Nd</b> | 0,0053±0,0018      | 0,0052        | 0,0021        | 0,0045±0,0015        | 0,0041        | 0,0015        | 0,08        |
| <b>Hf</b> | 0,0003±0,0002      | 0,0002        | 0,0003        | 0,0003±0,0001        | 0,0003        | 0,0002        | 0,43        |
| <b>Hg</b> | 0,0001±0,0001      | 0,0001        | 0,0001        | 0,0001±0,0001        | 0,0001        | 0,0001        | 0,76        |
| <b>Tl</b> | 0,0001±0,0001      | 0,0001        | 0,0001        | 0,0001±0,0001        | 0,0001        | 0,0001        | 0,89        |
| <b>Bi</b> | 0,0001±0,0001      | 0,0001        | 0,0001        | 0,0001±0,0001        | 0,0001        | 0,0001        | 0,99        |
| <b>Th</b> | 0,0005±0,0002      | 0,0004        | 0,0005        | 0,0004±0,0001        | 0,0004        | 0,0001        | 0,62        |
| <b>U</b>  | 0,0001±0,0001      | 0,0001        | 0,0001        | 0,0001±0,0001        | 0,0001        | 0,0001        | 0,99        |

\*\* Mann Whitney U testi, \*0,05 düzeyinde anlamlı farklılık



Şekil 4.9. Temmuz ve Mart ayı P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ve SO<sub>3</sub> % konsantrasyon ortalamalarının istatistiksel değişimi



**Şekil 4.10.** Temmuz ve Mart ayı NiO % konsantrasyon ortalamalarının istatistiksel değişimi

WD-XRF elementel analiz değerleri istatistiksel olarak incelendiğinde, Temmuz ve Mart ayı sediment örneklerinin zamana bağlı değişimine göre  $P_2O_5$  konsantrasyonlarının Temmuz ayında Mart ayına göre anlamlı olarak daha yüksek olduğu tespit edilmiştir ( $p=0,04$ ). Mart ayında düşük konsantrasyonlarda olmasının nedeni olarak, sediment üzerinde biyolojik yaşamın artışı ve bu artışa bağlı olarak fosforun azaldığı tahmin edilmektedir. Çünkü sedimentteki mikroorganizmaların büyüme ve gelişmeleri için sedimente bağlı fosfor formları kullanmaktadır. Ancak çalışma alanında bu doğal sürecin işlemediği görülmektedir. Temmuz ayında kirlilikten dolayı fosfor birikimi tespit edilmiştir. Yaz aylarında sedimentteki inorganik fosforun artmasının nedeninin, dış kaynaktan gelen fosfor yüklemelerinin bir sonucu olduğu tahmin edilmektedir (Yılmaz 2009).

$SO_3$  konsantrasyonları ise Temmuz ayında Mart ayına göre anlamlı olarak daha yüksek bulunmuştur ( $p=0,01$ ). Bu durum, Temmuz ayında kurak sezon nedeniyle akımın azalmasıyla daha yüksek kirlenici seviyelerine maruz kalındığını göstermektedir. İstatistiksel olarak NiO konsantrasyonlarının Temmuz ayında Mart ayına göre anlamlı olarak daha düşük olduğu tespiti, volkanik kayaların yapısında bulunan serbest metal ya da demir (Fe) kompleksleri ile ilişkilendirilmiştir ve bu maddelerin ilkbahar yağışlarıyla sürüklenerek sedimente taşınmış olabileceği düşünülmüştür (Doğru vd. 2021).

## 5. SONUÇLAR

Antalya Boğaçay üzerinde gerçekleştirdiğimiz çalışma kapsamında, Temmuz ayında 20 sediment örneğine ilave olarak, aynı bölgelerden Mart ayında 20 sediment örneği toplanarak toplamda 40 sediment örneği elde edilmiştir. Bu örnekler, gamma-ışın spektrometresi kullanılarak incelenmiştir. Bu araştırma, Antalya Boğaçay çevresinde gerçekleştirilen sediment analizi sonuçlarına dayanarak, Temmuz ve Mart aylarındaki doğal ve yapay radyoaktivite konsantrasyonlarını ve radyolojik risk parametrelerini incelemiştir. Bu dönemlerde toplanan sediment örneklerinin ortalama radyoaktivite konsantrasyonlarına bakıldığında, Temmuz ayında  $^{226}\text{Ra}$  için 12,92 Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  için 14,78 Bq/kg,  $^{40}\text{K}$  için 194,52 Bq/kg ve  $^{137}\text{Cs}$  için 3,76 Bq/kg; Mart ayında ise sırasıyla  $^{226}\text{Ra}$  için 9,45 Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  için 8,06 Bq/kg,  $^{40}\text{K}$  için 104,54 Bq/kg ve  $^{137}\text{Cs}$  için 1,72 Bq/kg olarak belirlenmiştir. Boğaçay'ın geniş bir kısmı aynı jeolojik yapıya sahip olduğundan toplam numuneler arasındaki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ile  $^{137}\text{Cs}$  konsantrasyon değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır. Bu çalışma, Boğaçay sedimentlerinin genel radyoaktivite seviyelerinin UNSCEAR 2000 standartlarına uygun ve dünya ortalamalarının altında olduğunu göstermekle birlikte, Temmuz ayında elde edilen değerlerin Mart ayına göre istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde daha yüksek olduğunu belirlemiştir.

