

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BİNALARDA KAPLAMA MALZEMESİ OLARAK KULLANILAN SERAMİK
VE MERMER ÖRNEKLERİNİN EDXRF YÖNTEMİYLE KİMYASAL
BİLEŞİMİNİN BELİRLENMESİ VE RADYASYON DOZ DEĞERLENDİRMESİ
İÇİN GAMA SPEKTROMETRİK YÖNTEMLE RADYOAKTİVİTE
İÇERİKLERİNİN ÖLÇÜLMESİ**

Hayati GÖKMEN

SAĞLIK FİZİĞİ ANABİLİM DALI

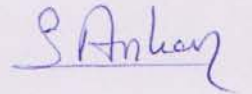
ANKARA

2014

Her hakkı saklıdır

Prof. Dr. Haluk YÜCEL danışmanlığında, Hayati GÖKMEN tarafından hazırlanan 'Binalarda Kaplama Malzemesi Olarak Kullanılan Seramik ve Mermer Örneklerinin EDXRF Yöntemiyle Kimyasal Bileşiminin Belirlenmesi ve Radyasyon Dozu Değerlendirmesi için Gama Spektrometrik Yöntemle Radyoaktivite İçeriklerinin Ölçülmesi' adlı tez çalışması 20 Haziran 2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Medikal Fizik Anabilim Dalı / Sağlık Fiziği Yüksek Lisans Programı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

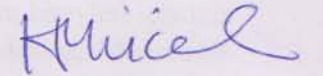
Başkan : Prof. Dr. Pervin ARIKAN

İmza: 

Üye : Prof. Dr. Yusuf Kaan KADIOĞLU

İmza: 

Üye : Prof. Dr. Haluk YÜCEL

İmza: 

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.



Doç. Dr. Niyazi MERİÇ

Enstitü Müdürü

20 Haziran 2014, Ankara

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Medikal Fizik Anabilim Dalı / Sağlık Fiziği Yüksek Lisans Programı

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİNALARDA KAPLAMA MALZEMESİ OLARAK KULLANILAN SERAMİK VE MERMER ÖRNEKLERİNİN EDXRF YÖNTEMİYLE KİMYASAL BİLEŞİMİNİN BELİRLENMESİ VE RADYOLOJİK DOZ DEĞERLENDİRMESİ İÇİN GAMA SPEKTROMETRİK YÖNTEMLE RADYOAKTİVİTE İÇERİKLERİNİN ÖLÇÜLMESİ

Hayati GÖKMEN

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü
Medikal Fizik Anabilim Dalı
Sağlık Fiziği Yüksek Lisans Programı

Danışman: Prof.Dr.Haluk YÜCEL

İnsanlar, günlük yaşamının önemli bir kısmını (yaklaşık %80), ev, işyeri ve benzeri yaşam alanlarında geçirmeleri nedeniyle, binalarda kullanılan malzemelerden kaynaklanan iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmaktadırlar. Bu nedenle, bu tür yerleri kullanan toplum bireyleri için izin verilebilir yıllık 1 mSv alınabilecek radyasyon dozunun ölçülmesi ve değerlendirilmesi önemlidir. Bu tez çalışmasında kaplama malzemesi olarak kullanılan seramik ve mermer örneklerinin radyoaktivite içeriklerinin ölçülmesi için HPGe dedektörlü gama spektrometrik yöntem kullanılmıştır. Dedektörün verim kalibrasyonu çoklu radyonüklit standardı ile yapılmıştır. Kaplama malzemelerinin kompozisyonu, 25 mm² SDD (Silicon Drift Detector) dedektörlü bir EDXRF spektrometresi yardımıyla belirlenmiştir. Kompozisyon, gama öz soğurma düzeltmesi hesabında kullanılmıştır. Çeşitli seramik ve mermer örneklerinin öz soğurma düzeltme faktörü uygulanarak elde edilen aktivite değerleri ile öz soğurma düzeltmesi uygulanmadan elde edilen aktivite sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Aktivite sonuçları öz soğurma düzeltme faktörünün gerekli olduğunu göstermiştir. Seramik karolar ve mermer numuneleri için azami gama doz indisi $1,23 \pm 0,06$ bulunmuştur ve bu değer 0,3 mSv/y ekstra gama dozuna kaşılık gelen indisten, yani $I \leq 2$ 'den küçüktür. Ayrıca bir ZnS:Ag sintilatörlü dedektörle seramik karolarda yüzey beta aktivitesi 0,017-0,038 Bq/cm² aralığında ve bir 450 cm³ iyon odası ile de yüzey beta doz hızı 0,188-0,203 µSv/h aralığında ölçülmüştür. Bireyler için cilt dozu 50 mSv/yıl sınır değerine göre kaplama malzemesiyle günde 4 saat maruziyeti varsayıldığında, seramik ve mermerlerden kaynaklanan yüzey beta dozunun doğal fon seviyesinde kaldığı belirlenmiştir.

Haziran 2014, 74 sayfa

Anahtar Kelimeler: Gama spektrometresi, Ge dedektör, radyoaktivite, EDXRF, öz soğurma, verim, kaplama malzemeleri, seramik, mermer

ABSTRACT

Master Thesis

DETERMINATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF SERAMIC TILE AND MARBLE SAMPLES USED FOR COVERING MATERIALS IN BUILDINGS BY EDXRF METHOD AND MEASURUMENT OF RADIOACTIVITY CONTENT BY GAMMA SPECTROMETRIC METHOD FOR RADIATION DOSE ASSESSMENT

Hayati GÖKMEN

Ankara University, Institute of Nuclear Science
Department of Medical Physics

Supervisor: Prof.Dr.Haluk YÜCEL

People are always exposed to ionizing radiation from the materials used in buildings since they spend most of their daily life (approximately 80%) at homes, workplaces or similar residence of places. Therefore it is, important to measure and evaluate the dose from building materials in addition to the allowable annual radiation dose limit of 1mSv for individuals. In this study the radioactivity contents of ceramic tiles and marbles used for covering materials in buildings were measured by using gamma-ray spectrometric method with a %44.8 relative efficiency HPGe detector. The chemical compositions of the samples were determined by EDXRF method with a 25 mm² SDD(silicon drift detector) for the calculation of self-absorption factors that should be applied to the gamma peaks used in the analyses. The Ge detector was calibrated with a certified multinuclide standard reference material. Total 51 ceramic and marble samples were grinded, sieved and put into cylindrical containers and sealed them to attain radioactive equilibrium. Taking into account the self-absorption factors calculated from elemental composition, the activities with and without self-absorption correction applied were compared. The results indicated the necessity of the application of these factors to estimate more accurate activities, thus giving dose index. Maximum dose index for seramic tile and marble samples is found to be $1.23 \pm 0,06$, which is less than $I \leq 2$ corresponding to extra dose of 0.3 mSv/y. In addition, the surface beta activities of ceramic tile samples were measured in the range of 0.017-0.038 Bq/cm² by using a ZnS:Ag scintillation detector and surface beta dose rates were also measured in the range of 0.188-0.203 μ Sv/h by using 450 cm³ ionization chamber. According to the limit of maximum allowable skin dose equivalent of 50 mSv/y for individuals and assuming the maximum exposure time of 4h per day to the covering materials used in buildings, the beta surface doses from ceramic tiles and marbles are estimated. Extra dose due to beta radiation in the ceramic tiles was calculated and found to be close to background dose level.

June 2014, 74pages

Key Words: Gamma spectrometry, Ge detector, radioactivity, EDXRF, self-absorption, efficiency, covering materials, seramic tile, marble

TEŞEKKÜRLER

Çalışmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyen, mesleki deneyimlerini öğrencilerine büyük bir özveriyle aktaran ve kendimi geliştirmeme katkıda bulunan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Haluk YÜCEL' e sonsuz teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalar süresince desteklerinden dolayı Arş. Gör. Esra UYAR'a, Arş. Gör. Şölen ÇUBUKÇU, Alptuğ Özer YÜKSEL'e ve Arş Gör Emre GÜLLÜOĞLU'na ve yazım ile ilgili katkılarından ve düzeltmeleri için Sayın Emin YELTEPE (TAEK-SANAEM) ve Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler çalışanlarına teşekkür ederim

Çalışmalarım dışında manevi desteklerini benden esirgemeyen Büşra Haney Ozan'a, Tuna COPPENS ve Jan Peter COPPENS'a teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen her zaman yanımda olan annem Güllü GÖKMEN ve babam Hıdır GÖKMEN şükranlarımı ve sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| TEŞEKKÜRLER | iii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | vi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | vii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | viii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. KURAMSAL TEMELLER | 3 |
| 2.1 X-Işını Floresans Tekniği | 3 |
| 2.1.1 X-Işınlarnın Oluşumu | 3 |
| 2.1.2 Sürekli X-Işını Spektrumu | 4 |
| 2.1.3 Karakteristik X-ışını Spektrumu | 4 |
| 2.1.4 X-ışınları Floresans Spektrometresi | 5 |
| 2.1.5 X-Işını Floresans Uygulama Teknikleri | 6 |
| 2.1.5.1 Nitel Analiz (Kalitatif Analiz) | 6 |
| 2.1.5.2 Nicel Analiz (Kantitatif Analiz) | 7 |
| 2.2 Gama Spektrometri Yöntemi | 8 |
| 2.2.1 Radyoaktivite ve Radyoaktif Bozunma Yasası | 8 |
| 2.2.2 Doğal Bozunma Serileri | 10 |
| 2.2.2.1 Sürekli denge durumu | 11 |
| 2.2.2.2 Geçici denge durumu | 12 |
| 2.2.2.3 Dengenin oluşmadığı durum | 12 |
| 2.2.3 Gama Spektrometresi | 13 |
| 2.2.3.1 Yüksek saflıkta germanyum yarı iletken dedektörler | 13 |
| 2.2.4 Fotopik Net Sayımının Belirlenmesi | 14 |
| 2.2.4.1 Ortamdaki doğal fonun fotopik sayımından çıkarılması | 15 |
| 2.2.4.2 Net fotopik sayımındaki belirsizliğin hesaplanması | 16 |
| 2.2.5 Ölçülebilir En Küçük Aktivitenin Hesaplanması | 17 |
| 2.2.5.1 Kritik seviye | 17 |
| 2.2.5.2 Belirleme sınırı | 19 |
| 2.2.6 Dedektör Verimi | 21 |
| 2.2.6.1 Mutlak fotopik veriminin ölçülmesi | 21 |
| 2.2.7 Aktivite Ölçümü | 22 |
| 2.2.8 Fotopik Verimi ve Aktivite Ölçümünde Uygulanması Gereken Düzeltme | 23 |
| 2.2.8.1 Radyoaktif bozunma düzeltme faktörü | 23 |
| 2.2.8.2 Ölçüm süresi düzeltme faktörü | 24 |
| 2.2.8.3 Gama-ışını öz soğurma düzeltme faktörü | 24 |
| 2.2.8.3.1 Gama-ışını öz soğurma düzeltme faktörünün hesaplanması | 25 |
| 2.2.8.4 Gerçek koincidens düzeltme faktörü | 26 |
| 2.2.8.5 Rasgele yığılma düzeltme faktörü | 26 |
| 2.2.9 Belirsizlik Hesabı | 27 |
| 2.2.9.1 Fotopik veriminin belirsizliği | 28 |
| 2.2.9.2 Aktivitenin belirsizliği | 29 |
| 2.2.9.2.1 Doğrudan ölçme yöntemi ile ölçülen aktivitenin belirsizliği | 29 |

| | |
|--|-----------|
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM | 30 |
| 3.1 Tez Kapmasında Kullanılan Spektrometrik Yöntemler | 30 |
| 3.1.1 X-Işını Spektrometre Sistemi | 30 |
| 3.1.1.1 Standart Kaynakların ve Örneklerin Ölçüme Hazırlanmasında Kullanılan Cihazlar | 31 |
| 3.1.1.2 Numunelerin Hazırlanması | 31 |
| 3.1.1.3 Enerji Kalibrasyonu | 33 |
| 3.1.1.4 XRF Analiz Metotları | 33 |
| 3.1.2 Gama Spektrometre Sistemi | 34 |
| 3.1.2.1 Örneklerin hazırlanması | 35 |
| 3.1.2.2 Doğal Fon Spektrumunun Ölçülmesi | 36 |
| 3.1.2.3 Gama-ışını Öz Soğurma Düzeltme Faktörünün Belirlenmesi | 36 |
| 3.1.2.3.1 Gama-ışını öz soğurma düzeltme faktörünün hesaplanması | 36 |
| 3.1.2.4 Verim Kalibrasyonu | 36 |
| 3.1.2.4.1 Verim Kalibrasyonunda Kullanılan Sertifikalı Referans Standart | 37 |
| 3.1.2.4.2 Mutlak Verim Kalibrasyonu | 37 |
| 3.1.2.5 Yapı Malzemelerinden kaynaklanan radyasyon dozunun kaynağı | 38 |
| 3.1.2.6 Yapı Malzemelerinin Radyoaktivite İçeriğinin Radyolojik Değerlenmesi .. | 39 |
| 3.1.2.7 Yapı Malzemelerinin Aktivite Ölçümü | 40 |
| 3.1.2.8 Aktivitesi ölçülen nüklitler ve aktivite ölçümünde Kullanılan gama-ışını enerjileri | 41 |
| 3.1.2.9 Ölçülen aktivite değerleri kullanılarak hesaplanan nicelikler | 43 |
| 3.1.2.9.1 Soğurulan doz hızı | 43 |
| 3.1.2.7.2 Gama aktivitesi derişim indisi | 44 |
| 3.1.3 Yüzey Beta Dozu Ölçümü | 44 |
| 3.1.3.1 Kontaminasyon Dedektörleri | 44 |
| 3.1.3.2 İyon Odası | 45 |
| 4. BULGULAR | 47 |
| 4.1 X-ışını Floresans Spektrometresi | 47 |
| 4.1.1 Nitel (Kalitatif) Analiz | 49 |
| 4.1.2 Nicel (Kantitatif) Analiz | 51 |
| 4.2 Gama-ışını Öz Soğurma Düzeltme Faktörleri | 55 |
| 4.2.2 Hesaplanan gama-ışını öz soğurma düzeltme faktörleri | 55 |
| 4.3 Verim Kalibrasyon Eğrisi | 58 |
| 4.3.2 Mutlak Verim Kalibrasyon Eğrisi | 58 |
| 4.4 Kaplama Malzemelerinin Aktivite Ölçümü | 59 |
| 4.5 Yüzey Beta Dozu Ölçümü | 65 |
| 5. SONUÇ ve TARTIŞMA | 67 |
| KAYNAKLAR | 70 |
| ÖZGEÇMİŞ | 74 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

| | |
|----------------|---------------------------------|
| HPGe | Yüksek Saflıkta Germanyum |
| ROI | İlgilenilen Bölge |
| P | Yoğunluk |
| FWHM | Yarı Yükseklikteki Tam Genişlik |
| MCA | Çok Kanallı Analizör |
| ADC | Analog Sayısal Dönüştürücü |
| XRF | X-ışını Floresans |
| ED | Etkin Doz |
| D | Soğurulan Doz |
| I | Gama Derişim İndisi |
| MDA | Ölçülebilir En Küçük Aktivite |
| GRS | Gama Spektroskopi Tekniği |
| LT (Live time) | Ölçüm Zamanı |
| RT (Real time) | Gerçek Zaman |
| DT (Dead Time) | Ölü Zaman |
| μ_k | Kütle Soğurma Katsayısı |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1 Yüksek saflıkta germanyum dedektörlü gama spektrometresi | 13 |
| Şekil 2.2 Kritik seviyenin ve belirleme sınırının tanımı | 20 |
| Şekil 3.1 X-ışını Floresans Spektrometresi..... | 30 |
| Şekil 3.2 A) Seramik (K6 ve K9) ve mermer (R3) örnekleri, (B) Pelet örnekleri, (C) Sırlı seramik örneği, (D) Seramik örneğinin pasta kısmı | 32 |
| Şekil 4.1 Enerji Kalibrasyon Eğrisi..... | 48 |
| Şekil 4.2 E6 kodlu örneğin XRF spektrumu | 49 |
| Şekil 4.3 K1 kodlu örneğin XRF spektrumu..... | 50 |
| Şekil 4.4 E10 kodlu örneğin XRF spektrumu | 50 |
| Şekil 4.5 K2 kodlu örneğin XRF spektrumu..... | 51 |
| Şekil 4.6 Silindirik numune geometrisinde EGML 1389-37-7 çoklu radyonüklit standartı ile öz soğurma düzeltmesi uygulanarak elde edilen verim kalibrasyonu eğrisi..... | 59 |
| Şekil 4.7 ZnS;Ag Sintilatör dedektörü için ²⁰⁴ Tl ve ⁹⁰ Sr kaynakları kullanılarak elde edilen kalibrasyon eğrisi..... | 65 |
| Şekil 4.7 İyon odası dedektörü için ²⁰⁴ Tl ve ⁹⁰ Sr kaynakları kullanılarak elde edilen kalibrasyon eğrisi..... | 65 |
| Şekil 5.1 (A) açık bej renkli mermer örneği, (B) koyu kahverengi renkli mermer örneği | 68 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Çizelge 3.1 SDD Dedektörün Özellikleri..... | 31 |
| Çizelge 3.2 X-ışını Tüpü Özellikleri..... | 31 |
| Çizelge 3.3 HPGe dedektörün özellikleri..... | 35 |
| Çizelge 3.4 Sertifikalı EGML 1389-37-7 çoklu radyonüklit standardının özellikler | 37 |
| Çizelge 3.5 Aktivitesi ölçülen nüklitlerin özellikleri | 43 |
| Çizelge 3.6 ZnS(Ag) Sintilatörün özellikleri | 45 |
| Çizelge 3.7 İyon odası dedektörünün özellikleri..... | 46 |
| Çizelge 4.1 Enerji Kalibrasyon Değerleri | 47 |
| Çizelge 4.2 LKSD-1 sediment standardının bileşim ve yüzde miktarı..... | 48 |
| Çizelge 4.3 K kodlu numunelerin XRF yöntemi ile belirlenmiş kimyasal bileşimleri ... | 52 |
| Çizelge 4.4 K kodlu numunelerin XRF yöntemi ile belirlenmiş kimyasal bileşimleri ... | 52 |
| Çizelge 4.5 E kodlu numunelerin XRF yöntemi ile belirlenmiş kimyasal bileşimleri ... | 53 |
| Çizelge 4.6 E kodlu numunelerin XRF yöntemi ile belirlenmiş kimyasal bileşimleri ... | 53 |
| Çizelge 4.7 E kodlu numunelerin XRF yöntemi ile belirlenmiş kimyasal bileşimleri ... | 54 |
| Çizelge 4.8 R kodlu numunelerin XRF yöntemi ile belirlenmiş Kimyasal Bileşimleri . | 54 |
| Çizelge 4.9 Z kodlu numunelerin XRF ile belirlenmiş kimyasal bileşimleri | 55 |
| Çizelge 4.10 Silindirik numune geometrisinde K kodlu numuneleri için hesaplanan öz (K_o^h) soğurma düzeltme faktörleri..... | 56 |
| Çizelge 4.11 Silindirik numune geometrisinde K kodlu numuneleri için hesaplanan (K_o^h) öz soğurma düzeltme faktörleri..... | 56 |
| Çizelge 4.12 Silindirik numune geometrisinde E kodlu numuneleri için hesaplanan (K_o^h) öz soğurma düzeltme faktörleri..... | 56 |
| Çizelge 4.13 Silindirik numune geometrisinde E kodlu numuneleri için hesaplanan (K_o^h) öz soğurma düzeltme faktörleri..... | 57 |
| Çizelge 4.14 Silindirik numune geometrisinde E kodlu numuneleri için hesaplanan (K_o^h) öz soğurma düzeltme faktörleri..... | 57 |
| Çizelge 4.15 Silindirik numune geometrisinde R kodlu numuneleri için hesaplanan (K_o^h) öz soğurma düzeltme faktörleri..... | 57 |
| Çizelge 4.16 Silindirik numune geometrisinde Z kodlu numuneleri için hesaplanan (K_o^h) öz soğurma düzeltme faktörleri | 58 |
| Çizelge 4.17 Silindirik numune geometrisinde EGML 1389-37-7 çoklu radyonüklit standartı ile öz soğurma düzeltmesi uygulanarak elde edilen verim değerleri..... | 59 |
| Çizelge 4.18 Silindirik numune geometrisinde K kodlu seramik numunelerin öz soğurma düzeltme faktörü uygulanmadan ve uygulanarak elde edilen aktivite değerleri..... | 61 |

| | |
|---|----|
| Çizelge 4.19 Silindirik numune geometrisinde E kodlu seramik numunelerin öz soğurma düzeltme faktörü uygulanmadan ve uygulanarak elde edilen aktivite değerleri | 62 |
| Çizelge 4.20 Silindirik numune geometrisinde R kodlu mermer numunelerin öz soğurma düzeltme faktörü uygulanmadan ve uygulanarak elde edilen aktivite değerleri | 63 |
| Çizelge 4.21 Silindirik numune geometrisinde Z kodlu seramik numunelerin öz soğurma düzeltme faktörü uygulanmadan ve uygulanarak elde edilen aktivite değerleri | 64 |
| Çizelge 4.22 Seramik karolarda yüzey beta doz hızı ölçümleri..... | 66 |

1. GİRİŞ

İyonlaştırıcı radyasyon, kozmik ve yersel kaynaklı olarak doğal çevrenin kaçınılmaz bir unsurudur. Halkın ev, işyeri ve benzeri yaşam alanlarında günlerinin önemli bir kısmını (örneğin, %80'ni) geçirmeleri nedeniyle insanlar bu binalarda kullanılan yapı malzemelerinden kaynaklanan iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalabilirler(Yücel ve Yeltepe, 2013). Yapı malzemelerindeki doğal radyoaktivite, esas olarak ^{40}K , ^{238}U serisi ve ^{232}Th serisi radyonüklitlerin varlığı ile ilişkilidir. Bunlardan, toprakta ve yapı malzemelerinde sıkça bulunan ^{238}U serisinde ^{226}Ra (^{26}Ra , yarı ömrü:1620 yıl) bozunarak radon (^{222}Rn , yarı ömrü: 3,8 gün) olarak adlandırılan bir asal (inert) gaz dönüşür ve bu gaz yüzeylerden difüzyonla kolayca bina iç havasına karışır. Bir binada, duvarlardan veya zeminden kaynaklanan radon emanasyonu (salınımı), bronşlar ve akciğerlerin iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmasının asıl nedenidir (UNSCEAR, 1988).

Alfa yayımlayıcı olan radon gazı, doğrudan akciğerlere girerek veya bozunma ürünlerinin (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi ve ^{214}Po) aerosol formda solunum sisteminin bütün organlarına nüfuz ederek geçmesine ve bozunma sırasında ortaya çıkan parçacıkların, sahip oldukları enerjilerini doz olarak vücuda aktarmasına neden olur (Zalewski ve ark., 2001). Benzer şekilde, yapı malzemelerinin içerdiği toryum serisinden (^{232}Th) yayımlanan toron gazı (^{220}Rn , yarı ömrü :55,6 s) ve ^{235}U serisindeki aktinon (^{219}Rn ; yarı ömrü:4s) ve bunların radyoaktif bozunma ürünleri solunum yoluyla iç ışınlamaya neden olurken, gama ışını yayımlayıcı bozunma ürünleri de dıştan tüm vücut ışınlamasına neden olur.

Günümüzde, insanların yaşam alanı olarak kullandıkları (ev, işyeri, hastane, otel, kapalı alışveriş merkezleri) binalarda çeşitli yapı malzemelerinin (beton, tuğla, kiremit, gaz beton v.b) ve kaplama malzemelerinin (seramik yer ve duvar karoları, mermerler, sıvalar, boyalar v.b) kullanılması nedeniyle, yaşayan bireyin yıllık doğal radyasyon dozuna “ilave olarak alabileceği dozun” sınırlandırılması yönünde yaklaşımlar ve standartlar geliştirilmektedir.

İnsanlar binalarda kullanılan beton, tuğla, gazbeton, briket gibi mineral esaslı malzemelerden ve bina içinde zeminlerde ve duvarlarda kullanılan seramik karolar ve mermerlerden kaynaklanan iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmaktadırlar. Bu nedenle, halk bireyleri için yaşam alanlarının inşasında kullanılan malzemelerdeki doğal radyoaktiviteden alınabilecek dozun ölçülmesi ve değerlendirilmesi önemlidir. Bu tez çalışmasında kaplama malzemesi olarak kullanılan seramik ve mermer örneklerinin aktivite değerlerini ölçmek için HPGe dedektörüne sahip gama spektrometrik yöntem kullanılmıştır. Seramik ve mermerler çok yoğun malzemeler olduklarından, gama öz soğurma etkisi ölçülen aktivitelerin doğru belirlenmesi için çok önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, 25 mm² SDD dedektörlü EDXRF spektrometresi yardımıyla kaplama malzemelerinin elementel bileşimi ppm (mg.kg⁻¹) mertebesinde belirlenmiştir. Bu elementel bileşimler esas alınarak gama öz soğurma faktörleri hesaplanmıştır. Ayrıca, bu tezde özellikle halihazırda yaşam alanı olarak kullanılmakta olan binalardaki doğal taşların, yer ve duvar karolarının ve mermer kaplanan alanların yerinde beta-gama yüzey dozunun ölçülmesi için iyon odası ve sintilasyon dedektörlü yüzey kontaminasyon dedektörlerinin kullanılabilirliği test edilmiştir. Bu tezin birinci Bölümünde Giriş, ikinci Bölümünde Kuramsal Temeller, üçüncü Bölümünde kullanılan seramik ve mermer numuneler, sertifikalı referans malzemeler, çoklu radyonüklit kaynaklar, EDXRF ve gama spektrometre sistemi ve uygulama yöntemleri açıklanmıştır. Dördüncü bölümde bulgular ve son bölümde sonuç ve tartışma yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 X-Işını Floresans Tekniği

2.1.1 X-Işınlarının oluşumu

Doğal X-Işınları: Doğal X-ışınları, atom çekirdeği tarafından K seviyesinden elektron yakalanması, iç dönüşüm ve β bozunumu olaylarıyla meydana gelir (Eisberg, 1961).

