

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**HPGe DEDEKTÖRLÜ GAMA SPEKTROMETRİK ANALİZ İLE ÇİMENTO  
MALZEMELERİNDE DOĞAL RADYOAKTİVİTENİN BELİRLENMESİ VE  
ÖZ SOĞURMA DÜZELTMESİNİN UYGULANMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Burak ORUÇ**

**Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı**

**Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı**

**OCAK 2026**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**HPGe DEDEKTÖRLÜ GAMA SPEKTROMETRİK ANALİZ İLE ÇİMENTO  
MALZEMELERİNDE DOĞAL RADYOAKTİVİTENİN BELİRLENMESİ VE  
ÖZ SOĞURMA DÜZELTMESİNİN UYGULANMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Burak ORUÇ  
(302171006)**

**Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı**

**Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ayşe Nur ESEN**

**OCAK 2026**



**ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL**

**DETERMINATION OF NATURAL RADIOACTIVITY IN CEMENT  
MATERIALS BY HPGe GAMMA-RAY SPECTROMETRY WITH SELF-  
ATTENUATION CORRECTION**

**M.Sc. THESIS**

**Burak ORUÇ  
(302171006)**

**Nuclear Researches Division**

**Radiation Science and Technology Programme**

**Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ayşe Nur Esen**

**JANUARY 2026**



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 302171006 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Burak ORUÇ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “HPGe Dedektörlü Gama Spektrometrik Analiz ile Çimento Malzemelerinde Doğal Radyoaktivitenin Belirlenmesi ve Öz Soğurma Düzeltmesinin Uygulanması” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Doç. Dr. Ayşe Nur ESEN** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Nesrin ALTINSOY** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Ayşe DURUSOY** .....  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi**            : 02.01.2026  
**Savunma Tarihi**        : 16.01.2026





*Eşime,*



## ÖNSÖZ

Çalışmanın her aşamasında bilgi, deneyim ve değerli yönlendirmeleriyle bana yol gösteren, akademik katkıları ve destekleri için tez danışmanım Doç. Dr. Ayşe Nur ESEN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince deneysel süreçlerdeki katkı ve desteklerinden dolayı Araştırma Görevlisi Erdi ŞİRİN, Araştırma Görevlisi Deniz Agehan KAHRAMAN ve Doç. Dr. Esra UYAR'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 124F493 numaralı “Yüksek Saflıkta Germanyum Dedektörün Deneysel ve Monte Carlo Simülasyon Yöntemleri ile Karakterizasyonu ve Radyoaktivite Ölçümlerine Uygulanması” başlıklı proje kapsamında desteklenmiş olup, TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, eğitim hayatım boyunca ve bu tez çalışmasının her aşamasında sabrı, anlayışı ve manevi desteğiyle daima yanımda olan sevgili eşim Merve Nur ORUÇ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2026

Burak ORUÇ  
(Çevre Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖNSÖZ .....                                                                      | ix        |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                | xi        |
| KISALTMALAR .....                                                                | xiii      |
| SEMBOLLER .....                                                                  | xv        |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                                                            | xvii      |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                                              | xix       |
| ÖZET .....                                                                       | xxi       |
| SUMMARY .....                                                                    | xxiii     |
| <b>1. GİRİŞ</b> .....                                                            | <b>1</b>  |
| 1.1 Literatür Taraması .....                                                     | 3         |
| 1.2 Tezin Amacı .....                                                            | 8         |
| <b>2. TEORİK BİLGİLER</b> .....                                                  | <b>9</b>  |
| 2.1 Radyasyon ve Radyoaktivite .....                                             | 9         |
| 2.2 Doğal Radyasyon .....                                                        | 10        |
| 2.3 Gama Spektrometrik Yöntem .....                                              | 14        |
| 2.4 Fotopik Verimi Hesabı .....                                                  | 18        |
| 2.5 Radyoaktivite Hesabı .....                                                   | 20        |
| 2.5.1 Öz soğurma faktörü .....                                                   | 21        |
| 2.5.1.1 Öz soğurma faktörünün hesaplanması .....                                 | 22        |
| 2.5.1.2 Öz soğurma faktörünün deneysel olarak belirlenmesi .....                 | 22        |
| 2.6 Ölçülebilir En Küçük Aktivite .....                                          | 23        |
| 2.7 Ölçüm Belirsizliği Hesabı .....                                              | 24        |
| 2.8 Radyum Eşdeğer Aktivitesi ve Aktivite Konsantrasyon İndisi .....             | 25        |
| <b>3. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....                                               | <b>27</b> |
| 3.1 Çimento Örnekleri .....                                                      | 27        |
| 3.2 Standart Nokta Gama Kaynakları .....                                         | 29        |
| 3.3 Referans Malzemeler .....                                                    | 30        |
| 3.4 Gama Spektrometresi .....                                                    | 32        |
| 3.5 Öz Soğurma Faktörlerinin Belirlenmesi .....                                  | 33        |
| 3.6 Enerji Kalibrasyonu .....                                                    | 34        |
| 3.7 Art Alan Spektrumunun Ölçümü .....                                           | 35        |
| 3.8 Verim Kalibrasyonu .....                                                     | 36        |
| 3.9 Radyoaktivite Ölçümü .....                                                   | 38        |
| <b>4. BULGULAR</b> .....                                                         | <b>41</b> |
| 4.1 Çimento Örneklerinin Kimyasal Kompozisyonu .....                             | 41        |
| 4.1.1 Çimento örneklerinin öz soğurma faktörleri .....                           | 44        |
| 4.2 IAEA-447 Yosun/Toprak Referans Malzemesinin Aktivite Konsantrasyonları ..... | 49        |
| 4.3 Çimento Örneklerinin Aktivite Konsantrasyonları .....                        | 50        |
| 4.4 Literatür Karşılaştırması .....                                              | 58        |

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| <b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b> | <b>61</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>            | <b>63</b> |
| <b>EKLER .....</b>               | <b>67</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>            | <b>71</b> |



## KISALTMALAR

|                   |                                                                                                         |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <sup>228</sup> Ac | : Aktinyum-228                                                                                          |
| <sup>241</sup> Am | : Amerikyum-241                                                                                         |
| <sup>133</sup> Ba | : Baryum-133                                                                                            |
| <sup>214</sup> Bi | : Bizmut-214                                                                                            |
| <sup>57</sup> Co  | : Kobalt-57                                                                                             |
| <sup>60</sup> Co  | : Kobalt-60                                                                                             |
| <sup>137</sup> Cs | : Sezyum-137                                                                                            |
| <sup>152</sup> Eu | : Evropiyum-152                                                                                         |
| GÜTMAM            | : Gazi Üniversitesi Temel ve Mühendislik Bilimleri Merkez<br>Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi |
| HPGe              | : Yüksek saflıkta germanyum ( <i>High Purity Germanium</i> )                                            |
| <sup>40</sup> K   | : Potasyum-40                                                                                           |
| MCA               | : Çok kanallı analizör                                                                                  |
| MDA               | : Ölçülebilir en küçük aktivite                                                                         |
| <sup>54</sup> Mn  | : Mangan-54                                                                                             |
| NaI(Tl)           | : Sodyum İyodür Talyum                                                                                  |
| <sup>206</sup> Pb | : Kurşun-206                                                                                            |
| <sup>212</sup> Pb | : Kurşun-212                                                                                            |
| <sup>214</sup> Pb | : Kurşun-214                                                                                            |
| <sup>226</sup> Ra | : Radyum-226                                                                                            |
| <sup>232</sup> Th | : Toryum-232                                                                                            |
| <sup>208</sup> Tl | : Talyum-208                                                                                            |
| <sup>238</sup> U  | : Uranyum-238                                                                                           |
| UNSCEAR           | : Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi                                     |
| WD-XRF            | : Dalga Boyu Dağılımlı X-Işını Floresans                                                                |



## SEMBOLLER

|          |                                 |
|----------|---------------------------------|
| $\alpha$ | : Alfa parçacığı                |
| $\beta$  | : Beta parçacığı                |
| $\gamma$ | : Gama ışını                    |
| Bq       | : Becquerel                     |
| K        | : Kelvin                        |
| keV      | : Kilo elektron volt            |
| I        | : Aktivite konsantrasyon indisi |
| Sv       | : Sievert                       |



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|                     |                                                                                                                                                    |    |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Çizelge 3.1</b>  | : Çimento örneklerine ait bilgiler. ....                                                                                                           | 27 |
| <b>Çizelge 3.2</b>  | : Standart gama kaynaklarına ait bilgiler.....                                                                                                     | 30 |
| <b>Çizelge 3.3</b>  | : IAEA-312 toprak referans malzemesi özellikleri (IAEA, 2000). ....                                                                                | 31 |
| <b>Çizelge 3.4</b>  | : IAEA-447 yosun-toprak referans malzemesi özellikleri.....                                                                                        | 31 |
| <b>Çizelge 3.5</b>  | : HPGe dedektörün özellikleri. ....                                                                                                                | 32 |
| <b>Çizelge 3.6</b>  | : Radyoaktivitenin hesaplanmasında kullanılan gama ışını enerjileri. .                                                                             | 37 |
| <b>Çizelge 3.7</b>  | : Radyoaktivitenin hesaplanmasında kullanılan gama ışını enerjileri. .                                                                             | 39 |
| <b>Çizelge 4.1</b>  | : Çimento örneklerinin kimyasal bileşimleri (%). ....                                                                                              | 43 |
| <b>Çizelge 4.2</b>  | : Ç-1 –Ç-4 örneklerinin deneysel ve hesaplanan öz soğurma faktörleri. ....                                                                         | 45 |
| <b>Çizelge 4.3</b>  | : Ç-5 – Ç-8 örneklerinin deneysel ve hesaplanan öz soğurma faktörleri. ....                                                                        | 46 |
| <b>Çizelge 4.4</b>  | : Ç-9 – Ç-12 örneklerinin deneysel ve hesaplanan öz soğurma faktörleri. ....                                                                       | 47 |
| <b>Çizelge 4.5</b>  | : Aktivite hesaplarında kullanılan öz soğurma faktörleri. ....                                                                                     | 48 |
| <b>Çizelge 4.6</b>  | : IAEA-447 referans malzemesinin ölçülen ve sertifikalı aktivite değerleri (Bq/kg) ve belirsizlikleri (Bq/kg, k=1).....                            | 50 |
| <b>Çizelge 4.7</b>  | : Örneklere ait aktivite konsantrasyonları (Bq/kg), $R_{aeq}$ (Bq/kg) ve I indisleri ve bu değerlerin belirsizlikleri ((Bq/kg, k=1).....           | 53 |
| <b>Çizelge 4.8</b>  | : Her bir örneğin ölçülebilir en küçük aktivite değerleri (Bq/kg).....                                                                             | 54 |
| <b>Çizelge 4.9</b>  | : Pearson korelasyon analizi (*p < ,05, **p < ,01, ***p < ,001).....                                                                               | 56 |
| <b>Çizelge 4.10</b> | : Diğer ülkelerde yapılan çimento analizleri ile tez çalışmasından elde edilen çimento analizlerine ilişkin aktivite konsantrasyon değerleri. .... | 60 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|            |                                                                                                                                                                            |    |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1  | : $^{238}\text{U}$ bozunma zinciri (Gilmore, 2024).....                                                                                                                    | 11 |
| Şekil 2.2  | : $^{232}\text{Th}$ bozunma zinciri (Gilmore, 2024).....                                                                                                                   | 12 |
| Şekil 2.3  | : $^{40}\text{K}$ bozunma şeması (Henri Becquerel Ulusal Laboratuvarı, t.y.).....                                                                                          | 13 |
| Şekil 2.4  | : Seküler denge durumu (Gilmore, 2024).....                                                                                                                                | 14 |
| Şekil 2.5  | : Gama ışınlarının madde ile etkileşimini gösteren $^{137}\text{Cs}$ spektrumu (Gilmore, 2024).....                                                                        | 15 |
| Şekil 2.6  | : HPGe dedektör kapsülü (ORTEC, t.y.).....                                                                                                                                 | 16 |
| Şekil 2.7  | : Gama spektrometrisinin temel şeması (Tsoulfanidis & Landsberger, 2021).....                                                                                              | 17 |
| Şekil 2.8  | : p-tipi ve n-tipi HPGe dedektör (ORTEC, t.y.).....                                                                                                                        | 17 |
| Şekil 3.1  | : Paketlenmiş çimento örnekleri.....                                                                                                                                       | 28 |
| Şekil 3.2  | : Çimento örneklerinin kuru kütlelerinin belirlenmesi, a) tartım, b) etüvde kurutma, c) desikatörde bekletme.....                                                          | 29 |
| Şekil 3.3  | : Standart gama kaynakları kaynakları.....                                                                                                                                 | 29 |
| Şekil 3.4  | : İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Düşük Seviyeli Radyoaktivite Ölçümleri Laboratuvarı'nda bulunan p-tipi eş eksenli HPGe dedektörlü gama spektrometresi..... | 32 |
| Şekil 3.5  | : EpiXS yazılımı örnek görüntüsü (Filipin Nükleer Araştırma Enstitüsü, t.y.).....                                                                                          | 33 |
| Şekil 3.6  | : Deneysel öz soğurma faktörlerinin hesaplanmasında kullanılan ölçüm geometrisine ilişkin örnek görsel.....                                                                | 34 |
| Şekil 3.7  | : Enerji kalibrasyonu eğrisi.....                                                                                                                                          | 35 |
| Şekil 3.8  | : Art alan ölçümüne ait gama ışını spektrumu.....                                                                                                                          | 35 |
| Şekil 3.9  | : IAEA-312 analiz dosyası (300 keV'e kadar).....                                                                                                                           | 36 |
| Şekil 3.10 | : Fotopik verim kalibrasyonu eğrisi.....                                                                                                                                   | 37 |
| Şekil 3.11 | : Verim kalibrasyonu eğrisine ait katsayılar.....                                                                                                                          | 37 |
| Şekil 3.12 | : Ç-1 örneğine ait gama ışını spektrumu.....                                                                                                                               | 38 |
| Şekil 4.1  | : IAEA-447 analiz dosyası (525 keV'e kadar).....                                                                                                                           | 49 |
| Şekil 4.2  | : Ç-1 örneği analiz dosyası (327 keV'e kadar).....                                                                                                                         | 50 |
| Şekil 4.3  | : Çimento örneklerindeki $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ ve $^{40}\text{K}$ 'ın dağılımı.....                                                                        | 52 |
| Şekil 4.4  | : $^{226}\text{Ra}$ aktivite konsantrasyonu ile çimento türleri arasındaki ilişki.....                                                                                     | 55 |
| Şekil 4.5  | : $^{232}\text{Th}$ aktivite konsantrasyonu ile çimento türleri arasındaki ilişki.....                                                                                     | 55 |
| Şekil 4.6  | : $^{40}\text{K}$ aktivite konsantrasyonu ile çimento türleri arasındaki ilişki.....                                                                                       | 56 |
| Şekil 4.7  | : $^{226}\text{Ra}$ ve $^{232}\text{Th}$ aktivite konsantrasyonları arasındaki ilişki.....                                                                                 | 57 |
| Şekil 4.8  | : $^{226}\text{Ra}$ ve $^{40}\text{K}$ aktivite konsantrasyonları arasındaki ilişki.....                                                                                   | 57 |
| Şekil 4.9  | : $^{232}\text{Th}$ ve $^{40}\text{K}$ aktivite konsantrasyonları arasındaki ilişki.....                                                                                   | 58 |



# **HPGe DEDEKTÖRLÜ GAMA SPEKTROMETRİK ANALİZ İLE ÇİMENTO MALZEMELERİNDE DOĞAL RADYOAKTİVİTENİN BELİRLENMESİ VE ÖZ SOĞURMA DÜZELTMESİNİN UYGULANMASI**

## **ÖZET**

Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı bölgelerinde faaliyet gösteren üreticilerden temin edilen farklı çimento türlerinde doğal olarak bulunan radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesi ve bu çimentoların yapı malzemesi olarak kullanımına ilişkin radyolojik uygunluğunun değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında CEM I, CEM II ve CEM IV tiplerine ait toplam on iki adet çimento örneği analiz edilmiştir. Örneklerin farklı coğrafi bölgelerden seçilmesi, ulusal pazarda bulunan çimentoların radyolojik özelliklerinin temsil edici bir şekilde değerlendirilmesini amaçlamıştır. Doğal radyonüklitler olan  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'nın aktivite konsantrasyonları, yüksek çözünürlüklü gama-ışını spektrometrisi yöntemi ile belirlenmiştir.

Gama spektrometrik ölçümler, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Düşük Seviyeli Radyoaktivite Ölçümleri Laboratuvarı'nda bulunan %40 bağıl verime ve 1332 keV enerjisinde 1,8 keV çözünürlüğe sahip p-tipi eş eksenli HPGe dedektörlü bir sistem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dedektörün enerji kalibrasyonu sertifikalı  $^{152}\text{Eu}$  nokta kaynağı ile yapılmıştır. Dedektörün fotopik verimi kalibrasyonu sertifikalı IAEA-312 toprak referans malzemesi ile yapılmış, ölçüm yönteminin doğruluğu sertifikalı IAEA-447 toprak-yosun referans malzemesi kullanılarak doğrulanmıştır.

Çimento örnekleri İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Radyoaktif İzleyiciler ve Uygulamaları Laboratuvarı'nda hazırlanmıştır. Örneklerin kuru kütleleri  $105^{\circ}\text{C}$ 'de 12 saat etüvde kurutularak belirlenmiştir. Toz formunda homojen yapıda olan örnekler tartılarak silindirik plastik kaplara koyulmuştur ve radon gazının sızmasını engellemek için parafilm ile kapatılmıştır.  $^{226}\text{Ra}$  bozunma ürünleri ile kalıcı dengenin sağlanabilmesi amacıyla örnekler ölçümlerden önce en az 30 gün süreyle bekletilmiştir.

Düşük enerjili gama ışınlarında aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesinde önemli bir hata kaynağı olan öz-soğurma etkisinin düzeltilmesi amacıyla, çimento örnekleri için öz soğurma faktörleri teorik ve deneysel olmak üzere iki farklı yaklaşımla belirlenmiştir. Deneysel yöntemde sertifikalı  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  ve  $^{54}\text{Mn}$  nokta kaynakları kullanılarak 53,2 keV-1408,0 keV gama ışını enerjisi aralığında gama iletim yöntemi uygulanmıştır. Teorik yöntemde ise, gama ışını enerjileri için kütle soğurma faktörleri EPIX veri tabanı kullanılarak hesaplanmış ve Beer-Lambert yasasına göre öz soğurma faktörleri elde edilmiştir. EPIX veri tabanına girilmek üzere örneklerin kimyasal kompozisyonları Gazi Üniversitesi Temel ve Mühendislik Bilimleri Merkez Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi (GÜTMAM)'da bulunan Dalga Boyu Dağılımlı X-Işını Floresans (WD-XRF) Spektrometresi yöntemi ile belirlenmiştir. Deneysel ve teorik yöntemlerden elde edilen öz soğurma faktörlerinin birbiriyle uyumlu olduğu (fark<%10), faktörlerin 1,02 (1408,0 keV)-1,51

(53,5 keV) aralığında deęiřtięi ve öz soęurma etkisinin dūřuk enerji bōlgesinde (<200 keV) baskın olduęu ve en yōksek 53,2 keV (<sup>133</sup>Ba) gama ışıını enerjisinde gōzlendięi belirlenmiřtir. Őz soęurma dūzeltmesinin ihmal edilmesi durumunda, űzellikle dūřuk enerjili gama ışıını enerjisine sahip radyonōklitlerin aktivite konsantrasyonlarında yōksek hatalar oluřabileceęi ortaya konulmuřtur.

Çimento űrneklerinde <sup>226</sup>Ra'nın aktivite konsantrasyonu, <sup>214</sup>Pb (295,2 keV ve 351,9 keV) ve <sup>214</sup>Bi (609,3 keV ve 1120,3 keV) gama ışıını enerjilerinden hesaplanmıştır. <sup>232</sup>Th'nin aktivite konsantrasyonunun hesaplanmasında ise <sup>228</sup>Ac (338,4 keV) ve <sup>208</sup>Tl (583,2 keV), gama ışıını enerjileri kullanılmıştır. <sup>40</sup>K'ın radyoaktivitesi 1460,8 keV gama ışıını enerjisinden hesaplanmıştır. <sup>226</sup>Ra aktivite konsantrasyonları 13,1–59,9 Bq/kg, <sup>232</sup>Th aktivite konsantrasyonları 10,5–41,6 Bq/kg ve <sup>40</sup>K aktivite konsantrasyonları 72,9–338,6 Bq/kg aralığında değişmektedir. Katkılı çimentolarda (CEM II ve CEM IV) űzellikle <sup>40</sup>K ve <sup>232</sup>Th aktivite konsantrasyonlarının Portland çimentolara (CEM I) gōre daha yōksek olduğu belirlenmiştir. Çimento űrneklerinin űlçōlebilir en kōçōk aktivite (MDA) değerleri <sup>226</sup>Ra için 1,3-2,0 Bq/kg, <sup>232</sup>Th için 1,0-2,6 Bq/kg ve <sup>40</sup>K için 2,6-5,8 Bq/kg olarak űlçōlmüřtūr.

Çimento űrneklerinin radyum eřdeęer aktiviteleri ( $R_{eq}$ ) ve aktivite konsantrasyon indisleri (I) hesaplanmıř ve sonuçlar radyolojik risk açısından deęerlendirilmiřtir. Hesaplanan radyum eřdeęer aktivite deęerleri 43,0–127,3 Bq/kg aralığında deęiřmektedir. En yōksek  $R_{eq}$  deęeri Ç-1 űrneęinde (127,3 Bq/kg), en dūřuk  $R_{eq}$  deęeri ise Ç-6 űrneęinde (43,0 Bq/kg) belirlenmiřtir. Tōm çimento űrnekleri için hesaplanan  $R_{eq}$  deęerlerinin sınır deęer olan 370 Bq/kg'ın oldukça altında olduęu gōrōlmüřtūr. Ayrıca, Avrupa Birlięi radyolojik deęerlendirme kriterlerine gōre hesaplanan aktivite konsantrasyon indisi deęerleri 0,15–0,45 aralığında olup, tōm űrnekler için  $I < 1$  kořulu saęlanmıřtır. Bu sonuçlar, incelenen çimento űrneklerinin yapı malzemesi olarak kullanımı sırasında i ve dıř radyasyon maruziyeti açısından herhangi bir radyolojik risk oluřturmadıęını ve uluslararası radyolojik gōvenlik kriterlerine uygun olduęunu gōstermektedir.

# **DETERMINATION OF NATURAL RADIOACTIVITY IN CEMENT MATERIALS BY HPGe GAMMA-RAY SPECTROMETRY WITH SELF-ATTENUATION CORRECTION**

## **SUMMARY**

This study aims to determine the activity concentrations of naturally occurring radionuclides in different types of cement samples obtained from manufacturers operating in various regions of Türkiye, in order to assess their radiological characteristics and suitability for use as building materials. Cement is one of the most widely used construction materials worldwide, and due to its mineralogical composition and the raw materials involved in its production, it may contain varying levels of naturally occurring radioactive materials (NORM). These radionuclides, which mainly originate from the uranium and thorium decay series as well as from potassium-bearing minerals, can contribute to both external gamma radiation exposure and internal exposure through radon exhalation when cement-based materials are used in residential buildings. Consequently, prolonged human exposure may occur, particularly in indoor environments where such materials are extensively utilized. Therefore, a systematic investigation of radionuclide activity concentrations in cement products is essential for evaluating potential radiological hazards, estimating radiation exposure to the population, and ensuring compliance with national and international radiation protection guidelines and safety standards.

Within the scope of this study, a total of twelve cement samples belonging to the CEM I, CEM II, and CEM IV types were analyzed. These cement types represent the most commonly used materials in the construction sector, including ordinary Portland cement as well as blended cements incorporating supplementary cementitious materials such as fly ash, pozzolana, and other mineral additives. The selection of samples from manufacturers operating in different geographical regions of Türkiye was intended to provide a representative assessment of the radiological characteristics of cement products available on the national market.

The activity concentrations of the naturally occurring radionuclides  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$  were determined using high-resolution gamma-ray spectrometry with a high-purity germanium (HPGe) detector, a technique widely recognized for its reliability and precision in environmental radioactivity measurements. Gamma spectrometric analyses were performed using a p-type coaxial HPGe detector system with a relative efficiency of 40% and an energy resolution of 1.8 keV at 1332 keV. The measurement system is installed at the Low Level Radioactivity Measurements Laboratory of the Energy Institute at Istanbul Technical University. The high energy resolution of the detector allows for the effective separation of closely spaced gamma-ray peaks, which is particularly important for the precise identification and quantification of radionuclides belonging to the uranium and thorium decay series.

Prior to the measurement of the cement samples, the energy calibration of the detector was performed using a certified  $^{152}\text{Eu}$  point source covering a wide range of gamma-

ray energies. This calibration ensured an accurate relationship between channel number and gamma-ray energy across the entire energy spectrum relevant to the radionuclides investigated. The photopeak efficiency calibration of the detector was carried out using the certified IAEA-312 soil reference material, which has a well-characterized radionuclide composition and a density comparable to that of the cement samples. This step is essential for converting measured gamma-ray count rates into activity concentrations. Furthermore, the accuracy and reliability of the applied measurement methodology were assessed using the certified IAEA-447 soil–moss reference material. The use of this reference material enabled verification of the overall performance of the gamma spectrometric system under conditions closely resembling those encountered during routine analysis of the cement samples.

Cement samples were prepared at the Radioactive Tracers and Applications Laboratory of the Energy Institute at Istanbul Technical University, following standardized sample preparation procedures to ensure consistency and reproducibility of the measurements. For dry mass determination, the samples were dried in an oven at 105 °C for 12 hours to remove moisture content, in accordance with the relevant ASTM standard. The samples were accurately weighed and transferred into cylindrical plastic containers of fixed geometry, specifically selected to be compatible with the gamma-ray spectrometric measurement setup. To prevent radon gas leakage and the potential loss of radon progeny, the containers were tightly sealed using parafilm. In order to establish secular equilibrium between  $^{226}\text{Ra}$  and its short-lived decay products, which are used for indirect determination of  $^{226}\text{Ra}$  activity, the sealed samples were stored for a minimum period of 30 days prior to counting. This storage period is essential to allow radon and its progeny to reach equilibrium, thereby ensuring accurate and reliable activity concentration calculations.

In the determination of activity concentrations, particularly for radionuclides emitting low-energy gamma rays, the self-attenuation effect represents a significant source of systematic uncertainty. Self-attenuation occurs when gamma rays emitted within the sample are partially attenuated before reaching the detector, which can lead to an underestimation of the true activity concentration if not adequately corrected. To address this effect, self-attenuation correction factors for the cement samples were determined using both experimental and theoretical approaches. The application of two independent methods enabled cross-validation of the correction factors and increased confidence in the accuracy of the final results. In the experimental approach, the gamma-ray transmission technique was employed over an energy range from 53.2 keV to 1408.0 keV using certified point sources of  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ , and  $^{54}\text{Mn}$ . These sources were selected to cover a broad spectrum of gamma-ray energies relevant to the radionuclides investigated. Transmission measurements were performed by recording gamma-ray intensities with and without the cement samples positioned between the source and the detector. From these measurements, energy-dependent transmission coefficients were obtained, and the corresponding self-attenuation correction factors were derived. In the theoretical approach, mass attenuation coefficients corresponding to the relevant gamma-ray energies were calculated using the EPIX database. These coefficients, together with experimentally determined sample density and thickness parameters, were used to calculate self-absorption correction factors based on the Beer–Lambert law. Accurate theoretical calculations required detailed chemical compositions of the cement samples as input data for the EPIX database. The chemical compositions were determined using wavelength-dispersive X-ray fluorescence (WD-XRF) spectrometry at the Central

Laboratory of Fundamental and Engineering Sciences Application and Research Center of Gazi University. A comparison between the experimentally and theoretically derived self-attenuation correction factors showed good agreement, with discrepancies of less than 10% across the investigated energy range. The self-attenuation correction factors were found to vary from 1.02 at 1408.0 keV to 1.51 at 53.2 keV, indicating that self-attenuation effects become increasingly significant at lower gamma-ray energies. The results clearly demonstrate that self-absorption is dominant in the low-energy region below 200 keV, reaching its maximum at the 53.2 keV gamma-ray energy emitted by  $^{133}\text{Ba}$ . These findings emphasize that neglecting self-attenuation correction can result in substantial underestimation of activity concentrations, particularly for radionuclides emitting low-energy gamma rays, and highlight the necessity of applying appropriate correction methods in gamma spectrometric analyses of cement materials.

The activity concentration of  $^{226}\text{Ra}$  in the cement samples was determined indirectly using the gamma-ray emissions of its short-lived decay products, namely  $^{214}\text{Pb}$  at 295.2 keV and 351.9 keV and  $^{214}\text{Bi}$  at 609.3 keV and 1120.3 keV, assuming secular equilibrium between  $^{226}\text{Ra}$  and its progeny. The activity concentration of  $^{232}\text{Th}$  was evaluated using the gamma-ray emissions of  $^{228}\text{Ac}$  at 338.4 keV and  $^{208}\text{Tl}$  at 583.2 keV, while the activity concentration of  $^{40}\text{K}$  was calculated directly from its characteristic gamma-ray line at 1460.8 keV. The measured activity concentrations of  $^{226}\text{Ra}$  ranged from 13.1 to 59.9 Bq/kg, those of  $^{232}\text{Th}$  from 10.5 to 41.6 Bq/kg, and those of  $^{40}\text{K}$  from 72.9 to 338.6 Bq/kg. These variations reflect differences in raw material composition and cement formulation among the investigated cement types and manufacturers. In particular, blended cements, namely CEM II and CEM IV, generally exhibited higher  $^{40}\text{K}$  and  $^{232}\text{Th}$  activity concentrations compared to ordinary Portland cement (CEM I). This trend can be attributed to the incorporation of supplementary cementitious materials, such as fly ash and pozzolanic additives, which may contain elevated levels of potassium- and thorium-bearing minerals.

The minimum detectable activity (MDA) values achieved in this study demonstrate the high sensitivity of the gamma spectrometric system and the suitability of the applied methodology for low-level radioactivity measurements. The MDA values were determined to be 1.3–2.0 Bq/kg for  $^{226}\text{Ra}$ , 1.0–2.6 Bq/kg for  $^{232}\text{Th}$ , and 2.6–5.8 Bq/kg for  $^{40}\text{K}$ , indicating that even relatively low activity concentrations could be reliably detected and quantified. These low detection limits are particularly important for evaluating compliance with radiological safety criteria and for identifying subtle differences in radionuclide content among different cement types.

To evaluate the potential radiological hazards associated with the use of cement as a building material, the radium equivalent activity ( $R_{\text{eq}}$ ) and the activity concentration index (I) were calculated for all cement samples. The radium equivalent activity, which provides a single parameter representing the combined radiological contributions of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$ , was found to range from 43.0 to 127.3 Bq/kg. The highest  $R_{\text{eq}}$  value was obtained for sample C-1, while the lowest value was observed for sample C-6. All calculated  $R_{\text{eq}}$  values were well below the recommended safety limit of 370 Bq/kg, indicating that the investigated cement samples do not present a significant external gamma radiation hazard. The activity concentration index (I), calculated in accordance with the European Union radiological assessment criteria, ranged from 0.15 to 0.45 for all samples, thereby satisfying the condition  $I < 1$ . This index is commonly used to assess compliance with reference dose limits for building materials and serves as an important indicator of potential radiological impact on building

occupants. The obtained results demonstrate that all cement samples analyzed in this study comply with international radiological safety requirements. Overall, the findings indicate that the cement samples investigated do not pose any radiological risk in terms of either internal or external radiation exposure during their use in construction applications and are therefore considered suitable for use as building materials from a radiological protection perspective.



## 1. GİRİŞ

Doğal radyoaktivite, yerkabuğu, atmosfer ve biyosferde doğal olarak bulunan radyonüklitlerin kendiliğinden bozunmaları sonucu ortaya çıkan ve çevrede sürekli olarak varlığını sürdüren iyonlaştırıcı radyasyon olarak tanımlanır. Yerkabuğundaki başlıca doğal radyonüklitler uranyum ( $^{238}\text{U}$ ) ve toryum ( $^{232}\text{Th}$ ) bozunma serileri ile potasyumun izotopu olan  $^{40}\text{K}$ 'dır (UNSCEAR, 2010). Bu radyonüklitler toprak, kayalar ve bu hammaddelerden üretilen yapı malzemeleri içerisinde değişen oranlarda bulunmakta ve insanlar için hem dışsal gama ışımasını hem de radon gazı yoluyla içsel maruziyet oluşturmaktadır. Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR), dünya genelinde bireylerin yıllık ortalama doğal radyasyon dozunun yaklaşık 2,4 mSv olduğunu ve bunun önemli bir kısmının yapı malzemelerinden kaynaklanan iç mekân maruziyetinden geldiğini bildirmektedir (UNSCEAR, 2010).

Yapı malzemeleri, insanların zamanlarının yaklaşık %80–90'ını kapalı alanlarda geçirmesi nedeniyle radyolojik açıdan özel bir öneme sahiptir (Kovler ve diğerleri, 2025; Hanfi ve diğerleri, 2024). Granit, mermer, tuğla, beton ve çimento gibi malzemeler; içeriklerindeki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  nedeniyle iç mekanlarda gama dozunu artırabilmektedir (Chandrasekaran ve Rahman, 2025; Salama ve diğerleri, 2025; Wang ve diğerleri, 2025; Lewicka ve diğerleri, 2022). Bu nedenle, yapı malzemelerinin doğal radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesi ve uluslararası güvenlik kriterleri çerçevesinde değerlendirilmesi hem halk sağlığı hem de sürdürülebilir yapılaşma açısından kritik önemdedir (Kovler ve diğerleri, 2025).

