

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KAPADOKYA BÖLGESİNDE YAPI TAŞI OLARAK
ÜRETİLEN TÜFLERDEKİ DOĞAL
RADYOAKTİVİTENİN GAMA SPEKTROMETRİK
YÖNTEMLE ÖLÇÜLMESİ**

**Tezi Hazırlayan
Elif ATICI**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Şeref TURHAN**

**Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**MAYIS 2016
NEVŞEHİR**

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KAPADOKYA BÖLGESİNDE YAPI TAŞI OLARAK
ÜRETİLEN TÜFLERDEKİ DOĞAL
RADYOAKTİVİTENİN GAMA SPEKTROMETRİK
YÖNTEMLE ÖLÇÜLMESİ**

**Tezi Hazırlayan
Elif ATICI**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Şeref TURHAN**

**Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

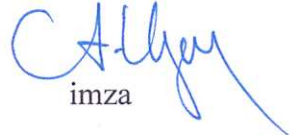
**MAYIS 2016
NEVŞEHİR**

Prof. Dr. Şeref TURHAN danışmanlığında Elif ATICI tarafından hazırlanan “ Kapadokya bölgesinde yapı taşı olarak üretilen tüflerdeki doğal radyoaktivitenin gama spektrometrik yöntemle ölçülmesi “ başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

11/05/2016

JÜRİ

Başkan : Doç. Dr. Aslıhan KARATEPE


imza

Üye : Prof. Dr. H. Reşit YAZAR


imza

Üye : Prof. Dr. Şeref TURHAN


imza

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 13.5.2016 tarih ve 19-175... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

13/5/2016

Doc. Dr. Şahlan ÖZTÜRK
Enstitü Müdürü



TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.


Elif ATICI

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince tüm bilgilerimi benimle paylaşmaktan kaçınmayan, her türlü konuda desteğini benden esirgemeyen ve tezimde büyük emeği olan danışmanım Prof. Dr. Şeref TURHAN'a, örneklerin toplanması ve radyoaktivite ölçümü için hazırlanması aşamasında fedakârca yardım eden kıymetli babam Hasan Basri ATICI'ya ve arkadaşım Ercan SAVAŐ'a, Fen Edebiyat Fakültesi Dekanlığı'na, örneklerin radyoaktivite ölçümleri konusunda engin deneyimini ve emeğini esirgemeyen Dr. Ahmet VARINLIOĞLU'na, Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkez Müdürlüğü'ne, tez çalışmasına 114Y042 kodlu proje kapsamında destek veren TÜBİTAK'a ve maddi, manevi olarak her zaman desteklerini hissettiren değerli aileme içtenlikle teşekkür ederim.

KAPADOKYA BÖLGESİNDE YAPI TAŞI OLARAK ÜRETİLEN TÜFLERDEKİ DOĞAL RADYOAKTİVİTENİN GAMA SPEKTROMETRİK YÖNTEMLE ÖLÇÜLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Elif ATICI

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2016

ÖZET

Volkanik tüf taşları, Türkiye'deki inşaat sektöründe binaların iç ve dış yüzeylerini yalıtım ve/veya dekoratif amaçlı kaplama malzemesi ve özellikle Kapadokya Bölgesinde kâgir yapılarda iç ve dış duvarların yapımında yapısal malzeme olarak da kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Nevşehir ve Kayseri'de bulunan farklı ocaklardan toplanan elli dokuz volkanik tüf taş örneğinin radyometrik analizi, gama-ışını spektrometrik yöntem kullanılarak yapıldı ve bu taş örneklerindeki doğal radyonüklitlerden (^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K) yayımlanan iyonlaştırıcı radyasyonun (alfa ve gama ışını) insan sağlığında oluşturabileceği radyolojik risk değerlendirildi. ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişimi, sırasıyla, $58,7 \pm 4,2$ Bq/kg, $75,9 \pm 5,3$ Bq/kg, $41,9 \pm 3,0$ Bq/kg ve $523,6 \pm 48,0$ Bq/kg olarak ölçüldü. Dış ve iç ışınlama indisleri, kapalı ve açık ortamlarda havada soğurulan gama doz hızı ve bunlara karşılık gelen yıllık etkin radyasyon doz hızları ve yaşam boyu kanser riski, volkanik tüf taş örneklerinin yapısal veya kaplama malzemesi olarak kullanılmasından kaynaklanan radyolojik riskleri değerlendirmek için hesaplandı. Sonuçlar, incelenen bütün volkanik tüf taş örneklerinin dış cephelerde, yalıtım ve dekoratif amaçlı kaplama malzemesi olarak kullanılabilmesini gösterdi. Ancak bazı volkanik tüf taş örneklerinin özellikle Q5 kodlu ocaktan temin edilenlerin, iç cephelerde kaplama malzemesi veya yapısal malzeme olarak kullanılmasının sınırlandırılması gerekmektedir.

Anahtar kelimeler: Doğal radyoaktivite, Volkanik tñf, Uranyum, Toryum, Radyum, Potasyum, Soğurulmuş gama doz hızı, Yıllık etkin doz hızı, Radyum eşdeğer aktivite indisi, Aktivite derişim indisi, Alfa indisi, Kanser riski.

Tez Danışman: Prof. Dr. şeref TURHAN
Sayfa Adeti: 70



**MEASUREMENT OF NATURAL RADIOACTIVITY IN TUFF PRODUCED AS
BUILDING STONE IN CAPPADOCIA REGION BY GAMMA-RAY
SPECTROMETRIC METHOD**

(M. Sc. Thesis)

Elif ATICI

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

May 2016

ABSTRACT

Volcanic tuff stones are used as covering material of the interior and exterior surfaces of the buildings for insulation and/or ornamental purposes in the construction industry in Turkey and also used as structural material in the construction of masonry buildings especially in Cappadocia region. In this study, fifty-nine volcanic tuff stone samples collected from different quarries located in Nevşehir and Kayseri province different geographical regions in Turkey were surveyed for radiometric analysis using gamma-ray spectrometric technique and evaluated radiological risk to the human health caused by ionizing radiation (alpha and gamma-ray) from natural radionuclides (^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{40}K) in these stone samples. The average activity concentrations of ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{40}K were measured as 58.7 ± 4.2 Bq/kg, 75.9 ± 5.3 Bq/kg, 41.9 ± 3.0 Bq/kg and 523.6 ± 48.0 Bq/kg, respectively. External and internal exposure indexes, absorbed gamma dose rate indoor and outdoor air and the corresponding annual effective radiation dose rates and life time cancer risk were estimated to evaluate the potential radiological risk to human caused from usage of the volcanic tuff samples as insulation or structural material. The results denoted that all of the surveyed volcanic tuff stone samples can be used as covering materials of exterior surfaces of building for ornamental or insulating covering purposes. However, the use of some volcanic tuff stone samples especially quarry coded of Q5 as covering materials of interior surfaces and structural building materials should be restricted.

Keywords: Natural radioactivity, Volcanic tuff, Uranium, Thorium, Radium, Potassium, Absorbed gamma dose rate, Annual effective dose rate, Radium equivalent activity index, Activity concentration index, Alpha index, Cancer risk.

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Şeref TURHAN

Page Number: 70



İÇİNDEKİLER

| | |
|--|------|
| ONAY..... | i |
| TEZ BİLDİRİM SAYFASI | ii |
| TEŞEKKÜR..... | iii |
| ÖZET..... | iv |
| ABSTRACT..... | vi |
| İÇİNDEKİLER | viii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | xi |
| TABLolar LİSTESİ | xiii |
| RESİMLER LİSTESİ..... | xiii |
| BÖLÜM 1 | |
| GİRİŞ | 1 |
| Literatür Özeti ve Değerlendirme | 3 |
| BÖLÜM 2 | |
| 2.1. Radyoaktivite | 10 |
| 2.2. Bozunum Süreçleri..... | 10 |
| 2.2.1. Alfa bozunumu | 10 |
| 2.2.2. Beta bozunumu..... | 11 |
| 2.2.3. Gama bozunumu | 12 |
| 2.3. Doğal radyoaktif seriler..... | 12 |
| 2.4. Radyasyon | 16 |
| 2.4.1. İyonlaştırıcı radyasyon çeşitleri | 16 |
| 2.4.1.1. Elektromanyetik radyasyonlar | 16 |
| 2.4.1.1.1. Gama-ışınları..... | 16 |
| 2.4.1.1.2. X-ışınları | 16 |
| 2.4.1.2. Parçacıklı radyasyon | 16 |
| 2.4.1.2.1. Alfa (α) ışınları..... | 16 |
| 2.4.1.2.2. Beta (β) ışınları..... | 17 |
| 2.5. İyonlaştırıcı Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi | 17 |
| 2.5.1. Gama ve X- ışınlarının etkileşim mekanizmaları..... | 18 |
| 2.5.1.1. Fotoelektrik soğurma | 18 |

| | | |
|---|--|----|
| 2.5.1.2 | Compton saçılması | 19 |
| 2.5.1.3 | Çift oluşumu | 19 |
| 2.6. | Radyasyon Doz Birimleri | 21 |
| 2.6.1. | Aktivite birimi | 21 |
| 2.6.2. | Işınlama doz birimi | 22 |
| 2.6.3. | Soğurma doz birimi | 22 |
| 2.6.4. | Eşdeğer doz birimi | 23 |
| 2.7. | Radyasyonun Biyolojik Etkileri | 23 |
| BÖLÜM 3 | | |
| MATERYAL VE YÖNTEM | | |
| 25 | | |
| 3.1. | Volkanik Tüf Taşının Özellikleri | 25 |
| 3.2. | Örneklerin Ölçme İşlemi İçin Hazırlanması | 26 |
| 3.3. | Gama-ışını Spektrometresi | 31 |
| 3.3.1. | Yüksek saflıktaki yarı-iletken germanyum (Ge) dedektörleri | 32 |
| 3.3.2. | Mutlak verim kalibrasyonu | 34 |
| 3.3.3. | Enerji kalibrasyonu | 35 |
| 3.3.4. | Gama-ışını fotopiklerin seçilmesi | 35 |
| 3.4. | Ölçümlerde kullanılan gama-ışını spektrometresi | 36 |
| BÖLÜM 4 | | |
| ELDE DİLEN VERİLER VE TARTIŞMA | | |
| 38 | | |
| 4.1. | Gama-ışını Spektrometresinin Mutlak Verim Kalibrasyonu | 38 |
| 4.2. | Volkanik Tüf Örneklerinde Ölçülen Doğal Radyonüklitlerin Aktivite Değişimleri | 38 |
| 4.3. | Radyolojik değerlendirme | 45 |
| 4.3.1. | Dış ışınlama indisleri | 45 |
| 4.3.1.1. | Radyum eş değer aktivite indisi | 45 |
| 4.3.1.2. | Aktivite değişim indisi | 47 |
| 4.3.2. | İç ışınlama indisleri | 49 |
| 4.3.2.1. | Alfa indisi | 49 |
| 4.3.3. | Kapalı ortamda soğurulan doz hızı ve karşılık gelen yıllık etkin doz hızı | 50 |
| 4.3.4. | Dış (açık) ortamda soğurulan doz hızı ve karşılık gelen yıllık etkin doz hızı | 54 |
| 4.3.5. | Yaşam boyu kanser riski | 55 |

BÖLÜM 5

| | |
|---|----|
| SONUÇ VE ÖNERİLER, | 60 |
| 5.1. Volkanik tüf örneklerinde ölçülen ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın aktivite derişim sonuçlarının değerlendirilmesi | 60 |
| 5.1.1. Radyolojik açıdan değerlendirme | 61 |
| 5.2. Öneriler | 63 |
| KAYNAKLAR | 64 |
| ÖZGEÇMİŞ | 69 |



ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1. Compton Saçılması | 19 |
| Şekil 2.2. Çift Oluşumu..... | 19 |
| Şekil 2.3. Fotoelektrik Olay, Compton Olay ve çift oluşumun baskın olduğu bölgeler | 20 |
| Şekil 3.1. Örneklerin toplandığı ocakların yerleri | 28 |
| Şekil 3.2. Tipik bir gama spektrometresi | 32 |
| Şekil 3.3. Düzlemsel geometrili p-tipi HPGE detektörü | 34 |
| Şekil 4.1. Ölçme sisteminin mutlak verim eğrisi | 38 |
| Şekil 4.2. Tüf örneklerinde ölçülen a) ^{238}U , b) ^{232}Th , c) ^{226}Ra ve d) ^{40}K aktivite | 43 |
| Şekil 4.3. Volkanik tüf örneklerinde ölçülen radyonüklitlerin ortalama aktivite derişimlerinin, birbirleri, yerkabuğu ortalaması ve doğal taş örneklerinde ölçülen ortalama değerler ile karşılaştırılması | 44 |
| Şekil 4.4. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama R_{aeq} indis değerlerinin, birbirleri ve sınır değer ile karşılaştırılması | 47 |
| Şekil 4.5. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama ADİ değerlerinin, birbirleriyle ve ölçüt değerler ile karşılaştırılması | 49 |
| Şekil 4.6. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama AI değerlerinin, birbirleri ve sınır değer ile karşılaştırılması | 51 |
| Şekil 4.7. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $DH_{\text{iç}}$ değerlerinin, birbirleriyle ve dünya ortalaması ile karşılaştırılması | 53 |
| Şekil 4.8. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $EDH_{\text{iç}}$ değerlerinin, birbirleri ve ölçüt değer ile karşılaştırılması..... | 54 |
| Şekil 4.9. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $DH_{\text{dış}}$ değerlerinin, birbirleriyle ve dünya ortalaması ile karşılaştırılması | 57 |
| Şekil 4.10. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $EDH_{\text{dış}}$ değerlerinin, birbirleriyle ve ölçüt değer ile karşılaştırılması..... | 57 |
| Şekil 4.11. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $KR_{\text{iç}}$ ve $KR_{\text{dış}}$ değerlerinin, birbirleriyle karşılaştırılması | 59 |

TABLULAR LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Tablo 2.1. Toryum, Uranyum ve Aktinyum elementlerine ait bazı özellikler | 13 |
| Tablo 2.2. Doğal Toryum serisi üyelerinin bazı özellikleri..... | 13 |
| Tablo 2.3. Doğal uranyum serisinin üyelerinin bazı özellikleri | 14 |
| Tablo 2.4. Doğal Aktinyum serisi üyelerinin bazı özellikleri | 15 |
| Tablo 3.1. Ölçme işlemine tabi tutulan volkanik tüf örnekleri..... | 29 |
| Tablo 3.2. Germanyumun özellikleri | 33 |
| Tablo 3.3. Ölçme işlemlerinde kullanılan HPGe dedektörünün özellikleri | 37 |
| Tablo 4.1. En düşük ölçme sınır değeri (D_L)..... | 40 |
| Tablo 4.2. Tüf örneklerinde ölçülen radyonüklit aktivite derişimlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikî bilgiler..... | 40 |
| Tablo 4.3. Tüf örneklerinde ölçülen radyonüklit aktivite derişimlerinin aralık (en küçük-en büyük) ve ortalama ($ort. \pm standart hata$) değerleri..... | 41 |
| Tablo 4.4. Volkanik tüf örneklerinde ölçülen radyonüklitlerin ortalama aktivite derişimlerinin literatürde verilen değerler ile karşılaştırılması | 44 |
| Tablo 4.5. Tüf örnekleri için hesaplanan ortalama R_{aeq} indis değerleri | 46 |
| Tablo 4.6. Doz ölçütünün kontrolüne yönelik ADİ değerleri..... | 48 |
| Tablo 4.7. Tüf örnekleri için hesaplanan ortalama ADİ değerleri..... | 48 |
| Tablo 4.8. Tüf örnekleri için hesaplanan ortalama AI değerleri..... | 50 |
| Tablo 4.9. Tüf örnekleri için hesaplanan ortalama $DH_{iç}$ ve $EDH_{iç}$ değerleri | 53 |
| Tablo 4.10. Tüf örnekleri için hesaplanan ortalama $DH_{dış}$ ve $EDH_{dış}$ değerleri..... | 56 |
| Tablo 4.11. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $KR_{iç}$, $KR_{dış}$ ve KR_{toplam} değerleri..... | 58 |

RESİMLER LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Resim 3.1. Volkanik tüflerin üretim aşamaları | 27 |
| Resim 3.2. Volkanik tuf örneklerinin kırılma işlemi..... | 30 |
| Resim 3.3. Ölçme işlemi için hazırlanmış volkanik tuf örnekleri..... | 31 |



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Bireylerin yaşadıkları çevre (toprak, su, bitki örtüsü, iklim, jeoloji, konut, çalışma mekânları vb.), yaşam kalitesiyle doğrudan ilişkilidir. Epidemiyolojik çalışmalar, sağlık sorunları (kanser, solunum, deri, diş hastalıkları vb.) ile yaşanan bölgenin jeolojik-jeokimyasal yapısı özellikle kayaçların, toprağın ve su kaynaklarının içerdiği toksik ve/veya radyotoksik elementler veya mineraller (kurşun, uranyum, toryum, radyum, polonyum, asbest, erionit, kadmiyum, selenyum, bakır, arsenik vb.) arasında önemli bir bağlantı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bunun yanı sıra bireyler, yaşadıkları bölgenin jeolojik çevre şartları ve yaşam standartlarına bağlı olarak doğal radyoaktif kaynaklardan yayınlanan alfa, beta ve gama iyonlaştırıcı radyasyonuna sürekli olarak maruz kalmaktadır. Doğal radyoaktif kaynaklar, kozmojenik radyonüklitler (^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{22}Na vb.) ile yerkabuğundaki primordiyal radyonüklitlerden (uranyum ve toryum doğal radyoaktif serisinde yer alan radyonüklitler, ^{40}K vb.) oluşmaktadır. Her türlü yapı işlerinde veya bu işlerin herhangi bir kısmında kalıcı olarak kullanılmak üzere üretilen ve piyasaya arz edilen yapı malzemeleri, yapısal malzemeler (beton, tuğla, briket, gaz beton vb.), yalıtım ve dekorasyon için kullanılan kaplama malzemeleri (seramik, fayans, granit, mermer, tüf, çimento, alçıtaşı, kireçtaşı vb.) ve katkı ham maddeleri (uçucu kül, cüruf, tras, fosfojips vb.) olarak sınıflandırılabilir.

Yerkabuğu kökenli olan bu malzemeler, yukarıda sözü edilen primordiyal radyonüklitleri, malzemenin elde edildiği bölgenin jeolojik-jeokimyasal yapısına bağlı olarak farklı miktarlarda içermektedir [1]. Zamanlarının büyük bir kısmını evde ve/veya işyerinde kapalı ortamlarda ve açık ortamlarda geçiren bireyler, yaşadıkları ev ve/veya işyeri binalarının oturduğu zemindeki kaya, toprak ve binalarında kullanılan yapı malzemelerinin içerdiği radyonüklit derişimine bağlı olarak bu doğal radyonüklitlerden yayınlanan iyonlaştırıcı radyasyona iki farklı şekilde maruz kalabilirler: (1) Dış ışınlama sonucunda, bu doğal radyonüklitlerden yayınlanan enerjik gama-ışınlarına tüm vücut olarak maruz kalabilir; (2) İç ışınlama sonucunda, uranyum (^{238}U) doğal radyoaktif serisinde radyumun (^{226}Ra) bozunum ürünü olan radon (^{222}Rn) gazı ve radonun bizmut (^{214}Bi), kurşun (^{214}Pb) gibi kısa yarı ömürlü bozunum ürünlerinin solunumla vücuda girmesi ile solunum yolları ve akciğer dokusu alfa ve beta ışınlarına maruz kalabilir.

Bireylerin, radyoaktivitesi yüksek olan yapı malzemelerinin kullanıldığı bina içinde yaşamaları hâlinde uzun zaman ölçeğinde sağlık açısından olumsuz etkilere sebep olabilecek kayda değer radyolojik riskler ortaya çıkabilir. Epidemiyolojik çalışmalar, kapalı ortamda yüksek radon derişimine uzun süre maruz kalmanın, iç ışınlama sonucunda akciğer kanser riskini artırdığını açıkça göstermiş ve radon, 1988 yılında Uluslararası Kanser Araştırma Kurumu (International Agency for Research on Cancer) tarafından kansere yol açan madde olarak kabul edilmiştir [2]. Bu yüzden bireylerin, yapı malzemelerinden dolayı alabilecekleri yıllık etkin radyasyon dozunun değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Dolayısıyla özellikle ev ve işyeri binalarının inşasında kullanılacak yapı malzemelerinin işlevi, performansı ve maliyetinin yanında içerdiği doğal radyoaktivitenin de dikkate alınması elzemdir.

Çok eski devirlerde, tapınaklar, abideler, heykeller ve hamam gibi genel kullanıma hizmet verme amaçlı olarak doğal taşların işlenmesi ve kullanılması, günümüze kadar farklı kültürlerin yansıtılmasını sağlamıştır [3]. Doğal taş; heykeller aracılığı ile pek çok duygu ve düşüncenin aktarılmasında rol oynayarak sanata hizmet etmiş ve insanoğlunun barınma ihtiyacını yerleşik düzende karşılamaya başlamasından beri ise yapı ve tasarım malzemesi olarak, gücün, saygınlığın, eşsizliğin ve ölümsüzlüğün farklı coğrafyalardaki simgesi olmuştur [4]. Son yıllarda, doğal malzeme kullanımına verilen önem artmakta ve özellikle binaların iç ve/veya dış cephelerinin doğal taşlar ile kaplanması ve bu malzemelerin sağladığı teknik avantajlardan yararlanılmaya çalışılması, inşaat sektörüne ve mimari tasarımlara önemli ölçüde farklı bir ayrıcalık kazandırmaktadır [3]. Ülkemizdeki inşaat sektöründe, magmatik (volkanik), sedimanter ve metamorfik kökenli olarak bilinen kayaçlar, doğal kaplama taşı olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, düşük birim ağırlığı, ısı ve ses yalıtımı, kolay işlenmesi ve farklı renk seçeneklerinin bulunması gibi öne çıkan özelliklerinden dolayı volkanik kökenli doğal taşlar, diğer kaplama taşlarına göre çok daha avantajlıdır [3]. Özellikle İç Anadolu Bölgesinde Erciyes ve Hasan Dağı'nın volkanik patlamaları sonucunda, Aksaray, Nevşehir ve Kayseri dolaylarında bulunan volkanik yataklarda, bu bağlamda değerlendirilebilen kayaç serilerini görmek ve bulmak mümkündür [3].

Tüfler, volkanik patlama sırasında yeryüzüne püskürtülen kül ve irili ufaklı parçaların üst üste yığılarak yapışması ve taşlaşması ile oluşan gözenekli yapıya sahip, kolay

dağılabilen ve değişik renkte (beyaz, gülkurusu, gri, koyu kahve, açık kahve, siyah, vişne vb.) volkanik kökenli bir doğal taş grubundandır.

Literatür zeti ve Değerlendirme

Gündüz ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, Orta Anadolu Bölgesinde (Konya, Aksaray, Nevşehir ve Kayseri) yer alan sekiz ayrı renkteki volkanik kayaa oluşumları üzerine yapılan bir araştırmanın bulguları dikkate alınarak bu kayacın oluşumunda üretilecek doğal taşların, inşaat sektöründe doğal kaplama taşı olarak kullanılabilirliğine ilişkin tasarım ve mühendislik özellikleri analiz edilmiş ve bu kayaaların fiziko-kimyasal etkileşimlerine karşı dirençleri de ayrıntılı olarak irdelenmiştir [3].

zdoğlar tarafından yapılan çalışmada, evrensel bir malzeme olarak dünyayı, insanlığa ifade etmekte bir araç olarak kullanılan doğal taşın sınırlarını belki de sınırsızlığını gösteren farklı coğrafya ve kültürlerdeki taş kullanımı, sanat ve mimarlık tarihinde yer edinmiş bazı yapılar nitel yöntemler ile incelenerek irdelenmiş ve farklı coğrafyalarda benzer simgesel anlamlarla şekillendirilmiş yapı ve eserlerden yararlanılarak, doğal taşın çağlara ve kıtalara uzanan yolculuğu analiz edilmiştir [4].

ztank tarafından yapılan çalışmada, sürdürülebilirlik/ekolojik ölçütlere göre doğal taşın, malzeme ve mimaride kullanımı incelenerek üretiminden kullanıma kadar olan aşamaları ele alınmış ve doğal taş kullanılan binaların sürdürülebilir yapı ilkelerine göre performansı değerlendirilmiştir [5].

Canbolat ve Gürani tarafından yapılan çalışmada, genelde taşıyıcı eleman ve kaplama malzemesi olarak kullanılan doğal taşların, günümüzde hem blok hem de ince kesitler hâlinde mobilya tasarımında kullanılması ele alınmıştır [6].

Gürani ve Canbolat tarafından yapılan çalışmada, doğal taş malzemenin geçmişte ve günümüzde farklı kullanım biçimlerini incelenmiş ve bu farkın nedenlerini ortaya koyulmuştur [7].

Onay tarafından yapılan çalışmada, Rönesans Dönemi'nde Floransa'da kullanılan yerel doğal taşların yapısal bütün içindeki yerleri tartışılarak, malzeme ve mimarlık arasında kurulan güçlü ilişki vurgulanmıştır [8].