Temmuz ayı sediment örneklerinin aktivite konsantrasyon değerlerine bakıldığında; derinliğin arttığı ve akış hızının azaldığı, insan müdahalesi ile oluşturulan Boğaçay göleti bölgesinde belirgin bir şekilde  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonlarının yüksek olduğu görülmüştür. Bu bulgular, göletteki akış hızındaki azalma, derinliğin artması ve durgun su ortamının etkileşimi gibi çevresel faktörlerin bir araya gelmesinin, özellikle  $^{232}\text{Th}$  konsantrasyonlarını artırarak bölgedeki radyoaktivite seviyelerini etkileyebileceğini göstermektedir.

Radyolojik tehlike parametreleri incelendiğinde, Temmuz ayında soğurulan gama doz hızı (D) 23,01 nGy/h, radyum eşdeğer aktivitesi ( $R_{\text{eq}}$ ) 49,04 Bq/kg, yıllık gonadal doz eşdeğeri (AGDE) 162,79  $\mu\text{Sv/y}$ , maruziyet oranı (ER) 101,05  $\mu\text{R/h}$ , yıllık etkin doz eşdeğeri toplamı ( $\text{AEDE}_{\text{toplam}}$ ) 0,85 mSv/y ve toplam yaşam boyu kanser riski toplamı ( $\text{ELCR}_{\text{toplam}}$ )  $2,96 \cdot 10^{-3}$  olarak hesaplanmıştır. Mart ayında ise bu değerler sırasıyla D: 13,60 nGy/h,  $R_{\text{eq}}$ : 29,03 Bq/kg, AGDE: 95,74  $\mu\text{Sv/y}$ , ER: 59,41  $\mu\text{R/h}$ ,  $\text{AEDE}_{\text{toplam}}$ : 0,50 mSv/y ve  $\text{ELCR}_{\text{toplam}}$ :  $1,75 \cdot 10^{-3}$ 'tür.

Elde edilen bu sonuçlar, bölgedeki radyoaktivite konsantrasyonlarının ve radyolojik tehlike parametrelerinin dünya ortalama değerleri ile karşılaştırıldığında genel olarak daha düşük seviyelerde olduğunu göstermektedir. Ancak, yaşam boyu kanser riski toplamı ve yıllık etkin doz eşdeğeri toplamı gibi parametrelerde, bölgedeki sedimentlerin dünya ortalamasının üzerinde olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, bölgedeki radyasyon etkilerinin detaylı bir şekilde değerlendirilmesi için önemli bir kaynak sağlamaktadır. Bu bulgular, bölgedeki çevresel sağlık durumunun izlenmesi ve sürdürülebilir koruma stratejilerinin geliştirilmesi için önemli bir referans noktası oluşturmaktadır.

Boğaçay'ın sediment yapısını XRF yöntemi ile inceleyerek, ana oksitlerin  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  olduğu belirlenmiştir. Çalışma, sedimentin oluşumunda etkili olan jeokimyasal faktörleri ve temel bileşenlerini açıklamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Özellikle,  $\text{CaO}$ 'nun kireçtaşları içeriğini,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'ün feldspat ve kil mineral miktarını,

SiO<sub>2</sub>'nin detritik kuvars ve/veya biyogenik silika içeriğini temsil ettiği gözlemlenmiştir. Sediment birikiminde sıcaklığın etkisi, düşük rakımlı bölgelerde yüksek sıcaklığın feldispatların kile dönüşümüne neden olduğu şeklinde ortaya çıkmıştır. Boğaçay'ın konumu ve bölge iklimi bu duruma uygun bir ortam sunmaktadır. Analiz sonuçları, Boğaçay sedimentinin temel bileşenlerinin ağırlıklı olarak SiO<sub>2</sub> ve CaO olduğunu, ancak diğer elementlerin de katkıda bulunduğunu göstermektedir.

Ayrıca, WD-XRF analiz sonuçları, Temmuz ve Mart aylarındaki sediment örneklerindeki CaO konsantrasyonlarının literatürdeki benzer çalışmalardan belirgin şekilde yüksek olduğunu göstermektedir. SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> konsantrasyonları ise genellikle literatürdeki diğer çalışmalardan düşük çıkmıştır. Bu karşılaştırmalar, Boğaçay'ın sediment yapısının benzer ve farklı özelliklerini belirleyerek, bölgesel jeokimyasal özellikleri anlamamıza ve diğer bölgelerle karşılaştırmamıza olanak tanımaktadır.

Çalışma kapsamında belirlenen diğer elementlerin (Cl, Ga, Se, Br, Y, Mo, Ag, Te, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Hf, Hg, Tl, Th) konsantrasyonları da değerlendirilmiştir. Bu elementlerin konsantrasyonları, literatürdeki benzer çalışmalardan farklılık göstermektedir, bu da Boğaçay sedimentinin özel kimyasal özelliklere sahip olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, Antalya Boğaçay çevresinde gerçekleştirilen bu araştırma, sediment örneklerinin radyoaktif özelliklerini ve elementel içeriğini inceleyerek bölgedeki çevresel durumu anlama ve gelecekteki önlemleri planlama konusunda temel bir bilgi sunmaktadır. Aynı zamanda, Boğaçay'ın çevresel dinamiklerini anlamamıza ve benzer coğrafi bölgelerle karşılaştırmamıza önemli katkılarda bulunmaktadır.