Çimento, dünya genelinde çok fazla kullanılan bir malzeme olup, beton üretiminin temel bileşenidir. Modern çimento üretiminde Portland klinkerine ek olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu, puzolan ve kalker gibi katkı maddeleri yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu katkılar, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sağlamakla birlikte, bazı durumlarda yüksek doğal radyoaktivite içeriğine sahip olabilmekte ve nihai çimentonun radyolojik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Wang ve diğerleri, 2025; Elewee ve diğerleri, 2025). Literatürde

farklı ülkelerde yapılan çalışmalar, çimentolardaki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonlarının geniş bir aralıkta değiştiğini ve bu değişimin hammadde kaynağına, üretim teknolojisine ve katkı oranlarına bağlı olduğunu ortaya koymaktadır (Nemlioğlu ve diğerleri, 2022).

Yapı malzemelerinin radyolojik güvenliğinin değerlendirilmesinde en yaygın kullanılan göstergelerden biri radyum eşdeğer aktivite ( $Ra_{eq}$ ) olup,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'nın toplam etkisini tek bir parametre altında ifade etmektedir (Beretka, J. ve Mathew, P. J., 1985). Bunun yanı sıra Avrupa Komisyonu tarafından önerilen aktivite konsantrasyon indisi (I), yapı malzemelerinin iç mekanlarda oluşturabileceği ek yıllık etkin dozun değerlendirilmesinde temel bir kriter olarak kullanılmaktadır (European Commission, 1999). Avrupa Birliği mevzuatında ve EURATOM Temel Güvenlik Standartları'nda, yapı malzemelerinden kaynaklanan yıllık ek dozun 1 mSv'in altında tutulması hedeflenmekte ve bu amaçla  $I < 1$  koşulu güvenli kullanım için referans kabul edilmektedir (European Commission, 1999).

Doğal radyoaktivite ölçümlerinde en yaygın ve güvenilir yöntemlerden biri yüksek çözünürlüklü gama ışını spektrometrisidir. Özellikle yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörlü sistemler, yüksek enerji çözünürlüğü sayesinde düşük aktivite seviyelerinin hassas şekilde belirlenmesine olanak sağlamaktadır (Knoll, 2010; Gilmore, 2024). Ancak, gama spektrometrik ölçümlerde örnek matrisinin yoğunluğu ve kimyasal bileşimine bağlı olarak ortaya çıkan öz soğurma (*self-attenuation*) etkisi, özellikle düşük enerjili gama ışınlarında ölçüm hatalarına neden olabilmektedir (Gilmore, 2024). Bu nedenle, güvenilir radyolojik değerlendirmeler için öz soğurma etkisinin teorik ve/veya deneysel yöntemlerle düzeltilmesi büyük önem taşımaktadır (Barba-Lobo, 2025).

Türkiye, önemli bir çimento üreticisi konumundadır. Bu bağlamda, farklı bölgelerde üretilen ve farklı katkı bileşimlerine sahip çimentoların doğal radyonüklit içeriklerinin belirlenmesi, radyolojik risk göstergelerinin hesaplanması ve ölçümlerde öz-soğurma etkisinin dikkate alınması hem ulusal veri tabanının güçlendirilmesi hem de yapı malzemelerinin güvenli kullanımının sağlanması açısından önem arz etmektedir. Bu tez çalışması, söz konusu gereksinimleri karşılamayı hedefleyerek Türkiye'de üretilen farklı tipteki çimentoların radyolojik özelliklerine kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır.

## 1.1 Literatür Taraması

Kovler ve ark. (2025), yapı malzemelerinde bulunan doğal radyoaktivitenin iç mekânlarda gama radyasyonu yoluyla dış maruziyete ve radon gazı aracılığıyla iç maruziyete neden olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada, özellikle çimento gibi yapı malzemelerinde  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklitlerinin aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesinin, radyolojik güvenliğin değerlendirilmesi açısından önemli olduğu vurgulanmıştır. Avrupa Birliği Temel Güvenlik Standartları kapsamında yapı malzemelerinden kaynaklanan yıllık etkin dozun 1 mSv sınırı ile sınırlandırıldığı ifade edilmiş ve bu değerlendirmenin gama spektrometrik ölçümlerle yapılması gerektiği belirtilmiştir. Araştırmacılar, yüksek çözünürlüklü HPGe dedektörlerinin doğal radyoaktivite tayininde güvenilir sonuçlar sağladığını, ancak ölçümlerde malzeme yoğunluğu ve bileşimine bağlı olarak ortaya çıkan öz soğurma etkisinin dikkate alınmasının gerekli olduğunu ortaya koymuşlardır.

Akkaş (2025), Türkiye’de yapı sektöründe yaygın olarak kullanılan yerli ve ithal granit yapı malzemelerinde doğal radyoaktivite düzeylerini ve radon emisyon hızlarını incelemiştir. Çalışmada,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklitlerinin aktivite konsantrasyonları HPGe dedektörlü gama spektrometrik analiz yöntemiyle belirlenmiş; radyum eşdeğer aktivitesi, soğurulan gama doz hızı ve yıllık etkin doz değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca granit örneklerinin radon emisyon hızları ölçülmüş ve radon salınımının özellikle malzemedeki  $^{226}\text{Ra}$  içeriği ile ilişkili olduğu gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bazı granit örneklerinde radyum eşdeğer aktivitesinin ve yıllık etkin dozun önerilen sınır değerleri aşılabildiğini, bu nedenle doğal taş ve yapı malzemelerinin radyolojik açıdan değerlendirilmesinin gerekli olduğunu ortaya koymuştur. Çalışma, yapı malzemelerinde doğal radyoaktivite ve radon kaynaklı iç maruziyetin birlikte ele alınmasının önemini vurgulayarak, gama spektrometrik analizlerin yapı malzemelerinin radyasyon güvenliği açısından kritik bir araç olduğunu göstermektedir.

Chandrasekaran ve Rahman (2025), Hindistan’ın Tamil Nadu bölgesinde yaygın olarak kullanılan vitrifiye seramik karolarda  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyoaktivite düzeylerini gama spektrometrik yöntemlerle belirlemiş ve bu malzemelerin radyolojik etkilerini kapsamlı biçimde değerlendirmişlerdir. Çalışmada ölçülen ortalama aktivite konsantrasyonlarının, özellikle  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{232}\text{Th}$  için UNSCEAR tarafından önerilen

dünya ortalamalarının üzerinde olduğu; buna bağlı olarak hesaplanan iç mekân gama soğurulan doz hızı, yıllık etkin doz ve yaşam boyu kanser riski gibi bazı radyolojik parametrelerin küresel ortalama değerlere kıyasla hafif artış gösterdiği rapor edilmiştir. Bununla birlikte, ortalama radyum eşdeğer aktivitesi ve yıllık etkin doz değerlerinin genel olarak kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığı, ancak bazı örneklerde sınır değerlerin aşılabildiği belirtilmiştir. Çalışma, modern yapı malzemelerinde doğal radyoaktivitenin bölgesel olarak değişebileceğini ve bu nedenle yapı malzemelerinin üretiminde kullanılan hammaddeler için radyolojik karakterizasyonun gerekli olduğunu vurgulamaktadır.

Knežević Radić ve ark. (2025), Sırbistan'da kullanılan çimento, şamot ve farklı refrakter ürünlerde doğal radyoaktivite düzeylerini düşük seviyeli HPGe dedektörlü gama spektrometrisi kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklitlerinin aktivite konsantrasyonları belirlenmiş; aktivite konsantrasyon indisi, soğurulan gama doz hızı ve yıllık etkin doz gibi radyolojik risk parametreleri hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları, çimento örneklerinin büyük çoğunluğu için aktivite konsantrasyon indisinin 1'in altında kaldığını, ancak bazı çimento, şamot ve özellikle refrakter malzeme örneklerinde  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonlarının yüksek olması nedeniyle yıllık etkin dozun 1 mSv sınırını aşabildiğini göstermiştir. Ayrıca çalışmada, farklı malzeme matrislerine bağlı olarak öz soğurma ve dedektör verim düzeltmelerinin doğru aktivite tayini açısından kritik olduğu vurgulanmış ve gama spektrometrik ölçümlerde uygun kalibrasyon ile öz soğurma düzeltmelerinin uygulanmasının radyolojik değerlendirmelerin güvenilirliğini artırdığı ifade edilmiştir. Elde edilen bulgular, çimento ve benzeri yapı malzemelerinde doğal radyoaktivitenin düzenli olarak izlenmesi ve radyolojik kontrolün gerekli olduğunu ortaya koymaktadır.

Wang ve ark. (2025), Çin'in Chongqing bölgesindeki çimento üretim tesislerinde kullanılan hammaddelerden nihai çimento ürünlerine kadar olan süreçte doğal radyoaktivitenin değişimini incelemişlerdir. Çalışmada  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklitlerinin aktivite konsantrasyonları HPGe gama spektrometresi kullanılarak belirlenmiş; radyum eşdeğer aktivitesi, iç ve dış maruziyet indisleri ile yıllık etkin doz değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, çimento üretiminde kullanılan hammadde bileşimi, yüksek radyoaktif katkı maddelerinin (uçucu kül, cüruf, fosfojips vb.) ilavesi ve fırın kalsinasyon sürecinde meydana gelen birikimin, nihai

çimento ürününün radyoaktivite seviyelerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Bazı katkı malzemeleri için hesaplanan yıllık etkin doz değerlerinin 1 mSv sınırını aşabildiği belirtilmiş ve bu durumun çimento üretiminde radyolojik açıdan dikkatle kontrol edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Araştırmacılar, çimento üretim sürecinde özellikle hammadde seçiminin ve katkı oranlarının kontrol edilmesinin, düşük radyoaktiviteli çimento üretimi açısından kritik olduğunu ortaya koymuşlardır.

Da Silva ve ark. (2024), Brezilya'nın Rio de Janeiro kentinde konut yapımında kullanılan farklı ticari çimento türlerinde doğal radyoaktiviteye bağlı radyolojik tehlikeleri değerlendirmişlerdir. Çalışmada 16 farklı çimento örneğinde  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklitlerinin aktivite konsantrasyonları HPGe dedektörlü gama spektrometrisi kullanılarak belirlenmiş; radyum eşdeğer aktivitesi, soğurulan gama doz hızı, yıllık etkin doz, yıllık gonad doz eşdeğeri ve yaşam boyu kanser riski gibi çok sayıda radyolojik risk parametresi hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, ortalama  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonunun dünya ortalamasının üzerinde olmasına karşın, tüm çimento örnekleri için hesaplanan radyum eşdeğer aktivitesi ve yıllık etkin doz değerlerinin UNSCEAR tarafından önerilen 1 mSv/yıl sınırının altında kaldığını göstermiştir. Bununla birlikte bazı örneklerde radyolojik parametrelerin görece yüksek değerlere ulaştığı ve çimento üretiminde kullanılan hammaddelerin doğal radyoaktivite üzerinde belirleyici rol oynadığı vurgulanmıştır. Çalışma, HPGe dedektörlü gama spektrometrik analizlerin çimento malzemelerinde doğal radyoaktivitenin güvenilir biçimde belirlenmesi ve radyolojik risklerin değerlendirilmesi açısından etkin bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

Baha ve ark. (2023), Malezya'nın Johor bölgesinde yaygın olarak kullanılan granit, mermer, porselen ve kuvars gibi dekoratif yapı taşlarında doğal radyoaktivite düzeylerini HPGe dedektörlü gama spektrometrisi kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklitlerinin aktivite konsantrasyonları belirlenmiş; radyum eşdeğer aktivitesi, iç ve dış tehlike indisleri, aktivite konsantrasyon indisi ve alfa indisi gibi radyolojik risk parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, özellikle granit ve porselen örneklerinde aktivite konsantrasyonlarının diğer malzemelere kıyasla daha yüksek olduğunu, ancak hesaplanan yıllık etkin doz değerlerinin tamamının 1 mSv/y sınırının altında kaldığını göstermiştir.

Kumar ve ark. (2023), Nepal'de yaygın olarak kullanılan farklı çimento türlerinde  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyoaktivite düzeylerini NaI(Tl) dedektörlü gama spektrometrisi

kullanarak belirlemiş ve bu malzemelerin radyolojik etkilerini değerlendirmişlerdir. Çalışmada ölçülen ortalama aktivite konsantrasyonlarının tüm radyonüklitler için UNSCEAR tarafından yapı malzemeleri için verilen dünya ortalama değerlerinin altında kaldığı rapor edilmiştir. Buna bağlı olarak hesaplanan radyum eşdeğer aktivitesi, soğurulan gama doz hızı, yıllık etkin doz, iç ve dış tehlike indisleri, gama indisi ve yaşam boyu kanser riski gibi tüm radyolojik parametrelerin önerilen sınır değerlerin oldukça altında olduğu belirlenmiştir. Ayrıca korelasyon analizleri,  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{232}\text{Th}$  arasında güçlü bir ilişki bulunduğunu,  $^{40}\text{K}$ 'nın ise bu radyonüklitlerle zayıf korelasyon gösterdiğini ortaya koymuştur.

Lewicka ve ark. (2022), Polonya'da yaygın olarak kullanılan farklı çimento türlerinde  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyoaktivite düzeylerini gama spektrometrik yöntemle belirlemişlerdir. Çalışmada, HPGe ve NaI(Tl) dedektörleri kullanılarak aktivite konsantrasyonları ölçülmüş ve radyum eşdeğer aktivitesi, soğurulan gama doz hızı, yıllık etkin doz ile gama ve alfa indisleri gibi radyolojik tehlike parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, çimentolardaki doğal radyoaktivite seviyelerinin genel olarak Avrupa Komisyonu ve UNSCEAR tarafından önerilen sınır değerlerin altında olduğunu, ancak katkı maddesi içeren bazı çimento türlerinde aktivite konsantrasyonlarının görece daha yüksek olabildiğini göstermiştir. Araştırmacılar, çimento üretiminde kullanılan uçucu kül ve cüruf gibi endüstriyel katkıların doğal radyoaktiviteyi etkileyebileceğini ve bu nedenle çimento bazlı yapı malzemelerinin HPGe dedektörlü gama spektrometrik analizlerle düzenli olarak izlenmesinin gerekli olduğunu vurgulamışlardır.

Estokova ve ark. (2022), Slovakya'daki tarihi bir yapıda kullanılan taş ve tuğla yapı malzemelerinde doğal radyoaktivite düzeylerini incelemiş ve bu malzemelerin iç ve dış mekân radyolojik etkilerini değerlendirmişlerdir. Çalışmada  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyoaktivite konsantrasyonları gama spektrometrik yöntemlerle belirlenmiş; aktivite konsantrasyon indisi, radyum eşdeğer aktivitesi, iç ve dış tehlike indisleri ile yıllık etkin doz ve yaşam boyu kanser riski gibi radyolojik parametreler hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, toplam aktivite konsantrasyonunun dünya ortalamasını aşmasına rağmen, aktivite konsantrasyon indisinin örnekler için Avrupa Birliği tarafından önerilen sınır değerlerin altında kaldığını ve yıllık etkin dozun 1 mSv sınırını aşmadığını göstermiştir. Ayrıca tuğla malzemelerin taş malzemelere kıyasla daha yüksek doğal radyoaktivite içerdiği ve özellikle  $^{40}\text{K}$  içeriğinin toplam aktivite üzerinde

belirleyici olduğu vurgulanmıştır. Çalışma, yapı malzemelerinde doğal radyoaktivitenin güvenilir şekilde değerlendirilmesi için gama spektrometrik ölçümlerin ve radyolojik indislerin birlikte kullanılmasının önemini ortaya koymaktadır.

La Verde ve ark. (2020), İtalya'nın Puglia bölgesinde yapı malzemesi olarak yaygın biçimde kullanılan doğal taşların  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonlarını belirlemiştir. Ölçüm sonuçları, tüm örnekler için hesaplanan I değerlerinin 1 mSv/yıl referans seviyesinin altında kaldığını göstermiştir. Araştırmacılar, doğal taşların jeolojik kökeni ve kimyasal bileşiminin doğal radyoaktivite seviyeleri üzerinde belirleyici olduğunu vurgulamış ve yapı malzemelerinin kullanımından önce gama spektrometrik yöntemlerle radyolojik karakterizasyonunun yapılmasının önemini ortaya koymuşlardır.

Al-Horr ve Khoo (2025), HPGe dedektörlü gama spektrometrik ölçümlerde özellikle hacimli ve farklı geometrilere sahip örneklerde ortaya çıkan öz soğurma etkisini incelemiş ve bu etkiyi gidermeye yönelik pratik bir düzeltme yöntemi önermişlerdir. Çalışmada farklı kalınlık ve yoğunluklara sahip toprak örnekleri kullanılarak  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklitlerinin aktivite konsantrasyonları belirlenmiş; örnek geometrisi ve doğrusal zayıflatma katsayısına bağlı olarak geliştirilen öz soğurma faktörlerinin ölçüm doğruluğunu %3,88–6,72 oranında artırdığını gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, düşük enerjili gama fotonlarında öz soğurma etkisinin daha belirgin olduğunu ve örnek kütlesi ile kalınlığı arttıkça düzeltme ihtiyacının kritik hâle geldiğini ortaya koymuştur.

Barba-Lobo ve ark. (2025), gama spektrometrik analizlerde farklı kimyasal bileşim, yoğunluk ve geometriye sahip örneklerde ortaya çıkan öz soğurma etkisinin düzeltilmesine yönelik deneysel ve simülasyon tabanlı yöntemleri kapsamlı ve eleştirel bir yaklaşımla incelemişlerdir. Çalışmada, özellikle HPGe dedektörlü ölçümlerde tam enerji pik (fotopik) veriminin doğru şekilde belirlenebilmesi için öz soğurma düzeltmelerinin zorunlu olduğu vurgulanmış; Cutshall ve Appleby modelleri gibi analitik yaklaşımlar ile LabSOCS, EFFTRAN, DETEFF, PENELOPE ve Geant4 gibi Monte Carlo tabanlı yazılımların avantaj ve sınırlılıkları karşılaştırılmıştır. Elde edilen değerlendirmeler, düşük enerjili gama fotonlarında ve kalibrasyon kaynağından fiziksel olarak farklı matrislerde öz soğurma etkisinin ihmal edilmesinin aktivite tayininde ciddi sistematik hatalara yol açabileceğini göstermiştir. Ayrıca doğru öz

soğurma düzeltmesi için örnek kimyasal bileşiminin, yoğunluğunun ve homojenliğinin doğru belirlenmesinin kritik olduğu belirtilmiştir. Çalışma, HPGe dedektörlü gama spektrometrik analizlerde güvenilir aktivite ve doz hesaplamaları yapılabilmesi için uygun öz soğurma düzeltme yöntemlerinin seçilmesi ve uygulanmasının gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Bhattacharya ve ark. (2024), gama spektrometrik analizlerde hacimli jeolojik örneklerde ortaya çıkan öz soğurma etkisini iletim (transmisyon) yöntemi ve MCNP tabanlı Monte Carlo simülasyonları kullanarak ayrıntılı biçimde incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar, Cutshall yönteminin farklı matrisler için genel olarak yeterli olduğunu göstermiştir. Ayrıca öz soğurma düzeltmesinin örnek yüksekliği ile doğrusal ilişki gösterdiği belirlenmiştir. Çalışma, HPGe dedektörlü gama spektrometrik analizlerde öz soğurma düzeltmelerinin ihmal edilmesinin aktivite konsantrasyonu tayininde önemli sistematik hatalara yol açabileceğini ortaya koyarak, yapı ve çevresel malzemelerin radyolojik karakterizasyonunda uygun düzeltme yöntemlerinin uygulanmasının gerekliliğini vurgulamaktadır.

## **1.2 Tezin Amacı**

Bu tezin amacı, Türkiye'nin farklı bölgelerinde faaliyet gösteren üreticilerden temin edilen farklı tipteki çimento malzemelerinde (CEM I, CEM II ve CEM IV) doğal radyonüklitlerin ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ ) aktivite konsantrasyonlarını yüksek çözünürlüklü gama ışıını spektrometrisi yöntemiyle belirlemek; elde edilen sonuçları radyum eşdeğer aktivitesi ( $R_{\text{eq}}$ ) ve aktivite konsantrasyon indisi (I) değerlerini hesaplayarak radyolojik açıdan değerlendirmek ve hacimsel örneklerde aktivite konsantrasyonu hesaplarında önemli bir hata kaynağı olan öz soğurma etkisini teorik ve deneysel yaklaşımlar kullanarak düzeltmektir.

## 2. TEORİK BİLGİLER

Gama spektroskopisi, radyoaktif örneklerde bulunan gama ışını yayan radyonüklitlerin aktivite tayininde kullanılan temel yöntemlerden biridir. Yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörler, yüksek enerji çözünürlükleri sayesinde çevresel örneklerin analizinde tercih edilmektedir (Debertin ve Helmer, 1988). Gama spektrumunda belirli enerjilerde oluşan fotopikler ilgili radyonüklitlerin tanımlanmasına olanak sağlar.

Fotopik verimi, dedektörün belirli bir enerjiye sahip gama ışınlarını algılama oranını ifade eder ve aktivite hesabında kullanılan temel bir parametredir. Ölçülen net pik sayımları, fotopik verimi, ölçüm süresi ve gama yayımlanma olasılığı dikkate alınarak örnekteki aktivite hesaplanmaktadır (IAEA, 2003).

Doğru aktivite tayini için radyoaktif bozunma, gerçek çakışma düzeltmesi, öz soğurma düzeltmesi ve rasgele yığılma düzeltmesi gibi düzeltmelerin uygulanması gereklidir. Ayrıca ölçülebilir en küçük aktivite (MDA), sistemin ölçüm sınırını tanımlarken, ölçüm belirsizliği hesapları elde edilen sonuçların güvenilirliğinin değerlendirilmesinde önemli rol oynamaktadır (Currie, 1968; ISO, 2008).

Tez çalışmasının bu bölümünde çalışma kapsamında kullanılan temel bilimsel bilgilere yer verilmiştir.

### 2.1 Radyasyon ve Radyoaktivite

Radyasyon, enerjinin elektromanyetik dalga veya parçacık formunda bir ortamdan diğerine taşınması olarak tanımlanır. Atomun çekirdeğinden yayınlanan radyasyon genellikle iyonlaştırıcı özellik gösterir ve madde ile etkileştiğinde atom veya moleküllerden elektron kopararak iyonlaşmaya neden olurlar. İyonlaştırıcı radyasyon; alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ), gama ( $\gamma$ ) ışınları ile nötron radyasyonunu içerir. Bu radyasyon türleri enerji düzeyleri ve maddeyle etkileşim mekanizmaları bakımından birbirinden farklılık göstermektedir (Knoll, 2010).

Radyoaktivite kararsız atom çekirdeklerinin, daha kararlı bir duruma geçebilmek amacıyla kendiliğinden bozunması sonucu radyasyon yayması olayıdır. Bu bozunma

süreci rasgele olup, her bir radyonüklit için karakteristik bir yarı ömür ile tanımlanır. Yarı ömür, bir radyoaktif maddedeki çekirdeklerin yarısının bozunması için geçen süre olarak tanımlanmakta ve radyoaktif maddelerin çevresel ve endüstriyel uygulamalardaki davranışlarının anlaşılmasında temel bir parametre olarak kabul edilmektedir (L'Annunziata, 2012).

Alfa bozunması, genellikle ağır çekirdeklerde görülür ve iki proton ile iki nötrondan oluşan bir alfa parçacığının çekirdekten salınmasıyla gerçekleşir. Alfa parçacığı yüksek iyonlaştırma gücüne sahiptir, ancak madde içerisindeki menzili oldukça kısadır. Beta bozunması ise çekirdekteki bir nötronun protona veya bir protonun nötrona dönüşmesi sırasında elektron veya pozitron yayılması şeklinde ortaya çıkar. Beta parçacıklarının nüfuz yetenekleri alfa parçacıklarına kıyasla daha yüksek olmakla birlikte, gama ışınlarına göre daha düşüktür (Turner, 2008).

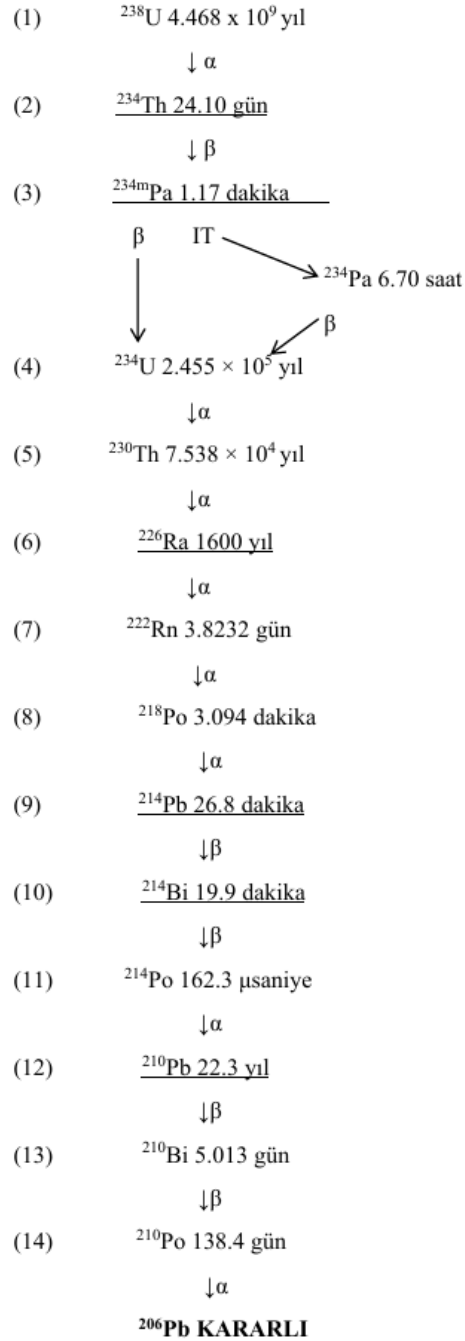
Gama radyasyonu, çekirdeğin uyarılmış bir enerji seviyesinden daha düşük bir seviyeye geçmesi sırasında yayılan yüksek enerjili elektromanyetik dalgadır. Gama ışınlarının kütesiz ve yüksüz olmaları, onları çevresel örneklerin analizinde özellikle önemli kılmaktadır. Yüksek nüfuz yetenekleri nedeniyle gama ışınları, örneğin tüm hacmi hakkında bilgi elde edilmesine olanak sağlamaktadır; bu özellik, gama spektroskopisini çevresel radyoaktivitenin belirlenmesinde temel yöntemlerden biri hâline getirmiştir (Debertin ve Helmer, 1988).

Radyoaktivite, birim zamanda gerçekleşen bozunma sayısı olarak tanımlanır ve SI birim sisteminde becquerel (Bq) birimi ile ifade edilir. Çevresel örnekler ve yapı malzemelerine yönelik radyolojik değerlendirmelerde, doğru radyoaktivite ölçümü; dedektör-örnek ölçüm geometrisinin, örnek matrisinin ve çeşitli düzeltmelerin dikkate alınmasını gerektirmektedir. Bu nedenle radyasyon ve radyoaktivite kavramlarının teorik temellerinin anlaşılması, güvenilir gama spektrometrik ölçümlerin yapılabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır (IAEA, 2003).

## **2.2 Doğal Radyasyon**

Doğal radyasyon, insan faaliyetlerinden bağımsız olarak çevrede bulunan ve canlıların sürekli olarak maruz kaldığı iyonlaştırıcı radyasyon kaynaklarını ifade etmek için kullanılan bir terimdir. İnsanların maruz kaldığı toplam yıllık radyasyon dozunun büyük bir bölümü doğal kaynaklı olup, bu maruziyet coğrafi konum, rakım, jeolojik

yapı ve çevresel koşullar gibi birçok değişkene bağlı olarak değişmektedir. Doğal radyasyonun temel bileşenleri kozmik radyasyon ve yer kabuğunda bulunan doğal radyonüklitlerden kaynaklanan karasal (terrestrial) radyasyondur (UNSCEAR, 2000).



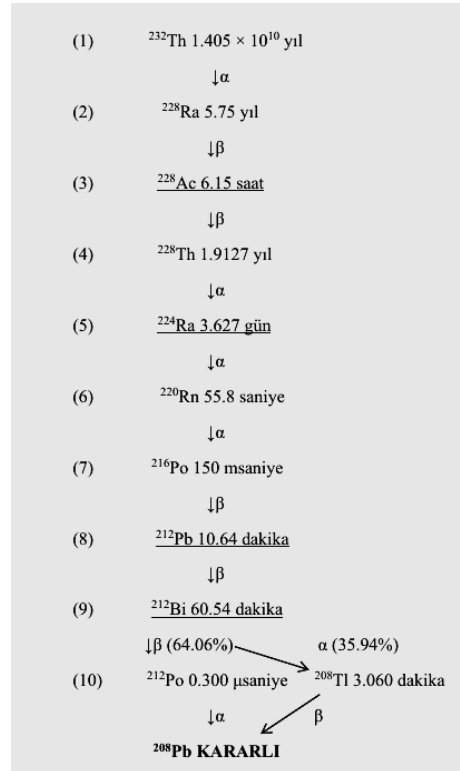
**Şekil 2.1 :**  ${}^{238}\text{U}$  bozunma zinciri (Gilmore, 2024).

Karasal doğal radyasyonun ana kaynağını, yer kabuğunda bulunan uzun yarı ömürlü ilksel (primordial) radyonüklitler oluşturmaktadır. Bu radyonüklitler, dünyanın oluşumundan bu yana varlıklarını sürdüren ve günümüzde de bozunmaya devam eden Uranyum-238 ( ${}^{238}\text{U}$ ), Toryum-232 ( ${}^{232}\text{Th}$ ) ve Potasyum-40 ( ${}^{40}\text{K}$ ) izotoplarıdır. Bu

izotoplar kayalarda, toprakta, doğal sularda ve bu jeolojik materyallerden türetilen yapı malzemelerinde farklı konsantrasyonlarda bulunmaktadır (IAEA, 1989).

Yapı malzemeleri, hammaddelerinin doğrudan yer kabuğundan elde edilmesi nedeniyle doğal radyonüklitlerin önemli bir taşıyıcısı konumundadır. Çimento ve çimento esaslı yapı malzemeleri; kireçtaşı, kil, marn ve çeşitli mineral katkıları gibi doğal hammaddelerden üretildiği için bu malzemelerde bulunan doğal radyoaktivite büyük ölçüde hammadde bileşimine ve üretim süreçlerine bağlıdır. Bu nedenle yapı malzemeleri, doğal radyasyonun insan çevresindeki dağılımında dikkate alınması gereken önemli bir bileşen olarak değerlendirilmektedir (UNSCEAR, 2000; IAEA, 2013).

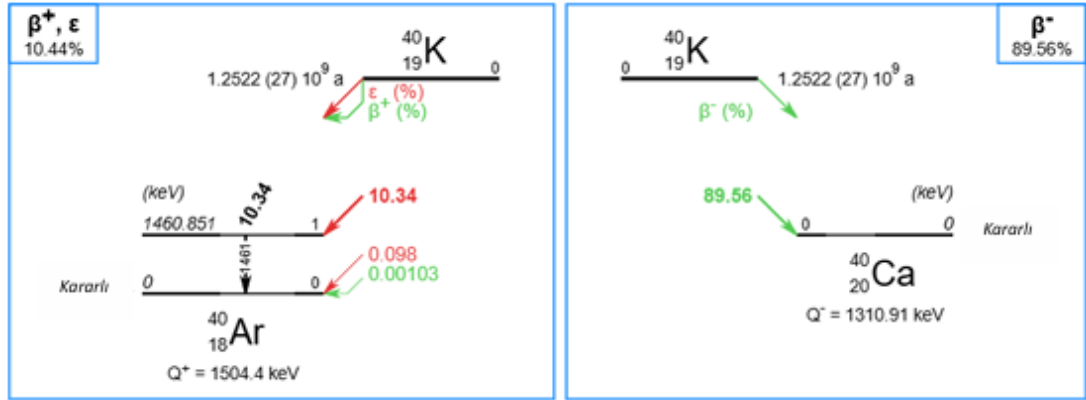
$^{238}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$  izotopları, çok sayıda ara çekirdek içeren uzun bozunma serilerine sahiptir.  $^{238}\text{U}$  bozunma serisi, alfa ve beta bozunmaları yoluyla ilerleyerek kararlı Kurşun-206 ( $^{206}\text{Pb}$ ) izotopuna sonlanmaktadır (Şekil 2.1). Bu seri içerisinde yer alan Radyum-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ), Kurşun-214 ( $^{214}\text{Pb}$ ) ve Bizmut-214 ( $^{214}\text{Bi}$ ) gibi radyonüklitler, çevresel ve yapı malzemelerine yönelik gama spektrometrik ölçümlerde uranyum içeriğinin tayininde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu radyonüklitlerin yayımladığı karakteristik gama enerjileri, dedektör sistemleri tarafından yüksek doğrulukla tespit edilebilmektedir (Debertin ve Helmer, 1988).



Şekil 2.2 :  $^{232}\text{Th}$  bozunma zinciri (Gilmore, 2024).