Özkahraman ve Işık tarafından yapılan çalışmada, Gölcük volkanizmasının ürünü olan İsparta'da yüzeylenen ve yörede köyke taşı olarak isimlendirilen kaynaklanmış tüflerin mukavemeti, yoğunluk ve gözenekliliği ölçülmüş ve kaynaklanmış tüf taşlarının duvarlara levhalar hâlinde kaplanmasını sağlayacak özel bir yapıştırma harcı da ortak bir çalışma ile geliştirilmiştir [9].

Çelik tarafından yapılan çalışmada, yapıların döşeme ve kaplamalarında, binaların iç ve dış mekânları, çevre düzenlemeleri, yaya yolu ve kaldırımlarda kullanılan mermer, traverten, granit, andezit, bazalt ve tüf gibi doğal taş ürünlerinin kullanım alanları ve çeşitleri ele alınmıştır [10].

Daloğlu ve Emir tarafından yapılan çalışmada, tüflerle ilgili bir standardın oluşturulmasına ışık tutmak ve mevcut standartlara göre de Eskişehir-Derbent tüflerinin doğal yapı taşı olarak değerlendirilebilirliği incelenmiştir. Bu kapsamda, Eskişehir-Derbentte bulunan bir kesme taş ocağındaki beyaz tüflerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri belirlenmiş ve mevcut standartlara göre doğal yapı taşı olarak değerlendirilebilirliği araştırılmıştır [11].

Özkahraman ve Bolattürk tarafından yapılan çalışmada, Isparta bölgesindeki binalarda gözenekli köyke taşı (kaynaklanmış tüf) kullanılması ile sağlanan enerji tasarrufu araştırılmış ve hesaplar ömür maliyet analizi dikkate alınarak yapılmıştır. Çalışma sonucunda, dış duvarlarda köyke taşı kullanılması ile beton duvara nazaran % 60 oranında enerji tasarrufu sağlanacağı ortaya konmuştur, ilk yatırım masraflarının da sağlanacak enerji tasarrufu ile yedi yılda karşılanacağı belirlenmiştir [12].

Bekar ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, doğal bir puzolan malzeme olması sebebiyle sıva harcı üretiminde de kullanılabilecek endüstriyel bir hammadde olan Aksaray Bölgesi volkanik tüf oluşumlarının sıva harcı olarak kullanımı üzerine yapılmış bir araştırmanın bulguları sunulmuştur [13].

Kibici ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, Afyon zonu içerisinde güneyden kuzeye doğru, akan lavların ve piroklastik malzemelerin mineralojik ve petrografik özellikleri tanımlanmıştır [14].

Kuşçu ve Yıldız tarafından yapılan çalışmada, Afyon-Ayazın Bölgesindeki taş ocaklarından toplanan değişik karakterli kayaç örnekleri üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve bunlar kimyasal analiz, mikroskobik inceleme ve fiziko - mekanik testler olmak üzere başlıca üç bölümde yürütülmüştür. Mikroskobik incelemeler neticesinde tüfte, camdan oluşan bir hamur içerisinde kuvars, plajiyoklaz, sanidin ve biyotit fenokristalleri gözlenmiştir. Kimyasal analiz verilerinin yorumlanması ile Ayazın tüflerinin riyolit bileşimli olduğu tespit edilmiştir. Fiziko-mekanik testler sonucunda Ayazın tüflerinin betonarme karkas yapılarda duvar dolgu malzemesi ve yığma yapı temellerinde, su basman seviyesinin üst bölümlerinde yapı taşı olarak kullanılabilir özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca güzel renk ve desene sahip taşlar ise binaların dış cephe kaplamalarında sınırlı olarak kullanılabilirliği ortaya konmuştur [15].

Kavas ve Çelik tarafından yapılan çalışmada, Ayazini (Afyon) civarında yüzeylenmiş olan tüflerin çimento sanayiinde tras olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bunun için Ayazini türlerinin kimyasal, mineralojik, fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiş, TS 25 (Tras) standartlarına uygunluğu kontrol edilmiştir. Üretilen tüf katkılı çimento örneklerine yapılan basınç dayanımları 5,7-10,6 N/mm² arasında değişirken, eğilmede çekme dayanımları 1,4-2,5 N/mm² olarak bulunmuştur. Yapılan testler sonucunda Ayazini bölgesinde bulunan tüflerin katkılı çimento üretiminde tras olarak kullanılabilirliği görülmüştür [16].

Bayırlı ve Pekin tarafından yapılan çalışmada, morfolojik açıdan benzersiz geometrik şekillere sahip olabilen volkanik tüf yüzeylerinde oluşan birikintilere ait yapısal özellikler, yüzeyde bulunan gözeneklerin geometrik yapısı ve sınırları belirlenmiştir. Bu amaçla, doğal birikintileri bulunan volkanik tüf yüzeyi görüntüleri fotoğraf makinesi kullanılarak bilgisayar ortamına taşınmış ve bu görüntüler farklı morfolojik yapılarına göre 8-bitli BMP resim formatına dönüştürülerek doğrusal olarak ölçeklenmiştir [17].

Atabey tarafından yapılan çalışmada, eriyonitli volkanik tüfler ile Aksaray-Nevşehir arasında bulunan yerleşim yerlerinde görülen kanser vakalar arasında ilişki ele alınmış ve haritalanarak genel dağılımı ortaya konulmuştur. Akciğer kanseri nedeni olduğu bilinen eriyonitli volkanik tüf kayaları üzerinde bulunan yerleşim yerlerinde yaşayan halkın sağlık riski özellikle bazı yerleşim birimlerinde fazlasıyla devam ettiğinden risk

altındaki yerleşim yerlerinin tahliye edilmesi, gerek halkın gerekse kuruluşların, yapı malzemesi olarak ve alt yapı hizmetleri için eriyonitli tuf kayalarının kullanılmasının önlenmesi, yerleşim birimlerinin yeşillendirilmesi, bu gibi alanların yeni yerleşimlere açılmaması tavsiye edilmiştir [18].

Sancak ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, küfeki olarak adlandırılan sıkı tüflerin fiziko-mekanik özellikleri araştırılmış ve tüflerin birim hacim ağırlığı 1465 kg/m³, özgül ağırlığı 2340 kg/m³, su emme miktarı % 19,71, porozite 62,8 ve kompasite 37,2 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçların, TSE tarafından kabul edilen niteliklere uygun olduğu görülmüştür [19].

Güner tarafından yapılan çalışmada, Güllüdağ tufü, Melendiz tufü ve Alacaşar tufü olarak üç farklı gruptan 6 adet kayaç örneğinden ince kesit çalışmaları yapılmıştır. İnce kesit incelemeleri sonucunda bölgedeki farklı ocaklardan alınan camsı kül tüflerin hepsinde ortak mineral olarak plajiyoklaz (feldspat) mineralleri ve tamamen volkan camından oluşan ve volkanik kayaçların hamur kısmını süngertaşlı-pümsin oluşturduğu görülmüştür. Pişirme (1000 °C) ve sırlama işlemleri 6 adet örnek üzerinde denenmiştir. Pişirilen örneklerin ince kesitte incelenmeleri sonucunda çeşitli farklılıkların ortaya çıktığı görülmüştür [20].

Demirdağ tarafından yapılan çalışmada, Manisa İli Kula ve Salihli ilçelerinden temin edilen volkanik cüruf agregaları ile farklı karışım oranlarında ve farklı çimento dozajlarında karışımlar hazırlanarak dayanım ve birim ağırlık açısından araştırmalar yapılmıştır [21].

Kaygısız tarafından yapılan çalışmada, Kayseri yöresinde yapıtaşı olarak kullanılabilen bazı tuf ve bazalt kayaçlarının fiziko-mekanik özelliklerin belirlenmiş ve bu kayaçlara ait korelasyon katsayıları hesaplanmıştır [22].

Akgül tarafından yapılan çalışmada, Datça bölgesindeki volkanik tüflerin yapı malzemesi olarak değerlendirilebilmesi için puzolanik aktivite özelliğinde yararlanarak elde edilen ürünlerin mekanik, fiziksel ve mineralojik özellikleri araştırılmıştır [23].

Sınıksaran tarafından yapılan çalışmada, Kapadokya (Nevşehir) bölgesinde bulunan ve ekonomik kayıplara ve çevre kirliliğine yol açan volkanik tuf ocaklarından çıkan tuf

atıklarının yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Çalışmada matris malzeme olarak polyester, takviye malzemesi olarak volkanik tuf tozları ve mermer tozları ve polimer sertleştirici olarak metil etil keton peroksit ve reaksiyon hızlandırıcı olarak kobalt oktoat kullanılmıştır. Volkanik tuf tozları ile mermer tozları kullanılarak üretilen kompozit ürünlere; şekil bozukluğu, birim hacim ağırlık, su emme, tek eksenli basınç dayanımı ve elastisite modülü, nokta yükü dayanım indeksi deneyleri yapılarak üretilen malzemenin yapı sektöründe kullanılabilmesi görülmüştür [24].

Ay tarafından yapılan çalışmada, Isparta yöresi pomza, tras ve volkanik tüflerinin çimento sanayinde katkı maddesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, ilk olarak katkı maddelerinin puzolanik aktivite değerleri belirlenmiş ve tras ile volkanik tuf arasında seçim yapılarak puzolanik aktivitesi yüksek olan tras, volkanik tuf yerine tercih edilmiştir. Daha sonra Portland çimentosu ile % 3, % 6, % 9, % 12 ve % 15 oranında pomza ve aynı oranda tras ilavesi yapılarak çimento karışımları hazırlanmıştır. Sonuç olarak, Isparta yöresi pomza, tras ve volkanik tüflerinin çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabilmesi belirlenmiştir [25].

Koçu tarafından yapılan çalışmada, Konya çevresindeki volkanik tufun yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi için puzolanik aktivite özelliğinden yararlanarak elde edilen mamul ürünlerinin fiziksel, mekanik, kimyasal özelliklerin araştırılmış ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir [26].

Righi ve Bruzzi tarafından yapılan çalışmada, İtalya'daki binaların yapımında kullanılan 42 adet yapı malzemesindeki doğal radyoaktivite araştırılmıştır. Yapı malzemelerinin içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerinin aktivite derişimleri gama-ışını spektrometresi kullanılarak, bu malzemelerin radon salım hızları is E-PERM elektrot iyonlaşma odası kullanılarak ölçülmüştür. Kaplama malzemesi olarak kullanılan üç adet volkanik tuf örneğindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişimi, sırasıyla 92 Bq/kg, 138 Bq/kg ve 1200 Bq/kg, 190 Bq/kg, 210 Bq/kg ve 1900 Bq/kg ve 280 Bq/kg, 270 Bq/kg ve 1900 Bq/kg olarak ölçülmüştür. Bu üç örneğin radon salım hızları ise, 0,041 Bq/kg/h, 0,103 Bq/kg/h ve 0,17 Bq/kg/h olarak ölçülmüştür [27].

Değerlier tarafından yapılan çalışmada, Kapadokya Bölgesinde üretilen 6 farklı renkteki volkanik tuf örneğindeki doğal radyonüklitlerin aktivite derişimleri bir HPGe dedektörlü gama-ışını spektrometresi ile ölçülmüş ve bu örneklerin mineralojik

kompozisyonu X-ışını toz kırınımölçer kullanılarak belirlenmiştir. İncelenen örneklerdeki ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişimleri, sırasıyla, 50,7 Bq/kg, 58,6 Bq/kg ve 717,6 Bq/kg olarak ölçülmüştür. Volkanik tüf örneklerinin kaplama ve/veya dekorasyon amaçlı yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğini değerlendirmek için radyum eş değer aktivite indisi, dış ışınlama sağlık indisi, gama indisi, havada soğurulmuş gama-ışını doz hız ve buna karşılık gelen yıllık etkin doz hızı hesaplanmıştır [28].

Lanzo ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, İtalya'nın Lipari Adasındaki volkanik ürünlerin petrografik ve radyometrik analizleri yapılmıştır [29].

Literatür değerlendirmesinden, Türkiye'de yalıtım ve/veya dekoratif amaçlı olarak konut, okul, işyeri vb. binaların iç ve dış alanlarında kullanılan volkanik tüf taşlarının yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğine yönelik fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinin ele alındığı görülmektedir. Sadece Değerlier tarafından yapılan çalışmada [28], Kayseri İlinden temin edilen altı adet volkanik tüf taşlarının radyoaktivitesine ilişkin bilgi yer almaktadır. Bu tezde, Nevşehir ve Kayseri İllerinde farklı yerlerde bulunan on iki ocaktan toplanan farklı renkteki elli dokuz volkanik tüf taş örneğinin içerdiği ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın aktivite derişimleri, bir yüksek saflıktaki germanyum (HPGe) dedektörlü gama-ışını spektrometresi kullanılarak ölçüldü ve bu doğal radyonüklitlerden yayımlanan iyonlaştırıcı radyasyonun, insan sağlığında oluşturabileceği radyolojik risk değerlendirildi. Bu açıdan bakıldığında tez kapsamında yapılan çalışma, volkanik tüf taşlarının radyoaktivitesine yönelik kapsamlı ve ayrıntılı olarak yapılan ilk çalışmadır.

Bu tez beş bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın birinci bölümünde, yapı malzemelerindeki radyoaktivitenin ölçülmesinin radyolojik açıdan önemi ve çalışmanın amacı açıklanmıştır ve volkanik tüf taşlarına yönelik literatürde yer alan çalışmalar özetlenmiştir. İkinci bölümünde, radyoaktivite, bozunum süreçleri, doğal radyoaktif seriler, radyasyon, iyonlaştırıcı radyasyonun madde ile etkileşmesi, doz birimleri kısa ve özlü bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, volkanik tüf taşlarının yapısına ve üretimine ilişkin bilgi verilmiş ve farklı ocaklardan temin edilen volkanik tüf taş örneklerinin radyoaktivite ölçme işlemine hazırlanması, HPGe gama-ışını spektrometresi ve radyoaktivite ölçme işlemi ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Dördüncü bölümde, elde

edilen aktivite ölçüm sonuçları, tablo ve grafik hâlinde sunulmuş ve volkanik tuf örneklerinde ölçülen ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K aktivite sonuçları hem birbirleriyle hem de literatürdeki veriler ile karşılaştırılmış ve bu malzemelerin kullanılmasını radyolojik açıdan değerlendirmek amacıyla radyoaktivite ölçümü yapılan her bir volkanik tuf örneği için radyolojik parametreler (radyum eşdeğer aktivite indisi, aktivite derişim indisi, alfa indisi, kapalı ve açık ortamdaki havada soğurulan gama-ışını doz hızları ve bunlara karşılık gelen yıllık etkin radyasyon doz hızları ve kanser riski) hesaplanmış ve sonuçlar tablo ve grafik hâlinde sunulmuştur. Beşinci bölümde, elde edilen aktivite derişim ve radyolojik parametre verileri, tavsiye edilen ölçüt değerler ile karşılaştırılarak volkanik tuf taşlarının kaplama ve yapısal malzeme olarak kullanılabilirliği tartışılmıştır.

BÖLÜM 2

2.1. Radyoaktivite

Kararsız çekirdeklerin kendiliğinden bozunarak daha kararlı çekirdeklere dönüşmesi ve bozunum boyunca radyasyon yayması süreci radyoaktivite olarak isimlendirilir. Mevcut olan 92 elementin 300'e yakın izotopundan 60 kadarı kararlı değildir ve atom numarası 81 ila 92 arasında yer alan elementlerin hepsi kararsızdır. Doğal radyoaktivite 1896'da Henri Becquerel tarafından rastlantı sonucu keşfedilmiştir. İki yıl sonra 1898'de Rutherford, uranyum tarafından yayınlanan radyasyonun (ışınımın) iki tür olduğunu buldu ve bunları alfa ve beta olarak isimlendirdi. İki yıl sonra Villard, radyoaktif çekirdeklerin bozunum süreci esnasında yayınladığı üçüncü radyasyon olan gama-ışınımını keşfetti [43]. Daha sonraki yıllarda yapılan araştırmalarda, radyasyonların özellikleri araştırılmaya başlandı. Bu araştırmalar, radyasyonun, çeşitli maddelerdeki giriciliği, gazları iyonlaştırma özelliği ve elektrik ve manyetik alan altındaki davranışları esas alınarak yapıldı.

2.2. Bozunum Süreçleri

Kararsız bir çekirdek alfa, beta ve gama bozunumu gibi bozunum süreçlerinden biri veya birden fazlası ile daha kararlı duruma geçebilir. Alfa ve beta bozunum sürecinde, kararsız bir çekirdek bir α veya bir β parçacığı yayınlayarak daha kararlı bir çekirdek hâline dönüşür yani kütle numarasına göre en kararlı izobara yaklaşır. Gama bozunumunda, uyarılmış bir durumdaki çekirdek değişmeden taban duruma bozunur [44].

2.2.1. Alfa bozunumu

Bu süreçte, kararsız çekirdek bir alfa parçacığı yayınlamaya (Rutherford ve arkadaşları bu parçacığın bir helyum (${}^4\text{He}$) çekirdeği olduğunu göstermişlerdir). Alfa bozunum denklemi,



olarak verilir. Burada X ve Y ilk ve son çekirdeklerin kimyasal simgelerini göstermektedir. Bozunum, kütle, yük, spin, parite vb. korunum kanunlarına uymaktadır.

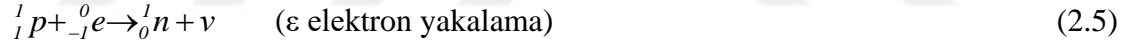
Alfa bozunumuna bir örnek olarak yarılanma süresi 1620 yıl olan radyum (^{226}Ra) bozunumu



gösterilebilir. Bozunum sonucunda ^{226}Ra , yarılanma süresi 3,8 gün olan kararsız radon (^{222}Rn) ürün çekirdeğine dönüşmüş ve yaklaşık 4,8 MeV enerjili alfa yayınlanmıştır [44].

2.2.2. Beta bozunumu

Kararsız çekirdek fazla proton veya nötronundan, bir protonu nötrona veya bir nötronu protona dönüştürerek daha kararlı duruma gelebilir. Bu bozunum süreci, üç farklı yolla gerçekleşebilir [44].



Birinci bozunum süreci negatif β bozunumu veya negatron bozunumu olarak bilinir ve bir elektron ile antinötrinin yayınlanmasını kapsar. İkinci bozunum süreci pozitron β bozunumu veya pozitron bozunumu olarak bilinir ve pozitif yüklü bir elektron ile nötrinin yayınlanmasını kapsar yayınlanır. Elektron yakalama olarak bilinen üçüncü bozunum sürecinde, çekirdeğe en yakın elektron çekirdek tarafından yakalanır ve sonuçta bir nötron ile nötrinin yayınlanır [44]. Pozitif ve negatif β bozunumunda, elektron veya pozitron çekirdek bozunuma uğramadan önce çekirdek içinde bulunmaz. Alfa bozunumunda durum bunun tam tersidir ve yayınlanan nükleonlar, çekirdek bozunuma uğramadan önce çekirdeğin içindedir.

Bazı β bozunum örnekleri aşağıda verilmiştir:



Bu süreçlerde, proton sayısı (Z) ve nötron sayısı (N) bir birim değişir ancak Z+N toplam kütle sayısı değişmez [44].

2.2.3. Gama bozunumu

Radyoaktif gama-ışını yayınlanması, optik veya X- ışını geçişleri gibi atomik radyasyon yayınlanmasına benzer. Çekirdek uyarılmış bir durumdan, daha düşük bir uyarılmış duruma veya taban durumuna, nükleer durumlar arasındaki farka eşit bir enerjiyle, bir γ -ışını yayınlamaya geçer. Gama-ışını yayınlanması uyarılmış bağlı durumları olan ($A > 5$) tüm çekirdeklerde gözlenir ve genellikle α ve β bozunum sürecini takip eder. Çünkü bu bozunumlarda ana çekirdek ürün çekirdeğin uyarılmış durumunda kalır [44].

Gama-ışını yayınlanmasının yarı ömrü çok kısadır, genellikle 10^{-9} s'den daha küçüktür, ancak saat, hatta gün mertebesinde yarı ömürlü γ -ışını yayınlanması da mevcuttur. Bu geçişler, izomerik geçişler olarak bilinir ve uzun ömürlü uyarılmış durumlara izomerik durumlar veya izomerler (veya bazen yarı kararlı durumlar) denir. Bir durumun izomerik bir durum olup olmadığını belirlemenin kesin bir ölçütü yoktur. Önceleri yarı ömrü doğrudan ölçülebilen durumlar izomerik durum olarak kabul ediliyordu, ancak bugün 10^{-9} s'nin altındaki değerler de ölçülebilmektedir. Bir yarı kararlı (metastable) durumu belirtmek için genelde "m" üst indisi kullanılır (örneğin $^{110}\text{Ag}^m$ veya ^{110m}Ag). Gama-ışını yayınlanması ile yarışan bir olay iç dönüşümdür, bu olayda bir çekirdek enerjisini doğrudan doğruya bir atom elektronuna aktararak bozunur ve laboratuvarında bir serbest elektron gözlenir [44].

2.3. Doğal Radyoaktif Seriler

Doğal radyoaktif izotopların birçoğu ağır elementlerden oluşmaktadır. Bu ağır elementler üç seride toplanmaktadır. Bunlar uranyum (^{238}U), toryum (^{232}Th) ve aktinyum (^{235}U) serileridir. n bir tam sayı olmak üzere bu seriler, $4n$, $4n+2$, $4n+3$ denklemleri ile tanımlanır. n değeri seriye bağlı olarak 51 veya 52' den 58 veya 59' a kadar değişir. Bu denklemlerle serideki radyoaktif çekirdeklerin kütle numaraları elde edilir. Alfa bozunumu yapan bir radyonüklitin kütle numarası dört birim azalır. Beta bozunumu yapan radyonüklitin kütle numarası değişmez. Bu nedenle bu serilerden herhangi birinde bir bozunum gerçekleşirse, oluşan yeni element yine aynı serinin bir

üyesi olur. Bu üç seriye adını veren uranyum, toryum ve aktinyum elementlerine ait bazı özellikler Tablo 2.1.' de verilmiştir [43].

Tablo 2.1. Toryum, uranyum ve aktinyum elementlerine ait bazı özellikler [44]

| Element | Türü | En son bozunum ürünü | Yarı ömür (y) |
|----------|------|----------------------|-----------------------|
| Toryum | 4n | ²⁰⁸ Pb | 1.41×10^{10} |
| Uranyum | 4n+2 | ²⁰⁶ Pb | 4.47×10^9 |
| Aktinyum | 4n+3 | ²⁰⁷ Pb | 7.04×10^8 |

Bu üç serinin de en kararlı elementi kurşunun izotoplarıdır. Tablo 2.2, Tablo 2.3. ve Tablo 2.4.'de sırasıyla toryum, uranyum ve aktinyum bozunum serilerine ait radyonüklitler ve bazı özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 2.2. Doğal toryum serisi üyelerinin bazı özellikleri [43]

| Element- Z | Sembol | Yarı ömrü | Alfa (MeV) | Beta (MeV) | Gamma (MeV) |
|--------------|-------------------|-------------------------|------------|------------|-------------|
| Toryum- 90 | ²³² Th | $1,40 \times 10^{10}$ y | 4,00 | - | 0,06 |
| Radyum- 88 | ²²⁸ Ra | 5,8 y | - | 0,054 | - |
| Aktinyum- 89 | ²²⁸ Ac | 6,13 h | - | 1,11 | 0,09 |
| Toryum- 90 | ²²⁸ Th | 1,91 y | 5,43 | - | 0,08 |
| Radyum- 88 | ²²⁴ Ra | 3.7 gün | 5,68 | - | 0,24 |
| Radon- 86 | ²²⁰ Rn | 55.6 s | 6,29 | - | - |
| Polonyum- 84 | ²¹⁶ Po | 145 ms | 6,78 | - | - |
| Kurşun- 82 | ²¹² Pb | 10,6 h | - | 0,36 | 0,238 |
| Bizmut- 83 | ²¹² Bi | 60,6 dk | 6,05 | 2,20 | 0,04 |
| Polonyum- 84 | ²¹² Po | 300 ns | 8.78 | - | - |
| Talyum- 81 | ²⁰⁸ Tl | 3.1 dk | - | 1.79 | 2.62 |
| Kurşun- 82 | ²⁰⁸ Pb | Kararlı | | | |

Tablo 2.3. Doğal uranyum serisinin üyelerinin bazı özellikleri [43]

| Element- Z | Sembol | Yarı ömrü | Alfa (MeV) | Beta (MeV) | Gamma(MeV) |
|------------------|--------------------------------|-------------------------|------------|------------|------------|
| Uranyum- 92 | ²³⁸ U | 4,5 x 10 ⁹ y | 4,2 | - | 0,048 |
| Toryum- 90 | ²³⁴ Th | 24,1 gün | - | 0,19 | 0,09 |
| Protaktinyum- 91 | ²³⁴ Pa ^m | 1.17 dk | - | 2,29 | 1,0 |
| Uranyum- 92 | ²³⁴ U | 2.5 x 10 ⁵ y | 4,8 | - | 0,05 |
| Toryum- 90 | ²³⁰ Th | 7.7 x 10 ⁴ y | 4,8 | - | 0,068 |
| Radyum- 88 | ²²⁶ Ra | 1600 y | 4,8 | - | 0,186 |
| Radon- 86 | ²²² Rn | 3.82 gün | 5,49 | - | 0,5 |
| Polonyum- 84 | ²¹⁸ Po | 3.05 dk | 6,00 | - | - |
| Kurşun- 82 | ²¹⁴ Pb | 26.8 dk | - | 0,65 | 0,24 |
| Bizmut- 83 | ²¹⁴ Bi | 19.9 dk | 5,5 | 1,5 | 0,61 |
| Polonyum- 84 | ²¹⁴ Po | 164 µs | 7,7 | - | 0,8 |
| Kurşun- 82 | ²¹⁰ Pb | 22.3 y | - | 0,016 | 0,046 |
| Bizmut- 83 | ²¹⁰ Bi | 5.0 gün | - | 1,16 | - |
| Polonyum-84 | ²¹⁰ Po | 138 gün | 5,30 | - | 0.80 |
| Kurşun- 82 | ²⁰⁶ Pb | Kararlı | | | |

Tablo 2.4. Doğal Aktinyum serisi üyelerinin bazı özellikleri [43]

| Element- Z | Sembol | Yarı ömrü | Alfa (MeV) | Beta (MeV) | Gamma (MeV) |
|------------------|-------------------|-------------------------|------------|------------|-------------|
| Uranyum- 92 | ²³⁵ U | 7,0 x 10 ⁸ y | 4,38 | - | 0,185 |
| Toryum- 90 | ²³¹ Th | 25,5 h | - | 0,30 | 0,25 |
| Protaktinyum- 91 | ²³¹ Pa | 3,3 x 10 ⁴ y | 5,06 | - | Birçok |
| Aktinyum- 89 | ²²⁷ Ac | 21,8 y | 4,95 | 0,046 | Birçok |
| Toryum- 90 | ²²⁷ Th | 18,7 gün | 6,04 | - | Birçok |
| Radyum- 88 | ²²³ Ra | 11,4 gün | 5,86 | - | Birçok |
| Radon- 86 | ²¹⁹ Rn | 4,0 s | 6,82 | - | 0,27 |
| Polonyum- 84 | ²¹⁵ Po | 178 ms | 7,38 | - | - |
| Kurşun- 82 | ²¹¹ Pb | 36,1 dk | - | 1,36 | 0,83 |
| Bizmut- 83 | ²¹¹ Bi | 2,15 dk | 6,62 | 0,59 | 0,35 |
| Talyum- 81 | ²⁰⁷ Tl | 4,79 dk | - | 1,44 | 2,90 |
| Kurşun- 82 | ²⁰⁷ Pb | Kararlı | | | |

2.4. Radyasyon

Radyasyon, dalga, parçacık veya foton olarak adlandırılan enerji paketleri ile yayılan enerjidir ve daima doğada var olan, birlikte yaşadığımız bir olgudur. Radyo ve televizyon iletişimini olanaklı kılan radyo dalgaları, endüstride kullanılan X-ışınları ve güneş ışınları günlük hayatımızda alışkın olduğumuz radyasyon çeşitleridir. Radyasyon ilk çağlardan beri vardır ancak insanlığın radyasyonu keşfetmesi 1896'da Fransız fizikçi Henri Becquerel'in uranyum tuzunun ışınlar yaydığını fark etmesiyle gerçekleşmiştir. Teknolojinin ve sanayinin gelişmesiyle de uranyum elementi kullanılmaya başlanmış ve radyasyonun etkileri giderek artmıştır [45].

