

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

Ferhat GEZER

**FARKLI ENDÜSTRİYEL SEKTÖRLERDE KULLANILAN
MİKA TAŞI VE ZEOLİT İÇİNDEKİ DOĞAL
RADYONÜKLİTLERİN BELİRLENMESİ**

FİZİK ANABİLİM DALI

ADANA-2018

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI ENDÜSTRİYEL SEKTÖRLERDE KULLANILAN MİKA TAŞI
VE ZEOLİT İÇİNDEKİ DOĞAL RADYONÜKLİTLERİN
BELİRLENMESİ**

Ferhat GEZER

DOKTORA TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

Bu Tez .../.../2018 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından
Oybirliği/Oyçokluğu ile Kabul Edilmiştir.

.....
Prof. Dr. Yüksel UFUKTEPE
DANIŞMAN

.....
Prof. Dr. Mustafa TOPAKSU
ÜYE

.....
Prof. Dr. Tunç TÜKEN
ÜYE

.....
Doç. Dr. F. Aysun UĞUR
ÜYE

.....
Doç. Dr. O. Murat ÖZKENDİR
ÜYE

Bu Tez Enstitümüz Fizik Anabilim Dalında hazırlanmıştır.
Kod No:

**Prof. Dr. Mustafa GÖK
Enstitü Müdürü**

**Bu Çalışma Ç. Ü. Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: FDK-2016-5899**

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge
vefotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri
Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZ

DOKTORA TEZİ

FARKLI ENDÜSTRİYEL SEKTÖRLERDE KULLANILAN MİKA TAŞI VE ZEOLİT İÇİNDEKİ DOĞAL RADYONÜKLİTLERİN BELİRLENMESİ

Ferhat GEZER

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Yüksel UFUKTEPE
Yıl: 2018, Sayfa: 112
Jüri : Prof. Dr. Yüksel UFUKTEPE
: Prof. Dr. Mustafa TOPAKSU
: Prof. Dr. Tunç TÜKEN
: Doç. Dr. F. Aysun UĞUR
: Doç. Dr. O. Murat ÖZKENDİR

Mika ve zeolit mineralleri, inşaat, kâğıt, boya, otomobil, tekstil, gübre gibi farklı endüstrilerde yaygın olarak kullanılan önemli katkı ham maddeleridir. Bu çalışmada, Batı Anadolu’da bulunan dört zeolit ve üç mika Ocağının ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K doğal radyonüklit, radon emisyon katsayısı ve radon kütle salım hızları dağılımları, yüksek saflıkta germanyum dedektörlü bir gama ışıını spektrometresi kullanılarak belirlendi. 88 adet zeolit örneğindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ’ın ortalama aktivite derişimi, sırasıyla $70,9 \pm 2,8$ Bq/kg, $122,5 \pm 3,0$ Bq/kg ve $1025,5 \pm 24,9$ Bq/kg ve 84 adet mika örneğindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ’ın ortalama aktivite derişimi ise, sırasıyla $8,2 \pm 0,9$ Bq/kg, $37,6 \pm 1,8$ Bq/kg ve $2706,8 \pm 24,7$ Bq/kg olarak ölçüldü. Zeolit ve mika örneklerinin ortalama radon emisyon katsayı, sırasıyla $\%4 \pm \%1$ ve $\%10 \pm \%1$ ve zeolit ve mika örneklerinin ortalama radon kütle salım hızları ise, sırasıyla $5,95 \pm 0,24$ $\mu\text{Bq/kg s}$ ve $1,78 \pm 0,19$ $\mu\text{Bq/kg s}$ olarak bulundu. Zeolit ve mika örneklerinin, yapı malzemelerinde katkı ham maddesi olarak kullanılmasını radyolojik açıdan değerlendirmek amacıyla aktivite derişim indisi ve alfa indisi hesaplandı. Ayrıca, zeolit ve mika ocaklarında çalışanların alabilecekleri yıllık etkin radyasyon dozu ve yaşam boyu kanser riski değerlendirildi. Veriler, ölçüt veya sınır değerler ile karşılaştırıldı. Sonuçlar, incelenen zeolit ve mika örneklerin yapı malzemesi olarak kullanılmasının önemli ölçüde herhangi bir radyolojik risk oluşturmayacağını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Mika, Zeolit, Doğal Radyoaktivite, ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , radon emisyon katsayısı, radon kütle salım hızı, Gama ışıını spektrometresi.

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

DETERMINATION OF NATURAL RADIONUCLIDES MICA STONE AND ZEOLITE USED IN DIFFERENT INDUSTRIAL SECTORS

Ferhat GEZER

ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS

Supervisor : Prof. Dr. Yüksel UFUKTEPE
Year: 2018, Pages: 112
Jury : Prof. Dr. Yüksel UFUKTEPE
: Prof. Dr. Mustafa TOPAKSU
: Prof. Dr. Tunç TÜKEN
: Assoc. Prof. Dr. F. Aysun UĞUR
: Assoc. Prof. Dr. O. Murat ÖZKENDİR

Mica and zeolite minerals are important additives that are widely used in different industries such as construction, paper, paint, automobile, textile, and fertilizer. In this study, distributions of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K natural radionuclides, radon emanation coefficient and radon mass exhalation rates of four zeolites and three mica quarries in Western Anatolia were determined using a gamma ray spectrometry with high purity germanium detector. Average activity concentrations of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in 88 zeolite and 84 mica samples were measured as 70.9 ± 2.8 Bq/kg, 122.5 ± 3.0 Bq/kg and 1025.5 ± 24.9 Bq/kg and 8.2 ± 0.9 Bq/kg, 37.6 ± 1.8 Bq/kg and 2706.8 ± 24.7 Bq/kg, respectively. The average radon emanation coefficients and the average of radon mass exhalation rates of the zeolite and mica samples were found as $4\% \pm 1\%$ and $10 \pm 1\%$ and 5.95 ± 0.24 $\mu\text{Bq/kg s}$ and 1.78 ± 0.19 $\mu\text{Bq/kg s}$, respectively. The activity index and the alpha index were calculated in order to radiological evaluation of the use of zeolite and mica samples as additives in building materials. In addition, annual effective radiation doses and lifetime cancer risks for zeolite and mica workers were evaluated. The data were compared with criteria or limit values. The results revealed that usage of the investigated zeolite and mica samples as building materials would not cause any significant radiological risk.

Key Words: Mica, Zeolite, Natural Radioactivity, ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , radon emanation coefficient, radon mass exhalation rate, Gamma ray spectrometer.

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Bu çalışmada, yer kabuğu minerallerinden olan; özellikle asbeste alternatif olarak, elektrik - elektronik endüstrisinde, çimento-beton üretiminde, dekoratif ve boya katkı maddesi olarak kullanılan mika taşının ve atık sularda bulunan azot ve istenmeyen bazı ağır metal katyonlarının (örneğin Pb^{++}) tutuculuğunda, diş macunu ve deterjan katkı maddesi olarak kullanılan zeolit, kullanıldıkları alanlar itibariyle radyolojik açıdan değerlendirmesi, bölgeden bölgeye değişiklik gösteren doğal radyonüklitlerin dağılımlarının belirlenmesi, izlenmesi ve bu radyonüklitlerden kaynaklanan ilave dozun insan sağlığına etkileri açısından değerlendirilmesine ilişkin çalışmaların sonuçları sunulmuştur.

Zeolit örnekleri Manisa Gördes’ de bulunan 4 farklı ocaktan toplanmış olup 88 adet örnek temin edilmişken mika taşı örnekleri Muğla, Yatağan Hisarardı’ nda bulunan 3 farklı ocaktan toplanmış olup 84 adet örnek temin edilmiştir. Kütleleri 1,5-2 kg olan her bir zeolit ve mika örnekleri poşetler içinde Çukurova Üniversitesi Fizik Bölümü Gülten Günel Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarına getirildi, toplandıkları yerlerin bilgisini içerecek şekilde kodlandı ve laboratuvar ortamında kurumaya bırakıldı. Daha sonra bu örnekler, dedektör verim kalibrasyonunun yapıldığı referans standart malzemeler ile hemen hemen aynı büyüklük ve geometriye sahip olmaları amacıyla öğütücüden geçirilerek toz haline getirildi ve gözenek büyüklüğü 1 mm olan elekten geçirildi. Elenmiş örnekler, net kütle miktarını belirlemek için sıcaklığı 110 °C’ye ayarlanmış etüvde 20 saat süreyle kurutuldu. Örnekler 5x6 cm boyutundaki silindirik örnek kaplarına konuldu ve tartım işlemleri yapıldı. Daha sonra kapların sızdırmazlığı sağlanarak radyum (^{226}Ra) ve bozunum ürünleri arasındaki kalıcı dengenin sağlanabilmesi için her bir örnek, radyoaktivite ölçme işlemine kadar en az bir ay bekletildi. Ölçüm işlemleri yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörü kullanılarak yapıldı. Ölçme işlemi sonucunda elde edilen aktivite sonuçları çizelge hâlinde verilmiştir. Mika ve zeolit örneklerinin yapı malzemesi olarak kullanılmasını, radyolojik açıdan

değerlendirmek amacıyla radon emisyon katsayısı (REK), radon kütle salım hızı (RKSH) ($\mu\text{Bq/kg s}$), aktivite derişim indisi (ADI), alfa indisi (AI), havada soğurulan gama doz hızı (DH) (nGy/h), yıllık etkin radyasyon dozu (YERD) (μSv) ve yaşam boyu kanser riski (YBKR) hesaplanmıştır.