Elektron yakalamada, elektron yörüngede dolanırken, çekirdeğe çok yaklaşırsa Coulomb yasası gereği çekirdek tarafından yakalanabilir. Bu olay genelde atom numarası yüksek olan atomların, K kabuğundaki elektronların yakalanması şeklindedir. Bu olay sonrası atom, numarası (Z-1) olan yeni elemente dönüşürken, atom ağırlığında hiçbir değişiklik olmaz. Elektron yakalaması olayı, yüklü parçacık yayımlanması olmadığı için, (Z-1) atom numaralı elementin karakteristik X-ışını yayımlaması ile gözlemlenir (Kurucu ve Şahin , 1989).

Beta bozunması çekirdeğin içinde gerçekleşen bir olaydır ve bir nötron bir protona dönüşür ve en karakteristik özelliği çekirdek orjinliği olan bu elektronun sürekli bir enerji spektrumu söz konusudur. Yayınlanan betaların maksimum enerjisi toplam bozunma enerjisi – kız çekirdekteki (daughter) uyarılmış seviyenin enerjisidir. Bu olayda bir antinötrino yayınlanır ve bu kütsüz ve yüksüz varsayılan parçacık bozunma enerjisinin büyük bir kısmını taşır. Bu nedenle beta enerjisi 0'dan $E_{\beta\max}$ 'a kadar değişen sürekli bir spektrum gösterir.

İç dönüşüm veya iç geçiş olayında A ve Z değişmez. herhangi bir γ ışını yayınlanmaksızın nükleer seviyeler de-eksitasyona uğrarlar. Bu proses de de-eksitasyon enerjisi atomun elektronlarında birine aktarılır ve bu elektron yerinden sökülür. Enerjinin korunumu gereği yayınlanan elektronun kinetik enerjisi, (nükleer seviyeler arasındaki enerji farkı) – (elektronun bağlanma enerjisi + geri tepme enerjisi) olarak ifade edilir (Debertin ve Helmer, 1988).

Yapay X-Işınları: Maddenin fotonlarla veya yüklü parçacıklarla (p^+ , e^- gibi) etkileşme durumunda kesikli (karakteristik) spektrum elde edilir. Fotonlarla etkileşmesinden kesikli (karakteristik) spektrum elde edilir. Yüklü parçacıklarla etkileşmesinden hem kesikli hem de sürekli spektrum elde edilir (Tertian ve Claisse, 1982).

2.1.2 Sürekli X-ışını spektrumu

Sürekli X-ışınları, elektronlar veya diğer yüksek enerjili yüklü parçacıkların (örneğin protonlar veya alfa parçacıkları gibi) çekirdeğin coulomb alanından geçerken enerji kaybetmeleri sonucunda oluşur. Burada ilk ve son hızları arasındaki enerji farkına eşit enerjide X-ışınları yayarlar. Bu ışımaya “Bremsstrahlung” frenleme radyasyonu adı verilir.

2.1.3 Karakteristik X-ışını spektrumu

Bir elementin karakteristik X-ışını spektrumu, atomun iç yörüngelerinden elektronların koparılmasıyla, buralarda oluşan boşluklara üst seviyedeki yörüngelerden boşluğu doldurmak amacıyla elektron geçişleri olduğundan oluşur. Üst yörüngeden alt yörüngeye olan geçişlerin her birinde iki yörünge arasındaki enerji farkı kadar enerjide bir X-ışını fotonu yayınlanır (Bertin, 1975).

Yayınlanan enerji, doldurulan kabuğun bağlanma enerjisi ile elektronun geldiği kabuğun bağlanma enerjisi arasındaki farka eşittir. Her bir elementteki elektronlar tek enerji seviyesine sahip olduğundan elektromanyetik radyasyonun bu yayınımları o elementin karakteristiğidir. Bu yüzden ‘karakteristik X-ışınları’ olarak adlandırılırlar.

Karakteristik X-ışınlarının oluşmasını sağlayan atom yörüngelerindeki elektron boşluğunun oluşturulması için farklı yollar vardır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- a) Elektron ile bombardıman etmek,
- b) Protonlar, döteronlar, alfa parçacıkları veya hızlandırıcılardan gelen diğer iyonlar ile bombardıman etmek,
- c) X-ışını tüplerinde oluşan birincil X-ışını ile bombardıman etmek,

- d) Radyoizotoplardan yayınlanan alfa, beta parçacıkları, gama ve diğer X-ışınları ile bombardıman etmek,
- e) Hedef elementten yayınlanan ikincil X-ışınları ile bombardıman etmek,
- f) Doğal radyoaktif bozunma (iç dönüşüm, K yakalama, β^- bozunumu)

2.1.4 X-ışınları floresans spektroskopisi

XRF tekniği, malzemenin bütün kimyasal bileşimini (composition) tanımlayabilen analitik bir metottur. Malzemeler katı, sıvı, toz veya diğer biçimlerde olabilir. Bazı durumlarda XRF, kaplamaların tabaka bileşimi ve kalınlıklarını belirlemede kullanılır.

Metot hızlı, kesin ve tahribatsızdır. Genellikle küçük numuneler gerektirir. Metallerde, seramiklerde, yağ, polimer, plastik, yiyecek endüstrisi, madencilik, mineraloji ve jeoloji, ve çevresel su analizleri gibi birçok alanda uygulanmaktadır.

XRF analizinde tekrarlanabilirlik çok yüksektir. Doğru hazırlanmış homojen bir örnekte oldukça hassas ve doğruluğu yüksek sonuçlar sağlayabilir. Ölçüm zamanı elementlerin atom numaralarına yani kararlılık durumlarına bağlıdır(Brouwer P., 2003).

XRF tekniği enerji dağılımlı XRF(EDXRF) veya dalga boyu dağılımlı XRF (WDXRF) olarak uygulanmaktadır. Bu çalışmada EDXRF tekniği uygulanılmıştır.

Dalgaboyu dağılım spektrometreleri, enerji dağılım spektrometrelerinden daha önce geliştirilmiştir. Bu cihazlarda X-ışınlarının şiddeti dalgaboyunun bir fonksiyonu olarak ölçülür. X-ışınları kaynağından çıkan primer radyasyon örnek üzerine gönderilir. Spektrometre çemberinin ortasına yerleştirilen bir analizör kristal ile örnekten yayınlanan ikincil radyasyonun difraksiyonu sağlanır. Difraksiyona uğrayan ışınların dalgaboyları (λ) Bragg koşulunu sağlar ve $2d\sin\theta$ 'a eşittir. Burada “d” kristalin atom düzlemleri arasındaki mesafedir, “ θ ” ise örnek ve dedektör arasındaki açının yarısına eşittir.

Enerji dağılım spektrometresinde, X-ışını kaynağından çıkan primer radyasyon örneğe gönderilir ve örnekten yayınlanan ikincil X-ışınları karakteristik çizgileri içerir. Bu spektrometrede difraksiyon yoktur. Dedektör tarafından algılanan ikincil radyasyon,

enerjilerine göre, çok kanallı analizör ile (multi channel analyzer) ayrılır. EDXRF spektrometresi ile Na-Pu aralığındaki tüm elementlerin nitel ve nicel analizini yapmak mümkündür. Ayırım gücü kullanılan dedektöre bağlıdır ve 150-600 eV aralığında değişir. Bu dezavantajına rağmen EDXRF spektrometreleri WDXRF spektrometrelerinden daha ucuzdur ve daha hızlı analize olanak tanır.

2.1.5 X-Işını floresans uygulama teknikleri

2.1.5.1 Nitel analiz (Kalitatif Analiz)

Karakteristik X-ışını fotonunun enerjisi ile karakteristik emisyon çizgisi oluşturan elementin atom numarası arasında, Moseley yasasına göre karakteristik X-ışınlarının frekansı (yani, foton enerjileri $E=h\nu$) atom numarası Z 'nin karesiyle değişir (Debertin ve Helmer,1988).

$$\sqrt{\nu} = k_1 \times Z - k_2 \quad (2.1)$$

Burada Z , atom numarasını, ν frekansı, k_1 ve k_2 ise x- ışını emisyon çizgilerine bağlı sabitleri gösterir.

Her elementin verilen bir seride (K,L,M,...) karakteristik çizgilerinin yayınlanması o elementin varlığını gösterir. Bilinmeyen maddenin atom numarası yayınlanan X-ışını serisinin çizgilerinin enerjilerinin ölçülmesi ile uyarılmış elementlerin atom numarası belirlenebilir. Nitel analiz genellikle numune içindeki elementleri belirlemek için kullanılır (Jenkins, R., at al). Örneğin ^{109}Cd gibi bir radyoizotop kaynağı veya x-ışını tüpü hedef malzemesinden (W, Ag, Mo, Au gibi) elde edilen sürekli spektrum ışınlarıyla belirli sürelerde uyarılan numune tahribatsız olarak analiz edilebilmektedir.

Doğal olarak elde edilen spektrumdaki herhangi bir spektral çizgiler grubu (K_α , K_β gibi) numunedeki bilinmeyen bir elementi temsil eder.

Her bir element için elde edilen çizgi şiddetlerine karşılık gelen kanal numaraları belirlenir ve element çizgi şiddetinin bulunduğu kanal numarası elementin enerjisine

karşılık getirilir. Elde edilen enerji – kanal numarası grafiğinin denklemi kalibrasyon denklemidir. Kalibrasyon denklemi $y = mx+n$ şeklinde doğrusala oldukça yakındır. Burada y enerjiyi, x kanal numarasını ve m de grafiğın eğimini gösterir. Denklem birinci dereceden olabileceği gibi, doğrusallıktan sapmanın bir ölçüsü olarak ikinci dereceden de olabilir.

2.1.5.2 Nicel analiz (Kantitatif Analiz)

Nicel analiz bir numunedeki elementlerin derişimi olarak belirlenmesidir. Nicel analizlerde önce analiz yapılacak numune hazırlanır, analit uygun seviyede uyarılır, şiddeti ölçülür ve ölçülen şiddet elementel konsantrasyona dönüştürülür (Erdoğan Y., 1995).

X-ışını floresans spektrometresinde katı, sıvı, toz numunelerle çalışılabilir. Toz numuneler ince mylar kaplı numune kaplarına konarak veya basınç altında tablet haline getirilerek analiz edilebilir.

Analizlerde ortaya çıkan soğurulma – artırma etkisi “Matris Etkisi” olarak bilinir. Soğurulma – artırma etkisi, matrisin kimyasal bileşiminden meydana gelir. Numune kalınlığına ve uyarıcı radyasyonun maddeye giriciliğine ve enerjisine bağılı olarak değışir. Soğurulma – artırma etkisini azaltmak için kullanılan metotlar aşağıda sıralanmıştır (Efe N, 1986).

- a) Standartla Karşılaştırma Metodu
- b) Matris Seyreltme Metodu
- c) İnce Film Metodu
- d) Standart Ekleme ve Seyreltme Metotları
- e) Matematiksel Düzeltmeler
- f) Deneysel Düzeltme Metodu

Standartla karşılaştırma metodunda numunelerden elde edilen analit pik şiddeti numuneyle benzer fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip standartlardan elde edilen analit

pik şiddetiyle karşılaştırılır. Bu çalışmada da standartla karşılaştırma yöntemi kullanılmıştır.

Toz numunenin homojen olmaması, partikül büyüklüğünün, yoğunluğunun farklı olması durumlarında toz numune ile çalışmak zordur. Floresans şiddeti partikül büyüklüğünden etkilendiğinden, numunenin çok iyi öğütülüp homojen hale getirilmesi gerekir. Ayrıca partikül büyüklüğü ve diğer matris etkilerinin ortadan kaldırılması için, numune ve standardın aynı partikül büyüklüğüne ve matrise sahip olmaları gerekir (Arıkan P., 1986).

Partikül büyüklüğü etkileri;

- a) Partikül büyüklüğü etkileri giderilinceye kadar öğütme,
- b) Numune ve standardı aynı partikül büyüklüğü ve dağılımında, aynı metotla öğütme,
- c) Kuru seyreltme (tercihen aynı partikül büyüklüğünde toz ilavesi yapılır.),
- d) Yüksek basınçta tabletleme,
- e) Yüksek enerjili radyasyon kullanma,
- f) Matematiksel düzeltme metotları ile düzeltilebilir.

2.2 Gama Spektrometri Yöntemi

2.2.1 Radyoaktivite ve radyoaktif bozunma yasası

Radyoaktif parçalanma (bozunma) atomun çekirdeğinden, parçacıklar veya elektromanyetik radyasyon yayınlanmasıyla kendiliğinden anlık olarak gerçekleşen çekirdekteki değişimdir. Bozunma sonucu oluşan ürünler ana çekirdekten kütlece daha küçüktür. Oluşan ürünler başka kararlı veya kararsız çekirdeklere dönüşebilirler. Radyoaktif bozunma temel olarak alfa, beta, gama yayınıyla birlikte kendiliğinden fisyon şeklinde olabilir. Kararlı veya kararsız nükleitlerin herhangi bir mekanizma ile dışarıdan verilen bir uyarımla (parçacık/radyasyon bombardımanı), yapay olarak radyoaktif hale getirilmesi de mümkündür. Bu durumla oluşan ürünler radyoizotop olarak adlandırılır.

Radyoaktif bozunma olayında radyonüklitlerin sayısı üstel olarak azalır. Bozunma rasgele bir olaydır ve istatistiksel bir doğası vardır. Herhangi bir çekirdeğin tam olarak ne zaman bozunacağı bilinemez, ancak belirli bir gözlem süresi sonunda bozunanların sayısı belli bir olasılıkla belirlenir ve buna atom çekirdeğinin bozunma sabiti $\lambda=0,693/t_{1/2}$ dir. Burada bu sabit radyonüklite özgü $t_{1/2}$ yarı ömrüne bağlıdır.

Bir radyonüklitin birim zamandaki bozunma sabiti λ ile gösterilir ve radyonüklitin temel özelliğidir, zaman içinde değişmez. Bir t anında N tane radyonüklit varsa, dt süresinde bozunacak radyonüklit sayısı, dN

$$A = \left| -\frac{dN}{dt} \right| = \lambda N \quad (2.2)$$

ile verilir. Burada A, aktiviteyi göstermektedir ve zamanla azalan bir niceliktir. dt süresi içindeki bozunma sayısı, bozunmamış radyonüklit sayısı, N, ile orantılıdır.

Eşitlik 2.2

$$-\frac{dN}{N} = \lambda dt \quad (2.3)$$

şeklinde yazılıp integrali alınır

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.4)$$

üstel radyoaktif bozunma yasası elde edilir. Burada N_0 , $t=0$ 'da henüz bozunmamış radyonüklitlerin sayısıdır. Buna göre aktivite, A(t), birim zamandaki bozunma sayısı, yani bozunma hızı olarak tanımlıdır. t anındaki aktivite, $t=0$ anındaki A_0 aktivitesi ile

$$A(t) = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

şeklinde ilişkilidir. Aktivitenin SI birim sisteminde birimi Becquerel (Bq) olup saniyede bir parçalanmaya eşittir. Aktivitenin eski birimi Curie (Ci)'dir ve $1\text{Ci} \approx 3,7 \times 10^{10}$ Bq (bozunma/s) olarak tanımlanır. Özgül aktivite, A_{sp} (Bq.kg^{-1} veya C.kg^{-1}) bir maddenin birim ağırlığına (m) göre ifade edilir.

$$A_{sp} = \frac{A}{m} = \frac{\lambda N}{m} = \frac{\lambda}{m} \cdot \frac{m N_{av}}{M} = \frac{\lambda N_{av}}{M} \quad (2.6)$$

Burada M, atom ağırlığı ve N_{av} avagadro sayısıdır.

2.2.2 Doğal bozunma serileri

Bazı radyoaktif elementlerin (örneğin toryum gibi; ^{232}Th , $14,05 \times 10^9$ yıl) yarı ömrü, çok uzundur. Çevremizdeki doğal radyoaktifliğin kaynağını temelde ^{238}U ($4,468 \times 10^9$ yıl), ^{235}U ($7,038 \times 10^8$ yıl), ^{232}Th ($14,05 \times 10^9$ yıl), ^{40}K ($1,277 \times 10^9$ yıl) gibi radyonüklitler oluşturmaktadır.

Günümüzde gözlenen doğal radyoaktif elementlerin çoğu çok ağır elementlerden oluşur. Bu radyonüklitler genellikle alfa (α), beta (β^-), pozitron (β^+), elektron yakalaması (EC) ve kendiliğinden fisyon (sf) bozunumları ile kütle numarasını (A) ve atom numarasını (Z), kararlı ve hafif bir çekirdeğe ulaşmaya kadar azaltırlar. Biri yapay, diğer üçü doğada gerçekte bulunan dört radyoaktif seri vardır. Bunların her birisi en sonunda kararlı bir kurşun izotopuna dönüşür. Örneğin, toryum, ^{232}Th ($1,405 \times 10^{10}$ yıl) \rightarrow ^{208}Pb (kararlı); uranyum, ^{238}U ($4,468 \times 10^9$ yıl) \rightarrow ^{206}Pb (kararlı) ve aktinyum, ^{235}U ($7,038 \times 10^8$ yıl) \rightarrow ^{207}Pb (kararlı) doğal radyoaktivitenin ana kaynaklarıdır.

Genellikle reaktörlerde yapay olarak üretilen neptünyum izotopunun, ^{237}Np ($2,14 \times 10^6$ yıl) \rightarrow ^{209}Bi (kararlı) serisinin ana nükliti ^{237}Np 'nin yarı ömrü, dünyanın oluşumundan

bugüne geçen süreye göre daha kısa olduğundan doğal olarak bulunmaz, fakat reaktörlerde yapay olarak üretilir. Doğal radyoaktif serilerin dışında doğada potasyumun radyoaktif izotopu ^{40}K ($1,277 \times 10^9$ yıl) %0,0117 bollukta bulunur. ^{40}K , β^- bozunumu (%89,28 olasılıkla) yaparak ^{40}Ca 'a ve küçük bir kesride elektron yakalama (EC) ile ^{40}Ar 'a dönüşür (%10,67 olasılıkla) ve bu sırada 1460,8 keV enerjili bir gama ışını yayınlanır.

Uranyum doğada %99,2745 bollukta ^{238}U ($4,468 \times 10^9$ yıl), %0,72 bollukta ^{235}U ($7,038 \times 10^8$ yıl) ve %0,0055 bollukta ^{234}U ($2,455 \times 10^5$ yıl) olarak bulunur. Toryum doğada ^{232}Th ($1,405 \times 10^{10}$ yıl) olarak bulunur ve serisinin kararlı nükliti ^{208}Pb 'dir.

2.2.2.1 Sürekli denge durumu

Doğal üç serinin radyonüklitlerinin, jeolojik ve çevresel örneklerde yaklaşık olarak sürekli denge durumunda olması beklenir. Sürekli dengenin oluşması için ana nüklitin yarı ömrü, ürün nüklitin yarı ömründen çok çok uzun olmalı, (yani $\lambda_1 \ll \lambda_2$) ve dengeye ulaşması için yeteri kadar uzun bir süre geçmiş olmalıdır.

$$A_2 = A_{10}(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.7)$$

$\lambda_1=0$ için

$$A_2 = A_{10}(1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.8)$$

ile verilir. $t \rightarrow \infty$ olduğunda, ürün nüklitin aktivitesi, ana nüklitin aktivitesine eşit olur.

$$A_2(t) \cong A_1(t) \quad (t \gtrsim 7 \times t_{1/2} \text{ için}) \quad (2.9)$$

2.2.2.2 Geçici denge durumu

Ana çekirdeğin yarı ömrü ürün çekirdeğin yarı ömründen büyükse, yani $\lambda_1 < \lambda_2$ ise, geçici denge oluşur.

$$N_2(t) \cong N_{I0} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t}) \quad (2.10)$$

Burada t arttıkça üstel terim azalır ve aktivite oranı artar. Bir süre sonra aktivite oranı $\lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)$ sabit değerine yaklaşır ve ürün nüklitin aktivitesi ana nüklitin aktivitesinden büyük olur. Toplam aktivite, ana nüklit ile aynı hızda azalır.

$$A_2(t) \cong \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1(t) \quad (2.11)$$

2.2.2.3 Dengenin oluşmadığı durum

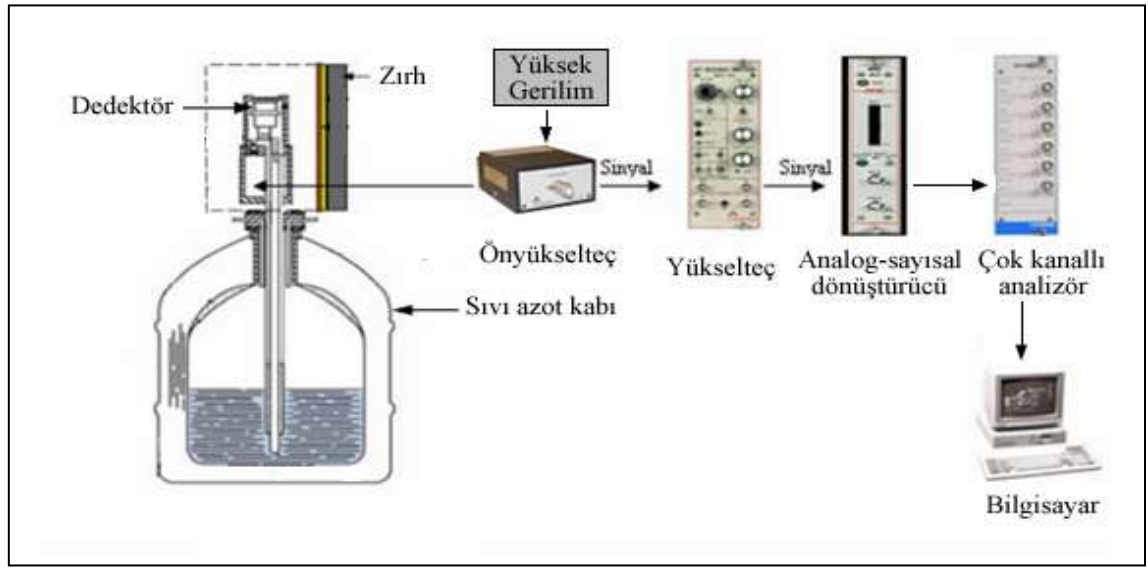
Ürün nüklitin yarı ömrü ana nüklitin yarı ömründen büyükse, yani $\lambda_1 > \lambda_2$ ise radyoaktif denge oluşmaz. Ana nüklit hızlı bir şekilde bozunduğu için yeterince uzun bir süre sonra ürün nüklitin aktivitesi en büyük değerine ulaşır ve daha sonra kendi bozunma sabiti ile azalır.

$$A_1 + A_2 \cong A_2 \quad (2.12)$$

Radyoaktif dengenin oluşmadığı durum genellikle kimyasal olarak açık sistemlerde, bir veya daha fazla radyonüklitin seriden tamamen veya kısmen çıkarılması durumunda meydana gelir. Toryum doğada nadiren radyoaktif dengede bulunmaz. Potasyumda da bu problem gözlenmez. Fakat uranyumun bozunma serisinde radyoaktif dengenin bozulması yaygındır.

2.2.3 Gama spektrometresi

Gama spektrometresi, dedektör kristaline ulaşan gama ışınlarının enerjisiyle orantılı olarak oluşan pulsların bir önyükselteç ve yükselteçte işlendikten sonra elde edilen sinyalin analog sayısal dönüştürücüde (ADC) sayısal hale getirilmesi ve çok kanallı analizörün (MCA) hafızasında spektrum olarak kaydedilmesine imkan veren bir sistemdir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Yüksek saflıkta germanyum dedektörlü gama spektrometresi

2.2.3.1 Yüksek saflıkta germanyum yarı iletken dedektörler

HPGe dedektörler p-tipi veya n-tipi yapısında yarıiletkenlerden oluşurlar. Yük taşıyıcılarından arındırılmış (intrinsic) bölge radyasyona karşı hassastır. Elektrotlara ters besleme uygulandığında elektrik alan intrinsic bölge genişler. Gelen gama ışınlarının germanyum kristalinde oluşturduğu elektron-deşik çiftleri elektrik alanın etkisiyle p ve n elektrotlarına hareket ederek sinyal oluştururlar. Germanyumun bant aralığı enerjisi 0,67 eV'dur. Bu nedenle kaçak akıma bağlı oluşan gürültü sinyalinin önlenmesi için HPGe dedektörler sıvı azot sıcaklığında (77 K) çalıştırılır fakat oda sıcaklığında muhafaza edilebilir.