2.4.1. İyonlaştırıcı radyasyon çeşitleri

2.4.1.1. Elektromanyetik radyasyonlar

Gama ve X-ışınları elektromanyetik radyasyonlardır. Bunlar yüksek frekanslı görünen ışık ve radyo dalgaları gibi elektromanyetik dalgalardır ve dalga boyları çok küçük olmasına rağmen enerjileri yüksektir [45].

2.4.1.1.1. Gama-ışınları

Manyetik alanda sapmadıkları için belirli bir elektrikle yüklü değillerdir. Gama-ışınları elektromanyetik dalgalardan meydana gelmiştir. Radyoaktif bozunumlar veya nükleer tepkimeler sonucu oluşan kararsız atom çekirdeklerinden yayılan bir çeşit elektromanyetik ışınlardır [45].

2.4.1.1.2. X-ışınları

Hızlandırılmış elektronlar hedef seçilen atomların çekirdeklerine yaklaştıklarında, frenleme olur. Bu frenleme sonucunda, X-ışınları oluşur [45].

2.4.1.2. Parçacıklı radyasyon

2.4.1.2.1. Alfa (α) ışınları

Alfa ışınları (+) yüklü parçacıklardan oluşur. Bu yöndeki çalışmalar alfa ışınlarının artı yüklü helyum çekirdeklerinden (He^{++}) meydana geldiğini göstermiştir. Bir kâğıt parçası veya cildimiz tarafından durdurulabilir [45].

2.4.1.2.2. Beta (β) ışınları

Beta ışınları (+) ve (-) elektrik yüklerinden meydana gelmişlerdir. İnce bir su, metal levha veya cam tabakası bu elektronları durdurmak için yeterlidir. Alfa ve beta ışınları atomun çekirdeğinden kaynaklanan radyoaktif ışınlardır. Her iki ışın da belirli bir kütleyle sahiptir. Alfa ve beta ışınları kütleleri ve elektriksel yüklerinden dolayı, X ve gama-ışınlarına göre, maddelere daha az nüfuz ederler. Ancak, bu ışınların iyonlaştırıcı etkileri daha fazladır. Nötron ve proton ise kütleleri alfa ışınlarının dörtte biri kadar olan nükleer taneciklerdir. Çeşitli nükleer reaksiyonlar sırasında çekirdekten kopan nötron ve protonlar insan sağlığı için en tehlikeli radyasyonlardır. Özellikle nötron, elektrik yükü olmadığından çok büyük nüfuz etme özelliğine sahiptir. Radyoaktif ışınların insan vücuduna etkisi bu ışınların hareketleriyle ilgilidir [45].

2.5. İyonlaştırıcı Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi

Radyasyonun madde ile etkileşimleri biyolojik, kimyasal ve fiziksel değişimlere yol açar. Alfa ve beta gibi yükü olan radyasyon genellikle atomun bağlı/yörünge elektronlarıyla etkileşir. Radyasyonun elektrondan nasıl saçılacağını yükü ve kütlesi belirler. Ağır bir parçacık, kendinden çok hafif elektronları yoğun bir şekilde saçarak enerjisinin az bir kısmını kaybeder. Elektron-elektron saçılmaları ise enerji paylaşımına yol açar. Fotonlar madde içerisinde ilerlerken uzun menzilli etkileşmezler ve sadece yerel veya kesikli etkileşimler geçirirler. Yüklü parçacıkların aksine Coulomb veya nükleer kuvvete maruz kalmazlar. Dolayısıyla, bir foton demeti herhangi bir malzeme içerisinde ilerlerken, etkileşim geçiren fotonlar demetten ayrıldıkça demetin şiddeti de azalır, ancak etkileşmeyen fotonların enerjileri sabit kalır. Fotonlar, baskın biçimde hızlı hareket eden elektronlar açığa çıkaracak şekilde etkileşirler. Düşük enerjili fotonlar sadece bir kez etkileşir ve tek bir birincil elektron oluşturur. Enerjili fotonlar ise birkaç kez etkileşebileceğinden, enerjileri tükenene kadar birkaç birincil elektron oluşturabilecektir. Yüksek enerjili fotonlar ise madde-antimadde çifti oluşturabilir ve böylece ikincil elektronlar oluşabilir. Demette kalan yani madde içinde etkileşmeye uğramayan fotonların enerjileri sabit kalır ve böylece belli bir malzeme kalınlığı içerisinde bir fotonun etkileşme olasılığı da fotonun enerjisi ne olursa olsun sabit kalır. Bir foton demetindeki elektromanyetik ışımının madde içindeki zayıflaması Beer-Lambert yasası ile ifade edilir:

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

Burada I_0 ve I sırasıyla malzeme üzerine gelen ve x kalınlığındaki malzemedan geçen demet şiddetlerini temsil eder. μ malzemenin toplam doğrusal soğurma katsayısıdır. Foton enerjisine ve malzemenin cinsine bağlı bir sabittir. Malzeme içindeki fotonların ortalama serbest yolu $\lambda=1/\mu$ ile verilir. Yarı-değer kalınlığı ise $X_{1/2} = \ln 2/\mu$ şeklinde ifade edilir. Zayıflamanın üstel doğası geçen radyasyonun şiddetinin sıfıra gitmeyeceği anlamına gelir. Kütleli soğurma katsayısı (μ/ρ), doğrusal soğurma katsayısının (μ) malzemenin yoğunluğuna (ρ) bölünmesiyle elde edilir. Soğurucunun fiziksel hâinden bağımsızdır ve temel etkileşimlerin atom başına tesir kesiti ile ifade edilebileceği gerçeğini temsil eder.

2.5.1. Gama ve X- ışınlarının etkileşim mekanizmaları

2.5.1.1. Fotoelektrik soğurma

İlk olarak Einstein tarafından tanımlanmıştır. Yaygın kullanışı vardır. Fotosellerin ışığı algılaması, güneş ışığını enerjiye dönüştüren fotovoltaik pillerdir. Bu olayda tek bir foton bir serbest elektrona dönüşür. Bağlı bir elektron ile etkileşen foton, tamamen soğurulur ve elektron atomdan belli bir kinetik enerji ile kopar. Momentumun korunumu gereği elektronun atoma bağlı olması şarttır. Atomdan kopan elektron malzeme içinde saçılmalara uğradıkça kinetik enerjisini kaybeder. Fotoelektrik soğurmanın gerçekleşme olasılığı veya tesir kesiti, keV bölgesindeki fotonlar için atomun büyüklüğünün karesi mertebesinde. Artan foton enerjisi ile hızlıca azalır. Soğurucu malzemenin atom numarasına sıkıca bağlıdır. Fotoelektrik soğurmada, kopan elektronun geride bıraktığı kabuk boşluğu atomik geçişler yoluyla doldurulur. Bu sürece floresan olayı adı verilir ve üst kabuktan bir elektron alt kabuktaki boşluğu doldurduğunda genellikle bir X-ışını fotonu yayılır. Floresan fotonunun doğrultusu gelen fotonun doğrultusu ile ilgisizdir ve az miktarda foton soğurucudan ters yöne doğru yayılabilecektir. Dolayısıyla soğurucu bir malzeme yüksek enerjili fotonlara maruz kaldığında kendine özgü karakteristik X-ışınları yayacaktır. Gama-ışını spektroskopisi sistemlerinde kullanılan kurşun zırhlarda karakteristik X-ışınları gözlemlenebilir ve bu ışınlar düşük enerjili fotonlar için ölçüm yapılırken ölçüm sonuçlarını etkiler. Bu problemi çözmek için kurşun zırhların iç yüzeyine alüminyum veya bakır tabakalar eklenerek kurşunun yayacağı X-ışınlarının soğurulması sağlanır [44].

2.5.1.2. Compton saçılması

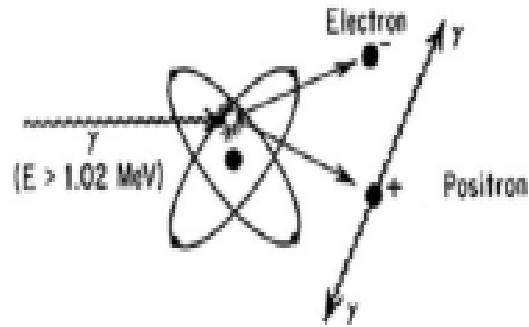
Madde içerisine giren fotonun enerjisi en iç kabuktaki elektronların tipik bağlanma enerjisinden büyükse, fotoelektrik soğurma olasılığı fotonun elektrondan saçılma olasılığının altına düşer. Gelen foton, enerjisinin bir kısmını kaybetmiş şekilde elektrondan saçılır ve sonuçta elektron atomdan kopar. Bu sürece Compton saçılması adı verilir [44].



Şekil 2.1. Compton Saçılması [44]

2.5.1.3. Çift oluşumu

Gelen fotonun enerjisi iki elektron kütesinden (1,022 MeV) büyükse, çift oluşumu mümkün hâle gelir.



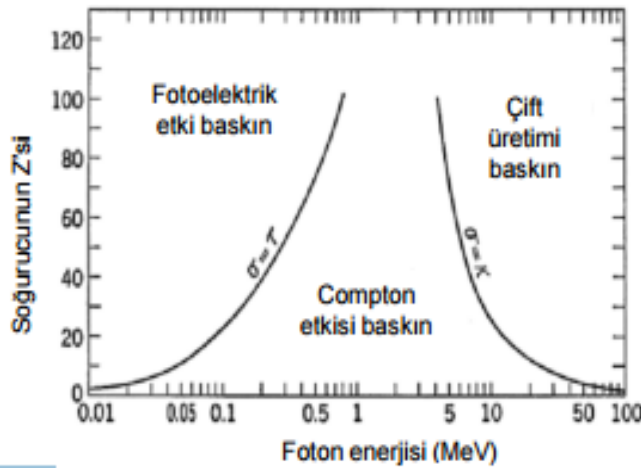
Şekil 2.2. Çift Oluşumu [44]

Gelen foton, çekirdeğin Coulomb alanı ile etkileşir ve enerjisi bir elektron-pozitron (madde-anti madde çifti) üretmeye harcanır. Coulomb alanı içerisinde enerji ve momentumun korunumu gereği, üretilen elektron ve pozitron gelen fotonun ilk doğrultusu ile küçük bir açı yaparak ileri doğru hareket ederler. Üretilen parçacık çifti, malzeme içindeki yörünge elektronları ve çekirdekler ile etkileşebilir. Elektron

durdurmada gözlenen frenleme ışması süreci çift üretimi süreci ile yakından ilgilidir. Frenleme ışmasında hareketli bir elektron atomun Coulomb alanı ile etkileşir ve iki enerji düzeyi arasında bir geçiş yapar ve bir X-ışını fotonu yayılır. Çift üretiminde ise atomik Coulomb alanı ile etkileşen bir foton yok olur ve bir çift elektron yaratılır. Çift üretimi olasılığı için eşik enerjisi 1,022 MeV'dir, yani daha düşük enerjili fotonlar için bu süreç gerçekleşemez. Tesir kesiti, hızla artar ve şekilde görüldüğü gibi 10 MeV'in üzerinde doyuma ulaşır. Çift üretimi tesir kesitinin foton enerjisi ile değişimi karmaşıktır ve soğurucunun atom numarasının karesine bağlıdır [45]. Çift üretimi yüksek enerjili fotonlar için baskın süreçtir. İki parçacık (elektron ve pozitron) üretildiği için, çift üretiminin eşik enerjisi 1,022 MeV'dir. Böylece bir kısım enerji çiftin kütlesini yaratmaya ayrılır. Elektronun yükü -e, pozitronun yükü +e olduğundan, süreçte toplam elektrik yükü korunur. Üretilen pozitron bir elektron ile karşılaştığında yok olma reaksiyonu gerçekleşir ve böylece iki parçacık üretilmeye harcanan enerji geri açığa çıkar. Yok olma süreci:



Yaratılan iki foton 180° ile sırt sırta yayılır. Bu fotonların yayımlandığı eksen, gelen fotonun doğrultusuna göre rastgele olacaktır. Çünkü pozitron atom ile ve elektronlarla çoklu saçılmalar gerçekleştirerek önce yavaşlayacaktır. Sürecin son safhasında pozitron tek bir elektron yakalar ve pozitronyum adı verilen nötr bir yapı oluşturur [44].



Şekil 2.3. Fotoelektrik Olay, Compton Olay ve çift oluşumun baskın olduğu bölgeler [44]

2.6. Radyasyon Doz Birimleri

Doz, herhangi bir maddenin belli bir zaman içerisinde kullanılan veya tüketilen miktarı olarak bilinir. Zehirli ve/veya radyotoksik kimyasallar gibi bütün zararlı maddeler alındığı vücutta, büyüklüğü maddenin cinsi, alınış şekli ve dozuna bağlı olarak değişebilen birtakım biyolojik hasarlara sebep olurlar. Bununla birlikte, doz olarak alınan maddenin tüketim hızı yani ne kadar zamanda tüketildiği de zararın büyüklüğünü belirleyici bir etkidir. Vücutta oluşabilecek hasarlar, tüketim hızına bağlı olarak artacaktır. Dolayısıyla yaşam boyunca vücut tarafından tüketilen toplam miktar, oluşabilecek hasarı belirleyen önemli bir unsurdur. Gerekli önlemler alınmadığında, belli bir sürede belli bir miktarın (kabul edilebilir sınırların) üzerinde radyasyon dozuna maruz kalan canlılarda da bazı zararlı etkilerin meydana gelmesi kaçınılmazdır. Bu zararlı etkilerin büyüklüğü, iyonlaştırıcı radyasyonunun tipine, soğurulma hızına ve soğurulan radyasyonun miktarına bağlıdır [46].

2.6.1. Aktivite birimi

Aktivite,

$$A = \lambda \cdot N \quad (2.11)$$

Eşitliği ile verilir. Burada,

λ : Bozunum sabitidir ve $\lambda=0,693/t_{1/2}$ 'ye eşittir. Burada $t_{1/2}$: Fiziksel yarılanma süresidir ve

N: Kararsız çekirdek sayısıdır.

Bir radyoaktif elementin (çekirdeğin veya izotopun) aktivitesi, birim zamanda bozunuma uğrayan çekirdek sayısı ile ölçülür. Saniyede $3,7 \times 10^{10}$ kadar bozunuma uğrayan çekirdek sayısına sahip herhangi bir radyoaktif izotopun aktivitesi 1 Ci ile verilir. Curie (Ci) birimi, radyoaktivite çalışmalarında büyük emeği geçen Polonya asıllı Fizikçi Madam Curie'ye atfen verilmiştir.

1 Ci= $3,7 \times 10^{10}$ bozunum/s dir.

Bu değer, 1 gram radyumun bir saniyede uğradığı bozunum sayısıdır. Son yıllarda, aktivite birimi olarak aktiviteyi keşfeden Fransız Fizikçi Henry Becquerel'e atfen

verilen Becquerel (Bq) kullanılmaktadır. Saniyede 1 bozunum veren radyoaktif elementin aktivitesi 1 Bq ile verilir. Dolayısıyla, 1 Ci= 3,7 x 10¹⁰ Bq dir.

2.6.2. Işınlama doz birimi

Işınlama, iyonlaştırıcı radyasyonun havayı iyonlaştırma kapasitesinin bir ölçüsüdür. Işınlamanın hesaplanmasında, birim kütle veya hacim hava içinden geçene iyonlaştırıcı radyasyon demetinin oluşturduğu iyonizasyonun ölçülmesini esas alınır. Işınlama birimi olarak standart şartlarda (0 °C ve 760 mm Hg basıncında), 1 cm³ havada 1 esb elektrik yükü oluşturan X-ışını radyasyon miktarı olarak tanımlanan röntgen (R) kullanılır. Daha sonra 1 R, 0,001293 g hava içinde 1 esb lik pozitif veya negatif elektrik yükü taşıyan iyonlar oluşturan X- ve γ - ışını radyasyon miktarı olarak tanımlanmıştır. Uluslararası birim sisteminde ise ışınlama doz birimi C/kg dır. Burada C (Coulomb) elektrik yük miktarıdır. Dolayısıyla,

$$1 R = 2,57 \times 10^{-4} C/kg \text{ dır.}$$

Bu tanıma göre 1 R, 1 kg havada 2,57 x 10⁻⁴ C'luk yük oluşturan radyasyon miktarıdır.

2.6.3. Soğurma doz birimi

Röntgen, yüksek enerjili (3 MeV'den daha büyük enerjili) X ve γ - ışınları ile α ve β radyasyonun, herhangi bir cisim tarafından soğurulmasının tanımlanmasında yetersiz kaldığından, soğurma doz birimi olarak "radiation absorbed dose" kelimelerinin baş harflerinden türetilen "rad" tanımlanmıştır. Rad, herhangi bir ortamın (dokunun) 1 gramında 100 erglik veya 1 kilogramında 10⁻² joule'lik enerji soğurulması oluşturan herhangi bir radyasyon miktarıdır.

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g} = 10^{-2} \text{ J/kg dır.}$$

Son yıllarda, soğurma doz birimi olarak Gray (Gy) kullanılmaktadır. 1 Gy, 1 kg'lık bir ortamda 1 joule'lik enerji soğurulması oluşturan radyasyon miktarıdır.

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad dır.}$$

Rad ve Gray soğurma doz birimleri, radyasyonun tipinden ve ortamdaki bağımsız olarak tanımlanmıştır [47].

2.6.4. Eşdeğer doz birimi

Yapılan çalışmalar, soğurulan dozun oluşturduğu zararlı biyolojik etkilerin, iyonlaştırıcı radyasyonun tipine ve oluşturduğu iyonizasyon yoğunluğuna bağlı olduğunu göstermiştir. Bu yüzden iyonlaştırıcı radyasyonun oluşturduğu biyolojik etkilerin bir ölçüsü olan ve buna bağlı olarak bazı parametreleri içine alan yeni bir doz biriminin tanımlanması gereği ortaya çıkmıştır. Bu yeni doz birimi olarak röntgenin insan eşdeğeri manasına gelen “roentgen equivalent man” kelimelerinin başa harflerinden türetilen “rem”, 1 R’lik X ve γ -ışını ile aynı biyolojik etkiyi oluşturan herhangi bir radyasyon miktarı olarak tanım tanımlanmıştır. Eşdeğer doz veya doz eşdeğeri aşağıdaki bağıntı ile verilir:

$$\text{Doz eşdeğeri (rem)} = \text{soğurulan doz (rad)} \times \text{ağırlık faktörü} \quad (2.12)$$

Ağırlık faktörü, X- ışını, γ -ışını ve β radyasyonu için 1, α radyasyonu için 10 değerindedir. Soğurulmuş doz birimi olarak Gray kullanıldığında, eşdeğer doz birimi olarak Sievert (Sv) elde edilir ve 1 Sv, 100 rem değerindedir.

2.7. Radyasyonun Biyolojik Etkileri

İyonlaştırıcı radyasyonun bir canlı üzerinde biyolojik etki yapabilmesi için radyasyon enerjisinin canlıyı oluşturan hücreler ve dokular tarafından soğurulması ve bu enerjinin dokularda dağılması gerekmektedir. Radyasyon canlı doku içinden hiç enerji bırakmadan geçip giderse, hiçbir biyolojik etki oluşmaz. Radyasyon enerjisinin soğurulması ile biyolojik etkinin ortaya çıkması arasında geçen süre içinde birbirini izleyen dört kademeli olay meydana gelir. Birinci kademede, radyasyonu soğuran maddenin moleküllerinde uyarılma ve/veya iyonlaşma olayları meydana gelir. Bu ilk kademede etkileşmeler sonucu ortaya çıkan ürünler, çok kısa süre içinde (10^{-10} s) ikincil tepkimelerin oluşmasına sebep olurlar ve ikincil tepkime ürünleri ortaya çıkar. İkincil tepkimeler radyasyon etkisinin ikinci kademesini, fiziko kimyasal kademe oluşturur. Üçüncü kademede olan kimyasal kademede, serbest atom veya radikaller hem birbirleriyle hem de ortamdaki moleküller ile tepkimeye girerler. Bir organizmada radyasyon etkisi ile oluşan moleküler değişiklikler ise biyolojik kademe olarak isimlendirilen dördüncü kademeyi başlatır [47]. Bu kademeler sonucunda, kromozomda meydana gelen hasarlar bir takım biyolojik etkilerin oluşmasına yol açarlar. Bu etkiler,

bedensel ve kalıtsal etkilerdir. Işınlanan kişinin kendi bedeninde meydana gelebilecek hasarlar bedensel etkiler, kendisinden sonraki nesillerde çıkabilecek hasarlar ise kalıtsal etkiler olarak adlandırılır. Bedensel ve kalıtsal etkiler de erken ve gecikmiş etkiler olarak iki farklı kategoride incelenebilir. Erken etkiler, kısa bir süre içinde ve bir defada yüksek dozlara maruz kalınması sonucunda kısa bir zaman aralığı içerisinde ortaya çıkabilecek hasarlardır. Gecikmiş etkiler ise uzunca bir süre aralıklı olarak düşük dozlara maruz kalınması sonucu ortaya çıkarlar. Erken etkiler akut ışınlanma etkileri, gecikmiş etkiler ise kronik ışınlanma etkileri olarak da adlandırılırlar [46].



BÖLÜM 3

MATERYAL VE YÖNTEM

Yerkabuğu kökenli yapı malzemelerinin doğal olarak içerdiği uranyum (^{238}U) serisi sekiz alfa ve altı beta bozunumu; toryum (^{232}Th) serisi, altı alfa bozunumu ve dört beta bozunumu ve radyoaktif potasyum (^{40}K) beta ve elektron yakalama bozunumu yaparak alfa, beta ve gama-ışını gibi iyonlaştırıcı radyasyonu yayınlamaktadır. Bu sebepten yüksek radyoaktivite içeren yapı malzemelerinin kullanıldığı konut, okul, iş yeri vb. binalarda yaşayan insanların, yapı malzemelerinden yayınlanan iyonlaştırıcı radyasyonuna maruz kalmaları, uzun zaman ölçeğinde radyolojik açıdan risk oluşturabilir. Dolayısıyla nihai yapı malzemesi ürünlerinin özellikle volkanik kökenli yapısal ve kaplama malzemelerinin içerdiği radyonüklitlerin aktivite değişimlerinin bilinmesi, bu malzemelerin kullanımlarının radyolojik açıdan değerlendirilmesi ve bu malzemelere yönelik standartların hazırlanması açısından önem arz etmektedir.