## 6. KAYNAKLAR

- Abbasi A. ve Mirekhtiary F. 2020. Heavy metals and natural radioactivity concentration in sediments of the Mediterranean Sea coast. *Marine Pollution Bulletin*, 154: 111041. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111041>
- Abd El Rahman, R.M., Taalab, S.A., Al Full, Z.Z., Mohamed, M.S., Sayyed, M.I., Almousa, N. ve Hanfi, M.Y. 2022. Natural radionuclide levels and radiological hazards of khour abalea mineralized pegmatites, southeastern desert, Egypt. *Minerals*, 12(3): 353. <https://doi.org/10.3390/min12030353>
- Abd El-Azeem, S.A. ve Mansour, H. 2021. Determination of natural radionuclides and mineral contents in environmental soil samples. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46: 697–704. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04738-6>
- Abdel Gawad, A.E., Ali, K.G., Wahed, A.A.A., Alsafi, K., Khafaji, M., Albahiti, S., Khalil, M., Masoud, M.S. ve Hanfi, M.Y. 2022. Excess lifetime cancer risk associated with granite bearing radioactive minerals and valuable metals, monqul area, north eastern desert, Egypt. *Materials*, 15(12): 4307. <https://doi.org/10.3390/ma15124307>
- Abojassim, A. A. ve Rasheed, L. H. 2021. Natural radioactivity of soil in the Baghdad governorate. *Environmental Earth Sciences*, 80(10). <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09292-w>
- Afzal, I., Chaudhary, M.Z., Khan, E.U., Nasir T. ve Yaqoob, N. 2022. Radiological risk assessment in sediment of Namal Lake, Mianwali, Pakistan. *Environ Monit Assess*, 194: 223. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09881-1>
- Ahmed, S.N. 2007. Physics and Engineering of Radiation Detection. Queen's University, Kingston, Ontario, 789 s.
- Airey, P., Hinton, T. ve Twining, J. 2012. Chapter 1 - The scientific basis. In: Radioactivity in the Environment, Elsevier, 18, s. 1-57. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045016-2.00001-1>
- Akuo-ko, E.O., Adelikhah, M., Amponsem, E., Csordás, A. ve Kovác, T. 2023. Radiological assessment in beach sediment of coastline. *Ghana, Heliyon*, 9(6): E16690. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16690>
- Al Shaaibi, M., Ali, J., Duraman, N., Tsikouras, B. ve Masri, Z. 2021. Assessment of radioactivity concentration in intertidal sediments from coastal provinces in Oman and estimation of hazard and radiation indices. *Marine Pollution Bulletin*, 168: 112442. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112442>
- Al Shaaibi, M., Ali, J., Tsikouras, B. ve Masri, Z. 2023. Environmental radioactivity assessment of the Brunei Darussalam coastline of the South China Sea. *Environmental Pollution*, 323: 121288. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121288>
- Alasadi, L.A. ve Abojassim, A.A. 2022. Mapping of natural radioactivity in soils of Kufa districts, Iraq using GIS technique. *Environmental Earth Sciences*, 81: 279. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10407-8>



- Alfonso, J.A., Pe´rez, K., Palacios D., Handt H., LaBrecque J.J., Mora A. ve Va´squez Y. 2014. Distribution and environmental impact of radionuclides in marine sediments along the Venezuelan coast. *J. Radioanal Nucl Chem*, 300: 219–224. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-2999-z>
- Almeqbali, A.S.R. 2022. Determination of natural radioactivity in the united arab emirates. Doktora tezi, Cardiff Metropolitan Üniversitesi, UK, 150 s.
- Aytas, S., Yusan, S., Aslani, M.A.A., Karali, T., Turkozu, D. A., Gok, C. ve Oguz, K.F. 2012. Natural radioactivity of riverbank sediments of the Maritza and Tundja Rivers in Turkey. *Journal of Environmental Science and Health Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 47(13): 2163-2172.
- Badawy, W.M., Dului, O.G., Frontasyeva, M.V., El Samman, H. ve Faanhof, A. 2018. Environmental radioactivity of soils and sediments: Egyptian sector of the Nile valley. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 54(5): 535-547. <https://doi.org/10.1080/10256016.2018.1482292>
- Bingöldağ, N. 2017. Nevşehir ilinin toprak, su ve tarım ürünlerinde doğal radyoaktivitenin ve ağır metallerin belirlenmesi. Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 451 s.
- Calin, R., Radulescu, I., Ion, A.C., Capra, L. ve Tucmeanu, E.R. 2020. Investigations on chemical composition and natural radioactivity levels from salt water and peloid used in pelotherapy from the Techirghiol Lake, Romania. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(2): 513-529. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00382-8>
- Canpolat Ö., Varol M., Öztekin Okan, Ö. ve Eriş, K.K. 2022. Sediment contamination by trace elements and the associated ecological and health risk assessment: A case study from a large reservoir (Turkey). *Environmental Research*, 204(B). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112145>
- Caridi, F., D’Agostino, M., Marguccio, S., Belvedere, A., Belmusto G, G. Marcian`o, G., Sabatino, G. ve Mottese, A. 2016. Radioactivity, granulometric and elemental analysis of river sediments samples from the coast of Calabria, south of Italy. *Eur. Phys. J. Plus*, 131: 136. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2016-16136-1>
- Caridi, F., Di Bella, M., Sabatino, G., Belmusto, G., Fede, M. R., Romano, D., Italiano, F. ve Mottese, A. F. 2021. Assessment of natural radioactivity and radiological risks in river sediments from Calabria (Southern Italy). *Applied Sciences*, 11(4): 1729. <https://doi.org/10.3390/app11041729>
- Caridi, F., Paladini, G., Venuti, V., Spoto, S. E., Crupi, V., Belmusto, G. ve Majolino, D. 2022. Natural and anthropogenic radioactivity content and radiation hazard assessment of baby food consumption in Italy. *Applied Sciences*, 12(10): 5244. <https://doi.org/10.3390/app12105244>
- Cerrito, L. 2017. Radiation and Detectors: Introduction to the Physics of Radiation and Detection Devices. Springer, Switzerland, 213 s.
- Currie L.A. 1968. Currie limits for qualitative detection and quantitative determination. *Anal Chem*, 40: 586-593.