2.2.4 Fotopik net sayımının belirlenmesi

Bir gama spektrometresinde, dedektörde enerji soğurulmasına karşılık gelen puls yükseklik spektrumundaki (pulse height analysis) fotopiklerin analizidir. Dedektörden gelen sinyallerin işlenmesiyle elde edilen gama ışını spektrumlarında gözlenen fotopiklerin her birinin altında kalan net alan, gama ışınlarının Compton ve fotoelektrik etkileşmeleri ile orantılı bir nicelik olarak net sayım verdiği için, belirlenme yöntemleri özellikle önemlidir. Çünkü fotopikin net alana karşılık gelen sayım değeri, diğer tüm hesaplanacak büyüklüklerde kullanılan, gözlenen bir niceliktir. Bu nedenle spektrumlardaki fotopik alanlarının belirlenme yöntemlerinden elde edilecek net sayım; fotopikin şekline (kuyruklanma ve çoklu piklerin birbirine girişimi), kullanılan dedektör tipine (NaI, HPGe, CZT) göre değişebildiği gibi kullanılan yazılımda seçilen algoritma farklılıklarına veya analizi yapanın gözlemine göre de değişebilmektedir. En yaygın ve standard yaklaşım pratikte 3xYYTG (yarı yükseklikteki tam genişlik) kriterine uygun yakınlıktaki fotopikler için sıkça kullanılan hemen hemen Gauss eğrisi şeklindeki bir fotopikin temel alınmasıdır (Anonymous 1986). Son yıllarda, yamuk (trapezoid) fotopik şekline uygun net sayım belirlenmesi de yaygın olarak kullanılmaktadır (Anonymous 2003).

Bir fotopikteki toplam sayım, G , fotopiki oluşturan kanallardaki her bir sayımın toplanmasıyla elde edilir.

$$G = \sum_{i=1}^u y_i \quad (2.13)$$

Burada y_i , herhangi bir i 'nci kanaldaki sayım, l ve u ise sırasıyla fotopikin sol ve sağ ucundaki kanal numarasını gösterir.

Net fotopik sayımı, N_p , fotoelektrik etkileşmeler sonucu elde edilen sayımları ifade eder ve toplam sayımdan ilgilenilen enerjideki Compton saçılmaları nedeniyle oluşan sürekliliğin (B), çıkarılması ile hesaplanır.

$$N_p = G - B \quad (2.14)$$

Compton sürekliliğinin hesabında çeşitli yaklaşımlar kullanılabilir. Bu yaklaşımlardan en yaygın olanları, doğrusal (linear) veya basamak (step) azalımı şeklindeki fonksiyonlardır

2.2.4.1 Ortamdaki doğal fonun fotopik sayımından çıkarılması

Dedektörde kaynak yok iken laboratuvar ortamında var olan doğal fon spektrumu ölçülmelidir. Doğal fon spektrumundan her bir radyonüklitin ilgilenilen fotopiki için doğal fon alanları belirlenmeli ve bu değer daha sonra örnek spektrumunda ilgilenilen enerjide elde edilen fotopik alanından çıkarılmalıdır. Ortamdaki doğal fon çıkarılarak bulunan net fotopik sayımı, N_p , aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$N_p = G - B - N' \quad (2.15)$$

Burada G, ilgilenilen fotopikteki toplam sayım; B, toplam sayımdan çıkarılacak Compton sürekliliği; N' , ortamdaki doğal fondan kaynaklanan sayımdır. Sayım süresine göre, daha uzun sürede elde edilen ortam doğal fon ölçümleri, örnek spektrumunun sayım süresine göre normalize edilir.

$$N' = \frac{t_c}{t_d} \cdot N_d \quad (2.16)$$

Burada t_c , örnek spektrumunun sayım süresi (live time); t_d , doğal fon spektrumunun sayım süresi ve N_d , doğal fon spektrumundaki fotopikin net sayımıdır. Ortam doğal fon spektrumundaki net fotopik sayımı, N_d , $N_d = G_d - B_d$, doğal fon spektrumundan elde edilen fotopikin, toplam sayımından (G_d), Compton sürekliliğinin (B_d) çıkarılması ile hesaplanır.

2.2.4.2 Net fotopik sayımındaki belirsizliğin hesaplanması

$$u_{N_p} = \sqrt{u_G^2 + u_B^2 + u_{N'}^2} \quad (2.17)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada u_G , u_B ve $u_{N'}$ sırasıyla toplam sayımın, Compton sürekliliğinin ve ortamdaki doğal fonun belirsizliğidir. Toplam sayım, G , Poisson istatistiğini sağlayacak büyüklükte bir değer olduğu için $u_G^2 = G$ 'dir. u_B ise hesaplamada kullanılan kanal sayısına bağlıdır. Compton sürekliliğinin hesaplanmasında doğrusal fonksiyon kullanıldığında

$$u_B = \sqrt{\left(\frac{p}{2 \cdot n}\right)^2 \cdot u_{B_1}^2 + \left(\frac{p}{2 \cdot n}\right)^2 \cdot u_{B_2}^2} \quad (2.18)$$

eşitliği ile sürekliliğin belirsizliği hesaplanır. Burada u_{B_1} , B_1 'in belirsizliği ; u_{B_2} , B_2 'nin belirsizliğidir. Dolayısıyla, $u_{B_1}^2 = B_1$ ve $u_{B_2}^2 = B_2$ alınarak Eşitlik 2.18 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$u_B = \sqrt{\left(\frac{p}{2 \cdot n}\right)^2 \cdot (B_1 + B_2)} \quad (2.19)$$

Compton sürekliliğinin hesaplanmasında basamak fonksiyonu kullanıldığında ise

$$u_B = \sqrt{\frac{1}{(n \cdot G)^2} \cdot \left[p \cdot G - \sum P_i^2 B_1 + \sum P_i^2 B_2 + B_2 - B_1 - \sum P_i^2 \left(\frac{1}{G} + \frac{1}{\sum P_i} \right) \right]} \quad (2.20)$$

ile sürekliliğin belirsizliği hesaplanır.

Ortamdaki doğal fonun belirsizliği

$$u_{N'} = \sqrt{\left(\frac{t_c}{t_d}\right)^2 \cdot u_{Nd}^2} \quad (2.21)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada u_{Nd} , örneğin sayım süresine bölünerek göre normalize edilir. u_G ve u_B sırasıyla doğal fon spektrumundan elde edilen fotopikin toplam sayımındaki ve Compton sürekliliğindeki belirsizlik olmak üzere aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u_{Nd} = \sqrt{u_{Gd}^2 + u_{Bd}^2} \quad (2.22)$$

2.2.5 Ölçülebilir en küçük aktivitenin hesaplanması

Ölçülebilir en küçük aktivite (minimum detectable activity, MDA), herhangi bir radyonüklit için bir sayım sisteminde belirli şartlarda (bir kaynak-dedektör geometrisinde öngörülen madde miktarı ve ölçüm süresi dikkate alınarak) ölçülebilecek en küçük aktivite miktarıdır. Katı ve sıvılardaki en düşük aktivite miktarı sırasıyla 1 kilogramdaki Bq [Bq kg^{-1}] veya 1 litredeki Bq [Bq L^{-1}] olarak verilir.

Bu terimin tanımı üzerinde çok farklı yorumlar hala devam etmektedir (MacLellan and Strom 1999) ve hesaplanmasında çeşitli yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada Currie yöntemi kullanılmıştır. Currie'nin MDA yöntemi, kritik seviye (L_C) ve belirleme sınırı (L_D) olarak tanımlanan iki önemli kavrama dayanır. Bu değerler, sayım cinsinden hesaplanır ve genellikle $L_D > L_C$ 'dir.

2.2.5.1 Kritik seviye

Kritik seviye (L_C), ölçülen herhangi bir gama spektrumundaki her bir fotopik için belirlenen sayımın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını gösterir. Diğer bir ifadeyle kritik seviyenin altında olan net sinyale güvenilmez. Kritik seviye, dedeksiyon hassasiyeti olarak da adlandırılabilir.

Örnek spektrumunda belirli bir enerjideki net sinyal sıfır ise, çevresel doğal fon etkisinin çıkarıldığı durumda fotopik sayımının standart sapması, u_0

$$u_0 = \sqrt{B + N' + u_B^2 + u_{N'}^2} \quad (2.23)$$

olur. Burada B, Compton sürekliliği; N' , örneğin sayım süresine normalize edilmiş doğal fon sayımı; u_B , Compton sürekliliğinin belirsizliği ve $u_{N'}$, doğal fonun belirsizliğidir. Compton sürekliliği, örnek spektrumundan, doğal fon sayımı ise dedektör üzerinde örnek yok iken alınan başka bir spektrumdan hesaplanır.

Kritik seviye, L_C

$$L_C = k_\alpha \cdot u_0 \quad (2.24)$$

eşitliği ile verilir. Kritik seviye için bir değer elde edebilmek için Eşitlik 2.23, Eşitlik 2.24'te yerine konulursa

$$L_C = k_\alpha \cdot \sqrt{B + N' + u_B^2 + u_{N'}^2} \quad (2.25)$$

olur. Burada farklı sürelerde alınabilecek örnek ve doğal fon sayımlarını normalize etmek ve standart sapmaları birlikte ifade etmek için kritik seviye aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$L_C = k_\alpha \cdot \sqrt{B + \left(\frac{t_c}{t_d}\right) \cdot N_d + \left(\frac{p}{2 \cdot n}\right)^2 \cdot \mathbf{B}_1 + B_2 + \left(\frac{t_c}{t_d}\right)^2 \cdot u_{N_d}^2} \quad (2.26)$$

k_α faktörü önceden belirlenen güven derecesine göre seçilir ve yaygın olarak %95 güven seviyesine karşılık gelen $k_\alpha=1,645$ kullanılır. Bu katsayı normal dağılım fonksiyonundaki tek taraflı güven katsayısıdır.

2.2.5.2 Belirleme sınırı

Belirleme ya da dedeksiyon sınırı (L_D), bir sayım sisteminde belirli şartlarda yapılan ölçümde güvenilir olarak elde edilebilecek en küçük sayım miktarıdır ve kritik seviyenin üstündedir (

Şekil 2.2). Net sinyal belirleme sınırına eşit ise ($N_p=L_D$), net sinyalin standart sapması, u_{N_p}

$$u_{N_p} = \sqrt{L_D + B + N' + u_B^2 + u_{N'}^2} \quad (2.27)$$

olur. Belirleme sınırı, L_D

$$L_D = L_C + k_\beta \cdot u_{N_p} \quad (2.28)$$

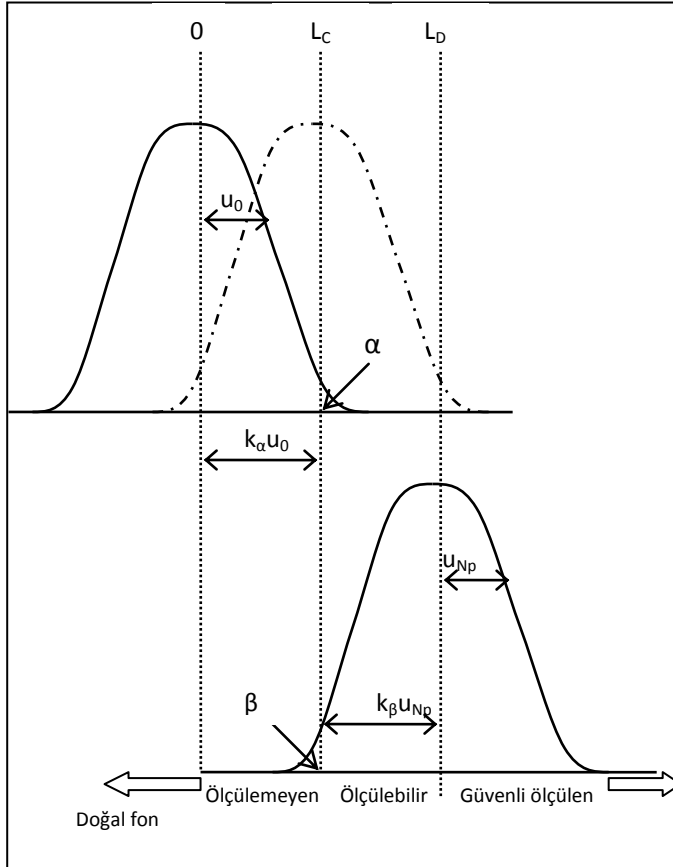
eşitliği ile hesaplanır. Genellikle $k_\alpha = k_\beta = k$ kabul edilir ve L_D

$$L_D = L_C + k \cdot \sqrt{L_D + u_0^2} \quad (2.29)$$

ile ifade edilir (Anonymous 2004). Belirleme sınırı

$$L_D = k^2 + 2 \cdot L_C \quad (2.30)$$

olur. Pik alanı hesaplanmasında, basitçe $L_D = 2,71 + 3,29 \cdot \sqrt{B \cdot \ln(1 + p/2n)}$ olarak da alınabilir. Burada p, ilgilenilen fotopiktaki kanal sayısı; n, fotopikin sağındaki ve solundaki Compton sürekliliği kanallarının sayısıdır.



Şekil 2.2 Kritik seviyenin ve belirleme sınırının tanımı

Bu durumda ölçülebilir en küçük aktivite (MDA), belirleme sınırı ifadesinden,

$$MDA = \frac{L_D}{\varepsilon(E) \cdot f_\gamma(E) \cdot t_c \cdot m} = \frac{k^2 + 2 \cdot L_C}{\varepsilon(E) \cdot f_\gamma(E) \cdot t_c \cdot m} \quad (2.31)$$

veya

$$MDA = \frac{2,71 + 3,29 \cdot \sqrt{B \cdot (1 + p / 2n)}}{\varepsilon(E) \cdot f_{\gamma}(E) \cdot t_c \cdot m} \quad (2.32)$$

olarak hesaplanır. Burada $\varepsilon(E)$, ilgilenilen enerjideki fotopik verimi; $f_{\gamma}(E)$, ilgilenilen enerjinin gama-ışını yayınlama olasılığı; t_c , sayım süresi (s) ve m , örnek miktarıdır (kg veya L).

2.2.6 Dedektör verimi

Mutlak fotopik verimi (tüm enerji fotopik verimi), ε , belirli bir enerjide fotopik altında kaydedilen sayımın, kaynaktan yayınlanan gama ışınları sayısına oranıdır. Özgün verim ve fotopik verimi, $\varepsilon = \varepsilon_{in} \cdot (\Omega / 4\pi) \cdot T$ ifadesi ile birbiriyle ilişkilidir. Burada Ω , kaynak konumundan dedektör tarafından görülen katı açı ve $T = \exp - \mu_i \cdot d_i$ olmak üzere kaynak ile dedektör arasındaki saçıcı/soğurucu ortamları geçen fotonlar için geçiş (transmisyon) katsayısıdır (Debertin ve Helmer 1988). Geçiş katsayısının hesaplanmasında kullanılan μ_i , dedektörün penceresi, hava vb. malzemelerin lineer azalım katsayıları ve d_i ise bunların kalınlıklarıdır.

2.2.6.1 Mutlak fotopik veriminin ölçülmesi

Herhangi bir örnekte bulunan radyonüklitin aktivitesinin ölçülmesi için, belirli sayım geometrisinde, dedektörün fotopik (mutlak) veriminin bilinmesi gereklidir. Gama ışınının belirli bir enerjideki sayım hızı, kaynağın özelliklerine, dedektör kristalinin şekline ve aktif hacmine, kaynak-dedektör geometrisine ve dedektörün etrafındaki malzemelerdeki (dedektör penceresi, kılıfı, kriyostat parçaları gibi diğer saçıcı/soğurucular, zırh v.b.) foton etkileşmelerine bağlı olduğu için her sayım geometrisinde fotopik veriminin değişik olması beklenir. Örneğin aktivitesinin hesabında kullanılacak örnek-dedektör sayım geometrisi, verim tayininde kullanılan standart kaynak-dedektör geometrisi ile her zaman aynı olmalıdır. Aksi halde oluşacak farkların hesapla uygun bir şekilde düzeltilmesi gerekir (Debertin and Helmer 1988).

Belirli bir E enerjisinde gözlenen fotopik veriminin en hassas şekilde belirlenmesi, sertifikalı referans standart kaynaklar kullanılarak yapılan kalibrasyona dayanır. Bu amaçla belirli bir kaynak-dedektör geometrisinde referans standart kaynaklar kullanılarak elde edilen gama spektrumlarından ilgilenilen fotopikteki net sayımın Bölüm 2.5’de açıklandığı gibi belirlenmesiyle; kaynağın verdiği sayım hızından fotopik verimi

$$\varepsilon(E) = \frac{\left[\frac{N_p}{t_c} - \frac{N_d}{t_d} \right]}{f_\gamma(E) \cdot A} \cdot K \quad (2.33)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada N_p , ilgilenilen fotopikin Compton sürekliliği çıkarılmış net sayımı; t_c , sayım süresi (s); N_d , doğal fon spektrumundan elde edilen fotopikin Compton sürekliliği çıkarılmış net sayımı; t_d , doğal fon sayım süresi (s); $f_\gamma(E)$, ilgilenilen enerjinin gama ışını yayınlanma olasılığı; A , standart kaynağın aktivitesi (Bq) ve K , kaynağın özelliklerine ve ölçüm düzeneğine bağlı farklı etkileri içeren düzeltme faktörlerinin bileşimini veren bir katsayıdır.

$$K = \frac{K_k \cdot K_o \cdot K_r}{K_b \cdot K_c} \quad (2.34)$$

Burada; K_b , radyoaktif bozunma düzeltmesi; K_c , ölçüm süresi düzeltmesi; K_k , gerçek koincidens düzeltmesi; K_o , gama ışını öz soğurma düzeltmesi ve K_r , rasgele yığılma düzeltmesi faktörleridir.

2.2.7 Aktivite ölçümü

Gama spektrometrik yöntem, düşük seviyeli aktivitenin ölçülmesinde, oldukça büyük (yaklaşık 4 L’ye varan) hacimli örnekleri genelde hasar verilmeksizin örnek hazırlama usulleri ile hızlı ve pratik şekilde ölçme imkanı vermektedir. Bu yöntemle, yüksek çözme güçlü ve yüksek verimli HPGe dedektörler kullanıldığında 10 keV-10 MeV

enerji aralığında gama ışını yayınlayan her türlü radyonüklit aktivitesi belirlenebilmektedir. Bu nedenle HPGe dedektörlü gama spektrometresi, genelde oldukça düşük aktivite içeren çevresel ve gıda örneklerinde çok etkin olarak kullanılmaktadır ve yüksek doğrulukta sonuçlar vermektedir. Yöntem, diğer her türlü maddenin (çevresel ve sanayi atıkları, adi atıklar, sanayi ham maddeleri ve ürünleri, yapı malzemeleri) içerebileceği aktivitelerin belirlenmesinde de kullanıldığı gibi, yüksek aktiviteler içeren nükleer atıkların ölçümüne de uygundur.

Uygulamada aktivitenin ölçülmesinde iki yöntem kullanılır:

1. Örneğe uygun bir standart olmaması durumunda sistemin sayım geometrisine uygun mutlak verimin kullanıldığı doğrudan aktivite belirleme yöntemi
2. Örnekle özdeş bir standart olması durumunda verim tayini gerektirmeyen ve daha kolay olan standartla karşılaştırma yöntemi

Bu tez çalışmasında örneğin aktivitesinin belirlenmesi için doğrudan aktivite ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Örnekte bulunan radyonüklitin ilgilenilen enerjisindeki aktivitesi

$$A = \frac{\left[\frac{N_p}{t_c} - \frac{N_d}{t_d} \right]}{\varepsilon(E) \cdot f_\gamma(E) \cdot m} \cdot K \quad (2.35)$$

eşitliğinden hesaplanır.

2.2.8 Fotopik verimi ve aktivite ölçümünde uygulanması gereken düzeltme faktörleri

2.2.8.1 Radyoaktif bozunma düzeltme faktörü

Radyonüklitin aktivitesi zamanla azalacağı için buna uygun bir düzeltme faktörü

$$K_b = e^{\left(\frac{0,693 \Delta t}{t_{1/2}} \right)} \quad (2.36)$$

ile verilir. Burada Δt , örneğin toplanmasından ölçümün başladığı zamana kadar geçen süre (s) ve $t_{1/2}$ ilgilenilen nüklitin yarı ömrüdür (s). Yarı ömrü çok uzun olan nüklitler için $K_b \cong 1$ kabul edilir (Dovlete and Povinec 2004).

2.2.8.2 Ölçüm süresi düzeltme faktörü

Standardın veya örneğin sayımı sırasında da radyonüklitler bozunmaya devam ederler. Sayım süresi boyunca bozunmayı hesaba katmak için ölçme süresine göre bir düzeltme faktörü hesaplanır. Ölçüm süresi boyunca oluşan bozunma için düzeltme faktörü

$$K_c = \frac{t_{1/2}}{\ln 2 \cdot t_r} \left(1 - e^{\left(\frac{0,693 t_r}{t_{1/2}} \right)} \right) \quad (2.37)$$

ile verilir. Burada t_r , ölçüm boyunca geçen gerçek süredir (real time). Yarı ömrü çok uzun olan nüklitler için $K_c \cong 1$ kabul edilir (Dovlete and Povinec 2004).

2.2.8.3 Gama-ışını öz soğurma düzeltme faktörü

Örneğin (veya standart kaynağın) içinden geçen gama ışınlarının, örnek matrisi ve yoğunluğu nedeniyle soğurulması sonucunda, fotopik sayımında oluşan kayıpları düzeltmek için, özellikle yüksek atom numaralı elementleri içeren ve yüksek yoğunluklu matrislerde öz soğurma etkisi için düzeltme faktörü uygulanması bir zorunluluktur. Öz soğurma, gama ışını dedeksiyonunda düşük aktivite ölçümünde büyük hacimli örnekler kullanılması nedeniyle özellikle düşük enerji bölgesinde (<200 keV) önemli bir sorundur.

Örnek ve dedektör arasına bir soğurucu konulursa, Beer-Lambert kuralına göre soğurucu içinden geçen gama ışınlarının üstel olarak azaldığı bilinmektedir.

$$C = C_0 \cdot e^{-\mu_k \cdot \rho \cdot d} \quad (2.38)$$

Burada C_0 , azalırma uğramamış gama ışını sayısı; C , soğurucu içinden geçerek azalırma uğramış gama ışını sayısı; μ_k , ilgilenilen enerjideki kütle soğurma katsayısı ($\mu_k = \mu/\rho$, $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$); ρ , soğurucunun yoğunluğu (g cm^{-3}), d soğurucu kalınlığıdır (cm). $e^{-\mu_k \cdot \rho \cdot d}$ terimi d kalınlığındaki düzlemsel bir soğurucu maddenin öz soğurma katsayısıdır.

2.2.8.3.1 Gama-ışını öz soğurma düzeltme faktörünün hesaplanması

Örneğin (veya standart kaynağın) öz soğurma faktörünün kuramsal olarak hesaplanması için kimyasal bileşiminin bilinmesi gereklidir. Belirli bir enerjide kimyasal bileşime ait toplam kütle soğurma katsayısı

$$\mu_k = \sum_{i=1}^n w_i \mu_i \quad (2.39)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada μ_i , maddenin kimyasal bileşiminde bulunan her bir bileşenin kütle soğurma katsayısı; w_i ise bu bileşenlerin ağırlık kesirleridir.

Küçük hacimli silindir geometrisi için öz soğurma faktörü

$$K_o = \frac{\mu_k \cdot \rho \cdot d}{1 - e^{-\mu_k \cdot \rho \cdot d}} \quad (2.40)$$

eşitliği ile hesaplanabilir (Cutshall *et al.* 1983). Burada μ_k , ilgilenilen enerjideki kütle soğurma katsayısı ($\mu_k = \mu/\rho$, $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$); ρ , maddenin görünür yoğunluğu (g cm^{-3}); d , maddenin kalınlığıdır (cm).

2.2.8.4 Gerçek çakışma (true coincidence) düzeltme faktörü

Dedektörün, bozunan radyonüklitin birçok sayıda açığa çıkan X- ve gama ışınlarını algılayarak bir tepki vermesi, yani her enerjiyle orantılı bir puls oluşması beklenir. Halbuki sistemin çözme zamanından daha kısa sürede, özellikle nükleer seviyelerin art arda (cascade) yayınladığı gama ışınları bir toplam pik olarak spektrumda gözlenebilmektedir. Dolayısıyla üst üste çakışan enerjilerin oluşturduğu fotopiklerde kayıplar ve artışlar söz konusu olabilmektedir. Nükleer seviyelerden eş zamanlı yayınlanan iki gama ışınının bir toplamı olarak, gama spektrumunda gözlenecek yeni bir pik gerçek çakışma olayının olduğunu gösterir. Bu olay nedeniyle fotopik sayımında olabilecek kayıplar ve artışlar, nüklitin bozunma şemasına bağlı olduğu gibi kaynak-dedektör geometrisine de bağlıdır. Gerçek çakışma olaylarının sayısı, kaynağın aktivitesiyle doğru orantılı olmasına rağmen, belirli bir katı açıda oluşan kayıpların toplam sayıya oranı kaynağın aktivitesine bağlı değildir. Pratikte, kaynak dedektöre yaklaştırıldığında veya dedektör hacmi büyüdüğünde gerçek çakışma kayıplarını düzeltme gereksinimi de artar. Ancak bunun düzeltilmesi, her nüklit ve her sayım geometrisi için özel uğraşlar gerektirir. Uygulamada, özdeş sayım geometrilerinde mümkün olduğunca dedektörden uzak sayım yaparak bu etkiler giderilebilir (Garcia-Talavera *et al.* 2001). Küçük kristal hacminde bir dedektör ve dedektörden uzakta yapılan sayımlarda bu etkiler ihmal edilir derecede azalabilir. Örneğin, kristal yüksekliğinin en az iki katı mesafede sayılan noktasal kaynaklar için çakışma kayıplarının %5'in altında olduğu ve bağlı verimi %30-40'ı geçmeyen eş-eksenli dedektörler ile 10-12 cm mesafede yapılan sayımlarda oluşabilecek kayıpların belirsizlik sınırları içinde olduğu ifade edilmektedir (Debertin and Helmer 1988, Ramos-Lerate *et al.* 1992, Russ *et al.* 2005). Nüklitin nükleer seviyelerinin art arda gama ışını yayınlanması durumu yoksa, yakın mesafelerde yapılan ölçümlerde gerçek çakışma toplanması için bir düzeltme faktörü uygulanmasına gerek yoktur.