Elde edilen veriler doğrultusunda mika ve zeolit örneklerinin aktivitelerinin yüksek çıkmasının sebeplerini, cevherin mineralojisine, bölgenin jeolojik, jeokimyasal yapısına ve bu minerallerin gözenekli yapıları sebebi ile uranyum, toryum ve potasyum elementlerinin tutulmaları veya özellikle zeolit minerali ile bu elementler arasındaki kimyasal olaylara bağılığı ile açıklayabileceğimiz sonucuna ulaşılmıştır. Bu örneklerin, yapı katkı malzemesi, özellikle de çimento ve beton üretiminde katkı ham maddesi olarak kullanılmasının radyolojik açıdan herhangi bir risk oluşturmadığı da ulaşılan sonuçlardandır.

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmamda benden her türlü ilgi ve desteğini esirgemeyen danışman hocalarım Prof. Dr. Yüksel UFUKTEPE ve Prof. Dr. Şeref TURHAN'a teşekkür ederim.

Ayrıca her türlü desteğini yaşamım boyunca benden esirgemeyen sevgili aileme ve aramıza yeni katılan oğlum Alper GEZER'e sonsuz teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ	I
ABSTRACT.....	II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET	III
TEŞEKKÜR.....	V
İÇİNDEKİLER	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XIV
1. GİRİŞ	1
1.1. Radyoaktivitenin Tanımı	6
1.2. Radyoaktivitenin Keşif Öyküsü.....	8
1.3. Yerküre Kaynaklı Radyasyon.....	9
1.3.1. Uranyum Radyoaktif Bozunum Serisi.....	10
1.3.2. Toryum Radyoaktif Bozunum Serisi	12
1.3.3. Aktinyum Radyoaktif Bozunum Serisi.....	14
1.3.4. Potasyum	16
1.4. Radyoaktif Bozunma Kanunu.....	17
1.5. Yarı ve Ortalama Ömür	19
1.6. Zincirleme Reaksiyon.....	20
1.7. Radyoaktif Bozunma Türleri	21
1.7.1. Alfa Bozunumu.....	22
1.7.2. Beta Bozunumu	23
1.7.3. Gama Bozunumu	27
1.8. Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimi.....	27
1.8.1. Fotoelektrik Etki	29
1.8.2. Compton Saçılması.....	29
1.8.3. Çift Oluşumu	30

1.9. Radyoaktivite Birimleri	31
1.9.1. Çevresel Radyoaktivite	32
1.9.2. Doğal Çevredeki Radyoaktivite	33
1.9.3. Tipik Radyasyon Dozları	34
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	37
3. MATERYAL VE METOT	51
3.1. Örneklerinin Toplanması	51
3.2. Örneklerin Hazırlanması	51
3.3. Gama Işını Spektrometresi	54
3.3.1. Gama Spektrometrik Analizler	58
3.3.2. Enerji Kalibrasyonu	59
3.3.3. HPGe Dedektörün Tam Pik Verim Kalibrasyonu	61
3.3.4. Uygun Gama Işını Fotopiklerin Seçilmesi	62
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	64
4.1. Zeolit ve Mika Örneklerinin Radyonüklit Derişimleri	64
4.1.1. Zeolit Ocaklarının Radyonüklit Dağılımı	74
4.1.2. Mika Ocaklarının Radyonüklit Dağılımı	79
4.2. Radon Emisyon Katsayısı ve Radon Kütle Salım Hızı	85
4.2.1. Zeolit ve Mika Örnekleri için Ölçülen Radon Emisyon Katsayısı	86
4.2.2. Zeolit ve Mika Örnekleri için Ölçülen Radon Kütle Salım Hızı	87
4.3. Radyolojik Değerlendirme	89
4.3.1. Zeolit ve Mikanın Yapı Malzemesi Olarak Kullanılmasının Radyolojik Açıdan Değerlendirilmesi	89
4.3.2. Ocak Çalışanlarının Maruz Kalabilecekleri Radyasyon Dozunun Değerlendirilmesi	93
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	102
5.1. ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K Radyonüklitlerinin Aktivite Derişimleri	102
5.2. Radon Emisyon Katsayısı ve Radon Kütle Salım Hızları	103

5.3. Zeolit ve Mikanın Yapı Malzemesi Olarak Kullanılmasının Radyolojik	
Değerlendirilmesi	103
5.4. Çalışanların Maruz Kalabilecekleri Radyasyon Dozunun	
Değerlendirilmesi	104
5.5. Öneriler	105
KAYNAKLAR	106
ÖZGEÇMİŞ	112





ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA

Çizelge 1.1.	Yerküre Kaynaklı Üç Doğal Radyoaktif Seri (Krane, 1998).....	9
Çizelge 1.2.	^{238}U 'in Radyoaktif Bozunum Serisi (Lowder ve ark, 1956; Özger, 2005)	11
Çizelge 1.3.	^{232}Th 'in Radyoaktif Bozunum Serisi (Lowder ve ark, 1956; Özger, 2005)	13
Çizelge 1.4.	^{235}U 'in Radyoaktif Bozunum Serisi (Lowder ve ark, 1956; Özger, 2005)	15
Çizelge 1.5.	Doğada Tek Başına Bulunan Yerkabuğu Orjinli Radyonüklidler (Lowder ve ark, 1956; Özger, 2005).....	16
Çizelge 1.6.	Radyoaktivite Birimleri	32
Çizelge 1.7.	Doğal Radyonüklitlerin Yarı Ömürleri ve Ortalamala Bollukları	34
Çizelge 1.8.	ABD' deki Ortalama Radyasyon Dozları, 1980-1982 (Her Yıl Etkin Doz) (Nuclear Science, 2003)	35
Çizelge 3.1.	Yüksek Safılıkta Germanyum Dedektörün Özellikleri	60
Çizelge 3.2.	RGU-1, RGTh-1 ve RGK-1 Referans Malzemeler.....	62
Çizelge 4.1.	Zeolit Örneklerinde Ölçülen Radyonüklit Aktivite Derişimleri için Tanımlayıcı İstatistik Bilgiler	70
Çizelge 4.2.	Mika Örneklerinde Ölçülen Radyonüklit Aktivite Derişimleri için Tanımlayıcı İstatistik Bilgiler	70
Çizelge 4.3.	Zeolit için Pearson Korelasyon Katsayı Matrisi	71
Çizelge 4.4.	Mika için Pearson Korelasyon Katsayı Matrisi	71
Çizelge 4.5.	Z1 Kodlu Zeolit Ocağının Radyonüklit Dağılımı	76
Çizelge 4.6.	Z2 Kodlu Zeolit Ocağının Radyonüklit Dağılımı	76
Çizelge 4.7.	Z3 Kodlu Zeolit Ocağının Radyonüklit Dağılımı	77
Çizelge 4.8.	Z4 Kodlu Zeolit Ocağının Radyonüklit Dağılımı	78
Çizelge 4.9.	M1 Kodlu Mika Ocağının Radyonüklit Dağılımı	81

Çizelge 4.10. M2 Kodlu Mika Ocağının Radyonüklit Dağılımı	82
Çizelge 4.11. M3 Kodlu Mika Ocağının Radyonüklit Dağılımı	82
Çizelge 4.12. Zeolit ve Mika için Ölçülen Radon Emisyon Katsayılarına İlişkin Tanımlayıcı İstatistiki Bilgi	87
Çizelge 4.13. Zeolit ve Mika Ocaklarının Radon Emisyon Katsayıları Dağılımı	87
Çizelge 4.14. Zeolit ve Mika için Ölçülen Radon Kütle Salım Hızlarına İlişkin Tanımlayıcı İstatistiki Bilgi	88
Çizelge 4.15. Zeolit ve Mika Ocaklarının Radon Kütle Salım Hızları Dağılımı	88
Çizelge 4.16. Zeolit ve Mika için Hesaplanan ADİ Değerlerine İlişkin Tanımlayıcı İstatistiki Bilgi	90
Çizelge 4.17. Zeolit ve Mika Ocaklarının ADİ Değerleri Dağılımı.....	91
Çizelge 4.18. Zeolit ve Mika için Hesaplanan AI Değerlerine İlişkin Tanımlayıcı İstatistiki Bilgi	92
Çizelge 4.19. Zeolit ve Mika Ocaklarının AI Değerleri Dağılımı	93
Çizelge 4.20. Zeolit ve Mika İçin Hesaplanan DH Değerlerine İlişkin Tanımlayıcı İstatistiki Bilgi	95
Çizelge 4.21. Zeolit ve Mika Ocaklarının DH Değerleri Dağılımı.....	96
Çizelge 4.22. Zeolit ve Mika İçin Hesaplanan YERD Değerlerine İlişkin Tanımlayıcı İstatistiki Bilgi	98
Çizelge 4.23. Zeolit ve Mika Ocaklarının YERD Değerleri Dağılımı.....	99
Çizelge 4.24. Zeolit ve Mika için Hesaplanan YBKR Değerlerine İlişkin Tanımlayıcı İstatistiki Bilgi	100
Çizelge 4.25. Zeolit ve Mika Ocaklarının YBKR Değerleri Dağılımı.....	100

ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil 1.1.	Kararlı Bir Çekirdeğin N-Z Grafiği (Krane, 1998)	7
Şekil 1.2.	^{238}U 'in Radyoaktif Bozunum Serisi (NCRP 97, 1988).....	10
Şekil 1.3.	^{232}Th 'in Radyoaktif Bozunum Serisi (NCRP 97, 1988).....	12
Şekil 1.4.	^{235}U 'in Radyoaktif Bozunum Serisi (NCRP 97, 1988).....	14
Şekil 1.5.	Bozunum Grafiği	18
Şekil 1.6.	Alfa Bozunumu	22
Şekil 1.7.	β^- Bozunumu.....	24
Şekil 1.8.	β^+ Bozunumu	25
Şekil 1.9.	Elektron Yakalama	26
Şekil 1.10.	β^- Bozunumu Sonrasında Yayılan Elektronların Enerji Spektrumları	26
Şekil 1.11.	Gama Bozunumu	27
Şekil 1.12.	Elektromanyetik Radyasyonun Alüminyum ile Etkileşimi (Krane, 2001).....	28
Şekil 1.13.	Fotoelektrik Etki.....	29
Şekil 1.14.	Compton Saçılması.....	30
Şekil 1.15.	Çift Oluşumu	31
Şekil 4.1.	Gama Işını Spektrumu.....	65
Şekil 4.2.	Fotopik Alanı.....	66
Şekil 4.3.	Background Ölçümlerine Ait Gama Işını Spektrumu	67
Şekil 4.4.	Zeolit Örneklerindeki a) ^{226}Ra , b) ^{232}Th ve c) ^{40}K 'in Histogram Eğrisi	72
Şekil 4.5.	Mika Örneklerindeki a) ^{226}Ra , b) ^{232}Th ve c) ^{40}K 'in Histogram Eğrisi	73
Şekil 4.6.	Zeolit ve Mika Örneklerinde Ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th Ve ^{40}K 'in Ortalama Aktivite Değişimlerinin Yerkabuğu Ortalaması ile Karşılaştırılması.....	74

Şekil 4.7.	Zeolit Ocaklarında Ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın Ortalama Aktivite Derişimlerinin Yerkabuğu Ortalaması ile Karşılaştırılması.....	79
Şekil 4.8.	Mika Ocaklarında Ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th Ve ^{40}K 'ın Ortalama Aktivite Derişimlerinin Yerkabuğu Ortalaması ile Karşılaştırılması.....	84
Şekil 4.9.	Zeolit ve Mika Örneklerinin Ortalama ADİ Değerlerinin Sınır Değer ile Karşılaştırılması.....	91
Şekil 4.10.	Zeolit ve Mika Örneklerinin Ortalama AI Değerlerinin Sınır Değer ile Karşılaştırılması.....	93
Şekil 4.11.	Zeolit ve Mika Örneklerinin Ortalama DH Değerlerinin Dünya Ortalaması ile Karşılaştırılması	95
Şekil 4.12.	Radyonüklitlerin Zeolit Örnekleri Ocağı için Hesaplanan Toplam Gama Doz Hızına Katkıları.....	96
Şekil 4.13.	Radyonüklitlerin Mika Örnekleri Ocağı için Hesaplanan Toplam Gama Doz Hızına Katkıları.....	97
Şekil 4.14.	Zeolit ve Mika Örneklerinin Ortalama YERD Değerlerinin Dünya Ortalaması ile Karşılaştırılması	98

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	: Aktivite
A_s	: Standartın Aktivitesi
A_x	: Örneğin Aktivitesi
B	: Doğal Fon
Bq	: Becquerel
C	: İntegral Sabiti
C_K	: K Derişimi (Özgöl Aktivite)
C_{Th}	: Th Derişimi (Özgöl Aktivite)
C_U	: U Derişimi (Özgöl Aktivite)
D	: Radyasyon Dozu
dt	: Küçük Zaman Aralığı (Diferansiyel)
E	: Elektrik Alan
E_i	: İlk Enerji
E_f	: Son Enerji
E_γ	: Gama Enerjisi
f_γ	: Gama Yayınlanma Olasılığı
G	: İlgilenilen Bölgedeki Pikin Toplam Alanı, Sayım Sayısı
g	: Gram
h	: Planck Sabiti, Saat
K	: Potasyum
keV	: Kiloelektronvolt
kg	: Kilogram
m	: Güven Katsayısı
m_s	: Standardın Kütlesi
m_x	: Örneğin Kütlesi

N	: Radyoaktif Çekirdek Sayısı, İlgilenilen Pikin Sağında ve Solundaki Kanal Sayısı
n	: E Enerjili Fotopikin Altındaki Net Alan, Seçilen Uç Kanal
o	: Sayısı
nGy	: Nanogrey
N ₀	: Başlangıçtaki Çekirdek Sayısı, Kaynağın Aktivitesi
N _p	: Pik Alanı
P	: Bozunma Olasılığı
P ₂ O ₅	: Fosfor Pentaoksit
P _y (E)	: E Enerjili Gama Fotopikinin Yayınlanma Olasılığı
S	: Net Pik Alanı
t	: Zaman, Sayım Zamanı
t _{1/2}	: Yarı Ömür
t _d	: Bozunum Süresi
t _s	: Standartın Sayım Süresi
t _x	: Örneğin Sayım Süresi
Th	: Toryum
X	: X-ışını
Z	: Atom Numarası
α	: Alfa
β	: Beta
ΔE	: Enerji Farkı
ε	: Verim
γ	: Gama
μCi	: Mikrocurie
μSv	: Mikrosievert
τ	: Ortalama ömür
U	: Uranyum

ν	: Frekans
ADC	: Analog Sayısal Dönüştürücü
EPA	: Amerikan Çevre Örgütü
HPGe	: Yüksek Saflıkta Germanyum Dedektörü
IAEA/RGK-1	: UAEA Potasyum Standardı
IAEA/RGTh-1	: UAEA Toryum Standardı
IAEA/RGU-1	: UAEA Uranyum Standardı
MCA	: Çok Kanallı Analizör
MDA	: Minimum Dedeksiyon Aktivitesi
NaI(Tl)	: Talyum Aktive Edilmiş Sodyum İyodür Dedektör
UNSCEAR	: Birleşmiş Milletler Radyoaktivite Etkileri Bilimsel Komitesi
λ	: Radyoaktif Numunenin Bozunma Sabiti
XRF	: X-Işını Flüoresans



1. GİRİŞ

İnsanoğlu yaşadığı kapalı ve açık ortamlarda sürekli olarak doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından yayınlanan iyonlaştırıcı radyasyona (alfa, beta, gama ve x-ışınları v.b.) maruz kalmaktadır. Doğal ve yapay radyonüklitlerden yayınlanan gama radyasyonu dış ışınlamaya sebep olurken, solunum ve sindirim yolu ile vücuda alınan radyonüklitlerden yayımlanan alfa ve beta radyasyonu iç ışınlamaya önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Bireylerin yaşam standartlarına, yaşadığı ortamların fiziksel özelliklerine ve coğrafi koşullara bağlı olarak değişiklik göstermekle birlikte maruz kaldığı yıllık ortalama olan 2.8 mSv'lik radyasyon dozunun yaklaşık %85'i doğal radyasyon ve %15'i ise yapay radyasyon kaynaklarından ileri gelmektedir (UNSCEAR, 2000).

Yerkabuğunda bulunan uranyum (^{238}U), toryum (^{232}Th) ve aktinyum (^{235}U) doğal radyoaktif serilerine ait radyonüklitler ve bu serilerin dışında yerkabuğunda doğal olarak var olan radyoaktif potasyum (^{40}K) v.b. radyonüklitler çevredeki radyoaktivitenin en önemli kaynaklarını oluşturmaktadır. Bu radyonüklitlerin aktivite derişim oranları, bölgenin jeolojik ve jeokimyasal yapısına göre bölgeden bölgeye farklılık göstermektedir. Uranyum, toryum, radyum ve radyoaktif potasyumun aktivite derişimleri sırasıyla 16-110 Bq/kg, 11-64 Bq/kg, 17-60 Bq/kg ve 140-850 Bq/kg arasında değişmektedir (UNSCEAR, 2000).

Farklı alanlarda kullanılan endüstriyel ham maddeler çeşitli jeolojik ortamlarda biçimlenmiş olan minerallerdir. Bu endüstriyel ham minerallerin sahip olduğu doğal radyoaktivite konsantrasyonları bunların mineralojisi ve jeokimyası ile yakından ilgilidir. Bazen birkaç işlenmemiş mineralin nispeten yüksek doğal radyoaktiviteye sahip olduğu tespit edilmiştir. 2004 yılında Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) doğal kaynaklı radyonüklidlerin aktivite konsantrasyonları için önerilen değerlerin ^{40}K için 10 Bq/g ve diğerleri için 1 Bq/g olması gerektiğini açıkladı (IAEA, 2004).

Bu çalışmanın amacı; endüstriyel malzemeler ve bu malzemelerin girdi olarak yer aldığı pek çok ürün nedeniyle insanların çevresel kaynaklardan alabilecekleri radyasyon dozunu tayin ederek, meydana gelebilecek sağlık risklerinin değerlendirmesidir. Endüstriyel hammaddeler içinde yer alan Mika ve Zeolit bu çalışma kapsamında ele alınmıştır. Her iki malzeme aşağıda açıklandığı gibi pek çok alanda geniş bir kullanıma sahiptir ve doğada saf olarak elde edilerek işlenmektedir.