Benzer şekilde,  $^{232}\text{Th}$  bozunma serisi de alfa ve beta bozunmalarından oluşan uzun bir zincir hâlinde ilerlemekte ve kararlı Kurşun-208 ( $^{208}\text{Pb}$ ) izotopu ile sonlanmaktadır (Şekil 2.2). Bu seride Aktinyum-228 ( $^{228}\text{Ac}$ ), Kurşun-212 ( $^{212}\text{Pb}$ ) ve Talyum-208 ( $^{208}\text{Tl}$ ) gibi güçlü gama yayıcı radyonüklitler yer almaktadır.

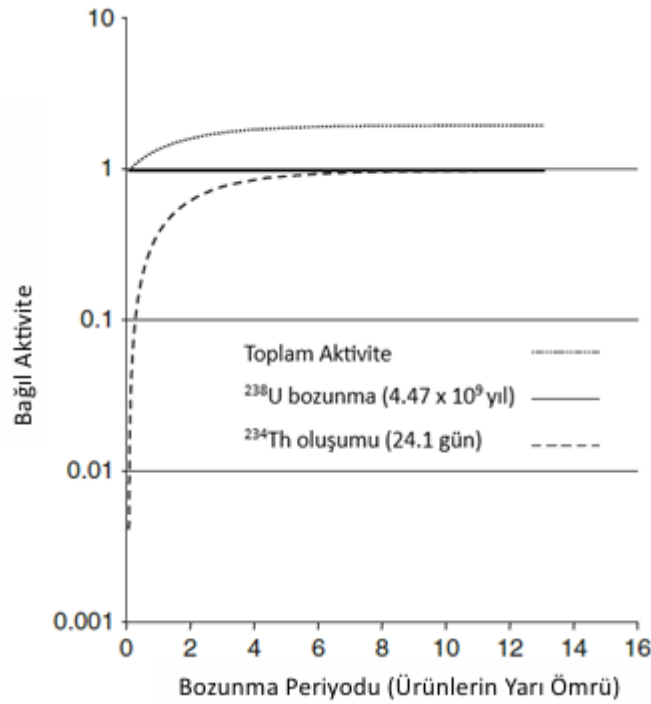
$^{40}\text{K}$ , uranyum ve toryumdan farklı olarak bir bozunma serisine sahip olmayan ilksel bir radyonüklittir. Doğal potasyumun yaklaşık %0,0117'sini oluşturan  $^{40}\text{K}$ , beta bozunması ve elektron yakalama yoluyla bozunmakta ve 1460,8 keV enerjili karakteristik bir gama ışını yaymaktadır (Şekil 2.3). Kil mineralleri ve feldispat içeriği yüksek hammaddelerden üretilen yapı malzemelerinde  $^{40}\text{K}$  aktivitesinin radyoaktiviteye önemli katkılar sağladığı bilinmektedir (UNSCEAR, 2000).



**Şekil 2.3 :**  $^{40}\text{K}$  bozunma şeması (Henri Becquerel Ulusal Laboratuvarı, t.y.).

Doğal bozunma serilerinin gama spektrometrik yöntemle değerlendirilmesinde temel varsayımlardan biri seküler (kalıcı) denge durumudur (Gilmore, 2024). Seküler denge, ana çekirdeğin yarı ömrünün ürün çekirdeğin yarı ömrüne kıyasla çok uzun olduğu durumlarda, kapalı bir sistemde yeterli süre geçtikten sonra ana ve ürün çekirdeklerin aktivitelerinin birbirine eşitlenmesini ifade eder (Şekil 2.4). Yapı malzemeleri gibi katı matrislerde, örnek hazırlama ve saklama koşulları uygun olduğunda uranyum ve toryum serilerinin seküler dengede olduğu kabul edilir (L'Annunziata, 2012). Ancak yapı malzemelerinin fiziksel yapısı, gözenekliliği ve üretim süreçleri, bu denge durumunu etkileyebilmektedir. Özellikle uranyum ve toryum serilerinde yer alan radon izotopları asal gaz olmaları nedeniyle katı matristen kısmen ayrılabilmekte ve bu durum ana çekirdek ile kısa yarı ömürlü bozunma ürünleri arasındaki dengeyi bozabilmektedir. Bu nedenle yapı malzemelerine yönelik gama spektrometrik analizlerde, örneklerin hava geçirmez kaplarda yeterli süre bekletilmesi yoluyla bozunma ürünlerinin yeniden dengeye ulaşması sağlanmaktadır. Bu yaklaşım,

radonun doğrudan ölçümünden ziyade, aktivite tayininde kullanılan seküler denge varsayımının geçerliliğini desteklemeye yöneliktir (IAEA, 2010).



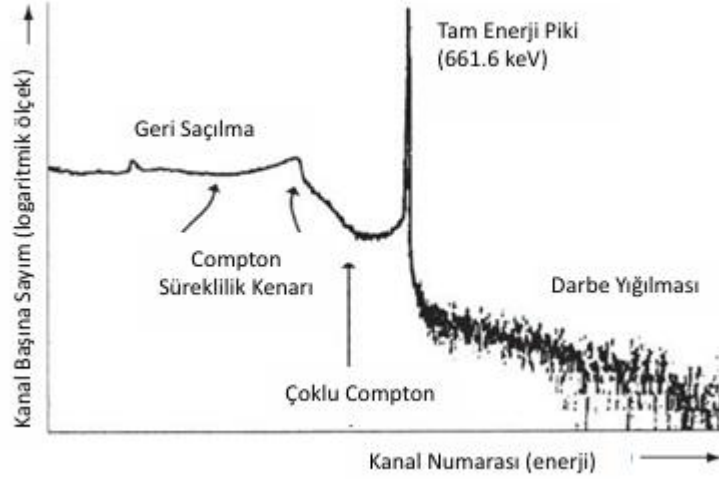
Şekil 2.4 : Seküler denge durumu (Gilmore, 2024).

### 2.3 Gama Spektrometrik Yöntem

Gama spektroskopisi, gama ışını yayan radyonüklitlerin tanımlanması ve nicel olarak belirlenmesi amacıyla kullanılan en yaygın ve güvenilir yöntemlerden biridir. Bu teknik, radyonüklitlerin karakteristik gama enerjilerinin ölçülmesine ve kaydedilen enerji spektrumunun analiz edilmesine dayanır. Gama spektroskopisi, özellikle çevresel örnekler ve yapı malzemeleri gibi karmaşık matrislere sahip örneklerde, tahribatsız ölçüm imkânı sunması nedeniyle tercih edilmektedir (Knoll, 2010).

Gama ışınlarının madde ile etkileşimi temel olarak fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşum süreçleri ile gerçekleşmektedir. Düşük enerjili gama ışınlarında fotoelektrik etki baskın iken, orta enerji aralığında Compton saçılması, yüksek enerjilerde ( $<1,022$  Me) ise çift oluşum ön plana çıkmaktadır (Tsoulfanidis & Landsberger, 2021). Bu etkileşimlerin her biri, dedektörde oluşan enerji dağılımını ve dolayısıyla gama spektrumunun şeklini doğrudan etkilemektedir (Şekil 2.5). Spektrumda, belirli enerjilerde gözlenen keskin pikler fotopik olarak adlandırılmakta ve doğrudan ilgili radyonüklitin karakteristik gama enerjisine karşılık gelmektedir. Fotopiklerin yanı sıra Compton saçılması sonucu oluşan sürekli enerji dağılımı ve art

alan katkıları da spektrumda yer almaktadır. Fotopiklerin doğru şekilde tanımlanması ve net pik alanlarının belirlenmesi, güvenilir aktivite tayini açısından kritik öneme sahiptir.



**Şekil 2.5 :** Gama ışınlarının madde ile etkileşimini gösteren <sup>137</sup>Cs spektrumu (Gilmore, 2024).

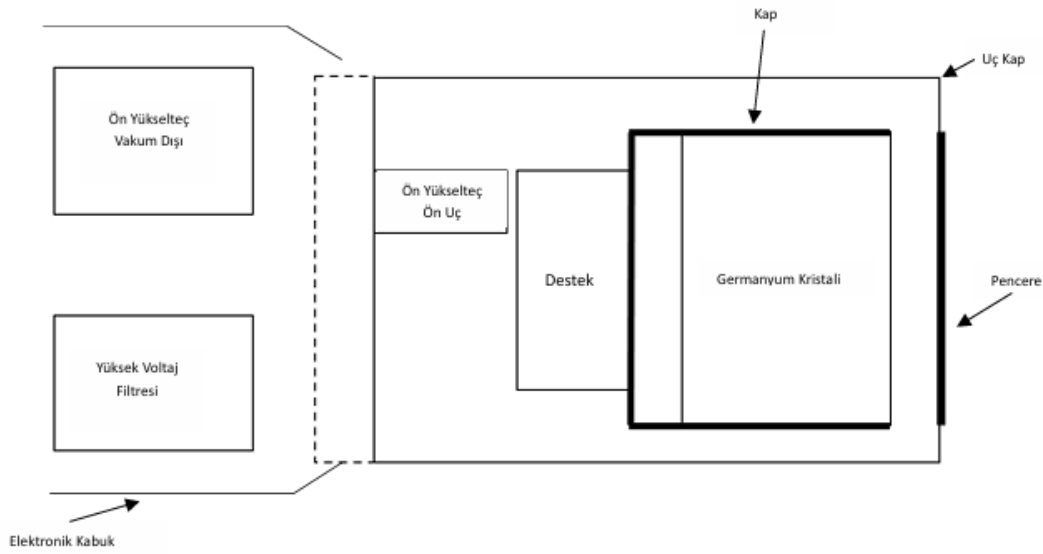
Gama spektroskopisinde kullanılan dedektörler arasında sintilasyon dedektörleri ve yarı iletken dedektörler öne çıkmaktadır. Ancak çevresel örnekler ve yapı malzemelerine yönelik çalışmaların, yüksek enerji çözünürlüğü gerektirmesi nedeniyle yarı iletken olan yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörler yaygın olarak tercih edilmektedir. HPGe dedektörler, düşük enerji farklarına sahip gama ışınlarının ayırt edilmesine imkân verecek seviyede enerji çözünürlüğü sunmaktadır (Knoll, 2010).

HPGe dedektörlerin çalışma prensibi, gama ışınlarının germanyum kristali içerisinde etkileşerek yük taşıyıcılar olarak adlandırılan elektron-deşik çiftleri oluşturmaya dayanmaktadır. Uygulanan elektrik alan sayesinde bu yük taşıyıcıları toplanmakta ve oluşan elektrik sinyali, gama ışınının dedektörde bıraktığı enerji ile orantılı olmaktadır. Germanyum kristalinin yüksek atom numarası ve yarı iletken yapısı, gama ışınlarının etkin şekilde soğurulmasını ve yüksek dedeksiyon verimini mümkün kılmaktadır (Tsoulfanidis & Landsberger, 2021).

Dedektörün temel bileşeni, yüksek saflıkta üretilmiş germanyum kristalidir. Germanyum kristali, gama ışınlarının madde ile etkileşmesi sonucu oluşan elektron-deşik çiftlerinin üretildiği aktif hacmi oluşturmaktadır ve elektriksel olarak ters

besleme altında çalıştırılarak yük taşıyıcılarının etkin bir şekilde toplanması sağlanmaktadır (Knoll, 2010).

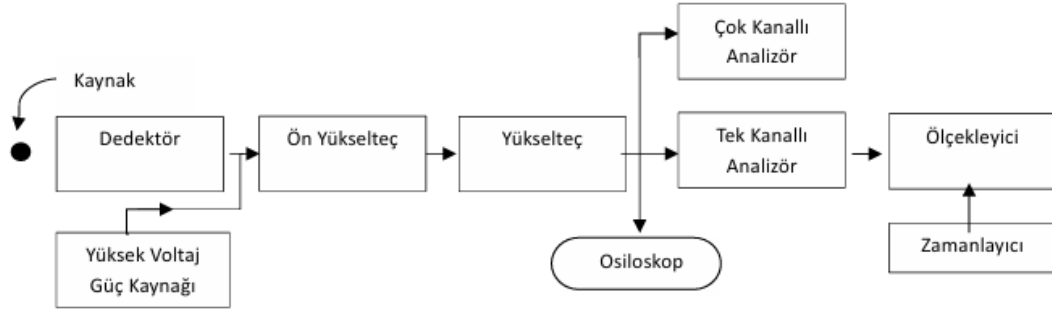
Germanyum kristali, vakumlu bir uç kap (*end cap*) içerisinde yer almakta olup, bu muhafaza genellikle alüminyum veya düşük atom numaralı malzemelerden üretilmektedir (Şekil 2.6). Muhafazanın temel amacı, kristali mekanik hasarlardan ve çevresel etkilerden korurken, gama ışınlarının dedektöre en az zayıflama ile ulaşmasını sağlamaktır. Dedektör ön yüzeyinde yer alan pencere kalınlığı ve malzemesi, özellikle düşük enerjili gama ışınlarının algılanmasında belirleyici bir rol oynamaktadır.



**Şekil 2.6 :** HPGe dedektör kapsülü (ORTEC, t.y.).

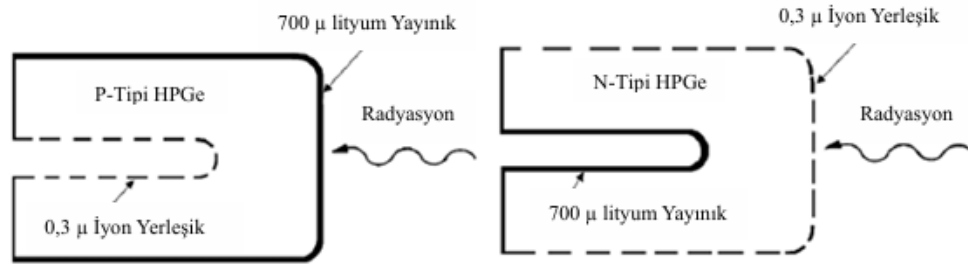
HPGe dedektör sisteminin önemli bir diğer bileşeni, soğutma mekanizmasıdır. Germanyum kristalinde termal uyarımların neden olduğu gürültüyü azaltmak amacıyla dedektörler genellikle sıvı azot kullanılarak yaklaşık 77 K sıcaklıkta çalıştırılmaktadır. Alternatif olarak, elektrikli soğutma sistemleri de günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Soğutma sistemi, dedektörün enerji çözünürlüğünü ve uzun süreli kararlılığını doğrudan etkilemektedir (Gilmore, 2024).

Dedektör kristaline entegre edilen ön yükselteç (*preamplifier*), dedektörde oluşan zayıf elektrik sinyallerinin gürültü eklemeyen yükseltilmesini sağlamaktadır. Ön yükselteçten çıkan sinyaller, yükselteç ve çok kanallı analizör (MCA) aracılığıyla işlenerek enerji spektrumuna dönüştürülmektedir. Ayrıca HPGe dedektör sistemlerinde, yüksek gerilim kaynağı, veri toplama yazılımı da ölçüm sisteminin bileşenleri arasında yer almaktadır (Şekil 2.7).



**Şekil 2.7 :** Gama spektrometrisinin temel şeması (Tsoulfanidis & Landsberger, 2021).

HPGe dedektörler, katkılama türüne bağlı olarak n-tipi ve p-tipi olmak üzere iki temel sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma, germanyum kristalinde çoğunluk taşıyıcıların türüne göre yapılmaktadır. HPGe dedektörlerin n-tipi olanlarda elektronlar, p-tipi olanlarda ise deşikler çoğunluk taşıyıcıdır (Şekil 2.8). Bu farklılık, dedektörün yapısal özelliklerini ve performans karakteristiklerini doğrudan etkilemektedir (Knoll, 2010).



**Şekil 2.8 :** p-tipi ve n-tipi HPGe dedektör (ORTEC, t.y.).

Genellikle p-tipi HPGe dedektörler daha kalın ölü tabaka (*dead layer*) yapısına sahiptir. Bu özellik, dedektörün düşük enerjili gama ışınlarına karşı duyarlılığını bir miktar azaltırken, yüksek enerjili gama ışınlarına karşı daha dayanıklı bir yapı sunmaktadır. Bu nedenle p-tipi dedektörler, yüksek enerjili gama ışınlarının ölçümünde ve yüksek aktiviteye sahip örneklerin analizinde tercih edilmektedir. Öte yandan, n-tipi HPGe dedektörler daha ince ölü tabakaya sahip olmaları nedeniyle düşük enerjili gama ışınlarının algılanmasında avantaj sağlamaktadır. Bu özellik, özellikle düşük enerjili gama yayıcı radyonüklitlerin analizinde ve düşük aktivite seviyelerinin belirlenmesinde n-tipi dedektörleri daha uygun hâle getirmektedir. Ancak n-tipi dedektörler, yüzey hasarına ve radyasyon etkilerine p-tipi dedektörlere kıyasla daha duyarlı olabilmektedir (Gilmore, 2024).

Yapı malzemeleri gibi yoğun ve heterojen matrislere sahip örneklerin gama spektrometrik analizlerinde, dedektör tipi seçimi ölçüm doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle öz soğurma etkisinin belirgin olduğu bu tür örneklerde, dedektörün enerji çözünürlüğü ve verim karakteristikleri ölçüm sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda HPGe dedektörler, yüksek çözünürlükleri sayesinde karmaşık spektrumların güvenilir biçimde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır (IAEA, 2010).

## 2.4 Fotopik Verimi Hesabı

Gama spektrometrisinde fotopik verimi, belirli bir enerjiye sahip gama ışınlarının dedektörde tüm enerjilerini kaybederek fotopik oluşturma olasılığını ifade eden temel bir dedektör parametresidir. Başka bir ifadeyle fotopik verimi, kaynaktan yayılan gama ışınlarının ne kadarının dedektör tarafından tam enerji soğurulması ile kaydedildiğini tanımlar. Bu parametre, dedektörün enerjiye, ölçüm geometrisine ve örnek özelliklerine bağlı duyarlılığını yansıttığından, gama spektrometrik ölçümlerde aktivite tayininin doğruluğu açısından kritik öneme sahiptir (IAEA, 2010).

Fotopik verimin doğru belirlenmesi, özellikle çevresel örnekler ve yapı malzemeleri gibi karmaşık ve yoğun matrislere sahip örneklerde daha da önem kazanmaktadır. Bu tür örneklerde gama ışınlarının bir kısmı dedektöre ulaşmadan önce örnek içerisinde soğurulmakta veya saçılmakta, bu durum ölçülen fotopik sayımların azalmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, fotopik verimi yalnızca dedektörün içsel özelliklerini değil, aynı zamanda ölçüm koşullarını da kapsayan bir büyüklük olarak değerlendirilmelidir.

Gama spektrometrisi kullanılarak bir radyonüklitin aktivitesi, ölçülen fotopik net sayımı ile dedektör verim parametreleri ilişkilendirilerek hesaplanmaktadır.

Bir radyoaktif kaynağın aktivite hesabı aşağıdaki (Denklem 2.1) eşitlik ile ifade edilmektedir (IAEA, 2010; Gilmore, 2024):

$$A = \frac{N}{\varepsilon(E) \cdot P\gamma(E) \cdot t} \quad (2.1)$$

Bu denklemde; A kaynağın aktivitesini (Bq), N ilgili gama enerjisine ait art alan (*background*) sayımı çıkartılmış net fotopik sayımını,  $\varepsilon(E)$  dedektörün söz konusu

enerji için fotopik verimini,  $P_\gamma(E)$  ilgili gama ışınının yayımlanma olasılığını (%) ve  $t$  ölçüm süresini (s) ifade etmektedir.

Bu eşitlikten de görüldüğü üzere, fotopik verimi aktivite hesabının paydasında yer almakta olup, verimde meydana gelen küçük bir hata dahi hesaplanan aktivite değerinde doğrudan bir sapmaya neden olmaktadır. Bu nedenle fotopik veriminin doğru belirlenmesi, gama spektrometrik ölçümlerin temel gerekliliklerinden biridir (ISO, 2018). Fotopik verimi genellikle, aktiviteleri bilinen standart radyoaktif kaynaklar kullanılarak deneysel olarak belirlenmektedir. Bu amaçla, ölçüm geometrisi sabit tutularak farklı gama enerjilerine sahip standart kaynakların spektrumları elde edilir. Her bir gama enerjisi için fotopik verimi aşağıdaki (Denklem 2.2) ifade yardımıyla hesaplanmaktadır (IAEA, 2003):

$$\varepsilon(E) = \frac{N}{A \cdot P_\gamma(E) \cdot t} \quad (2.2)$$

Bu yöntemle, dedektörün farklı enerjilerdeki yanıtı deneysel olarak belirlenmekte ve enerjiye bağlı bir fotopik verim eğrisi oluşturulmaktadır. Elde edilen deneysel verim değerleri, genellikle enerjiye bağlı sürekli bir fonksiyon elde etmek amacıyla matematiksel modellerle ifade edilmektedir. Literatürde en yaygın kullanılan yaklaşımlardan biri, fotopik verimin logaritmik enerji fonksiyonları ile modellenmesidir. Bu bağlamda sıklıkla kullanılan bir ifade aşağıdaki (Denklem 2.3) gibidir (Sima, 2001):

$$\ln \varepsilon(E) = a_0 + a_1 \ln E + a_2 (\ln E)^2 + \dots \quad (2.3)$$

Bu eşitlikte yer alan  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  katsayıları, deneysel verim noktalarına en küçük kareler yöntemi uygulanarak belirlenmektedir. Bu yaklaşım, ölçüm sırasında doğrudan kalibre edilmemiş ara enerjiler için de güvenilir fotopik verim değerlerinin interpolasyon yoluyla hesaplanmasına olanak tanımaktadır.

Yapı malzemeleri, toprak gibi doğal radyoaktivitenin ölçüldüğü örneklerde, yoğunluk, matris etkisi gibi nedenlerle nokta kaynaklar yerine örnek geometrisindeki kalibrasyon kaynakları ile fotopik kalibrasyonu gerçekleştirilmektedir.

## 2.5 Radyoaktivite Hesabı

Radyoaktivite hesabı, bir örnek içerisinde bulunan radyoaktif çekirdeklerin birim zamanda gerçekleştirdiği bozunma sayısının nicel olarak belirlenmesini amaçlamaktadır. Aktivite, radyasyon ölçümlerinin temel çıktısı olup, çevresel radyasyon seviyelerinin değerlendirilmesi, radyolojik risk analizleri ve ulusal–uluslararası sınır değerlerle karşılaştırmalar açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle yapı malzemeleri, çevresel örnekler ve doğal kaynaklı materyaller için yapılan gama spektrometrik ölçümlerde, doğru radyoaktivite hesapları güvenilir sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır (UNSCEAR, 2000).

Gama spektrometrisi yöntemiyle bir örneğin radyoaktivitesi (Bq/kg) aşağıdaki (Denklem 2.4) ifade ile hesaplanmaktadır:

$$A = \frac{N}{\varepsilon(E) \cdot P\gamma(E) \cdot t \cdot m} \cdot C_{toplam} \quad (2.4)$$

Burada m, örneğin kütlesini (kg),  $C_{toplam}$ , örneğin özelliklerine ve ölçüm koşullarına bağlı farklı düzeltme faktörlerinin bileşiminden oluşan toplam düzeltme faktörüdür.

Net sayımın hesaplanmasında, art alan katkısının uygun şekilde çıkarılması gerekmektedir. Net fotopik sayımı aşağıdaki (Denklem 2.5) ifade ile belirlenmektedir:

$$N = N_{toplam} - N_{art\ alan} \quad (2.5)$$

Doğal radyoaktivite çalışmalarında sıklıkla karşılaşılan bir durum, ölçülen radyonüklitin doğrudan kendisine ait gama ışınının bulunmaması veya zayıf olmasıdır. Bu tür durumlarda, özellikle  $^{238}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$  bozunma serilerinde, ana radyonüklit yerine kısa yarı ömürlü bozunma ürünlerine ait gama ışınları kullanılarak dolaylı aktivite tayini yapılmaktadır. Bu yaklaşım, seri içerisinde seküler denge varsayımının geçerli olduğu durumlarda uygulanabilmektedir (UNSCEAR, 2000). Bu durumda,  $^{226}\text{Ra}$  aktivitesi,  $^{214}\text{Pb}$  veya  $^{214}\text{Bi}$  izotoplarına ait gama enerjileri kullanılarak hesaplanabilmektedir (IAEA, 2013). Benzer şekilde  $^{232}\text{Th}$  serisi için  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{212}\text{Pb}$  ve  $^{208}\text{Tl}$  izotoplarının gama enerjileri yaygın olarak tercih edilmektedir.

Bir radyonüklite ait birden fazla uygun gama enerjisinin bulunması durumunda, aktivite hesabı her bir gama enerjisi için ayrı ayrı yapılmakta ve daha güvenilir bir

sonuç elde etmek amacıyla ağırlıklı ortalama aktivite değeri hesaplanmaktadır. Bu yaklaşım aşağıdaki (Denklem 2.6) şekilde ifade edilir (Gilmore, 2024):

$$A_{ort} = \frac{\sum A_i \omega_i}{\sum A_i} \quad (2.6)$$

Burada  $A_i$ , i'inci gama enerjisinden hesaplanan aktiviteyi,  $\omega_i$  ağırlık faktörünü ifade etmektedir. Ağırlık faktörü aşağıdaki (Denklem 2.7) şekilde ifade edilir:

$$\omega_i = \frac{1}{u_i^2} \quad (2.7)$$

Burada  $u_i$ , i'inci gama enerjisinden hesaplanan aktivitenin belirsizliğidir.

Toplam düzeltme faktörü  $C$ ;  $C_D$ , radyoaktif bozunma düzeltmesini;  $C_R$ , rasgele yığılma düzeltmesini;  $C_T$ , gerçek çakışma düzeltmesini ve  $C_S$ , gama ışını öz soğurma düzeltmesini içermektedir. (Denklem 2.8)

$$C = C_D \times C_R \times C_T \times C_S \quad (2.8)$$

Doğal radyoaktivite ölçümlerinde, ölçülen radyonüklitlerin yarı ömürlerinin uzun olması nedeniyle radyoaktif bozunma düzeltmesine gerek duyulmazken, örneklerin düşük aktiviteye sahip olması sonucunda dedektörün ölü zamanı %10'un altında kalmakta ve bu nedenle rasgele yığılma düzeltmesi ihmal edilebilir düzeydedir. Gerçek çakışma düzeltmesi ise bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur. Bu çalışma kapsamında uygulanan öz soğurma düzeltmesi aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

### 2.5.1 Öz soğurma faktörü

Öz soğurma düzeltmesi, yoğun ve hacimli örneklerde gama spektrometrisinde dikkate alınması gereken en kritik düzeltme faktörlerinden biridir. Öz soğurma etkisi, doğal radyoaktivite ölçümlerinde büyük hacimli örneklerin kullanılması nedeniyle özellikle düşük enerji bölgesinde (<200 keV) belirgin bir sorun oluşturmaktadır. Öz soğurma etkisi nedeniyle örnek içerisinden yayılan gama ışınlarının bir kısmı, dedektöre ulaşmadan önce örnek matrisi tarafından soğurulmaktadır. Bu durum, ölçülen sayımların azalmasına neden olmaktadır (Cutshall ve ark., 1983).

Gama ışınlarının bir malzemeden geçerken uğradığı zayıflama Beer–Lambert yasası ile tanımlanır: (Denklem 2.9)

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.9)$$

Burada  $\mu$  doğrusal zayıflatma katsayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ) ve  $x$  gama ışınının malzeme içinde kat ettiği mesafedir (m). Kütle zayıflatma katsayısı ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) kullanılarak ifade şu şekilde yazılabilir: (Denklem 2.10)

$$I = I_0 e^{-(\mu/\rho)\rho x} \quad (2.10)$$

Burada  $\rho$  malzemenin yoğunluğudur ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ). Bu çalışmada öz soğurma faktörü iki farklı yöntemle belirlenmiştir.

#### 2.5.1.1 Öz soğurma faktörünün hesaplanması

Öz soğurma faktörünün teorik olarak hesaplanması için malzemenin kimyasal bileşimi bilinmelidir. Silindir kap geometrisi için öz soğurma faktörü aşağıdaki (Denklem 2.11) ifade ile hesaplanmaktadır:

$$C_s = \frac{\mu/\rho \cdot \rho \cdot x}{1 - \exp(\mu/\rho \cdot \rho \cdot x)} \quad (2.11)$$

Burada  $\mu/\rho$  malzemenin kütle zayıflatma katsayısı ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ),  $\rho$ , malzemenin yoğunluğu ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $x$  malzemenin kalınlığıdır (cm).

#### 2.5.1.2 Öz soğurma faktörünün deneysel olarak belirlenmesi

Kimyasal bileşimi bilinmeyen malzemenin öz soğurma faktörleri deneysel olarak belirlenebilir. Silindir kap geometrisinde, belirli bir homojen hacme sahip örnek üzerine yerleştirilen nokta kaynak geometrisinde referans ortam havaya göre öz soğurma faktörü aşağıdaki (Denklem 2.12) gibi hesaplanır (Cutshall ve diğerleri, 1983).

$$C_s = \frac{\ln\left(\frac{N_x}{N_0}\right)}{\left(\frac{N_x}{N_0}\right) - 1} \quad (2.12)$$

Burada  $N_x$ , ilgilenilen enerjideki gama ışınlarının belirli bir ölçüm geometrisindeki malzemeden geçmesi sonucunda elde edilen fotopikin sayım hızı (sayım/s);  $N_0$ ,

ilgilenilen enerjideki gama ışınlarının, aynı ölçüm geometrisinde, referans ortam havadaki sayım hızıdır (sayım/s).

## 2.6 Ölçülebilir En Küçük Aktivite

Gama spektrometrik ölçümlerde elde edilen sonuçların güvenilirliği, yalnızca hesaplanan aktivite değerlerine değil, aynı zamanda sistemin ölçebileceği en küçük aktivite değerinin doğru biçimde belirlenmesine de bağlıdır. Bu amaçla kullanılan ölçülebilir en küçük aktivite (*Minimum Detectable Activity* – MDA), belirli bir güven düzeyinde, ölçüm sistemi tarafından art alan sinyalden ayırt edilebilen en düşük aktivite miktarını ifade etmektedir. MDA kavramı, düşük seviyeli doğal radyoaktivite içeren örneklerin analizinde kritik bir öneme sahiptir (Currie, 1968).

MDA hesabının temelinde istatistiksel belirsizlikler yer almakta olup, ölçülen sayımların Poisson dağılımına uyduğu varsayılmaktadır. Bu yaklaşım ilk olarak Currie tarafından tanımlanmış ve daha sonra uluslararası standartlar tarafından kabul edilmiştir (ISO, 2018; IAEA, 2010). Currie yöntemine göre, bir radyonüklitin tespit edilebilir olması için ölçülen net sayımın, art alan dalgalanmalarının belirli bir güven katsayısını aşması gerekmektedir.

Bir gama enerjisi için belirleme sınırı (*limit of detection* –  $L_D$ ) aşağıdaki (Denklem 2.13) ifade ile verilmektedir:

$$L_D = 2,71 + 3,29\sqrt{2B} \quad (2.13)$$

Burada B, ilgili fotopik bölgesinde Compton sürekliliğinden kaynaklanan art alan sayımını ifade etmekte olup formül %95 güven düzeyi için gösterilmiştir (Currie, 1968).

Ölçülebilir en küçük aktivite (Bq/kg) aşağıdaki (Denklem 2.14) eşitlik ile hesaplanmaktadır:

$$MDA = \frac{L_D}{\varepsilon(E).P\gamma(E).t.m} \quad (2.14)$$

Bu ifade, MDA değerinin yalnızca istatistiksel art alan seviyesine değil; aynı zamanda ölçüm süresi, fotopik verimi ve örnek miktarına bağlı olduğunu göstermektedir.

## 2.7 Ölçüm Belirsizliği Hesabı

Gama spektrometrik ölçümlerde elde edilen aktivite değerleri, ölçüm sürecine dâhil olan çeşitli istatistiksel ve sistematik belirsizlikler nedeniyle belirli bir hata payı içermektedir. Ölçüm belirsizliği, bir ölçüm sonucuna güvenilirlik kazandıran temel parametrelerden biri olup, raporlanan aktivite değerlerinin doğruluğu ve karşılaştırılabilirliği açısından zorunlu olarak değerlendirilmelidir (ISO, 2018).

Gama spektrometrisinde aktivite hesabı 2.4 numaralı denklemle ifade edilmektedir. Bu eşitlikte yer alan her bir büyüklük, ölçüm belirsizliğine katkıda bulunan bağımsız bir değişken olarak değerlendirilmektedir. Uluslararası kabul görmüş ölçüm belirsizliği yaklaşımına göre, bu değişkenlere ait belirsizlikler hata yayılımı yöntemi kullanılarak birleştirilmektedir (BIPM, 2008). Birleştirilmiş standart belirsizlik 2.15 numaralı denklemle ifade edilmektedir.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i)} \quad (2.15)$$

Burada ölçülen değer,  $x_i$  ölçülen değeri hesaplamada kullanılan bağımsız değişkenler ve  $u(x_i)$  bu değişkenlerin standart belirsizliğidir.

Birleştirilmiş standart belirsizlik değeri  $u_c(y)$ , gerek duyulduğunda (daha yüksek güvenilirlikle ifade edilmek istendiğinde) bir  $k$  kapsama faktörü ile çarpılarak genişletilmiş belirsizlik olarak aşağıdaki gibi ifade edilir. (Denklem 2.16) Genellikle %95 güven düzeyi için  $k = 2$  değeri kullanılmaktadır (BIPM, 2008).