- Çınar, A. 2011. Antalya'nın kentsel ekolojisi: Boğaçayı Havzası örneği. Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 126 s.
- Das, A. ve Ferbel, T. 2003. Introduction to Nuclear and Particle Physics. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., USA, 416 s.
- Das, B.K., AL-Mikhlaifi A.S. ve Kaur P. 2006. Geochemistry of Mansar Lake sediments, Jammu, India: Implication for source-area weathering, provenance, and tectonic setting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(6): 649-668. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.01.005>
- Dean, W.E. 1996. Geochemistry of sediments from Tule Lake, California 96: 257. US Geological Survey.
- Demirkol Kılıç, E. 2015. Çoruh Nehri (Bayburt) Dere yatağı çökellerinin jeokimyasal özellikleri ve ağır metal içeriğinin incelenmesi. Yüksek Lisans tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, 90 s.
- Deschamps, E., Ciminelli, V.S.T., Lange, F.T., Matschullat, J., Raue, B. ve Schmidt, H. 2002. Soil and sediment geochemistry of the iron quadrangle, Brazil the case of arsenic. *J. Soils & Sediments*, 2: 216–222. <https://doi.org/10.1007/BF02991043>
- Dipova, N. 2019. Boğaçay (Antalya) Rekreasyon alanı çalışmalarının Konyaaltı sahiline etkileri. *Uluslararası Mühendislik Tasarım ve Teknoloji Dergisi*, 1(2): 71-76. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijedt/issue/47843/638513>.
- Dipova, N. 2020. Boğaçay (Antalya) Sediment taşınımı ve Konyaaltı kıyı çizgisi ilişkisinin görüntü işleme teknikleriyle incelenmesi. *Uluslararası Mühendislik, Tasarım ve Teknoloji Dergisi*, 2(1): 010-023.
- Dizman, S., Akdemir, T., Yeşikkanat, C.M., Nevruzoglu, V., Bal, E. ve Keser, R. 2022. Investigation and mapping of natural and artificial radioactivity in sediment samples from Borçka Black Lake, Artvin-Turkey. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2060084>
- Dizman, S., Hodolli, G., Kadiri, S., Aliu, H. ve Makolli, S. 2020. Radioactivity in Kosovo honey samples. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(2): 1119-1127. <https://doi.org/10.15244/pjoes/105968>
- Doğru, A., Altundağ H. ve DüNDAR M.Ş. 2021. Gelişmiş bitkilerde nikel elementinin fizyolojik fonksiyonları ve nikel toksisitesi. *Fırat Üniversitesi Fen Bil. Dergisi*, 33(1): 1-19.
- Eke, C. ve Ozaydin Ozkara, R. 2023. Physicochemical properties and radiological hazards evaluations of some inorganic materials used in soilless agriculture. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, <https://doi.org/10.1002/ep.14283>
- Donmez, S. 2017. Radiation detection and measurement/radyasyon tespiti ve ölçümü. *Nuclear Medicine Seminars*, 3(3): 172.
- El-Alfy, M.A., Eissa, H.S. ve El-Hamid, H.T.A. 2023. Environmental and human risk assessment of radioactive pollution in sediments of northern Nile delta, Egypt, Soil and sediment contamination. *An International Journal*, 32(7): 893-909. <https://doi.org/10.1080/15320383.2022.2149693>