Mika; granit bileşimli magmatik kayalarda ve metamorfik kayalarda doğal olarak bulunan bir mineraldir. Farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip levhamsı, kompleks bileşimli hidroalüminyum silikat minerallerinden oluşur. Mineralojik olarak yer kabuğunun ağırlıkça % 3.8'ini oluşturan mikalar özellikle asidik magmatik ve metamorfik kayalarda bol olarak bulunur. Mika grubu mineralleri arasında endüstriyel öneme sahip ana mineral muskovit $[KAl_2(AlSi_3O_{10})(F,OH)_2]$ ve flogopittir $[KMg_3AlSi_3O_{10}(OH)_2]$ (Turner D.C.,1975). Ülkemiz için yeni bir endüstriyel hammadde olan toz mika, dünyada endüstriyel alanda geniş çapta kullanılmaktadır. Özellikle çevre için zararlı etkileri belirlenen asbeste alternatif malzemeler arasında yer alması toz mikanın kullanımını arttırmıştır. Mika, elektrik - elektronik endüstrisinde ısı ve elektrik yalıtımında kullanılmaktadır. Ayrıca, her türlü elektrik aletlerinin yapımında telefon santrallerinde, dinamo ve motor gibi yüksek voltaj indüksiyon aletlerinin yapımında kullanılmaktadır. Blok mika ise vakum tüpleri ve kapasitör üretiminde kullanılmaktadır. Mika dielektrik özellikleri dikkate alındığı zaman, fenol yapışkan ve fenolik kalıp yapımında geniş çapta dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır. Üstün mekanik, ısı ve elektriksel özelliklere sahip olan mika, yüksek gerilme ve bükülme dayanımı gösteren, şeffaf, elastik, sert ve nispeten ucuz doğal bir mineraldir. Kimyasal olarak kararlı olup, ışık, elektrik, su, yağ çözücüler, asitler (hidroflorik asit ve konsantre sülfürik asit haricinde), alkaliler ve kimyasal maddelere karşı dirençli olup mükemmel derecede dielektrik dayanımı ve ısı kararlılığına sahiptir. Neme, yanmaya, erimeye ve sıcaklık değişimine karşı

dayanıklılığı kanıtlanan mika, ışığı yansıtan ve geçiren muskovit tanelerinin, dekoratif ve süsleyici özelliklere sahiptir. Yapışmaya ve sürtünmeye karşı kaydadeğer özelliklere sahip olan muskovit tanelerinin yüzeylerinin korunmasına yardımcı olur. Boyalarda katkı maddesi olarak kullanıldığında düşük özgül ağırlığı ve yapraksı yapısı nedeni ile çökelmemesi ve boyada homojen bir dağılım göstermesi, ayrıca sudan etkilenmemesi, yapıştırıcı ve boyalar ile kolay karışması boya endüstrisinde kullanılma özelliğine sahiptir. Son ürünün sertleşmesine, pekişmesine ve kuvvetlenmesine yardımcı olma özelliği olduğundan dolayı mikro ölçekte kırılmayı ve bozulmayı önler, iletkenliği azaltır ve ısı yalıtımını artırır. Bunlara ek olarak ultraviyole ışığı geçirme özelliğine sahip olması, güneş ışığının, nemin, ısı ve atmosferik gazların zararlı etkilerini azaltma özelliği, yaşam kalitesini ve yapıların dekoratif özelliklerini artırıcı olduğu tespit edilmiştir (Rajgerhia L.M., 1987).

Son zamanlarda, yapıların dış yüzeylerinde mika katkılı sıva malzemelerinin kullanılması, yapılara dekoratif bir görünüm kazandırma özelliği kattığı için toz mikanın endüstriyel alanda kullanımına iyi bir örnek teşkil etmektedir. Yukarıda bahsedilen özelliklerden dolayı kuru öğütülmüş 100 - 325 mesh tanecik aralığına sahip toz muskovitin, yalıtkan malzeme ve çatlak çimentosu katkı maddesi olarak kullanılmasında artış gözlenmektedir.

Mika minerali yatakları ülkemizde Muğla-Yatağan-Hisarardı, Akhisar bölgesinde, Balıkesir - Edremit- Sındırgı, Bitlis - Tatvan - Merkez, Bolu - Mudurnu - Düzce, Diyarbakır - Çermik, Elazığ - Merkez, Eskişehir - Merkez- Sarıcakaya,- Gümüşhane - Merkez, İzmir - Merkez - Menemen - Ödemiş, Kastamonu - Daday, Kırklareli - Üskülüp - Lalapaşa, Kütahya - Simav, Manisa - Gördes - Demirci, Tunceli - Nazimiye, Sivas -Divriği - Kangal - İnhisar - Sorgun, Bursa - Uludağ, Kars - Torman bölgelerinde pegmatitik oluşumlara bağlı olarak büyük ve küçük çapta bulunmaktadır (Gülseren B., 1977).

Zeolitler; kafes yapılarında alüminyum, silis ve oksijen; gözeneklerinde ise katyon ve su içeren mikro gözenekli kristal katılardır. Silis ve alüminyum atomları ortak oksijen atomu münasebeti ile birbirlerine tetrahedral olarak bağlanmışlardır (zeolyst.com, 2009).

Zeolit kelime olarak kaynayan taş anlamında olup ısıtıldığında patlaması sebebi ile bu isim verilmiştir. Önemli endüstriyel hammaddeler arasında olan zeolitlerin son yıllarda kullanımı hızla artış göstermiştir. Günümüzde zeolitlerin, iyon değişimi ve emici özelliklerinin yanı sıra katalizör olarak da kullanılabilmeleri bu mineralin değerini daha da arttırmaktadır. Zeolitler için yukarıda sayılan birçok özellikten dolayı; enerji, tarım, hayvancılık, madencilik, metalürji, inşaat, deterjan, kâğıt sanayi, vs. gibi çeşitli sektörlerde kullanılması kaçınılmaz olmuştur.

$(M^+, M^{+2}) O \cdot Al_2O_3 \cdot 9SiO_2 \cdot nH_2O$ genel formülü ile ifade edilebilen zeolit minerali, yapılarındaki Si/Al oranlarında ve içerdikleri katyon cinsi ve miktarlarında bazı farklılıklar göstermektedir. Formülde ifade edilen M^+ bir alkali katyon olup çoğu zaman Na^+ veya K^+ , nadiren ise Li^+ olup, M^{+2} ise bir toprak alkali katyonu olup genellikle Mg^{+2} , Ca^{+2} , Fe^{+2} nadiren ise de Ba^{+2} , Sr^{+2} olur (DPT, 1996).

Ülkemizde 1980’li yıllardan itibaren artan ilgi ile değişik sektörlerde kullanılmaya başlanan zeolitler kimyasal olarak su içeren alümino silikatlar olarak bilinmektedir. Zeolitlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki çeşitlilikler olan; iyon değişikliği yapabilme adsorbsiyon ve buna bağlı moleküler elek yapısı, silis içeriği, ayrıca tortul zeolitlerde açık renkli olma, hafiflik, küçük kristallerin gözenek yapısı bu madenin çok çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmalarına zemin hazırlamıştır. Son zamanlarda, önemli bir endüstriyel hammadde durumuna gelen doğal zeolitlerin kullanım alanları; kirlilik kontrolü, enerji, tarım-hayvancılık, maden-metalürji ve diğer alanlar olarak çeşitlilik göstermektedir.

Zeolit mineralinin en yaygın kullanım alanlarından biri de atık sularda bulunan azot ve istenmeyen bazı ağır metal katyonlarının (örneğin Pb^{++}) bu maden ürünü tarafından kolaylıkla tutulmasıdır. Bir diğer endüstriyel kullanım alanı da

petrol ve kömür ile çalışan tesislerin bacalarından çıkan CO₂, SO₂ ve diğer kirletici gazların zeolitlerin emici özelliği ile ayrılabilmesidir. Diğer yandan uzun yıllardan beri kullanılmakta olan zeolit; gübrelerin kötü kokusunu giderme, içeriğini kontrol etme ve asit volkanik toprakların pH' ını yükseltme amacı ile de kullanılmaktadır. Yer kabuğu kökenli zeolitlerin çoğunlukla kil bakımından fakir olan toprakların tarıma hazırlanmasında yaygın biçimde kullanılması, yüksek iyon değiştirme ve su tutma özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Aynı zaman doğal zeolitlerden, iyon değiştirme ve emici özelliğinden dolayı tarımsal mücadele de ilaç taşıyıcı olarak yararlanılmaktadır. Farklı bir kullanım alanı olan kâğıt endüstrisinde yüksek parlaklığı sebebi ile zeolit cevherleri, dolgu maddesi olarak kullanılmakta olup klinoptilolit flörlü diş macunlarında parlaticı katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Dünya zeolit tüketimi yılda 750 000 ton olup bu tüketimin % 70'i deterjanlarda, % 10 katalizör ve emicilik üretiminde, % 8 nem çekici üretiminde ve % 12'lik kısmıda diğer alanlardadır (Köktürk U., 1995).

Zeolit minerali yatakları ülkemizde Balıkesir, Bigadiç, Manisa, Gördes, Kütahya, İzmir, Bolu, Kapadokya gibi yörelerde bulunmaktadır (Çetinel G., 1993).

Bu çalışmada, mika ve zeolit minerallerinin, kullanıldıkları alanlar itibariyle radyolojik açıdan değerlendirmek amacıyla, içerdiği ve bölgeden bölgeye değişiklik gösteren doğal radyonüklitlerin dağılımlarının belirlenmesi, izlenmesi ve bu radyonüklitlerden kaynaklanan ilave dozun değerlendirilmesine ilişkin çalışmaların sonuçları sunulmuştur. Çalışmanın birinci bölümünde radyoaktivite, doğal radyoaktif seriler, kalıcı denge, radyasyon, radyasyonun madde ile etkileşmesi ve doz birimleri hakkında kuramsal bilgi verilmiştir. İkinci bölümde, mika ve zeolit minerallerine yönelik literatürde yer alan çalışmalar ve HPGe dedektörü kullanılarak daha önce yapılmış çevre radyoaktivite ölçüm çalışmaları özetlenmiştir. Üçüncü bölümde, ülkemizde bulunan farklı maden ocaklarından temin edilen mika ve zeolit örneklerinin kimyasal özelliklerine ve örneklerdeki radyonüklitlerin aktivite derişiminin ölçülmesinde kullanılan Çukurova Üniversitesi Fizik Bölümü Gülten Günel Nükleer Fizik Araştırma

Laboratuvarındaki gama spektrometresi ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Gama spektrometresi kullanılarak elde edilen spektrumun değerlendirilmesi ve aktivitenin hesaplanmasına yönelik olarak fotopik alanı ve hatasını hesaplama yöntemi, yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörü için yapılan mutlak verim ve enerji kalibrasyonu, mutlak aktivite ve standart karşılaştırma yöntemleri ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, elde edilen aktivite sonuçları çizelge hâlinde verilmiş ve gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Mika ve zeolit örneklerinin yapı malzemesi olarak kullanılmasını, radyolojik açıdan değerlendirmek amacıyla radon emisyon katsayısı (REK), radon kütle salım hızı (RKSH) ($\mu\text{Bq/kg s}$), aktivite derişim indisi (ADİ), alfa indisi (AI), havada soğurulan gama doz hızı (DH) (nGy/h), yıllık etkin radyasyon dozu (YERD) (μSv) ve yaşam boyu kanser riski (YBKR) hesaplanmıştır. Beşinci bölümde ise elde edilen veriler değerlendirilmiş ve bu tür katkı malzemelerinin kullanılabilirliğine ilişkin yol gösterici bilgiler özetlenmiştir.