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (2.16)$$

Bağımsız değişkenlerin belirsizlikleri kullanılarak deneysel verim ve radyoaktivite değerlerinin birleşik standart belirsizlikleri  $u_c(\varepsilon)$  (Denklem 2.17) ve  $u_c(A)$  (Denklem 2.18) hata yayılımı yöntemiyle aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$\left(\frac{u_c(\varepsilon)}{\varepsilon}\right)^2 = \left(\frac{u(N)}{N}\right)^2 + \left(\frac{u(A)}{A}\right)^2 + \left(\frac{u(P_\gamma)}{P_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(C)}{C}\right)^2 \quad (2.17)$$

$$\left(\frac{u_c(A)}{A}\right)^2 = \left(\frac{u(N)}{N}\right)^2 + \left(\frac{u(\varepsilon)}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{u(P_\gamma)}{P_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(C)}{C}\right)^2 \quad (2.18)$$

Burada  $u(N)$  fotopikin net sayımının belirsizliği,  $u(\epsilon)$  fotopik veriminin belirsizliği,  $u(P_\gamma)$  gama ışınının yayınlanma olasılığının belirsizliği,  $u(m)$  örnek veya referans malzeme miktarının belirsizliği ve  $u(C)$  düzeltme faktörlerinin belirsizliğidir.

Bu çalışmada raporlanan tüm ölçüm belirsizlikleri, %68 güven düzeyine karşılık gelen kapsama faktörü  $k=1$  olacak şekilde hesaplanmış ve sunulmuştur.

## 2.8 Radyum Eşdeğer Aktivitesi ve Aktivite Konsantrasyon İndisi

Bir malzemede bulunan doğal radyonüklitler farklı gama enerjileri ve doz katkıları nedeniyle iç mekânlarda değişen radyolojik riskler oluşturmaktadır. Bu nedenle, mazlemelerin radyolojik açıdan değerlendirilmesinde, farklı radyonüklitlerin etkilerini tek bir parametre altında toplayan indislerin kullanılması yaygın bir yaklaşımdır. Bu amaçla en sık kullanılan parametrelerden biri radyum eşdeğer aktivitesi ( $Ra_{eq}$ )'dir.

Radyum eşdeğer aktivitesi, yapı malzemelerinde bulunan  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklitlerinin gama radyasyonuna katkılarını tek bir değerle ifade etmek amacıyla tanımlanmıştır. Bu kavram, farklı radyonüklitlerin oluşturduğu gama dozlarının, belirli katsayılar yardımıyla  $^{226}\text{Ra}$ 'ya eşdeğer bir etki yaratacak şekilde normalize edilmesine dayanmaktadır. Radyum eşdeğer aktivitesi aşağıdaki (Denklem 2.19) eşitlik ile hesaplanmaktadır (Beretka, 1985):

$$Ra_{eq} = A(^{226}\text{Ra}) + 1,43 \times A(^{232}\text{Th}) + 0,077 \times A(^{40}\text{K}) \quad (2.19)$$

Radyum eşdeğer aktivitesi, 370 Bq/kg  $^{226}\text{Ra}$ , 259 Bq/kg  $^{232}\text{Th}$  ve 4810 Bq/kg  $^{40}\text{K}$ 'ın aynı gama ışını doz hızlarını ürettiği varsayımına dayanır.  $Ra_{eq} \leq 370$  Bq/kg koşulunun sağlanması durumunda, yıllık etkin dozun yaklaşık 1 mSv sınırının altında kalacağı kabul edilmektedir (UNSCEAR, 2000).

Avrupa Birliği mevzuatlarında yapı malzemelerinin radyolojik uygunluğunu değerlendirmek amacıyla aktivite konsantrasyon indisi (I) tanımlanmıştır (European Commission, 1999). Aktivite konsantrasyon indisi 2.20 numaralı denklemdeki gibi ifade edilir.

$$I = \frac{A(^{226}\text{Ra})}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{A(^{232}\text{Th})}{200 \text{ Bq/kg}} + \frac{A(^{40}\text{K})}{3000 \text{ Bq/kg}} \quad (2.20)$$

Paydada yer alan katsayılar, yapı malzemelerinin kullanımından kaynaklanan yıllık etkin dozun 1 mSv sınırını aşmaması esasına göre belirlenmiştir.  $I \leq 1$  olması durumunda, yapı malzemesinin radyolojik açıdan konutlarda kullanımının güvenli olduğu kabul edilmektedir.  $I$  değerinin 1'den büyük olması hâlinde ise, malzemenin kullanım alanına bağlı olarak ayrıntılı doz değerlendirmelerinin yapılması önerilmektedir.



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1 Çimento Örnekleri

Bu çalışmada kullanılan çimento örneklerine ait bilgiler Çizelge 3.1’de sunulmuştur. Örnekler, Afyon, Mersin, Kocaeli ve Bolu illerinden temin edilmiş olup farklı çimento türlerini temsil edecek şekilde seçilmiştir. Çalışma kapsamında CEM I, CEM II ve CEM IV sınıfına ait toplam 12 adet çimento örneği incelenmiştir.

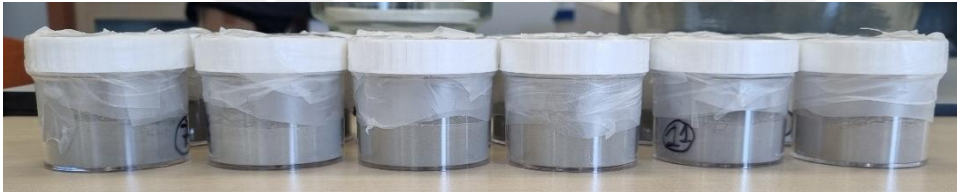
**Çizelge 3.1 : Çimento örneklerine ait bilgiler.**

| Örnek | İl        | Çimento Türü | Kuru Kütle (g) |
|-------|-----------|--------------|----------------|
| Ç-1   | Afyon     | CEM I        | 40,30          |
| Ç-2   | Afyon     | CEM I        | 40,25          |
| Ç-3   | Mersin    | CEM I        | 40,16          |
| Ç-4   | Kocaeli   | CEM I        | 40,13          |
| Ç-5   | Bolu      | CEM I        | 40,24          |
| Ç-6   | Eskişehir | CEM I        | 40,40          |
| Ç-7   | Afyon     | CEM II       | 39,96          |
| Ç-8   | Mersin    | CEM II       | 39,95          |
| Ç-9   | Mersin    | CEM II       | 40,00          |
| Ç-10  | Kocaeli   | CEM II       | 39,93          |
| Ç-11  | Afyon     | CEM IV       | 40,22          |
| Ç-12  | Bolu      | CEM IV       | 40,06          |

CEM I portland çimentosu, kütlece %95–100 oranında Portland çimentosu klinkeri ve en fazla %5 oranında minör bileşen içeren katkısız çimentolardır. Mineral katkı içeriğinin bulunmaması nedeniyle erken yaş dayanımı yüksektir ve genel amaçlı beton uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. TS EN 197-1 standardına göre CEM I çimentoları, 32,5 MPa, 42,5 MPa ve 52,5 MPa olmak üzere farklı dayanım sınıflarında üretilmektedir (TÜRK ÇİMENTO, 2021). CEM II Portland kompoze çimentosu, Portland klinkerine ek olarak yüksek fırın cürufu, doğal veya kalsine puzolan, uçucu kül, kalker, silis dumanı veya pişmiş şist gibi mineral katkılar içeren çimentolardır. Klinker oranı, alt tipine bağlı olarak yaklaşık %65–94 arasında değişmektedir. Mineral katkı türü ve miktarına bağlı olarak CEM II çimentoları;

mekanik özellikler, dayanıklılık ve çevresel etki açısından farklı performanslar gösterebilmektedir (TÜRK ÇİMENTO, 2021). CEM IV puzolanik çimento, klinkere ilave olarak doğal veya kalsine edilmiş puzolanik malzemeler içeren çimentolardır. Kütlece puzolan oranı CEM IV/A tipinde %11–35, CEM IV/B tipinde ise %36–55 aralığındadır. Bu çimentolar, hidrasyon sırasında puzolanik reaksiyonlar sayesinde uzun vadede dayanım gelişimi ve kimyasal dayanıklılık açısından avantaj sağlamaktadır. Özellikle sülfata dayanıklılık ve düşük hidrasyon ısı gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir (TÜRK ÇİMENTO, 2021).

Örnekler İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Radyoaktif İzleyiciler ve Uygulamaları Laboratuvarı'nda hazırlanmıştır. Çimento örnekleri analitik terazide tartılarak çapı 5,5 cm, yüksekliği 5 cm olan silindirik plastik kaplara yerleştirilmiştir ve radon gazının kaçmasını önlemek için parafilm ile kapatılmıştır (Şekil 3.1).  $^{226}\text{Ra}$  ve bozunma ürünlerinin seküler dengesini sağlamak için, ölçümler yapılmadan önce örnekler en az 30 gün süreyle bekletilmiştir.

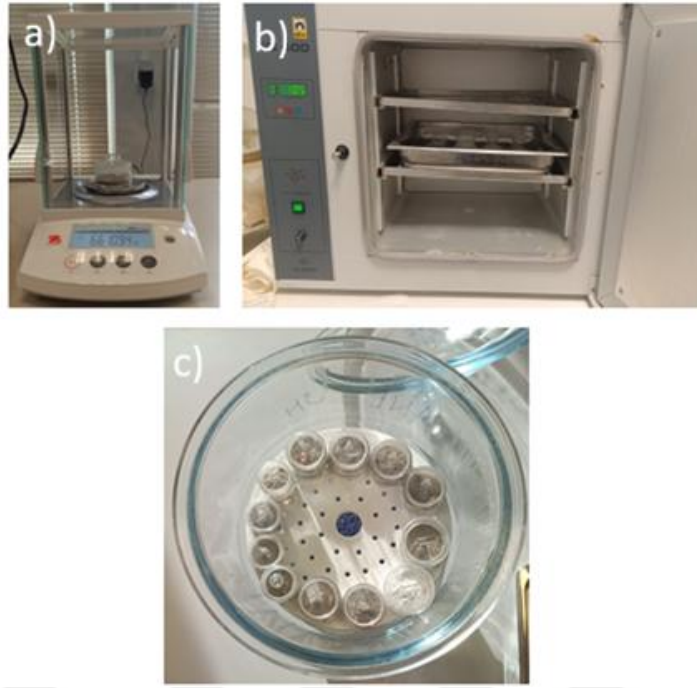


**Şekil 3.1 :** Paketlenmiş çimento örnekleri.

Örneklerin kuru kütle tayini, gravimetrik yöntem kullanılarak ASTM D2216-19 standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2). İlk aşamada boş vezin kaplarının kütleleri belirlenmiştir. Yaklaşık 10 g yaş kütleyle sahip örnekler tartılarak vezin kaplarına alınmıştır. Yaş örnekleri içeren kaplar, 105 °C sıcaklıkta 12 saat süreyle etüvde kurutulmuştur. Kurutma işleminin ardından kaplar, ortamdan nem almalarını önlemek amacıyla desikatöre alınarak oda sıcaklığına ulaşmaları beklenmiştir. Daha sonra kurutulmuş örnekleri içeren kaplar tartılmış ve örneklerin nem içerikleri (%) aşağıdaki (Denklem 3.1) ifade ile hesaplanmıştır:

$$Nem(\%) = \frac{m_{cms} - m_{cds}}{m_{cds} - m_c} \times 100 \quad (3.1)$$

Burada  $m_c$ , boş kap kütlesi,  $m_{cms}$  kap+yaş örnek kütlesi ve  $m_{cds}$  kap+etüvde kurutulmuş örnek kütlesidir.



**Şekil 3.2 :** Çimento örneklerinin kuru kütlelerinin belirlenmesi, a) tartım, b) etüvde kurutma, c) desikatörde bekletme.

### 3.2 Standart Nokta Gama Kaynakları

Gama spektrometresinin enerji kalibrasyonunun yapılması ve çimento örneklerinin ve öz soğurma faktörlerinin deneysel olarak belirlenmesinde sertifikalı gama nokta kaynakları kullanılmıştır (Şekil 3.3).



**Şekil 3.3 :** Standart gama kaynakları kaynakları.

Çizelge 3.2’de her bir kaynağa ait gama enerjileri, ilgili gama ışıını yayınlanma olasılıkları ( $P_\gamma$ ), sertifikalı aktiviteleri ve sertifika tarihleri verilmiştir.

**Çizelge 3.2 : Standart gama kaynaklarına ait bilgiler.**

| Kaynak            | Üretici                       | Enerji (keV) | P $\gamma$ (%) | Sertifika Aktivitesi (kBq) | Sertifika Tarihi |
|-------------------|-------------------------------|--------------|----------------|----------------------------|------------------|
| <sup>133</sup> Ba | Eckert&Ziegler                | 53,16        | 2,14           | 38,7                       | 1.9.2025         |
|                   |                               | 80,99        | 33,31          |                            |                  |
|                   |                               | 276,40       | 7,13           |                            |                  |
|                   |                               | 302,01       | 18,31          |                            |                  |
|                   |                               | 356,01       | 62,05          |                            |                  |
|                   |                               | 383,85       | 8,94           |                            |                  |
| <sup>241</sup> Am | Isotope Product Lab.          | 59,50        | 35,92          | 36,19                      | 1.12.2006        |
|                   |                               | 121,78       | 28,41          |                            |                  |
|                   |                               | 244,70       | 7,55           |                            |                  |
|                   |                               | 344,28       | 26,59          |                            |                  |
|                   |                               | 411,13       | 2,24           |                            |                  |
|                   |                               | 443,97       | 2,80           |                            |                  |
| <sup>152</sup> Eu | Eckert&Ziegler                | 778,92       | 12,97          | 42,2                       | 2.9.2025         |
|                   |                               | 867,39       | 4,24           |                            |                  |
|                   |                               | 964,06       | 14,50          |                            |                  |
|                   |                               | 1085,84      | 10,13          |                            |                  |
|                   |                               | 1089,77      | 1,73           |                            |                  |
|                   |                               | 1112,09      | 13,41          |                            |                  |
| <sup>57</sup> Co  | Çek Metroloji Enstitüsü (CMI) | 1299,15      | 1,63           | 53,19                      | 27.9.2023        |
|                   |                               | 1408,02      | 20,85          |                            |                  |
|                   |                               | 122,10       | 85,49          |                            |                  |
| <sup>137</sup> Cs | Çek Metroloji Enstitüsü (CMI) | 136,50       | 10,71          | 17,58                      | 30.6.2014        |
|                   |                               | 661,70       | 85,01          |                            |                  |
| <sup>54</sup> Mn  | Çek Metroloji Enstitüsü (CMI) | 834,80       | 99,98          | 49,01                      | 27.9.2023        |

### 3.3 Referans Malzemeler

Gama spektrometresinin verim kalibrasyonu, Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) tarafından sağlanan IAEA-312 toprak referans malzemesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (IAEA, 2000). Verim kalibrasyonu, sertifika değerleri (Çizelge 3.3) esas alınarak ve çimento örnekleriyle aynı örnek–dedektör geometrisi korunacak şekilde uygulanmıştır.

**Çizelge 3.3 : IAEA-312 toprak referans malzemesi özellikleri (IAEA, 2000).**

| Radyonüklit       | Önerilen Değer<br>(Bq/kg) | %95 Güven Aralığı<br>(Bq/kg) | Referans<br>Tarihi |
|-------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------|
| <sup>226</sup> Ra | 269                       | 250-287 Bq/kg                | 30 Ocak 1988       |

Uygulanan ölçüm ve analiz yönteminin doğruluğu ise Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA)’ndan alınan IAEA-447 yosun-toprak sertifikalı referans malzemesi kullanılarak test edilmiştir (IAEA, 2012). Bu referans malzemesi için sertifikasındaki <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th ve <sup>40</sup>K aktivite konsantrasyonları kullanılmıştır (Çizelge 3.4).

**Çizelge 3.4 : IAEA-447 yosun-toprak referans malzemesi özellikleri.**

| Radyonüklit       | Sertifika Değeri (Bq/kg) | Belirsizlik (k=1)<br>(Bq/kg) | Referans Tarihi |
|-------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------|
| <sup>226</sup> Ra | 25,1                     | 2,0                          | 01 Mart 2021    |
| <sup>232</sup> Th | 37,3                     | 2,0                          |                 |
| <sup>40</sup> K   | 550                      | 18                           |                 |

IAEA-312 referans malzemesi silindirik plastik kaba 40,1687 g, IAEA-447 referans malzemesi ise silindirik plastik kaba 40,5397 g tartılarak yerleştirilmiştir. Radon gazının kaçışını önlemek amacıyla her iki kap parafilm ile kapatılmıştır. <sup>226</sup>Ra ve bozunma ürünleri arasında seküler dengenin sağlanabilmesi için, ölçümler den önce en az 30 gün süreyle bekletilmiştir.

Gama spektrometrik analizde kullanılan yöntemin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, deneysel olarak elde edilen aktivite konsantrasyonları ile sertifikalı referans değerler arasındaki uyum  $E_n$ -sayısı ( $E_n$ -number) kullanılarak istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır.  $E_n$ -sayısı, ölçülen değer ile referans değer arasındaki farkın, her iki değere ait birleşik belirsizlik dikkate alınarak normalize edilmesini sağlayan bir uygunluk kriteridir (ISO, 2022).  $E_n$ -sayısı 3.2 numaralı denklemle ifade edilir.

$$E_n = \frac{|A_{ölçüm} - A_{sertifika}|}{\sqrt{U_{ölçüm}^2 - U_{sertifika}^2}} \quad (3.2)$$

Burada  $A_{ölçüm}$  ölçülen aktivite değeri,  $A_{sertifika}$  sertifikalı aktivite değeri,  $U_{ölçüm}$  ve  $U_{sertifika}$  sırasıyla ölçülen ve sertifikalı aktivite değerinin genişletilmiş belirsizliğidir ( $k=2$ ). Eğer  $E_n \leq 1$  ise ölçüm sonucu sertifika değeri ile istatistiksel olarak uyumludur,  $E_n > 1$  ise ölçüm sonucu sertifika değeri ile istatistiksel olarak uyumsuzdur.

### 3.4 Gama Spektrometresi

Radyoaktivite ölçümleri İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Düşük Seviyeli Radyoaktif Ölçümleri Laboratuvarı'nda bulunan p-tipi eş eksenli HPGe dedektör (ORTEC GEM-C40) kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4). Dedektörün özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

**Çizelge 3.5 : HPGe dedektörün özellikleri.**

| Tanım                                                  | Değer                  |
|--------------------------------------------------------|------------------------|
| Enerji ayırma gücü (FWHM, $^{60}\text{Co}$ – 1,33 MeV) | 1,8 keV                |
| Pik – Compton oranı ( $^{60}\text{Co}$ )               | 64:1                   |
| Bağıl verim ( $^{60}\text{Co}$ – 1,33 MeV)             | %40                    |
| Kristal çapı                                           | 61,9 mm                |
| Kristal uzunluğu                                       | 69,4 mm                |
| İç boşluk yarıçapı                                     | 8,5 mm                 |
| İç boşluk derinliği                                    | 56,2 mm                |
| Karbon Fiber Pencere kalınlığı                         | 0,9 mm                 |
| Dedektör kristali ile uç kabı arasındaki mesafe        | 4 mm                   |
| Dış ölü tabaka kalınlığı ve malzemesi                  | 0,7 mm Ge/Li           |
| İç ölü tabaka kalınlığı ve malzemesi                   | 0,3 $\mu\text{m}$ Ge/B |

Ortam kaynaklı art alan radyasyonunun etkisini en aza indirmek amacıyla dedektör kurşun zırh ile zırhlanmıştır. Dedektörün sinyal işleme sistemi Ortec DSPEC LF dijital sinyal işlemcisinden oluşmakta olup, sistem Maestro yazılımı ile kontrol edilmektedir.

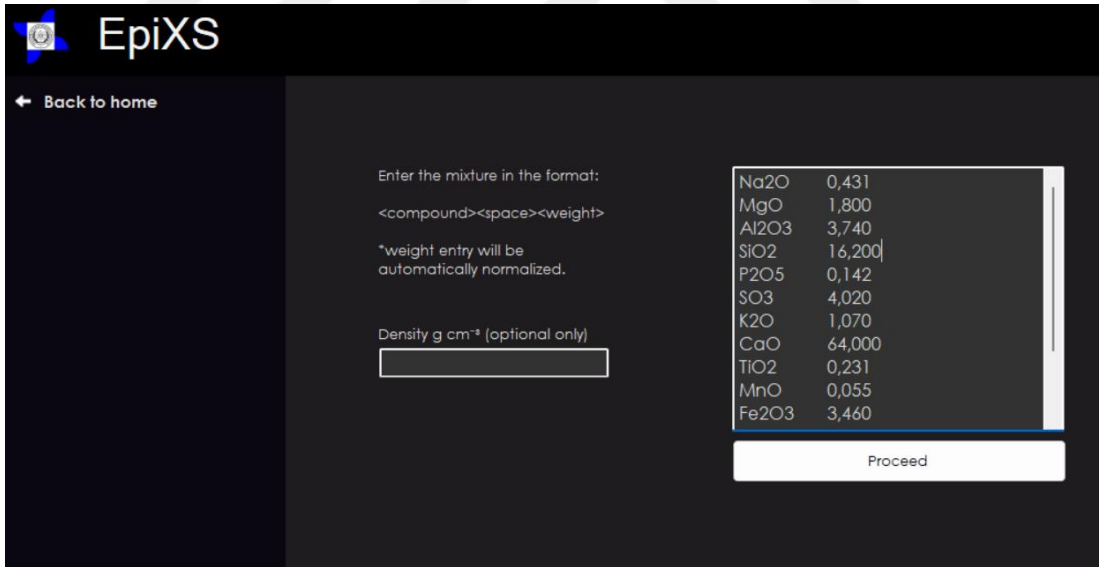


**Şekil 3.4 :** İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Düşük Seviyeli Radyoaktivite Ölçümleri Laboratuvarı'nda bulunan p-tipi eş eksenli HPGe dedektörlü gama spektrometresi.

### 3.5 Öz Soğurma Faktörlerinin Belirlenmesi

Çalışma kapsamında öz soğurma faktörlerinin belirlenmesi amacıyla hem teorik hemde deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Teorik öz soğurma faktörlerinin hesaplanabilmesi için öncelikle çimento örneklerinin kimyasal kompozisyonları WD-XRF (Dalga Boyu Dağılımlı X-Işını Floresans) yöntemi ile belirlenmiştir. WD-XRF analizleri sonucunda elde edilen oksit yüzdeleri kullanılarak örneklerin elementel bileşimleri oluşturulmuştur. Bu veriler, kütle zayıflatma katsayılarının hesaplanmasında kullanılmak üzere EpiXS yazılımına girdi olarak tanımlanmıştır. EpiXS yazılımı aracılığıyla, çimento örneklerinin kimyasal bileşimlerine bağlı olarak Çizelge 3.2’de verilen gama ışını enerjileri için kütle zayıflatma katsayıları hesaplanmıştır. Bu kütle zayıflatma katsayıları kullanılarak Eşitlik 2.11’den çimento örneklerinin ilgilenilen enerjilerdeki öz soğurma faktörleri hesaplanmıştır.

Belirlenen enerji aralığı, düşük enerjili gama fotonlarında öz soğurma etkisinin belirginliğini ve enerji arttıkça bu etkinin değişimini değerlendirebilmek amacıyla seçilmiştir. Yazılıma ait örnek bir arayüz görüntüsü Şekil 3.5’te sunulmaktadır.



Şekil 3.5 : EpiXS yazılımı örnek görüntüsü (Filipin Nükleer Araştırma Enstitüsü, t.y.).

Deneysel öz soğurma faktörlerini belirlemek amacıyla, Çizelge 3.2’de verilen her bir kaynak öncelikle boş kap üzerinde ölçülerek ilgili gama ışını enerjilerindeki sayımlar ( $N_0$ ) elde edilmiştir. Ardından aynı kaynaklar çimento örnekleri üzerinde ölçülmüş ve ilgili gama enerjilerinde zayıflamaya uğramış sayımlar ( $N_x$ ) belirlenmiştir. Tüm ölçümler 3600 s süreyle gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.6 :** Deneysel öz soğurma faktörlerinin hesaplanmasında kullanılan ölçüm geometrisine ilişkin örnek görsel.

Daha sonra, Eşitlik 2.12 kullanılarak çimento örneklerinin ilgilenilen enerjilerdeki deneysel öz soğurma faktörleri hesaplanmıştır. Bu yöntem sayesinde, örnek matrisi ve gama enerjisine bağlı öz soğurma etkileri doğrudan deneysel olarak ortaya konulmuştur.

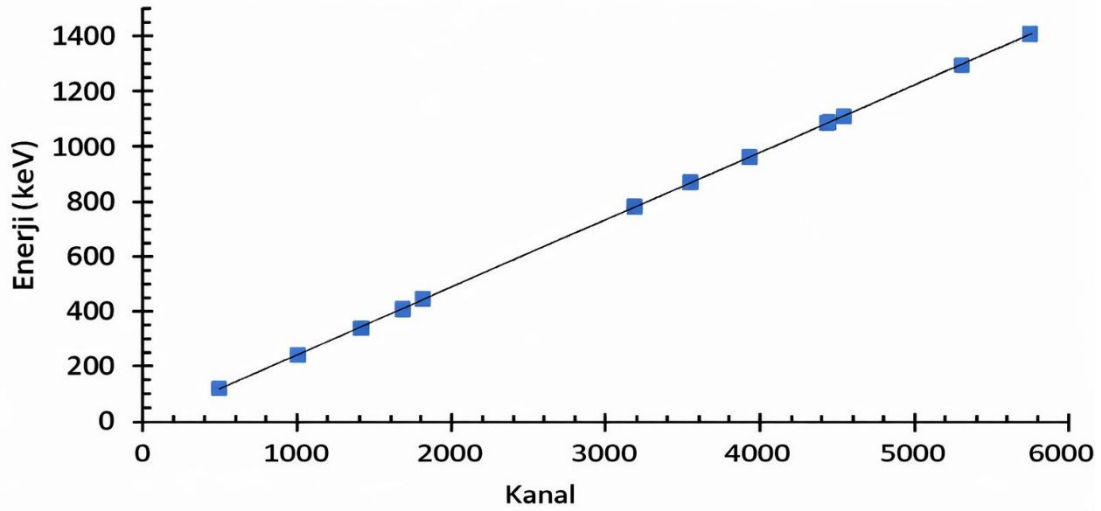
Bölüm 3.8’de sunulan verim kalibrasyonunda ve Bölüm 3.9’da sunulan radyoaktivite hesaplamalarında, deneysel öz soğurma faktörlerinin logaritmik bir fonksiyona uyarlanmasıyla elde edilen faktörler kullanılmıştır. (Denklem 3.3)

$$\ln C_s(E) = a_0 + a_1 \ln E + a_2 (\ln E)^2 + a_3 (\ln E)^3 + a_4 (\ln E)^4 \quad (3.3)$$

### 3.6 Enerji Kalibrasyonu

Enerji kalibrasyonu, spektrumda gözlenen fotopiklerin tepe noktalarına karşılık gelen kanal numaralarının, bilinen gama ışını enerjileri ile ilişkilendirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu amaçla, fotopik sayımlarının en yüksek olduğu kanallar ve bu kanallara karşılık gelen bilinen enerji değerleri sırasıyla sisteme tanımlanır. Elde edilen kalibrasyon eğrisi, doğrusal olmayan sapmaları da hesaba katabilmek için ikinci dereceden bir polinoma ( $y = a + bx + cx^2$ ) uyarlanır. Kullanılan radyonüklit sayısının artırılması, kalibrasyonun daha geniş bir enerji aralığını kapsamasını sağlayarak sonuçların güvenilirliğini artırır. Bu çalışmada enerji kalibrasyonunda özellikleri

Çizelge 3.2’de verilen  $^{152}\text{Eu}$  kaynağı kullanılmıştır.  $^{152}\text{Eu}$  kaynağının Çizelge 3.2’de verilen 13 gama ışını enerjisi kullanılarak elde edilen enerji kalibrasyonu eğrisi Şekil 3.7’de verilmiştir.



**Enerji Kalibrasyon Uyumlaması:**

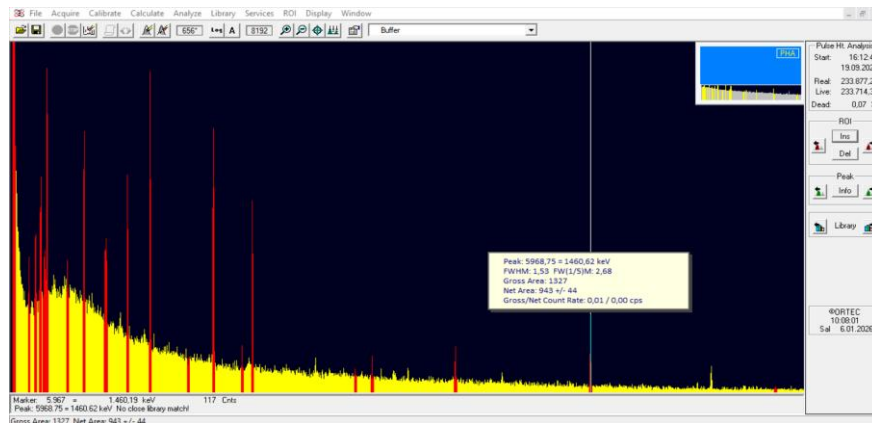
$$\text{Enerji} = 0,0849 + 0,244763 \cdot \text{Kanal} - 1,09047 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Kanal}^2$$

$$\text{FWHM (Kanal)} = 3,8675 + 0,000469 \cdot \text{Kanal} + 3,57599 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Kanal}^2$$

**Şekil 3.7 : Enerji kalibrasyonu eğrisi.**

### 3.7 Art Alan Spektrumunun Ölçümü

Ölçümler öncesinde ortamın art alan radyoaktivite ölçümü yapılmıştır. Art alan ölçümü, dedektörde örnek olmaksızın 233000 s süre ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen art alan spektrumu, referans malzemelerin ve örneklerin spektrumlarından çıkarılarak ilgili gama ışını enerjilerindeki net fotopik sayımları hesaplanmıştır. Art alan radyasyonuna ait gama ışını spektrumu Şekil 3.8’de sunulmaktadır.



**Şekil 3.8 : Art alan ölçümüne ait gama ışını spektrumu.**

### 3.8 Verim Kalibrasyonu

Deneysel fotopik verim değerlerinin belirlenmesi ve verim kalibrasyon eğrisinin elde edilmesi amacıyla IAEA-312 toprak referans malzemesi kullanılmıştır. IAEA-312 toprak referans malzemesinin gama spektrometrik ölçümü, çimento örneklerinin aktivitelerinin belirleneceği örnek–dedektör geometrisi korunarak 99000 s süreyle gerçekleştirilmiştir.

Çimento örneklerinin ve referans malzemenin kimyasal bileşimleri ve yoğunlukları farklı olduğundan Bölüm 3.5’te anlatıldığı gibi öz soğurma düzeltmesi hesaba katılmıştır. Deneysel verim değerleri ve belirsizlikleri Bölüm 3.2 ve 3.3’te anlatıldığı gibi hesaplanmıştır. Deneysel verim değerleri Eşitlik 2.3 ile verilen logaritmik bir fonksiyona uyarlanarak verim kalibrasyonu eğrisi elde edilmiştir.

IAEA-312 referans malzemesinin ölçülen gama ışını spektrumu Maestro yazılımıyla analiz edilmiştir ve analiz dosyasının bir bölümü Şekil 3.9’da tamamı ise Ek A’da verilmiştir. Analiz dosyasından <sup>226</sup>Ra radyonüklitinin ürün radyonüklitlerinden yayınlanan gama ışını enerjilerindeki net sayımlar ve belirsizlikleri alınarak deneysel verim değerleri ve belirsizlikleri hesaplanmıştır (Çizelge 3.6).