2.2.8.5 Rasgele yığılma düzeltme faktörü

Rasgele yığılma, spektrometrenin çözme zamanı içinde, sisteme art arda oluşan iki veya daha fazla pulsun gelmesi sonucu, aynı veya farklı enerjili art arda oluşan iki pulsun, eş

zamanlı dedeksiyonunun bir sonucudur. Diğer bir ifadeyle, iki gama ışının meydana getireceği pulslar, spektrometrenin belirli bir çözme zamanı içinde aynı sayım sitemine ulaşırlarsa, bunlar ayırık olaylar olarak ayırt edilemeyerek, bunun yerine toplam bir enerjiye karşılık tek bir puls olarak kaydedilecektir (Örneğin ^{137}Cs kaynağında $661,6+661,6=1323,2$ keV'de olabileceği gibi). Bu durumda gerçekte kaydedilmesi gereken puls sayısında kayıplar olacaktır. Rasgele yığılma etkisi, toplam sayım hızının ve sistemdeki yükseltecin puls genişliğinin bir fonksiyonudur. Bu nedenle, bu puls yığılması etkisi, pulsların toplam genişliği daraltılarak (şekillendirme zamanı azaltılarak) en aza indirilebileceği gibi, kaynak-dedektör mesafesi değiştirilerek (veya uygun kaynak aktivitesi sağlanarak) sayım hızı düşürülerek azaltılabilir. Yüksek sayım hızlarında nicel olarak daha fazla pulsun sistemin çözme zamanı içerisinde birbirinden etkilenmesi söz konusudur. Pratik uygulamalarda, örneğin, sistemin ölü zaman %10'u geçtiğinde kesinlikle puls yığılması düzeltilmesi yapılması gerekir.

$$K_r = e^{(2 \cdot R \cdot \tau)} \quad (2.41)$$

Burada, R, tüm spektrumdaki toplam (integral) sayım hızı (sayım/s) ve τ , sistemin çözümü zamanıdır.

2.2.9 Belirsizlik hesabı

Bir çok durumda ilgilenilen nicelik (ölçüm değeri), doğrudan doğruya ölçülerek elde edilemez, bunun yerine çeşitli diğer niceliklerin değerlerinden türetilmek zorundadır. Bu durumda ölçüm değerinin belirsizliği birleştirilmiş standart belirsizlik olarak verilir. İlgilenilen niceliğin (ölçüm değeri, y_i) birleştirilmiş standart belirsizliği, Gauss'un "hata yayılma yasası" kullanılarak türetilir. En genel haliyle, y ölçülen değerin toplam belirsizliği $u_c(y_i)$, her bir değişkenin belirsizliğinden $u(x_i)$, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u_c(y(x_1, \dots, x_n)) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u(x_i)^2} \quad (2.42)$$

Burada $y(x_1, \dots, x_n)$, x_1, \dots, x_n niceliklerinin bir fonksiyonudur. x_i niceliklerinin birbirinden bağımsız olduğu ve $u(x_i) \ll x_i$ olduğu durumda geçerlidir (Dovlete and Povinec 2004).

Birleştirilmiş standart belirsizlik değeri $u_c(y_i)$, gerek duyulduğunda (daha yüksek güvenilirlikle ifade edilmek istendiğinde) bir k_α genişletme faktörü ile çarpılarak, ölçülen nicelik $u \pm k_\alpha \cdot u_c$ şeklinde ifade edilir. Aksi belirtilmediği durumda, bu çalışmada belirsizlikler, $k_\alpha=1$, yani $\pm 1\sigma$ güven aralığında verilmiştir.

2.2.9.1 Fotopik veriminin belirsizliği

Standart kaynak kullanılarak belirli bir enerjide ölçülen verim değeri, ilgilenilen enerjide elde edilen fotopikin net sayım hızının, ilgilenilen enerjideki gama yayınlanma olasılığının, standart kaynağın aktivitesi ile madde miktarının ve düzeltme faktörlerinin bir fonksiyonudur. Buna göre fotopik veriminin belirsizliği ($\pm 1\sigma$ aralığında)

$$u_{\epsilon} \equiv \epsilon \cdot \sqrt{\left(\frac{u(N_p)}{N_p}\right)^2 + \left(\frac{u(A)}{A}\right)^2 + \left(\frac{u(f_\gamma)}{f_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(K)}{K}\right)^2} \quad (2.43)$$

ile verilir. Burada ϵ , ilgilenilen enerjideki fotopik verimi; N_p , fotopikin Compton sürekliliği ve doğal fon düzeltilmesi yapılmış net sayımı; $u(N_p)$, net fotopik sayımının belirsizliği; A , standart kaynağın aktivitesi; $u(A)$, standart kaynağın aktivitesinin belirsizliği; f_γ , ilgilenilen enerjinin gama ışını yayınlama olasılığı; $u(f_\gamma)$, gama ışını yayınlama olasılığının belirsizliği; m , standardın miktarı; $u(m)$, standardın miktarındaki belirsizlik; K , düzeltme faktörlerinin bileşimi ve $u(K)$ ise düzeltme faktörlerini kapsayan belirsizliktir.

2.2.9.2 Aktivitenin belirsizliği

2.2.9.2.1 Doğrudan ölçme yöntemi ile ölçülen aktivitenin belirsizliği

İlgilenilen örneğin doğrudan ölçme yöntemi ile belirlenen aktivitesindeki belirsizlik, ilgilenilen radyonüklitin belirli enerjisindeki fotopikin net sayım hızının, ilgilenilen enerjideki gama yayınlanma olasılığının, fotopik veriminin, örneğin madde miktarının ve düzeltme faktörlerinin bir fonksiyonudur. Buna göre aktivite niceliğinin belirsizliği;

$$u(A) = A \cdot \sqrt{\left(\frac{u(N_p)}{N_p}\right)^2 + \left(\frac{u(f_\gamma)}{f_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{u(\epsilon)}{\epsilon}\right)^2 + \left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(K)}{K}\right)^2} \quad (2.44)$$

ile verilir. Burada A, örneğin aktivitesi; N_p , fotopikin Compton sürekliliği ve doğal fon sayımı çıkarılmış net sayımı; $u(N_p)$, net fotopik sayımının belirsizliği; ϵ , fotopik verimi; $u(\epsilon)$, fotopik veriminin belirsizliği; f_γ , ilgilenilen enerjinin gama ışını yayınlama olasılığı; $u(f_\gamma)$, gama ışını yayınlama olasılığının belirsizliği; m, örneğin miktarı; $u(m)$, örneğin miktardalı belirsizlik; K, düzeltme faktörlerinin bileşimi; $u(K)$ ise düzeltme faktörlerini kapsayan belirsizliktir.

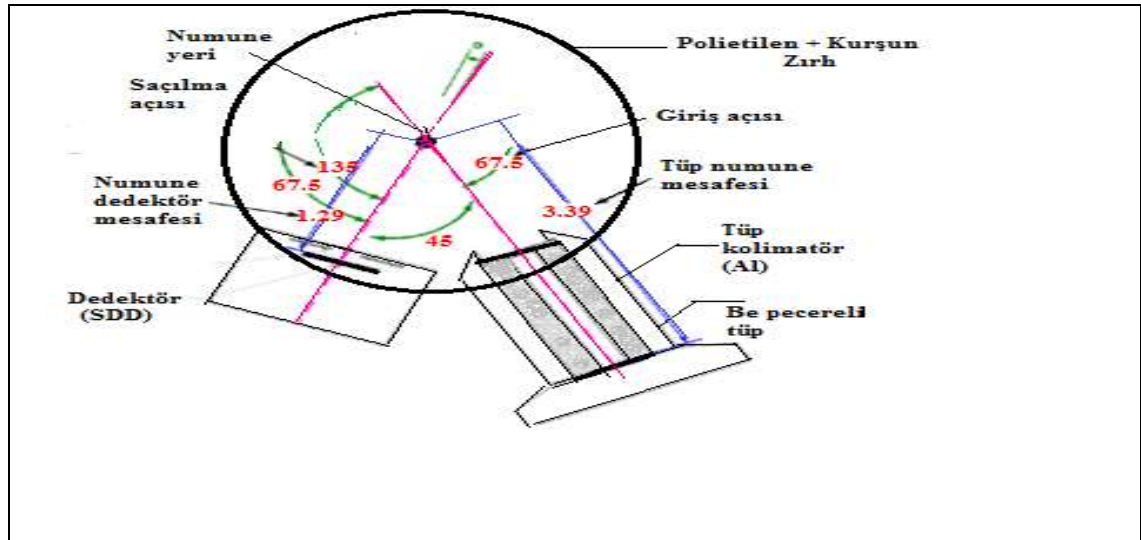
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Kullanılan Spektrometrik Yöntemler

3.1.1 X-ışını spektrometre sistemi

X-ışınları kaynağından çıkan ışınlar (fotonlar) kimyasal analizi yapılacak olan örnek üzerine gönderilir. Karakteristik ışınların dalga boyları sabittir ve elementin karakteristiğidir ve bu durum örneğin kimyasal analizinin yapılmasına olanak tanır. Bu prensipten yararlanarak, EDXRF tekniği ile elementel analiz yapılmıştır.

Seramik ve mermerlerin kimyasal bileşimindeki ppm(mg.kg⁻¹) ve % mertebesindeki elementler, yüksek enerji ayırma güçlü (132 eV FWHM@5.9 keV) 25mm² aktif alanlı, Be pencereleli bir SDD dedektör ve max. çıkış gücü 50kV olan Ag-anodlu X-ışını tüpü uyarmalı bir EDXRF analiz sistemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla birkaç yüz mikron tane büyüklüğünde elenmiş toz numuneler, organik bağlayıcı ile pres altında pelet haline getirildikten sonra kullanılmıştır. Her numune için en az 2 pelet hazırlanmıştır.



Şekil 3.1 X-ışını floresans spektrometresi

Çizelge 3.1 SDD dedektörün özellikleri

| | |
|----------------------------|------------------------------|
| Dedektör Tipi | Silikon Drift Dedektör (SDD) |
| Boyutu | 25 mm ² |
| Silikon Kalınlığı | 500 µm |
| Berilyum Pencere Kalınlığı | 12.5 µm |
| Toplam Güç | 2.5 Watt |

Çizelge 3.2 X-ışını tüpü özellikleri

| | |
|-------------------|------------------|
| Hedef Malzemesi | Gümüş (Ag) |
| Hedef Kalınlığı | 0.75 µm |
| Tüp Voltajı | 10-50 kV |
| Yaklaşık Doz Hızı | 1 Sv/h @ 30 cm |
| Pencere Malzemesi | Berilyum |
| Pencere Kalınlığı | 127 µm |
| Çıkış Koni Açısı | 120 ⁰ |

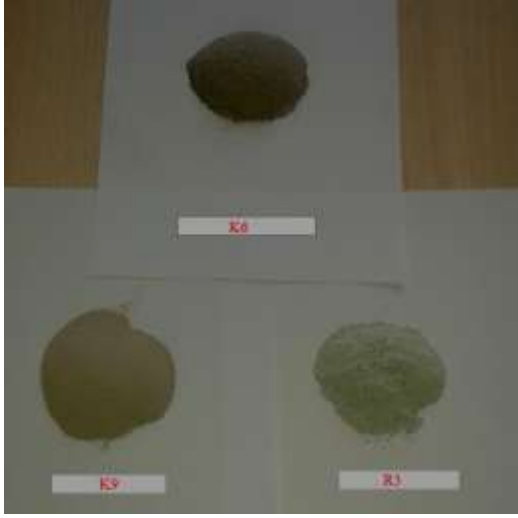
3.1.1.1 Standart kaynakların ve örneklerin ölçüme hazırlanmasında kullanılan cihazlar

Örnek hazırlamada 200°C'ye kadar ayarlanabilen SalvisLab marka Thermocenter TC-100 etüv, 1µm'den küçük tane büyüklüğü sağlayan Retsch marka PM-200 öğütücü, basınç uygulanabilen Specac marka pres ve hassasiyeti ±%0,01-0,0001 olan And marka GR-202 hassas terazi kullanılmıştır.

3.1.1.2 Numunelerin hazırlanması

Kantitatif analiz için ilk olarak örnekler 105 °C de etüv edilerek nemden arındırılmıştır. Elde edilen numune daha sonra homojenlik kazanması ve aynı partikül büyüklüğüne sahip olması için 250 µm gözlü eleklerle elenmiştir. Toz halinde bulunan örnek, kaygan bir kağıt üzerine dökülerek hassas terazide tartılmıştır. Tartma miktarı kıyaslanacak olan standarda göre belirlenmiştir. Bu değer genelde 1 gramdır. Bizim kullandığımız LKSD-

1 (CRM Canadian lake sediment) standardından oluşmaktadır. Elde ettiğimiz örnekler 1 gram ağırlığında ve belirli miktarda selüloz bağlayıcı ile birlikte homojen olarak karıştırılmış ve 9-10 ton/cm² basınç altında 13 mm çapında pelet haline getirilmiştir. Uygulanan işlemler hazırlanan bütün numuneler için aynı şartlarda aynı işlemler gerçekleştirilmiştir. Böylece matriks etkisi de minimum seviyeye çekilmiştir.



(A)



(B)



(C)



(D)

Şekil 3.2 (A) Seramik (K6 ve K9) ve mermer (R3) örnekleri, (B) Pelet örnekleri,

(C) Sırlı seramik örneği, (D) Seramik örneğinin pasta kısmı

3.1.1.3 Enerji kalibrasyonu

Herhangi bir numune ile çalışılırken, spektrumdaki pikleri doğru bir şekilde değerlendirmek için enerji kalibrasyonu yapılır. Enerji kalibrasyonu yapmak için enerji değerleri bilinen pikler bu piklerin enerji değerlerine karşılık gelen kanal numaraları kullanılmıştır. Bu çalışmada referans malzeme olarak paslanmaz çelik (SS 316) kullanılarak enerji kalibrasyonu yapılmıştır. Bu referans metal içinde Fe, Cr, Mn, Cu ve Mo gibi elementler ve bu elementlere ait karakteristik pikler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

3.1.1.4 XRF analiz metotları

Çok çeşitli olan x-ışını spektrometrik analiz metotları matris (soğurma ve şiddetlendirme) etkilerinin azaltılmasına temel yaklaşımları itibariyle yedi grupta toplanabilir (Bertin, 1975). Bu tez çalışmasında standartla mukayese metodu ile numunenin kimyasal bileşimi tayin edilmiştir.

Standartla karşılaştırma metodu: Numuneden yayınlanan karakteristik analit çizgi şiddeti, numuneler ile aynı veya yakın analit ve matris konsantrasyonuna sahip standartla karşılaştırma yapılır.

Standart ilave ve seyreltme metodu: Analit konsantrasyonu numune matrisi içinde miktar olarak değiştirilir. Bu bir veya birkaç numune matrisine, birkaç değişik konsantrasyonda saf analit veya analit çözeltileri ilave edilerek matris içinde analit miktarının azar azar arttırılması ile yapılır.

İnce film metodu: Soğurma ve şiddetlendirme etkilerini ortadan kaldırmak için numuneler ince filmler halinde hazırlanır.

İç (dahili) standardizasyon: Standartlarla karşılaştırma metodu, özel bir matris içinde analite benzer uyarma, soğurma ve şiddetlendirme karakteristiğine sahip bir dahili standart elemntin bütün numunelere ilave edilmesi ile düzeltilir. Kalibrasyon fonksiyonu, analit ve dahili standart çizgilerini şiddet oranını ihtiva eder.

Saçılmış X-ışınları ile standardizasyon: Numune tarafından saçılmış primer X-ışınlarının şiddeti, soğurma-şiddetlendirme etkilerini düzeltmede kullanılır.

Deneysel düzeltme: Soğurma ve şiddetlendirme etkilerini yok etmek veya minimuma indirmek için özel deneysel teknikler kullanılır.

Matematiksel düzeltme: Soğurma ve şiddetlendirme etkilerini deneysel olarak türetilmiş parametreler kullanılarak matematiksel düzeltme yapılır (Bertin, 1975).

3.1.2 Gama spektrometre sistemi

Gama spektrometre sistemleri, çeşitli radyoaktif örneklerdeki radyoizotopların tanımlanmasında sıkça kullanılmaktadır. Gama ışınlarının enerjisi her bir çekirdek için kesikli ve karakteristiktir. Bir örnek içindeki farklı radyoaktif çekirdeklerin aynı anda analiz edilebilmesi, malzeme ve zaman kaybına sebep olan ayırma işlemleri gerektirmemesi, hızlı ve kolay örnek hazırlanması gama spektrometresinin avantajları arasında yer alır. HPGe dedektörü, besleme gerilimi uygulanmadığı zaman, yani ölçüm alınmadığında, Ge kristal oda sıcaklığında tutulabilir. Fakat çalışırken germanyum darbant özellikli bir yarıiletken olduğundan dedektör kullanılırken sıvı azot sıcaklığında tutmak gerekir. Bu durum pratik açıdan dezavantaj gibi görünse de, sağladığı yüksek ayırma gücü nedeniyle, bir çok radyonüklidin verdiği karmaşık bir gama spektrumlarının aynı anda analiz edilmesine ve böylelikle güvenilir aktivite değerlerine ulaşılmasına imkan verir.

Bu tezde öngörülen ölçümleri gerçekleştirmek için yaygın olarak kullanılan yüksek enerji ayırma güçlü (2.2 keV FWHM @1332.5 keV'de 2.2 keV FWHM) kuyu tipi %44,6 bağıl verimli Ge dedektörü olan bir gama spektrometresi kullanılmıştır. Gama spektrometrik ölçümler için sistem ASTM E181 standardına uygun olarak kalibre edilmiştir. Uygun bir sayım süresi için pik alan belirsizliği için bir karar verilerek ve spektrumlar kaydedilmiştir. Spektral girişim, öz soğurma ve gerçek zamanlı çakışmalar(TCS) için gerekli düzeltme faktörleri uygulanmıştır (Yücel ve ark., 2011).

Spektrumalarda, ^{226}Ra için 7-10 Bq/kg, ^{232}Th için 7-10 Bq/kg ve ^{40}K için 10-20 Bq/kg MDA (asgari ölçülebilir aktivite) değerleri hedef alınmıştır.

Çizelge 3.3 HPGe dedektörün özellikleri

| | | |
|--|---|---------------------------------|
| Dedektör geometrisi ve kristal tipi | | Kapalı uçlu, eş eksenli, p-tipi |
| Bağlı verimi | | % 44,8 |
| Aktif hacmi | | 218 cm ³ |
| Ge kristali | Çap | 66,5 mm |
| | Yükseklik | 67 mm |
| Enerji ayırma gücü (FWHM) | 122 keV (^{57}Co) | 1,16 keV |
| | 1332,5 keV (^{60}Co) | 2,0 keV |
| Pik-Compton oranı | 1332,5 keV (^{60}Co) | 60,8:1 |

3.1.2.1 Örneklerin hazırlanması

Yurt dışına ihracat için sertifikalandırma amacıyla A.Ü. NBE'ne daha önceden gelen, seramik karolar ve mermer ürün parçaları firma adı ve kodu kullanılmaksızın laboratuvarında özel bir numarayla kodlanmıştır. Daha sonra, iki aşamalı bir işlemde geçirilerek kırılıp öğütülmüştür. Toz tane büyüklüğü ve yaş/ kuru ağırlıkları ve net miktarları, hazırlama tarihleri etiketlenen numuneler, sızdırmaz şekilde silindirik kaplara konulmuştur. Örnekler, ilk olarak etüvde 105°C'de 4 saat kurutulmuştur. Daha sonra, uygun homojenliği elde etmek için tane boyutu 1 mm'nin altına inecek şekilde öğütülerek toz şekline getirilmiştir ve standart kaynaklar ile aynı geometrideki plastik kaplar içerisine doldurulmuştur. Hazırlanan bazı örnekler ^{226}Ra 'nın ürün nükliti ^{222}Rn ile radyoaktif dengeye gelmesi için ölçümden önce en az bir ay veya daha fazla süreyle bekletilmiştir.

3.1.2.2 Doğal fon spektrumunun ölçülmesi

Laboratuvar ortamının doğal fon spektrumu, dedektörde ve dedektör çevresinde herhangi bir kaynak yokken ölçülmüştür. İlgilenilen enerjilerde doğal fon sayımları, farklı zamanlarda her biri iki veya üç gün süre ile yapılan en az üç ölçümün ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

3.1.2.3 Gama-ışını öz soğurma düzeltme faktörünün belirlenmesi

Gama-ışını öz soğurma düzeltme faktörleri silindirik numune geometrisinde, standart kaynaklar ve örnekler için belirlenmiştir.

3.1.2.3.1 Gama-ışını öz soğurma düzeltme faktörünün hesaplanması

Gama ışını öz soğurma düzeltme faktörünün hesaplanması için öncelikle K, E ve R kodlu örneklerin kimyasal bileşimleri hesaplanmıştır. XRF ölçümleri A.Ü N.B.E’de yapılmıştır. Kimyasal element bileşimi bulunduktan sonra NIST XCOM (<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>, 2014) referans veri tabanı kullanılarak kütle azalım katsayıları hesaplanmıştır. Ayrıca EGML 1389-37-7 çoklu radyonüklit standardının bilinen kimyasal bileşimi SiO₂ kullanılmıştır.

Kimyasal bileşimi bilinen madde için, ilgilenen enerjideki öz soğurma düzeltme faktörü, silindirik numune geometrisinde o enerjideki kütle azalım katsayısı ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$), maddenin yoğunluğu (g cm^{-3}) ve kalınlığı kullanılarak Eşitlik 2.39’dan hesaplanmıştır.

3.1.2.4 Verim kalibrasyonu

Dedektörün verim kalibrasyonu, mutlak verim kalibrasyonu (absolute efficiency) yöntemi ile silindirik numune geometrisinde yapılmıştır.

3.1.2.4.1 Verim kalibrasyonunda kullanılan sertifikalı referans standart kaynaklar

Dedektörün verim kalibrasyonunun elde edilmesinde sertifikalı EGML 1389-37-7 çoklu radyonüklit (

Çizelge 3.4) referans standart kaynağı kullanılmıştır.

Çizelge 3.4 Sertifikalı EGML 1389-37-7 çoklu radyonüklit standardının özellikler

| Nüklit | E (keV) | f_r (%) | $t_{1/2}$ | A (kBq) | Toplam belirsizlik (%) |
|--------------------|----------|-----------|-------------------|---------|------------------------|
| ²¹⁰ Pb | 46,539 | 4,18 | 22,3±0,2 yıl | 5094,81 | 7,0 |
| ²⁴¹ Am | 59,537 | 36,0 | 432,17±0,66 yıl | 512,67 | 3,0 |
| ¹⁰⁹ Cd | 88,0341 | 3,63 | 462,6±0,7 gün | 4832,88 | 3,1 |
| ⁵⁷ Co | 122,06 | 85,6 | 271,79±0,09 gün | 178,75 | 3,1 |
| ^{123m} Te | 159 | 84,0 | 119,7±0,1 gün | 238,29 | 3,1 |
| ⁵¹ Cr | 320,0842 | 9,86 | 27,706±0,007 gün | 6120,16 | 3,0 |
| ¹¹³ Sn | 391,688 | 64,9 | 115,09±0,04 gün | 857,01 | 3,0 |
| ⁸⁵ Sr | 514,0067 | 98,4 | 64,849±0,004 gün | 1120,54 | 3,0 |
| ¹³⁷ Cs | 661,66 | 85,1 | 30,17±0,16 yıl | 796 | 3,0 |
| ⁸⁸ Y | 898,042 | 94,0 | 106,630±0,025 gün | 1779,19 | 3,0 |
| ⁶⁰ Co | 1173,232 | 99,86 | 5,272±0,001 yıl | 953,48 | 3,0 |
| ⁶⁰ Co | 1332,5 | 99,98 | 5,272±0,001 yıl | 953,48 | 3,0 |
| ⁸⁸ Y | 1836,063 | 99,4 | 106,630±0,025 gün | 1779,19 | 3,0 |

3.1.2.4.2 Mutlak verim kalibrasyonu

Aktivitesi bilinen standart kaynakların bilinen enerjileri için ölçülen verim değerlerinin uygun bir eğriye uyarlanarak, bilinmeyen bir enerjideki verimin ara değerlendirme

(interpolasyon) veya dışa değerleme (ekstrapolasyon) ya da eğri uzatma/uyarlama (cubic spline) teknikleri ile hesaplanmasını esas alır. Bu yöntemde gerçek koinsidens etkilerini ayrıca hesaba katmak gerekir. Bu yöntemle belirlenen verim değeri doğrudan aktivite hesabında kullanılacağından, farklı bir radyonüklitin bozunma şemasına bağlı değişebilen gerçek çakışma kayıpları farklı büyüklükte olabilecektir. Ayrıca bu yöntemde de örnek ve standart kaynağın kimyasal bileşimleri ve yoğunlukları farklı olabileceğinden öz soğurma düzeltmesi yapılması gerekmektedir.