1.1. Radyoaktivitenin Tanımı

Becquerel tarafından radyoaktivitenin keşfedilmesi ile beraber Rutherford'ın çekirdekli atom teorisi ile çalışmalar ivme kazanmıştır. Radyoaktivite, karasız bir elementin ışıma yaparak fiziksel ve kimyasal olarak değişmesine istinaden kararlı hale gelmesi olayına denir. Her atomun çekirdeğinin kararsız olma ihtimali düşüktür ve bu minvalde radyoaktivitenin çekirdek için ayırt edici fiziksel bir özellik olduğu anlaşılmaktadır. Kararsız olan çekirdekler; alfa (α), beta (β) ve gama (γ) olarak adlandırılan yüksek enerjili parçacıklar yayarak kararlı hale gelirler. Alfa parçacıkları (${}^4_2\text{He}$) Helyum çekirdekleri olarak adlandırılır ve iki nötron, iki proton ihtiva eder. Beta parçacıkları yüksek enerjili elektronlar ihtiva ederler. Fakat bazı durumlarda zıt parçacıkları olan ve pozitron (β^+) olarak tanımlanmaktadırlar. Bir diğer yüksek enerjili radyasyon ise oldukça yüksek enerji ihtiva eden ve foton olarak tanımlanan gamadır.

Bir başka pencereden bakıldığında radyoaktivitenin atom çekirdeğinin kararlılığına ve kararsızlığına bağlı olduğu belirtilmektedir. Buda kararlılık ve kararsızlığın Çekirdek Fiziği açısından incelenmesinin gerekli olduğunu göstermektedir . Çekirdek Fiziği açısından bir atomun çekirdeğinin temel yapı taşları nükleon adı verilen, proton (p) ve nötronlardan (n) meydana gelmektedir. Kararlılığın bağlı olduğu niceliklere bakarsak, Şekil 1.1’ de görüleceği gibi kararlılığın çekirdekteki nötron sayısı / proton sayısı yani N/Z ’ nin değerine bağlı olduğunu görürüz.

Kararlılık eğrisi incelendiğinde, $N=Z$ hafif çekirdekleri temsil eden kararlılık bölgesini göstermektedir. $N/Z>1$ olduğu durumda ise daha ağır çekirdeklere rastlanmaktadır.



Şekil 1.1. Kararlı Bir Çekirdeğin N-Z Grafiği (Krane, 1998)

1.2. Radyoaktivitenin Keşif Öyküsü

John Dalton 1802 yılına kadar maddenin yapısıyla ilgili ortaya atmış olduğu savlardan ve çalışmalarından yola çıkarak ilk atom modelini geliştirmiştir. Bu modele göre, yapı taşları her element için farklı kütleye sahiptir ve madde küçük parçalardan oluşmaktaydı. Buda atom kütesinin maddenin fiziksel bir özelliği olduğunu göstermektedir. Fakat Dalton Atom Modelinin atomu bölünemez kabul etmesi bu modelin eksik olduğunu göstermekteydi.

Dalton Atom Modeli'nin atomun bölünemezliğine dair savı 1897 yılına kadar geçerliliğini korudu fakat 1897'de İngiliz fizikçi Joseph John Thomson eksi (-) yüklü elektronu bulması ile bu sav çürütülmüş oldu. Bunu takiben eksi (-) yüklü elektronun varlığı yüksüz oldukları bilinen atom içerisinde zıt yüklü başka parçacıkların da olması gerektiğini düşündürmüştür. Bu düşünce ile üzümlü kek modeli olarak adlandırılan ve Thomson atom modelini öne sürmüştür. Bu modele göre, maddenin küre şeklindeki atomlardan meydana geldiği ve içerisinde kütesi atomun kütesinden çok küçük olan negatif yüklü elektronlar bulunduğu öne sürülmüştür. Bu durumda atomun yüksüz olması için geri kalan kısmının artı yüklü olması gerekmektedir. Artı (+) yükün kütenin çok büyük bir kısmını oluşturması artı yükün atomda homojen olarak dağıldığını kanıtlamakla birlikte elektronların bu kürede elektriksel açıdan yüksüz olmayı sağlayacak şekilde dağılmış olmasını kanıtlamaktadır.

Henri Becquerel 1896 yılında laboratuvarında yaptığı çalışmalar sonucunda bazı tesadüflerle fotoğraf camlarının bulanıklaştığını farketmiştir. Bunu da güneş ışığının etkisi ile kristallerin ışıını yaydığı ve bu camı sislendirdiği ile açıklamıştır. Fakat güneş ışığı altında yaptığı bu yorum malesef kapalı havada seyir değiştirmiştir. Bu çalışmanın farklı bir aşamasında Becquerel, güneş ışığının kristalleri etkilenmesini önlemek amacıyla bazı kimyasallar kullanarak ve camları tekrar karanlık bir ortama koyarak yinelemiştir. Sonuç olarak camlar tekrar dışarı çıkardığında, uranyum bileşikli kristallerden oluşan camlarda artık sisin bulunmayışını tespit etmiştir. Becquerel' in atomun, proton ve elektronlardan

oluştüğunu doğrulamış olması ile tam olarak radyoaktivitenin keşfi gerçekleşmiştir.

1.3. Yerküre Kaynaklı Radyasyon

Doğal yollarla meydana gelmiş olup dışarıdan herhangi bir etki olmaksızın bozunan elementler yerküre kaynaklı radyoaktif elementler olarak isimlendirilir ve oluşan bu olaya da yerküre kaynaklı radyoaktivite denir. Bir başka deyişle bozunan element yerküre kaynaklı olması münasebeti ile doğada bulunur yahutta doğada bulunan diğer elementlerin bozunması sonucu ortaya çıkar. Bu bozunmalar radyoaktif çekirdekler için α ve β yayımlayarak Z (proton) ve A (proton+ nötron) sayılarının (A_ZX) azalması ile kararlı hale dönüşmesi şeklinde açıklanabilir. Bu bozunum türleri ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

Uranyum (${}^{238}\text{U}$), Toryum (${}^{232}\text{Th}$) ve Aktinyum (${}^{235}\text{U}$) v.b. gibi radyoaktif serilere üye olan yerküre kaynaklı radyoizotoplar genellikle ağır çekirdekleri temsil eder ve bu serilere ait bazı temel özellikler Çizelge 1.1’ de verilmektedir.

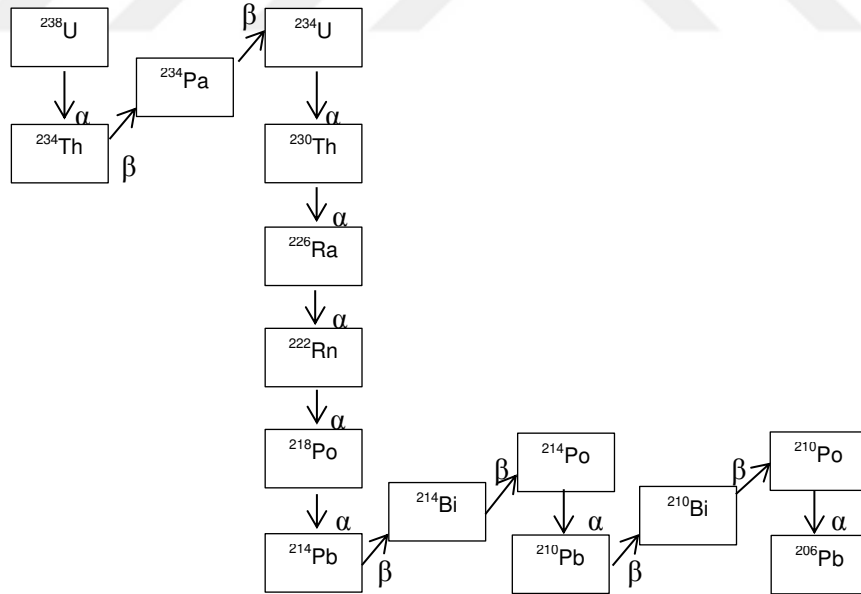
Çizelge 1.1. Yerküre Kaynaklı Üç Doğal Radyoaktif Seri (Krane, 1998)

Seri Adı	Kararlı Çekirdek	En Uzun Ömürlü Üyesi	
		Çekirdek	Yarı Ömür (Yıl)
Uranyum	${}^{206}\text{Pb}$	${}^{238}\text{U}$	4.47×10^9
Toryum	${}^{208}\text{Pb}$	${}^{232}\text{Th}$	1.41×10^{10}
Aktinyum	${}^{207}\text{Pb}$	${}^{235}\text{U}$	7.04×10^8

İlerleyen konularda da tanımlarını yapacağımız yerküre kaynaklı radyoaktif izotopların birçoğu, Uranyum radyoaktif bozunum serisi, toryum radyoaktif bozunum serisi ve aktinyum radyoaktif bozunum serisi olarak adlandırılan ağır elementlerden oluşan üç seride toplanmaktadır.