^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın aktivite değişimi, alfa, beta (sıvı sintilasyon) ve gama-ışını spektrometrik yöntemler gibi farklı yöntemler kullanılarak ölçülebilir. Bu çalışmada, Kayseri ve Nevşehir İlinde bulunan 12 volkanik tüf ocağından toplanan ve kaplama ve yapısal malzeme olarak kullanılan farklı renkteki 59 volkanik tüf örneğinin içerdiği ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın aktivite değişimi, Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ÇNAEM)-Radyoaktivite Ölçme ve Analiz Birimi (RÖA Birimi) laboratuvarlarında bulunan eş eksenli p-tipi HPGe dedektörlü gama-ışını spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür. Tezin bu bölümünde, volkanik tüf taşının özellikleri kısaca özetlenmiş, örneklerin radyoaktivite ölçme işlemine hazırlanması, ölçme işlemi ve gama-ışını spektrometresi ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

3.1. Volkanik Tüf Taşının Özellikleri

Tüfler, volkanik patlama süresince püskürtülen küllerin zamanla bir katı kayaç içinde bir araya gelerek birikmesi ve soğumasıyla sertleşerek bir kayaca dönüşmesi ile meydana gelmektedir. Tüfler, serbest olarak kuvars mineralleri içerebilir ve tortul kayaçlar gibi tabakalanma gösterebilirler.

Ülkemiz bu bakımdan son derece şanslıdır. Bu tür kayaç serileri, özellikle İç Anadolu Bölgesinde Konya, Aksaray, Nevşehir ve Kayseri dolaylarında oluşumları bulunan

volkanik yataklarda bulunmaktadır [3]. Kayseri ve Nevşehir İlindeki orta ölçekteki işletmelerde, bu bölgelerden elde edilen kayalar aynen mermer işleminde olduğu gibi işlenerek boyutlandırılmış levha ve/veya plaka şekillerine dönüştürülerek doğal olarak değişik renkteki özellikle beyaz, pembe, sarı-kırmızı desenli ve yeşil renklerin baskın olduğu tüfler üretilmektedir [3,30].

Bugün inşaat sektöründe, volkanik ve tortul veya metamorfik kökenli pek çok kaya türü doğal kaplama taşı olarak kullanılabilir. Bununla birlikte volkanik kökenli kayalar arasında, birim ağırlığı düşük, ısı ve ses yalıtım özelliği diğer kaplama taşlarına göre çok daha üstün, işlenmesi ve işçiliği çok daha kolay, farklı renk seçeneklerinde bulunabilen kaya türleri mevcuttur [3]. Ülkemizde üretilen volkanik tüfler, tuğla, perde beton ve briket duvarların kaplanmasında kullanılmasının yanı sıra özellikle Kapadokya Bölgesinde yığma binaların taşıyıcı olarak duvarlarının oluşturulmasında, cami, minare gibi yapılarda kullanılmaktadır. Volkanik tüfler ocaklarda, iki uzun ray üzerinde biri yatay biri düşey konumda dairesel iki elmas disk kesici bulunan bir makine marifetiyle doğrudan ana kayadan kesilerek üretilmektedir (Resim 3.1) [30]. 15 x 20 x 40 cm ebadındaki standart ürünler, duvar örme amaçlı ve 5 x 10 x 40 cm ebadındaki ürünler ise kaplama amaçlı üretilmektedir. Değişik amaçlı ve istenilen boyutlarda da üretim söz konusudur [30].

3.2. Örneklerin Ölçme İşlemi İçin Hazırlanması

Farklı renkteki elli dokuz volkanik tuf örneği, Kayseri ve Nevşehir’de bulunan ve konumları Şekil 3.1’de gösterilen on iki farklı ocaktan toplanmıştır. Toplanan volkanik tuf örnekleri, Nevşehir Üniversitesi-Fen Edebiyat Fakültesi Örnek Hazırlama Laboratuvarına getirilmiş ve ocak sahiplerinin ticari kaygıları dikkate alınarak tuf ocakları Q harfi ile kodlanmıştır (Tablo 3.1). Her bir volkanik tuf örneği, HPGe dedektörlü gama-ışını spektrometresinin verim kalibrasyonu için kullanılan standart kalibrasyon kaynağının geometrisine benzer duruma getirebilmek için öğütülmüş ve gözenek büyüklüğü 1 mm olan elekten geçirilmiştir (Resim 3.2). Daha sonra toz hâline getirilen her bir örnek, 110 °C’de etüvde 15-20 saat bekletilerek kurutulmuştur. Örnekler, standart kalibrasyon kaynakları ile aynı boyuta sahip 1 L hacmindeki Marinelli kaplarına aktarılmış ve net kütlelerini belirlemek için tartılmıştır. Yapılan tartım işleminden sonra ^{226}Ra ve ürün çekirdeği olan ^{222}Rn arasındaki kalıcı dengeyi

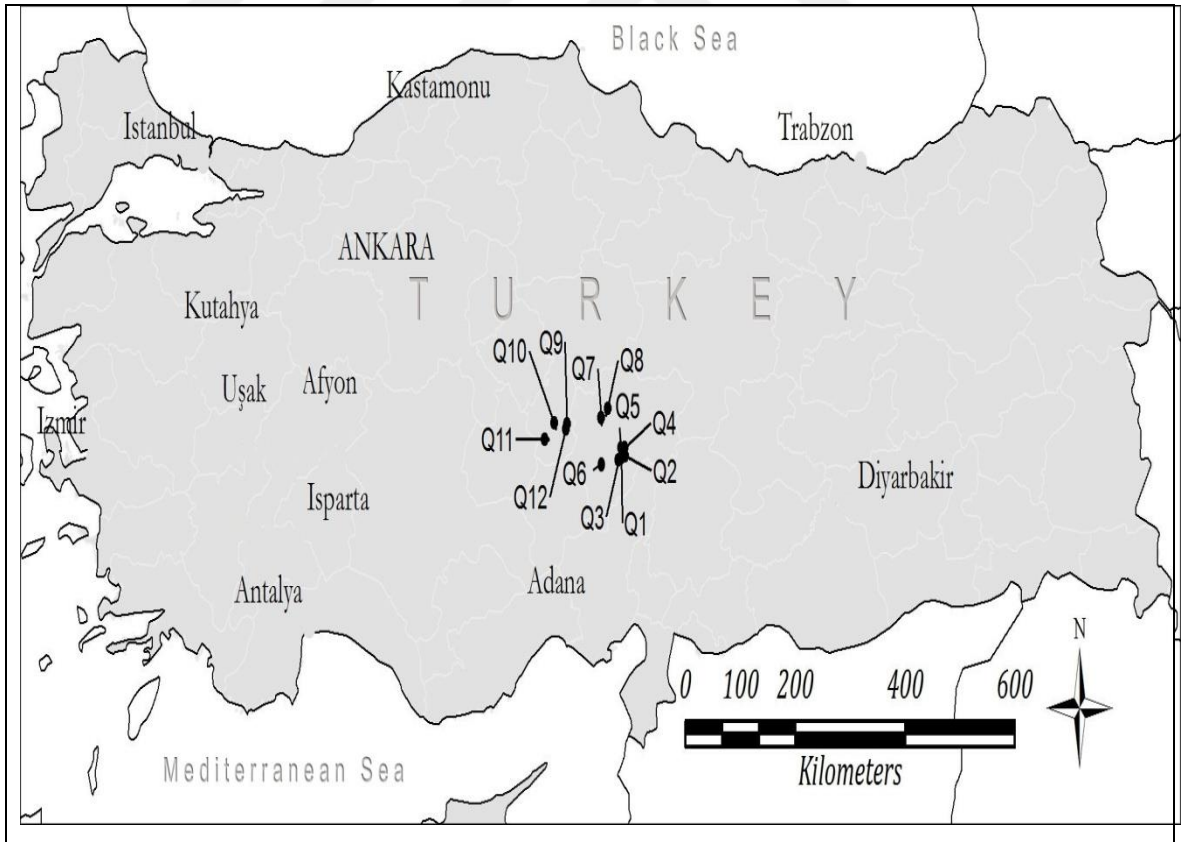
sağlamak amacıyla örneklerin içinde bulunduğu kaplar sızdırmaz bir şekilde kapatılarak en az dört hafta süreyle bekletilmiştir. Böylece örnekler, ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K radyonüklitlerinin aktivite derişimlerinin ölçülmesi işlemi için hazır hâle getirilmiştir (Resim 3.3).



Resim 3.1. Volkanik tüflerin üretim aşamaları



Resim 3.2. ' in devamı



Şekil 3.1. Örneklerin toplandığı ocakların yerleri

Tablo 3.1. Ölçme işlemine tabi tutulan volkanik tüf örnekleri

| Ocak kodu | Örnek sayısı | Örneğin rengi (örnek sayısı) |
|-----------|--------------|--|
| Q1 | 6 | Sarı (2), siyah (1), vişne (1), kurşuni siyah (1), gülkurusu (1), |
| Q2 | 6 | Sarı (2), kahverengi (1), siyah (1), gülkurusu (2) |
| Q3 | 7 | Vişne (1), kırmızı (1), kahverengi (1), sarı (1), gri (1), gülkurusu (1), siyah (1) |
| Q4 | 7 | Gri (4), siyah (1), gülkurusu (1), kahverengi (1) |
| Q5 | 4 | Sarı (3), kahverengi (1) |
| Q6 | 6 | Sarı (1), siyah (1), gri (1), gülkurusu (1), açık kahve (1), koyu kahve (1) |
| Q7 | 4 | Sarı (4) |
| Q8 | 3 | Gri (2), sarı (1) |
| Q9 | 6 | Antik sarı (1), vişne (1), siyah (1), antik beyaz (1), başdere firuze (1), antik kırmızı (1) |
| Q10 | 5 | Sarı (1), vişne (1), gülkurusu (1), açık kahve (1), devetüyü (1) |
| Q11 | 4 | Sarı-beyaz (1), beyaz (1), açık sarı (1), Kapadokya gülü (1) |
| Q12 | 1 | Beyaz (1) |



Resim 3.2. Volkanik tuf örneklerinin kırılma işlemi

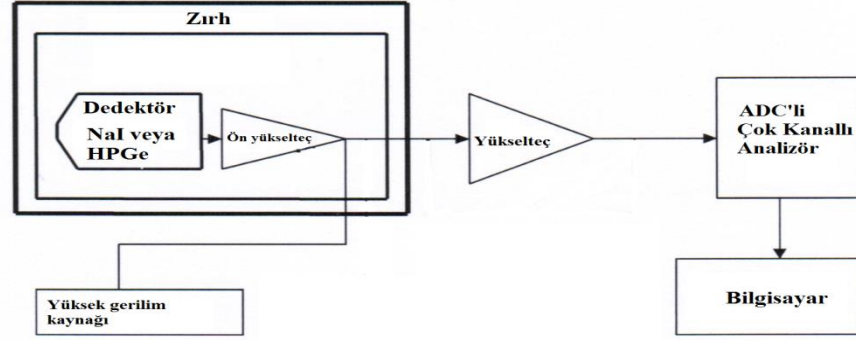


Resim 3.3. Ölçme işlemi için hazırlanmış volkanik tüf örnekleri

3.3. Gama-ışını Spektrometresi

Gama-ışını spektrometrik yöntem, radyokimyasal ayırma işlemlerine gerek duyulmadan doğrudan, tahribatsız, hızlı, güvenilir ve örneğin içerdiği bir veya birden fazla gama-ışını yayınlayan radyonüklitleri aynı anda ölçme imkânı sağlayan bir analiz yöntemidir. Gama-ışını spektrometrik yöntem, nükleer bilim, nükleer teknoloji ve sağlık fiziğinin uygulama alanlarında en çok kullanılan yöntemlerden birisidir [31]. Tipik bir gama-ışını spektrometresi NaI(Tl) sintilasyon dedektörü veya yarı iletken yüksek saflıklı germanyum dedektörü (HPGe), dedektör zırhı, yüksek gerilim kaynağı, ön yükselteç, yükselteç, analog-sayısal dönüştürücü (ADC), çok kanallı analizör, bilgisayar ve yazıcıdan oluşmaktadır (Şekil 3.2). NaI(Tl) inorganik sintilasyon dedektörlerinin verimi yüksek ancak çözme (ayırma) gücü zayıf olduğu hâlde yarı-iletken HPGe dedektörlerinin çözme gücü yüksek ancak verimi düşüktür. Gama-ışını spektrometrik yöntemde ölçme işlemi, radyoaktif çekirdeklerin bozunumları sonucunda yayınlanan gama-ışını fotonlarının dedeksiyonu ve enerjilerinin ölçülmesini esas almaktadır. Gama-

ışını fotonu enerjisi, radyoaktif çekirdeğin bir karakteristiğidir. Gama-ışınlarının dedeksiyonu, gama-ışını fotonları ile dedektör malzemesi arasındaki etkileşmeye dayanır [31].



Şekil 3.2. Tipik bir gama-ışını spektrometresi [31]

Dedektör malzemesi içinden geçen gama-ışını fotonları, fotoelektrik, Compton saçılması ve çift oluşumunu dedektör hacmi içinde gerçekleştirebilir. Fotoelektrik soğurma, düşük enerjili gama-ışınları (birkaç yüz keV'lik enerjiye kadar) ve çift oluşumu yüksek enerjili gama-ışınları (5-10 MeV) için etkin iken Compton etkileşmesinin ise bu iki enerji sınırı arasındaki enerjilerde meydana gelme ihtimali söz konusudur. Radyoaktif kaynaktan yayınlanan birincil gama-ışını fotonları veya saçılan ikincil gama-ışını fotonları dedektör atomları ile etkileşir ve dedektör hacmi içinde enerjileri birincil gama-ışını fotonlarının enerjileri ile orantılı olan hızlı elektronların meydana gelmesine sebep olurlar. Ortamda oluşan bu hızlı elektronlar, Coulomb etkileşmesi ile dedektör hacmi içinde serbestçe hareket edebilen ikincil elektronları, ikinci elektronlar da aynı etkileşme ile üçüncül elektronları oluşturabilir. İkinci ve üçüncül elektronlar, elektrik darbeleri üretmek için toplanır. Daha sonra da bu yükler bir ön yükselteç yardımı ile büyüklüğü, dedektör ortamına gelen birincil gama-ışını fotonlarının enerjileri ile orantılı olan bir gerilim darbesine dönüştürülür [31].

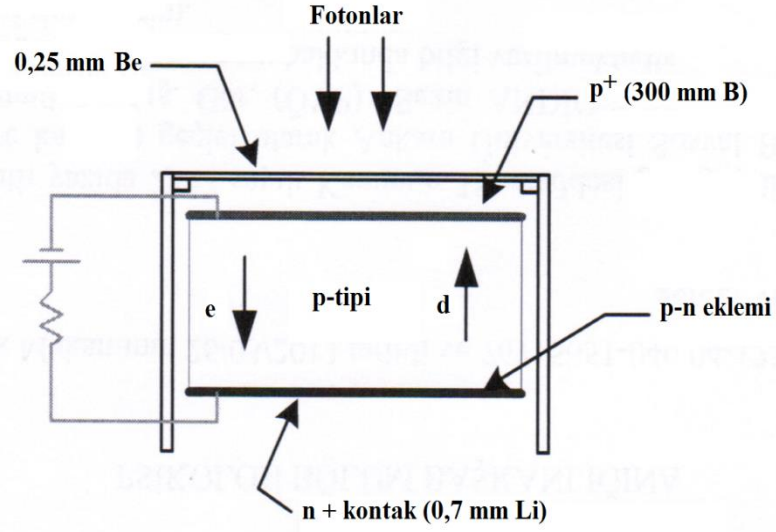
3.3.1. Yüksek saflıktaki yarı-iletken germanyum (Ge) dedektörleri

Yüksek saflıktaki germanyum dedektörü (HPGe), çözme gücünün yüksek olması sebebiyle radyoaktivite ölçümünde, nükleer spektroskopi ve sağlık fizikinde en çok tercih edilen dedektör olmuştur [32]. Germanyumun özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Germanyum dedektörleri, düzlemsel, silindirik veya eş eksenli geometrilere imal

edilmektedir. Yüksek saflıklı p-tipi germanyumdan imal edilen düzlemsel bir HPGe dedektörünün konfigürasyonu Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Bu konfigürasyonda elektrik kontaktarı, bir germanyum kristalinin düz ve hacimli iki yüzeyi üzerinde olacak şekilde yapılmıştır. Yüzeylerden birisi buharlaştırma ve difüzyon işlemi ile birkaç yüz μm kalınlığındaki lityum (Li) ile kaplanmıştır. Boşaltım bölgesi n^+ -p eklemi ters besleme ile oluşturulmuştur. Diğer yüzey ise yüzey kenarındaki iletkenliği artırmak amacıyla aşılma tekniği ile bor (B) alıcı atomları ile p^+ tabakası olacak şekilde modifiye edilmiştir. Her iki malzemede p-tipi olduğundan üst kısımda yarı-iletken eklem yoktur. p^+ tabakası radyasyonun oluşturduğu yük taşıyıcıları toplamak için elektrik kontağı sağlamaktadır. Aşılana bor tabakasının kalınlığı (birkaç on μm), düşük enerjili fotonların dedektör ortamına girmesi için uygundur. Ters beslemeyi oluşturmak için pozitif yüksek gerilim, p^+ yüzeyi yerine n^+ kontağına uygulanır. Böylece boşaltım bölgesinin, n^+ kontağına yakın bölgede oluşması sağlanır [31, 32].

Tablo 3.2. Germanyumun özellikleri [32]

| | |
|---|--|
| Atom numarası | 32 |
| Kütle numarası | 72,6 |
| Kararlı izotopları | ^{70}Ge , ^{72}Ge , ^{73}Ge , ^{74}Ge , ^{76}Ge |
| Yoğunluğu, g/cm^3 (300 K'de) | 5,32 |
| Atom numarası/ cm^3 | $4,41 \times 10^{22}$ |
| Dielektrik sabiti | 16 |
| Yasaklı enerji bölgesi, eV (300 K'de) | 0,665 |
| Yasaklı enerji bölgesi, eV (0 K'de) | 0,746 |
| Taşıyıcı yoğunluğu (öz), cm^3 (300 K'de) | $2,4 \times 10^{13}$ |
| Direnç (öz), $\Omega.\text{cm}$ (300 K'de) | 47 |
| Elektron mobilitesi $\text{cm}^2/\text{V.s}$ (300 K'de) | 3900 |
| Deşik (hole) mobilitesi $\text{cm}^2/\text{V.s}$ (300 K'de) | 1900 |
| Elektron-deşik başına enerji, eV (77 K'de) | 2,96 |
| Fano faktör | 0,129 |



Şekil 3.3. Düzlemsel geometrili p-tipi HPGe dedektörü [31]

Bir HPGe dedektörünün, gama-ışınlarının dedeksiyonuna yönelik olarak optimum çözünürlük ve dedeksiyon verimi elde edebilmek amacıyla 120 K'nın altındaki sıcaklıklarda ve 4000 V'a kadar olan geri besleme geriliminde çalıştırılması gerekmektedir. Bu alçak sıcaklık, genellikle 77 K sıcaklıktaki sıvı azot (LN₂) kullanılarak temin edilmektedir. Bir soğutucu olarak LN₂'nin kullanılması, ısıl uyarılma ile sonuçlanabilecek elektronik gürültüyü en aza indirgeyebilir. HPGe dedektörü çalıştırılmadığı durumlarda, oda sıcaklığında muhafaza edilebilir. HPGe dedektörüne bir geri besleme geriliminin uygulanması, yük taşıyıcıların sürüklenme hızı ve kristaldeki boşaltım bölgesinin büyüklüğü üzerinde önemli etki yapmaktadır [31,32].

3.3.2. Mutlak verim kalibrasyonu

Mutlak verim kalibrasyonu veya tüm enerji üzerinden fotopik verimi, kaynak dedektör mesafesine ve kaynağın geometrisine bağlı olarak yarılanma süreleri, aktiviteleri ve gama-ışını yayınlanma ihtimalleri kesin olarak bilinen, farklı geometrilerdeki (nokta, ampul, çeşitli hacimlerdeki Marinelli kabı) katı veya sıvı standart kaynaklar kullanılarak istenen enerji aralığında, gama-ışını enerjilerinin bir fonksiyonu olarak doğrudan deneysel ölçmeler sonucunda, aşağıda verilen formülle belirlenir [31].

$$\varepsilon(E_\gamma) = \frac{S}{I_\gamma \cdot t \cdot A \cdot D} \quad (3.1)$$

Burada,

S: ilgilenilen gama-ışını fotopikine ait net alan veya sayım

I_γ : İlgili gama-ışınının yayınlanma ihtimali

t: Sayım süresi (s)

A: Standart kaynağın aktivitesi (Bq)

D: $e^{-\lambda t_d}$ ile verilen düzeltme faktörüdür ve yarılanma süreleri uzun olan radyonüklitler için ihmal edilebilir. Burada λ : Bozunum sabiti ($\lambda=0,693/T_{1/2}$), $T_{1/2}$: Yarılanma süresi ve t_d : Standart kaynağın referans tarihinden ölçme işlemi için kullanıldığı tarihe kadar geçen süredir.

Dedektörün mutlak verim kalibrasyonu için genellikle hem tek enerjili hem de çoklu enerjilere sahip ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{85}Sr , ^{88}Y , ^{109}Cd , ^{113}Sn , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{139}Ce , ^{152}Eu ve ^{241}Am gibi standart radyonüklit kaynaklar tavsiye edilmektedir [31].

3.3.3. Enerji kalibrasyonu

Fotoelektrik olayı sonucunda soğurulan gama-ışını fotonlarının oluşturduğu darbeler, çok kanallı analizörün veya bilgisayarın hafızasında darbe yüksekliklerine karşılık gelen kanallarda toplanmaktadır. Gama-ışını spektrumunu değerlendirebilmek için kanal numarasına karşılık gelen enerji değerinin bilinmesi gerekir. Enerji kalibrasyonu için genelde ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{241}Am vb. gama enerjileri bilinen radyonüklitlerden oluşan nokta standart kaynaklar kullanılmaktadır [31]. Noktasal standart kaynaklar, spektrometrede belli bir süre sayılarak fotopikler elde edilir. Bu fotopiklerin orta noktasına (azami değerine) karşılık gelen kanal numarası tespit edilerek kaydedilir. Daha sonra bu değerler bir birinci dereceden bir doğru denklemine bazen de ikinci veya üçüncü dereceden bir polinoma uydurularak (fit edilerek) kanal sayısı ile gama-ışını enerjisi arasındaki ilişki bulunur. Tez kapsamında, örneklerin radyometrik ölçümlerinde kullanılan gama-ışını spektrometresinin enerji kalibrasyonu, ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co ve ^{40}K noktasal standart kaynaklar kullanılarak yapılmış ve elde edilen veriler birinci derecen bir doğru denklemine uydurulmuştur [31].

3.3.4. Gama-ışını fotopiklerin seçilmesi

Gama-ışını spektrometresinde analiz edilecek radyonüklite ait fotopikin seçilmesi büyük önem taşımaktadır. ^{238}U ve ^{232}Th 'nin yayınladıkları gama-ışınlarının şiddetleri

veya yayınlanma ihtimalleri çok düşük olduğundan bu radyonüklitlerin aktivite derişimlerinin gama-ışını spektrometrik teknik ile ölçülmesi günümüz dedektör teknolojisi ile hemen hemen mümkün değildir. Bu radyonüklitlerin aktivite derişimlerinin gama-ışını spektrometrik teknik ile ölçülebilmesi için uranyum ve toryumun bozunum zincirindeki ürün radyonüklitleri ile kalıcı dengede olmaları gerekir [31]. ^{238}U 'in aktivite derişimini, gama-ışını yayınlayan uzak ürün radyonüklitlerin aktivite derişiminden bulmak için ^{238}U - ^{226}Ra ve ^{226}Ra - ^{222}Rn arasındaki kalıcı dengenin sağlanması gerekmektedir. Bu dengelerin sağlanması durumunda ana çekirdek ^{238}U 'in aktivitesi, ^{226}Ra ve diğer uzak ürünlerinin aktivite derişimlerine denk olabilir. ^{226}Ra 'nın aktive derişimini kendi yayınladığı 186,2 keV enerjili gama-ışını fotopikten hesaplayabilmek için girişim yapan ^{235}U 'in 185,7 keV enerjili fotopikin katkısının çıkarılması gerekmektedir. ^{226}Ra ile ^{222}Rn arasındaki kalıcı dengenin sağlanması durumunda ise ^{226}Ra 'nın aktivitesini ölçmek için ürün çekirdekleri olan ^{214}Pb 'ye ait 295,2 keV ve 351,9 keV enerjili fotopikler ile ^{214}Bi ait 609,3 keV, 1120,3 keV ve 1764,5 keV enerjili temiz analitik fotopikler kullanılabilir [31].