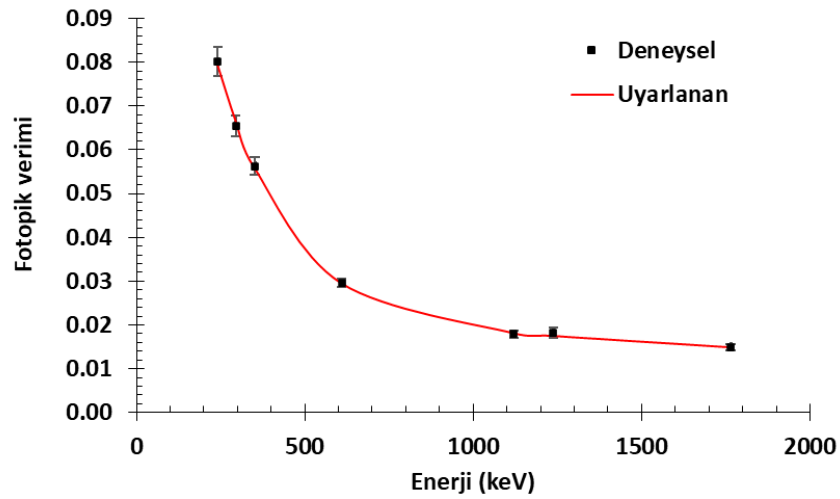
| Detector #1 ACQ 22-Eki-2025 at 11:35:02 RT = 99660,5 LT = 99000,0<br>DSROL DSPEC-LF |             |        |        |        |     |          |      |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------|--------|--------|-----|----------|------|----------|
| ROI#                                                                                | RANGE( keV) |        | GROSS  | NET    | +/- | CENTROID | FWHM | FW(1/5)M |
| 1                                                                                   | 4,25        | 8,16   | 5503   | 1242   | 78  | 6,45     | 0,90 | 1,43     |
| 2                                                                                   | 8,90        | 20,89  | 34561  | 11936  | 362 | 15,75    | 1,64 | 2,31     |
| 3                                                                                   | 38,02       | 41,94  | 8697   | 1463   | 98  | 39,87    | 0,75 | 1,12     |
| 4                                                                                   | 44,63       | 55,16  | 25636  | 6331   | 305 | 46,60    | 0,80 | 1,25     |
| 5                                                                                   | 55,89       | 59,81  | 10196  | 500    | 107 | 57,90    | 0,59 | 0,87     |
| 6                                                                                   | 61,52       | 65,44  | 16507  | 4418   | 134 | 63,44    | 0,89 | 1,34     |
| 7                                                                                   | 65,93       | 69,84  | 13276  | 539    | 122 | 67,82    | 0,72 | 1,27     |
| 8                                                                                   | 70,82       | 95,54  | 174062 | 108361 | 938 | 77,22    | 0,86 | 1,35     |
| 9                                                                                   | 97,50       | 101,90 | 9080   | 1708   | 109 | 99,59    | 0,91 | 1,42     |
| 10                                                                                  | 103,62      | 108,02 | 9137   | 2242   | 108 | 105,51   | 1,32 | 1,94     |
| 11                                                                                  | 110,72      | 115,12 | 7151   | -19    | 99  | 112,92   | 0,71 | 0,87     |
| 12                                                                                  | 126,87      | 131,27 | 9954   | 3347   | 111 | 129,18   | 0,89 | 1,36     |
| 13                                                                                  | 141,80      | 146,20 | 6962   | 692    | 97  | 143,92   | 0,63 | 1,81     |
| 14                                                                                  | 151,83      | 156,24 | 7269   | 1545   | 97  | 154,13   | 0,96 | 1,57     |
| 15                                                                                  | 161,13      | 168,48 | 9438   | 138    | 164 | 163,43   | 0,69 | 1,24     |
| 16                                                                                  | 174,59      | 179,00 | 5207   | 15     | 85  | 176,79   | 0,53 | 0,80     |
| 17                                                                                  | 183,90      | 188,30 | 11616  | 6324   | 117 | 186,08   | 1,13 | 1,72     |
| 18                                                                                  | 197,36      | 201,76 | 5251   | 316    | 84  | 199,44   | 0,57 | 1,29     |
| 19                                                                                  | 207,15      | 211,55 | 9005   | 4402   | 104 | 209,27   | 0,95 | 1,50     |
| 20                                                                                  | 213,75      | 218,16 | 4530   | 355    | 78  | 216,01   | 1,04 | 1,31     |
| 21                                                                                  | 233,82      | 244,35 | 68381  | 59713  | 314 | 238,63   | 0,99 | 1,53     |
| 22                                                                                  | 250,22      | 258,30 | 5829   | 36     | 137 | 252,52   | 0,74 | 1,05     |
| 23                                                                                  | 268,09      | 272,49 | 6692   | 3543   | 89  | 270,18   | 1,12 | 1,78     |
| 24                                                                                  | 275,18      | 279,59 | 4630   | 1514   | 76  | 277,31   | 0,97 | 1,52     |
| 25                                                                                  | 285,71      | 290,11 | 3025   | 294    | 64  | 288,06   | 0,61 | 1,17     |
| 26                                                                                  | 293,05      | 297,46 | 14685  | 11975  | 125 | 295,19   | 1,03 | 1,58     |
| 27                                                                                  | 297,94      | 302,35 | 5221   | 2694   | 79  | 300,07   | 1,04 | 1,62     |

Şekil 3.9 : IAEA-312 analiz dosyası (300 keV’e kadar).

**Çizelge 3.6 :** Fotopik verimleri ve belirsizlikleri (k=1).

| Radyonüklit       | Enerji (keV) | $P_\gamma$ (%) | $u(P_\gamma)$ (%) | $\varepsilon$ | $u(\varepsilon)$ |
|-------------------|--------------|----------------|-------------------|---------------|------------------|
| $^{214}\text{Pb}$ | 242,00       | 7,27           | 0,02              | 0,0801        | 0,003            |
| $^{214}\text{Pb}$ | 295,22       | 18,41          | 0,04              | 0,0656        | 0,002            |
| $^{214}\text{Pb}$ | 351,93       | 35,60          | 0,07              | 0,0563        | 0,002            |
| $^{214}\text{Bi}$ | 609,31       | 45,49          | 0,19              | 0,0296        | 0,001            |
| $^{214}\text{Bi}$ | 1120,29      | 14,91          | 0,03              | 0,0179        | 0,001            |
| $^{214}\text{Bi}$ | 1238,11      | 5,83           | 0,01              | 0,0181        | 0,001            |
| $^{214}\text{Bi}$ | 1764,49      | 15,31          | 0,05              | 0,0149        | 0,001            |

Deneyisel verim değerlerinin logaritmik bir fonksiyona uyarlanmasıyla elde edilen verim kalibrasyonu eğrisi Şekil 3.10’da ve uyarlanan fonksiyonun katsayıları ve  $R^2$  değeri Şekil 3.11’de verilmiştir.



**Şekil 3.10 :** Fotopik verim kalibrasyonu eğrisi.

**Yakınsama**

İterasyon: 16

$R^2_{yy}(x)$ : 0.9994105E+00

Veri dosyası: Efficiency-Soil312-Fscorected-3112.txt

**Fonksiyon:**

$$Y = A + B \cdot \log(X) + C \cdot \log(X)^2 + D \cdot \log(X)^3 + E \cdot \log(X)^4$$

Serbestlik Derecesi: 2

Ki-Kare (ChiSq): 0.2000000E+01

İndirgenmiş Ki-Kare: 0.1000000E+01

**Parametreler: Ortalama**

A = -0.1086440704463E+02

B = 0.7276655599355E+01

C = -0.1771287053991E+01

D = 0.1876426165457E+00

E = -0.7339530494585E-02

**Belirsizlikler: Standart Sapma (SD)**

SIGMAA = 0.6761371745518E+01

SIGMAB = 0.4150499982446E+01

SIGMAC = 0.9518474075550E+00

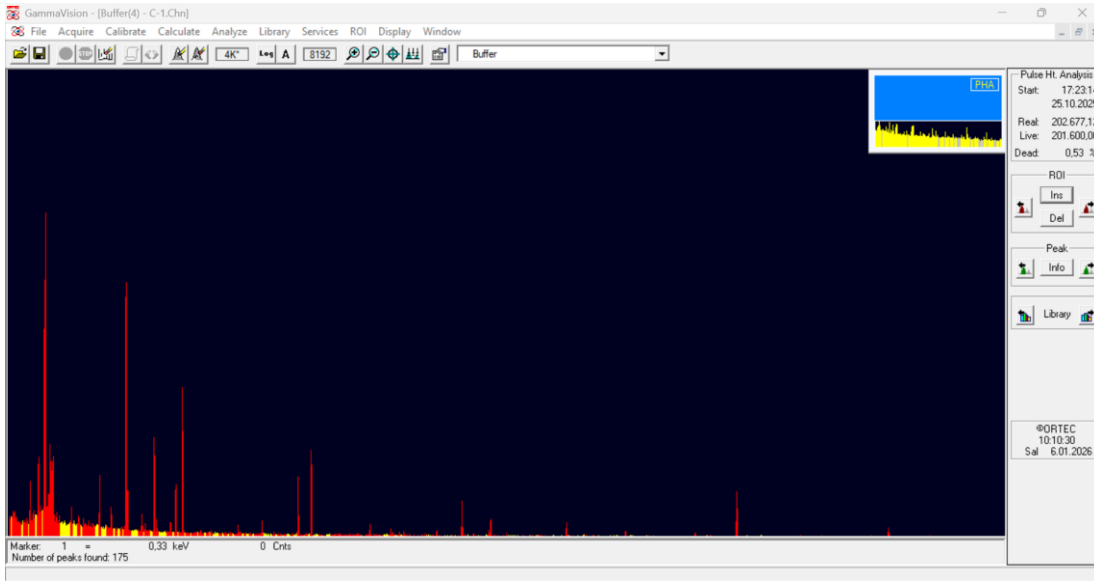
SIGMAD = 0.9666183815407E-01

SIGMAE = 0.3667883124074E-02

**Şekil 3.11 :** Verim kalibrasyonu eğrisine ait katsayılar.

### 3.9 Radyoaktivite Ölçümü

Çimento örneklerinin doğal radyoaktivite düzeylerinin belirlenmesi amacıyla  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  doğal radyonüklitlerine ait aktivite konsantrasyonları gama spektrometrik yöntem kullanılarak ölçülmüştür. Çimento örnekleri için iki günden uzun süreyle ölçüm yapılmıştır. Uzun sayım süresi, düşük seviyeli doğal radyoaktivite içeren çimento örneklerinde fotopik sayımlarındaki belirsizliğin azaltılması amacıyla tercih edilmiştir. Çimento örneklerine ait ölçüm spektrumlarına örnek olarak, Ç-1 örneğine ait gama ışını spektrumu Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12 : Ç-1 örneğine ait gama ışını spektrumu.

Yöntemin doğrulanması için IAEA-447 yosun/toprak referans malzemesinin aktivite konsantrasyonları ölçülmüştür. IAEA-447 malzemesinin gama spektrometrik ölçümü, çimento örneklerinin aktivitelerinin ölçüldüğü örnek–dedektör geometrisi korunarak 99000 s süreyle gerçekleştirilmiştir.

Uranyum serisindeki radyonüklitlerden  $^{226}\text{Ra}$ ’nın radyoaktivitesi, ürünleri  $^{214}\text{Pb}$ ’ün 295,2 keV ve 351,9 keV ve  $^{214}\text{Bi}$ ’ün 609,3 keV ve 1120,29 keV gama ışını enerjilerinden hesaplanmıştır.  $^{232}\text{Th}$  radyoaktivitesini belirlemek için ürünleri  $^{208}\text{Tl}$ ’in 583,2 keV gama ışını enerjisi ve  $^{228}\text{Ac}$ ’in 338,3 keV gama ışını enerjileri kullanılmıştır.  $^{40}\text{K}$  radyoaktivitesi 1460,8 keV gama ışını enerjisi kullanılarak belirlenmiştir (Çizelge 3.7).

Aktivite konsantrasyonları Eşitlik 2.4 kullanılarak hesaplanmış, bu değerlere ait belirsizlikler ise Eşitlik 2.18 ile belirlenmiştir.  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{232}\text{Th}$  izotoplarının aktivite

konsantrasyonları birden fazla karakteristik gama ışını enerjisinden hesaplandığından, ortalama aktivite konsantrasyonları Eşitlik 2.6 ile hesaplanmıştır.

**Çizelge 3.7 :** Radyoaktivitenin hesaplanmasında kullanılan gama ışını enerjileri.

| Radyonüklit       | Bozunma ürünü     | E (keV) | $I_\gamma \pm u(I_\gamma)(\%)$ |
|-------------------|-------------------|---------|--------------------------------|
| $^{226}\text{Ra}$ | $^{214}\text{Pb}$ | 295,22  | $18,41 \pm 0,04$               |
|                   |                   | 351,93  | $35,60 \pm 0,07$               |
|                   | $^{214}\text{Bi}$ | 609,31  | $45,49 \pm 0,19$               |
|                   | $^{214}\text{Bi}$ | 1120,29 | $14,91 \pm 0,03$               |
| $^{232}\text{Th}$ | $^{228}\text{Ac}$ | 338,32  | $11,4 \pm 0,4$                 |
|                   | $^{208}\text{Tl}$ | 583,19  | $30,2 \pm 0,3$                 |
| $^{40}\text{K}$   |                   | 1460,82 | $10,55 \pm 0,11$               |

Ölçülebilir en küçük aktivite değerleri Eşitlik 2.14 ile hesaplanmıştır.



#### 4. BULGULAR

Tez çalışmasının bu bölümünde, çimento örneklerinin kimyasal kompozisyonu ve teorik olarak hesaplanan ve deneysel olarak belirlenen öz soğurma faktörleri, HPGe dedektörlü gama spektrometresinin enerji ve verim kalibrasyonu, çimento örneklerine ait aktivite konsantrasyonları ile radyolojik değerlendirme sonuçları sunulmuştur.

##### 4.1 Çimento Örneklerinin Kimyasal Kompozisyonu

Teorik öz soğurma faktörlerinin hesaplanması için çimento örneklerinin kimyasal bileşenleri Gazi Üniversitesi Temel ve Mühendislik Bilimleri Merkez Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi (GÜTMAM)'da WD-XRF analizi ile belirlenmiştir (Çizelge 4.1).

Çimento örneklerinin ana oksit bileşimleri, çimento türleri dikkate alınarak değerlendirildiğinde, kimyasal kompozisyon ile çimento sınıflandırması arasında belirgin bir ilişki olduğu görülmektedir. CEM I türü çimentolar (Ç-1–Ç-6), genel olarak yüksek CaO (%60,4–65,6) ve orta düzey SiO<sub>2</sub> (%16,2–17,9) içerikleri ile karakterize edilmektedir. Bu durum, söz konusu örneklerin klinker oranı yüksek, klasik Portland çimentosu yapısına sahip olduğunu göstermektedir. CEM I örneklerinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%3,7–4,2) ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%2,8–3,8) oranlarının görece sınırlı olması, klinker fazlarının dengeli bir dağılım sergilediğine işaret etmektedir.

CEM II türü çimentolarda (Ç-7–Ç-10), CEM I'e kıyasla CaO içeriğinin azaldığı (%57,8–63,6), buna karşılık SiO<sub>2</sub> (%14,8–20,4) ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%3,6–6,3) oranlarının arttığı gözlenmektedir. Özellikle Mersin kaynaklı Ç-8 ve Ç-9 örneklerinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiO<sub>2</sub> içeriklerindeki artış, bu çimentolarda uçucu kül, doğal puzolan veya cüruf gibi mineral katkıların varlığını göstermektedir. Bu katkıların varlığı, çimentonun yalnızca mekanik özelliklerini değil, aynı zamanda doğal radyoaktivite içeriğini ve radyolojik davranışını da etkileyebilecek bir faktör olarak değerlendirilmektedir.

CEM IV türü çimentolarda (Ç-11 ve Ç-12) ise CaO oranı önemli ölçüde azalırken (%56,5 ve %40,2), SiO<sub>2</sub> (%17,8 ve %32,1) ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%4,96 ve %8,90) içeriklerinin

belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Özellikle Ç-12 örneğindeki yüksek SiO<sub>2</sub> ve alkali oksit (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) oranları, bu çimentonun yüksek oranda puzolanik katkı içerdiğini göstermektedir. Alkali oksitlerin artışı, özellikle <sup>40</sup>K kaynaklı doğal radyoaktivite açısından önem taşımaktadır.

Tüm örnekler birlikte değerlendirildiğinde, CEM I'den CEM IV'e doğru gidildikçe CaO içeriğinin azaldığı, buna karşılık SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve alkali oksit içeriklerinin arttığı açıkça görülmektedir. Bu kimyasal değişim, çimento türüne bağlı olarak ölçülen aktivite konsantrasyonları ve hesaplanan öz soğurma faktörleri üzerinde etkili olabilecek önemli bir parametredir. Dolayısıyla çimento örneklerinin radyolojik değerlendirilmesinde, çimento türü ve kimyasal bileşimi birlikte ele alınmalıdır.



**Çizelge 4.1 : Çimento örneklerinin kimyasal bileşimleri (%).**

| Örnek | CaO   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | TiO <sub>2</sub> |
|-------|-------|------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|------|------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|
| Ç-1   | 64,00 | 16,20            | 3,74                           | 4,02            | 3,46                           | 1,80 | 1,07             | 0,43              | 0,14                          | 0,23             |
| Ç-2   | 65,60 | 17,90            | 4,22                           | 3,62            | 3,79                           | 1,72 | 0,46             | 0,13              | 0,11                          | 0,26             |
| Ç-3   | 65,00 | 16,60            | 3,81                           | 4,53            | 2,81                           | 2,16 | 0,99             | 0,42              | 0,08                          | 0,30             |
| Ç-4   | 60,40 | 17,00            | 4,14                           | 4,09            | 2,99                           | 2,46 | 0,82             | 0,13              | 0,08                          | 0,31             |
| Ç-5   | 62,40 | 16,60            | 4,16                           | 3,69            | 3,42                           | 1,34 | 0,68             | 0,63              | 0,09                          | 0,43             |
| Ç-6   | 65,50 | 17,70            | 3,85                           | 4,03            | 0,24                           | 0,81 | 0,22             | 0,47              | 0,05                          | -                |
| Ç-7   | 63,60 | 15,30            | 3,58                           | 3,89            | 3,13                           | 1,82 | 0,98             | 0,45              | 0,13                          | 0,22             |
| Ç-8   | 61,00 | 16,10            | 5,48                           | 3,32            | 2,80                           | 1,72 | 0,89             | 0,37              | 0,16                          | 0,35             |
| Ç-9   | 57,80 | 20,40            | 6,28                           | 4,41            | 3,14                           | 2,25 | 1,03             | 0,50              | 0,16                          | 0,35             |
| Ç-10  | 62,10 | 14,80            | 3,58                           | 4,43            | 3,04                           | 1,49 | 0,69             | 0,12              | 0,07                          | 0,25             |
| Ç-11  | 56,50 | 17,80            | 4,96                           | 4,09            | 3,71                           | 2,99 | 0,86             | 0,31              | 0,10                          | 0,27             |
| Ç-12  | 40,20 | 32,10            | 8,90                           | 4,20            | 3,68                           | 1,45 | 1,23             | 1,69              | 0,19                          | 0,57             |

#### 4.1.1 Çimento örneklerinin öz soğurma faktörleri

Çimento örneklerinin öz soğurma faktörleri Bölüm 3.5'te anlatıldığı gibi deneysel olarak belirlenmiş ve teorik olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.2-Çizelge 4.4'te verilen deneysel ve hesaplanan öz soğurma faktörleri arasında genel olarak iyi bir uyum vardır. Ç-1'den Ç-12'ye kadar tüm örneklerde enerjiye bağlı eğilim aynıdır. Bu durum, çimentolar arasındaki küçük bileşim ve yoğunluk farklarının, özellikle orta ve yüksek enerjilerde, öz soğurma düzeltmesini önemli ölçüde etkilemediğini göstermektedir. Düşük enerji bölgesinde ( $\approx 50-60$  keV) tüm çimento örneklerinde deneysel ve teorik değerler arasındaki % farklar en yüksek değerlerine (%5-10 arasında) ulaşmaktadır. Bu sapma beklenen bir sonuçtur çünkü düşük enerjilerde öz soğurma etkisi daha güçlüdür ve örnek yoğunluğu farkları sonuçlara daha hassas yansımaktadır. Orta enerji bölgesinde % farklar yoğunlukla %0-3 aralığındadır. Birçok enerjide deneysel ve hesaplanan değerler neredeyse bire bir örtüşmektedir. Yüksek enerji bölgesinde ( $\geq 600$  keV) öz soğurma etkisinin zayıflaması nedeniyle % farklar büyük ölçüde %0-2 aralığındadır. Elde edilen sonuçlar, bu yaklaşımın radyoaktivite hesaplamalarında güvenle kullanılabileceğini ve deneysel verilerle tutarlı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bölüm 4.5'te sunulan radyoaktivite hesaplamalarında Çizelge 4.5'te yer alan deneysel öz soğurma faktörlerinin logaritmik fonksiyona uyarlanmasıyla elde edilen faktörler kullanılmıştır. (Çizelge 4.5)

**Çizelge 4.2 : Ç-1 –Ç-4 örneklerinin deneysel ve hesaplanan öz soğurma faktörleri.**

| Radyonüklit       | Enerji (keV) | Ç-1      |            |        | Ç-2      |            |        | Ç-3      |            |        | Ç-4      |            |        |
|-------------------|--------------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|
|                   |              | Deneysel | Hesaplanan | % Fark | Deneysel | Hesaplanan | % Fark | Deneysel | Hesaplanan | % Fark | Deneysel | Hesaplanan | % Fark |
| <sup>133</sup> Ba | 53,16        | 1,49     | 1,36       | 8,90   | 1,47     | 1,36       | 7,60   | 1,51     | 1,36       | 9,81   | 1,49     | 1,36       | 9,05   |
| <sup>241</sup> Am | 59,50        | 1,39     | 1,31       | 5,76   | 1,37     | 1,31       | 4,82   | 1,41     | 1,31       | 7,27   | 1,39     | 1,31       | 6,26   |
| <sup>133</sup> Ba | 81,00        | 1,23     | 1,21       | 1,50   | 1,21     | 1,21       | 0,32   | 1,23     | 1,21       | 1,64   | 1,22     | 1,20       | 1,22   |
| <sup>152</sup> Eu | 121,78       | 1,14     | 1,14       | 0,10   | 1,13     | 1,14       | 1,43   | 1,15     | 1,14       | 0,44   | 1,14     | 1,14       | 0,20   |
| <sup>57</sup> Co  | 122,10       | 1,15     | 1,14       | 1,08   | 1,15     | 1,14       | 0,54   | 1,16     | 1,14       | 1,96   | 1,17     | 1,14       | 2,85   |
| <sup>57</sup> Co  | 136,50       | 1,15     | 1,13       | 1,79   | 1,14     | 1,13       | 1,02   | 1,16     | 1,13       | 2,86   | 1,17     | 1,13       | 3,25   |
| <sup>152</sup> Eu | 244,70       | 1,09     | 1,10       | 0,51   | 1,08     | 1,10       | 1,78   | 1,10     | 1,10       | 0,10   | 1,10     | 1,10       | 0,26   |
| <sup>133</sup> Ba | 276,40       | 1,07     | 1,09       | 2,34   | 1,06     | 1,09       | 3,25   | 1,07     | 1,09       | 2,00   | 1,07     | 1,09       | 2,05   |
| <sup>133</sup> Ba | 302,01       | 1,09     | 1,09       | 0,07   | 1,08     | 1,09       | 1,34   | 1,09     | 1,09       | 0,09   | 1,09     | 1,09       | 0,10   |
| <sup>133</sup> Ba | 356,01       | 1,08     | 1,08       | 0,83   | 1,05     | 1,08       | 3,61   | 1,07     | 1,08       | 0,90   | 1,07     | 1,08       | 0,92   |
| <sup>133</sup> Ba | 383,85       | 1,09     | 1,08       | 0,53   | 1,07     | 1,08       | 0,94   | 1,09     | 1,08       | 0,55   | 1,09     | 1,08       | 0,43   |
| <sup>152</sup> Eu | 443,97       | 1,06     | 1,08       | 1,92   | 1,05     | 1,08       | 2,73   | 1,06     | 1,08       | 1,59   | 1,06     | 1,08       | 1,87   |
| <sup>137</sup> Cs | 661,70       | 1,06     | 1,07       | 0,56   | 1,06     | 1,07       | 0,61   | 1,07     | 1,07       | 0,85   | 1,07     | 1,07       | 0,68   |
| <sup>152</sup> Eu | 778,92       | 1,07     | 1,06       | 0,53   | 1,06     | 1,06       | 0,41   | 1,07     | 1,06       | 0,93   | 1,07     | 1,06       | 0,91   |
| <sup>54</sup> Mn  | 834,80       | 1,06     | 1,06       | 0,50   | 1,06     | 1,06       | 0,35   | 1,08     | 1,06       | 1,55   | 1,07     | 1,06       | 0,73   |
| <sup>152</sup> Eu | 964,06       | 1,04     | 1,05       | 1,60   | 1,03     | 1,05       | 2,78   | 1,04     | 1,05       | 1,61   | 1,04     | 1,06       | 1,41   |
| <sup>152</sup> Eu | 1085,84      | 1,05     | 1,05       | 0,13   | 1,04     | 1,05       | 1,61   | 1,05     | 1,05       | 0,13   | 1,05     | 1,05       | 0,05   |
| <sup>152</sup> Eu | 1112,09      | 1,03     | 1,05       | 1,67   | 1,02     | 1,05       | 2,61   | 1,04     | 1,05       | 1,51   | 1,04     | 1,05       | 1,22   |
| <sup>152</sup> Eu | 1408,02      | 1,03     | 1,05       | 1,65   | 1,02     | 1,05       | 2,62   | 1,03     | 1,05       | 1,69   | 1,03     | 1,05       | 1,72   |

**Çizelge 4.3 : Ç-5 – Ç-8 örneklerinin deneysel ve hesaplanan öz soğurma faktörleri.**

| Radyonüklit       | Enerji (keV) | Ç-5      |            |        | Ç-6      |            |        | Ç-7      |            |        | Ç-8      |            |        |
|-------------------|--------------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|
|                   |              | Deneysel | Hesaplanan | % Fark | Deneysel | Hesaplanan | % Fark | Deneysel | Hesaplanan | % Fark | Deneysel | Hesaplanan | % Fark |
| <sup>133</sup> Ba | 53,16        | 1,48     | 1,36       | 8,35   | 1,48     | 1,35       | 8,35   | 1,49     | 1,36       | 9,02   | 1,46     | 1,36       | 7,20   |
| <sup>241</sup> Am | 59,50        | 1,40     | 1,31       | 6,26   | 1,38     | 1,30       | 5,80   | 1,39     | 1,31       | 5,83   | 1,37     | 1,30       | 4,56   |
| <sup>133</sup> Ba | 81,00        | 1,22     | 1,21       | 1,13   | 1,21     | 1,20       | 0,85   | 1,23     | 1,21       | 1,59   | 1,21     | 1,20       | 0,64   |
| <sup>152</sup> Eu | 121,78       | 1,13     | 1,14       | 0,84   | 1,14     | 1,14       | 0,07   | 1,14     | 1,14       | 0,12   | 1,14     | 1,14       | 0,20   |
| <sup>57</sup> Co  | 122,10       | 1,17     | 1,14       | 2,41   | 1,17     | 1,14       | 2,82   | 1,17     | 1,14       | 2,46   | 1,16     | 1,14       | 2,10   |
| <sup>57</sup> Co  | 136,50       | 1,16     | 1,13       | 2,75   | 1,17     | 1,13       | 3,28   | 1,17     | 1,13       | 3,42   | 1,16     | 1,13       | 2,71   |
| <sup>152</sup> Eu | 244,70       | 1,09     | 1,10       | 1,16   | 1,10     | 1,10       | 0,19   | 1,09     | 1,10       | 0,29   | 1,09     | 1,10       | 0,97   |
| <sup>133</sup> Ba | 276,40       | 1,06     | 1,09       | 2,89   | 1,07     | 1,09       | 2,20   | 1,07     | 1,09       | 1,80   | 1,07     | 1,09       | 2,13   |
| <sup>133</sup> Ba | 302,01       | 1,08     | 1,09       | 0,77   | 1,09     | 1,09       | 0,41   | 1,09     | 1,09       | 0,13   | 1,09     | 1,09       | 0,20   |
| <sup>133</sup> Ba | 356,01       | 1,07     | 1,08       | 1,51   | 1,07     | 1,08       | 1,25   | 1,08     | 1,08       | 0,47   | 1,07     | 1,08       | 0,99   |
| <sup>133</sup> Ba | 383,85       | 1,08     | 1,08       | 0,07   | 1,09     | 1,08       | 0,42   | 1,09     | 1,08       | 0,89   | 1,08     | 1,08       | 0,27   |
| <sup>152</sup> Eu | 443,97       | 1,05     | 1,08       | 2,34   | 1,06     | 1,08       | 1,55   | 1,05     | 1,08       | 2,18   | 1,06     | 1,08       | 1,42   |
| <sup>137</sup> Cs | 661,70       | 1,07     | 1,07       | 0,32   | 1,07     | 1,07       | 0,51   | 1,06     | 1,06       | 0,67   | 1,07     | 1,06       | 0,67   |
| <sup>152</sup> Eu | 778,92       | 1,06     | 1,06       | 0,08   | 1,07     | 1,06       | 0,75   | 1,07     | 1,06       | 0,76   | 1,07     | 1,06       | 0,72   |
| <sup>54</sup> Mn  | 834,80       | 1,07     | 1,06       | 1,23   | 1,07     | 1,06       | 1,04   | 1,08     | 1,06       | 1,73   | 1,07     | 1,06       | 1,31   |
| <sup>152</sup> Eu | 964,06       | 1,03     | 1,05       | 2,68   | 1,04     | 1,06       | 1,60   | 1,04     | 1,05       | 1,43   | 1,04     | 1,05       | 1,59   |
| <sup>152</sup> Eu | 1085,84      | 1,04     | 1,05       | 0,80   | 1,05     | 1,05       | 0,06   | 1,05     | 1,05       | 0,00   | 1,05     | 1,05       | 0,52   |
| <sup>152</sup> Eu | 1112,09      | 1,01     | 1,05       | 4,11   | 1,04     | 1,05       | 1,33   | 1,04     | 1,05       | 1,21   | 1,03     | 1,05       | 1,79   |
| <sup>152</sup> Eu | 1408,02      | 1,02     | 1,05       | 2,44   | 1,03     | 1,05       | 1,11   | 1,03     | 1,05       | 1,53   | 1,03     | 1,05       | 1,79   |

**Çizelge 4.4 : Ç-9 – Ç-12 örneklerinin deneysel ve hesaplanan öz soğurma faktörleri.**

| Radyonüklit       | Enerji (keV) | Ç-9      |            |        | Ç-10     |            |        | Ç-11     |            |        | Ç-12     |            |        |
|-------------------|--------------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|
|                   |              | Deneysel | Hesaplanan | % Fark | Deneysel | Hesaplanan | % Fark | Deneysel | Hesaplanan | % Fark | Deneysel | Hesaplanan | % Fark |
| <sup>133</sup> Ba | 53,16        | 1,44     | 1,35       | 6,36   | 1,46     | 1,36       | 6,84   | 1,43     | 1,35       | 5,18   | 1,39     | 1,32       | 4,84   |
| <sup>241</sup> Am | 59,50        | 1,38     | 1,30       | 6,33   | 1,38     | 1,31       | 4,96   | 1,37     | 1,30       | 5,04   | 1,31     | 1,28       | 2,83   |
| <sup>133</sup> Ba | 81,00        | 1,19     | 1,20       | 0,67   | 1,20     | 1,21       | 0,55   | 1,20     | 1,20       | 0,28   | 1,19     | 1,19       | 0,09   |
| <sup>152</sup> Eu | 121,78       | 1,15     | 1,14       | 0,71   | 1,13     | 1,14       | 0,55   | 1,14     | 1,14       | 0,25   | 1,14     | 1,14       | 0,14   |
| <sup>57</sup> Co  | 122,10       | 1,18     | 1,14       | 3,65   | 1,15     | 1,14       | 1,19   | 1,17     | 1,14       | 2,33   | 1,16     | 1,14       | 2,48   |
| <sup>57</sup> Co  | 136,50       | 1,18     | 1,13       | 4,67   | 1,15     | 1,13       | 2,08   | 1,16     | 1,13       | 2,70   | 1,16     | 1,13       | 3,04   |
| <sup>152</sup> Eu | 244,70       | 1,10     | 1,10       | 0,02   | 1,09     | 1,10       | 0,84   | 1,10     | 1,10       | 0,17   | 1,10     | 1,10       | 0,06   |
| <sup>133</sup> Ba | 276,40       | 1,05     | 1,09       | 4,07   | 1,06     | 1,09       | 3,56   | 1,06     | 1,09       | 2,69   | 1,07     | 1,09       | 2,55   |
| <sup>133</sup> Ba | 302,01       | 1,07     | 1,09       | 1,95   | 1,07     | 1,09       | 1,69   | 1,08     | 1,09       | 0,87   | 1,08     | 1,09       | 0,83   |
| <sup>133</sup> Ba | 356,01       | 1,06     | 1,08       | 2,71   | 1,06     | 1,08       | 2,50   | 1,07     | 1,08       | 1,59   | 1,07     | 1,08       | 1,59   |
| <sup>133</sup> Ba | 383,85       | 1,07     | 1,08       | 1,21   | 1,07     | 1,08       | 1,06   | 1,08     | 1,08       | 0,31   | 1,08     | 1,08       | 0,37   |
| <sup>152</sup> Eu | 443,97       | 1,07     | 1,08       | 0,85   | 1,06     | 1,08       | 1,95   | 1,06     | 1,08       | 1,31   | 1,06     | 1,08       | 1,18   |
| <sup>137</sup> Cs | 661,70       | 1,07     | 1,06       | 0,51   | 1,07     | 1,06       | 0,54   | 1,08     | 1,07       | 1,19   | 1,08     | 1,07       | 1,14   |
| <sup>152</sup> Eu | 778,92       | 1,07     | 1,06       | 1,33   | 1,07     | 1,06       | 0,57   | 1,07     | 1,06       | 1,25   | 1,07     | 1,06       | 1,17   |
| <sup>54</sup> Mn  | 834,80       | 1,08     | 1,06       | 1,61   | 1,07     | 1,06       | 1,27   | 1,08     | 1,06       | 1,81   | 1,08     | 1,06       | 1,98   |
| <sup>152</sup> Eu | 964,06       | 1,04     | 1,05       | 1,24   | 1,03     | 1,05       | 1,97   | 1,05     | 1,05       | 0,90   | 1,04     | 1,05       | 1,46   |
| <sup>152</sup> Eu | 1085,84      | 1,05     | 1,05       | 0,10   | 1,04     | 1,05       | 0,73   | 1,06     | 1,05       | 0,35   | 1,05     | 1,05       | 0,17   |
| <sup>152</sup> Eu | 1112,09      | 1,04     | 1,05       | 1,15   | 1,03     | 1,05       | 2,00   | 1,04     | 1,05       | 1,02   | 1,04     | 1,05       | 1,10   |
| <sup>152</sup> Eu | 1408,02      | 1,03     | 1,05       | 1,49   | 1,03     | 1,05       | 2,00   | 1,03     | 1,05       | 1,20   | 1,03     | 1,05       | 1,50   |