Verim kalibrasyonun elde edilmesinde silindirik numune geometrisindeki standart kaynaklar dedektör kılıfının (end-cap) üzerinde ölçülmüştür. Radyoaktif standart kaynaklardan iyi bir sayım istatistiği elde etmek için 2 günlük bir ölçüm yapılmıştır. Gerçek çakışma düzeltmesi, kristalin gerçek dikey konumdan 1° - 2° eğilmesi, kristal yüzeyindeki ölü tabaka gibi çok çeşitli parametrelerin hesaba katılması ve özel prosedürlerle dedektörün toplam veriminin de ölçülmesini gerektirdiğinden bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur.

3.1.2.5 Yapı malzemelerinden kaynaklanan radyasyon dozunun kaynağı

Doğal ürünler genel olarak farklı mineral ve farklı kimyasal kompozisyona sahiptir. Bu farklılık farklı kimliğe bürünmelerini ve farklı isimlendirmelerine neden olmaktadır. Radyasyon veya radyoaktivite özelliği taşıyan mineraller doğada az bulunmaktadır. Ancak bu elementler mobil olmalarından dolayı son kristalleşen üründe daha fazla yoğunlaşma göstermektedir. Bu nedenle kristalizasyon süreci içerisinde doğa halde radyoaktif elementler son kristallerdeki minerallerde yığışım göstermektedir. Bu nedenle ortoklaz, mikroklin, sanidin ve anortoklazlardaki potasyum (K) zenginleşmesinden dolayı radyoaktif özellik sergiler. bunun yanımda ilk kristalleşip ancak çözeltide var olan radyoaktif elementler bazı minerallerin bünyesine katılmaktadır. Zirkon, monazit, granat, titanit, sodalit, kankrinit gibi mineraller bunlara örnek verilebilir. Seramikler daha çok Kaolin ve alkali feldspat minerallerden yapılmaktadır. Bu nedenle potasyum (K) etkili radyoaktivite özellikli mineraller etkindir. Bu nedenle seramiğin bileşimi ve özelliği oldukça etkilidir.

3.1.2.6 Yapı malzemelerinin radyasyon doz değerlendirilmesi

Bina yapımında kullanılan malzemeler büyük bir çoğunluğu toprak kaynaklı olduğundan, bunlar da insanların doğal radyasyona maruz kalmalarının nedenidir. Bütün yapı malzemeleri değişik miktarda doğal radyonüklitler içermektedir. Kayalardan ve topraktan elde edilen malzemeler genellikle Uranyum (^{238}U) ve Toryum (^{232}Th) serilerinin doğal radyonüklitleri ile Potasyum (^{40}K) radyoaktif izotopunu içermektedir. Uranyum serilerinde ^{226}Ra ile başlayan bozunma serisi önem arz ettiğinden, referanslar genellikle Uranyum yerine Radyuma göre yapılmaktadır. Dünya genelinde toprak katmanlarındaki Radyum, Uranyum ve Potasyum konsantrasyonları sırasıyla 40-50 Bq/kg, 40-50 Bq/kg ve 400-500 Bq/kg'dır. Yapı malzemelerindeki radyoaktivitenin kontrol amacı, maruz kalınan doğal radyasyon seviyesinin bu malzemeler nedeniyle artmasının önlenmesidir. Toplum üyelerinin alacağı radyasyonun mümkün olan en düşük seviyede tutulması esastır. Ancak, yapı malzemelerinin kullanım alanının genişliği nedeniyle bunlardan kaynaklanan radyasyonun tamamen önlenmesi mümkün değildir. Yapı malzemelerinden kaynaklanan radyasyon ışınlamasını, iç ve dış ışınlama olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Dış ışınlamaya doğrudan gama ışınları sebep olmaktadır. İç ışınlamaya ise, Radon (^{222}Rn), Toron (^{220}Rn) ve bunların kısa ömürlü parçalanma ürünlerinin teneffüs edilmesi sebep olmaktadır.

İç Işınlamaya Karşı: 90/143/Euratom rumuzlu Avrupa Komisyonunun 21 Şubat 1990 tarihli “Evlerdeki Radon Işınlamalarına Karşı Halkın Korunması”na ilişkin Tavsiye Kararı’nda yeni ve eski binalar için eve içi Radon konsantrasyon limitleri belirlenmiştir. Bu seviyeler; eski binalar için 400 Bq/m^3 ve yeni binalar için Radon konsantrasyonu tasarım seviyesi 200 Bq/m^3 dür.

Dış Işınlamaya Karşı: Avrupa Komisyonu’nun “Radiation Protection 112 (Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials), 1999” raporunda yapı malzemelerinden kaynaklanan radyasyondan korunmak için 1 mSv/yıl gama dozu sınırlaması getirilmektedir. Bu çerçevede AB ülkelerinde, 1 mSv üzerinde gama dozuna sebep olabilecek miktarda radyoaktivite içeren yapı malzemelerine izin verilmemektedir. Üye ülkelerin bir kısmı yapı malzemelerinin radyoaktivitesine ilişkin düzenlemeleri hazırlamış olup yapı

malzemelerinin Avrupa Birliği içinde kontrollü dolaşımının sağlanması arzulanmaktadır.

Radyum-226, Toryum-232 ve Potasyum-40 aktivite konsantrasyonları C_{Ra} , C_{Th} , C_K sırasıyla (Bq/kg) olmak yıllık doza karşılık gelen aktivite derişim indeksi; binalarda beton gibi çok kullanılan malzemeler için

$$I = \frac{C_{Ra}}{300} + \frac{C_{Th}}{200} + \frac{C_K}{3000} \quad (3.1)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Aktivite derişim indeksi, I, kullanılan malzemeye göre değişmekle birlikte, binalarda kullanımı sınırlı olan kaplama malzemelerinin toplum bireyine ekstra verebileceği dozun 0,3 mSv/yıl sınırlandığı durumunda; $I \leq 2$ olmalıdır. Buna göre ölçülecek aktivite derişimlerinden I indeksi aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir:(yücel, yeltepe, 2014).

$$I = \frac{C_{Ra}}{510} + \frac{C_{Th}}{437} + \frac{C_K}{6378} \quad (3.2)$$

3.1.2.7 Yapı malzemelerindeki aktivitenin ölçümü

Yapı malzemelerinin aktivite ölçüm sonuçları, doğrudan aktivite ölçüm yöntemi ile elde edilmiştir. Örnekler, yeterli sayım istatistiğinin sağlanması amacıyla iki ile üç gün arasında değişen sürelerde ölçülmüştür ve bütün ölçümlerde sistemin ölü zamanı %1'den az tutulmuştur. Aktivitesi belirlenecek örneğin ölçülen spektrumundan,

Çizelge 3.5'de verilen enerjilerdeki fotopiklerin net sayımları ve belirsizlikleri; dedektörde herhangi bir kaynak yok iken alınan ortamdaki doğal fon spektrumundan aynı enerjilerdeki fotopiklerin doğal fon sayımları ve belirsizlikleri elde edilmiştir. Aktivite ölçümünde K, E, M ve Z kodlu örneklere deneysel olarak ölçülen öz soğurma

düzeltilme faktörleri uygulanmıştır. Her örnek için ilgilenilen enerjilerde ölçülebilir en küçük aktivite (MDA) değerleri ise 100000 s ölçüm süresi esas alınarak hesaplanmıştır.

Doğrudan aktivite ölçüm yönteminde örneğin aktivitesi, A Eşitlik 2.27 kullanılarak, aktivitenin belirsizliği, $u(A)$ ise $\pm 1\sigma$ güven aralığında hesaplanmıştır. Aktivite sonuçları EGML 1389-37-7 çoklu radyonüklit standardı kullanılarak elde edilen verim değerleri ve radyonüklite özgü yöntem ile elde edilen verim değerleri için ayrı ayrı verilmiştir.

3.1.2.8 Aktivitesi ölçülen nüklitler ve aktivite ölçümünde kullanılan gama-ışını enerjileri

Uranyum bozunma serisinin ana radyonükliti ^{238}U , 49,5 keV (% 0,064) ve 113,5 keV (%0,0102) enerjili pratikte ölçülmesi güç olan çok zayıf şiddetli gama ışınları yayınlar (Yücel *ve ark.*, 1998). Bu nedenle ^{238}U 'ün, ürün nüklitleri ^{234}Th (24,1 gün) ve $^{234\text{m}}\text{Pa}$ (1,17 dakika) ile dengede olduğu varsayılarak aktivitesi hesaplanır (Huy *ve ark.*, 2004). Bu nüklitlerin her ikisi de, kapalı bir sistemde 120-160 günlük bir sürede ^{238}U ile ~%99 dengeye ulaşır. ^{234}Th 'ün 63,3 keV (%3,8) enerjili gama ışını, ^{232}Th ve ^{231}Th 'den sırasıyla 63,8 keV (%0,255) ve 63,9 keV (%0,023)'de zayıf şiddetli gama katkıları içermesine rağmen aktivite belirlenmesine uygundur. $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 'in en şiddetli gama enerjisi 1001 (%0,837) keV'dir. Bu enerjinin yüksek enerji bölgesinde olması nedeniyle, öz soğurma etkileri ^{234}Th 'ün 63,3 keV enerjisindeki kadar büyük olmamasına karşın 100 Bq kg^{-1} altındaki uranyum aktivitesi için sayım istatistiği ciddi bir sorundur. Uranyum serisinde yayınlanma olasılıkları yüksek olan gama ışınlarına sahip ^{214}Pb ve ^{214}Bi radyonüklitleri bulunur. Kısa yarı ömürlerine bağlı olarak, bu iki nüklit kapalı bir sistemde yaklaşık bir ayda ^{226}Ra ile dengeye ulaşır. ^{214}Pb ilgilenilen enerjileri 295,2 keV (%18,2) ve 351,9 keV (%35,1)'dir. ^{214}Bi nüklitinin en şiddetli gama ışınları 609,3 keV (%44,6) ve 1120,2 keV (%14,7)'dedir. Bu enerjilerde ise önemli koinsidens kayıpları vardır. Ancak 351,9 keV'lik gama ışınının en az çakışma etkisi olduğu rapor edilmektedir (Garcia- Talavera *ve ark.*, 2001).

Toryum serisinde en çok ilgilenilen nüklitler ^{228}Ra (5,75 yıl) ve ^{228}Th (1,9131 yıl)'dir. Dengenin sağlandığı durumda ^{228}Ra ürün nükliti ^{228}Ac 'den ve ^{228}Th ürün nüklitleri ^{212}Pb , ^{212}Bi ve ^{208}Tl 'den belirlenebilir. ^{228}Ac 'in en şiddetli gama ışınları 338,4 keV

(%11,26), 911,1 keV (%26,6) ve 968,9 keV (%16,23)'dir. Bu enerjilerde çakışma kayıpları etkindir. ^{212}Bi 'nin en önemli gama enerjisi 727,3 keV (%6,64)'dir ve üst seviyelerden yayınlanan gama ışınlarıyla meydana gelen çakışma etkisi için düzeltme gerektirir. ^{212}Pb nüklitinin ilgilenilen enerjisi 238,6 keV (%43,5)'dir. ^{208}Tl 'in en şiddetli gama enerjisi ise 583,1 keV (%30,58)'dir. Bu enerjide de çakışma kayıpları için düzeltme gereklidir.

Aktinyum serisinden kaynaklanan nüklitlerin ölçümü nadiren mümkündür. En şiddetli gama enerjisi 185,7 keV (%57,2)'dir, fakat spektrumda ^{226}Ra 'nın 186,2 keV (%3,56)'lik enerjisi ile aynı fotopik olarak kaydedilir. ^{226}Ra ve ^{214}Pb nüklitleri arasında denge oluşmamışsa, ^{235}U aktivitesi 163,3 keV (%5,08) ve 205,3 keV (%5,01) enerjilerinden ölçülebilir. Bu iki enerji, diğer enerjilerden zayıf katkılar içerir.

Potasyum aktivitesi ^{40}K nüklitinin 1460,8 keV enerjili fotopikinden ölçülür. Çoğu durumda 1460,8 keV'de oluşan fotopik, ^{40}K ve ^{228}Ac 'in oluşturduğu bir pikdir. ^{232}Th ile dengede olan ^{228}Ac 'in 1459,2 keV'de %1 (Reus ve Westmeier 1983) veya %0,83 (Firestone *ve ark.*, 1988) gama yayınlanma olasılığına sahip gama enerjisi vardır. Bu iki değerlerin ortalaması alınarak gama yayınlanma olasılığı % $0,92 \pm 0,09$ elde edilir. ^{40}K nüklitinin 1460,8 keV enerjisinin gama yayınlanma olasılığı %10,67'dir (Reus ve Westmeier 1983, Firestone *ve ark.*, 1988). Bu durumda oluşan fotopike ^{232}Th ve ^{40}K nüklitlerinin katkısının oranı $0,92/10,67=0,088$ 'dir. Deneysel sonuçlar bu oranın $0,097 \pm 0,09$ olduğunu göstermiştir. Bu değerlerin ortalaması alınarak, oran 0,093 olarak önerilmiştir (Groppi *ve ark.*, 2005). Diğer bir ifadeyle, ^{40}K 'ın bulunmadığı durumda bile ^{232}Th 'nin ^{228}Ac ürününden kaynaklanan 1459,2 keV'lik gama ışını nedeniyle bir ^{40}K fotopikine girişim yapar. Örnekte ^{40}K ve ^{232}Th aktivitesi aynı ise, ^{40}K tayininde %9,3'lük bir hata söz konusu olabilir. Bu durumda ^{40}K aktivitesindeki % hata,

$9,3 \times [A(^{232}\text{Th})/A(^{40}\text{K})]$ ile hesaplanır. Ölçülen ^{40}K aktivitesinden toryum etkisini çıkarmak için düzeltilmiş ^{40}K aktivitesi

$$A_d(^{40}\text{K}) = A(^{40}\text{K}) - 0,093 \times A(^{232}\text{Th}) \quad (3.3)$$

ile verilir. Burada $A_d(^{40}\text{K})$, düzeltilen ^{40}K aktivitesi; $A(^{40}\text{K})$, ölçülen ^{40}K aktivitesi ve $A(^{232}\text{Th})$ ölçülen ^{232}Th aktivitesidir. $^{40}\text{K}/^{232}\text{Th}$ aktivite oranı 9,3'den büyük olduğunda ^{40}K aktivitesindeki hata %1'den küçük olduğu için ihmal edilebilir (Groppi ve ark., 2005).

Bu çalışmada, ^{226}Ra aktivitesi, ^{226}Ra , ^{214}Pb ve ^{214}Bi 'den ; ^{232}Th aktivitesi ise bozunma ürünleri ^{228}Ac (338,32 keV) ve ^{228}Ac (911,20 keV)'in ilgili fotopiklerinden ölçülen aktivitelerin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. ^{40}K aktivitesi ise 1460,8 keV enerjili fotopikinden hesaplanmıştır.

Çizelge 3.5 Aktivitesi ölçülen nüklitlerin özellikleri

| Nüklit | Bozunma Ürünü | Gama-ışını Enerjisi E γ (keV) | Gama-ışını yayınlama olasılığı F γ (%) |
|-------------------|---------------------------|---|--|
| ^{238}U | ^{226}Ra | 186,21 | 3,56 |
| | ^{214}Pb | 351,93 | 35,60 |
| | ^{214}Bi | 609,31 | 45,49 |
| ^{232}Th | ^{228}Ac | 338,32 | 11,40 |
| | ^{228}Ac | 911,20 | 26,20 |
| ^{238}U | ^{234}Th | 63,30 | 3,75 |
| | $^{234\text{m}}\text{Pa}$ | 1001,03 | 0,84 |
| ^{40}K | ^{40}K | 1460,82 | 10,55 |

3.1.2.9 Ölçülen aktivite değerleri kullanılarak hesaplanan nicelikler

3.1.2.9.1 Soğurulan doz hızı

Yıllık etkin doz hızını hesaplamak için önerilen, havadaki soğurulan dozdan (D), etkin doza (ED) dönüşüm katsayısı 0,7 Sv Gy $^{-1}$ ve yaşam alanlarında bulunma (occupancy) ya da meşguliyet faktörü 0,8'dir (Anonymous 2000). Bu durumda bina içinde yaşayanlar için kaplama malzemeleri nedeniyle alabilecekleri gama etkin doz hızı

$$0,3mSv \begin{bmatrix} = 0,2 \times 10^{-9} \text{ Gy} \cdot h^{-1} / Bq \cdot kg^{-1} \times C_{Ra} \\ = 0,14 \times 10^{-9} \text{ Gy} \cdot h^{-1} / Bq \cdot kg^{-1} \times C_{Th} \\ = 0,096 \times 10^{-9} \text{ Gy} \cdot h^{-1} / Bq \cdot kg^{-1} \times C_K \end{bmatrix} \times 0,7Sv / Gy \times 7000h \quad (3.4)$$

ile hesaplanabilir. Toplum üyesi kişiler için etkin doz hızı yılda 0,3 mSv’i geçmemelidir

3.1.2.9.2 Gama aktivitesi derişim indisi

Aktivite konsantrasyon indisi $I \leq 2$, fazladan 0,3 mSv/yıl gama dozu için ölçülen gama aktivitesi derişim indisi;

$$I = \left[\frac{C_{Ra}}{510} + \frac{C_{Th}}{437} + \frac{C_K}{6378} \right] \times \left[\frac{Bq}{kg} \right] \quad (3.5)$$

Burada C_{Ra} , C_{Th} ve C_K sırasıyla radyum, toryum ve potasyum aktiviteleleridir ($Bq \text{ kg}^{-1}$)

3.1.3 Yüzey beta dozu ölçümü

3.1.3.1 Kontaminasyon dedektörleri

Kontaminasyon dedektörlerinde dedektör yüzeyi geniştir. Alfa ve beta, girciliği az olan radyasyonların dedekte edilebilmesi için dedektör pencereleri çok incedir. Kontaminasyon dedektörlerinde orantılı sayaç ya da sintilatörler kullanılır. Bu tür dedektörler kontamine bölgedeki aktivite miktarını belirlemek için tasarlandıklarından genelde CPM (count per minute) ya da CPS (count per second) cinsinden ya da doğrudan Bq/cm^2 cinsinden ölçüm yaparlar.

Bu tez çalışmasında ZnS(Ag) sintilatör dedektörü kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümler seramik karolar kurşun zırh içinde yerleştirilerek, çok hassas bir şekilde alınmış ve daima aynı geometride tekrarlanmıştır. Tez çalışmasında

kullanılan ZnS(Ag) sintilatör dedektörünün başlıca özellikleri Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6 ZnS(Ag) Sintilatörün özellikleri

| | |
|--|--|
| Radyasyon dedektör | ZnS (Ag) sintilatör |
| Giriş Pencere Boyutu | 150 mm x230 mm |
| Pencere Alanı | 345 cm ² |
| Koruyucu Izgara | 80 % geçirgenlik |
| Beta-Gama Hassasiyeti 1μSv/h (¹³⁷Cs) | <100 cps |
| Ölçüm Aralığı (ölü zaman <10%) | 0 – 5000 cps (α- kanal) 0 – 50000 cps (β-γ-kanal) |
| Dış Boyut | 260 mm x 178 mm x 150 mm |
| Ölçüm Modu | α ve β-γ ölçümü |

3.1.3.2 İyon odası

İyon odaları X-ışını, gama ışınları ve beta parçacıkları ölçmede kullanılır. Alçak radyasyon şiddetine duyarlı olmamakla beraber yüksek doz şiddetlerini ölçmede son derece yararlıdır. Çeşitli radyasyonları ayırt etme özellikleri yoktur. Gaz olarak genellikle atmosfer basıncında hava kullanılır. Ölçüm göstergeleri μGy/h, μSv/h ve mR/h şeklindedir.

Bu tez çalışmasında yüksek hassas hacimli (450 cm³) bir sayaç kullanılarak yüzeysel beta dozu hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Ölçümler kurşun zırh içinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirilip ZnS(Ag) sintilatör dedektörüyle elde edilen değerler ile karşılaştırılmış ve yüzde değişimleri belirlenmiştir. İyon odası dedektörünün bazı özellikleri aşağıdaki Çizelge 3.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7 İyon odası dedektörünün özellikleri

| | |
|------------------------------------|---|
| Entegre Edilen Doz | 0 – 50 μSv 0 – 500 μSv |
| Yoğunluk | 7 mg/cm^2 |
| H' (0,07) beta tepkisi | $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ E_{max} 2,27 MeV , 1.01 ^{204}Tl E_{max} 0,77MeV, 0,62 |
| Ortam sıcaklığı aralığı | -10 $^{\circ}\text{C}$ ile +50 $^{\circ}\text{C}$ |
| Pencere | Alüminyum |
| Bağlı yapısal hata | $\pm 15\%$ |
| İstatistiksel dalgalanmalar | -2,9 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ (0,29mR/h), %4,5 -40 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ (4,0mR/h), %1 |

4. BULGULAR

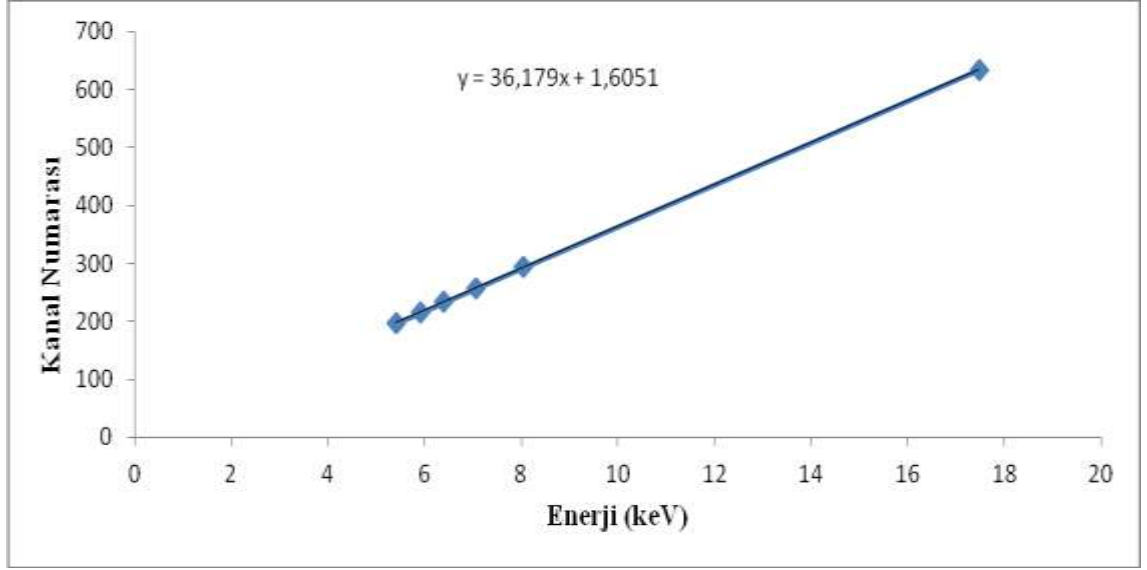
4.1 X-ışını Floresans Spektrometresi

X-ışını Floresans Spektrometresi ile yapılan analiz için standart ile karşılaştırma metodundan yararlanılmıştır. Bu çalışmada seramik karo, seramik porselen, mermer ve zirkon numunelerinin hem kalitatif hemde kantitatif olarak element analizleri yapılmıştır. Analizleri yapabilmek için LKSD-1 Lake Sediment standardı ile çeşitli konsantrasyonlarda miktarlar hazırlanarak kullanılmıştır.

Enerji kalibrasyonu standart referans çelik malzeme SS 316 standartına göre Çizelge 4.1'de verilen enerji kalibrasyon değerleri doğrultusunda yapılmıştır.