Bu çalışmada volkanik tüf örneklerindeki ^{238}U 'nin aktivite derişimi, ağırlıklı ortalaması alınan 295,2 keV ve 351,9 keV enerjili fotopik ile ağırlıklı ortalaması alınan 609,3 keV ve 1764,5 keV enerjili fotopiklerin aritmetik ortalaması alınarak ölçülmüştür. ^{232}Th 'nin aktivite derişimini, gama-ışını yayınlayan uzak ürün radyonüklitlerin aktivite derişiminden bulmak için ^{232}Th - ^{228}Ac ve ^{224}Ra - ^{220}Rn arasındaki kalıcı dengenin sağlanması gerekmektedir. Bu dengelerin sağlanması durumunda ana çekirdek ^{232}Th 'nin aktivitesi, ^{228}Ac ve diğer uzak ürünlerinin aktivite derişimlerine denk olabilir. ^{232}Th 'nin aktivitesi için ise bozunum çekirdeği olan ^{228}Ac 'e ait 338,4 keV ve 911,2 keV ve ^{208}Tl 583,2 keV enerjili temiz analitik fotopikler kullanılabilir. Bu çalışmada ^{232}Th 'nin aktivite derişimi, 911,2 keV enerjili fotopik ile 583,2 keV enerjili fotopiklerin aritmetik ortalaması alınarak ölçülmüştür. Bu çalışmada ^{226}Ra 'nın aktivite derişimi, 186,2 keV enerjili fotopik ile ölçülürken ^{40}K 'ın aktivite derişimi ise 1460,8 keV enerjideki kendi gama-ışını kullanılarak ölçülmüştür.

3.4. Ölçümlerde Kullanılan Gama-ışını Spektrometresi

Volkanik tüf örneklerindeki ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'un aktivite derişimleri, ÇNAEM-RÖA Birimindeki HPGe dedektörlü gama-ışını spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür.

Gama-ışını spektrometresi, özellikleri Tablo 3.3'te verilen eş eksenli bir p-tipi HPGe dedektör (Canberra GX3018), 16 K'lık çok kanallı analizör özellikli ve gelişmiş sinyal işleme tekniğini (digital signal processing techniques, DSP) içeren sayısal spektrum analizör (Digital Spectrum Analyzer, DSA-1000) ve Genie-2000 gama-ışını spektroskopi yazılımının yüklü olduğu masa üstü bilgisayardan oluşmaktadır. Dedektör, çevreden gelen doğal fon radyasyonunu en aza indirmek için 9,5 mm kalınlığındaki çelik iskelet içine yerleştirilen 100 mm kalınlığındaki kurşun (Pb) ile zırhlanmıştır. Bu zırhın iç tarafı, gama-ışını fotonlarının kurşun zırh ile etkileşmesi sonucunda oluşan 72-88 keV enerji aralığındaki Pb-X-ışınları için 1 mm kalınlığındaki kalay ve 1,5 mm kalınlığındaki bakır levha ile kaplanmıştır. Kurşun zırhtan saçılmaları en az düzeyde tutmak için dedektör kurşun zırhın içine ortali olarak konumlandırılmıştır. Sıvı azot soğutması için 50 L hacminde, çift duvarlı (vakumlu) bir sıvı azot kabı kullanılmıştır [31].

Tablo 3.3. Ölçme işlemlerinde kullanılan HPGe dedektörünün özellikleri

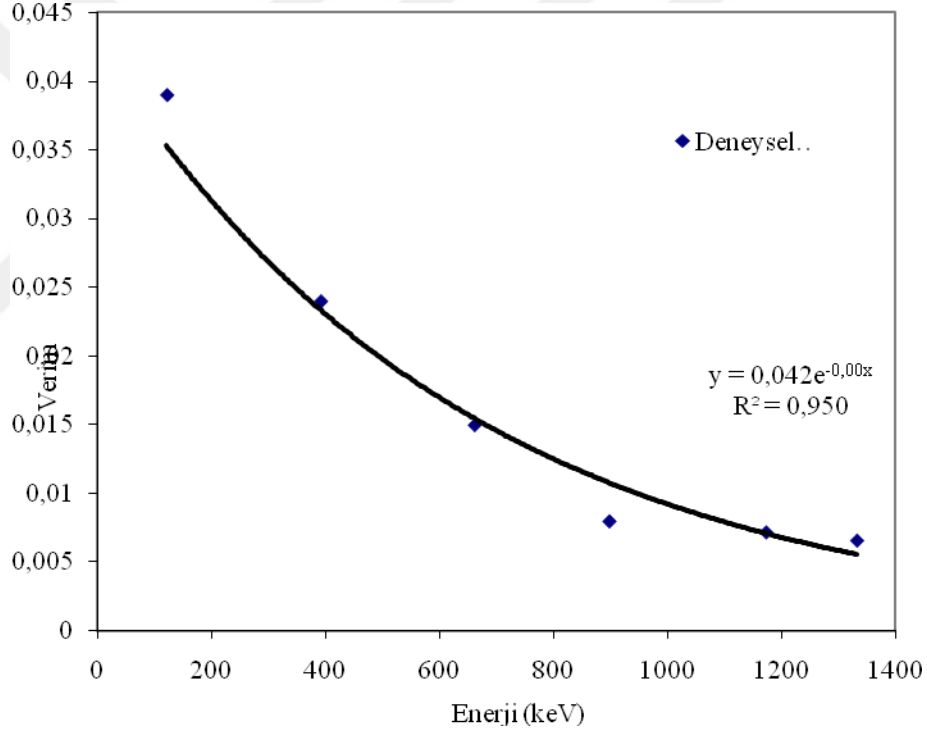
| | |
|-------------------------------------|---|
| Dedektör modeli | Canberra GX3018 |
| Bağlı verimi | % 30 |
| Enerji ayırma gücü (çözünürlük) | 1,8 keV (^{60}Co 'ın 1333 keV enerjili fotopikin YYTG değeri) |
| Pik/Compton oranı | 60:1 |
| Dedektör geometrisi ve kristal tipi | Kapalı uçlu, eş eksenli ve p-tipi HPGe |
| Çapı ve yüksekliği | 62,5 mm |
| Pencereden uzaklık | 5 mm |
| Çalışma gerilimi | +2500 Vdc |
| Kriyostat ve azot kabı hacmi | Yatay geometri ve 50 L |

BÖLÜM 4

ELDE DİLEN VERİLER VE TARTIŞMA

4.1. Gama-ışını Spektrometresinin Mutlak Verim Kalibrasyonu

Gama-ışını spektrometresinin mutlak verim kalibrasyonu, Eckert&Ziegler Isotope Products firması tarafından hazırlanan 1 L Marinelli kabını dolduran epoksi matrisi içine homojen bir şekilde dağıtılmış çoklu radyoizotop içeren sertifikalı standart kaynak kullanılarak yapılmıştır [30]. Deneysel olarak elde edilen mutlak verim değerlerinin enerjiye göre grafiği çizilmiş ve uygun bir matematik fonksiyonuna fit edilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Ölçme sisteminin mutlak verim eğrisi [30]

4.2. Volkanik Tüf Örneklerinde Ölçülen Doğal Radyonüklitlerin Aktivite Derişimleri

Bu çalışmada, Kapadokya Bölgesinde yer alan Nevşehir ve Kayseri İlinde bulunan 12 ocaktan toplanan farklı renkteki 59 volkanik tüf taş örneği, doğal olarak içerdikleri ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın aktivite derişimlerinin belirlenmesi amacıyla radyometrik analize tabi tutulmuştur. Her bir tüf örneği için elde edilen gama-ışını spektrumlarında, ^{238}U

için 295,2 keV, 351,9 keV, 609,3 keV ve 1764,5 keV enerjili, ^{232}Th için 911,2 keV ve 583,2 keV enerjili, ^{226}Ra için 186,2 keV enerjili ve ^{40}K için 1460,8 keV enerjili ilgilenilen gama-ışını fotopikleri seçildi. Her bir tuf örneğine ve belli aralıklarla yapılan laboratuvar ortamı ölçümlerine ait gama-ışını spektrumundaki ilgilenilen gama-ışını fotopiklerinin alanları ve belirsizlikleri, Genie-2000 yazılımı kullanılarak bulundu. Her bir tuf örneği için sayım süresi, ilgilenilen gama-ışını fotopiklerinin sayım alanı belirsizlikleri %3'ün altında olacak şekilde ayarlandı. İlgilenilen gama-ışını fotopiklerinin net alanları, gama-ışını fotopiklerinin alanlarından, ortalaması alınan laboratuvar ortamı gama-ışını fotopiklerinin alanları çıkarılarak hesaplandı. ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K için gama-ışını spektrometrik ölçme sisteminin en düşük ölçme sınır değeri (D_L) aşağıda verilen formül ile hesaplandı [33]:

$$D_L (\text{Bq kg}^{-1}) = \frac{1.64 \cdot \sigma_B}{\varepsilon(E_\gamma) \cdot I_\gamma \cdot t \cdot M} \quad (4.1)$$

Burada,

σ_B : Laboratuvar ortamı gama-ışını spektrumunda ilgilenilen gama-ışını fotopik alanlarının standart sapması,

$\varepsilon(E_\gamma)$: İlgilenilen enerjideki gama-ışını fotopiki için mutlak verim değeri,

I_γ : İlgilenilen gama-ışınının yayımlanma ihtimali,

t: Sayım süresi (s) ve

M: Örneğin kütlesi (kg).

dir. ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K için ölçülen ortalama D_L değerleri, Tablo 4.1'de verilmiştir.

Bu radyonüklitlerin aktivite derişimleri (A) aşağıda verilen formül kullanılarak belirlendi:

$$A (\text{Bq / kg}) = \frac{S_H}{\varepsilon(E_\gamma) \cdot I_\gamma \cdot M} \quad (4.2)$$

Burada,

S_H : Elde edilen gama-ışını spektrumunda ilgilenilen gama-ışını fotopikine ait sayım hızıdır ve net alanın, sayım süresine bölünmesi ile elde edilir.

Farklı ocaklarından toplanan volkanik tuf örneklerinde ölçülen ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın aktivite derişim değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistiki bilgiler, Tablo 4.2'de ve her bir ocağa ait radyonüklit aktivite derişimlerinin aralık ve ortalama değerleri ise

Tablo 4.3'te verilmiştir. ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'in aktivite derişim frekans dağılımları ise Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Tablo 4.2'den de görülebileceği gibi ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'in ortalama değerleri, sırasıyla $58,7 \pm 4,2$ Bq/kg, $75,9 \pm 5,3$ Bq/kg, $41,9 \pm 3,0$ Bq/kg ve $523,6 \pm 48,0$ Bq/kg olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'in en büyük değerleri, sırasıyla $182,1 \pm 5,2$ Bq/kg, $233,1 \pm 8,4$ Bq/kg, $116,6 \pm 3,7$ Bq/kg ve $2107,2 \pm 164,4$ Bq/kg olarak ölçülmüş iken en düşük değerleri ise, sırasıyla $2,8 \pm 0,1$ Bq/kg, $8,4 \pm 0,3$ Bq/kg, $2,0 \pm 0,9$ Bq/kg ve $99,2 \pm 7,7$ Bq/kg olarak ölçülmüştür. Tablo 4.3'ten de anlaşılacağı gibi ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'in en küçük değeri, Q1 kodlu ocaktan temin edilen volkanik tüf örneklerinde ölçülmüştür. ^{238}U , ^{226}Ra ve ^{40}K 'in en büyük değeri, Q5 kodlu ocaktan temin edilen volkanik tüf örneklerinde ölçülmüş iken ^{232}Th 'nin en büyük değeri, Q6 kodlu ocaktan temin edilen volkanik tüf örneklerinde ölçülmüştür.

Tablo 4.1. En düşük ölçme sınır değeri (D_L)

| Malzeme | D_L (Bq/kg) | | | |
|--------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| | ^{238}U | ^{232}Th | ^{226}Ra | ^{40}K |
| Volkanik tüf | 0,8 | 1,2 | 0,9 | 7,7 |

Tablo 4.2. Tüf örneklerinde ölçülen radyonüklit aktivite derişimlerine ilişkin tanımlayıcı istatistik bilgileri

| | Aktivite derişimi (Bq/kg) | | | |
|----------------|---------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| | ^{238}U | ^{232}Th | ^{226}Ra | ^{40}K |
| Ortalama | 58,7 | 75,9 | 41,9 | 523,6 |
| Standart Hata | 4,2 | 5,3 | 3,0 | 48,0 |
| Ortanca | 49,4 | 73,4 | 37,0 | 435,9 |
| Standart Sapma | 32,3 | 40,6 | 23,2 | 369,0 |
| Basıklık | 3,8 | 6,4 | 1,3 | 8,0 |
| Çarpıklık | 1,7 | 2,0 | 1,1 | 2,6 |
| En Küçük | 2,8 | 8,4 | 2,0 | 99,2 |
| En Büyük | 182,1 | 233,1 | 116,6 | 2107,2 |

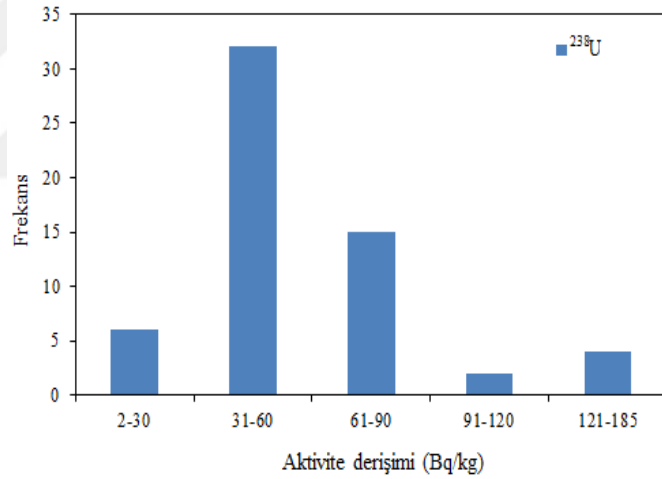
Şekil 4.2’den görülebileceği gibi radyonüklitlerin aktivite derişim frekans dağılımları, tam normal bir dağılım göstermemektedir. Bütün tuf örneklerinde ölçülen ^{238}U aktivite derişiminin %54’ü, 31-60 Bq/kg ve %25’i ise 61-90 Bq/kg; ^{232}Th aktivite derişiminin %27’si, 26-55 Bq/kg, %33’ü 56-85 Bq/kg ve %27’si ise 66-115 Bq/kg; ^{226}Ra aktivite derişiminin %15’i, 16-25 Bq/kg, %47’si 26-45 Bq/kg ve %17’si ise 46-65 Bq/kg ve ^{40}K aktivite derişiminin %47’si, 301-500 Bq/kg ve %17’si ise 501-700 Bq/kg aralığında yer almaktadır.

Tablo 4.3. Tuf örneklerinde ölçülen radyonüklit aktivite derişimlerinin aralık (en küçükten büyük) ve ortalama (ort. \pm standart hata) değerleri

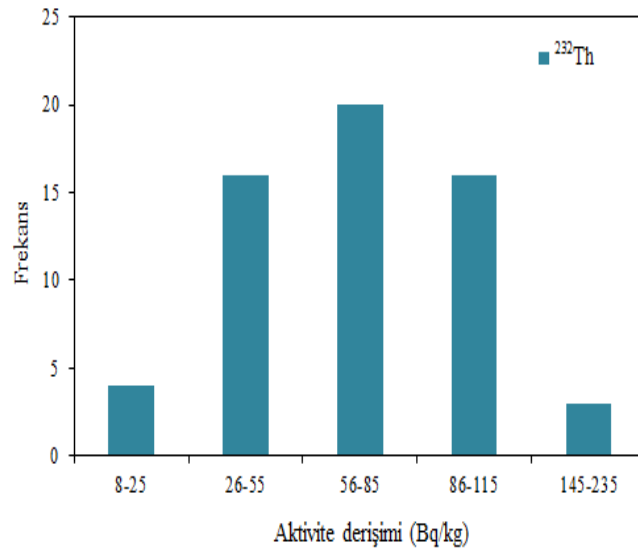
| Ocak kodu | Aktivite derişimi (Bq/kg $\pm 1\sigma$) | | | | |
|-----------|--|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| | | ^{238}U | ^{232}Th | ^{226}Ra | ^{40}K |
| Q1 | Aralık | 2,8 \pm 0,1-77,3 \pm 2,7 | 8,4 \pm 0,3-103,3 \pm 3,2 | 2,0 \pm 0,9-67,6 \pm 2,2 | 99,2 \pm 7,7-689,2 \pm 53,8 |
| | Ort. | 45,1 \pm 11,4 | 60,9 \pm 14,2 | 37,7 \pm 9,8 | 394,7 \pm 79,9 |
| Q2 | Aralık | 36,2 \pm 1,1-117,0 \pm 4,1 | 51,2 \pm 2,0-105,1 \pm 3,8 | 23,1 \pm 0,9-81,0 \pm 2,6 | 254,7 \pm 19,9-893,8 \pm 69,7 |
| | Ort. | 62,8 \pm 12,6 | 66,9 \pm 19,6 | 39,7 \pm 8,7 | 445,4 \pm 95,3 |
| Q3 | Aralık | 40,3 \pm 1,4-73,8 \pm 2,6 | 43,9 \pm 1,6-105,1 \pm 3,8 | 25,3 \pm 0,9-61,0 \pm 2,0 | 316,4 \pm 24,7-954,3 \pm 74,4 |
| | Ort. | 57,5 \pm 4,6 | 68,5 \pm 7,7 | 39,7 \pm 5,3 | 574,0 \pm 85,9 |
| Q4 | Aralık | 25,6 \pm 0,9-88,6 \pm 3,3 | 34,4 \pm 1,2-111,7 \pm 4,0 | 22,6 \pm 0,7-89,3 \pm 2,9 | 201,1 \pm 15,7-872,3 \pm 68,0 |
| | Ort. | 48,3 \pm 9,6 | 62,4 \pm 12,1 | 41,7 \pm 10,0 | 414,6 \pm 99,6 |
| Q5 | Aralık | 139,7 \pm 4,6-182,1 \pm 5,2 | 93,1 \pm 3,4-230,6 \pm 8,3 | 67,2 \pm 2,2-116,6 \pm 3,7 | 385,4 \pm 30,1-2107,2 \pm 164,4 |
| | Ort. | 149,4 \pm 11,4 | 150,0 \pm 32,3 | 92,1 \pm 10,5 | 1456,9 \pm 382,0 |
| Q6 | Aralık | 37,5 \pm 1,2-61,1 \pm 2,0 | 51,0 \pm 1,8-233,1 \pm 8,4 | 36,3 \pm 1,2-53,1 \pm 1,6 | 387,6 \pm 30,2-692,9 \pm 54,0 |
| | Ort. | 49,2 \pm 4,0 | 98,8 \pm 27,6 | 45,2 \pm 3,2 | 505,8 \pm 43,9 |
| Q7 | Aralık | 26,1 \pm 0,9-72,5 \pm 2,6 | 14,4 \pm 0,5-83,7 \pm 3,0 | 7,5 \pm 0,2-40,1 \pm 1,3 | 136,8 \pm 10,7-488,8 \pm 37,7 |
| | Ort. | 39,9 \pm 11,0 | 33,5 \pm 16,8 | 19,4 \pm 7,2 | 268,2 \pm 83,3 |
| Q8 | Aralık | 64,2 \pm 2,3-70,9 \pm 2,7 | 87,1 \pm 3,1-90,9 \pm 3,3 | 38,4 \pm 1,2-55,4 \pm 1,8 | 454,2 \pm 35,4-533,5 \pm 41,6 |
| | Ort. | 67,9 \pm 2,0 | 89,5 \pm 1,2 | 46,9 \pm 4,9 | 490,5 \pm 23,1 |
| Q9 | Aralık | 45,8 \pm 1,5-77,0 \pm 2,9 | 47,1 \pm 1,7-91,5 \pm 3,3 | 23,4 \pm 1,7-61,1 \pm 2,0 | 385,1 \pm 30,0-604,2 \pm 47,1 |
| | Ort. | 55,7 \pm 4,7 | 70,3 \pm 7,4 | 41,0 \pm 5,6 | 461,2 \pm 36,8 |
| Q10 | Aralık | 23,9 \pm 0,8-67,1 \pm 2,4 | 70,9 \pm 2,6-76,3 \pm 2,7 | 15,3 \pm 0,5-41,1 \pm 1,3 | 390,5 \pm 30,5-732,6 \pm 57,1 |
| | Ort. | 41,1 \pm 7,6 | 74,2 \pm 1,0 | 24,7 \pm 4,5 | 514,9 \pm 60,3 |
| Q11 | Aralık | 36,2 \pm 1,3-49,4 \pm 1,6 | 69,2 \pm 2,3-79,5 \pm 2,5 | 19,8 \pm 0,6-40,6 \pm 1,3 | 120,0 \pm 9,4-428,3 \pm 33,4 |
| | Ort. | 43,8 \pm 2,8 | 75,3 \pm 2,3 | 30,3 \pm 4,5 | 263,2 \pm 67,1 |
| Q12 | | 103,1 \pm 3,6 | 107,7 \pm 3,9 | 89,3 \pm 2,9 | 1127,0 \pm 87,9 |

UNSCEAR raporunda, ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K radyonüklitlerinin yer kabuğunda ölçülen ortalama aktivite derişimleri sırasıyla, 33 Bq/kg, 45 Bq/kg, 32 Bq/kg ve 412 Bq/kg olarak verilmiştir [1]. Avrupa Birliğı (AB) üye ülkelerinde kaplama ve dekorasyon amaçlı olarak kullanılan doğal taşlarda ölçülen ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişimleri, sırasıyla 60 Bq/kg, 60 Bq/kg ve 640 Bq/kg olarak belirlenmiştir [34]. Farklı ocaklardan temin edilen volkanik tüf örneklerinde ölçülen ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişimlerinin, birbirleri, yerkabuğu ortalaması ve AB üye ülkelerinde kullanılan doğal taşlarda ölçülen ortalama değerler ile karşılaştırılması, Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Farklı ülkelerde kaplama ve dekorasyon amaçlı kullanılan malzemelerde ölçülen ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K aktivite derişimi değerleri, Tablo 4.4'de verilmiştir. Tablo 4.4'den, bu çalışmada ölçülen ^{32}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K aktivite derişim değerlerinin, literatürde yer alan değerlerle kıyaslanabilir olduğu görülmektedir.