1.3.1. Uranyum Radyoaktif Bozunum Serisi

8 alfa ve 6 beta salınımı içeren uranyum radyoaktif bozunum serisinin ana elemanı ^{238}U olduğu bilinmekle birlikte uranyum doğal olarak ^{234}U , ^{235}U ve ^{238}U izotoplarından oluşur. Şekil 1.2' de de görüldüğü gibi, bilinen ve süreç içerisinde bozunuma uğrayan çekirdekler sırasıyla; ^{234}Th , ^{234}Pa , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po , ^{210}Pb , ^{210}Bi , ^{210}Po ve son olarak kararlı halde bulunan ^{206}Pb izotopudur. Çizelge 1.2'de yarılanma ömrü, enerji ve bağıl bolluk değerleri verilen ^{238}U ; atom numarası 92, atom ağırlığı 238,09 ve spesifik aktivitesi 12,33 Bq/mg olan radyoaktif bir elementtir (Dayanıklı, 2004).



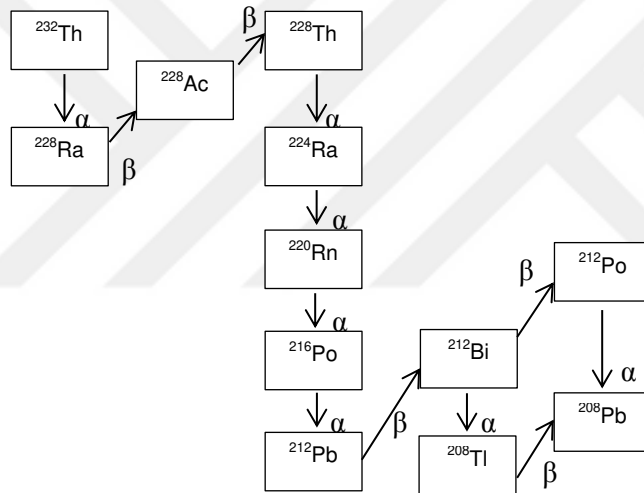
Şekil 1.2. ^{238}U 'in Radyoaktif Bozunum Serisi (NCRP 97, 1988)

Çizelge 1.2. ^{238}U 'in Radyoaktif Bozunum Serisi (Lowder ve ark, 1956; Özger, 2005)

İzotop	T _{1/2}	E(keV)	Bağıl Bolluk (%)
^{238}U	$4,5 \times 10^9$ yıl	49,55	0,064
^{232}Th	24,1 gün	63,29 92,38 92,80 112,81	4,47 2,60 2,56 0,26
^{234}Pa	1,17 dak	1001,0	0,59
^{234}Pa	6,7 saat	131,2 880,5 883,24	20,0 13,0 15,0
^{234}U	$2,5 \times 10^5$ yıl	53,2	0,123
^{230}Th	$7,5 \times 10^4$ yıl	67,67	0,376
^{226}Ra	1600 yıl	11,59 81,07 186,21	1,2 0,3 3,29
^{222}Rn	3,8 dak	512,0	0,078
^{218}Po	3,05 dak	-	-
^{214}Po	$1,6 \times 10^{-4}$ s	-	-
^{214}Pb	26,8 dak	241,98 295,25 351,92	20,41 18,7 35,8
^{214}Bi	20,0 dak	609,32 768,36 1120,3 1764,5	45,0 4,83 14,9 16,07
^{210}Pb	22,2 yıl	9,43	24,6
^{210}Po	134 gün	-	-
^{206}Pb	Stabil	46,54	4,06

1.3.2. Toryum Radyoaktif Bozunum Serisi

Şekil 1.3’de görüldüğü gibi, 7 alfa ve 5 beta salınımı içeren ve 11 radyonüklit ihtiva eden toryum radyoaktif bozunum serisinin ana elemanı ^{232}Th ’dir. Görüldüğü üzere, bilinen ve süreç içerisinde bozunuma uğrayan çekirdekler sırasıyla; ^{228}Ra , ^{228}Ac , ^{228}Th , ^{224}Ra , ^{220}Rn , ^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{212}Po , ^{208}Tl ve son olarak kararlı halde bulunan ^{208}Pb izotopudur. Çizelge 1.3’de yarılanma ömrü, enerji ve bağlı bolluk değerleri verilen ^{232}Th ’ un yarı ömrü 1.39×10^4 yıl, spesifik aktivitesi ise 4.1 Bq/mg’dır (Kahveci, 1993; Dayanıklı, 2004).



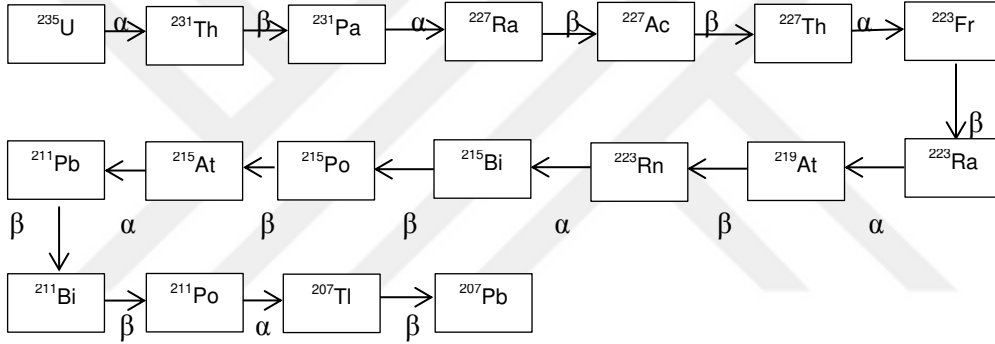
Şekil 1.3. ^{232}Th ’in Radyoaktif Bozunum Serisi (NCRP 97, 1988)

Çizelge 1.3. ^{232}Th 'in Radyoaktif Bozunum Serisi (Lowder ve ark, 1956; Özger, 2005)

İzotop	T _{1/2}	E(keV)	Bağıl Bolluk (%)
^{232}Th	$1,4 \times 10^{10}$ yıl	59,0 126,0	0,19 0,043
^{228}Ac	5,8 yıl	129,1 209,4 270,3 338,4 463,0 794,8 911,1 964,6 968,9	2,8 3,6 3,2 11,51 4,44 4,64 27,8 5,23 16,74
^{228}Th	1,91 yıl	84,4 215,9	1,22 0,26
^{228}Ra	47 yıl	-	-
^{224}Ra	3,66 dak	241,0	4,05
^{220}Rn	55,6 s	549,7	0,11
^{216}Po	$1,6 \times 10^{-5}$ s	-	-
^{212}Pb	10,64 saat	238,63 300,1	43,5 3,25
^{212}Bi	60,5 dak	727,3 785,42 1620,7	6,64 1,1 1,49
^{208}Tl	3,05 dak	277,3 510,8 583,19 860,4 2614,6	6,4 22,8 85,1 12,52 99,83
^{208}Pb	Stabil	-	-

1.3.3. Aktinyum Radyoaktif Bozunum Serisi

Şekil 1.4' de görüldüğü gibi, 7 alfa ve 10 beta salınımı içeren ve 17 radyonüklit ihtiva eden Aktinyum Radyoaktif Bozunum serisinin ana elemanı ^{235}U ' dir. Görüldüğü üzere, bilinen ve süreç içerisinde bozunuma uğrayan çekirdekler sırasıyla; ^{231}Th , ^{231}Pa , ^{227}Ra , ^{227}Ac , ^{227}Th , ^{223}Fr , ^{223}Ra , ^{219}At , ^{223}Rn , ^{215}Bi , ^{215}Po , ^{215}At , ^{211}Pb , ^{211}Bi , ^{211}Po , ^{207}Tl ve son olarak kararlı halde bulunan ^{207}Pb izotopudur. Çizelge 1.4'te ^{235}U için yarılanma süresi, enerji ve bağıl bolluk değerleri verilirken Çizelge 1.5'te de tabiatta yalnız başına bulunan doğal radyonüklitlere ait yarılanma süresi, yayılan radyasyon, enerji ve bağıl bolluk değerleri verilmiştir.