Çizelge 4.1 Enerji kalibrasyon değerleri

| Element | Karakteristik X-ışını | Enerji (keV) | Kanal Numarası |
|---------|-----------------------|--------------|----------------|
| Cr | $K_{\alpha 1}$ | 5,41 | 198 |
| Mn | $K_{\alpha 1}$ | 5,92 | 215 |
| Fe | $K_{\alpha 1}$ | 6,40 | 233 |
| Fe | $K_{\beta 1}$ | 7,06 | 257 |
| Cu | $K_{\alpha 1}$ | 8,045 | 293 |
| Mo | $K_{\alpha 1}$ | 17,48 | 634 |



Şekil 4.1 Enerji kalibrasyon eğrisi

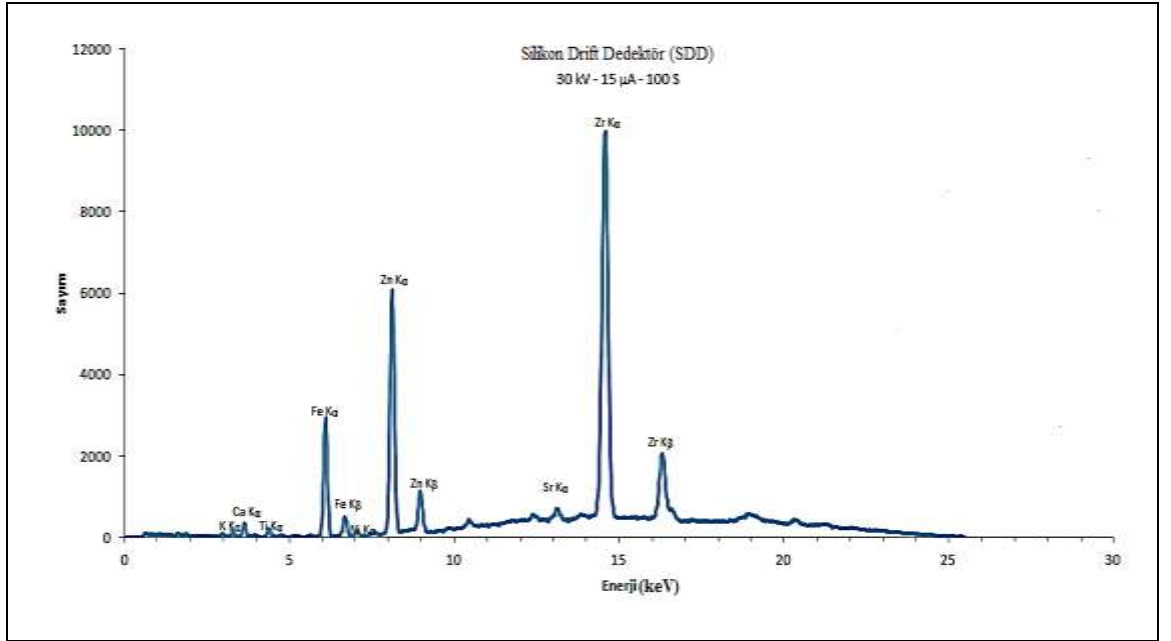
Çizelge 4.2 LKSD-1 sediment standardının bileşim ve yüzde miktarı

| Bileşen | Yüzde Bileşim |
|--------------------------------|---------------|
| SiO ₂ | 40,1 |
| Al ₂ O ₃ | 7,8 |
| Fe ₂ O ₃ | 4,1 |
| MgO | 1,7 |
| CaO | 10,8 |
| Na ₂ O | 2,0 |
| K ₂ O | 1,1 |
| MnO | 0,1 |
| TiO ₂ | 0,5 |
| P ₂ O ₅ | 0,2 |
| LOI (1000 °C) | 29,9 |
| SO ₄ | 1,6 |

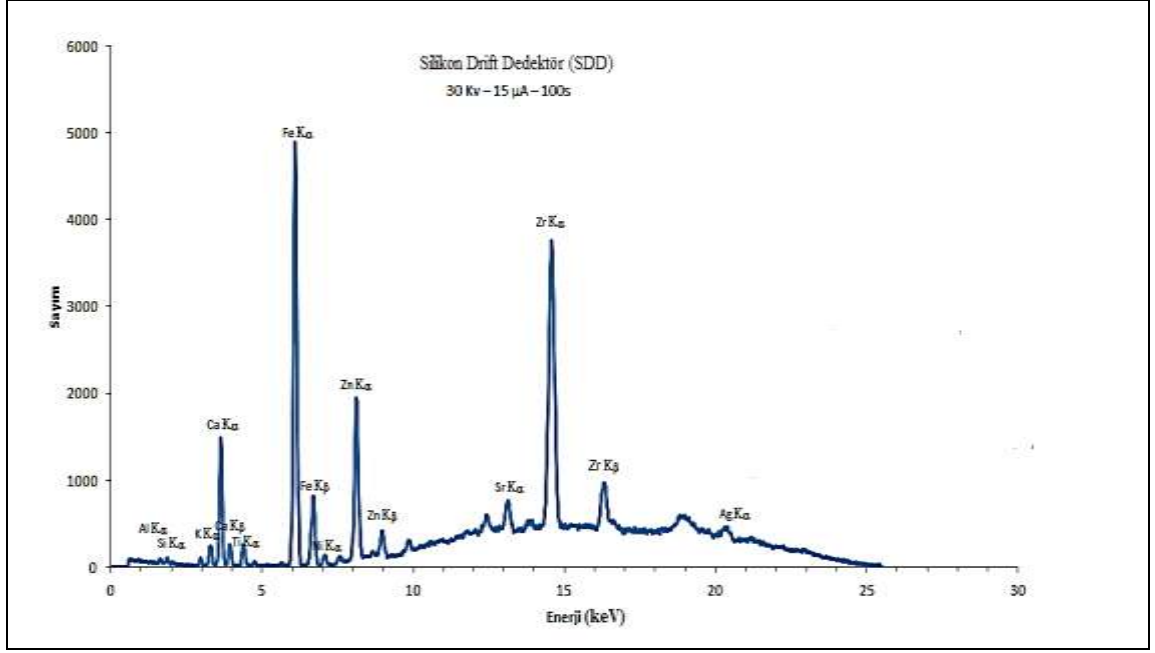
LOI: yanmadaki kayıp (loss of ignition)

4.1.1 Nitel (Kalitatif) analiz

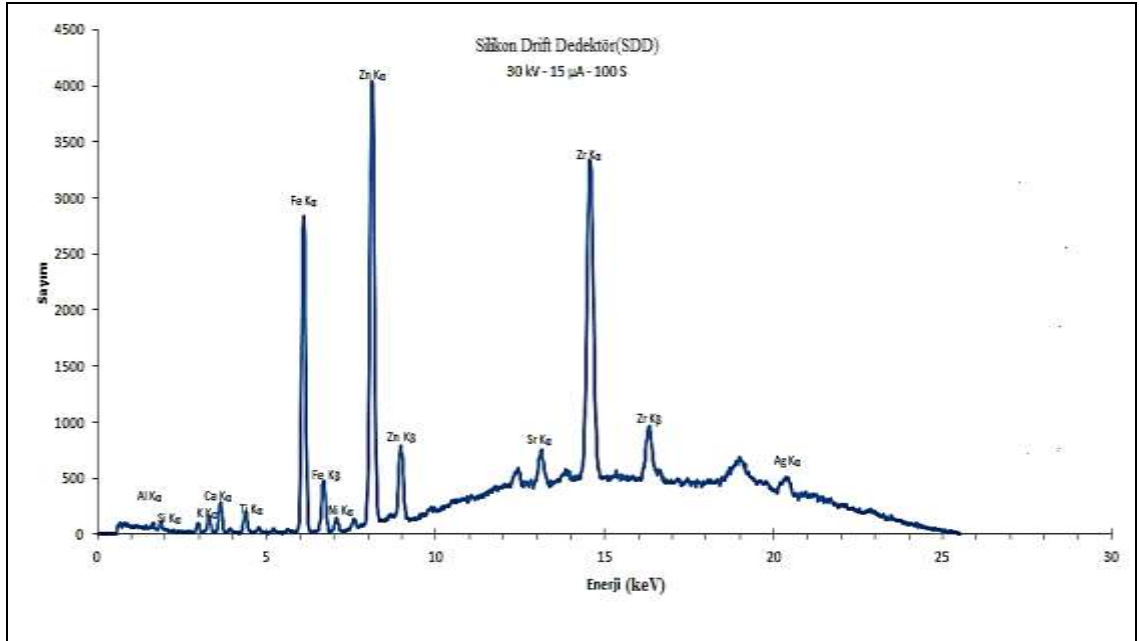
Nitel analiz genel olarak numune içindeki elementleri belirlemek için kullanılır. Herhangi bir spektral analiz yönteminde olduğu gibi, bir grup spektral çizgi bir elementi temsil eder. Bu tez çalışmasında elli bir örneğin analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da bazı örneklerin XRF analizinde gözlemlenen spektrumları verilmiştir.



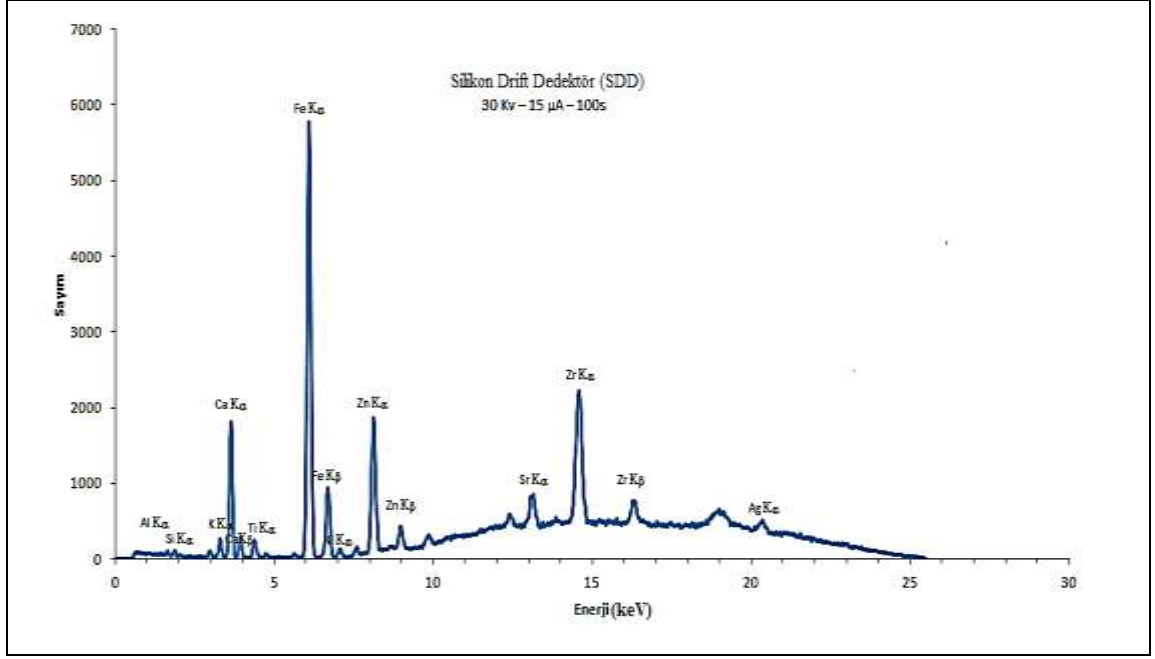
Şekil 4.2 E6 kodlu örneğin XRF spektrumu



Şekil 4.2 K1 kodlu örneğin XRF spektrumu



Şekil 4.3 E10 kodlu örneğin XRF spektrumu



Şekil 4.4 K2 kodlu örneğin XRF spektrumu

4.1.2 Nicel (Kantitatif) analiz

Kantitatif analiz, çalışılan numunedeki bir elementin yüzde olarak oranının belirlenmesi esasına dayanır. Enerji dağılımlı spektrometrelerde nicel olarak analiz yapılabilmektedir (Jenkins ve ark, 1981).

Bu çalışmada standartla karşılaştırma metodu ile analizler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de K kodlu numunelerin, Çizelge 4.5, Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de E kodlu numunelerin, Çizelge 4.8’de M kodlu numunelerin ve son olarak Çizelge 4,9’da Z kodlu numunelerin kimyasal bileşimleri belirlenmiş ve yüzde olarak miktarları hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3 K kodlu numunelerin XRF yöntemi ile belirlenmiş kimyasal bileşimleri

| Element | % Bileşim* | | | | | | | |
|--------------------------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | K1 % | K2 % | K3 % | K4 % | K5 % | K6 % | K7 % | K8 % |
| Al ₂ O ₃ | 14,426 | 4,2893 | 0,9118 | 12,087 | 18,586 | 13,6517 | 16,247 | 4,4278 |
| SiO ₂ | 76,099 | 86,001 | 92,897 | 85,683 | 77,821 | 81,5057 | 82,015 | 89,837 |
| K ₂ O | 1,5998 | 1,4705 | 2,4406 | 0,6880 | 1,0172 | 1,7231 | 0,4017 | 2,4200 |
| CaO | 5,2598 | 5,5775 | 0,5786 | 0,3844 | 0,4829 | 0,5605 | 0,6272 | 0,6995 |
| TiO ₂ | 0,6112 | 0,5492 | 1,0230 | 0,5987 | 1,0793 | 1,2371 | 0,3969 | 0,7934 |
| MnO | 0,0195 | 0,0218 | 0,0131 | 0,0079 | 0,0137 | 0,0362 | 0,0105 | 0,0210 |
| Fe ₂ O ₃ | 1,6630 | 1,7723 | 1,8195 | 0,4352 | 0,8232 | 1,0994 | 0,2243 | 1,4943 |
| Ni | 0,0106 | 0,0107 | 0,0225 | 0,0142 | 0,0163 | 0,0150 | 0,0275 | 0,0213 |
| Zn | 0,1665 | 0,1427 | 0,0132 | 0,0042 | 0,0028 | 0,0023 | 0,0073 | 0,0936 |
| Sr | 0,1440 | 0,1646 | 0,2810 | 0,0966 | 0,1578 | 0,1690 | 0,0426 | 0,1920 |

* Eksik olan madde miktarı 1'e normalize edilmiştir.

Çizelge 4.4 K kodlu numunelerin XRF yöntemi ile belirlenmiş kimyasal bileşimleri

| Element | % Bileşim* | | | | | | | |
|--------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | K9 % | K10 % | K11 % | K12 % | K13 % | K14 % | K15 % | K16 % |
| Al ₂ O ₃ | 23,799 | 1,5894 | 23,549 | 4,2857 | 16,285 | 8,7424 | 7,4336 | 10,767 |
| SiO ₂ | 73,769 | 89,940 | 67,139 | 87,478 | 76,807 | 88,706 | 87,040 | 85,733 |
| K ₂ O | 0,6547 | 2,3429 | 2,3348 | 2,1336 | 3,5012 | 0,6919 | 1,8986 | 0,5245 |
| CaO | 0,4263 | 0,4284 | 0,5417 | 0,6455 | 0,6008 | 0,4218 | 0,7261 | 0,3654 |
| TiO ₂ | 0,6947 | 1,0718 | 1,3083 | 3,1277 | 0,8418 | 0,7854 | 0,7830 | 0,8894 |
| MnO | 0,0067 | 0,0315 | 0,0294 | 0,0900 | 0,0100 | 0,0065 | 0,0136 | 0,0639 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,4841 | 4,3825 | 4,8657 | 1,8909 | 1,7988 | 0,5176 | 1,5757 | 1,5596 |
| Ni | 0,0150 | 0,0097 | 0,0118 | 0,0243 | 0,0119 | 0,0149 | 0,0186 | 0,0093 |
| Zn | 0,0040 | 0,0157 | 0,0133 | 0,1416 | 0,0490 | 0,0089 | 0,3417 | 0,0048 |
| Sr | 0,1463 | 0,1877 | 0,2073 | 0,1823 | 0,0943 | 0,1045 | 0,1689 | 0,0825 |

* Eksik olan madde miktarı 1'e normalize edilmiştir.

Çizelge 4.5 E kodlu numunelerin XRF yöntemi ile belirlenmiş kimyasal bileşimleri

| Element | % Bileşim* | | | | | | | |
|--------------------------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | E1 % | E2 % | E3 % | E4 % | E5 % | E6 % | E7 % | E8 % |
| Al ₂ O ₃ | 5,5679 | 8,1871 | 11,378 | 8,3314 | 6,3346 | 21,779 | 16,414 | 12,210 |
| SiO ₂ | 83,791 | 85,169 | 83,949 | 88,034 | 89,460 | 72,259 | 78,784 | 83,593 |
| K ₂ O | 1,4100 | 1,5236 | 1,2012 | 0,6089 | 0,7231 | 1,3806 | 1,0549 | 0,9605 |
| CaO | 6,2200 | 2,2505 | 1,1448 | 1,2568 | 1,6669 | 1,5275 | 1,1413 | 1,0659 |
| TiO ₂ | 0,9651 | 1,0453 | 0,6281 | 0,5462 | 0,4409 | 0,6589 | 0,6465 | 0,5733 |
| MnO | 0,0080 | 0,0360 | 0,0195 | 0,0380 | 0,0449 | 0,0236 | 0,0227 | 0,0132 |
| Fe ₂ O ₃ | 1,5214 | 1,4745 | 1,3634 | 0,6383 | 1,0204 | 1,2436 | 1,1496 | 0,9642 |
| Ni | 0,0126 | 0,0140 | 0,0159 | 0,0220 | 0,0091 | 0,0144 | 0,0184 | 0,0140 |
| Zn | 0,3593 | 0,0678 | 0,1092 | 0,0082 | 0,0113 | 0,7537 | 0,6439 | 0,4799 |
| Sr | 0,1447 | 0,2316 | 0,1906 | 0,5163 | 0,2889 | 0,1676 | 0,1252 | 0,1261 |

* Eksik olan madde miktarı 1'e normalize edilmiştir.

Çizelge 4.6 E kodlu numunelerin XRF yöntemi ile belirlenmiş kimyasal bileşimleri

| Element | % Bileşim* | | | | | | | |
|--------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | E9 % | E10 % | E11 % | E12 % | E13 % | E14 % | E15 % | E16 % |
| Al ₂ O ₃ | 8,4608 | 7,0696 | 9,0392 | 8,8650 | 9,7697 | 5,2599 | 13,063 | 17,731 |
| SiO ₂ | 85,697 | 88,999 | 84,894 | 80,976 | 83,685 | 91,640 | 84,357 | 76,931 |
| K ₂ O | 1,2600 | 1,0425 | 1,1756 | 1,8551 | 1,6610 | 0,5598 | 0,4427 | 1,2349 |
| CaO | 1,4166 | 0,9297 | 2,2068 | 6,0542 | 1,8270 | 1,4303 | 1,0688 | 1,3494 |
| TiO ₂ | 0,6461 | 0,5011 | 0,6431 | 0,6732 | 0,6213 | 0,4881 | 0,4341 | 0,6366 |
| MnO | 0,0305 | 0,0119 | 0,0532 | 0,0125 | 0,0412 | 0,0112 | 0,0110 | 0,0306 |
| Fe ₂ O ₃ | 1,2778 | 0,9393 | 1,5856 | 1,2625 | 1,3303 | 0,3496 | 0,2659 | 1,2889 |
| Ni | 0,0186 | 0,0116 | 0,0171 | 0,0125 | 0,0006 | 0,0224 | 0,0196 | 0,0190 |
| Zn | 1,0392 | 0,3824 | 0,0212 | 0,2157 | 0,8044 | 0,0035 | 0,0012 | 0,6154 |
| Sr | 0,1537 | 0,1134 | 0,3645 | 0,0730 | 0,2594 | 0,2348 | 0,3368 | 0,1632 |

* Eksik olan madde miktarı 1'e normalize edilmiştir.

Çizelge 4.7 E kodlu numunelerin XRF yöntemi ile belirlenmiş kimyasal bileşimleri

| Element | % Bileşim* | | | | | |
|--------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | E17 % | E18 % | E19 % | E20 % | E21 % | E22 % |
| Al ₂ O ₃ | 9,2730 | 8,2302 | 5,9044 | 6,2829 | 10,8170 | 2,3804 |
| SiO ₂ | 81,7528 | 80,4185 | 90,3481 | 90,5639 | 83,0790 | 92,1174 |
| K ₂ O | 1,3437 | 1,7128 | 0,8720 | 0,7647 | 1,6886 | 1,0814 |
| CaO | 5,6205 | 7,1041 | 1,2968 | 1,2831 | 2,2981 | 2,2608 |
| TiO ₂ | 0,5726 | 0,7656 | 0,5731 | 0,5244 | 0,6336 | 1,2223 |
| MnO | 0,0088 | 0,0103 | 0,0164 | 0,0185 | 0,0220 | 0,0198 |
| Fe ₂ O ₃ | 1,1781 | 1,4713 | 0,6122 | 0,3882 | 1,1802 | 0,6299 |
| Ni | 0,0135 | 0,0083 | 0,0149 | 0,0167 | 0,0158 | 0,0189 |
| Zn | 0,1831 | 0,2068 | 0,0053 | 0,0025 | 0,0971 | 0,0059 |
| Sr | 0,0539 | 0,0721 | 0,3568 | 0,1551 | 0,1686 | 0,2632 |

* Eksik olan madde miktarı 1'e normalize edilmiştir.

Çizelge 4.8 R kodlu numunelerin XRF yöntemi ile belirlenmiş Kimyasal Bileşimleri

| Element | % Bileşim* | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|
| | R1 % | R2 % | R3 % | R4 % | R5 % | R6 % | R7 % | R8 % | R9 % |
| Al ₂ O ₃ | 26,431 | 16,972 | 0,759 | 6,973 | 13,877 | 0,562 | 26,170 | 16,683 | 13,13 2 |
| SiO ₂ | 0,797 | - | 47,936 | 84,119 | 75,388 | - | - | - | - |
| K ₂ O | - | - | - | 5,139 | 1,688 | - | - | - | 0,510 |
| CaO | 72,619 | 81,877 | 44,235 | 0,913 | 2,831 | 96,33 | 72,573 | 81,688 | 85,34 |
| TiO ₂ | - | - | - | 0,406 | 0,745 | - | - | - | 0,065 |
| MnO | - | - | 0,190 | 0,048 | 0,112 | - | - | - | - |
| Fe ₂ O ₃ | 0,029 | 0,003 | 6,510 | 2,283 | 4,784 | 0,055 | 0,0025 | 0,0023 | 0,293 |
| Ni | 0,012 | 0,025 | 0,238 | 0,010 | 0,019 | 0,022 | 0,0083 | 0,0087 | 0,014 |
| Zn | - | 0,006 | 0,003 | 0,007 | 0,008 | 0,006 | 0,0022 | 0,0024 | 0,008 |
| Sr | 0,111 | 0,146 | 0,129 | 0,102 | 0,548 | 0,155 | 0,0513 | 0,1072 | 0,640 |

* Eksik olan madde miktarı 1'e normalize edilmiştir.

Çizelge 4.9 Z kodlu numunelerin XRF ile belirlenmiş kimyasal bileşimleri

| Element | % Bileşim* | | | |
|--------------------------------|------------|---------|---------|---------|
| | Z1 % | Z2 % | Z3 % | Z4 % |
| Al ₂ O ₃ | 8,035 | 8,174 | 6,773 | 7,282 |
| SiO ₂ | 91,718 | 91,700 | 93,044 | 92,494 |
| K ₂ O | - | - | - | - |
| CaO | - | - | - | - |
| TiO ₂ | 0,217 | 0,108 | 0,145 | 0,197 |
| MnO | - | - | - | - |
| Fe ₂ O ₃ | 0,041 | 0,037 | 0,046 | 0,037 |
| Ni | 0,071 | 0,055 | 0,084 | 0,064 |
| Zn | - | - | - | - |
| Sr | - | - | - | - |

* Eksik olan madde miktarı 1'e normalize edilmiştir.

4.2 Gama-ışını Öz Soğurma Düzeltme Faktörleri

4.2.2 Hesaplanan gama-ışını öz soğurma düzeltme faktörleri

Kimyasal bileşimi bilinen standart kaynaklar ve örnekler için ilgilenilen enerjideki öz soğurma düzeltme faktörleri, ŞBS geometrisinde Bölüm 3.1.2.4.1'de anlatıldığı gibi hesaplanmıştır. Belirli enerjilerde hesaplanan öz soğurma düzeltme faktörleri ŞBS geometrisindeki numuneler için Çizelge 4.10, Çizelge 4.11, Çizelge 4.12, Çizelge 4.13, çizelge 4.14, çizelge 4.15 ve çizelge 4.16'da belirtilmiştir.