**Çizelge 4.5 :** Aktivite hesaplarında kullanılan öz soğurma faktörleri.

| Radyonüklit       | Bozunma<br>Ürünü  | Enerji<br>(keV) | Öz Soğurma Faktörleri |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                   |                   |                 | Ç-1                   | Ç-2  | Ç-3  | Ç-4  | Ç-5  | Ç-6  | Ç-7  | Ç-8  | Ç-9  | Ç-10 | Ç-11 | Ç-12 |
| <sup>226</sup> Ra | <sup>214</sup> Pb | 295,22          | 1,10                  | 1,07 | 1,09 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,09 | 1,08 | 1,09 | 1,08 | 1,08 | 1,08 |
|                   | <sup>214</sup> Pb | 351,93          | 1,09                  | 1,07 | 1,09 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,07 | 1,08 | 1,07 | 1,08 | 1,08 |
|                   | <sup>214</sup> Bi | 609,31          | 1,08                  | 1,06 | 1,08 | 1,07 | 1,07 | 1,06 | 1,07 | 1,06 | 1,08 | 1,07 | 1,07 | 1,07 |
|                   | <sup>214</sup> Bi | 1120,29         | 1,06                  | 1,03 | 1,05 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,03 | 1,07 | 1,05 | 1,05 | 1,04 |
| <sup>228</sup> Ra | <sup>228</sup> Ac | 338,320         | 1,09                  | 1,07 | 1,09 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,07 | 1,08 | 1,08 |
| <sup>228</sup> Th | <sup>208</sup> Tl | 583,187         | 1,08                  | 1,06 | 1,08 | 1,07 | 1,07 | 1,06 | 1,07 | 1,06 | 1,08 | 1,07 | 1,07 | 1,07 |
| <sup>40</sup> K   | <sup>40</sup> K   | 1460,82         | 1,06                  | 1,02 | 1,03 | 1,03 | 1,02 | 1,03 | 1,03 | 1,01 | 1,05 | 1,03 | 1,03 | 1,02 |

## 4.2 IAEA-447 Yosun/Toprak Referans Malzemesinin Aktivite

### Konsantrasyonları

IAEA-447 referans malzemesinin ölçülen gama ışını spektrumu Maestro yazılımıyla analiz edilmiştir. Analiz sonucunun bir bölümü Şekil 4.1’de tamamı Ek B’de gösterilmiştir. Analiz dosyasından  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{232}\text{Th}$  radyonüklitlerinin ürün radyonüklitlerinden yayınlanan gama ışını enerjilerindeki ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklitinin 1460 keV enerjisindeki net sayımlar ve belirsizlikleri alınarak aktivite konsantrasyonları ve belirsizlikleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.6).

| Detector #1 |             | ACQ 17-Eki-2025 at 11:38:46 |       |      |     | RT = 99039,2 |      | LT = 99000,0 |  |
|-------------|-------------|-----------------------------|-------|------|-----|--------------|------|--------------|--|
|             |             | DSROL DSPEC-LF              |       |      |     |              |      |              |  |
| ROI#        | RANGE( keV) |                             | GROSS | NET  | +/- | CENTROID     | FWHM | FW(1/5)M     |  |
| 1           | 4,25        | 8,16                        | 1097  | 247  | 35  | 6,48         | 0,96 | 1,28         |  |
| 2           | 11,10       | 17,95                       | 4318  | 856  | 100 | 12,88        | 1,01 | 1,37         |  |
| 3           | 22,11       | 26,03                       | 1874  | -153 | 46  | 24,07        | 0,24 | 0,72         |  |
| 4           | 30,19       | 38,27                       | 9774  | 4865 | 144 | 32,05        | 0,94 | 1,45         |  |
| 5           | 44,63       | 48,55                       | 6830  | 4684 | 84  | 46,60        | 0,80 | 1,27         |  |
| 6           | 51,48       | 55,40                       | 1871  | 107  | 46  | 53,22        | 0,77 | 1,21         |  |
| 7           | 57,60       | 65,44                       | 4826  | 433  | 119 | 63,48        | 0,89 | 1,24         |  |
| 8           | 72,78       | 77,18                       | 7458  | -831 | 103 | 74,90        | 0,57 | 0,83         |  |
| 9           | 82,08       | 95,30                       | 9053  | 3209 | 194 | 87,31        | 1,10 | 1,54         |  |
| 10          | 97,50       | 101,90                      | 1686  | 168  | 47  | 99,74        | 0,51 | 1,57         |  |
| 11          | 103,37      | 107,78                      | 1735  | 308  | 48  | 111,23       | 1,35 | 2,26         |  |
| 12          | 113,16      | 117,57                      | 1654  | -32  | 48  | 115,30       | 0,30 | 1,25         |  |
| 13          | 126,87      | 131,27                      | 1777  | 255  | 48  | 129,23       | 0,80 | 1,17         |  |
| 14          | 141,80      | 146,20                      | 1548  | 73   | 46  | 143,98       | 0,52 | 0,81         |  |
| 15          | 151,59      | 155,99                      | 1466  | 264  | 44  | 154,01       | 0,83 | 2,00         |  |
| 16          | 161,38      | 165,78                      | 1282  | 71   | 42  | 163,57       | 0,45 | 2,04         |  |
| 17          | 184,14      | 188,55                      | 2018  | 562  | 51  | 186,03       | 1,26 | 1,61         |  |
| 18          | 201,52      | 205,92                      | 1461  | 74   | 45  | 203,77       | 0,98 | 1,78         |  |
| 19          | 206,90      | 211,31                      | 1729  | 342  | 47  | 209,32       | 0,79 | 1,92         |  |
| 20          | 223,05      | 227,46                      | 1251  | 21   | 41  | 225,15       | 0,88 | 1,53         |  |
| 21          | 236,52      | 240,92                      | 5965  | 4086 | 82  | 238,63       | 1,00 | 1,53         |  |
| 22          | 267,84      | 276,65                      | 2389  | 67   | 92  | 270,07       | 0,68 | 1,70         |  |
| 23          | 293,05      | 302,11                      | 3288  | 1222 | 95  | 295,24       | 0,90 | 1,56         |  |
| 24          | 336,12      | 340,53                      | 1762  | 826  | 46  | 338,28       | 1,04 | 1,68         |  |
| 25          | 346,16      | 354,23                      | 3534  | 1749 | 87  | 351,88       | 0,96 | 1,63         |  |
| 26          | 393,63      | 398,53                      | 1075  | 35   | 42  | 396,26       | 0,93 | 2,28         |  |
| 27          | 407,09      | 411,99                      | 1215  | 183  | 43  | 409,73       | 1,51 | 2,78         |  |
| 28          | 460,44      | 465,34                      | 1700  | 345  | 50  | 462,78       | 0,64 | 2,57         |  |
| 29          | 508,16      | 515,75                      | 1336  | 472  | 55  | 510,77       | 0,94 | 2,67         |  |
| 30          | 522,85      | 527,74                      | 585   | -32  | 31  | 525,41       | 0,43 | 0,61         |  |

Şekil 4.1 : IAEA-447 analiz dosyası (525 keV’e kadar).

Ölçülen aktivite konsantrasyonları sertifika değerleri ile karşılaştırılarak yöntem doğrulanmıştır (Çizelge 4.6). Üç radyonüklit için de  $E_n < 1$  elde edilmiş olup, bu durum ölçülen değerler ile sertifika değerlerinin birbiriyle uyumlu olduğunu göstermektedir

**Çizelge 4.6 :** IAEA-447 referans malzemesinin ölçülen ve sertifikalı aktivite değerleri (Bq/kg) ve belirsizlikleri (Bq/kg, k=1).

| Radyonüklit       | Ölçülen değer |       | Sertifika değeri |      | E <sub>n</sub> -sayısı |
|-------------------|---------------|-------|------------------|------|------------------------|
|                   | A             | u(A)  | A                | u(A) |                        |
| <sup>226</sup> Ra | 25,43         | 0,98  | 25,1             | 2,0  | 0,07                   |
| <sup>232</sup> Th | 32,79         | 1,86  | 37,3             | 2,0  | 0,83                   |
| <sup>40</sup> K   | 578,67        | 31,24 | 550              | 18   | 0,40                   |

#### 4.3 Çimento Örneklerinin Aktivite Konsantrasyonları

Çimento örneklerinin ölçülen gama ışını spektrumları Maestro yazılımıyla analiz edilmiştir. Örnek olması açısından analiz sonucunun bir kısmı Şekil 4.2’de tamamı Ek C’de gösterilmiştir.

| Detector #1 |             | ACQ 25-Eki-2025 at 17:23:14 |       |       |     | RT = 202677,1 |      | LT = 201600,0 |  |
|-------------|-------------|-----------------------------|-------|-------|-----|---------------|------|---------------|--|
|             |             | DSROL DSPEC-LF              |       |       |     |               |      |               |  |
| ROI#        | RANGE( keV) |                             | GROSS | NET   | +/- | CENTROID      | FWHM | FW(1/5)M      |  |
| 1           | 4,25        | 8,16                        | 1571  | 398   | 41  | 6,46          | 0,92 | 1,34          |  |
| 2           | 11,10       | 21,13                       | 7053  | 1178  | 162 | 15,88         | 1,82 | 5,03          |  |
| 3           | 23,58       | 27,50                       | 2107  | 194   | 48  | 25,89         | 1,37 | 2,23          |  |
| 4           | 32,88       | 36,80                       | 2059  | -4    | 48  | 35,02         | 0,31 | 0,82          |  |
| 5           | 37,78       | 41,69                       | 2463  | 227   | 52  | 39,92         | 0,97 | 1,30          |  |
| 6           | 44,63       | 48,55                       | 3607  | 1431  | 62  | 46,59         | 0,77 | 1,25          |  |
| 7           | 51,24       | 55,16                       | 2933  | 445   | 57  | 53,34         | 0,91 | 1,87          |  |
| 8           | 61,52       | 69,60                       | 9254  | 1986  | 160 | 63,38         | 0,74 | 1,27          |  |
| 9           | 72,78       | 95,05                       | 45157 | 23974 | 496 | 77,18         | 0,85 | 1,32          |  |
| 10          | 97,50       | 105,58                      | 4715  | -581  | 129 | 99,68         | 0,42 | 0,92          |  |
| 11          | 127,11      | 131,52                      | 2708  | 725   | 59  | 129,20        | 0,74 | 1,48          |  |
| 12          | 141,55      | 145,96                      | 2286  | 436   | 55  | 143,94        | 0,81 | 1,70          |  |
| 13          | 151,83      | 159,42                      | 3308  | 464   | 95  | 154,04        | 0,83 | 2,30          |  |
| 14          | 161,13      | 165,54                      | 1853  | 269   | 49  | 163,44        | 0,52 | 2,25          |  |
| 15          | 167,50      | 176,31                      | 3128  | 321   | 102 | 169,69        | 0,35 | 1,25          |  |
| 16          | 183,90      | 188,30                      | 3953  | 2445  | 67  | 186,05        | 1,08 | 1,64          |  |
| 17          | 200,05      | 204,45                      | 1443  | -56   | 45  | 202,17        | 0,35 | 0,58          |  |
| 18          | 207,15      | 211,55                      | 2264  | 943   | 53  | 209,27        | 0,97 | 1,48          |  |
| 19          | 216,69      | 221,10                      | 1251  | 104   | 41  | 219,07        | 1,14 | 1,34          |  |
| 20          | 226,73      | 231,13                      | 1101  | 54    | 39  | 228,81        | 0,36 | 0,59          |  |
| 21          | 234,07      | 247,77                      | 16760 | 13219 | 187 | 238,62        | 1,02 | 1,55          |  |
| 22          | 264,17      | 272,25                      | 2501  | 393   | 85  | 270,11        | 0,70 | 1,80          |  |
| 23          | 275,18      | 279,59                      | 1249  | 384   | 40  | 277,25        | 0,72 | 2,15          |  |
| 24          | 281,30      | 285,71                      | 970   | -28   | 37  | 283,50        | 0,66 | 1,51          |  |
| 25          | 293,05      | 297,46                      | 5105  | 4269  | 74  | 295,20        | 1,01 | 1,65          |  |
| 26          | 297,94      | 302,35                      | 1394  | 567   | 41  | 300,10        | 0,81 | 1,76          |  |
| 27          | 319,48      | 323,89                      | 782   | 86    | 32  | 321,77        | 0,77 | 1,52          |  |
| 28          | 325,60      | 330,00                      | 1311  | 465   | 40  | 327,99        | 1,09 | 1,57          |  |

**Şekil 4.2 :** Ç-1 örneği analiz dosyası (327 keV’e kadar).

Analiz dosyasından <sup>226</sup>Ra ve <sup>232</sup>Th radyonüklitlerinin ürün radyonüklitlerinden yayınlanan gama ışını enerjilerindeki ve <sup>40</sup>K radyonüklitinin 1460 keV enerjisindeki net sayımlar ve belirsizlikleri alınarak aktivite konsantrasyonları ve belirsizlikleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.7).

<sup>226</sup>Ra aktivite konsantrasyonlarının 13,13 Bq/kg ile 56,94 Bq/kg arasında değiştiği ve ortalamanın 37,20 Bq/kg olduğu belirlenmiştir. En yüksek <sup>226</sup>Ra aktivite konsantrasyonu CEM I sınıfına ait Portland çimento örneklerinden birinde gözlenirken, en düşük değer CEM II sınıfında yer alan Portland kompoze çimento örneğinde elde edilmiştir.

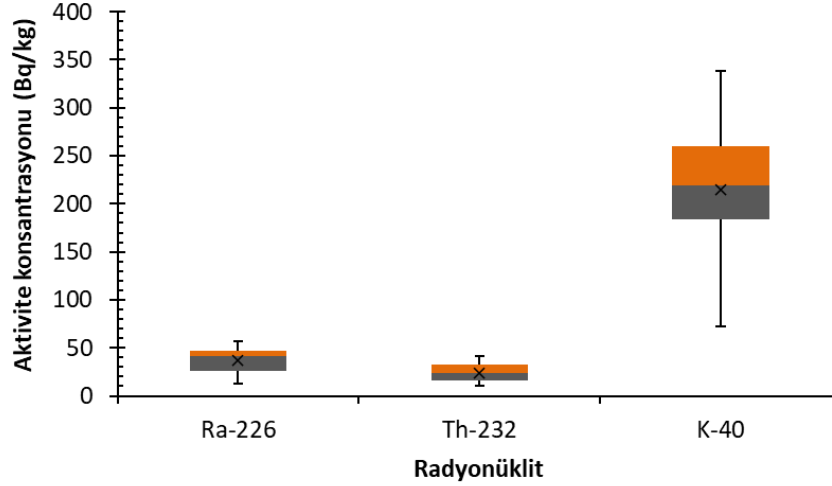
<sup>232</sup>Th aktivite konsantrasyonlarının 10,53 Bq/kg ile 41,57 Bq/kg aralığında değiştiği ve ortalamanın 23,97 Bq/kg olduğu belirlenmiştir. En yüksek <sup>232</sup>Th değeri CEM I sınıfındaki Portland çimento örneklerinde elde edilirken, en düşük değer yine CEM I grubunda yer alan bir örnekte belirlenmiştir. Bu durum, aynı çimento sınıfı içerisinde dahi hammadde kaynaklı farklılıkların önemli rol oynadığını göstermektedir. Ölçülen <sup>40</sup>K değerleri 72,90 Bq/kg ile 338,64 Bq/kg arasında değişmekte olup, ortalama 214,76 Bq/kg'dir. En yüksek <sup>40</sup>K aktivite konsantrasyonu CEM IV sınıfında yer alan puzolanik çimento örneğinde belirlenmiştir. Bu durum, puzolanik katkıların doğal potasyum içeriği ile doğrudan ilişkilidir.

<sup>226</sup>Ra için en küçük değer 13,13 Bq/kg olup, alt çeyrek (Q1) ile en küçük değer arasındaki farkın (12,52 Bq/kg) ve medyan–Q1 aralığının (15,72 Bq/kg) görece geniş olması, dağılımın alt değerler tarafında daha yaygın olduğunu göstermektedir (Şekil 4.3). Buna karşılık, Q3–medyan aralığının (5,61 Bq/kg) daha dar olması, üst yarıda verilerin daha kümeli olduğunu ortaya koymaktadır. Ortalama değer (37,20 Bq/kg) medyandan büyük olması, dağılımın sağa çarpık bir yapı sergilediğine işaret etmektedir.

<sup>232</sup>Th dağılımında Q1–min, medyan–Q1, Q3–medyan ve max–Q3 aralıklarının birbirine oldukça yakın olması, verilerin daha dengeli ve simetrik bir dağılım gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ortalama değer (23,97 Bq/kg) medyana yakın olması da bu durumu desteklemektedir. Bu sonuç, <sup>232</sup>Th aktivite konsantrasyonlarının örnekler arasında nispeten homojen dağıldığını göstermektedir (Şekil 4.3).

<sup>40</sup>K için Q1–min (110,76 Bq/kg) ve max–Q3 (79,14 Bq/kg) aralıklarının geniş olması, özellikle alt ve üst uçlarda yüksek değişkenliğe işaret etmektedir. Medyan çevresindeki dağılımın (Med–Q1 ve Q3–Med) görece daha dar olması, merkezi değerlerin daha kümeli olduğunu göstermektedir. Ortalama değer (214,76 Bq/kg) medyandan daha yüksek olması, <sup>40</sup>K dağılımının da sağa çarpık olduğunu ve bazı örneklerde yüksek <sup>40</sup>K içeriklerinin bulunduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 4.3).

Genel olarak,  $^{232}\text{Th}$  en homojen dağılıma,  $^{226}\text{Ra}$  ve özellikle  $^{40}\text{K}$  ise daha geniş ve sağa çarpık bir dağılıma sahiptir. Bu durum,  $^{40}\text{K}$  ve  $^{226}\text{Ra}$  aktivitelerinin hammadde bileşimine daha duyarlı olduğunu,  $^{232}\text{Th}$ 'nin ise örnekler arasında daha sınırlı değişkenlik sergilediğini ortaya koymaktadır.



**Şekil 4.3 :** Çimento örneklerindeki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'ın dağılımı.

Yapı malzemelerinin radyolojik açıdan değerlendirilmesinde kullanılan radyum eşdeğer aktivitesi ve aktivite konsantrasyon indisi değerleri de Çizelge 4.7'de sunulmuştur. İncelenen çimento örnekleri için hesaplanan radyum eşdeğer aktivite değerleri 43,03–127,26 Bq/kg aralığında değişmektedir. Tüm örnekler için elde edilen  $R_{\text{eq}}$  değerlerinin, yapı malzemeleri için yaygın olarak kabul edilen 370 Bq/kg sınır değerinin oldukça altında kaldığı belirlenmiştir. Bu sonuç, ölçülen  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonlarının birleşik radyolojik etkisinin düşük seviyelerde olduğunu ve incelenen çimentoların gama radyasyonu açısından herhangi bir radyolojik risk oluşturmadığını göstermektedir.

Hesaplanan aktivite konsantrasyon indeksi değerlerinin ise 0,15 ile 0,45 arasında değiştiği ve tüm örnekler için  $I < 1$  koşulunun sağlandığı tespit edilmiştir. Avrupa Komisyonu tarafından önerilen bu indeks, yapı malzemelerinin iç mekân kullanımında oluşturabileceği radyolojik riskin değerlendirilmesinde kullanılmakta olup, elde edilen sonuçlar incelenen çimento örneklerinin konut ve benzeri yapılarda kullanım açısından radyolojik açıdan güvenli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgu,  $R_{\text{eq}}$  sonuçları ile uyumludur.

**Çizelge 4.7 :** Örneklerle ait aktivite konsantrasyonları (Bq/kg),  $R_{eq}$  (Bq/kg) ve I indisleri ve bu değerlerin belirsizlikleri ((Bq/kg, k=1).

| Örnek                         | $^{226}\text{Ra}$ | $u(^{226}\text{Ra})$ | $^{232}\text{Th}$ | $u(^{232}\text{Th})$ | $^{40}\text{K}$    | $u(^{40}\text{K})$ | $R_{eq}$          | $u(R_{eq})$ | I               | $u(I)$ |
|-------------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------|-----------------|--------|
| Ç-1                           | 46,87             | 1,31                 | 41,57             | 1,73                 | 272,03             | 14,63              | 127,26            | 9,36        | 0,45            | 0,03   |
| Ç-2                           | 56,94             | 1,57                 | 34,30             | 1,42                 | 119,17             | 7,33               | 115,17            | 9,11        | 0,40            | 0,03   |
| Ç-3                           | 50,96             | 1,44                 | 17,09             | 0,84                 | 255,33             | 14,13              | 95,07             | 7,51        | 0,34            | 0,03   |
| Ç-4                           | 25,76             | 0,78                 | 16,30             | 0,78                 | 214,06             | 12,20              | 65,55             | 5,26        | 0,24            | 0,02   |
| Ç-5                           | 25,31             | 0,78                 | 10,53             | 0,54                 | 186,18             | 10,79              | 54,71             | 4,56        | 0,20            | 0,02   |
| Ç-6                           | 17,69             | 0,54                 | 13,79             | 0,66                 | 72,90              | 4,49               | 43,03             | 3,60        | 0,15            | 0,01   |
| Ç-7                           | 42,89             | 1,21                 | 34,92             | 1,39                 | 247,03             | 13,22              | 111,84            | 8,10        | 0,40            | 0,03   |
| Ç-8                           | 47,30             | 1,38                 | 24,73             | 1,13                 | 224,11             | 12,08              | 99,92             | 7,65        | 0,36            | 0,03   |
| Ç-9                           | 44,43             | 1,28                 | 25,91             | 1,25                 | 279,52             | 14,88              | 103,01            | 7,97        | 0,37            | 0,03   |
| Ç-10                          | 13,13             | 0,44                 | 12,27             | 0,64                 | 176,10             | 9,73               | 44,24             | 3,68        | 0,16            | 0,01   |
| Ç-11                          | 39,85             | 1,16                 | 32,50             | 1,34                 | 192,08             | 10,63              | 101,11            | 7,57        | 0,36            | 0,03   |
| Ç-12                          | 35,28             | 1,05                 | 23,78             | 1,05                 | 338,64             | 18,02              | 95,36             | 7,19        | 0,35            | 0,03   |
| Ortalama $\pm$ standart sapma | 37,20 $\pm$ 13,82 |                      | 23,97 $\pm$ 10,18 |                      | 214,76 $\pm$ 72,41 |                    | 88,02 $\pm$ 28,67 |             | 0,32 $\pm$ 0,10 |        |

Çizelge 4.8’de ölçülebilir en küçük aktivite değerleri verilmiştir. Tüm örneklerde  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  için ölçülen aktivite konsantrasyonlarının MDA değerlerinin üzerinde olduğu görülmektedir.

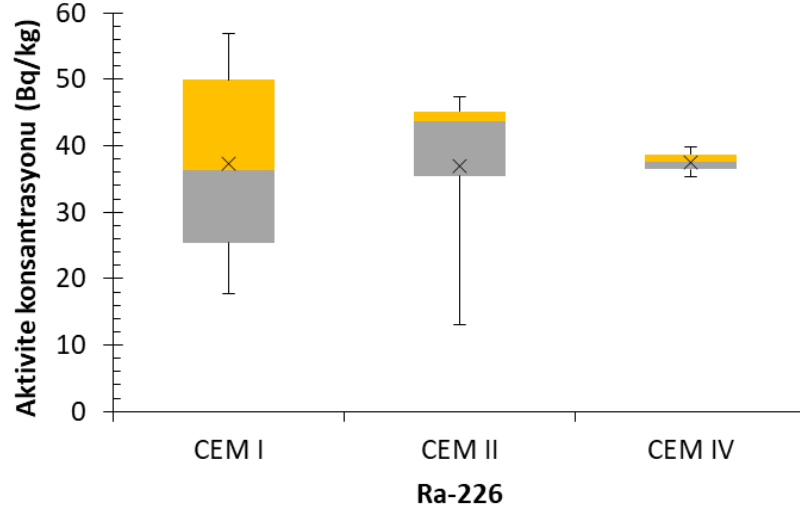
**Çizelge 4.8 :** Her bir örneğin ölçülebilir en küçük aktivite değerleri (Bq/kg).

| Örnek | $^{226}\text{Ra}$ | $^{232}\text{Th}$ | $^{40}\text{K}$ |
|-------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Ç-1   | 1,6               | 2,2               | 3,2             |
| Ç-2   | 1,9               | 2,0               | 5,7             |
| Ç-3   | 1,8               | 1,6               | 5,7             |
| Ç-4   | 1,4               | 1,5               | 5,8             |
| Ç-5   | 1,4               | 1,0               | 5,2             |
| Ç-6   | 2,0               | 1,0               | 3,3             |
| Ç-7   | 1,7               | 2,6               | 2,6             |
| Ç-8   | 1,9               | 1,5               | 3,1             |
| Ç-9   | 1,9               | 2,2               | 3,7             |
| Ç-10  | 1,3               | 1,5               | 3,4             |
| Ç-11  | 1,8               | 1,8               | 5,3             |
| Ç-12  | 1,9               | 1,8               | 4,0             |

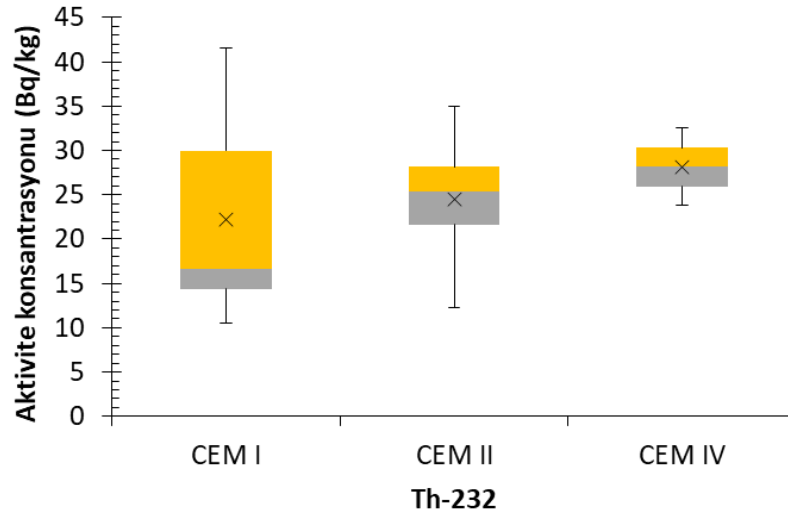
Çimento türlerine göre radyoaktivite konsantrasyonlarının karşılaştırılması Şekil 4.4–4.6’de sunulmuştur. CEM I tipi çimentolarda  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonları 17,69–56,94 Bq/kg aralığında değişmektedir. En yüksek  $^{226}\text{Ra}$  değerleri standart Portland çimentosu (Ç-1, Ç-2 ve Ç-3) örneklerinde gözlenirken, Beyaz Portland çimentosu (Ç-6) en düşük değeri sergilemektedir. Bu durum, beyaz çimentonun üretiminde kullanılan daha saf hammaddelerin doğal radyum içeriğinin düşük olmasıyla ilişkilendirilebilir. CEM II tipi çimentolarda  $^{226}\text{Ra}$  değerleri genel olarak 13,13–47,30 Bq/kg aralığında olup, kalkerli ve uçucu küllü çimentolarda görece yüksek değerlere ulaşırken, kompoze çimento (Ç-10) belirgin şekilde daha düşük bir  $^{226}\text{Ra}$  içeriğine sahiptir. CEM IV tipi çimentolarda  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonları 35,28–39,85 Bq/kg aralığında olup, bu değerler CEM I ve CEM II’ye kıyasla orta seviyelerde seyretmektedir.

$^{232}\text{Th}$  açısından CEM I çimentoları 10,53–41,57 Bq/kg aralığında geniş bir dağılım göstermektedir. Standart Portland çimentolarında  $^{232}\text{Th}$  değerleri görece yüksek iken, beyaz Portland çimentosu daha düşük seviyelerle öne çıkmaktadır. CEM II çimentolarında  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonları 12,27–34,92 Bq/kg arasında değişmekte olup, kalkerli çimentolarda daha yüksek, kompoze çimentoda ise daha düşük değerler gözlenmiştir. CEM IV çimentolarında  $^{232}\text{Th}$  değerleri 23,78–32,50

Bq/kg aralığında yer almakta olup, özellikle taban külü katkılı çimentoda (Ç-11) görece yüksek  $^{232}\text{Th}$  içeriği dikkat çekmektedir. Bu durum, puzolanik ve endüstriyel katkıların doğal torium içeriği ile ilişkilendirilebilir.



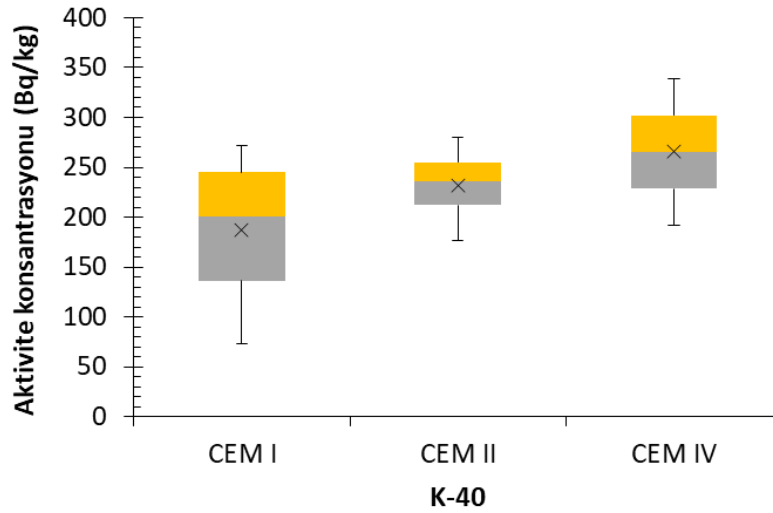
Şekil 4.4 :  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonu ile çimento türleri arasındaki ilişki.



Şekil 4.5 :  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonu ile çimento türleri arasındaki ilişki.

$^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonları tüm çimento türleri arasında en geniş değişkenliği göstermektedir. CEM I çimentolarında  $^{40}\text{K}$  değerleri 72,90–272,03 Bq/kg aralığında olup, özellikle standart Portland çimentolarında yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Beyaz Portland çimentosu yine en düşük  $^{40}\text{K}$  içeriğine sahip örnek olarak öne çıkmaktadır. CEM II çimentolarında  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonları 176,10–279,52 Bq/kg aralığında değişmekte ve özellikle uçucu küllü çimentoda (Ç-9) yüksek  $^{40}\text{K}$  değeri gözlenmektedir. Bu durum, uçucu külün potasyum açısından zengin bir katkı

malzemesi olmasından kaynaklanmaktadır. CEM IV çimentolarında  $^{40}\text{K}$  değerleri 192,08–338,64 Bq/kg aralığında olup, puzolanik çimentoda (Ç-12) en yüksek  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonu ölçülmüştür. Bu sonuç, puzolanik katkıların  $^{40}\text{K}$  içeriğinin yüksek olabileceğini göstermektedir.



**Şekil 4.6 :**  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonu ile çimento türleri arasındaki ilişki.

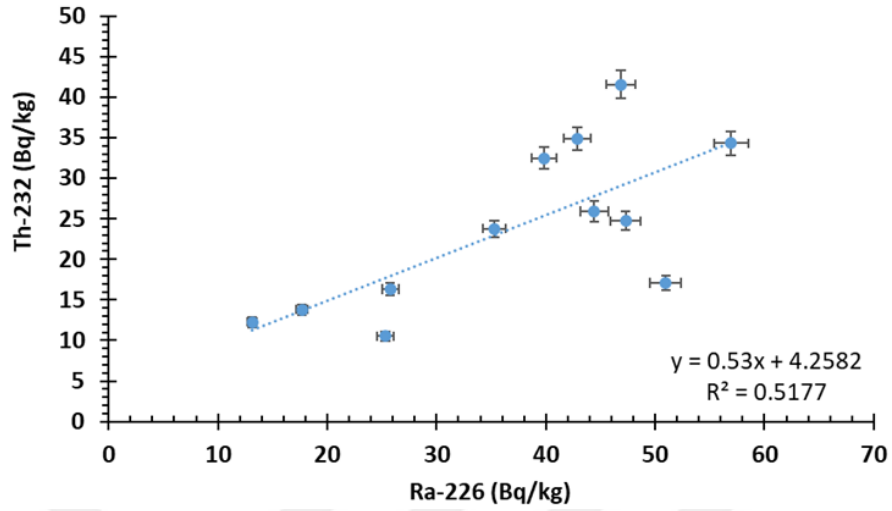
Çimento örneklerinin ölçülen aktivite konsantrasyonları Pearson korelasyonu ile analiz edilerek aralarındaki ilişki değerlendirilmiştir (Çizelge 4.9).  $^{226}\text{Ra}$  ile  $^{232}\text{Th}$  arasında istatistiksel olarak anlamlı bir pozitif korelasyon tespit edilmiştir ( $r=0,72$ ,  $p < 0,01$ ). Bu durum, söz konusu radyonüklitlerin çimento bileşiminde birlikte değişim gösterdiğini ve büyük olasılıkla benzer hammadde kaynaklarından etkilendiğini göstermektedir. Buna karşılık,  $^{40}\text{K}$  ile hem  $^{226}\text{Ra}$  ( $r=0,34$ ,  $p>0,05$ ) hem de  $^{232}\text{Th}$  ( $r = 0,28$ ,  $p>0,05$ ) arasında zayıf ve istatistiksel olarak anlamsız korelasyonlar elde edilmiştir. Bu bulgu,  $^{40}\text{K}$ 'ın çimentolardaki dağılımının, uranyum ve toryum serisi radyonüklitlerden farklı mineralojik bileşenler veya potasyum içeriği yüksek katkı malzemeleri tarafından kontrol edilebileceğini düşündürmektedir.