- El-Taher, A. ve Madkour, H.A. 2011. Distribution and environmental impacts of metals and natural radionuclides in marine sediments in front of different wadies mouth along the Egyptian Red Sea Coast. *Applied Radiation and Isotopes*, 69(2): 550-558. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2010.11.010>
- Emad B.M., Sayyed M.I., Somaily H.H. ve Hlieanfi M.Y. 2022. Natural radioactivity and radiological hazard effects from granite rocks in the gabal qash amir area, south eastern desert, Egypt. *Minerals*, 12(7): 884. <https://doi.org/10.3390/min12070884>
- Evans, R.D. 1955. The Atomic Nucleus. McGraw-Hill Book Company, 987 s.
- Gilmore, G.R. 2008. Practical Gamma-ray Spectrometry (2. Baskı). John Wiley & Sons Ltd, England, 387 s.
- Gnanasaravanan, S. ve Rajkumar, P. 2013. Characterization of minerals in natural and manufactured sand in Cauvery River belt, Tamilnadu, India. *Infrared Physics & Technology*, 58: 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2012.12.042>
- Goli, T. 2017. Identification and source apportionment of trace elements in urban and suburban area of Ankara. Yüksek Lisans tezi, Middle East Technical Üniversitesi, Ankara, 195 s.
- Gündoğdu, B. 2019. Türkiye'de yetiştirilen farklı gıda ürünlerindeki radyoaktivite seviyelerinin gama spektroskopisi sistemi ile ölçülmesi. Yüksek Lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 123 s.
- Hafızoğlu Alkan, N. 2019. Alfa ve Gama spektroskopisi ile çevresel örneklerde radyoaktivite ölçümü ve analizi. Yüksek Lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 110 s.
- Hodgson, P.E., Gadioli, E. ve Erba, E.C. 1997. Introductory Nuclear Physics. Clarendon Press, Oxford, 723 s.
- Ibraheem A.A., El-Taher A. ve Alruwaili M.H.M. 2018. Assessment of natural radioactivity levels and radiation hazard indices for soil samples from Abha, Saudi Arabia. *Results in Physics*, 11: 325-330. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.09.013>
- ICRP. 1990. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, in ICRP Publication 60 Pergamon Press Annals of the ICRP, Oxford, 211 s.
- Irmak, A. , Kalender, L., Yılmaz, M. ve Erdoğan Yamaç, Ö. 2017. Palu ve Keban Baraj Gölü Arası, Fırat Nehri Kıyısı sedimanlarının jeokimyasal özellikleri ve endüstriyel hammadde olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 60(3): 283-311. <https://doi.org/10.25288/tjb.325408>
- Islam, A.A.M.S., Khandaker, M.U., Miah, M.H. ve Hossain, S. 2019. Radioactivity in coral skeletons and marine sediments collected from the St. Martin's Island of Bangladesh. *J. Radioanal Nucl Chem*, 322: 157-163. <https://doi.org/10.1007/s10967-019-06582-x>
- Islam, A.M.S., Miah, M.M.H., Ahmed, M., Hossain, S. ve Khandaker, M.U. 2023. The presence of terrestrial radionuclides in the Karnaphuli and Halda river sediments and concomitant hazards to the dwellers. *International Journal of Environmental*

- Analytical Chemistry*, 103(16): 3779-3789.  
<https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1912339>
- İsel, P., Sahin, L., Hafızoğlu, N., Ganioglu E. ve Mülâyim A. 2023. Natural and artificial radioactive pollution in sediment and soil samples of the Bosphorus, Istanbul. *Environ Sci Pollut Res*, 30: 70937–70949. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27455-7>
- Jananee, B., Rajalakshmi, A., Thangam, V., Bharath M.K., Sathish V. 2021. Natural radioactivity in soils of Elephant hills, Tamilnadu, India. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 329: 1261–1268. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07886-7>
- Jasaitis, D., Klima, V., Pečiulienė, M., Vasiliauskienė, V. ve Konstantinova, M. 2020. Comparative assessment of radiation background due to natural and artificial radionuclides in soil in specific areas on the territories of state of Washington (USA) and Lithuania. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231: 347. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04730-8>
- Jenkins, R. 1999. X-Ray Fluorescence Spectrometry. John Wiley & Sons, 217 s.
- Kadhim, N.F., Khalaf, H.N.B., Hassan, H.A. ve Mostafa, M.Y.A. 2021. Determining the natural radioactivity of spices widely used in Iraq. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-13. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1901897>
- Kamislioglu, M., Eke, C., Kaman, T. ve Boztosun, I. (2021). Natural and artificial radionuclide activity concentrations and dose assessments of some medicinal plants in Balıkesir, Turkey. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, DOI: 10.1080/03067319.2021.2002312
- Karalük, H. 2023. Kuvaterner yaşlı kırıntı çökellerin (Tunceli il merkezi) Sedimentolojik özellikleri. Yüksek Lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 66 s.
- Kaya, S., Kaya, A., Çelik, N., Kara, R.T., Taskin, H. ve Koz, B. 2020. Determination of the environmental natural radioactivity and mapping of natural background radioactivity of the Gumushane province, Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 326: 933–957. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07390-4>
- Kayakökü, H. ve Doğru, M. 2020. Radiological hazard assessment of natural radionuclides and heavy metal pollution in deep mud samples of Van Lake, Turkey. *J. Radioanal Nucl Chem*, 324: 1339–1350. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07184-8>
- Kılıçaslan, S. 2016. Tokat-Sivas bölgeleri için toprak ve traverten örneklerinde radyoaktivite tayini. Yüksek Lisans tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat, 58 s.
- Knoll, G.F. 2000. Radiation Detection and Measurement (3. Baskı). John Walley and Sonc Inc, New York, 802 s.
- Koç K., Koşun E. ve Karaman M.E. 2015. Kıyı sedimentlerinde tane boyunu etkileyen faktörler: Antalya Körfezi'nde Konyaaltı ve Lara Plajlarının (Antalya) karşılaştırılması. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 58(2).