Çizelge 4.10 ŞBS geometrisinde K numuneleri için hesaplanan (K_o^h) öz soğurma düzeltme faktörleri

| Enerji | K1 K_o^h | K2 K_o^h | K3 K_o^h | K4 K_o^h | K5 K_o^h | K6 K_o^h | K7 K_o^h | K8 K_o^h |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 63,30 | 1,57 | 1,58 | 1,53 | 1,72 | 1,64 | 1,72 | 1,70 | 1,72 |
| 186,21 | 1,28 | 1,29 | 1,26 | 1,38 | 1,34 | 1,37 | 1,37 | 1,36 |
| 338,32 | 1,22 | 1,22 | 1,21 | 1,30 | 1,27 | 1,28 | 1,29 | 1,28 |
| 351,93 | 1,22 | 1,22 | 1,21 | 1,30 | 1,27 | 1,28 | 1,29 | 1,28 |
| 609,31 | 1,17 | 1,18 | 1,16 | 1,23 | 1,21 | 1,22 | 1,23 | 1,22 |
| 911,20 | 1,14 | 1,15 | 1,13 | 1,19 | 1,17 | 1,18 | 1,19 | 1,18 |
| 1001,03 | 1,13 | 1,14 | 1,13 | 1,18 | 1,17 | 1,18 | 1,18 | 1,17 |
| 1460,82 | 1,11 | 1,11 | 1,10 | 1,15 | 1,14 | 1,14 | 1,15 | 1,14 |

Çizelge 4.11 ŞBS geometrisinde K kodlu numuneleri için hesaplanan (K_o^h) öz soğurma düzeltme faktörleri

| Enerji | K9 K_o^h | K10 K_o^h | K11 K_o^h | K12 K_o^h | K13 K_o^h | K14 K_o^h | K15 K_o^h | K16 K_o^h |
|---------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 63,30 | 1,45 | 1,81 | 1,59 | 1,51 | 1,68 | 1,59 | 1,68 | 1,72 |
| 186,21 | 1,25 | 1,38 | 1,28 | 1,25 | 1,34 | 1,32 | 1,34 | 1,37 |
| 338,32 | 1,19 | 1,30 | 1,22 | 1,20 | 1,27 | 1,25 | 1,27 | 1,29 |
| 351,93 | 1,19 | 1,29 | 1,22 | 1,19 | 1,27 | 1,25 | 1,26 | 1,29 |
| 609,31 | 1,15 | 1,23 | 1,17 | 1,15 | 1,21 | 1,19 | 1,21 | 1,23 |
| 911,20 | 1,13 | 1,19 | 1,14 | 1,13 | 1,17 | 1,16 | 1,17 | 1,19 |
| 1001,03 | 1,12 | 1,18 | 1,13 | 1,12 | 1,16 | 1,15 | 1,16 | 1,18 |
| 1460,82 | 1,10 | 1,15 | 1,11 | 1,10 | 1,13 | 1,12 | 1,13 | 1,15 |

Çizelge 4.12 ŞBS geometrisinde E kodlu numuneleri için hesaplanan (K_o^h) öz soğurm düzeltme faktörleri

| Enerji | E1 K_o^h | E2 K_o^h | E3 K_o^h | E4 K_o^h | E5 K_o^h | E6 K_o^h | E7 K_o^h | E8 K_o^h | E9 K_o^h |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 63,30 | 1,64 | 1,73 | 1,78 | 1,86 | 1,85 | 1,65 | 1,72 | 1,81 | 1,71 |
| 186,21 | 1,30 | 1,36 | 1,39 | 1,45 | 1,43 | 1,32 | 1,36 | 1,41 | 1,34 |
| 338,32 | 1,24 | 1,28 | 1,31 | 1,35 | 1,34 | 1,25 | 1,28 | 1,32 | 1,27 |
| 351,93 | 1,24 | 1,28 | 1,30 | 1,35 | 1,33 | 1,25 | 1,28 | 1,31 | 1,27 |
| 609,31 | 1,19 | 1,22 | 1,24 | 1,27 | 1,26 | 1,20 | 1,22 | 1,25 | 1,21 |
| 911,20 | 1,15 | 1,18 | 1,20 | 1,22 | 1,21 | 1,16 | 1,18 | 1,20 | 1,17 |
| 1001,03 | 1,15 | 1,17 | 1,19 | 1,21 | 1,20 | 1,15 | 1,17 | 1,19 | 1,16 |
| 1460,82 | 1,12 | 1,14 | 1,15 | 1,17 | 1,17 | 1,13 | 1,14 | 1,16 | 1,13 |

Çizelge 4.13 ŞBS geometrisinde E kodlu numuneleri için hesaplanan (K_o^h) öz soğurma düzeltme faktörleri

| Enerji | E10 K_o^h | E11 K_o^h | E12 K_o^h | E13 K_o^h | E14 K_o^h | E15 K_o^h | E16 K_o^h |
|---------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 63,30 | 1,79 | 1,84 | 1,64 | 1,66 | 1,77 | 1,68 | 1,70 |
| 186,21 | 1,40 | 1,41 | 1,31 | 1,32 | 1,40 | 1,36 | 1,35 |
| 338,32 | 1,32 | 1,32 | 1,25 | 1,25 | 1,32 | 1,28 | 1,27 |
| 351,93 | 1,31 | 1,32 | 1,24 | 1,25 | 1,31 | 1,28 | 1,27 |
| 609,31 | 1,24 | 1,25 | 1,19 | 1,19 | 1,24 | 1,22 | 1,21 |
| 911,20 | 1,20 | 1,20 | 1,16 | 1,16 | 1,20 | 1,18 | 1,17 |
| 1001,03 | 1,19 | 1,19 | 1,15 | 1,15 | 1,19 | 1,17 | 1,17 |
| 1460,82 | 1,16 | 1,16 | 1,12 | 1,12 | 1,16 | 1,14 | 1,14 |

Çizelge 4.2 ŞBS geometrisinde E kodlu numuneleri için hesaplanan (K_o^h) öz soğurma düzeltme faktörleri

| Enerji | E17 K_o^h | E18 K_o^h | E19 K_o^h | E20 K_o^h | E21 K_o^h | E22 K_o^h |
|---------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 63,30 | 1,61 | 1,60 | 1,74 | 1,71 | 1,79 | 1,76 |
| 186,21 | 1,30 | 1,29 | 1,37 | 1,37 | 1,39 | 1,38 |
| 338,32 | 1,24 | 1,23 | 1,29 | 1,29 | 1,31 | 1,30 |
| 351,93 | 1,24 | 1,23 | 1,29 | 1,29 | 1,30 | 1,30 |
| 609,31 | 1,19 | 1,18 | 1,23 | 1,23 | 1,24 | 1,23 |
| 911,20 | 1,15 | 1,15 | 1,19 | 1,19 | 1,20 | 1,19 |
| 1001,03 | 1,15 | 1,14 | 1,18 | 1,18 | 1,19 | 1,18 |
| 1460,82 | 1,12 | 1,12 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 |

Çizelge 4.15 ŞBS geometrisinde R kodlu numuneleri için hesaplanan (K_o^h) öz soğurma düzeltme faktörleri

| Enerji | R1 K_o^h | R2 K_o^h | R3 K_o^h | R4 K_o^h | R5 K_o^h | R6 K_o^h | R7 K_o^h | R8 K_o^h | R9 K_o^h |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 63,30 | 2,55 | 2,84 | 1,77 | 1,64 | 1,78 | 2,48 | 2,13 | 2,39 | 2,30 |
| 186,21 | 1,46 | 1,51 | 1,41 | 1,31 | 1,35 | 1,42 | 1,35 | 1,40 | 1,35 |
| 338,32 | 1,35 | 1,39 | 1,33 | 1,25 | 1,27 | 1,32 | 1,27 | 1,30 | 1,27 |
| 351,93 | 1,35 | 1,38 | 1,33 | 1,24 | 1,27 | 1,32 | 1,26 | 1,30 | 1,26 |
| 609,31 | 1,27 | 1,30 | 1,26 | 1,19 | 1,21 | 1,25 | 1,21 | 1,23 | 1,21 |
| 911,20 | 1,22 | 1,24 | 1,21 | 1,16 | 1,17 | 1,20 | 1,17 | 1,19 | 1,17 |
| 1001,03 | 1,21 | 1,23 | 1,20 | 1,15 | 1,16 | 1,19 | 1,16 | 1,18 | 1,16 |
| 1460,82 | 1,17 | 1,19 | 1,16 | 1,12 | 1,13 | 1,16 | 1,13 | 1,15 | 1,13 |

Çizelge 4.3 ŞBS geometrisinde Z kodlu numuneleri için hesaplanan (K_o^h) öz soğurma düzeltme faktörleri

| Enerji | Z1 K_o^h | Z2 K_o^h | Z3 K_o^h | Z4 K_o^h |
|---------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 63,30 | 1,49 | 1,60 | 1,57 | 1,67 |
| 186,21 | 1,28 | 1,33 | 1,31 | 1,37 |
| 338,32 | 1,22 | 1,26 | 1,25 | 1,29 |
| 351,93 | 1,22 | 1,26 | 1,25 | 1,29 |
| 609,31 | 1,17 | 1,20 | 1,19 | 1,23 |
| 911,20 | 1,14 | 1,17 | 1,16 | 1,19 |
| 1001,03 | 1,13 | 1,16 | 1,15 | 1,18 |
| 1460,82 | 1,11 | 1,13 | 1,12 | 1,14 |

4.3 Verim Kalibrasyon Eğrisi

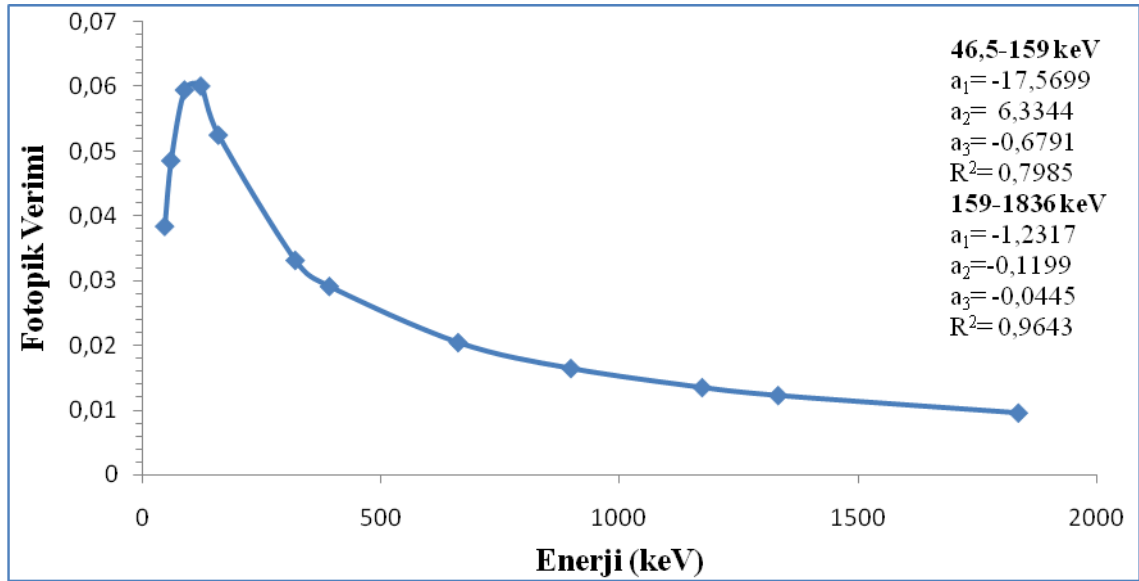
Silindirik numune geometrisinde dedektörüm verim kalibrasyon eğrisi Bölüm 3.1.2.4.2’de anlatıldığı gibi mutlak verim kalibrasyonu (absolute efficiency) yöntemi ile elde edilmiştir.

4.3.2 Mutlak verim kalibrasyon eğrisi

Dedektörün mutlak verim kalibrasyonu ŞBS geometrisinde EGML 1389- 37-7 çoklu radyonüklit standart kaynağı ile yapılmıştır. Çizelge 4. öz soğurma düzeltme faktörü uygulanarak elde edilen verim değerleri belirtilmiştir. Şekil 4.17’de ŞBS geometrisinde EGML 1389-37-7 çoklu radyonüklit standardı ile öz soğurma düzeltmesi uygulanarak elde edilen verim kalibrasyonu eğrisi gösterilmiştir.

Çizelge 4.17 ŞBS geometrisinde EGML 1389-37-7 çoklu radyonüklit standardı ile öz soğurma düzeltmesi uygulanarak elde edilen verim değerleri

| Nüklit | E (keV) | $f_\gamma \pm u (f_\gamma) (\%)$ | Fotopik verimi($\% \epsilon_d \pm u(\epsilon_d)$) |
|---------|----------|----------------------------------|---|
| Pb-210 | 46,539 | $4,060 \pm 0,08$ | $0,04 \pm 0,003$ |
| Am-241 | 59,537 | $35,920 \pm 0,17$ | $0,05 \pm 0,002$ |
| Cd-109 | 88,0341 | $3,650 \pm 0,06$ | $0,06 \pm 0,003$ |
| Co-57 | 122,06 | $85,680 \pm 0,13$ | $0,06 \pm 0,003$ |
| Te-123m | 159 | $83,990 \pm 0,095$ | $0,05 \pm 0,002$ |
| Cr-51 | 320,0842 | $9,870 \pm 0,05$ | $0,03 \pm 0,002$ |
| Sn-113 | 391,688 | $64,890 \pm 0,17$ | $0,03 \pm 0,001$ |
| Cs-137 | 661,66 | $85,200 \pm 0,20$ | $0,02 \pm 0,001$ |
| Y-88 | 898,042 | $94,100 \pm 0,50$ | $0,02 \pm 0,001$ |
| Co-60 | 1173,237 | $99,89 \pm 0,02$ | $0,01 \pm 0,001$ |
| Co-60 | 1332,5 | $99,983 \pm 0,02$ | $0,01 \pm 0,001$ |
| Y-88 | 1836,063 | $99,360 \pm 0,05$ | $0,01 \pm 0,0003$ |



Şekil 4.5 ŞBS geometrisinde EGML 1389-37-7 çoklu radyonüklit standardı ile öz soğurma düzeltmesi uygulanarak elde edilen verim kalibrasyonu eğrisi

4.4 Kaplama Malzemelerinin Aktivite Ölçümü

Silindirik numune geometrisinde hazırlanan örneklerin EGML çoklu radyonüklit standardı kullanılarak öz soğurma düzeltmesi uygulanmadan doğrudan aktivite ölçüm yöntemi ile ölçülen aktivite değerleri ile EGML çoklu radyonüklit standardı kullanılarak

hesaplanan öz soğurma düzeltme faktörü uygulanarak doğrudan aktivite ölçüm yöntemi ile ölçülen aktivite değerleri aşağıdaki çizelgelerde gama derişim indisi ile beraber verilmiştir.

Çizelge 4.18 Silindirik numune geometrisinde K kodlu seramik numunelerin öz soğurma düzeltme faktörü uygulanmadan ve uygulanarak elde edilen aktivite değerleri

| Numune Kodu | Numune Tipi | Özgül Aktivite* | | | | Gama Derişim İndisi I | Özgül Aktivite** | | | | Gama Derişim İndisi I |
|-------------|-------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| | | ²²⁶ Ra (Bq/kg) | ²³² Th (Bq/kg) | ⁴⁰ K (Bq/kg) | ²³⁸ U (Bq/kg) | | ²²⁶ Ra (Bq/kg) | ²³² Th (Bq/kg) | ⁴⁰ K (Bq/kg) | ²³⁸ U (Bq/kg) | |
| K1 | Porselen | 98 ± 5 | 80 ± 5 | 489 ± 23 | 88 ± 13 | 0,45 ± 0,02 | 121 ± 6 | 94 ± 5 | 543 ± 25 | 115 ± 17 | 0,54 ± 0,03 |
| K2 | Karo | 71 ± 4 | 76 ± 5 | 433 ± 21 | 64 ± 22 | 0,38 ± 0,02 | 87 ± 5 | 90 ± 6 | 481 ± 23 | 86 ± 29 | 0,45 ± 0,03 |
| K3 | Porselen | 64 ± 3 | 76 ± 4 | 522 ± 24 | 41 ± 14 | 0,38 ± 0,02 | 77 ± 4 | 89 ± 5 | 576 ± 27 | 55 ± 19 | 0,45 ± 0,02 |
| K4 | Karo | 42 ± 2 | 70 ± 4 | 197 ± 10 | 21 ± 8 | 0,27 ± 0,01 | 55 ± 3 | 87 ± 5 | 226 ± 11 | 30 ± 11 | 0,34 ± 0,02 |
| K5 | Karo | 46 ± 2 | 59 ± 3 | 253 ± 12 | 43 ± 9 | 0,27 ± 0,01 | 59 ± 3 | 72 ± 4 | 287 ± 14 | 58 ± 12 | 0,33 ± 0,02 |
| K6 | Karo | 71 ± 3 | 93 ± 5 | 524 ± 24 | 67 ± 10 | 0,43 ± 0,02 | 92 ± 4 | 115 ± 7 | 598 ± 28 | 87 ± 13 | 0,54 ± 0,03 |
| K7 | Porselen | 342 ± 16 | 117 ± 6 | 144 ± 7 | 254 ± 18 | 0,98 ± 0,05 | 445 ± 20 | 146 ± 7 | 164 ± 8 | 339 ± 24 | 1,23 ± 0,06 |
| K8 | Karo | 76 ± 4 | 83 ± 5 | 610 ± 29 | 52 ± 14 | 0,43 ± 0,02 | 97 ± 5 | 102 ± 6 | 695 ± 33 | 74 ± 20 | 0,53 ± 0,03 |
| K9 | Karo | 37 ± 2 | 66 ± 4 | 173 ± 9 | 40 ± 11 | 0,25 ± 0,01 | 45 ± 3 | 76 ± 4 | 189 ± 10 | 48 ± 14 | 0,29 ± 0,02 |
| K10 | Karo | 80 ± 4 | 112 ± 6 | 659 ± 31 | 98 ± 14 | 0,51 ± 0,03 | 104 ± 5 | 139 ± 8 | 754 ± 35 | 138 ± 20 | 0,64 ± 0,03 |
| K11 | Karo | 72 ± 4 | 99 ± 6 | 600 ± 28 | 84 ± 13 | 0,46 ± 0,02 | 88 ± 4 | 117 ± 7 | 665 ± 31 | 110 ± 17 | 0,54 ± 0,03 |
| K12 | Karo | 75 ± 4 | 87 ± 6 | 497 ± 24 | 147 ± 41 | 0,42 ± 0,02 | 90 ± 5 | 102 ± 7 | 546 ± 27 | 193 ± 53 | 0,49 ± 0,03 |
| K13 | Porselen | 156 ± 7 | 110 ± 6 | 868 ± 40 | 136 ± 14 | 0,70 ± 0,03 | 199 ± 9 | 135 ± 8 | 983 ± 45 | 193 ± 19 | 0,85 ± 0,04 |
| K14 | Porselen | 41 ± 2 | 68 ± 4 | 136 ± 7 | 60 ± 15 | 0,26 ± 0,01 | 51 ± 3 | 82 ± 5 | 152 ± 7 | 79 ± 20 | 0,31 ± 0,02 |
| K15 | Porselen | 81 ± 4 | 80 ± 5 | 556 ± 26 | 68 ± 12 | 0,43 ± 0,02 | 103 ± 5 | 97 ± 6 | 629 ± 30 | 92 ± 16 | 0,52 ± 0,03 |
| K16 | Porselen | 34 ± 2 | 65 ± 4 | 131 ± 7 | 28 ± 12 | 0,24 ± 0,01 | 44 ± 3 | 81 ± 5 | 150 ± 8 | 42 ± 17 | 0,30 ± 0,02 |

Minimum Detectable Activity (MDA) : <2 Bq/kg ²²⁶Ra, <3 Bq/kg ²³²Th, <7 Bq/kg ⁴⁰K, <1 Bq/kg ²³⁸U

* Öz soğurma düzeltme faktörü uygulanmadan elde edilen özgül aktivite

** Öz soğurma düzeltme faktörü uygulanarak elde edilen özgül aktivite

Çizelge 4.19 Silindirik numune geometrisinde E kodlu seramik numunelerin öz soğurma düzeltme faktörü uygulanmadan ve uygulanarak elde edilen aktivite değerleri

| Numune Kodu | Numune Tipi | Özgül Aktivite* | | | | Gama Derişim İndisi I | Özgül Aktivite** | | | | Gama Derişim İndisi I |
|-------------|-------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| | | ²²⁶ Ra (Bq/kg) | ²³² Th (Bq/kg) | ⁴⁰ K (Bq/kg) | ²³⁸ U (Bq/kg) | | ²²⁶ Ra (Bq/kg) | ²³² Th (Bq/kg) | ⁴⁰ K (Bq/kg) | ²³⁸ U (Bq/kg) | |
| E1 | Karo | 63 ± 3 | 52 ± 3 | 360 ± 17 | 50 ± 12 | 0,29 ± 0,02 | 78 ± 4 | 62 ± 4 | 402 ± 19 | 67 ± 16 | 0,36 ± 0,02 |
| E2 | Karo | 60 ± 3 | 45 ± 3 | 459 ± 22 | 59 ± 12 | 0,32 ± 0,02 | 77 ± 4 | 56 ± 4 | 523 ± 25 | 79 ± 16 | 0,36 ± 0,02 |
| E3 | Karo | 59 ± 3 | 45 ± 3 | 349 ± 16 | 54 ± 10 | 0,27 ± 0,01 | 77 ± 4 | 56 ± 3 | 402 ± 19 | 75 ± 14 | 0,34 ± 0,02 |
| E4 | Karo | 115 ± 6 | 48 ± 3 | 148 ± 7 | 101 ± 13 | 0,36 ± 0,02 | 157 ± 8 | 62 ± 3 | 173 ± 9 | 145 ± 19 | 0,48 ± 0,02 |
| E5 | Karo | 48 ± 2 | 38 ± 2 | 214 ± 10 | 23 ± 6 | 0,22 ± 0,01 | 64 ± 3 | 49 ± 3 | 249 ± 12 | 34 ± 8 | 0,28 ± 0,01 |
| E6 | Karo | 49 ± 3 | 49 ± 3 | 328 ± 16 | 71 ± 19 | 0,26 ± 0,01 | 61 ± 4 | 59 ± 4 | 369 ± 18 | 87 ± 23 | 0,31 ± 0,02 |
| E7 | Karo | 55 ± 3 | 50 ± 3 | 241 ± 12 | 56 ± 15 | 0,26 ± 0,02 | 71 ± 4 | 61 ± 4 | 275 ± 13 | 77 ± 20 | 0,32 ± 0,02 |
| E8 | Karo | 57 ± 3 | 45 ± 3 | 344 ± 17 | 66 ± 14 | 0,27 ± 0,02 | 76 ± 4 | 57 ± 4 | 398 ± 19 | 87 ± 19 | 0,34 ± 0,02 |
| E9 | Karo | 53 ± 3 | 44 ± 3 | 303 ± 14 | 59 ± 12 | 0,25 ± 0,01 | 68 ± 4 | 53 ± 3 | 344 ± 16 | 79 ± 16 | 0,31 ± 0,02 |
| E10 | Karo | 44 ± 3 | 42 ± 3 | 355 ± 17 | 29 ± 17 | 0,24 ± 0,01 | 58 ± 4 | 53 ± 3 | 410 ± 19 | 47 ± 27 | 0,30 ± 0,02 |
| E11 | Karo | 55 ± 3 | 44 ± 2 | 181 ± 8 | 64 ± 16 | 0,24 ± 0,01 | 73 ± 4 | 55 ± 3 | 210 ± 10 | 103 ± 26 | 0,30 ± 0,02 |
| E12 | Karo | 73 ± 4 | 57 ± 4 | 484 ± 23 | 38 ± 11 | 0,35 ± 0,02 | 91 ± 5 | 68 ± 4 | 543 ± 26 | 52 ± 15 | 0,42 ± 0,02 |
| E13 | Karo | 46 ± 3 | 47 ± 3 | 350 ± 17 | - | 0,25 ± 0,01 | 57 ± 3 | 57 ± 4 | 393 ± 19 | - | 0,30 ± 0,02 |
| E14 | Karo | 275 ± 13 | 77 ± 4 | 157 ± 8 | 235 ± 18 | 0,74 ± 0,04 | 364 ± 17 | 97 ± 5 | 180 ± 9 | 321 ± 24 | 0,96 ± 0,05 |
| E15 | Karo | 215 ± 10 | 64 ± 4 | 159 ± 8 | 167 ± 21 | 0,59 ± 0,03 | 277 ± 13 | 79 ± 5 | 181 ± 9 | 224 ± 28 | 0,75 ± 0,04 |
| E16 | Karo | 49 ± 2 | 47 ± 3 | 338 ± 16 | 48 ± 7 | 0,26 ± 0,01 | 63 ± 3 | 58 ± 3 | 383 ± 18 | 65 ± 9 | 0,32 ± 0,02 |
| E17 | Karo | 75 ± 4 | 58 ± 3 | 457 ± 21 | 73 ± 12 | 0,35 ± 0,02 | 94 ± 5 | 69 ± 4 | 511 ± 23 | 97 ± 16 | 0,42 ± 0,02 |
| E18 | Karo | 75 ± 4 | 60 ± 4 | 472 ± 23 | 63 ± 20 | 0,36 ± 0,02 | 92 ± 5 | 71 ± 5 | 526 ± 25 | 85 ± 28 | 0,43 ± 0,02 |
| E19 | Karo | 49 ± 2 | 57 ± 3 | 297 ± 14 | 90 ± 15 | 0,27 ± 0,01 | 65 ± 3 | 71 ± 4 | 339 ± 16 | 121 ± 20 | 0,34 ± 0,02 |
| E20 | Karo | 117 ± 5 | 74 ± 4 | 217 ± 10 | 111 ± 12 | 0,43 ± 0,02 | 151 ± 7 | 92 ± 5 | 248 ± 12 | 155 ± 16 | 0,55 ± 0,03 |
| E21 | Karo | 59 ± 3 | 44 ± 3 | 480 ± 22 | 50 ± 16 | 0,29 ± 0,02 | 78 ± 4 | 56 ± 3 | 554 ± 26 | 73 ± 23 | 0,37 ± 0,02 |
| E22 | Karo | 44 ± 2 | 59 ± 3 | 189 ± 9 | 45 ± 10 | 0,25 ± 0,01 | 58 ± 3 | 74 ± 4 | 217 ± 10 | 64 ± 15 | 0,32 ± 0,02 |

Minimum Detectable Activity (MDA) : <2 Bq/kg ²²⁶Ra, <3 Bq/kg ²³²Th, <7 Bq/kg ⁴⁰K, <1 Bq/kg ²³⁸U

* Öz soğurma düzeltme faktörü uygulanmadan elde edilen özgül aktivite

** Öz soğurma düzeltme faktörü uygulanarak elde edilen özgül aktivite

Çizelge 4.20 Silindirik numune geometrisinde R kodlu mermer numunelerin öz soğurma düzeltme faktörü uygulanmadan ve uygulanarak elde edilen aktivite değerleri

| Numune Kodu | Numune Tipi | Özgül Aktivite* | | | | Gama Derişim İndisi I | Özgül Aktivite** | | | | Gama Derişim İndisi I |
|-------------|-------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| | | ²²⁶ Ra (Bq/kg) | ²³² Th (Bq/kg) | ⁴⁰ K (Bq/kg) | ²³⁸ U (Bq/kg) | | ²²⁶ Ra (Bq/kg) | ²³² Th (Bq/kg) | ⁴⁰ K (Bq/kg) | ²³⁸ U (Bq/kg) | |
| R1 | Mermer | 21 ± 2 | <MDA | <MDA | 10 ± 10 | - | 28 ± 3 | <MDA | <MDA | 17 ± 17 | - |
| R2 | Mermer | 49 ± 2 | <MDA | <MDA | 25 ± 6 | - | 54 ± 3 | <MDA | <MDA | 44 ± 10 | - |
| R3 | Mermer | <MDA | <MDA | <MDA | <MDA | - | <MDA | <MDA | <MDA | <MDA | - |
| R4 | Mermer | 71 ± 4 | 252 ± 14 | 1388 ± 64 | 70 ± 11 | 0,93 ± 0,05 | 90 ± 4 | 303 ± 17 | 1557 ± 71 | 93 ± 14 | 1,11 ± 0,06 |
| R5 | Mermer | 23 ± 3 | 38 ± 5 | 382 ± 35 | 19 ± 14 | 0,19 ± 0,02 | 29 ± 2 | 47 ± 3 | 433 ± 20 | 27 ± 10 | 0,23 ± 0,01 |
| R6 | Mermer | 16 ± 1 | <MDA | <MDA | 6 ± 2 | - | 21 ± 1 | - | <MDA | 9 ± 2 | - |
| R7 | Mermer | 12 ± 1 | <MDA | <MDA | 15 ± 11 | - | 15 ± 1 | <MDA | <MDA | 16 ± 12 | - |
| R8 | Mermer | 3 ± 2 | <MDA | <MDA | <MDA | - | 4 ± 2 | <MDA | <MDA | <MDA | - |
| R9 | Mermer | 31 ± 3 | <MDA | 52 ± 3 | 28 ± 8 | 0,07 ± 0,03 | 40 ± 2 | <MDA | 59 ± 4 | 38 ± 10 | 0,09 ± 0,02 |