**Çizelge 4.9 :** Pearson korelasyon analizi (\* $p < ,05$ , \*\* $p < ,01$ , \*\*\* $p < ,001$ ).

| Radyonüklit       | $^{226}\text{Ra}$ | $^{232}\text{Th}$ | $^{40}\text{K}$ |
|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| $^{226}\text{Ra}$ | 1                 |                   |                 |
| $^{232}\text{Th}$ | 0,72**            | 1                 |                 |
| $^{40}\text{K}$   | 0,34              | 0,28              | 1               |

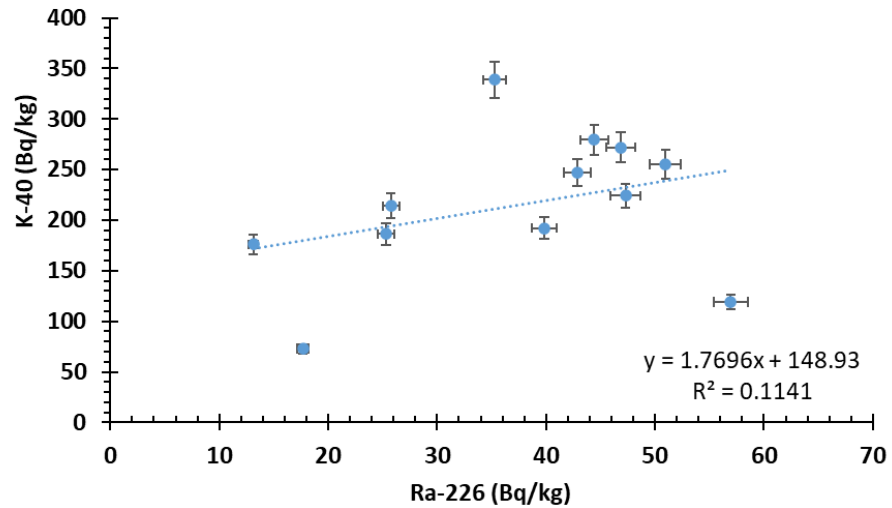
$^{226}\text{Ra}$  ile  $^{232}\text{Th}$  arasında belirgin bir pozitif doğrusal eğilim gözlenmektedir (Şekil 4.7). Noktaların regresyon doğrusu etrafında görece düzenli bir dağılım sergilemesi, bu iki radyonüklitin birlikte artma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, Pearson

korelasyon analiziyle elde edilen istatistiksel olarak anlamlı pozitif ilişkiyi desteklemektedir.



**Şekil 4.7 :**  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonları arasındaki ilişki.

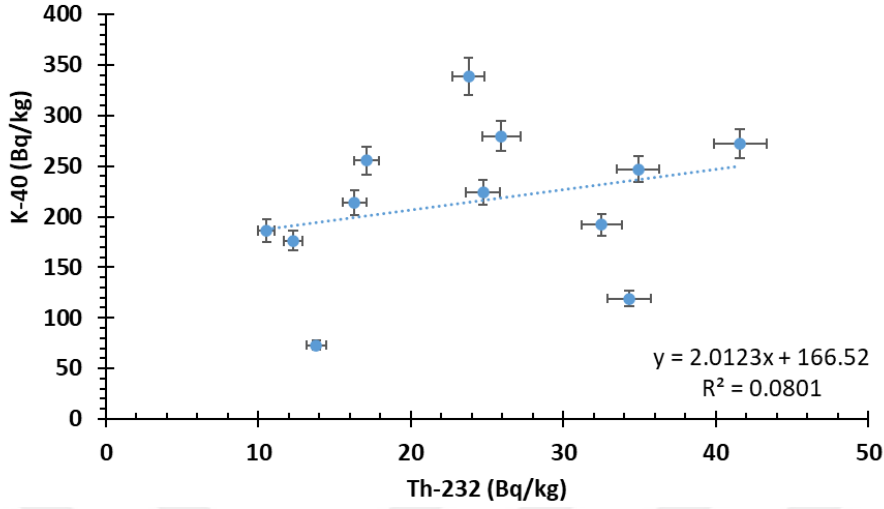
$^{226}\text{Ra}$  ile  $^{40}\text{K}$  arasındaki doğrusal ilişki zayıf olup, veri noktalarının regresyon doğrusundan belirgin şekilde saptığı görülmektedir (Şekil 4.8). Bazı örneklerde yüksek  $^{226}\text{Ra}$  değerlerine karşılık düşük  $^{40}\text{K}$  konsantrasyonları gözlenmesi, bu iki radyonüklit arasında tutarlı bir doğrusal ilişkinin bulunmadığını göstermektedir. Bu durum, Pearson korelasyon sonucunda elde edilen zayıf ve istatistiksel olarak anlamsız ilişkiyi doğrulamaktadır.



**Şekil 4.8 :**  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonları arasındaki ilişki.

$^{232}\text{Th}$  ile  $^{40}\text{K}$  arasındaki doğrusal eğilim oldukça sınırlıdır (Şekil 4.9). Regresyon doğrusu hafif pozitif eğim göstermesine rağmen, veri noktalarının geniş bir alana

dağılımı dikkat çekmektedir. Bu dağılım,  $^{232}\text{Th}$  ile  $^{40}\text{K}$  arasında bir doğrusal ilişki bulunmadığını göstermektedir. Bu gözlem Pearson korelasyon sonucu ile uyumludur.



Şekil 4.9 :  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonları arasındaki ilişki.

#### 4.4 Literatür Karşılaştırması

Bu çalışmada Türkiye’de farklı çimento türleri (CEM-I, CEM-II ve CEM-IV) için ölçülen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{232}\text{Th}$ ), Arnavutluk, Senegal, Slovakya ve Yunanistan’da raporlanan veriler ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.10).

Tez çalışması kapsamında incelenen tüm çimento türleri için  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonları 37–38 Bq/kg aralığında olup, çimento türüne bağlı belirgin bir değişim göstermemektedir. Bu değerler, Arnavutluk’ta raporlanan CEM-I ve CEM-II çimentolarındaki yaklaşık 51 Bq/kg seviyelerinin altında kalmaktadır. Senegal örneklerinde ise  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonlarının özellikle CEM-I ve CEM-II çimentolarında oldukça yüksek olduğu (110–136 Bq/kg) görülmektedir. Buna karşılık Senegal CEM-IV çimentosunda  $^{226}\text{Ra}$  değeri oldukça düşük olup (8,1 Bq/kg), bu durum kullanılan katkı maddelerinin ve hammaddelerin radyum içeriğinin çimento türüne bağlı olarak önemli ölçüde değişebildiğini göstermektedir. Slovakya çimentolarında  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonları geniş bir aralıkta değişmekte (9,3–58 Bq/kg) olup, Türkiye sonuçları bu dağılımın orta seviyelerinde yer almaktadır. Yunanistan’da ise CEM-I çimentolarında düşük  $^{226}\text{Ra}$  değerleri (15–17 Bq/kg) rapor edilirken, CEM-II ve CEM-IV çimentolarında bu değerlerin 89–111 Bq/kg seviyelerine kadar yükseldiği görülmektedir.

Tez çalışması kapsamında ölçülen  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonları 22–29 Bq/kg aralığında değişmektedir. Bu değerler, Arnavutluk ve Yunanistan'daki CEM-I çimentolarında raporlanan değerlerden (13–16 Bq/kg) bir miktar yüksek olmakla birlikte, Slovakya'daki bazı CEM-II örneklerinde belirlenen 32–34 Bq/kg seviyelerinin altında kalmaktadır. Senegal çimentolarında  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonlarının genel olarak düşük olduğu (4,68–15,1 Bq/kg) görülmektedir. Bu durum, Senegal'de kullanılan hammaddelerin toryum içeriğinin görece düşük olduğunu göstermektedir. Türkiye'deki sonuçlar,  $^{232}\text{Th}$  açısından literatürde bildirilen tipik değerlerle uyumlu olup, orta düzeyde bir dağılım sergilemektedir.

$^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonları bakımından çalışma kapsamında ölçülen değerler 187–265 Bq/kg aralığında olup, özellikle CEM-II ve CEM-IV çimentolarında daha yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Bu durum, potasyum içeriği yüksek katkı maddelerinin (uçucu kül, puzolan gibi) kullanımına bağlanabilir. Arnavutluk ve Yunanistan'daki  $^{40}\text{K}$  değerleri genellikle 130–210 Bq/kg aralığında değişirken, Senegal çimentolarında belirgin biçimde daha düşük değerler (59–119 Bq/kg) rapor edilmiştir. Slovakya örneklerinde ise oldukça geniş bir dağılım gözlenmekte; bazı CEM-II çimentolarında  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonlarının 300–460 Bq/kg seviyelerine kadar çıktığı görülmektedir. Türkiye'de elde edilen  $^{40}\text{K}$  sonuçları, Slovakya'daki en yüksek değerlerin altında kalmakla birlikte, birçok ülkeye kıyasla görece yüksek bir aralıktayken yer almaktadır.

Özdiş ve ark. (2016) yapmış olduğu çalışmada, ülkemizde incelenen 39 farklı çimento örneğinde  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonları ortalaması 34 Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonları ortalaması 15 Bq/kg ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonları ortalaması 220 Bq/kg olarak bulunmuştur. Baykara ve ark. (2011) yapı farklı yapı malzemeleri üzerine Elazığ ili özelinde yapmış olduğu çalışmada çimento örneğine ilişkin  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonu 25 Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonu 21 Bq/kg ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonu 2493 Bq/kg olarak bulunmuştur. Turhan (2008) ise çimento ve hammaddelerdeki doğal radyoaktiviteye yönelik olarak yaptığı çalışmada çeşitli çimento türlerinden 145 çimento türünü incelemiş ve  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonları ortalamasını 40 Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonları ortalamasını 26 Bq/kg ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonları ortalamasını 267 Bq/kg olarak bulmuştur. Bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçların benzer olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.10 :** Diğer ülkelerde yapılan çimento analizleri ile tez çalışmasından elde edilen çimento analizlerine ilişkin aktivite konsantrasyon değerleri.

| Ülke       | Çimento Türü | Aktivite Konsantrasyonu (Bq/kg) |                   |                 | Kaynak                                       |
|------------|--------------|---------------------------------|-------------------|-----------------|----------------------------------------------|
|            |              | <sup>226</sup> Ra               | <sup>232</sup> Th | <sup>40</sup> K |                                              |
| Türkiye    | CEM-I        | 37,3 ± 16,3                     | 22,5 ± 12,8       | 186,6 ± 77,8    | Bu çalışma                                   |
|            | CEM-II       | 37 ± 16                         | 24,4 ± 9,5        | 231,7 ± 43,5    |                                              |
|            | CEM-IV       | 37,6 ± 3,2                      | 28,9 ± 6,4        | 265,4 ± 103,6   |                                              |
| Arnavutluk | CEM-I        | 51,2 ± 5,5                      | 16,1 ± 2,3        | 169 ± 25        | Shala, F.<br>v.d. (2017)                     |
|            | CEM-II       | 51 ± 3,7                        | 16,5 ± 3,6        | 150 ± 20        |                                              |
|            | CEM-I        | 136 ± 8,2                       | 15,1 ± 0,9        | 59,3 ± 7,3      |                                              |
| Senegal    | CEM-II       | 110 ± 29                        | 12 ± 1,2          | 81 ± 19         | Ndour, O.<br>v.d. (2020)                     |
|            | CEM-IV       | 8,1 ± 0,9                       | 4,68 ± 0,78       | 119 ± 12        |                                              |
|            | CEM-I        | 58                              | 17                | 52              |                                              |
| Slovakya   | CEM-I        | 13,1                            | 19,8              | 169,3           | Eštaková, A. ve<br>Palaščáková, P.<br>(2013) |
|            | CEM-I        | 9,3                             | 18,2              | 228,3           |                                              |
|            | CEM-II       | 10,8                            | 32,8              | 314,6           |                                              |
|            | CEM-II       | 12,4                            | 34,2              | 460             |                                              |
|            | CEM-II       | 8,2                             | 18,7              | 178,9           |                                              |
|            | CEM-II       | 12,1                            | 16,0              | 146             |                                              |
|            | CEM-II       | 14,0                            | 20,1              | 150,2           |                                              |
| Yunanistan | CEM-I        | 17 ± 1                          | 15 ± 1            | 154 ± 13        | Papaefthymiou, H.<br>v.d. (2008)             |
|            | CEM-I        | 15 ± 1                          | 13 ± 2            | 132 ± 13        |                                              |
|            | CEM-II       | 91 ± 1                          | 18 ± 3            | 212 ± 15        |                                              |
|            | CEM-II       | 89 ± 1                          | 19 ± 3            | 196 ± 17        |                                              |
|            | CEM-IV       | 111 ± 17                        | 19 ± 3            | 244 ± 30        |                                              |

Genel olarak değerlendirildiğinde, Türkiye’de incelenen çimentoların doğal radyonüklit içerikleri literatürde raporlanan ülkelerle karşılaştırıldığında dünya ortalamaları ile uyumlu bir dağılım göstermektedir. <sup>226</sup>Ra ve <sup>232</sup>Th aktivite konsantrasyonlarının görece sınırlı bir aralıkta değişmesi, Türkiye’de kullanılan hammaddelerin radyolojik açıdan homojen bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, <sup>40</sup>K aktivite konsantrasyonlarının özellikle katkı oranı yüksek çimento türlerinde artış göstermesi, bu tür çimentoların radyolojik açıdan izlenmesinin önemini ortaya koymaktadır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, Türkiye'nin farklı bölgelerinde üretilen çeşitli çimento türlerinde doğal radyoaktivite düzeyleri belirlenmiş; aktivite konsantrasyonu hesaplamalarında öz soğurma düzeltmesinin etkisi teorik ve deneysel yöntemler kullanılarak ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

Yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörlerinin sağladığı yüksek enerji çözünürlüğü sayesinde  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  doğal radyonüklitlerine ait karakteristik gama ışını enerjileri güvenilir bir şekilde ayırt edilebilmiş; uzun sayım süreleri kullanılarak düşük seviyeli doğal radyoaktivite içeren çimento örneklerinde istatistiksel açıdan anlamlı ve güvenilir sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, gama spektrometrik yöntemin çimento gibi yapı malzemelerinde doğal radyoaktivitenin belirlenmesi için uygun ve etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Elde edilen bulgular, çimento gibi yoğun ve karmaşık matris yapısına sahip yapı malzemelerinde doğru ve güvenilir radyoaktivite ölçümleri yapılabilmesi için öz soğurma düzeltmesinin ihmal edilmemesi gereken temel bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle düşük ve orta enerjili gama fotonları için öz soğurma etkisinin belirgin olduğu ve bu etkinin hesaplanan aktivite konsantrasyonlarında sapmalara yol açabileceği belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, aynı çimento türleri içerisinde dahi kullanılan hammadde ve katkı maddelerindeki farklılıklar nedeniyle aktivite konsantrasyonlarının değişkenlik gösterebildiğini ortaya koymuştur. Bu durum, yapı malzemelerinden kaynaklanan doğal radyoaktivitenin bireylerin yıllık etkin dozlarına katkısının da değişken olabileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, çimento gibi yaygın kullanılan yapı malzemeleri için mevcut kimyasal ve fiziksel standartlara ek olarak radyolojik özellikleri kapsayan standartların belirlenmesinin ve uygulanmasının önem arz ettiği değerlendirilmektedir. Çalışma kapsamında incelenen radyum eşdeğer aktivitesi ve aktivite konsantrasyon indisi gibi nicel değerler belirlenerek bu standartların sağlanması hususunda düzenleyici yaklaşımların belirlenmesinin önemi anlaşılmıştır.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında elde edilen bulgular, imento malzemelerinde doğal radyoaktivitenin doğru belirlenmesinde gama spektrometrik yöntemin etkinliğini ve öz soğurma düzeltmesinin gerekliliğini açıkça ortaya koymakta; ulusal düzeyde yapılacak daha kapsamlı ve sistematik çalışmalar için metodolojik bir temel sunmaktadır.



## KAYNAKLAR

- Akkaş, A.** (2025). Radioactivity and radon exhalation rate of some granite building materials in Türkiye. *Applied Radiation and Isotopes*.
- Al-Horr, S. S., & Siong, K. K.** (2025). Self-attenuation correction in environmental bulk samples: a study on enhancing gamma-ray activity measurement using HPGe detector with soil samples in varied geometries. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Baha, A., Hashim, S., Sanusi, M. M., Chik, E. M. F. E., Hanifah, N. A., Hassan, H. J. & Zulkeplee, S. A.** (2023). Radioactivity in decorative building materials: Insights from Johor, Malaysia. *Radiation Physics and Chemistry*.
- Barba-Lobo, A.** (2025). A novel methodology for self-attenuation effect corrections using LabSOCS. *Radiation Physics and Chemistry*.
- Baykara, O., Karatepe, Ş., & Doğru, M.** (2011). Assessments of natural radioactivity and radiological hazards in construction materials used in Elazığ, Turkey. *Radiation Measurements*.
- Beretka, J. & Mathew, P. J.** (1985). Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. *Health Physics*, **48**(1), 87–95.
- Bhattacharya, T., Nagaiah, N. & Mahalakshmi, B.** (2024). Self-attenuation correction by transmission method in different geological samples using MCNP. *Radiation Physics and Chemistry*.
- BIPM.** (2008). *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*. JCGM 100:2008.
- Chandrasekaran, A. & Rahman, I. M.** (2025). Radiological profiling of modern building materials: A case study of natural radionuclides in vitrified tiles from Tamil Nadu, India and their health implications. *Nuclear Engineering and Technology*.
- Currie, L. A.** (1968). Limits for qualitative detection and quantitative determination: Application to radiochemistry. *Analytical Chemistry*.
- Cutshall, N. H., Larsen, I. L. & Olsen, C. R.** (1983). Direct analysis of <sup>210</sup>Pb in sediment samples: Self-absorption corrections. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*.
- Da Silva, L. B., da Silva, L. F., Orejuela, C. O. P., Junior, V. B. & da Silva, A. X.** (2024). Assessment and estimation of the effective dose due to external exposure from natural radioactivity of sands used in civil construction in the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Applied Radiation and Isotopes*.

- Debertin, K. & Helmer, R. G.** (1988). *Gamma- and X-ray spectrometry with semiconductor detectors*.
- Elewee, A. A., Alsaffar, M. S., Alhous, S. F. & Aswood, M. S.** (2025). Evaluating the level of <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th and <sup>40</sup>K in different building materials. *Nuclear Analysis*.
- European Commission (EC).** (1999). *Radiation protection 112: Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials*. Directorate-General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection.
- Estokova, A., Singovszka, E. & Vertal, M.** (2022). Investigation of building materials' radioactivity in a historical building: A case study. *Materials*.
- Filipin Nükleer Araştırma Enstitüsü.** (t.y.). *EPIXS* (Bilgisayar Yazılımı). Alıntı kaynağı: <https://www.pnri.dost.gov.ph/index.php/downloads/software/epixs> (Erişim tarihi: 01.12.2025).
- Gilmore, G. & Joss, D.** (2024). *Practical gamma-ray spectrometry*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Hanfi, M. Y., Abd El Rahman, R. M. & Alqahtani, M. S.** (2024). Assessment of environmental hazard impacts in building materials (marble), Gabal El-Galala El-Bahariya, Northeastern Desert, Egypt. *Nuclear Engineering and Technology*.
- Henri Becquerel Ulusal Laboratuvarı.** (t.y.). *Nucléide – LARA* (Web Tabanlı Yazılım). Alıntı kaynağı: <http://www.lnhb.fr/Laraweb/> (Erişim tarihi: 15.12.2025).
- IAEA.** (1989). *Measurement of radionuclides in food and the environment*. Technical Reports Series No. 295. Vienna.
- IAEA.** (2000). *Reference sheet: Reference material IAEA-312 (<sup>226</sup>Ra, Th and U in soil)*. Vienna.
- IAEA.** (2003). *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. IAEA-TECDOC-1363, Vienna.
- IAEA.** (2010). *Regulatory control for the safe transport of naturally occurring radioactive material (NORM)*. Technical Documents Series No. 1728. Vienna.
- IAEA.** (2012) *Worldwide Open Proficiency Test: Determination of Natural and Artificial Radionuclides in Moss-soil and Water*, IAEA-CU-2009- 03, Vienna.
- IAEA.** (2013). *Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards*. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Vienna.
- ISO.** (2008). *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*. ISO.
- ISO.** (2018). *Radiation protection — Performance criteria for laboratories measuring radionuclides using gamma-ray spectrometry*. ISO 18589-3.

- ISO. (2022). *Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison*. ISO 13528:2022.
- Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Kovler, K., Tsapalov, A., Bobkier, R., Wiegers, R., Schroeyers, W., Kovács, T., ... Babczuk, A. (2025). Indoor radon and NORM in building materials: Critical analysis of the current European regulation and road map for the next decade. *Journal of Environmental Radioactivity*.
- Knežević Radić, Vasić, M. V., Kuzmanović, P., Hansman, J., J., Muñoz Velasco, P., & Awoyera, P. O. (2025). Chemical, technological, and radiological characteristics of raw clay and shale mixtures for ceramic brick production. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*.
- La Verde, G., Raulo, A., D'Avino, V., Roca, V. & Pugliese, M. (2020). Radioactivity content in natural stones used as building materials in Puglia region analysed by high resolution gamma-ray spectroscopy: Preliminary results. *Construction and Building Materials*.
- Lewicka, S., Piotrowska, B., Łukaszek-Chmielewska, A. & Drzymala, T. (2022). Assessment of natural radioactivity in cements used as building materials in Poland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*.
- L'Annunziata, M. F. (Ed.). (2012). *Handbook of radioactivity analysis*. Amsterdam: Academic Press.
- Nemlioglu, S., Sezgin, N. & Cumali, B. O. (2022). Natural radioactivity in cement. In *Advances in the toxicity of construction and building materials* (ss. 171–206). Woodhead Publishing.
- Ndour, O., Thiandoume, C., Traore, A., Cagnat, X., Diouf, P. M., Ndeye, M., Ndao, A. S. & Tidjani, A. (2020). Assessment of natural radioactivity and its radiological hazards in several types of cement used in Senegal. *SN Applied Sciences*.
- ORTEC. (t.y.). *PROFILE HPGe photon detector product configuration guide*. Alıntı kaynağı: <https://www.ortec-online.com/-/media/ametektortec/brochures/p/profile.pdf> (Erişim tarihi: 15.12.2025).
- Özdiş, B. E., Çam, N. F., & Canbaz Öztürk, B. (2017). Assessment of natural radioactivity in cements used as building materials in Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*.
- Papaefthymiou, H. & Gouseti, O. (2008). Natural radioactivity and associated radiation hazards in building materials used in Peloponnese, Greece. *Radiation Measurements*.
- Salama, M. A., Korany, K. A. & Ezzeldien, M. (2025). Marble and granite as natural radiation sources: Risk assessment and their impact on health and the environment. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*.
- Shala, F., Xhixha, G., Kaceli Xhixha, M., Hasani, F., Xhixha, E., Shyti, M., Sadiraj Kuqi, M., Prifti, D. & Qafleshi, M. (2017). Natural

radioactivity in cements and raw materials used in Albanian cement industry. *Environmental Earth Sciences*.

- Sima, O.** (2001). On calculation of detection efficiency of gamma spectrometers with germanium detectors. Institute for Nuclear Research – Pitesti.
- Turhan, Ş.** (2008). Assessment of the natural radioactivity and radiological hazards in Turkish cement and its raw materials. *Journal of Environmental Radioactivity*.
- Turner, J. E.** (2008). *Atoms, radiation, and radiation protection*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Türkiye Çimento Sanayicileri Birliği.** (2021). *Çimento ve mineral katkı standartları*. Alıntı kaynağı: [https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/%C3%87imento\\_ve\\_Mineral\\_Katk%C4%B1\\_Standartlar%C4%B1\\_.pdf](https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/%C3%87imento_ve_Mineral_Katk%C4%B1_Standartlar%C4%B1_.pdf) (Erişim tarihi: 01.12.2025).
- Tsoufanidis, N. & Landsberger, S.** (2021). *Measurement and detection of radiation*. Boca Raton: CRC Press.
- UNSCEAR.** (2000). *Sources and effects of ionizing radiation*. United Nations, New York.
- UNSCEAR.** (2010). *Sources and effects of ionizing radiation: 2008 report to the General Assembly, Volume I*. United Nations.
- Wang, F., Geng, S., Wu, C., Du, H., Zhang, X., Song, Y., ... Li, G.** (2025). Analysis of cement raw materials radioactivity in Chongqing. *Applied Radiation and Isotopes*.

## **EKLER**

**EK A:** IAEA-312 analiz dosyası

**EK B:** IAEA-447 analiz dosyası

**EK C:** Ç-1 örneği analiz dosyası



# EK A: IAEA-312 analiz dosyası

| Detector #1 ACQ 22-Eki-2025 at 11:35:02 RT = 99660,5 LT = 99000,0 |                 |        |        |     |          |      |          |                         |      |      |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------|--------|--------|-----|----------|------|----------|-------------------------|------|------|
| DSROL DSPEC-LF                                                    |                 |        |        |     |          |      |          |                         |      |      |
| No sample description was entered                                 |                 |        |        |     |          |      |          |                         |      |      |
| ROI#                                                              | RANGE( keV)     | GROSS  | NET    | +/- | CENTROID | FWHM | FW(1/5)M | LIBRARY ( keV)          | Bq   | +/-  |
| 1                                                                 | 4,25 8,16       | 5503   | 1242   | 78  | 6,45     | 0,90 | 1,43     | DUMMY 0,10              | 0,00 | 0,00 |
| 2                                                                 | 8,90 20,89      | 34561  | 11936  | 362 | 15,75    | 1,64 | 2,31     | No close library match! |      |      |
| 3                                                                 | 38,02 41,94     | 8697   | 1463   | 98  | 39,87    | 0,75 | 1,12     | No close library match! |      |      |
| 4                                                                 | 44,63 55,16     | 25636  | 6331   | 305 | 46,60    | 0,80 | 1,25     | No close library match! |      |      |
| 5                                                                 | 55,89 59,81     | 10196  | 500    | 107 | 57,90    | 0,59 | 0,87     | No close library match! |      |      |
| 6                                                                 | 61,52 65,44     | 16507  | 4418   | 134 | 63,44    | 0,89 | 1,34     | No close library match! |      |      |
| 7                                                                 | 65,93 69,84     | 13276  | 539    | 122 | 67,82    | 0,72 | 1,27     | No close library match! |      |      |
| 8                                                                 | 70,82 95,54     | 174062 | 108361 | 938 | 77,22    | 0,86 | 1,35     | No close library match! |      |      |
| 9                                                                 | 97,50 101,90    | 9080   | 1708   | 109 | 99,59    | 0,91 | 1,42     | No close library match! |      |      |
| 10                                                                | 103,62 108,02   | 9137   | 2242   | 108 | 105,51   | 1,32 | 1,94     | No close library match! |      |      |
| 11                                                                | 110,72 115,12   | 7151   | -19    | 99  | 112,92   | 0,71 | 0,87     | No close library match! |      |      |
| 12                                                                | 126,87 131,27   | 9954   | 3347   | 111 | 129,18   | 0,89 | 1,36     | No close library match! |      |      |
| 13                                                                | 141,80 146,20   | 6962   | 692    | 97  | 143,92   | 0,63 | 1,81     | No close library match! |      |      |
| 14                                                                | 151,83 156,24   | 7269   | 1545   | 97  | 154,13   | 0,96 | 1,57     | No close library match! |      |      |
| 15                                                                | 161,13 168,48   | 9438   | 138    | 164 | 163,43   | 0,69 | 1,24     | No close library match! |      |      |
| 16                                                                | 174,59 179,00   | 5207   | 15     | 85  | 176,79   | 0,53 | 0,80     | No close library match! |      |      |
| 17                                                                | 183,90 188,30   | 11616  | 6324   | 117 | 186,08   | 1,13 | 1,72     | No close library match! |      |      |
| 18                                                                | 197,36 201,76   | 5251   | 316    | 84  | 199,44   | 0,57 | 1,29     | No close library match! |      |      |
| 19                                                                | 207,15 211,55   | 9005   | 4402   | 104 | 209,27   | 0,95 | 1,50     | No close library match! |      |      |
| 20                                                                | 213,75 218,16   | 4530   | 355    | 78  | 216,01   | 1,04 | 1,31     | No close library match! |      |      |
| 21                                                                | 233,82 244,35   | 68381  | 59713  | 314 | 238,63   | 0,99 | 1,53     | No close library match! |      |      |
| 22                                                                | 250,22 258,30   | 5829   | 36     | 137 | 252,52   | 0,74 | 1,05     | No close library match! |      |      |
| 23                                                                | 268,09 272,49   | 6692   | 3543   | 89  | 270,18   | 1,12 | 1,78     | No close library match! |      |      |
| 24                                                                | 275,18 279,59   | 4630   | 1514   | 76  | 277,31   | 0,97 | 1,52     | No close library match! |      |      |
| 25                                                                | 285,71 290,11   | 3025   | 294    | 64  | 288,06   | 0,61 | 1,17     | No close library match! |      |      |
| 26                                                                | 293,05 297,46   | 14685  | 11975  | 125 | 295,19   | 1,03 | 1,58     | No close library match! |      |      |
| 27                                                                | 297,94 302,35   | 5221   | 2694   | 79  | 300,07   | 1,04 | 1,62     | No close library match! |      |      |
| 28                                                                | 325,60 334,65   | 7671   | 2603   | 147 | 327,91   | 1,12 | 1,71     | No close library match! |      |      |
| 29                                                                | 336,12 340,53   | 12160  | 9709   | 114 | 338,27   | 1,06 | 1,71     | No close library match! |      |      |
| 30                                                                | 349,58 353,99   | 22526  | 19816  | 153 | 351,88   | 1,12 | 1,68     | No close library match! |      |      |
| 31                                                                | 399,51 404,40   | 2475   | 49     | 63  | 401,94   | 0,94 | 1,23     | No close library match! |      |      |
| 32                                                                | 406,85 411,74   | 3414   | 1238   | 69  | 409,45   | 1,05 | 1,68     | No close library match! |      |      |
| 33                                                                | 450,41 455,31   | 2023   | 143    | 57  | 452,81   | 1,08 | 1,73     | No close library match! |      |      |
| 34                                                                | 460,69 465,58   | 4270   | 2598   | 73  | 463,03   | 1,23 | 1,81     | No close library match! |      |      |
| 35                                                                | 475,86 480,76   | 1762   | -13    | 54  | 478,20   | 0,53 | 0,79     | No close library match! |      |      |
| 36                                                                | 484,43 489,32   | 1659   | 194    | 51  | 486,85   | 0,70 | 2,05     | No close library match! |      |      |
| 37                                                                | 508,41 513,30   | 5404   | 3469   | 81  | 510,75   | 1,21 | 1,86     | No close library match! |      |      |
| 38                                                                | 542,43 547,32   | 1506   | -27    | 50  | 544,86   | 0,25 | 0,41     | No close library match! |      |      |
| 39                                                                | 559,80 564,69   | 1795   | 388    | 52  | 562,52   | 1,27 | 1,92     | No close library match! |      |      |
| 40                                                                | 577,17 585,74   | 16035  | 13627  | 149 | 583,23   | 1,27 | 2,00     | No close library match! |      |      |
| 41                                                                | 606,78 611,68   | 14892  | 13446  | 126 | 609,35   | 1,27 | 2,00     | No close library match! |      |      |
| 42                                                                | 645,69 651,08   | 1326   | -132   | 51  | 648,33   | 0,29 | 0,50     | No close library match! |      |      |
| 43                                                                | 662,58 667,96   | 1723   | 452    | 53  | 665,58   | 1,19 | 2,22     | No close library match! |      |      |
| 44                                                                | 724,73 730,11   | 4291   | 3127   | 73  | 727,28   | 1,40 | 2,05     | No close library match! |      |      |
| 45                                                                | 752,38 757,77   | 1553   | 406    | 51  | 755,24   | 1,39 | 2,04     | No close library match! |      |      |
| 46                                                                | 765,84 774,89   | 3505   | 1600   | 94  | 768,42   | 1,23 | 2,19     | No close library match! |      |      |
| 47                                                                | 779,54 788,60   | 2366   | 789    | 82  | 785,75   | 1,60 | 2,22     | No close library match! |      |      |
| 48                                                                | 792,02 797,41   | 2344   | 1479   | 56  | 794,96   | 1,32 | 2,11     | No close library match! |      |      |
| 49                                                                | 833,13 838,51   | 1312   | 518    | 45  | 835,70   | 1,37 | 2,07     | No close library match! |      |      |
| 50                                                                | 846,83 852,22   | 740    | -10    | 37  | 849,58   | 0,30 | 0,52     | No close library match! |      |      |
| 51                                                                | 857,84 863,23   | 2301   | 1660   | 53  | 860,60   | 1,62 | 2,24     | No close library match! |      |      |
| 52                                                                | 864,45 869,83   | 657    | -36    | 36  | 867,21   | 0,36 | 0,75     | No close library match! |      |      |
| 53                                                                | 908,25 914,12   | 10550  | 9831   | 107 | 911,23   | 1,52 | 2,34     | No close library match! |      |      |
| 54                                                                | 931,00 936,88   | 1311   | 598    | 46  | 934,13   | 1,42 | 2,30     | No close library match! |      |      |
| 55                                                                | 949,35 961,34   | 1317   | 92     | 81  | 952,39   | 0,55 | 2,89     | No close library match! |      |      |
| 56                                                                | 961,83 971,86   | 8662   | 7507   | 111 | 969,03   | 1,60 | 2,45     | No close library match! |      |      |
| 57                                                                | 1117,20 1123,56 | 3385   | 2686   | 66  | 1120,40  | 1,45 | 2,45     | No close library match! |      |      |
| 58                                                                | 1167,84 1174,20 | 554    | -77    | 38  | 1171,02  | 0,24 | 0,39     | No close library match! |      |      |
| 59                                                                | 1235,12 1241,48 | 1531   | 1028   | 47  | 1238,22  | 1,72 | 2,74     | No close library match! |      |      |
| 60                                                                | 1244,18 1250,54 | 653    | 56     | 38  | 1247,51  | 0,53 | 1,18     | No close library match! |      |      |
| 61                                                                | 1254,94 1261,30 | 479    | -152   | 37  | 1259,10  | 0,24 | 0,39     | No close library match! |      |      |
| 62                                                                | 1262,04 1268,40 | 448    | -11    | 33  | 1265,25  | 0,28 | 0,49     | No close library match! |      |      |
| 63                                                                | 1299,96 1306,81 | 443    | 30     | 33  | 1302,16  | 1,71 | 1,86     | No close library match! |      |      |
| 64                                                                | 1374,33 1381,18 | 1208   | 690    | 45  | 1377,84  | 1,73 | 2,76     | No close library match! |      |      |
| 65                                                                | 1404,66 1411,51 | 734    | 382    | 36  | 1408,00  | 1,56 | 2,93     | No close library match! |      |      |
| 66                                                                | 1457,50 1464,35 | 3368   | 2987   | 63  | 1460,94  | 1,90 | 3,02     | No close library match! |      |      |
| 67                                                                | 1589,11 1596,45 | 859    | -28    | 50  | 1592,78  | 0,78 | 1,79     | No close library match! |      |      |
| 68                                                                | 1645,13 1652,47 | 262    | 14     | 27  | 1648,69  | 0,39 | 0,63     | No close library match! |      |      |
| 69                                                                | 1725,85 1733,68 | 771    | 528    | 36  | 1729,78  | 1,92 | 3,15     | No close library match! |      |      |
| 70                                                                | 1760,83 1773,55 | 2630   | 2312   | 64  | 1764,64  | 1,96 | 3,19     | No close library match! |      |      |
| 71                                                                | 1839,59 1852,07 | 712    | 315    | 50  | 1847,64  | 1,78 | 3,08     | No close library match! |      |      |
| 72                                                                | 1858,67 1866,99 | 192    | -5     | 26  | 1862,65  | 0,46 | 1,30     | No close library match! |      |      |
| 73                                                                | 1939,63 1947,95 | 216    | -16    | 28  | 1943,55  | 0,26 | 0,83     | No close library match! |      |      |