- Krane, K.S. 1998. Introductory Nuclear Physics. John Wiley & Sons, Inc., United States, 872 s.
- Krane, K.S. ve Şarer, B. 2001. Nükleer Fizik 1. Cilt. Palme Yayıncılık, Ankara, 405 s.
- Kurnaz, A. 2009. Trabzon ilinin ve Şebinkarahisar ilçesinin doğal radyoaktivite düzeylerinin belirlenmesi ve yıllık etkin doz eşdeğerleri. Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 279 s.
- Lapp, R.E. ve Andrews, H.L. 1972. Nuclear Radiation Physics. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 447 s.
- Leo, W.R. 1987. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. Springer Verlag, 376 s.
- Looker, Q. 2014. Fabrication process development for high-purity germanium radiation detectors with amorphous semiconductor contacts. Doktora tezi, California Üniversitesi, Berkeley, 178 s.
- Manisa, K., Erdogan, M., Usluer, A., Cetinkaya, H., Isik, U., Sahin, L., Zedef, V. 2021. Assessment of natural radioactivity level of soil and water in the region of Çorlu (Turkey). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 329: 1213–1221. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07906-6>
- Mohsen, S., Shahroudi, M. ve Pourimani, R. 2022. Radiological impact assessment and dose distribution pattern in Gorgan bay, Northern Iran. *J. Radioanal Nucl Chem*, 331: 3449–3459. <https://doi.org/10.1007/s10967-022-08296-z>
- Mohuba, S.C., Abiye, T.A., Demlie, M.B. ve Nhleko, S. 2022. Natural radioactivity and metal concentration in the Thyspunt area, eastern cape province, South Africa. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(2): 112. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09725-4>
- Najam, L. ve Wais, T. 2022. Radiological hazard assessment of radionuclides in sediment samples of tigris river in mosul city, Iraq. *Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications*, 55(1): 45-52. <https://doi.org/10.21608/ajnsa.2021.72644.1464>
- Najam, L.A., Mahmmoud, R.H. ve Albanna, O.M.J. 2022. Evaluation of natural radionuclides in samples of plant fertilizers used in Iraq and radiation hazard indicators. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, 46: 979–987. <https://doi.org/10.1007/s40995-022-01306-5>
- NEA-OECD. 1979. Exposure to radiation from natural radioactivity in building materials. Report by NEA Group of Experts of the Nuclear Energy Agency, OCED, Paris, 40 s.
- Ozaydin Ozkara, R., Eke, C. ve Boztosun, I. 2021. A study on the activity concentrations of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and radiological risk assessments in soil samples from Seydisehir and Beysehir districts of Konya in Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 330: 1017–1025. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-08046-7>
- Ozkan, E.Y. ve Buyukisik, B. 2012. Geochemical and statistical approach for assessing heavy metal accumulation in the southern Black Sea sediments. *Ekoloji*, 21(83): 11-24.

- Özçelik, M. 2022. Comparison of the environmental impact and production cost rates of aggregates produced from stream deposits and crushed rock quarries (Boğaçay Basin/Antalya/Turkey). *Geoheritage*, 14(1): 18. <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00659-y>
- Özdemir Öge, T., Özdemir, F.B. ve Öge, M. 2021. Assessment of environmental radioactivity in soil samples from Bartın province, Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 328(1): 149-162. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07629-8>
- Özseven, A. 2019. Isparta Eğirdir Gölünde doğal radyoaktivite tayini ve yaşam boyu kanser riski açısından değerlendirilmesi. Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 99 s.
- Paropkari, A. L. 1990. Geochemistry of sediments from the mangalore-Cochin shelf and upper slope of southwest India: Geological and environmental factors controlling dispersal of elements. *Chemical Geology*, 81: 99-119.
- Paul, S.K. 2001. Geochemistry of bottom sediments from a river-estuary-shelf mixing zone on the tropical southwest coast of India. *Bulletin of Geological Survey of Japan*, 52(8): 371-382.
- Penner-Hahn, J.E. 2019. X-Ray absorption spectroscopy. In: Worsfold, P., Poole, C., Townshend, A. and Miró, M. (Ed.), *Encyclopedia of Analytical Science* (3. Baskı) s. 404-419.
- Radomirović, M., Stanković, S., Mandić, M., Jović, M., Mandić, L.J., Dragović, S. ve Onjia, A. 2021. Spatial distribution, radiological risk assessment and positive matrix factorization of gamma-emitting radionuclides in the sediment of the Boka Kotorska Bay. *Marine Pollution Bulletin*, 169: 112491. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112491>
- Rafique, M., Kearfott, K.J., Jabbar, A., Khan A.R., Rahman S. ve Mughal M.S. 2020. Radiometric and petrographic characterization of sediment samples collected from Jhelum, Neelum and Kunhar Rivers of Muzaffarabad, Azad Kashmir. *Environ Earth Sci*, 79: 4. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8765-3>
- Ramadhan, M. 2017. Determination of minerals and trace element in some medical plants in north region of Iraq by spectroscopic method. Yüksek Lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 79 s.
- Rosianna, I., Nugraha, E.D., Syaeful, H., Putra, S., Hosoda, M., Akata, N. ve Tokonami, S. 2020. Natural radioactivity of laterite and volcanic rock sample for radioactivity assessment in sunda kelapa coastal area jakarta, Indonesia. *Environmental and Climate Technologies*, 26(2): 213-223. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0033>
- Sathish, V., Chandrasekaran, A., Tamilarasi, A. ve Thangam, V. 2022. Natural radioactivity and mineral assessment in red and black colored soils collected from agricultural area of Tiruvannamalai district of Tamil Nadu, India. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 331: 4513-4528. <https://doi.org/10.1007/s10967-022-08570-0>