Minimum Detectable Activity (MDA) : <2 Bq/kg ²²⁶Ra, <3 Bq/kg ²³²Th, <7 Bq/kg ⁴⁰K, <1 Bq/kg ²³⁸U

* Öz soğurma düzeltme faktörü uygulanmadan elde edilen özgül aktivite

** Öz soğurma düzeltme faktörü uygulanarak elde edilen özgül aktivite

Çizelge 4.21 Silindirik numune geometrisinde Z kodlu seramik numunelerin öz soğurma düzeltme faktörü uygulanmadan ve uygulanarak elde edilen aktivite değerleri

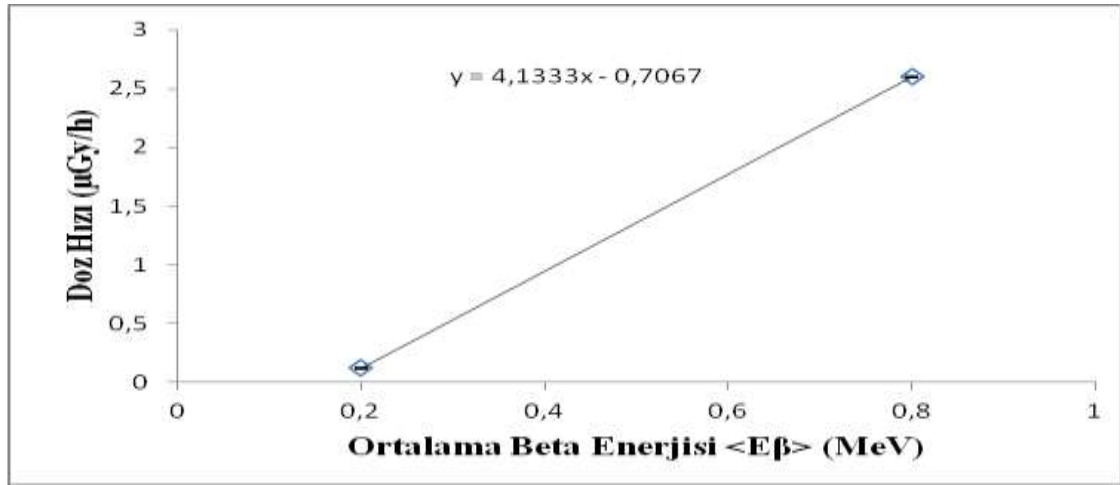
| Numune Kodu | Numune Tipi | Özgül Aktivite* | | | | Gama Derişim İndisi I | Özgül Aktivite** | | | | Gama Derişim İndisi I |
|-------------|-------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| | | ²²⁶ Ra (Bq/kg) | ²³² Th (Bq/kg) | ⁴⁰ K (Bq/kg) | ²³⁸ U (Bq/kg) | | ²²⁶ Ra (Bq/kg) | ²³² Th (Bq/kg) | ⁴⁰ K (Bq/kg) | ²³⁸ U (Bq/kg) | |
| Z1 | Zirkon | 2425±108 | 622±35 | 36±4 | 1562±80 | 6,18±0,50 | 2963±132 | 734±41 | 40±5 | 1858±95 | 7,50±0,61 |
| Z2 | Zirkon | 3012±134 | 607±34 | 35±6 | 2013±108 | 7,30±0,78 | 3812±170 | 738± 41 | 39±7 | 2451±131 | 9,17±0,98 |
| Z3 | Zirkon | 1802±55 | 252±10 | 25±4 | 1510±53 | 4,1±0,53 | 2050±69 | 305±12 | 29±4 | 1738±61 | 4,7±0,47 |
| Z4 | Zirkon | 2228±69 | 447±18 | 41±6 | 1851±75 | 5,4±0,49 | 2537±86 | 541±21 | 47±6 | 2133±87 | 6,2±0,44 |

* Öz soğurma düzeltme faktörü uygulanmadan elde edilen özgül aktivite

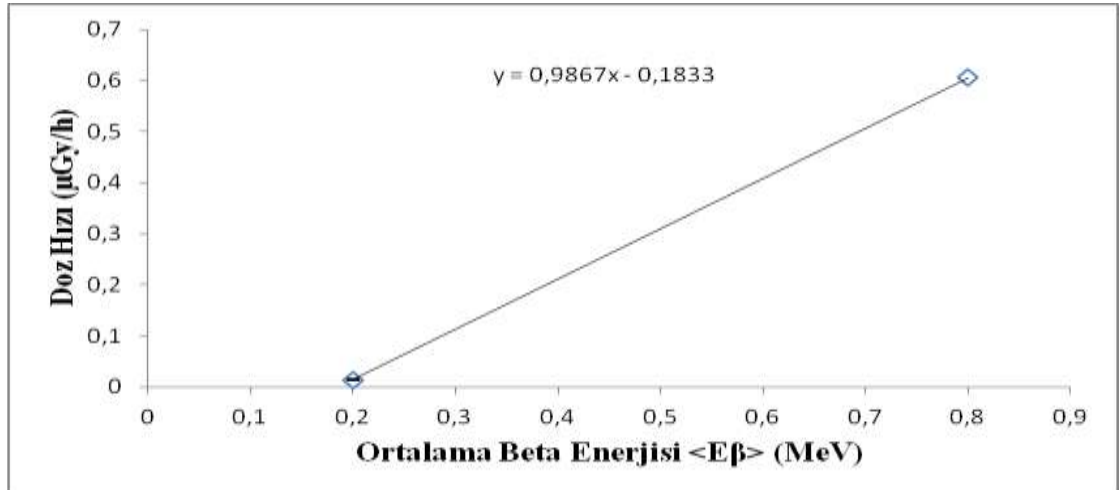
** Öz soğurma düzeltme faktörü uygulanarak elde edilen özgül aktivite

4.5 Yüzey Beta Dozu Ölçümü

Seramik karo numunelerinde yüzey beta dozu hesaplanması için ^{204}Tl ve ^{90}Sr kaynakları kullanılarak kalibrasyon sabitleri bulunmuş ve ZnS;Ag sintilatör dedektörü için kalibrasyon sabiti eğrisi Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Ayrıca iyon odası ölçümlerinde de yine ^{204}Tl ve ^{90}Sr kaynakları için kalibrasyon sabiti eğrisi Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



Şekil 4.7 ZnS;Ag Sintilatör dedektörü için ^{204}Tl ve ^{90}Sr kaynakları kullanılarak elde edilen kalibrasyon eğrisi



Şekil 4.8 İyon odası dedektörü için ^{204}Tl ve ^{90}Sr kaynakları kullanılarak elde edilen kalibrasyon eğrisi

Yapı malzemelerinde kaynaklanan yıllık doğal radyasyon dozuna ilave olarak beta parçacığından kaynaklanan radyasyon dozu için sintilatör dedektörü ve iyon odası ile ölçümler yapılmış olup ev, iş yeri, okul, alışveriş merkezleri vb. binalarda günde ortalama dört saat seramik ve mermer vb kaplama malzemelerine temas halinde bireyin yıllık ilave olarak aldığı beta dozu çizelge 4.25 te belirtilmiştir.

Çizelge 4.22 Seramik karolarda yüzey beta doz hızı ölçümleri

| Numune | Sintilatör Dedektör¹ μSv/h[*] | İyon Odası² μSv/h | Uyum (%) |
|---------------|--|---|-----------------|
| B1 | 0,182±0,005 | 0,251±0,110 | 27,51 |
| B2 | 0,181±0,010 | 0,230±0,111 | 21,50 |
| B3 | 0,182±0,006 | 0,235±0,100 | 22,71 |
| B4 | 0,180±0,010 | 0,225±0,090 | 20,17 |
| B5 | 0,185±0,010 | 0,195±0,116 | 4,99 |
| B6 | 0,187±0,005 | 0,210±0,115 | 10,90 |
| B7 | 0,185±0,003 | 0,230±0,101 | 19,49 |
| B8 | 0,188±0,008 | 0,240±0,093 | 21,96 |
| B9 | 0,185±0,007 | 0,200±0,087 | 7,67 |
| B10 | 0,186±0,004 | 0,205±0,095 | 9,05 |
| B11 | 0,182±0,004 | 0,210±0,090 | 13,39 |
| B12 | 0,184±0,015 | 0,200±0,103 | 7,99 |
| B13 | 0,181±0,009 | 0,210±0,093 | 13,67 |
| B14 | 0,178±0,010 | 0,215±0,086 | 17,16 |
| B15 | 0,179±0,011 | 0,240±0,083 | 25,99 |

¹⁾Sintilatör dedektör: ZnS (Ag); ^{*} Bq/cm² dönüştürülmüştür

²⁾İyon Odası

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Bu tezde, binalarda kaplama malzemesi olarak kullanılan seramik karoların ve mermerlerin radyoaktivite içeriği nedeniyle neden olacağı dış ışınlama radyasyon dozunun değerlendirilmesi için gama spektrometrik yöntemle U, Ra, Th ve K aktivitelerinin ölçülmesi ile enerji ayırmalı XRF tekniğiyle de kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Kaplama malzemesi olarak kullanılan seramik karolardan ve mermerlerden hazırlanmış numunelerin kimyasal bileşimi, Ag hedefli bir X-ışın tüpüyle uyarılarak, elementel kompozisyonu bir yüksek enerji ayırma güçlü SDD dedektörlü EDXRF spektrometresi ile belirlenmiştir. Belirlenen elementel kompozisyon doğrultusunda gama öz soğurma düzeltmesinin önemi ortaya konmuştur. Yüksek enerji ayırma gücüne sahip Ge dedektörle Uranyum-238, Radyum-226, Toryum-232 ve Potasyum-40 aktivite derişimleri ölçülmüş olup; bu malzemelerden kaynaklanabilecek ekstra gama etkin dozun tahmini için aktivite derişim indeksi (I) hesaplanmıştır. Ayrıca binalarda kaplama malzemesi olarak kullanılan seramik karolardan yıllık doğal radyasyon dozuna ilave olarak yüzeyden yayınlanan betaların doz ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Belirlenen elementel kompozisyon doğrultusunda seramik ve mermer örneklerinin öz soğurma düzeltme faktörleri NIST XCOM veri tabanı kullanılarak hesaplanmıştır. Öz soğurma düzeltme faktörünün 200 keV'in altındaki enerjilerde baskın olduğu özellikle 63.3 keV enerji pikinde en yüksek seviyede olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.10, Çizelge 4.11, Çizelge 4.12, Çizelge 4.13, Çizelge 4.14, Çizelge 4.15 ve Çizelge 4.16). Bunun nedeni kütle azalım katsayısının (μ_k) yüksek olmasıdır.

EGML 1389-37-7 çoklu radyonüklit standardı ile ölçümlerde kullanılan kuyu tipi Ge dedektör için verim kalibrasyonu yapılmıştır (Çizelge 4.17). Kaplama malzemesi olarak kullanılan seramik ve mermer örneklerinin analizleri iki şekilde gerçekleştirilmiştir. İlkinde öz soğurma düzeltme faktörü uygulanmadan aktivite ölçülmüştür. İkinci olarak ise öz soğurma düzeltme faktörü uygulanarak aktivite analizi gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.18, Çizelge 4.19, Çizelge 4.20, Çizelge 4.21). Bu analiz doğrultusunda

aktivite değerlerinde değişim gözlenmiş ve öz soğurma düzeltme faktörünün uygulanmasının gerekli olduğu görülmüştür.

Kaplama malzemesi olarak kullanılan seramik ve mermer örneklerinin aktivite analizleri kuyu tipi Ge dedektörle yapıldıktan sonra gama derişim indisi hesaplanarak etkin gama dozu tahmini yapılmıştır.

Mermer örnekleri farklı renk tonlarında ve genel anlamda sedimanter kökenli kaya levhalarından oluşmaktadır. Bunlar genel olarak açık bej renkli, koyu bej renkli ve koyu kahverengi tonlarında görülmektedir. Bu levhalar homojen renkte olmayıp kırık çatlakları beyaz ve açık bej renkli ve kristalize kalsit mineralleri tarafından doldurulmuştur. mikroskopik incelemeleri sonucu mikrokristalize, şekerimsi ve kataklastik doku özelliği sergilemektedirler. Kalsit ana mineral bileşimini oluşturmaktadırlar. Bunun yanında organik ve dolomit mineralleride gözlemlenebilmektedir. Mikroskop altında gözlemlenebilecek mikro çatlaklar ve kristalize kalsit mineralleri tarafından doldurulmuş, kayalar oldukça kompakt boşluk içermeyen az oranda fosil kabukları içermektedir. Kayaç içerisinde feldspat ve radyoaktif element içerebilecek herhangi bir mineral içermemektedir.



(A)



(B)

Şekil 5.1 (A) açık bej renkli mermer örneği, (B) koyu kahverengi renkli mermer örneği

Kaplama malzemesi olarak kullanılan seramik ve mermer örneklerinin aktivite hesabına bakıldığında M kodlu mermer numunelerinin düşük aktivite değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Birçok örneğin Ra, Th, U ve K değerlerinin ölçülebilir en küçük aktivite (MDA) seviyesinde olduğunu belirlenmiştir (Çizelge 4.20). M kodlu numune düşük aktivitelere sahip olmasının nedeni, mineralojik bileşimden kaynaklanmaktadır. K kodlu ve E kodlu örneklerin çoğunda yapı malzemelerinin güvenli kullanımı için önerilen doz indisi $I \leq 2$ (0,3 mSv/yıl) aşılmadığı gözlemlenmiştir. Ancak zirkon hammaddesine sahip olan Z kodlu örneklerin (Çizelge 4.21) aktivite değerlerinin yüksek olduğu gözlemlenmiş ve ancak bunlar belirli karışımlarda kullanıldığında doğrudan bir doz riski söz konusu değildir.

Aktiviteler ölçüldükten sonra Avrupa ülkelerinin genel yaklaşımı olan ve bireyin ilave alacağı etkin doza geçilebilmesi için Eşitlik 3.5'te verilen $0,3-1 \text{ mSv.y}^{-1}$ doz kriterlerine tabi tutulacak olan I (gama derişim indisi) değerleri hesaplanmalıdır. Bu değerlerin dışına çıkılması durumunda kullanılacak malzemeye müdahale edilmelidir. Bireyin alabileceği ilave doz değerinin 1 mSv.y^{-1} geçme riskine karşın söz konusu malzemenin binalarda yapı malzemesi olarak kullanılması önlenmelidir. Bu çalışmada ölçülen seramik ve mermer numunler için azami gama doz derişim indisi $I = 1,23 \pm 0,06$ bulunmuştur. Bu değer ekstra doz $0,3 \text{ mSv/yıl}$ 'a karşılık gelen $I \leq 2$ olduğundan müdahaleyi gerektirecek bir doz söz konusu değildir. Benzer şekilde yüzey beta aktivitesi ve beta-gama doz hızlarında normal doğal fon değerlerinden genelde 2 kat yüksek çıkmıştır. Ancak 50 mSv/yıl cilt dozu değerini geçmemektedir.

Bu tezde özellikle halihazırda kullanılmakta olan binalarda kaplama malzemesi olarak kullanılmış doğal taşların, yer ve duvar karolarının ve mermer kaplanan alanların yerinde beta-gama dozunun ölçülmesi için iyon odası ve sintilasyon dedektörlü yüzey kontaminasyon dedektörlerinin kullanılabilirliği test edilmiştir. Bunun pratik ve uygulanabilir bir yöntem olduğu gösterilmiştir.

Avrupa temel güvenlik standartlarında binalarda kullanılan yapı malzemelerinden kaynaklanan radyasyon dozu, toplum bireylerinin alabileceği yıllık etkin radyasyon dozuna ilave olarak en fazla $1,0 \text{ mSv/yıl}$ olarak sınırlandırılmıştır. Fakat bazı Avrupa

ülkeleri, örneğin Avusturya yapı malzemeleri için bu değeri 2,2 mSv/yıl değerine yükseltmiştir (ÖNORM S 5200, 1999). Binalarda kullanılan kaplama malzemeleri için ise 0,3 mSv/yıl ile sınırlandırılmaktadır (EU Rep. 112,1999). Bu tez çalışmasında, yoğun bir yapılaşmanın olduğu ülkemizin şehir yaşamındaki binalarda ve Türkiye inşaat malzemeleri ihracatında büyük bir paya sahip mermerler ve seramik karo numunelerinin doğal radyoaktivite içeriklerinin incelenmesi yapılmıştır. Standart radyoaktivite ölçüm yöntemi geliştirilerek, MDA değerleri belirlenmiş ve rutin olarak laboratuvarında kullanılması için sayım süresi, numune miktarı ve sayım geometrisi optimize edilmiştir. Numunelerden elde edilen aktivite derişimlerinden, günlük hayatımızın yaklaşık %80'ni (yıllık ~7000 saat) geçirdiğimiz ev, ofis gibi kapalı alanlarda sadece doğal temiz hava değişiminin $0,7h^{-1}$ (ICRP 65'e göre) olduğu varsayımıyla, farklı şekillerde kullanılan mermer ve seramiklerin sağlık açısından radon emisyonu da dahil sağlık riski teşkil edip etmediğinin değerlendirilmesi için verdiği ekstra dış ışınlama dozu tespit edilmiştir. Yeni binalarda tasarım için 200 Bq/m^3 ve bitmiş binalarda 400 Bq/m^3 radon derişiminin (EU Rep. 112,1999) esas alındığı dikkate alındığında, seramik duvar veya yer karolarının ve mermer kaplamaların odanın brüt hacmine ve havalandırma koşullarına göre radon emisyonu vasıtasıyla doza katkısının hesaba dahil edilmiş ve ayrıca, seramik ve karoların birim yüzeydeki beta yayınlayıcıların kaynaklanabilecek doz etkisi de incelenmiştir. Bu sebeplerden dolayı mermer ve seramiklerin içeriğindeki radyonüklitlerin deneysel olarak belirlenmesi, elde edilen aktivite sonuçları, standart yöntemlerle etkin doza karşılık gelen bir aktivite derişim indeksinde birleştirilerek hesaplanmıştır.

KAYNAKLAR

- Anonymous. 1991. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60.
- Anonymous. 1993. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 1993 Report.
- Anonymous. 1999. The Recommendation No:112. EC 1999.
- Anonymous. 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report.
- Anonymous. 2003. GammaVision-32 Gamma-Ray Spectrum Analysis and MCA Emulator for Microsoft Windows 2000 Professional and XP Professional A66-B32 Software User's Manual. Advanced Measurement Technology Inc.
- Anonymous. 2004. Genie 2000 3.0 Customization Tools Manual. Canberra Industries Inc.
- Appleby, P.G., Richardson, N. and Nolan, P.J. 1992. Self absorption correction for well-type germanium detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Section B, 71; 228-233.
- Arıkan, P., "Uranite Cevherinin Radyoizotop Uyarımalı X-Işını Floresans Tekniği ile Uranyum Analizi İçin Optimum Metotların Araştırılması", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-117 (1986).
- ASTM E181-93, Standard Test Methods for Detector Calibration and Analysis of Radionuclides.
- Beretka, J. and Mathew, P.J. 1985. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. Health Physics, 48(1); 87-95.
- Bertin, E.P., 1975. Principles and Practice of X-Ray Spectrometric Analysis. Second Edition, Plenum Press, New York, 1079s.
- Brouwer, P., Theory of XRF, Panalytical BV, Netherland, ISBN: 90-9016758-7, 2003.
- Cutshall, N.H., Larsen, I.L. and Olsen, C.R. 1983. Direct analysis of ^{210}Pb in sediment samples: Self absorption corrections. Nuclear Instruments and Methods, 206; 309-312.
- Debertin, K. and Helmer, R.H. 1988. Gamma- and X-ray spectrometry with semiconductor detectors. Elsevier Science Publishers B.V., 399, Amsterdam.

- Dovlete, C. and Povinec, P.P. 2004. Quantification of uncertainty in gamma-spectrometric analysis of environmental samples. IAEA TECDOC 1401, 103-126.
- Efe, N., X-Işını Floresans Tekniği İle Britolit Cevherinde Toryum ve Lantanitlerin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-90 (1986).
- Eisberg, D.L., 1961. "Fundamentals of Modern Physics", John Willey and Sons Inc., New York, 256-298.
- Erdoğan, Y., X-Işını Floresans Tekniği ile Orta Anadolu Linyitlerinin Kantitatif Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-60 (1995).
- EUROPEN COMMISSION, Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials, Radiation Protection Report -112, EC, European Commission, Luxembourg;(1999).
- Firestone, B.R., Baglin, C.M. and Frank Chu, S.Y. 1988. Table of isotopes eight edition 1998 update in CD-ROM. John Wiley and Sons, New York.
- Garcia-Talavera, M., Laedermann, J.P., Decombaz, M., Daza, M.J. and Quintana, B. 2001. Coincidence summing corrections for the natural decay series in γ -ray spectrometry. Journal of Radiation and Isotopes, 54; 769-776.
- Groppi, F., Lavi, N., Alfassi, Z.B., Bonardi, M. and Birattari, C. 2005. On the high resolution gamma-ray spectrometric measurement of ^{40}K in natural and synthetic materials. Radiation Protection Dosimetry, 115 (1-4); 441-444.
- Huy, N.Q. and Luyen, T.V. 2004. A method to determine ^{238}U activity in environmental soil samples by using 63,3 keV photopeak-gamma HPGe spectrometer. Applied Radiation and Isotopes, 61(6); 1419-1424.
- IAEA, 1996. International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. IAEA, 115, Vienna.
- Jenkins, R., Gould, R.W., Gedcke D., "Quantitative X-Ray Spectrometry", Marcel and Dekker Inc., New York-USA, 1-7, 9-42, 89-100, (1981).
- Knoll, F.G. 2000. Radiation Detection and Measurement Third Edition. Wiley, 816, New York.
- Krane, K.S. 2001. Nükleer Fizik. Palme.
- Kurucu, Y., Şahin, Y., "Atom Fiziği", Pagem Yayıncılık, Erzurum, 317-339 (1989).

- Lankosz, and B. Holynska, 1993. "Research in the Quantitative analysis of individual particles by x-ray fluorescence spectrometry", Adv. XRF, 36.
- MacLellan, J.A. and Strom, D.J. 1999. Traditional formulas for decision level are wrong for small numbers of counts. Pacific Northwest National Laboratory; 6.
- ÖNORM S 5200, Radioactivity in building materials, pp.1-12, 1999.
- Reus, U. and Westmeier, W. 1983. Atomic data and nuclear data tables. Catalog of Gamma-Rays from Radioactive Decay, 29(1-2); 393.
- Tertian, R., Claisse, F., 1982. "Principles of Quantitative X-Ray Fluorescence Analysis", Heyden and Son Ltd., Southampton-UK, 3-15, 16-35, 51-70 .
- UNSCEAR 2000. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. New York, (2000).
- XCOM: Photon Cross Sections Database, 1998. Web sitesi. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>. Erişim Tarihi: 2014.
- Yücel, H., Çetiner, M.A. and Demirel H. 1998. Use of the 1001 keV peak of ^{234m}Pa daughter of ^{238}U in measurement of uranium concentration by HPGe gamma-ray spectrometry. Nuclear Instruments and Methods in Physics Section A, 413; 74-82.
- Yücel, H., Esen, A.N., Köse, E., Bor, D., Correction methodology for the spectrally interfering γ -rays overlapping to the analytical peaks used in the analysis of ^{232}Th , Applied Radiation and Isotopes, Vol.69, No.6, pp.880-887(2011)
- Yücel, H., Yeltepe, E, 2014. Yapı malzemelerinin radyoaktivite içeriğinin radyolojik değerlendirilmesi. Türk Standardları Enstitüsü, Standardizasyonun Küresel Ekonomiye Etkileri sempozyum bildiri kitabı, tam metinli makale, sh. 654-662.
- Zalewski M., Tomczak M., Kapata J., Radyoactivity of Building Materials available in Noreastern, Poland, Publishing Journal of Environmental Studies, Vol.10, No.3 (2001), 183-188.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hayati Gökmen

Doğum Yeri : Tunceli

Doğum Tarihi : 20 / 12 / 1985

Eğitim Durumu:

Lise : Tunceli Atatürk Süper Lisesi (yabancı dil ağırlıklı),
(1999-2003)

Lisans : Gaziantep Üniversitesi Fizik Mühendisliği (İngilizce),
(2004-2011)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Medikal Fizik
Anabilim Dalı, Sağlık Fiziği (2012-2014)