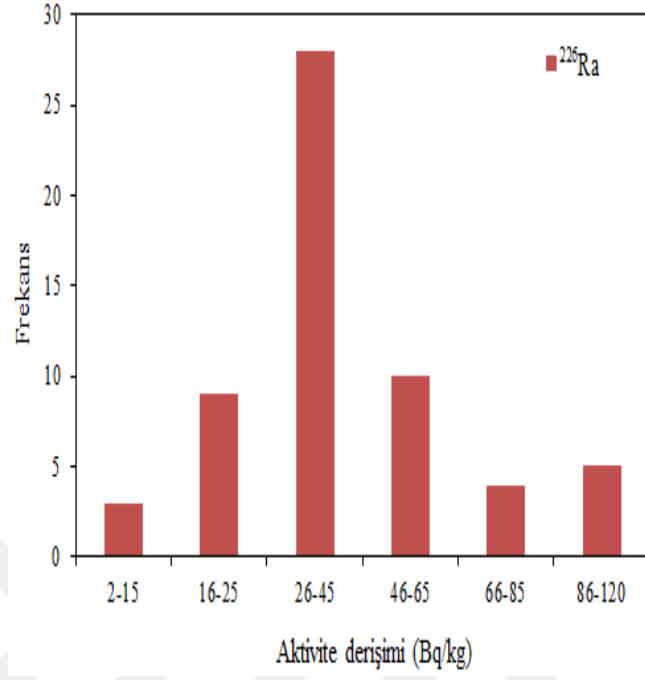
a)



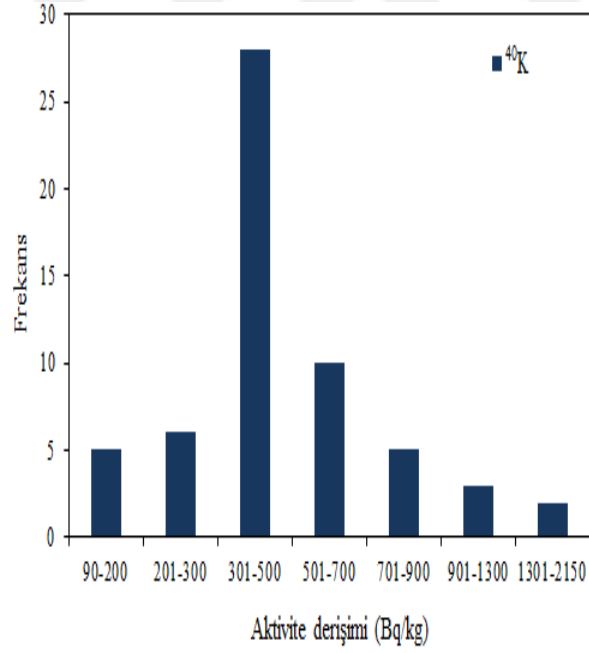
b)



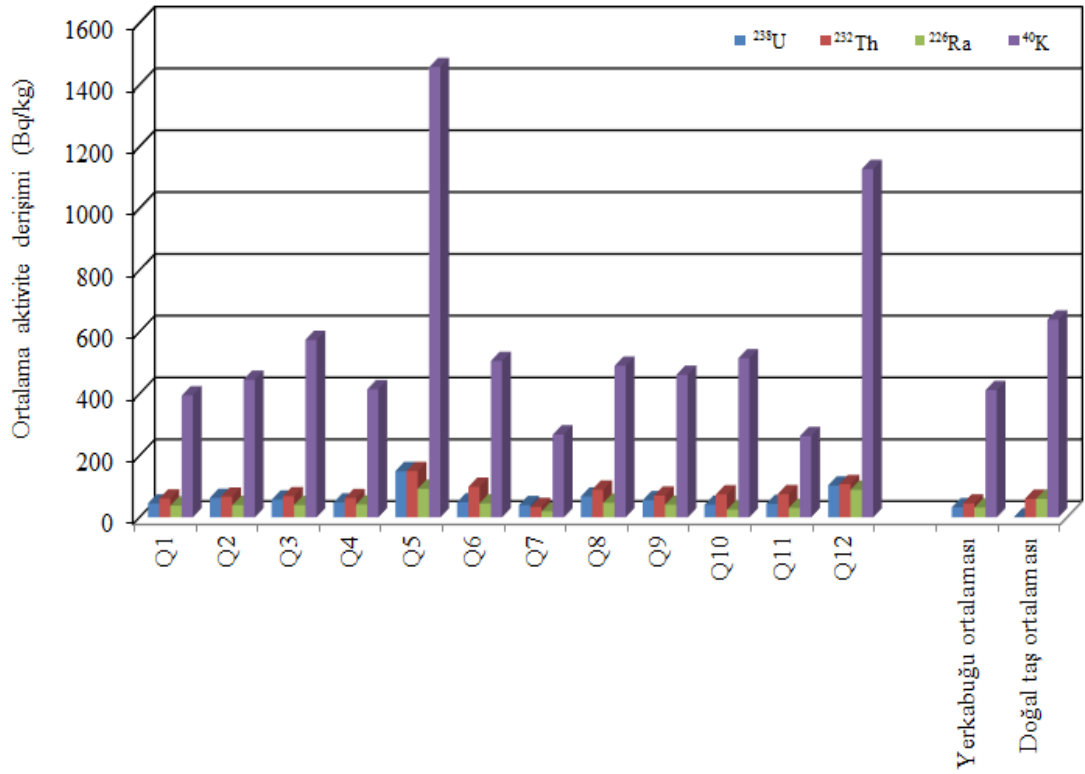
c)



d)



Şekil 4.2. Tuf örneklerinde ölçülen a) ^{238}U , b) ^{232}Th , c) ^{226}Ra ve d) ^{40}K aktivite derişim değerlerinin frekans dağılımları



Şekil 4.3. Volkanik tuf örneklerinde ölçülen radyonüklitlerin ortalama aktivite derişimlerinin, birbirleri ile yerkabuğu ortalaması ve doğal taş örneklerinde ölçülen ortalama değerler ile karşılaştırılması

Tablo 4.4. Volkanik tuf örneklerinde ölçülen radyonüklitlerin ortalama aktivite derişimlerinin literatürde verilen değerler ile karşılaştırılması

| | Örnek sayısı | Ülke | Aktivite derişimi (Bq/kg)* | | | Referans |
|-----------------|--------------|-------------------|----------------------------|-------------------|-----------------|------------|
| | | | ²³² Th | ²²⁶ Ra | ⁴⁰ K | |
| Volkanik tuf | 3 | İtalya | 137-270 | 92-280 | 1200-1900 | [27] |
| Volkanik tuf | 8 | Türkiye (Kayseri) | 17-96 | 18-97 | 229-1036 | [28] |
| Volkanik | 22 | İtalya (Vulsini) | 126-487 | 80-394 | 227-2487 | [35] |
| Dekorasyon taşı | 20 | İspanya | 20-490 | 12-390 | 240-2000 | [36] |
| Granit | 42 | Türkiye | 8-345 | 9-193 | 92-4156 | [37] |
| Volkanik tuf | 59 | Kapadokya | 8-233 | 2-117 | 99-2107 | Bu çalışma |

*Aralık değeri (en küçük-en büyük)

4.3. Radyolojik Değerlendirme

Bu bölümde, radyoaktivite ölçümü yapılan volkanik tuf örneklerinin, binaların iç ve dış mekânlarında kaplama veya yapı malzemesi ve özellikle Kapadokya Bölgesinde evlerin duvar yapımında tuğla gibi yapısal malzeme olarak kullanılması, radyolojik açıdan değerlendirildi. Radyolojik değerlendirmelere yönelik olarak her bir volkanik tuf örneği için dış ışınlama indisleri (radyum eşdeğer aktivite indis, aktivite derişim indis), iç ışınlama indis (alfa indis) indis, açık ve kapalı ortamda havada soğurulan gama-ışını doz hızı ve bunlara karşılık gelen yıllık etkin doz hızları ve yaşam boyu kanser riski, tuf örneklerinde ölçülen radyonüklitlerin aktivite derişimleri esas alınarak hesaplandı.

4.3.1. Dış ışınlama indisleri

Binalarda kullanılan yapı malzemelerinden kaynaklanan yapı içi gama radyasyon dozuna birden fazla radyonüklitin katkıda bulunması gerçeği, bu radyonüklitleri içeren malzemelerin aktivite derişimlerini karşılaştırmak ve uygulama sınırının aşılıp aşılmadığını değerlendirmek amacıyla aktivite indislerinin türetilmesine yol açmıştır [31]. Bugüne kadar yapı malzemesinin tipi, kullanılma miktarı, duvar kalınlıkları, kapı ve pencerelerin yerleri vb. parametreleri hesaba katan modellerin simülasyonu ile farklı indisler türetilmiştir. Bununla birlikte türetilen bu indisler arasında radyum eş değer aktivite indis ve aktivite derişim indis olarak isimlendirilen indisler yaygın olarak kullanılmaktadır.

4.3.1.1. Radyum eş değer aktivite indis

Radyum eş değer aktivite (Ra_{eq}) indis, aktivite derişimi 10 Bq/kg olan ^{226}Ra 'nin, aktivite derişimi 7 Bq/kg olan ^{232}Th ve aktivite derişimi 130 Bq/kg ^{40}K ile aynı gama-ışını doz hızını oluşturabileceği kabulü esas alınarak aşağıda verilen formül ile hesaplandı [38]:

$$Ra_{eq} (\text{Bq/kg}) = A_{Ra} + \frac{10}{7} \cdot A_{Th} + \frac{10}{130} \cdot A_K \quad (4.3)$$

Burada,

A_{Ra} : ^{226}Ra 'nin Bq/kg cinsinden aktivite derişimi,

A_{Th} : ^{232}Th 'nin Bq/kg cinsinden aktivite derişim ve

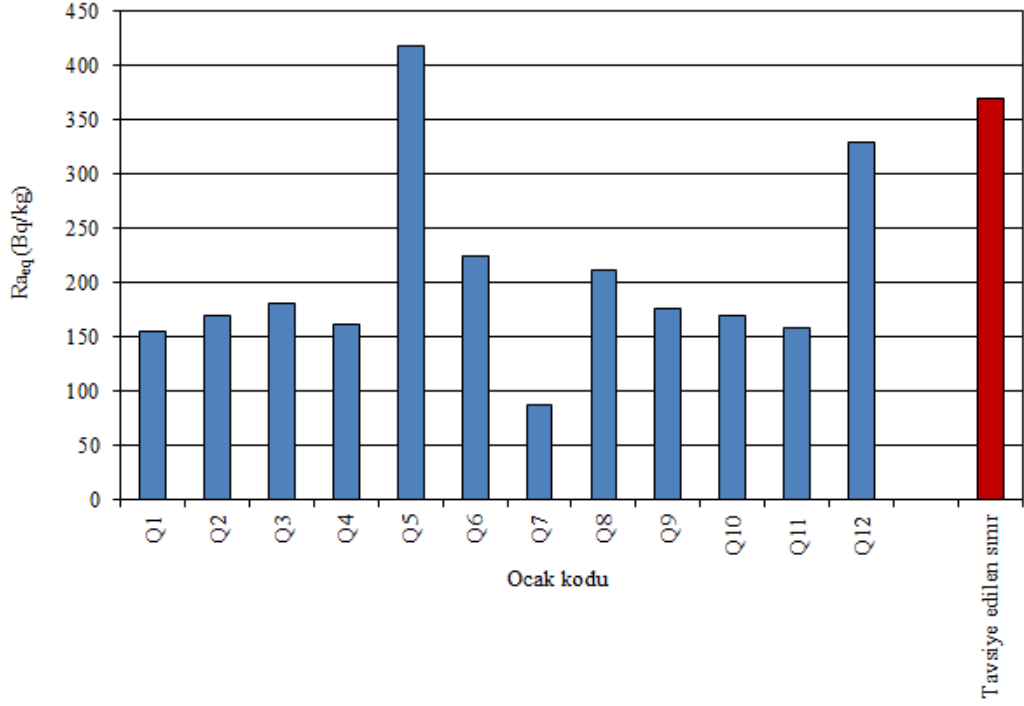
A_K : ^{40}K 'ın Bq/kg cinsinden aktivite derişimidir.

OECD-NEA tarafından 1979 yılında yayımlanan raporda, ev ve iş yeri binalarında kalıcı olarak kullanılmak amacıyla üretilen malzemeler için R_{aeq} indisinin izin verilen sınır değeri, 370 Bq/kg olarak belirlenmiştir [39]. Yapı malzemeleri için hesaplanan $R_{eş}$ aktivite indisinin, sınır değerden küçük veya eşit olması durumunda, bu malzemelerdeki radyonüklitlerin sebep olduğu dış ışınlamadan kaynaklanan yıllık etkin doz değerinin, 1,5 mSv'den küçük veya eşit olacağı kabul edilmiştir [31,39].

Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama R_{aeq} indis değerleri, Tablo 4.5'te verilmiştir. Hesaplanan bütün R_{aeq} indis değerleri, ortalaması 191 ± 13 Bq/kg olmak üzere 22 Bq/kg ila 608 Bq/kg aralığında değişmektedir. En büyük R_{aeq} indis değeri, Q5 ocağından temin edilen tüf örneği için ve en küçük değer ise Q1 ocağından temin edilen tüf örneği için hesaplanmıştır. Tablo 4.5'ten görülebileceği gibi en küçük ortalama R_{aeq} indis değeri Q7 ocağına ve en büyük ortalama R_{aeq} indis değeri ise Q5 ocağına aittir. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama R_{aeq} indis değerlerinin, birbirleri ve sınır değer ile karşılaştırılması, Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

Tablo 4.5. Tüf örnekleri için hesaplanan ortalama R_{aeq} indis değerleri

| Ocak kodu | R_{aeq} (Bq/kg) |
|-----------|-------------------|
| Q1 | 155 |
| Q2 | 169 |
| Q3 | 182 |
| Q4 | 163 |
| Q5 | 418 |
| Q6 | 225 |
| Q7 | 88 |
| Q8 | 212 |
| Q9 | 177 |
| Q10 | 170 |
| Q11 | 158 |
| Q12 | 330 |



Şekil 4.4. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama Ra_{eq} indis değerlerinin, birbirleri ve sınır değer ile karşılaştırılması

4.3.1.2. Aktivite derişim indisi

Ev, okul ve iş yeri binalarında kalıcı olarak kullanılmak amacıyla üretilen yerkaabuğu kökenli yapı malzemelerinin içerdiği birden fazla radyonüklitin, yıllık etkin doza katkıda bulunmasından dolayı izleme amaçlı pratik bir indis olarak Avrupa Komisyonu tarafından önerilen aktivite derişim indisi (ADİ), aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplandı [34]:

$$ADİ = \frac{A_{Ra}}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{A_{Th}}{200 \text{ Bq/kg}} + \frac{A_K}{3000 \text{ Bq/kg}} \quad (4.4)$$

Burada,

A_{Ra} : ^{226}Ra 'nin Bq/kg cinsinden aktivite derişimi,

A_{Th} : ^{232}Th 'nin Bq/kg cinsinden aktivite derişim ve

A_K : ^{40}K 'ın Bq/kg cinsinden aktivite derişimidir.

ADİ, yıllık etkin doz sınırına, malzemenin yapı içinde kullanılma şekline ve miktarına bağlı olarak Tablo 4.6'da verilen değerleri aşmamalıdır. Tablo 4.6'dan görülebileceği gibi $ADİ \leq 0,5$ (beton, tuğla, briket vb. yapısal malzemeler için) ve $ADİ \leq 2$ (granit, mermer vb. kaplama malzemeleri için) olduğu durumlarda, yapı malzemelerinin içerdiği

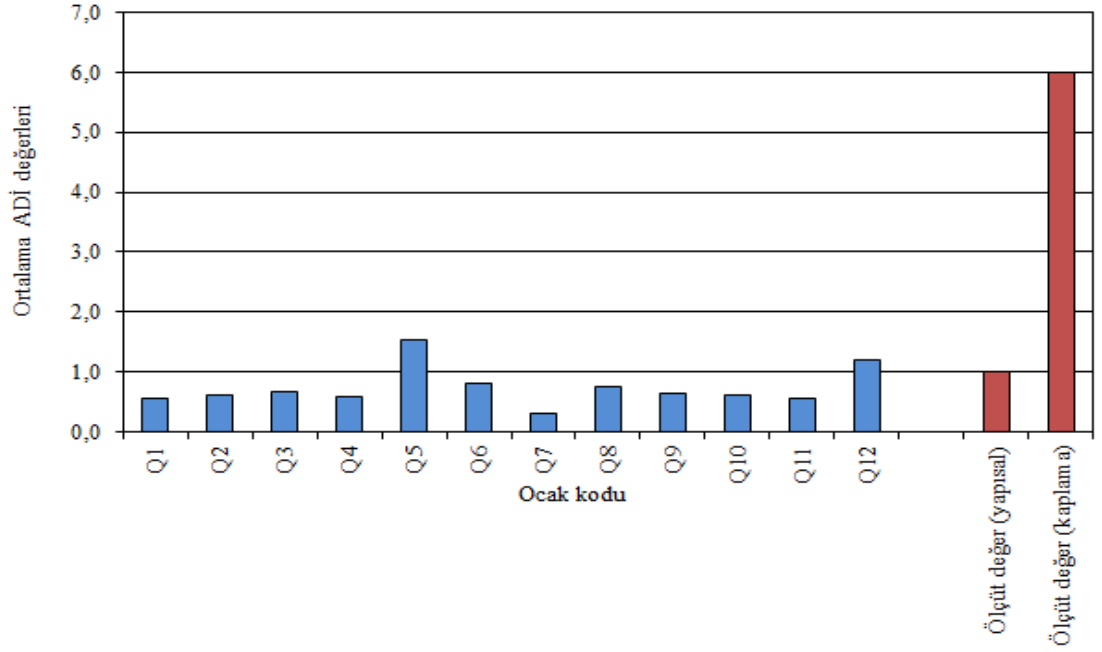
radyonüklitlerden kaynaklanan yıllık etkin gama radyasyon dozu hızı 0,3 mSv/y değerine eşit veya küçüktür. Bu durumda yapı malzemesi, radyoaktiviteye yönelik bütün kontrol ve izlemeden muaf tutulur. $ADI \leq 1$ (beton, tuğla, briket vb. yapısal malzemeler için) ve $ADI \leq 6$ (granit, mermer vb. kaplama malzemeleri için) olduğu durumlarda, yapı malzemelerinin içerdiği radionüklitlerden kaynaklanan yıllık etkin gama radyasyon dozu hızı 1 mSv/y değerine eşit veya küçüktür. Bu durumda yapı malzemesi, herhangi bir kısıtlama olmadan kullanılabilir [34]. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama ADİ değerleri, Tablo 4.7’de verilmiştir. Hesaplanan bütün ADİ değerleri, ortalaması $0,69 \pm 0,05$ olmak üzere 0,08 ila 2,24 aralığında değişmektedir. En büyük ADİ değeri, Q5 ocağından temin edilen tüf örneği için ve en küçük değer (0,08) ise Q1 ocağından temin edilen tüf örneği için hesaplanmıştır. Tablo 4.7’den görülebileceği gibi en küçük ortalama ADİ değeri Q7 ocağına ve en büyük ortalama ADİ değeri ise Q5 ocağına aittir. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama ADİ değerlerinin, birbirleri ve ölçüt değerler ile karşılaştırılması, Şekil 4.5.’te gösterilmiştir.

Tablo 4.6. Doz ölçütünün kontrolüne yönelik ADİ değerleri

| Yıllık etkin doz ölçütü | 0,3 mSv/y | 1 mSv/y |
|---|----------------|--------------|
| Yapısal malzemeler (beton, tuğla vb.) | $ADI \leq 0,5$ | $ADI \leq 1$ |
| Yüzeysel olarak ve sınırlı kullanıma sahip diğer malzemeler (kaplama malzemesi vb.) | $ADI \leq 2$ | $ADI \leq 6$ |

Tablo 4.7. Tüf örnekleri için hesaplanan ortalama ADİ değerleri

| Ocak kodu | ADİ |
|-----------|------|
| Q1 | 0,56 |
| Q2 | 0,61 |
| Q3 | 0,67 |
| Q4 | 0,59 |
| Q5 | 1,54 |
| Q6 | 0,81 |
| Q7 | 0,32 |
| Q8 | 0,77 |
| Q9 | 0,64 |
| Q10 | 0,62 |
| Q11 | 0,57 |
| Q12 | 1,21 |



Şekil 4.5. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama ADİ değerlerinin, birbirleriyle ve ölçüt değerler ile karşılaştırılması

4.3.2. İç ışınlama indisleri

Zamanlarının büyük bir kısmını kapalı alanlarda (ev, işyeri, okul vb.) geçiren bireylerin sağlığı için en büyük tehlikeyi, binaların zeminindeki kaya, toprak ve binaların inşaatında kullanılan yer kabuğu kökenli malzemelerin içerdiği radyumun bozunum ürünü olan radyoaktif gaz radonun ortama yayılması oluşturmaktadır. Yarılanma süresi 3,8 gün olan ve solunum yolu ile vücuda girebilen ^{222}Rn ve kısa ömürlü bozunum ürünlerinin yayınladığı alfa ve beta radyasyonları, iç ışınlamaya sebep olmaktadır. Farklı coğrafi bölgelerde yaşayan insanların, doğal radyoaktiviteden dolayı maruz kaldıkları ortalama 2,4 mSv büyüklüğündeki yıllık etkin radyasyon dozunun yaklaşık yarısı (1,2 mSv), radon gazının solunumu sonucunda oluşan iç ışınlanmadan kaynaklanmaktadır. Bu iç ışınlama, akciğer dokusuna zarar vererek akciğer kanser riskini artırmaktadır. TS 12614 standartta, ülkemizde yapı içi radon gazı derişiminin sınırı, binalar için 200 Bq/m^3 ile olarak belirlenmiştir [40].

4.3.2.1. Alfa indisi

Radon gazının solunmasının sebep olduğu ilave alfa radyasyonunun değerlendirilmesine ilişkin olarak türetilen alfa indisi (AI), aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplandı [27].

$$A\dot{I} = \frac{A_{Ra}}{200 \text{ Bq/kg}} \quad (4.5)$$

Burada,

A_{Ra} : ^{226}Ra 'nin Bq/kg cinsinden aktivite derişimidir.

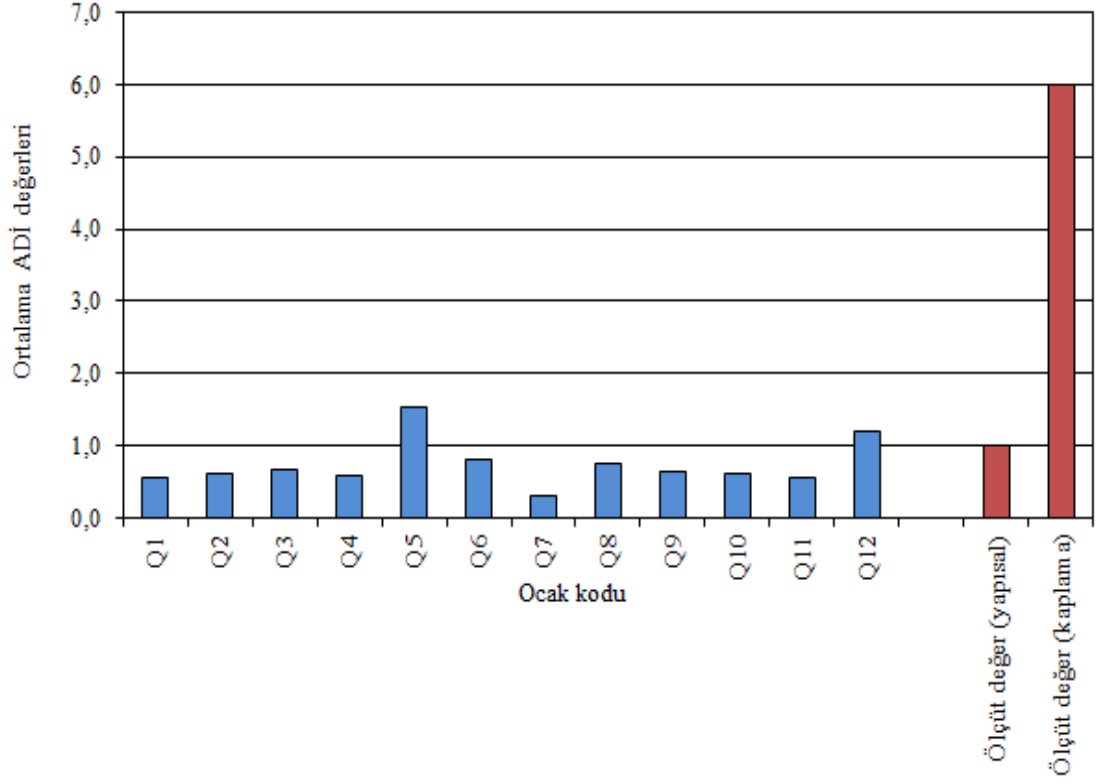
$A\dot{I} > 1$ olduğu durumlarda, kapalı ortam veya yapı içi (ev, okul, işyeri) radon aktivite derişimi, sınır değer olan 200 Bq/m³'ten daha büyüktür [2]. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $A\dot{I}$ değerleri, Tablo 4.8'de verilmiştir. Hesaplanan bütün $A\dot{I}$ değerleri, ortalaması $0,21 \pm 0,02$ olmak üzere 0,01 ila 0,58 aralığında değişmektedir. En büyük $A\dot{I}$ değer, Q5 ocağından temin edilen tüf örneği için ve en küçük değer ise Q1 ocağından temin edilen tüf örneği için hesaplanmıştır. Tablo 4.8'den görülebileceği gibi en küçük ortalama $A\dot{I}$ değer Q7 ocağına ve en büyük ortalama $A\dot{I}$ değer ise Q5 ocağına aittir. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $A\dot{I}$ değerlerinin, birbirleri ve sınır değer ile karşılaştırılması Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

4.3.3. Kapalı ortamda soğurulan doz hızı ve karşılık gelen yıllık etkin doz hızı

Yapı malzemelerinin içerdđi radyonüklitlerden yayınlanan gama-ışınlarının sebep olduğu dış ışınlamadan kaynaklanan kapalı ortamdaki havada soğurulan doz hızı, aşağıda verilen formül kullanılarak hesaplandı [1].

Tablo 4.8. Tüf örnekleri için hesaplanan ortalama $A\dot{I}$ değerleri

| Ocak kodu | $A\dot{I}$ |
|-----------|------------|
| Q1 | 0,19 |
| Q2 | 0,20 |
| Q3 | 0,20 |
| Q4 | 0,21 |
| Q5 | 0,46 |
| Q6 | 0,23 |
| Q7 | 0,10 |
| Q8 | 0,23 |
| Q9 | 0,21 |
| Q10 | 0,12 |
| Q11 | 0,15 |
| Q12 | 0,45 |



Şekil 4.6. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama AI değerlerinin, birbirleriyle ve sınır değeri ile karşılaştırılması

$$DH_{iç} (nGy/h) = \dot{I}CF_{Ra} \times A_{Ra} + \dot{I}CF_{Th} \times A_{Th} + \dot{I}CF_{K} \times A_{K} \quad (4.6)$$

Burada,

A_{Ra} : ^{226}Ra 'nin Bq/kg cinsinden aktivite derişimi,

A_{Th} : ^{232}Th 'nin Bq/kg cinsinden aktivite derişim,

A_K : ^{40}K 'ın Bq/kg cinsinden aktivite derişimi,

$\dot{I}CF_{Ra}$: ^{226}Ra için doz hızı dönüşüm kat sayısı,

$\dot{I}CF_{Th}$: ^{232}Th için doz hızı dönüşüm kat sayısı ve

$\dot{I}CF_K$: ^{40}K için doz hızı dönüşüm kat sayısıdır.

Hesaplamalarda, ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K için $\dot{I}CF_{Ra}$, $\dot{I}CF_{Th}$ ve $\dot{I}CF_K$ değerleri, sırasıyla 0,92 nGy/h/Bq/kg, 1,1 nGy/h/Bq/kg ve 0,08 nGy/h/Bq/kg olarak alınmıştır. Yer kabuğu kökenli radyonüklitlerden kaynaklanan dış ışınlanmanın sebep olduğu yapı içi soğurulan doz hızının nüfus ağırlıklı dünya ortalaması 84 nGy/h (aralık: 40 - 200 nGy/h) olarak hesaplanmıştır [1].

Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $DH_{iç}$ değerleri, Tablo 4.9'un ikinci sütununda verilmiştir. Hesaplanan bütün $DH_{iç}$ değerleri, ortalaması 164 ± 11 nGy/h

olmak üzere 19 nGy/h ila 530 nGy/h aralığında değişmektedir. Tablo 4.9'dan görülebileceği gibi en küçük ortalama $DH_{iç}$ değeri (76 nGy/h) Q7 ocağına ve en büyük ortalama $DH_{iç}$ değeri (366 nGy/h) ise Q5 ocağına aittir. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $DH_{iç}$ değerlerinin, birbirleri ve dünya ortalaması ile karşılaştırılması Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

Kapalı ortamda, yapı malzemelerinin içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'dan yayımlanan gama-ışını radyasyonuna maruz kalan bireylerin aldıkları yıllık etkin radyasyon doz hızı ($EDH_{iç}$), havada soğurulan gama-ışını dozundan etkin doza dönüşüm kat sayısı 0,7 Sv/Gy alınarak ve bireylerin zamanının %80'nini kapalı ortamlarda geçirdiği kabul edilerek aşağıdaki formül ile hesaplandı [1].

$$EDH_{iç} (\text{mSv} / \text{y}) = DH_{iç} (\text{nGy} / \text{h}) \times 365,25 \text{ gün} \times 24 \text{ h} \times 0,8 \times 0,7 \text{ Sv/Gy} \times 10^{-6} \quad (4.7)$$

Burada,

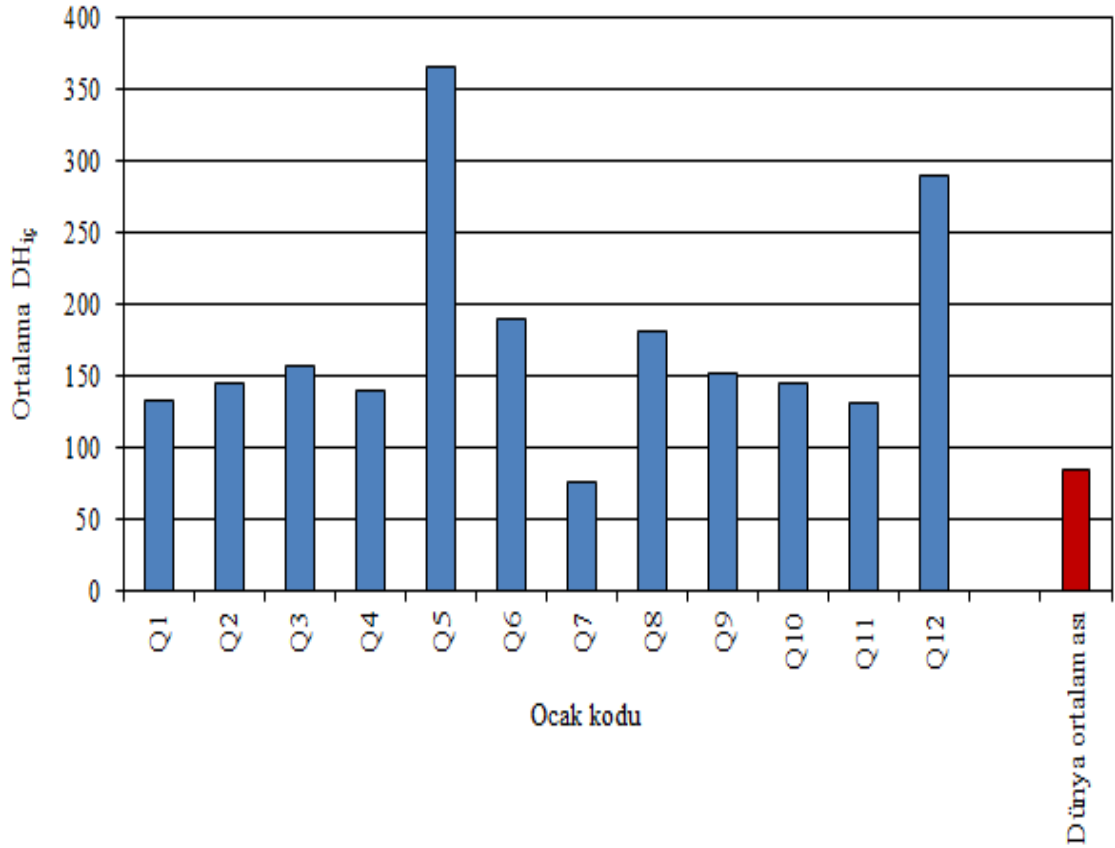
$DH_{iç}$: (4,6)'daki formül ile verilen gama-ışını doz hızıdır.

Binalarda kullanılan yapı malzemelerinin içerdiği radyonüklitlerden yayımlanan gama radyasyonu sebebiyle bireylerin maruz kaldığı kapalı ortam (yapı içi) yıllık etkin doz hızı için kontrol ölçütü olarak 1 mSv/y tavsiye edilmiştir [34]. Yapılacak kontrollerde, doz hızının, 0,3 mSv/y - 1 mSv/y aralığındaki bir değer esas alınması gereği de tavsiye edilmiştir.

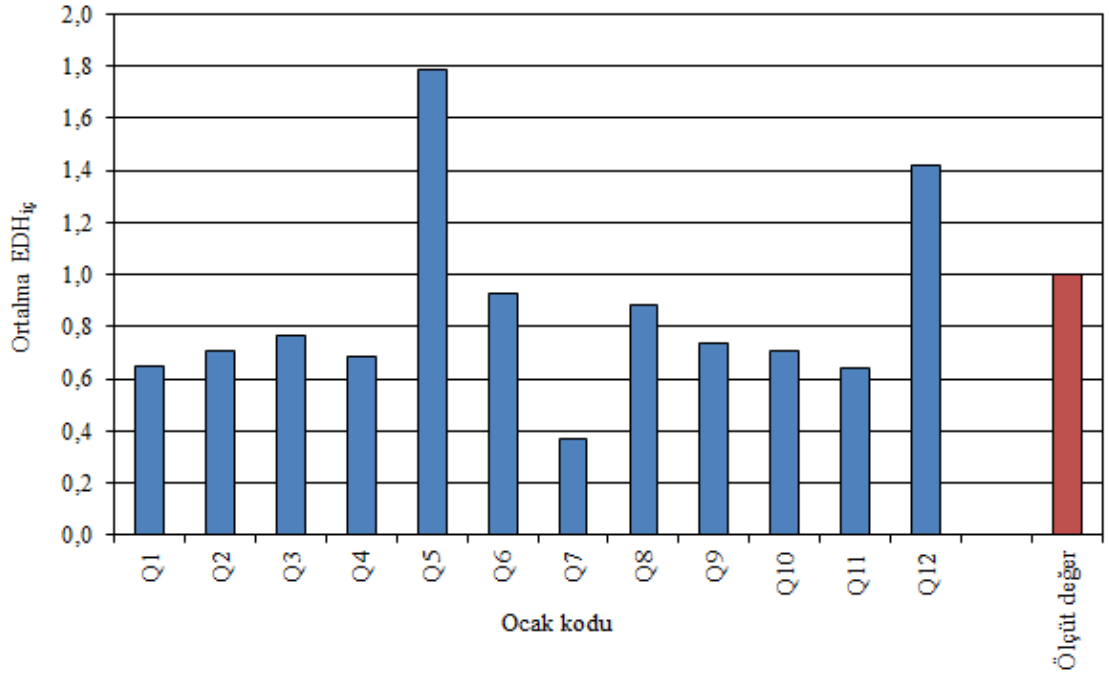
Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $EDH_{iç}$ değerleri, Tablo 4.9'un üçüncü sütununda verilmiştir. Hesaplanan bütün $EDH_{iç}$ değerleri, ortalaması $0,80 \pm 0,06$ mSv/y olmak üzere 0,09 mSv/y ila 2,58 mSv/y aralığında değişmektedir. Tablo 4.9'dan görülebileceği gibi en küçük ortalama $EDH_{iç}$ değeri (0,37 mSv/y) Q7 ocağına ve en büyük ortalama $EDH_{iç}$ değeri (1,78 mSv/y) ise Q5 ocağına aittir. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $EDH_{iç}$ değerlerinin, birbirleri ve ölçüt değeri ile karşılaştırılması Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

Tablo 4.9. Tüf örnekleri için hesaplanan ortalama $DH_{iç}$ ve $EDH_{iç}$ değerleri

| Ocak kodu | $DH_{iç}$ | $EDH_{iç}$ |
|-----------|-----------|------------|
| Q1 | 133 | 0,65 |
| Q2 | 146 | 0,71 |
| Q3 | 158 | 0,77 |
| Q4 | 140 | 0,68 |
| Q5 | 366 | 1,78 |
| Q6 | 191 | 0,93 |
| Q7 | 76 | 0,37 |
| Q8 | 181 | 0,88 |
| Q9 | 152 | 0,74 |
| Q10 | 145 | 0,71 |
| Q11 | 132 | 0,64 |
| Q12 | 291 | 1,42 |



Şekil 4.7. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $DH_{iç}$ değerlerinin, birbirleriyle ve dünya ortalaması ile karşılaştırılması



Şekil 4.8. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama EDH_{iç} değerlerinin, birbirleriyle ve ölçüt değeri ile karşılaştırılması

4.3.4. Dış (açık) ortamda soğurulan doz hızı ve karşılık gelen yıllık etkin doz hızı

Yapı malzemelerinin içerdiği radyonüklitlerden yayımlanan gama-ışınlarının sebep olduğu dış ışınlamadan kaynaklanan dış ortamdaki havada soğurulan doz hızı (DH_{dış}), aşağıda verilen formül kullanılarak hesaplandı [1].

$$DH_{dış} (nGy/h) = DCF_{Ra} \times A_{Ra} + DCF_{Th} \times A_{Th} + DCF_K \times A_K \quad (4.8)$$

Burada,

A_{Ra}: ²²⁶Ra'nin Bq/kg cinsinden aktivite derişimi,

A_{Th}: ²³²Th'nin Bq/kg cinsinden aktivite derişim,

A_K: ⁴⁰K'ın Bq/kg cinsinden aktivite derişimi,

DCF_{Ra}: ²²⁶Ra için doz hızı dönüşüm kat sayısı,

DCF_{Th}: ²³²Th için doz hızı dönüşüm kat sayısı ve

DCF_K: ⁴⁰K için doz hızı dönüşüm kat sayısıdır.

Hesaplamalarda, ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K için DCF_{Ra}, DCF_{Th} ve DCF_K değerleri, sırasıyla 0,462 nGy/h/Bq/kg, 0,604 nGy/h/Bq/kg ve 0,0417 nGy/h/Bq/kg değerleri alınmıştır. Yer kabuğu kökenli radyonüklitlerden kaynaklanan dış ışınlamanın sebep olduğu dış

ortamdaki havada soğurulan doz hızının nüfus ağırlıklı dünya ortalaması 59 nGy/h olarak hesaplanmıştır [1].

Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $DH_{dış}$ değerleri, Tablo 4.10'un ikinci sütununda verilmiştir. Hesaplanan bütün $DH_{dış}$ değerleri, ortalaması 87 ± 6 nGy/h olmak üzere 10 nGy/h ila 281 nGy/h aralığında değişmektedir. Tablo 4.10'dan görülebileceği gibi en küçük ortalama $DH_{dış}$ değeri (40 nGy/h) Q7 ocağına ve en büyük ortalama $DH_{dış}$ değeri (194 nGy/h) ise Q5 ocağına aittir. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $DH_{iç}$ değerlerinin, birbirleriyle ve dünya ortalaması ile karşılaştırılması Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

Açık (yapı dışı) ortamda, yapı malzemelerinin içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'dan yayınlanan gama-ışını radyasyonuna maruz kalan bireylerin aldıkları yıllık etkin radyasyon doz hızı ($EDH_{dış}$), havada soğurulan gama-ışını dozundan etkin doza dönüşüm kat sayısı 0,7 Sv/Gy alınarak ve bireylerin zamanının %20'sini dış (açık) ortamlarda geçirdiği kabul edilerek aşağıdaki formül ile hesaplandı [1].

$$EDH_{dış}(\text{mSv} / \text{y}) = DH_{dış}(\text{nGy} / \text{h}) \times 365,25 \text{ gün} \times 24 \text{ h} \times 0,2 \times 0,7 \text{ Sv/Gy} \times 10^{-6} \quad (4.9)$$

Burada,

$DH_{dış}$: (4,8)'daki formül ile verilen gama-ışını doz hızıdır.

Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $EDH_{dış}$ değerleri, Tablo 4.10'un üçüncü sütununda verilmiştir. Hesaplanan bütün $EDH_{dış}$ değerleri, ortalaması $0,11 \pm 0,01$ mSv/y olmak üzere 0,01 mSv/y ila 0,34 mSv/y aralığında değişmektedir. Tablo 4.10'dan görülebileceği gibi en küçük ortalama $EDH_{dış}$ değeri (0,05 mSv/y) Q7 ocağına ve en büyük ortalama $EDH_{dış}$ değeri (0,24 mSv/y) ise Q5 ocağına aittir. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $EDH_{dış}$ değerlerinin, birbirleri ve ölçüt değer ile karşılaştırılması Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

4.3.5. Yaşam boyu kanser riski

Yaşam boyu kanser riski (KR), belirli bir seviyedeki iyonlaştırıcı radyasyon dozuna maruz kalan bireyler içinde kanser vakasına yakalanan azami sayıyı gösteren bir değer olarak kabul edilir [31]. Volkanik tüf örneklerinin yapı içinde yapısal ve yapı içi veya

dışında kaplama malzemesi olarak kullanıldığı durumlar için KR aşağıda verilen formül ile hesaplandı [41]:

$$KR = EDH \cdot \ddot{O} \cdot R_F \quad (4.10)$$

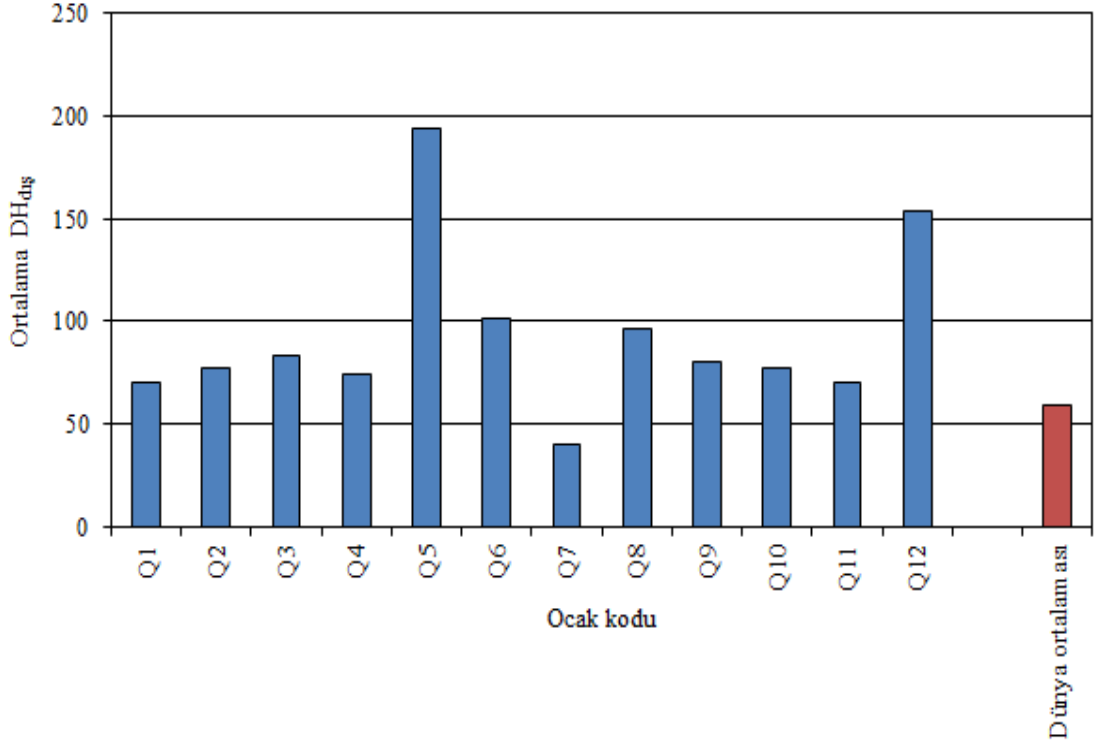
Burada,

EDH: Yıllık etkin radyasyon doz hızı,

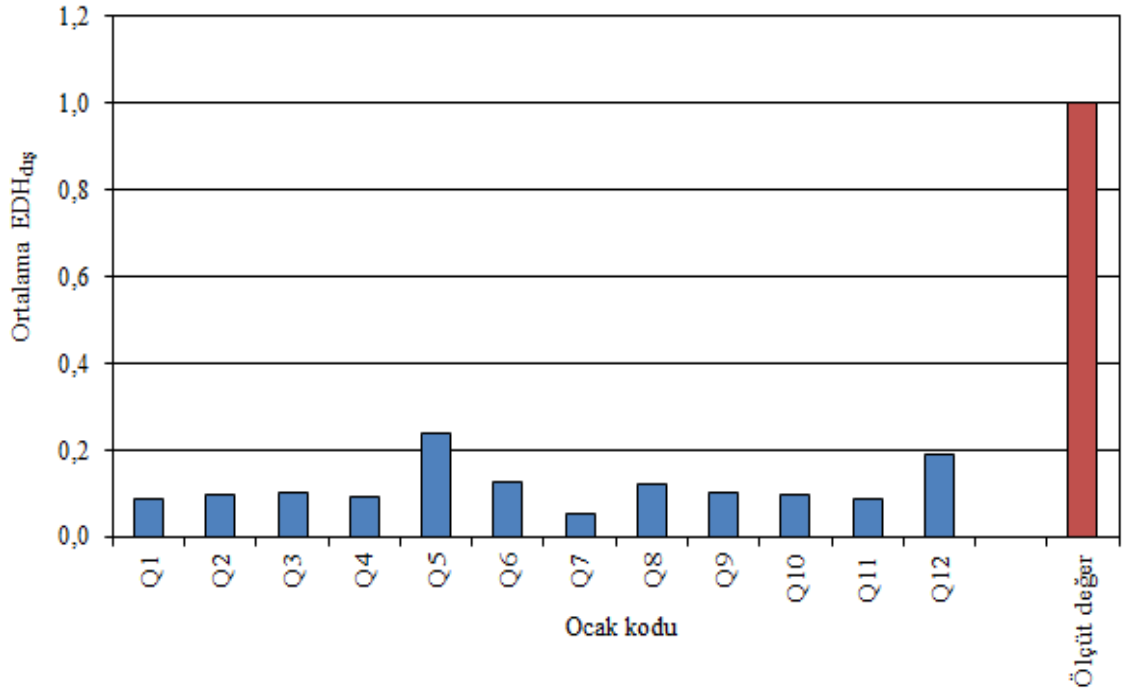
Ö: Ortalama ömür ve R_F risk faktörüdür. Hesaplamalarda kapalı ortam için EDH değerleri olarak Tablo 4.9'un üçüncü sütununda verilen $EDH_{iç}$ değerleri, açık ortam için Tablo 4.10'un üçüncü sütununda verilen $EDH_{dış}$ değerleri ve R_F , 0,05 olarak alınmıştır [42].

Tablo 4.10. Tüf örnekleri için hesaplanan ortalama $DH_{dış}$ ve $EDH_{dış}$ değerleri

| Ocak kodu | $DH_{dış}$ | $EDH_{dış}$ |
|-----------|------------|-------------|
| Q1 | 71 | 0,09 |
| Q2 | 77 | 0,09 |
| Q3 | 84 | 0,10 |
| Q4 | 74 | 0,09 |
| Q5 | 194 | 0,24 |
| Q6 | 102 | 0,12 |
| Q7 | 40 | 0,05 |
| Q8 | 96 | 0,12 |
| Q9 | 81 | 0,10 |
| Q10 | 78 | 0,10 |
| Q11 | 70 | 0,09 |
| Q12 | 153 | 0,19 |



Şekil 4.9. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $DH_{dış}$ değerlerinin, birbirleriyle ve dünya ortalaması ile karşılaştırılması

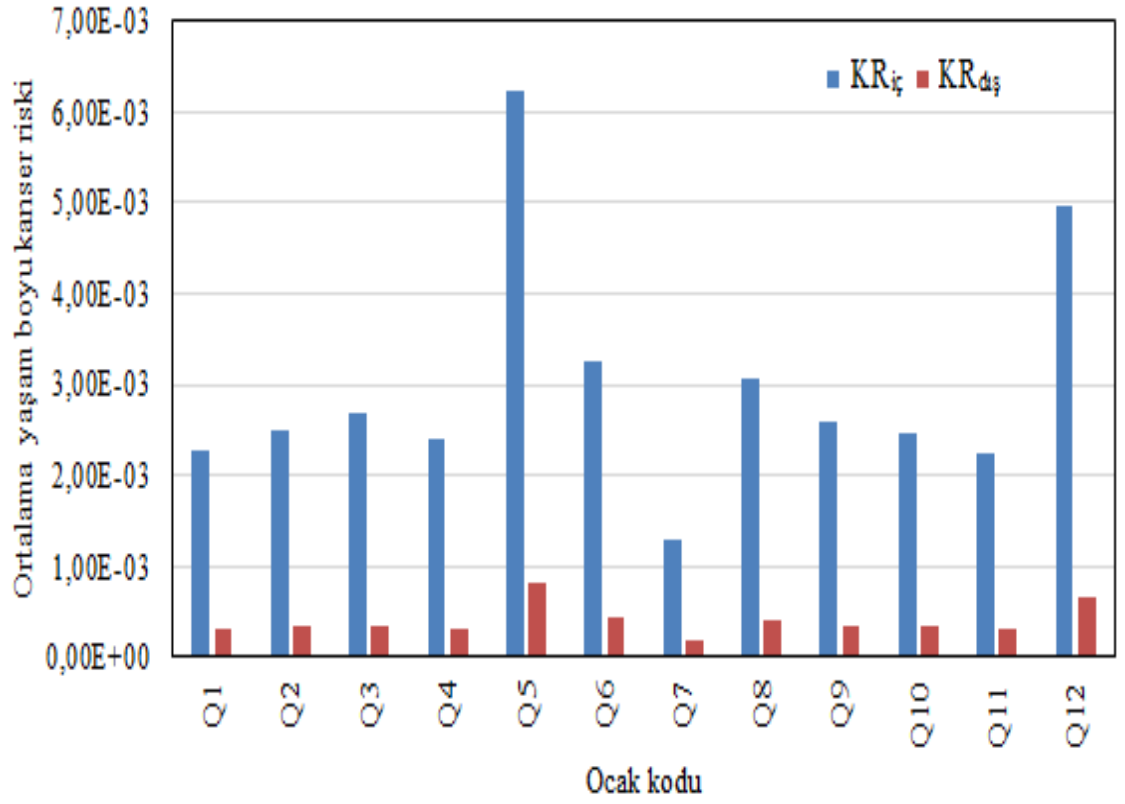


Şekil 4.10. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $EDH_{dış}$ değerlerinin, birbirleriyle ve ölçüt değeri ile karşılaştırılması

Yaşam boyu kanser riski değerinin dünya ortalaması $0,29 \times 10^{-3}$ olarak hesaplanmıştır [38]. Volkanik tüf örnekleri için hesaplanan kapalı ortam yapı içi $KR_{iç}$, açık ortam yapı dışı $KR_{dış}$ ve toplam KR_{toplam} değerleri, Tablo 4.11’de verilmiştir. Bütün tüf ocaklarından temin edilen volkanik tüf örneklerinin yapısal malzeme olarak kullanılmasının sebep verebileceği ortalama $KR_{iç}$ değeri $2,79 \times 10^{-3}$ (aralık: $3,24 \times 10^{-4} - 9,02 \times 10^{-3}$), volkanik tüf örneklerinin kaplama malzemesi olarak kullanılmasının sebep verebileceği ortalama $KR_{dış}$ değeri $3,74 \times 10^{-4}$ (aralık: $4,35 \times 10^{-5} - 1,21 \times 10^{-5}$) ve ortalama toplam kanser riski KR_{toplam} değeri $3,17 \times 10^{-3}$ (aralık: $3,68 \times 10^{-4} - 1,02 \times 10^{-2}$) olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.11’de, volkanik tüf ocakları için değerlendirilen ortalama yaşam boyu kanser riski değerleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.11. Volkanik tüf ocakları için hesaplanan ortalama $KR_{iç}$, $KR_{dış}$, ve KR_{toplam} değerleri

| Ocak kodu | $KR_{iç}$ | $KR_{dış}$ | KR_{toplam} |
|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Q1 | $2,27 \times 10^{-3}$ | $3,03 \times 10^{-4}$ | $2,57 \times 10^{-3}$ |
| Q2 | $2,48 \times 10^{-3}$ | $3,32 \times 10^{-4}$ | $2,81 \times 10^{-3}$ |
| Q3 | $2,69 \times 10^{-3}$ | $3,59 \times 10^{-4}$ | $3,05 \times 10^{-3}$ |
| Q4 | $2,39 \times 10^{-3}$ | $3,19 \times 10^{-4}$ | $2,71 \times 10^{-3}$ |
| Q5 | $6,24 \times 10^{-3}$ | $8,33 \times 10^{-4}$ | $7,07 \times 10^{-3}$ |
| Q6 | $3,25 \times 10^{-3}$ | $4,37 \times 10^{-4}$ | $3,69 \times 10^{-3}$ |
| Q7 | $1,30 \times 10^{-3}$ | $1,73 \times 10^{-4}$ | $1,47 \times 10^{-3}$ |
| Q8 | $3,08 \times 10^{-3}$ | $4,13 \times 10^{-4}$ | $3,49 \times 10^{-3}$ |
| Q9 | $2,59 \times 10^{-3}$ | $3,46 \times 10^{-4}$ | $2,94 \times 10^{-3}$ |
| Q10 | $2,48 \times 10^{-3}$ | $3,34 \times 10^{-4}$ | $2,81 \times 10^{-3}$ |
| Q11 | $2,25 \times 10^{-3}$ | $3,03 \times 10^{-4}$ | $2,55 \times 10^{-3}$ |
| Q12 | $4,95 \times 10^{-3}$ | $6,58 \times 10^{-4}$ | $5,61 \times 10^{-3}$ |



Şekil 4.11. Volkanik tuf ocakları için hesaplanan ortalama KR_{iç} ve KR_{dış} değerlerinin, birbirleriyle karşılaştırılması

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Volkanik tüf örneklerinde ölçülen ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın aktivite derişim sonuçlarının değerlendirilmesi

Bu tez kapsamında, Nevşehir ve Kayseri İlinde bulunan 12 ocaktan toplanan ve ülkemizde konut, okul, ibadet, müze ve işyeri binalarında yalıtım veya dekoratif amaçlı kaplama ve özellikle Kapadokya Bölgesinde evlerin iç ve/veya dış duvarlarının örülmesinde tuğla gibi yapısal malzeme olarak kullanılan 59 volkanik tüf taş örneğinde doğal olarak bulunan ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K radyonüklitlerinin aktivite derişimleri, eş eksenli p-tipi HPGe dedektörlü gama-ışını spektrometresi kullanılarak belirlendi. Her bir örneğe ilişkin ölçme sonuçları, tablolar ve şekiller hâlinde sunuldu.