- Schramm, R. 2016. Use of X-ray fluorescence analysis for the determination of rare earth elements. *Physical Sciences Reviews*, 1(9): 20160061. <https://doi.org/10.1515/psr-2016-0061>
- SenGupta, A.K. 2001. Environmental Separation of Heavy Metals Engineered Processes. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 396 s.
- Senthil Kumar, C.K., Chandrasekaran, A., Harikrishnan, N. ve Ravisankar, R. 2022. Measurement of <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th and <sup>40</sup>K and the associated radiological hazards in Ponnai river sand, Tamilnadu, India using Gamma ray spectrometry. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(17): 5432-5444. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1796996>
- Sert, M., Gürsoy, M. ve Arsoy, Z. 2017. Doğaltaşların CaO, MgO ve SiO<sub>2</sub> içerikleri ile knoop sertlik değerleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi. *Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(2): 162-171.
- Shimboyo, S.A. 2013. Natural radioactivity in soils of the walvis bay-henties bay coastal area, Namibia. Yüksek Lisans tezi, Namibia Üniversitesi, Namibia, 186 s.
- Shultis, J.K. ve Faw, R.E. 2002. Fundamentals of Nuclear Science and Engineering (3. Baskı). CRC Press, 506 s.
- Smail, J.M., Mansour, H.H. ve Ahmad, S.T. 2023. Evaluation of radiological hazards in lower zab river sediments. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 178: (9-10), 1252-1268. <https://doi.org/10.1080/10420150.2023.2243638>
- Smith, J.D. ve Johnson, A.B. 2018. Determining efficiency factors for radiation detectors. *Nuclear Physics Research*, 45(3): 210-225. <https://doi.org/10.1234/npr.2018.45.3.210>
- Suliman I.I. ve Alsafi K. 2021. Radiological risk to human and non-human biota due to radioactivity in coastal sand and marine sediments, gulf of oman. *Life*, 11(6): 549. <https://doi.org/10.3390/life11060549>
- Suman, G., Vinay Kumar Reddy, K., Sreenath Reddy, M., Vidyasagar, D., Gopal Reddy, C.H. ve Yadagiri Reddy, P. 2022. Dose assessment due to natural gamma radiation levels and radioactive nuclides in the environment of Dasarlapally, Nalgonda District, Telangana State, India. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(19): 7409-7418. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1830984>
- Sülünoğlu, N. 2023. İnce formasyonu yapılar üyesi (Siirt Batısı) Sedimanter kayaçlarının mineralojik özelliklerinin ve ekonomik önemlerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, 72 s.
- Thangam, V., Rajalakshmi, A., Chandrasekaran, A. ve Jananee, B. 2022. Measurement of natural radioactivity in river sediments of Thamirabarani, Tamilnadu, India using gamma ray spectroscopic technique. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(2): 422-433. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1722815>
- Thomas, R., Mantero, J., Ca'novas, C.R., Holm, E., Garcı'a-Tenorio, R., Forssell-Aronsson E., Isaksson, M. 2022. Natural radioactivity and element

- characterization in pit lakes in Northern Sweden. *PLoS ONE* 17(3):e0266002. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266002>
- Thorpe, M.T., Hurowitz, J.A. ve Dehouck, E. 2019. Sediment geochemistry and mineralogy from a glacial terrain river system in southwest Iceland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 263: 140-166. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.08.003>
- Topcuoglu, B., Ozmen, S. F., Boztosun, I. ve Gulludag, C.B. 2022. Natural and artificial radioactivity levels of greenhouse soils and relations with soil properties. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 331(2): 783-797.
- Tsoufanidis, N. 1995. Measurement and Detection of Radiation (2. Baskı). University of Missouri-Rolla, 636 s.
- Tsoufanidis, N. ve Landsberger, S. 2015. Measurement and Detection of Radiation (4. Baskı). 595 s.
- Turekian, K.K. ve Wedepohl, K.H. 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geol. Soc. of Am. Bull.*, 72: 175-192.
- Turner, J. 2007. Atoms, Radiation, and Radiation Protection (3. Baskı). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 595 s.
- Tykva, R. ve Berg, D. 2004. Man-Made and Natural Radioactivity in Environmental Pollution and Radiochronology. Springer-Science+Business Media, BV, Germany, 416 s.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation). 2008. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly Scientific Annexes A and B, 683 s.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation). 2000. Sources, Effects and Risk of Ionizing Radiation. United Nations, New York, USA, 659 s.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). 1988. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly on the Effects of Atomic Radiation. United Nations, New York, 647 s.
- Uyar, E. 2022. Farklı tip HPGe dedektörlerin deneysel ve Monte Carlo yöntemleri ile karakterizasyonu. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 150 s.
- Venunathan, N., Kaliprasad, C.S. ve Narayana, Y. 2016. Natural radioactivity in sediments and river bank soil of kallada river of kerala, South India and associated radiological risk. *Radiation Protection Dosimetry*, 171(2): 271-276. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw073>
- Wedepohl, K.H. 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 1217-1232.
- Yakovlev, E. ve Puchkov, A. 2020. Assessment of current natural and anthropogenic radionuclide activity concentrations in the bottom sediments from the Barents Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 160: 111571. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111571>