Şekil 1.4. ^{235}U 'in Radyoaktif Bozunum Serisi (NCRP 97, 1988)

Çizelge 1.4. ^{235}U 'in Radyoaktif Bozunum Serisi (Lowder ve ark, 1956; Özger, 2005)

İzotop	T _{1/2}	E(keV)	Bağıl Bolluk (%)
^{235}U	10^8 yıl	143,76 185,71 205,35	10,96 57,2 5,01
^{231}Th	25,5 saat	25,64 84,21	14,6 6,71
^{231}Pa	$3,3 \times 10^4$ yıl	27,36 302,67	11,1 2,47
^{227}Ac	21,6 yıl	15,2	0,04
^{223}Fr	21,8 dak	50,2	34,0
^{227}Th	18,2 dak	236,0 256,2	11,2 6,7
^{223}Ra	11,4 dak	154,2 269,4 232,9	5,59 13,6 3,9
^{219}Rn	4,0 s	271,1	9,9
^{215}Po	$1,8 \times 10^{-3}$	-	-
^{211}Pb	36,1 saat	404,8	3,0
^{211}Bi	2,14 dak	351,0	12,7
^{207}Tl	4,79 dak	897,8	0,57
^{207}Pb	Stabil	-	-

Çizelge 1.5. Doğada Tek Başına Bulunan Yerkabuğu Orjinli Radyonüklidler
(Lowder ve ark, 1956; Özger, 2005)

İzotop	T _{1/2} (yıl)	Yayılan Parçacık	E(keV)	Bağıl Bolluk (%)
³ H	12,4	β ⁻	180	100
¹⁴ C	5400	β ⁻	155	100
⁴⁰ K	1,3x10 ⁹	β ⁻ γ	1300 1460,8	90 10
⁸⁷ Rb	6,1x10 ¹⁰	β ⁻	250	100
¹¹⁵ In	10 ¹⁴	β ⁻	630	100
¹³⁸ La	7x10 ¹⁰	β ⁻ γ	1210 1390	7 93
¹⁴⁷ Sm	6,7x10 ¹¹	α	2180	-
¹⁷⁶ Lu	6,7x10 ¹⁰	β ⁻	425	-
²⁰⁹ Bi	2,7x10 ¹⁷	α	3150	-

1.3.4. Potasyum

Bozunumu sonucunda ürün çekirdeği kararlı olan yerkabuğu kaynaklı ⁴⁰K'ın % 0, 12' lik küçük bir kısmı radyoaktiftir ve 1,461 MeV'lik gama yayılımına neden olur. Yarı ömrü 1,26x10⁹ yıl ve spesifik aktivitesi 3, 3 Bq/kg olarak bilinen potasyum yer kabuğunun %2,6'sını oluşturması nedeniyle önemli bir elementtir ve bu da ⁴⁰K'ın her şartta derişimini sabit tutmasına ve gramı başına saniyede 3,3 gama ışınımı yayınlamasına sebebiyet verir (Kahveci, 1993; Dayanıklı, 2004).

1.4. Radyoaktif Bozunma Kanunu

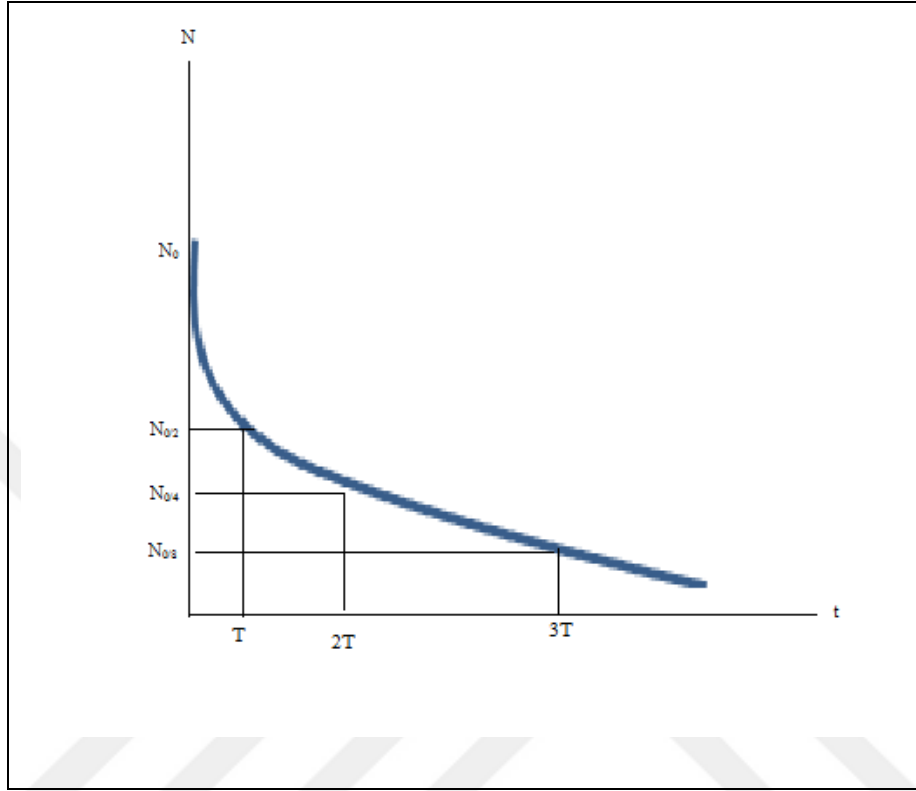
Zamana göre rastgele gerçekleşen radyoaktif bozunumun, ne zaman gerçekleşeceğini tahmin etmek imkansızdır. Bu aşamada önemli olan, genellikle radyoaktif bozunma sabiti olarak adlandırılan ve λ ile ifade edilen radyoaktif çekirdeğin, birim zamanda bozunma ihtimalini incelemek olmalıdır. Radyoaktif bozunma sabiti radyoaktif çekirdekler için ayırt edici bir özellik olup radyoaktif çekirdeğin yaşı ne olursa olsun bozunma olasılığı (λ) sabittir. Radyoaktif bir çekirdeğin bozunma hızı veya aktivitesi, birim zamanda meydana gelen bozunma sayısı olarak tanımlanır. Herhangi bir t anında N tane radyoaktif çekirdek bulunduğu varsayılırsa ve numuneye dışarıdan çekirdek ilave edilmiyorsa, sonsuz küçük dt zaman aralığı içinde bozunan çekirdek sayısı N ile orantılı olacaktır.

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

Denklem (1.1)'deki eksi işareti çekirdek sayısının zamanla azalmasını ifade etmekle birlikte bu denklemin çözülmesi ile radyoaktif bozunma yasası elde edilmiş olur.

$$\frac{dN(t)}{N(t)} = -\lambda dt \rightarrow \int \frac{dN(t)}{N(t)} = -\int \lambda dt \rightarrow N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

Burada t zamanı, $N(t)$; t zamanı sonunda kalan çekirdek sayısını, N_0 ilk ($t = 0$ iken) çekirdek sayısını ve λ bozunma sabitini gösterir ve birimi s^{-1} 'dir. Şekil 1.5'e bakıldığında yukarıda bahsi geçen bozunma denklemine ait değişim grafiğini görmekteyiz.



Şekil 1.5. Bozunum Grafiği

Denklem (1.2)' den elde edilen sonuca göre bu denklemin her iki tarafı λ ile çarpılırsa aktivite için bir ifade bulunmuş olur.

$$\lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.3)$$

Denklem (1.3)' de ki λN numunenin bozunma hızı ya da aktifliği olarak adlandırılırken aynı zamanda birim zaman başına bozunma sayısını verir ve birimi bozunma/saniye olan I ile ifade edilir.

$$I = I_0 e^{-\lambda t} \quad (1.4)$$

Burada I , t zamanındaki ve I_0 ise $t = 0$ zamanındaki bozunma hızlarını verir.

1.5. Yarı ve Ortalama Ömür

Teorik olarak bakıldığında numunedeki tüm çekirdeklerin bozunması için sonsuz zaman geçmesi gereken radyoaktif bozunma yasasını ifade eden denklem, herhangi bir t anında bozunmayan çekirdek sayısını vermektedir. Yani, ancak zaman sonsuz olursa $N(t) = 0$ olur. Fakat, sonsuz zamana ulaşmak göreceli olarak imkansız olduğundan bunun yerine ayırt edici bir özellik olan radyoaktif bir elementin başlangıçtaki çekirdek sayısının yarıya inmesi için geçen süreyi ifade eden yarı ömür kavramı kullanılır. $N = N_0/2$ olarak $T_{1/2}$ ile gösterilen yarı ömrü bulmak için,

$$N_0/2 = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.5)$$

$$e^{-\lambda t} = \frac{1}{2} \quad (1.6)$$

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (1.7)$$

$$N = N_0 \exp (- 0,693/T_{1/2}) \quad (1.8)$$

$$P(t) dt = \lambda e^{-\lambda t} dt \quad (1.9)$$

$$T_{\text{ort}} = \int_0^{\infty} P(t)t dt = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt \rightarrow T_{\text{ort}} = \frac{1}{\lambda} \quad (1.10)$$

Yukarıdaki denklemler kullanılarak, çekirdeğin kimyasal ve fiziksel etkilerle değişmeyen bir özelliği olan $T_{1/2}$ elde edilir ve buradan da bozunma kanununu, $\lambda = 0,693/T_{1/2}$ yazarak yeniden tanımlayabiliriz.

Bir başka tanımlama ise Denklem (1.9)'da verilen olasılık yoğunluğu fonksiyonudur.

Radyoaktif bir çekirdeğin bozunması için geçen ortalama zamanın hesaplanabilmesi için çekirdeğin bir t ile $t+dt$ zaman aralığındaki bozunma olasılığını veren yukarıdaki ifadeden Denklem (1.10)' a ulaşılabilir.

1.6. Zincirleme Reaksiyon

Bir radyoaktif bozunumun rastgele bir biçimde meydana geldiği ve hangi zamanda hangi atomun bozunuma uğrayacağını tahmin edilemeyeceği kabul edilerek yapılan çalışmalarla bu bozunumun üstel bir kanuna göre değiştiği gözlenmiştir. Yaptığımız açıklamalar ışığında bu kanuna göre hangi çekirdeğin ne zaman bozunuma uğrayacağını belirlenemeyeceği açıktır. Fakat, hangi çekirdeğin ne zaman bozunacağını bilinemeyeceği ifade edilse de toplam çekirdeklerin zamana bağlı bozunma ihtimalleri ve buna bağlı olan değeri bulunabilir.