Tablo 4.2'de, elli dokuz tüf örneğinde ölçülen ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın aktivite derişimlerinin ortalama değerleri, sırasıyla, $58,7 \pm 4,2$ Bq/kg, $75,9 \pm 5,3$ Bq/kg, $41,9 \pm 3,0$ ve $523,6 \pm 48,0$ Bq/kg olarak verilmiştir. Tablo 4.3'te verilen aktivite derişim değerleri, volkanik tüf örneklerinde ölçülen ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K radyonüklit dağılımlarının homojen olmadığını ve aktivite derişim değerlerinin, ocaktan ocağa göre değiştiğini göstermektedir. ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın en küçük değeri, Q1 kodlu ocaktan temin edilen volkanik tüf örneklerinde ölçülmüştür. ^{238}U , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın en büyük değeri, Q5 kodlu ocaktan temin edilen volkanik tüf örneklerinde ölçülmüş iken ^{232}Th 'nin en büyük değeri, Q6 kodlu ocaktan temin edilen volkanik tüf örneklerinde ölçülmüştür.

Tüf örneklerinde ölçülen ^{238}U 'nin ortalama değeri, yerkabuğu ortalamasından 1,8 kat daha büyüktür. Şekil 4.3'den görülebileceği gibi ocakların tamamında ölçülen ^{238}U aktivite derişim değeri, yerkabuğu ortalamasından daha büyüktür.

Tüf örneklerinde ölçülen ^{232}Th 'nin ortalama değeri, yerkabuğu ortalamasından 1,7 kat daha büyüktür. Q7 kodlu ocak hariç ocakların tamamında ölçülen ^{232}Th aktivite derişim değeri, yerkabuğu ortalamasından daha büyüktür.

Tüf örneklerinde ölçülen ^{226}Ra 'nın ortalama değeri, yerkabuğu ortalamasından 1,3 kat daha büyüktür. Q10 ve Q11 kodlu ocaklar hariç ocakların tamamında ölçülen ^{226}Ra aktivite derişim değeri, yerkabuğu ortalamasından daha büyüktür.

Tüf örneklerinde ölçülen ^{40}K 'ın ortalama değeri, yer kabuğu ortalamasından 1,3 kat daha büyüktür. Q1, Q7 ve Q11 kodlu ocaklar hariç ocakların tamamında ölçülen ^{40}K aktivite derişim değeri yer kabuğu ortalamasından daha büyüktür.

Tüf örneklerinde ölçülen ^{232}Th 'nin ortalama değeri, AB üye ülkelerinde kullanılan doğal taşlarda ölçülen ^{232}Th ortalama değerinden %27 daha büyüktür.

Tüf örneklerinde ölçülen ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın ortalama değeri, AB üye ülkelerinde kullanılan doğal taşlarda ölçülen ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın ortalama değerinden, sırasıyla %30 ve %18 daha küçüktür.

Şekil 4.3'den de görülebileceği gibi ocakların tamamında Q7 kodlu ocak hariç ocakların tamamında ölçülen ^{232}Th aktivite derişim değeri, AB üye ülkelerinde kullanılan doğal taşlarda ölçülen ^{232}Th ortalama değerinden daha büyüktür. Q5 ve Q12 kodlu ocaklar hariç ocakların tamamında ölçülen ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişim değeri AB üye ülkelerinde kullanılan doğal taşlarda ölçülen ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın ortalama değerinden daha küçüktür.

5.1.1. Radyolojik açıdan değerlendirme

Elli dokuz volkanik tüf örneği için hesaplanan R_{aeq} indisinin ortalama değeri (191 Bq/kg), ev ve işyeri binaları için tavsiye edilen azami değerden (370 Bq/kg'dan) yaklaşık 2 kat daha küçük iken Q5 ocağından temin edilen tüf örneği için hesaplanan en büyük R_{aeq} indis değeri (608 Bq/kg), tavsiye edilen azami değerden 1,6 kat daha büyüktür. Tablo 4.5'ten görülebileceği gibi en küçük ortalama R_{aeq} indis değeri Q7 ocağına ve en büyük ortalama R_{aeq} indis değeri ise Q5 ocağına aittir. Şekil 4.4, Q5 kodlu ocak hariç diğer ocakların ortalama R_{aeq} indis değerlerinin, tavsiye edilen azami değerinin altında olduğunu göstermiştir. Bu indis dikkate alındığında, Q5 kodlu ocak hariç volkanik tüf örneklerinin kaplama veya yapısal malzeme olarak kullanılması, radyolojik açıdan bir risk oluşturmamaktadır.

Elli dokuz volkanik tüf örneği için hesaplanan ADİ indisinin ortalama değeri (0,69), yapısal malzeme için tavsiye edilen ölçüt değerden (1'den) 1,6 kat daha küçük iken kaplama malzemesi için tavsiye edilen ölçüt değerden (6'dan) 6 kat daha küçüktür. Tablo 4.7'den, en küçük ortalama ADİ değerinin, Q7 ocağına ve en büyük ortalama ADİ değerinin ise Q5 ocağına ait olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.4, Q5 ve Q12 kodlu ocaklar hariç diğer ocakların ortalama ADİ değerlerinin, yapısal malzeme için tavsiye

edilen ölçüt değerden daha küçük olduğunu ve bütün ocakların ortalama ADİ değerlerinin ise kaplama malzemesi için tavsiye edilen ölçüt değerinin önemli ölçüde altında olduğunu göstermiştir. Bu indis dikkate alındığında, volkanik tüf örneklerinin, konut, okul, ibadet, iş yeri binalarında yalıtım veya dekoratif amaçlı kaplama malzemesi olarak kullanılmasından dolayı radyolojik açıdan herhangi bir sakınca görülmemektedir. Ancak, Q5 kodlu ocaktan temin edilen volkanik tüf örneklerinin, ev, okul ve iş yeri binalarında tuğla gibi yapısal malzeme olarak kullanılması, zamanlarının büyük bir kısmını bu tür binalarda geçiren bireyler için uzun vadede radyolojik açıdan bir risk oluşturabilir.

Elli dokuz volkanik tüf örneği için hesaplanan Aİ indisinin ortalama değeri (0,58), tavsiye edilen sınır değerden (1'den) yaklaşık 5 kat daha küçüktür. Tablo 4.8'den, en küçük ortalama Aİ değerinin Q1 ocağına ve en büyük ortalama Aİ değerinin ise Q5 ocağına ait olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.4, ortalama Aİ değerlerinin, tavsiye edilen sınır değerinin önemli ölçüde altında olduğunu göstermiştir. Bu indis dikkate alındığında volkanik tüf örneklerinin, yapı malzemesi olarak kullanıldığı ev, okul ve iş yeri binalarındaki kapalı ortamlarda (yapı içi veya odalarda) biriken ²²²Rn gazının aktivite derişimi, tavsiye edilen sınır değer olan 200 Bq/m³'ten daha düşük olacağı için bu tür malzemenin kaplama veya yapısal malzeme olarak kullanılmasından dolayı herhangi bir sakınca görülmemektedir.

Elli dokuz volkanik tüf örneği için hesaplanan DH_{iç}'in ortalama değeri (164 nGy/h), dünya ortalamasından (84 nGy/h) yaklaşık 2 kat daha büyüktür. Tablo 4.9'un ikinci sütunu ve Şekil 4.7'den görülebileceği gibi Q7 kodlu ocak hariç diğer ocaklar için hesaplanan DH_{iç}'in ortalama değerleri, dünya ortalamasında daha büyüktür. Volkanik tüf örnekleri için değerlendirilen kapalı ortamdaki havada soğurula gama-ışını doz hızına karşılık gelen ortalama EDH_{iç} değeri (0,80), ölçüt değerinin (1'in) altındadır. Tablo 4.9'un üçüncü sütunundan ve Şekil 4.8'den görülebileceği gibi en küçük ortalama EDH_{iç} değeri Q7 ocağına ve en büyük ortalama EDH_{iç} değeri ise Q5 ocağına aittir. Q5 ve Q12 kodlu ocaklar hariç diğer ocakların ortalama EDH_{iç} değerleri, yapısal malzeme için tavsiye edilen ölçüt değerden daha küçüktür.

Elli dokuz volkanik tüf örneği için hesaplanan DH_{dış}'in ortalama değeri (87 nGy/h), dünya ortalamasından (59 nGy/h) yaklaşık 1,5 kat daha büyüktür. Tablo 4.10'un ikinci sütunu ve Şekil 4.9'dan görülebileceği gibi Q7 kodlu ocak hariç diğer ocaklar için

hesaplanan $DH_{dış}$ 'ın ortalama değerleri, dünya ortalamasında daha büyüktür. Volkanik tuf örnekleri için değerlendirilen açık ortamdaki havada soğurula gama-ışını doz hızına karşılık gelen ortalama $EDH_{dış}$ değeri (0,11), ölçüt değerin (1'in) önemli ölçüde altındadır. Tablo 4.10'un üçüncü sütunundan ve Şekil 4.10'dan görülebileceği gibi en küçük ortalama $EDH_{dış}$ değerleri, yapısal malzeme için tavsiye edilen ölçüt değerden çok daha küçüktür.

Tablo 4.11 ve Şekil 4.11'den açıkça görülebileceği gibi volkanik tuf ocakları için hesaplanan ortalama $KR_{iç}$ ve $KR_{dış}$ değerleri, Q7 ocağına aittir. Doğal radyasyondan kaynaklanan yıllık 2,4 mSv/y'lik etkin radyasyona dozuna 70 yıllık ömrü boyunca maruz kalan bireyin kanser riskinin artma ihtimali, $8,4 \times 10^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Bu duruma göre volkanik tuf örneklerinden yayınlanan radyasyona kapalı ve açık ortamda 70 yıl süreyle maruz kalan birey için hesaplanan ortalama toplam KR_{toplam} değeri ($3,2 \times 10^{-3}$), dünya ortalamasından yaklaşık 3 kata daha küçüktür.

5.2. Öneriler

Bu tez kapsamında elde edilen veriler, ülkemizde son yıllarda artan bir oranda konut, okul ve iş yeri binalarında, yalıtım ve dekorasyon amaçlı olarak kullanılan volkanik tüflere yönelik standartların veya yönetmeliklerin oluşturulmasında radyolojik açıdan yol gösterici bilgi mahiyetindedir.

Bu tez kapsamında ortaya çıkan öneriler aşağıda verilmektedir:

- 1) Bu tez kapsamında incelenen tuf ocaklarından temin edilen volkanik tuf örneklerinin, konut, okul, iş yeri vb. binaların dış mekânlarının yalıtım ve/veya dekoratif amaçlı kaplanılmasında kullanılması önerilir.
- 2) Bu tez kapsamında incelenen tuf ocaklarından özellikle Q5 kodlu ocaktan temin edilen volkanik tuf örneklerinin konut, okul ve iş yeri binalarının iç ve dış duvarlarının örülmesinde tuğla gibi yapısal malzeme olarak kullanılmaması önerilir.
- 3) Bu tez kapsamında incelenen tuf ocaklarından özellikle Q5 kodlu ocaktan temin edilen volkanik tuf örneklerinin yapısal malzeme olarak kullanıldığı konut ve okul binalarında uygun havalandırma şartlarının sağlanması ve yılda en az iki kez kapalı ortamdaki radon gazı derişimi ölçümlerinin yapılması önerilir.

KAYNAKLAR

1. UNSCEAR 2008 Report, “Sources and effects of ionizing radiation”, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations Publication, New York, USA, 2010.
2. IARC (International Agency for Research on Cancer), “Radon manmade mineral fibres”. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, vol. 43. Lyon, ISBN 92-832-1243-6, 1988.
3. Gündüz, L., Ulusoy, M., Başpınar E., “Volkanik doğal kayaçların dış mimari kaplamada kullanımı üzerine teknik inceleme”, 3. *Ulusal Yapı Malzemeleri Kongresi*, s. 114-131, İstanbul Mimarlar Odası, Yapı Malzemeleri Komitesi, İstanbul. 15-17 Kasım 2006.
4. Özdoğlar, E., “Taşın çağlara uzanan evrensel yolculuğu üzerine bir analiz”, *Doğal Yaşam Doğal Taş Sempozyumu*, s. 7-15, İstanbul, 29-30 Mart 2012.
5. Öztank, N., “Mimaride doğal taş kullanımının ekolojik açıdan değerlendirilmesi”, *Doğal Yaşam Doğal Taş Sempozyumu*, s. 181-187, İstanbul, 29-30 Mart 2012.
6. Canbolat, T., Gürani, F.Y., “Mobilya tasarımında doğal taşın yeri”, *Doğal Yaşam Doğal Taş Sempozyumu*, s. 84-93, İstanbul, 29-30 Mart 2012.
7. Gürani, F.Y., Canbolat, T., “Geçmişten günümüze mekan ölçeğinde doğal taş kullanımındaki farklı yaklaşımlar”, *Doğal Yaşam Doğal Taş Sempozyumu*, s. 25-32, İstanbul, 29-30 Mart 2012.
8. Onay N.S., “Rönesans kentinde mimari kimliği belirleyici bir unsur olarak taş kullanımı”, *Doğal Yaşam Doğal Taş Sempozyumu*, s. 16-24, İstanbul, 29-30 Mart 2012.
9. Özkahraman, H.T., Işık, E.C., “Isparta kaynaklanmış tüflerinin kaplama taşı olarak kullanılmasının önemi ve uygun yapıştırma harcı üretimi” *Türkiye IV. Mermer Sempozyumu (Mersem'2003) bildiriler kitabı*, s. 201-211, Afyon, 18-19 Aralık 2003.
10. Çelik, M.Y., “Dekoratif doğal yapı taşlarının kullanım alanları ve çeşitleri”, *Madencilik*, 42(1), 3-15, 2003.

11. Daloğlu, G., Emir, E., “Eskişehir-Derbent Bölgesi beyaz tüflerinin doğal yapı taşı olarak değerlendirilebilirliği”, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1), 91-107, 2010.
12. Özkahraman, H.T., Bolattürk, A., “Bina yapımında köyke taşı (kaynaklanmış tüf) kullanılmasının enerji tasarrufundaki önemi”, *Türkiye IV. Mermer Sempozyumu (Mersem'2003) bildiriler kitabı*, s. 49-60, Afyon, 18-19 Aralık 2003.
13. Bekar, M., Şapcı, N., Gündüz, L., “Aksaray Bölgesi volkanik tüf serilerinin sıva malzemesi olarak kullanımı”, *IV. Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, s. 323-332, İstanbul, 2-4 Aralık 2006.
14. Kibici, Y., Dinç, D., Uçar, A., “Afyonkarahisar yöresi volkanik kayaların mineralojik ve petrografik özellikleri”, *DPÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1,53-70, 2012.
15. Kuşçu M., Yıldız, A., “Ayazini (Afyon) tüflerinin yapı taşı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması”, *Türkiye III. Mermer Sempozyumu (Mersem'2001) bildiriler kitabı*, s. 85-98, Afyon, 3-5 Mayıs 2001.
16. Kavas, T., Çelik M.Y., “Ayazini (afyon) tüflerinin çimento sanayiinde tras olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi” *Madencilik Dergisi*, 40(2-3), 39-46, 2001.
17. Bayırlı, M., Pekin, A., “Volkanik tüf yüzeyi gözeneklerinin özelliklerinin birikinti geometrisi kullanarak incelenmesi”, *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi*, 15(2), 66-72, 2013.
18. Atabey, E., “Aksaray-Nevşehir arası eriyonit minerali içeren volkanik tüflerin dağılımı ve akciğer kanseri (Mezotelyoma) ilişkisi”, 60. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri özleri kitabı*, s. 289-292, Ankara, 16-20 Nisan 2007.
19. Sancak, E., Uzun, İ., Çankıran, O., “Yapı blok ve kaplama malzemesi olarak kullanılan sıkı-tüf (küfeki) volkanik hammaddesinin fiziko-mekanik özellikleri”, *Int. J. Eng. Research&Development*, 2(1), 34-38, 2010.
20. Güner, E., “Volkanik tüf bileşimli taşlarının seramik sırlarıyla sırlanarak pişirilmesi”, *Sanat*, 11, 92-95, 2005.

21. Demirdağ, S., “Volkanik cüruf oluşumlarının inşaat endüstrisinde hafif yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, Isparta, 2005.
22. Kaygısız, H., “Kayseri yöresindeki yapıtaşlarının fiziko-mekanik özelliklerinin belirlenmesi”, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Adana, 2010.
23. Akgül, E., “Datça bölgesindeki volkanik tüflerin yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul, 2006.
24. Sınıksaran, M., “Volkanik tuf tozları ile polimer esaslı kompozit malzeme üretimi”, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Konya, 2012.
25. Ay, M.S., “Isparta yöresi pomza, tras ve volkanik tüflerinin çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Afyon, 2006.
26. Koçu, N., “Konya çevresindeki volkanik tüflerin yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi ve özelliklerinin belirlenmesi üzerine bir araştırma”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, İstanbul, 1997.
27. Righi, S., Bruzzi, L., “Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings”, *J. Environ. Radiact.*, 88, 158-170, 2006.
28. Değerlier, M., “Assessment of natural radioactivity and radiation hazard in volcanic tuff stones used as building and decoration materials in the Cappadocia region, Turkey”, *Radioprotection*, 48(2), 215-219, 2013.
29. Lanzo, G., Basile, S., Brai, M., Rizzo, S., ”Volcanic products of Lipari (Aeolian islands, Italy): Multivariate analysis of petrographic and radiometric data”, *Radiat. Meas.*, 45, 816-822, 2010.
30. DPT (Devlet Planlama Teşkilatı), 2616- ÖİK:627. Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı- Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu, “Yapı Malzemeleri II (Mermer-Granit-Yapı Taşları-Arduvaz (sleyt))”, Çalışma Grubu Raporu, Ankara 2001.

31. Demir, K., “Briket ve tuğlanın radyolojik açıdan karşılaştırılması”, *Nevşehir hacı Bektaş Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Nevşehir, 2015.
32. Knoll G. F., “Radiation Detection and Measurements 3rd ed.”, *John Wiley & Sons, Inc.* ISBN: 0-471-07338-5, New York, 2000.
33. Currie L.A., “Limits for qualitative detection and quantitative determination”, *Anal. Chem.* 40, 586–593, 1968.
34. EC (European Commission) Radiation protection 112- Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. Directorate-General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, 1999.
35. Capaccioni B., Cinelli G., Mostacci D., Tositti L., “Long-term risk in a recently active volcanic system: Evaluation of doses and indoor radiological risk in the quaternary Vulsini Volcanic District (Central Italy)”, *J. Volc. Geotherm. Res.*, 247-248, 26-36, 2012.
36. Marocchi M., Righi S., Bargossi G.M., Gasparotto G., “Natural radionuclides content and radiological hazard of commercial ornamental stones: An integrated radiometric and mineralogical-petrographic study”, *Radiat. Meas.*, 46, 538-545, 2011.
37. Turhan Ş., “Estimation of possible radiological hazards from natural radioactivity in commercially-utilized ornamental and countertops granite tiles”, *Ann. Nucl. Energy*, 44, 34-39, 2012.
38. Beretka J., Mathew P.J., “Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-product”, *Health Phys.*, 48, 87-95, 1985.
39. OECD-NEA, “Exposure to radiation from natural radioactivity in building materials”, Report by Group of Experts of the OECD Nuclear Energy Agency (NEA), Paris, 1979.
40. TS 12614, “Çevre Sağlığı- Kapalı ortamda radon kirliliğine Karşı alınacak tedbirler”, Ulusal Standard, Türk Standardları Enstitüsü, 1999.
41. ICRP, “Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”, vol. 212 No.1-3, publication 60, 1990.

42. Taşkin, H., Karavus, M., Ay, P., Topuzoglu, A., Hidiroglu, S., Karahan, G., “Radionuclide concentrations in soil and lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in Kırklareli, Turkey”, *J. Environ. Radioact.*, 100, 49-53, 2009.
43. <http://kaynak.home.uludag.edu.tr/images/radyoaktivite.pdf>
44. Nükleer Fizik I & II, Kenneth S. Krane, Palme Yayıncılık, 2001
45. <http://www.bilgiustam.com/radyasyon-nedir-zararlari-nelerdir/>
46. Köklü, N., “Radyasyonun insan sağlığı üzerindeki etkileri ve tıpta uygulama alanları”, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Konya, 2006.
47. Güngör, N., “Sağlık Fiziği”, İTÜ Fen Edebiyat Fakültesi yayınları, 1991.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı: Elif ATICI

Doğum Tarihi ve Yeri: 28 Nisan 1989, Gölköy

Medeni Durumu: Bekâr

Tel: 05546886089

E-posta: elifatici52@hotmail.com

Yazışma Adresi: Şahincili Mah. 644. Sok. Orsan Mevkii No:1 Daire: Altınordu/ORDU

Eğitim Durumu: Fizikçi/ Fizik Öğretmeni/ C Sınıfı İş Güvenliği Uzmanı

2013 - 2014 **İş Güvenliği Uzmanı**

2013 - 2016 **Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi (Nevşehir)**
Fizik Bölümü Tezli Yüksek Lisans Eğitimi

2013 - 2014 **Giresun Üniversitesi (GİRESUN)**
Fizik Öğretmenliği Tezsiz Yüksek Lisans Eğitimi

2008 - 2013 **Nevşehir Üniversitesi (Nevşehir)**
Fizik Lisans Eğitimi

2012 - **Anadolu Üniversitesi (Eskişehir)**
Sağlık Kurumları İşletmeciliği

2003 - 2006 **Cumhuriyet Lisesi (Ordu)**
Ortaöğretim

1995 – 2003 **Saraycık İlköğretim (Ordu)**
İlköğretim

Tezler

Lisans Tez Başlığı ve Tez Danışmanı

Lisans Tez Konusu: Platinum izotopunun elektro magnetik geçiş olasılıkları ve enerji düzeylerinin incelenmesi

Tez Yöneticisi: Doç. Dr. Harun Reşit Yazar

Yüksek Lisans Tez Başlığı ve Tez Danışmanı

Yüksek Lisans Tez Konusu: Kapadokya bölgesinde yapı taşı olarak üretilen tüflerdeki doğal radyoaktivitenin gama spektrometrik yöntemle ölçülmesi

Tez Yöneticisi: Prof. Dr. Şeref TURHAN

Kurslar ve Sertifikalar

- 1) 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union Certificate
- 2) Bilgisayar İşletmenliği-Operatör Sertifikası
- 3) İngilizce Sertifikası
- 4) C Sınıfı İş Sağlığı ve Güvenliği Sertifikası
- 5) Giresun Üniversitesi Eğitim Fakültesi Öğretmenlik Pedagojik Formasyon Sertifikası
- 6) Risk Analysis Certificate of Suitability
- 7) ISO 14001:2004 Environmental Management Systems Certificate of Suitability
- 8) ISO 18001:2007-Ohsas Occupational Health and Safety Systems Certificate of Suitability
- 9) ISO: 19011-2011 Internal Auditor Certificate of Suitability
- 10) ISO 22000:2005-HACCP Food Safety Management Systems Certificate of Suitability
- 11) ISO 9001:2008 Quality Management Systems of Suitability

Yayınlanan Makaleler: Ş. TURHAN, E. ATICI, A. VARİNLİOĞLU. Radiometric analysis of volcanic tuff Stones used as ornamental and structural building materials in Turkey and evaluation of radiological risk, Radioprotection 50(4), 273-280 (2015).

Projeler ve Kongreler : 15/08/2014 – 15/02/2016 tarihleri arası 114Y042 TÜBİTAK proje nolu Volkanik Tüften Üretilmiş Doğal Taşların Yalıtım ve Dekorasyon Amaçlı Kaplama Malzemesi Olarak Kullanılmasının Radyolojik Açıdan Değerlendirilmesi projesinde bursiyer.

Balkan Fizik Birliği 9. Uluslararası Fizik Konferansı (BPU-9) İstanbul Üniversitesi 24-27 Ağustos 2015