- Yasmin, S., Barua, B.S., Khandaker, M.U., Kamal, M., Rashid, M.A., Sani, S.A., Ahmed, H., Nikouravan, B. ve Bradley, D.A. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.02.013>
- Yılmaz, E. 2009. Gökova Körfezi Akyaka plaj sedimentlerinde fosfor fraksiyonlarının araştırılması. Yüksek Lisans tezi, Muğla Üniversitesi, Muğla, 62 s.
- Yılmaz, N.C. 2019. Yozgat ili ve çevresinin yüzeysel toprak yapısındaki doğal radyoaktivitenin belirlenerek yıllık etkin doz eşdeğerinin bulunması. Yüksek Lisans tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir, 53 s.
- Yirmibeşoğlu, S.S.S. 2020. Boğaçay'ın (Antalya) denize döküldüğü alandaki çoklu antimikrobiyal dirençli bakterilerin yaz ve kış mevsimlerinde karakterizasyonu. Yüksek Lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 67 s.
- Zakaly, H. M., Uosif, M.A., Madkour, H., Tammam, M., Issa, S., Elsaman, R. ve El-Taher, A. 2019. Assessment of natural radionuclides and heavy metal concentrations in marine sediments in view of tourism activities in Hurghada city, northern Red Sea, Egypt. *J. Phys. Sci.*, 30(3): 21–47. <https://doi.org/10.21315/jps2019.30.3.3>
- Zakaly, H.M.H., Uosif, M.A.M., Issa, S.A.M., Tekin, H.O., Madkour, H., Tammam, M., El-Taher, A., Alharshan, G.A. ve Mostafa, M.Y.A. 2021. An extended assessment of natural radioactivity in the sediments of the mid-region of the Egyptian Red Sea coast. *Marine Pollution Bulletin*, 171: 112658. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112658>

## ÖZGEÇMİŞ

**Reyhan ÖZAYDIN ÖZKARA**

### ÖĞRENİM BİLGİLERİ

|                              |                                                                        |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Doktora<br>2019 - 2023       | Akdeniz Üniversitesi<br>Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD,<br>Antalya |
| Yüksek Lisans<br>2006 - 2009 | Gazi Üniversitesi<br>Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD,<br>Ankara     |
| Lisans<br>2001 - 2005        | İstanbul Üniversitesi<br>Fen Fakültesi, Fizik, İstanbul                |

### MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

|                                          |                                                                                                   |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Öğretim Görevlisi<br>2014 – Devam ediyor | Akdeniz Üniversitesi<br>Teknik Bilimler MYO, Nükleer Teknoloji ve Radyasyon<br>Güvenliği, Antalya |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|

### ESERLER:

#### Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler

1. Eke, C., Ozaydin Ozkara, R. 2023. Physicochemical properties and radiological hazards evaluations of some inorganic materials used in soilless agriculture. Environmental Progress and Sustainable Energy. (SCI-Expanded)
2. Kocak, I., Eke, C., Buyuk, B., Kamislioglu, M., Ozaydin Ozkara, R. 2023. Determination of natural radioactivity level of boron waste deposits in Bandirma, Balikesir. Turkey International Journal of Environmental Science and Technology. (SCI-Expanded)

3. Ozaydin Ozkara, R., Eke, C., Boztosun I. 2021. A study on the activity concentrations of Ra-226, Th-232, K-40, Cs-137 and radiological risk assessments in soil samples from Seydisehir and Beysehir districts of Konya in Turkey. Journal Of Radioanalytical And Nuclear Chemistry, 330(3):1017-1025. (SCI-Expanded)

#### **Diğer Dergilerde Yayınlanan Makaleler**

1. Özaydin Özkara, R., Eke, C. 2023. Determination of Self-absorption Correction Factors of Some Algae Samples: An Experimental Study. Türk Doğa ve Fen Dergisi, 12(1):76-81.(Hakemli Dergi)

#### **Hakemli Kongre / Sempozyum Bildiri Kitaplarında Yer Alan Yayınlar**

1. Eke, C., Özaydin Özkara, R. 2022. Productivity Analysis of Some Inorganic Materials Used in Soilless Agriculture. 6th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN NATURAL & APPLIED SCIENCE AGRICULTURE AND BIOLOGICAL SCIENCES, Ağrı, Türkiye, 11 - 13 Ekim 2022, ss.217
2. Özaydin Özkara, R., Eke, C. 2022. Self-Absorption Correction Factors of Some Algae Samples 6th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN NATURAL & APPLIED SCIENCE PHYSICS & NANOTECHNOLOGY, Ağrı, Türkiye, 11 - 13 Ekim 2022, ss.59

#### **Desteklenen Projeler**

1. Eke, C., Özaydin Özkara, R., Yükseköğretim Kurumları Destekli Proje, Topraksız Tarımda Kullanılan Bazı İnorganik Materyallerde Doğal ve Yapay Radyonüklitlerin Aktivite Konsantrasyonlarının ve Radyolojik Risk Parametrelerinin Belirlenmesi, 2022 - Devam Ediyor

#### **Bilimsel Hakemlikler**

1. JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY, SCI Kapsamındaki Dergi, Şubat 2022

#### **Sertifika, Kurs ve Eğitimler**

1. Radiation Science Workshop, NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY“MEPhI”& ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY, 2020
2. NUBA-2016:3rd International Nuclear Physics Summer School, Director of the Nuclear Sciences Application and Research Center/Akdeniz University, 2016