## EK B: IAEA-447 analiz dosyası

| Detector #1 ACQ 17-Eki-2025 at 11:38:46 RT = 99039,2 LT = 99000,0 |             |         |       |       |          |         |          |                              |      |      |
|-------------------------------------------------------------------|-------------|---------|-------|-------|----------|---------|----------|------------------------------|------|------|
| DSROL DSPEC-LF                                                    |             |         |       |       |          |         |          |                              |      |      |
| No sample description was entered                                 |             |         |       |       |          |         |          |                              |      |      |
| ROI#                                                              | RANGE( keV) | GROSS   | NET   | +/-   | CENTROID | FWHM    | FW(1/5)M | LIBRARY ( keV)               | Bq   | +/-  |
| 1                                                                 | 4,25        | 8,16    | 1097  | 247   | 35       | 6,48    | 0,96     | 1,28 DUMMY 0,10              | 0,00 | 0,00 |
| 2                                                                 | 11,10       | 17,95   | 4318  | 856   | 100      | 12,88   | 1,01     | 1,37 No close library match! |      |      |
| 3                                                                 | 22,11       | 26,03   | 1874  | -153  | 46       | 24,07   | 0,24     | 0,72 No close library match! |      |      |
| 4                                                                 | 30,19       | 38,27   | 9774  | 4865  | 144      | 32,05   | 0,94     | 1,45 No close library match! |      |      |
| 5                                                                 | 44,63       | 48,55   | 6830  | 4684  | 84       | 46,60   | 0,80     | 1,27 No close library match! |      |      |
| 6                                                                 | 51,48       | 55,40   | 1871  | 107   | 46       | 53,22   | 0,77     | 1,21 No close library match! |      |      |
| 7                                                                 | 57,60       | 65,44   | 4826  | 433   | 119      | 63,48   | 0,89     | 1,24 No close library match! |      |      |
| 8                                                                 | 72,78       | 77,18   | 7458  | -831  | 103      | 74,90   | 0,57     | 0,83 No close library match! |      |      |
| 9                                                                 | 82,08       | 95,30   | 9053  | 3209  | 194      | 87,31   | 1,10     | 1,54 No close library match! |      |      |
| 10                                                                | 97,50       | 101,90  | 1686  | 168   | 47       | 99,74   | 0,51     | 1,57 No close library match! |      |      |
| 11                                                                | 103,37      | 107,78  | 1735  | 308   | 48       | 111,23  | 1,35     | 2,26 No close library match! |      |      |
| 12                                                                | 113,16      | 117,57  | 1654  | -32   | 48       | 115,30  | 0,30     | 1,25 No close library match! |      |      |
| 13                                                                | 126,87      | 131,27  | 1777  | 255   | 48       | 129,23  | 0,80     | 1,17 No close library match! |      |      |
| 14                                                                | 141,80      | 146,20  | 1548  | 73    | 46       | 143,98  | 0,52     | 0,81 No close library match! |      |      |
| 15                                                                | 151,59      | 155,99  | 1466  | 264   | 44       | 154,01  | 0,83     | 2,00 No close library match! |      |      |
| 16                                                                | 161,38      | 165,78  | 1282  | 71    | 42       | 163,57  | 0,45     | 2,04 No close library match! |      |      |
| 17                                                                | 184,14      | 188,55  | 2018  | 562   | 51       | 186,03  | 1,26     | 1,61 No close library match! |      |      |
| 18                                                                | 201,52      | 205,92  | 1461  | 74    | 45       | 203,77  | 0,98     | 1,78 No close library match! |      |      |
| 19                                                                | 206,90      | 211,31  | 1729  | 342   | 47       | 209,32  | 0,79     | 1,92 No close library match! |      |      |
| 20                                                                | 223,05      | 227,46  | 1251  | 21    | 41       | 225,15  | 0,88     | 1,53 No close library match! |      |      |
| 21                                                                | 236,52      | 240,92  | 5965  | 4086  | 82       | 238,63  | 1,00     | 1,53 No close library match! |      |      |
| 22                                                                | 267,84      | 276,65  | 2389  | 67    | 92       | 270,07  | 0,68     | 1,70 No close library match! |      |      |
| 23                                                                | 293,05      | 302,11  | 3288  | 1222  | 95       | 295,24  | 0,90     | 1,56 No close library match! |      |      |
| 24                                                                | 336,12      | 340,53  | 1762  | 826   | 46       | 338,28  | 1,04     | 1,68 No close library match! |      |      |
| 25                                                                | 346,16      | 354,23  | 3534  | 1749  | 87       | 351,88  | 0,96     | 1,63 No close library match! |      |      |
| 26                                                                | 393,63      | 398,53  | 1075  | 35    | 42       | 396,26  | 0,93     | 2,28 No close library match! |      |      |
| 27                                                                | 407,09      | 411,99  | 1215  | 183   | 43       | 409,73  | 1,51     | 2,78 No close library match! |      |      |
| 28                                                                | 460,44      | 465,34  | 1700  | 345   | 50       | 462,78  | 0,64     | 2,57 No close library match! |      |      |
| 29                                                                | 508,16      | 515,75  | 1336  | 472   | 55       | 510,77  | 0,94     | 2,67 No close library match! |      |      |
| 30                                                                | 522,85      | 527,74  | 585   | -32   | 31       | 525,41  | 0,43     | 0,61 No close library match! |      |      |
| 31                                                                | 577,42      | 589,17  | 2144  | 1152  | 79       | 583,24  | 1,18     | 1,89 No close library match! |      |      |
| 32                                                                | 606,78      | 611,68  | 1668  | 1342  | 43       | 609,37  | 1,25     | 1,99 No close library match! |      |      |
| 33                                                                | 620,98      | 625,87  | 266   | 11    | 21       | 623,72  | 1,12     | 2,75 No close library match! |      |      |
| 34                                                                | 633,95      | 638,84  | 227   | -7    | 19       | 636,40  | 0,63     | 1,22 No close library match! |      |      |
| 35                                                                | 659,15      | 664,53  | 30676 | 30294 | 176      | 661,72  | 1,37     | 2,07 No close library match! |      |      |
| 36                                                                | 685,33      | 694,63  | 289   | -47   | 35       | 688,06  | 0,28     | 0,46 No close library match! |      |      |
| 37                                                                | 703,69      | 709,07  | 227   | -23   | 21       | 706,39  | 0,70     | 0,87 No close library match! |      |      |
| 38                                                                | 717,63      | 723,02  | 227   | 31    | 20       | 718,90  | 0,29     | 1,92 No close library match! |      |      |
| 39                                                                | 724,73      | 730,11  | 424   | 292   | 23       | 727,36  | 1,57     | 2,41 No close library match! |      |      |
| 40                                                                | 752,38      | 757,77  | 230   | 69    | 19       | 755,07  | 0,41     | 2,39 No close library match! |      |      |
| 41                                                                | 760,95      | 766,33  | 234   | 21    | 20       | 765,35  | 0,24     | 0,39 No close library match! |      |      |
| 42                                                                | 769,27      | 774,65  | 223   | -1    | 20       | 771,95  | 0,63     | 0,84 No close library match! |      |      |
| 43                                                                | 796,18      | 801,57  | 188   | -13   | 19       | 800,34  | 0,26     | 1,84 No close library match! |      |      |
| 44                                                                | 866,65      | 875,46  | 209   | -45   | 30       | 868,37  | 6,12     | 6,26 No close library match! |      |      |
| 45                                                                | 878,40      | 884,27  | 160   | -24   | 19       | 880,13  | 1,59     | 1,81 No close library match! |      |      |
| 46                                                                | 890,14      | 896,01  | 150   | -3    | 18       | 891,37  | 1,97     | 2,13 No close library match! |      |      |
| 47                                                                | 908,49      | 919,26  | 1172  | 919   | 46       | 911,31  | 1,46     | 2,19 No close library match! |      |      |
| 48                                                                | 938,34      | 944,22  | 147   | 3     | 18       | 941,27  | 0,59     | 0,82 No close library match! |      |      |
| 49                                                                | 951,31      | 957,18  | 163   | 19    | 18       | 954,29  | 0,31     | 0,55 No close library match! |      |      |
| 50                                                                | 965,99      | 975,05  | 723   | 457   | 38       | 969,00  | 1,30     | 2,18 No close library match! |      |      |
| 51                                                                | 977,74      | 983,61  | 121   | 33    | 15       | 980,79  | 0,37     | 2,08 No close library match! |      |      |
| 52                                                                | 1006,36     | 1012,24 | 174   | 43    | 18       | 1009,97 | 2,43     | 2,59 No close library match! |      |      |
| 53                                                                | 1012,73     | 1018,60 | 147   | 9     | 17       | 1017,37 | 0,24     | 0,71 No close library match! |      |      |
| 54                                                                | 1033,77     | 1039,64 | 151   | 23    | 17       | 1036,67 | 0,29     | 0,81 No close library match! |      |      |
| 55                                                                | 1051,14     | 1060,68 | 228   | -7    | 31       | 1053,98 | 0,39     | 2,15 No close library match! |      |      |
| 56                                                                | 1117,44     | 1123,80 | 444   | 268   | 26       | 1120,55 | 1,41     | 3,38 No close library match! |      |      |
| 57                                                                | 1184,24     | 1190,60 | 183   | 24    | 20       | 1187,25 | 0,59     | 1,78 No close library match! |      |      |
| 58                                                                | 1203,56     | 1209,92 | 199   | 40    | 20       | 1221,02 | 1,28     | 1,99 No close library match! |      |      |
| 59                                                                | 1251,27     | 1257,63 | 181   | 70    | 18       | 1254,37 | 0,45     | 4,28 No close library match! |      |      |
| 60                                                                | 1298,00     | 1304,85 | 167   | 0     | 21       | 1301,42 | 0,26     | 0,41 No close library match! |      |      |
| 61                                                                | 1324,42     | 1331,27 | 111   | -20   | 18       | 1327,72 | 0,45     | 0,62 No close library match! |      |      |
| 62                                                                | 1382,16     | 1389,01 | 87    | 14    | 14       | 1385,39 | 1,12     | 1,33 No close library match! |      |      |
| 63                                                                | 1419,34     | 1426,19 | 62    | 8     | 12       | 1422,82 | 0,36     | 0,90 No close library match! |      |      |
| 64                                                                | 1431,57     | 1438,42 | 88    | 5     | 15       | 1434,91 | 0,47     | 0,87 No close library match! |      |      |
| 65                                                                | 1457,75     | 1470,47 | 4046  | 3894  | 69       | 1460,98 | 1,72     | 2,83 No close library match! |      |      |
| 66                                                                | 1472,67     | 1479,52 | 61    | 3     | 12       | 1476,05 | 0,33     | 1,55 No close library match! |      |      |
| 67                                                                | 1511,81     | 1519,15 | 76    | -2    | 15       | 1515,61 | 0,43     | 1,22 No close library match! |      |      |
| 68                                                                | 1839,35     | 1847,67 | 72    | -46   | 19       | 1843,51 | 0,24     | 0,39 No close library match! |      |      |
| 69                                                                | 1883,87     | 1892,18 | 51    | 3     | 13       | 1888,01 | 0,68     | 0,89 No close library match! |      |      |

# EK C: Ç-1 örneği analiz dosyası

| Detector #1 MCQ 25-Eki-2025 at 17:23:14 RT = 202677,1 LT = 201600,0 |             |         |       |       |          |                                  |          |                |                         |      |
|---------------------------------------------------------------------|-------------|---------|-------|-------|----------|----------------------------------|----------|----------------|-------------------------|------|
| DSRDL DSPEC-LF                                                      |             |         |       |       |          |                                  |          |                |                         |      |
| No sample description was entered                                   |             |         |       |       |          |                                  |          |                |                         |      |
| ROI#                                                                | RANGE( keV) | GROSS   | NET   | +/-   | CENTROID | FHMM                             | FN(1/5)M | LIBRARY ( keV) | Bq                      | +/-  |
| 1                                                                   | 4,25        | 8,16    | 1571  | 398   | 41       | 6,46                             | 0,92     | 1,34           | 0,00                    | 0,00 |
| 2                                                                   | 11,10       | 21,13   | 7053  | 1178  | 162      | 15,88                            | 1,82     | 5,83           | No close library match! |      |
| 3                                                                   | 23,58       | 27,59   | 2107  | 194   | 48       | 25,08                            | 1,37     | 2,23           | No close library match! |      |
| 4                                                                   | 32,88       | 36,88   | 2059  | -4    | 48       | 35,02                            | 0,31     | 0,82           | No close library match! |      |
| 5                                                                   | 37,78       | 41,69   | 2463  | 227   | 52       | 30,92                            | 0,97     | 1,30           | No close library match! |      |
| 6                                                                   | 44,63       | 48,55   | 3607  | 1431  | 62       | 46,59                            | 0,77     | 1,25           | No close library match! |      |
| 7                                                                   | 51,24       | 55,16   | 2933  | 445   | 57       | 53,34                            | 0,91     | 1,87           | No close library match! |      |
| 8                                                                   | 61,52       | 66,60   | 9254  | 1986  | 160      | 63,38                            | 0,74     | 1,27           | No close library match! |      |
| 9                                                                   | 72,78       | 95,05   | 45157 | 23974 | 496      | 77,18                            | 0,85     | 1,32           | No close library match! |      |
| 10                                                                  | 97,50       | 105,58  | 4715  | -581  | 129      | 99,68                            | 0,42     | 0,82           | No close library match! |      |
| 11                                                                  | 127,11      | 131,52  | 2705  | 725   | 59       | 129,20                           | 0,74     | 1,48           | No close library match! |      |
| 12                                                                  | 141,55      | 145,96  | 2286  | 436   | 55       | 143,94                           | 0,81     | 1,70           | No close library match! |      |
| 13                                                                  | 151,83      | 159,42  | 3308  | 464   | 95       | 154,04                           | 0,83     | 2,30           | No close library match! |      |
| 14                                                                  | 161,13      | 165,54  | 1853  | 269   | 49       | 163,44                           | 0,52     | 2,25           | No close library match! |      |
| 15                                                                  | 167,50      | 176,31  | 3128  | 321   | 102      | 169,69                           | 0,35     | 1,25           | No close library match! |      |
| 16                                                                  | 183,90      | 188,30  | 3953  | 2445  | 67       | 186,05                           | 1,08     | 1,64           | No close library match! |      |
| 17                                                                  | 200,05      | 204,45  | 1443  | -56   | 45       | 202,17                           | 0,35     | 0,58           | No close library match! |      |
| 18                                                                  | 207,15      | 211,55  | 2264  | 943   | 53       | 209,27                           | 0,97     | 1,48           | No close library match! |      |
| 19                                                                  | 216,69      | 221,10  | 1251  | 104   | 41       | 219,07                           | 1,14     | 1,34           | No close library match! |      |
| 20                                                                  | 226,73      | 231,13  | 1101  | 54    | 39       | 228,81                           | 0,36     | 0,59           | No close library match! |      |
| 21                                                                  | 234,97      | 247,77  | 16760 | 13219 | 187      | 238,62                           | 1,02     | 1,55           | No close library match! |      |
| 22                                                                  | 264,17      | 272,25  | 2501  | 393   | 85       | 270,11                           | 0,70     | 1,80           | No close library match! |      |
| 23                                                                  | 275,18      | 279,59  | 1249  | 384   | 40       | 277,25                           | 0,72     | 1,15           | No close library match! |      |
| 24                                                                  | 281,30      | 285,71  | 970   | -28   | 37       | 283,50                           | 0,66     | 1,51           | No close library match! |      |
| 25                                                                  | 293,05      | 297,46  | 5105  | 4269  | 74       | 295,20                           | 1,01     | 1,65           | No close library match! |      |
| 26                                                                  | 297,94      | 302,35  | 1394  | 567   | 41       | 300,10                           | 0,81     | 1,76           | No close library match! |      |
| 27                                                                  | 319,48      | 323,89  | 782   | 86    | 52       | 321,77                           | 0,77     | 1,52           | No close library match! |      |
| 28                                                                  | 325,69      | 330,09  | 1311  | 465   | 40       | 327,99                           | 1,09     | 1,57           | No close library match! |      |
| 29                                                                  | 336,12      | 340,53  | 2885  | 2039  | 57       | 338,28                           | 1,04     | 1,56           | No close library match! |      |
| 30                                                                  | 343,47      | 347,87  | 649   | 69    | 29       | 345,94                           | 1,15     | 1,41           | No close library match! |      |
| 31                                                                  | 349,83      | 354,23  | 7490  | 6654  | 88       | 351,89                           | 1,06     | 1,70           | No close library match! |      |
| 32                                                                  | 358,64      | 366,47  | 957   | 0     | 55       | 360,62                           | 1,02     | 1,81           | No close library match! |      |
| 33                                                                  | 370,63      | 375,04  | 675   | 22    | 30       | 372,93                           | 0,51     | 2,65           | No close library match! |      |
| 34                                                                  | 375,77      | 380,66  | 739   | 154   | 33       | 378,30                           | 0,58     | 2,21           | No close library match! |      |
| 35                                                                  | 384,09      | 388,98  | 807   | -7    | 36       | 386,52                           | 0,26     | 0,41           | No close library match! |      |
| 36                                                                  | 398,47      | 394,37  | 662   | -13   | 33       | 393,20                           | 0,41     | 0,30           | No close library match! |      |
| 37                                                                  | 399,26      | 404,16  | 691   | 43    | 33       | 401,59                           | 0,93     | 0,95           | No close library match! |      |
| 38                                                                  | 407,09      | 411,99  | 841   | 145   | 36       | 409,54                           | 1,05     | 1,31           | No close library match! |      |
| 39                                                                  | 425,69      | 430,59  | 619   | -16   | 32       | 427,92                           | 0,87     | 1,81           | No close library match! |      |
| 40                                                                  | 435,48      | 440,38  | 613   | 109   | 30       | 437,80                           | 0,41     | 2,02           | No close library match! |      |
| 41                                                                  | 445,52      | 450,41  | 615   | 35    | 31       | 447,95                           | 0,25     | 1,31           | No close library match! |      |
| 42                                                                  | 456,53      | 460,50  | 1809  | 540   | 89       | 462,95                           | 1,03     | 1,98           | No close library match! |      |
| 43                                                                  | 474,15      | 479,04  | 530   | -55   | 30       | 476,48                           | 0,44     | 0,62           | No close library match! |      |
| 44                                                                  | 484,67      | 489,57  | 583   | 92    | 30       | 487,26                           | 2,31     | 3,19           | No close library match! |      |
| 45                                                                  | 495,19      | 503,76  | 712   | 10    | 50       | 499,53                           | 0,35     | 1,91           | No close library match! |      |
| 46                                                                  | 504,25      | 513,06  | 1463  | 612   | 61       | 510,62                           | 0,86     | 1,41           | No close library match! |      |
| 47                                                                  | 531,90      | 536,80  | 466   | -22   | 28       | 534,35                           | 0,24     | 0,39           | No close library match! |      |
| 48                                                                  | 541,69      | 550,50  | 818   | -65   | 56       | 543,10                           | 1,16     | 2,17           | No close library match! |      |
| 49                                                                  | 554,66      | 559,56  | 417   | -95   | 27       | 557,18                           | 0,37     | 0,60           | No close library match! |      |
| 50                                                                  | 568,36      | 573,26  | 480   | 7     | 28       | 570,91                           | 0,68     | 1,81           | No close library match! |      |
| 51                                                                  | 580,60      | 583,33  | 3957  | 2976  | 92       | 583,22                           | 1,20     | 1,93           | No close library match! |      |
| 52                                                                  | 586,26      | 591,16  | 405   | -57   | 26       | 588,64                           | 0,35     | 0,76           | No close library match! |      |
| 53                                                                  | 607,93      | 611,92  | 5958  | 4683  | 73       | 609,36                           | 1,28     | 0,93           | No close library match! |      |
| 54                                                                  | 624,40      | 629,30  | 365   | 3     | 24       | 628,05                           | 0,27     | 0,30           | No close library match! |      |
| 55                                                                  | 632,23      | 637,13  | 281   | -47   | 22       | 635,90                           | 0,24     | 0,39           | No close library match! |      |
| 56                                                                  | 647,89      | 650,92  | 1733  | -167  | 140      | 658,91                           | 0,25     | 0,40           | No close library match! |      |
| 57                                                                  | 672,61      | 682,15  | 724   | 64    | 52       | 675,35                           | 0,42     | 1,97           | No close library match! |      |
| 58                                                                  | 682,89      | 688,27  | 411   | -12   | 28       | 685,58                           | 0,24     | 0,72           | No close library match! |      |
| 59                                                                  | 689,74      | 700,75  | 785   | 129   | 57       | 692,74                           | 1,41     | 4,09           | No close library match! |      |
| 60                                                                  | 702,46      | 707,85  | 477   | -58   | 31       | 705,72                           | 1,68     | 1,85           | No close library match! |      |
| 61                                                                  | 712,25      | 717,63  | 310   | -15   | 24       | 714,94                           | 0,71     | 0,87           | No close library match! |      |
| 62                                                                  | 719,35      | 729,87  | 1347  | 404   | 66       | 727,19                           | 1,36     | 2,11           | No close library match! |      |
| 63                                                                  | 731,34      | 745,29  | 900   | 102   | 71       | 733,98                           | 1,09     | 3,78           | No close library match! |      |
| 64                                                                  | 747,73      | 753,12  | 337   | 15    | 25       | 750,31                           | 0,43     | 1,83           | No close library match! |      |
| 65                                                                  | 765,35      | 774,65  | 1141  | 283   | 60       | 768,37                           | 1,40     | 1,62           | No close library match! |      |
| 66                                                                  | 782,72      | 788,11  | 552   | 132   | 30       | 785,46                           | 0,86     | 1,54           | No close library match! |      |
| 67                                                                  | 792,02      | 800,91  | 1261  | 342   | 86       | 795,02                           | 1,13     | 3,21           | No close library match! |      |
| 68                                                                  | 809,64      | 817,96  | 366   | 7     | 35       | 815,29                           | 0,29     | 2,30           | No close library match! |      |
| 69                                                                  | 821,63      | 827,91  | 246   | 22    | 21       | 824,36                           | 0,56     | 0,81           | No close library match! |      |
| 70                                                                  | 829,46      | 838,51  | 571   | 120   | 43       | 835,59                           | 0,96     | 1,27           | No close library match! |      |
| 71                                                                  | 850,99      | 856,38  | 256   | -103  | 24       | 852,22                           | 0,24     | 0,39           | No close library match! |      |
| 72                                                                  | 857,60      | 862,98  | 657   | 421   | 29       | 860,82                           | 1,62     | 2,75           | No close library match! |      |
| 73                                                                  | 865,18      | 870,57  | 261   | -41   | 23       | 866,16                           | 0,24     | 1,97           | No close library match! |      |
| 74                                                                  | 880,90      | 885,77  | 249   | 2     | 23       | 882,85                           | 2,30     | 2,53           | No close library match! |      |
| 75                                                                  | 888,46      | 894,33  | 257   | -62   | 25       | 889,93                           | 1,75     | 1,96           | No close library match! |      |
| 76                                                                  | 900,49      | 914,37  | 2300  | 2199  | 52       | 911,23                           | 1,43     | 2,28           | No close library match! |      |
| 77                                                                  | 916,32      | 922,20  | 290   | -79   | 27       | 917,55                           | 1,96     | 2,18           | No close library match! |      |
| 78                                                                  | 931,74      | 941,28  | 596   | 206   | 42       | 933,94                           | 2,01     | 1,18           | No close library match! |      |
| 79                                                                  | 949,60      | 955,47  | 282   | 41    | 24       | 952,41                           | 0,76     | 1,84           | No close library match! |      |
| 80                                                                  | 962,08      | 972,11  | 1956  | 1520  | 58       | 969,00                           | 1,61     | 2,90           | No close library match! |      |
| 81                                                                  | 973,58      | 1000,25 | 1195  | -441  | 143      | 976,51                           | 0,24     | 0,73           | No close library match! |      |
| 82                                                                  | 1029,61     | 1035,48 | 248   | -18   | 23       | 1032,36                          | 0,36     | 0,76           | No close library match! |      |
| 83                                                                  | 1048,45     | 1058,48 | 407   | 66    | 39       | 1057,03                          | 0,53     | 1,11           | No close library match! |      |
| 84                                                                  | 1064,35     | 1070,22 | 316   | -90   | 28       | 1067,29                          | 0,24     | 0,39           | No close library match! |      |
| 85                                                                  | 1071,69     | 1075,56 | 245   | 24    | 24       | 1073,40                          | 0,24     | 0,38           | No close library match! |      |
| 86                                                                  | 1080,91     | 1092,00 | 381   | -69   | 48       | 1084,66                          | 0,24     | 1,47           | No close library match! |      |
| 87                                                                  | 1117,44     | 1123,80 | 1256  | 952   | 41       | 1120,43                          | 1,66     | 2,43           | No close library match! |      |
| 88                                                                  | 1129,19     | 1135,55 | 253   | -54   | 26       | 1132,31                          | 0,32     | 0,56           | No close library match! |      |
| 89                                                                  | 1145,33     | 1151,70 | 241   | 38    | 23       | Could not properly fit the peak, |          |                |                         |      |
| 90                                                                  | 1157,08     | 1163,44 | 278   | -22   | 26       | 1160,30                          | 0,28     | 1,13           | No close library match! |      |
| 91                                                                  | 1170,05     | 1176,41 | 337   | -4    | 28       | 1173,14                          | 0,43     | 2,23           | No close library match! |      |
| 92                                                                  | 1199,16     | 1205,52 | 259   | -14   | 25       | 1201,12                          | 1,70     | 3,00           | No close library match! |      |
| 93                                                                  | 1226,56     | 1232,92 | 274   | -40   | 27       | 1229,70                          | 0,33     | 1,82           | No close library match! |      |
| 94                                                                  | 1235,61     | 1241,97 | 640   | 376   | 32       | 1238,33                          | 1,52     | 2,81           | No close library match! |      |
| 95                                                                  | 1271,82     | 1278,18 | 170   | -76   | 23       | 1276,71                          | 0,24     | 0,39           | No close library match! |      |
| 96                                                                  | 1281,36     | 1287,72 | 245   | -59   | 26       | Could not properly fit the peak, |          |                |                         |      |
| 97                                                                  | 1290,41     | 1297,26 | 230   | 34    | 23       | 1293,82                          | 0,63     | 2,93           | No close library match! |      |
| 98                                                                  | 1300,14     | 1306,99 | 113   | -57   | 20       | 1305,03                          | 0,24     | 0,39           | No close library match! |      |
| 99                                                                  | 1374,33     | 1381,18 | 444   | 313   | 26       | 1377,69                          | 1,48     | 3,57           | No close library match! |      |
| 100                                                                 | 1388,27     | 1395,12 | 119   | -37   | 19       | 1389,25                          | 4,40     | 4,55           | No close library match! |      |
| 101                                                                 | 1401,97     | 1411,25 | 365   | 59    | 37       | 1409,33                          | 1,64     | 4,35           | No close library match! |      |
| 102                                                                 | 1426,68     | 1433,53 | 178   | -14   | 22       | 1432,05                          | 0,68     | 0,86           | No close library match! |      |
| 103                                                                 | 1438,91     | 1451,63 | 201   | -31   | 36       | 1448,43                          | 0,64     | 0,84           | No close library match! |      |
| 104                                                                 | 1457,26     | 1464,11 | 3728  | 3645  | 62       | 1460,91                          | 1,95     | 2,91           | No close library match! |      |
| 105                                                                 | 1467,78     | 1474,63 | 139   | 41    | 17       | 1473,40                          | 0,24     | 1,11           | No close library match! |      |
| 106                                                                 | 1482,46     | 1489,30 | 126   | 25    | 18       | 1486,07                          | 0,47     | 1,44           | No close library match! |      |
| 107                                                                 | 1528,69     | 1536,63 | 142   | 22    | 19       | 1530,13                          | 3,00     | 3,25           | No close library match! |      |
| 108                                                                 | 1545,33     | 1556,33 | 196   | -80   | 35       | 1549,04                          | 1,39     | 1,58           | No close library match! |      |
| 109                                                                 | 1576,64     | 1591,56 | 405   | 253   | 36       | 1580,24                          | 1,73     | 3,98           | No close library match! |      |
| 110                                                                 | 1609,17     | 1616,51 | 113   | -42   | 30       | 1614,31                          | 1,22     | 0,77           | No close library match! |      |
| 111                                                                 | 1627,52     | 1634,86 | 228   | 123   | 21       | 1630,98                          | 1,62     | 4,29           | No close library match! |      |
| 112                                                                 | 1684,51     | 1692,34 | 106   | -30   | 20       | 1688,31                          | 0,48     | 0,71           | No close library match! |      |
| 113                                                                 | 1729,28     | 1737,10 | 190   | -136  | 30       | 1735,39                          | 0,24     | 0,76           | No close library match! |      |
| 114                                                                 | 1747,38     | 1772,82 | 1081  | 687   | 74       | 1764,67                          | 1,89     | 3,13           | No close library match! |      |
| 115                                                                 | 1792,39     | 1800,21 | 79    | 17    | 15       | 1796,42                          | 0,42     | 1,65           | No close library match! |      |
| 116                                                                 | 1813,91     | 1821,74 | 81    | -10   | 17       | 1816,36                          | 0,24     | 0,39           | No close library match! |      |
| 117                                                                 | 1830,29     | 1847,91 | 173   | -164  | 31       | 1846,93                          | 0,24     | 0,39           | No close library match! |      |
| 118                                                                 | 1860,63     | 186     |       |       |          |                                  |          |                |                         |      |

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Burak ORUÇ

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2021, University of Birmingham, School of Physics and Astronomy, MSc Nuclear Decommissioning and Waste Management

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2019 yılında Millî Eğitim Bakanlığı tarafından verilen Yurt Dışına Lisansüstü Öğrenim Görmek Üzere Gönderilecek Öğrencileri Seçme ve Yerleştirme (YLSY) bursunu almaya hak kazandı,
- 2022 yılında Nükleer Düzenleme Uzman Yardımcısı olarak Nükleer Düzenleme Kurumunda görev yapmaya başladı,
- 2025 yılında Nükleer Düzenleme Uzmanı olmaya hak kazandı.

### YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **ORUÇ B., KAHRAMAN D. A., ŞİRİN E., ESEN A. N., UYAR E., 2025,** Determination of Self-Attenuation Correction Factors in Gamma Spectrometry for Cylindrical Sample Geometry, 9th International Halich Congress On Multidisciplinary Scientific Research, December 3-4, 2025, Istanbul/Türkiye.