Bir dt zaman aralığında her bir atomun bozunma olasılığının $P(t) = \lambda dt$ olarak ifadelendirilmesi için bozunmamış çekirdeğin bir saniye içindeki bozunma olasılığının λ ile gösterilmesi ve $\lambda \approx 1$ alınması ve λ' 'nin zamandan ve mevcut diğer çekirdeklerin tür ve sayılarından bağımsız olması gereklidir. Ayrıca, dt gibi küçük bir zaman aralığında bozunuma uğrayacakların sayısının bulunabilmesi için Denklem (1.11) uygulanır ve verilen bir t zamanında N sayıda bozunmamış atom varlığı gerekmektedir;

$$dN = -\lambda N dt \quad (1.11)$$

olur. Yukarıdaki denklemden de anlaşılacağı gibi eksi işareti (t) arttıkça N 'nin azaldığını ifade ederken, kısa bir dt zaman aralığında bozunma sayısı, bozunmamış atomların sayısı (N) ve dt zaman aralığıyla doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Bu şekilde denklem;

$$-\frac{dN}{N} = \lambda dt \quad (1.12)$$

şeklinde yazılıp, $t = 0$ anında radyoaktif atomların sayısı N_0 olduğu kabul edilerek integral alınırsa;

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.13)$$

elde edilir ve tüm ara işlemler yapıldıktan sonra aşağıdaki gibi Denklem (1.14), Denklem (1.15) ve Denklem (1.16)' ya ulaşılır.

$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t} \quad (1.14)$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_{20} e^{-\lambda_2 t} \quad (1.15)$$

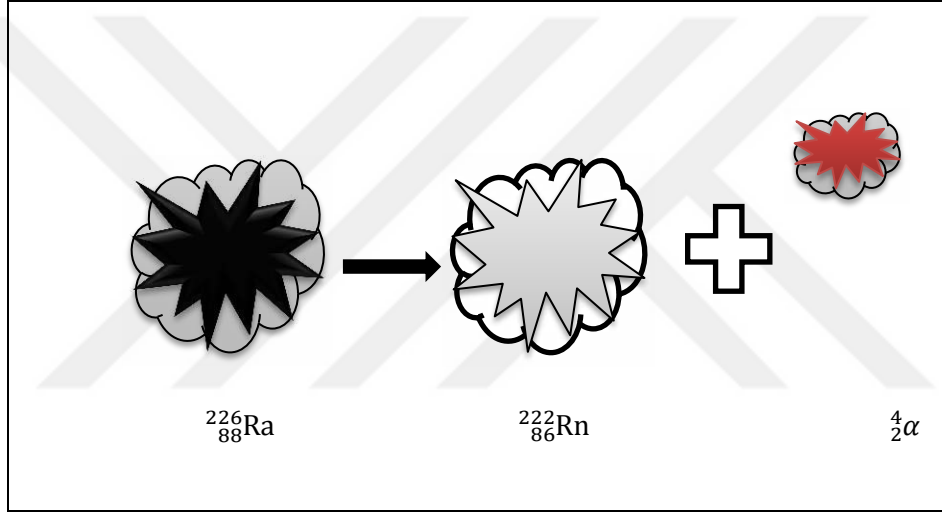
$$N_3 = N_{30} + N_{20} (1 - e^{-\lambda_2 t}) + N_{10} \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \right) \quad (1.16)$$

1.7. Radyoaktif Bozunma Türleri

Radyoaktif çekirdeklerin kendiliğinden ve rastgele bir şekilde bozunuma uğradıkları geçmiş bölümlerde anlatılmıştır. Bu başlık altında bu bozunum türlerinin neler olduğu ve detayları ile ilgili bilgiler verilecektir. Radyoaktif bir çekirdek üç şekilde bozunabilir. Bunlardan alfa ve beta bozunumlarında kararsız olan çekirdek, alfa veya beta parçacıkları yayımlayarak kararlı bir çekirdek haline gelmeye çalışır fakat, gama bozunumu irdelenecek olursa, çekirdeğin yapısı değişmeden uyarılmış bir durumdan taban durumuna geçme eğilimi gösterdiğini ifade edilebilir.

1.7.1. Alfa Bozunumu

Radyoaktif bir çekirdeğin kararsız oluşu proton ve nötron fazlalığından meydana geliyorsa, bu çekirdek Şekil 1.6' de de görüldüğü üzere Helyum çekirdeği olarak ta bilinen iki proton ve iki nötrondan oluşan bir alfa parçacığı yayımlayarak bozunur. Bu şekilde Denklem (1.17)'e göre bozunan çekirdeğin atom numarası 2, kütle numarası 4 azalır. Denklem (1.18)' e göre bu bozunumda proton ve nötron sayıları ayrı ayrı korunurken toplam enerjinin de korunduğu görülmektedir.



Şekil 1.6. Alfa Bozunumu

$$^A_Z X_N \rightarrow ^{A-4}_{Z-2} X'_{N-2} + ^4_2 He \quad (1.17)$$

$$Q = \Delta mc^2 = [m(X) - m(X') - m(^4_2 He)].c^2 \quad (1.18)$$

Alfa bozunumu sebebiyle meydana gelen enerjinin büyük bir kısmı, momentumun korunumu gereğince küçük kütleye sahip olan alfa parçacığı tarafından alınır. Başka bir açıdan $^4_2 He$ çekirdeği değerlendirildiğinde yüksek enerjiye sahip olmasına karşın ağır kütlesi sebebiyle menzilin çok kısa olduğu

bilinmektedir.

1.7.2. Beta Bozunumu

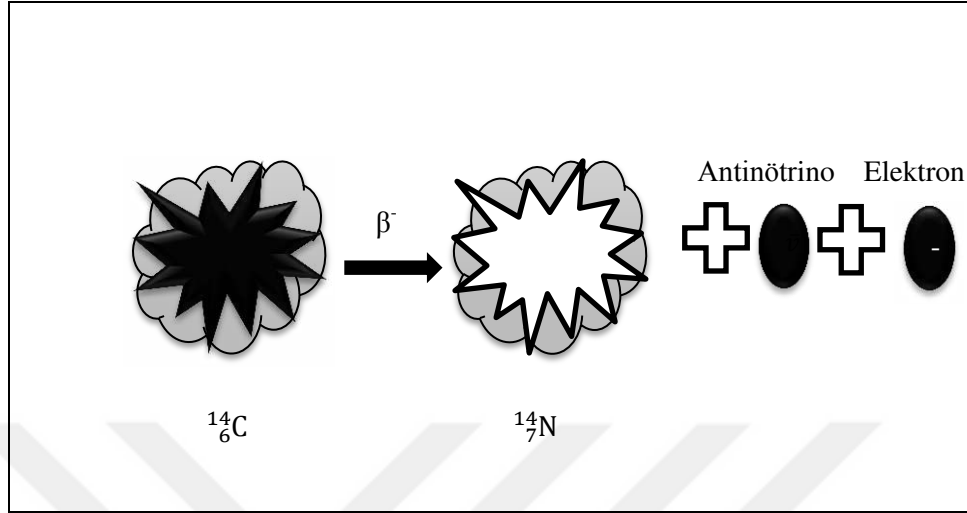
Beta bozunumu bilindiği üzere üç farklı şekilde tanımlanır ve bunlar: β^- bozunumu, β^+ bozunumu, Elektron Yakalama olarak isimlendirilir.

β^- bozunumu: Eğer radyoaktif bir çekirdeğin kararsızlığı nötron fazlalığından meydana geliyorsa, Denklem (1.19)' da görüldüğü gibi çekirdek enerji fazlalığı sorununun, bir nötronunun proton ve elektron haline dönüştürerek üstesinden gelmiş olur. Negatif beta bozunumuda denilen bu süreçle proton çekirdekte ikamet etmeye devam ederken, elektron hızlı bir şekilde atomdan dışarı atılır.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \quad (1.19)$$

$${}^A_Z X_N \rightarrow {}^A_{Z+1} X'_{N-1} + e^- + \bar{\nu} \quad (1.20)$$

Atomdan dışarı atılan bu yüksek hızlı elektrona, radyoaktif bir çekirdeğin Denklem (1.20)' de görüldüğü gibi atom numarasını bir arttırarak kendinden bir sonraki elementin izobar atomuna dönüştürmesine sebep olan beta parçacığı (negatron) adı verilir. Bir diğer tanımlamayla, ürün çekirdeğin kütle sayısı değişmediği için bu bozunmaya izobarik bozunma adı da verilir.

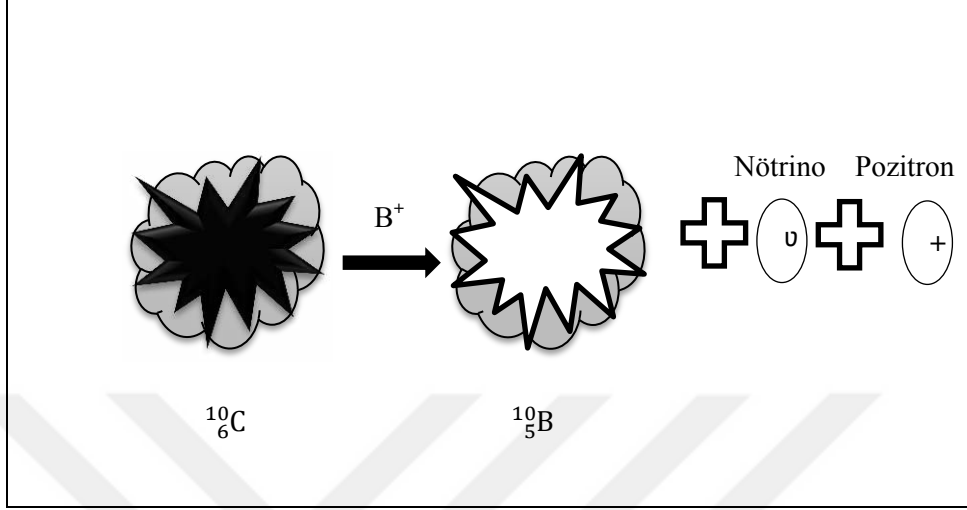
Şekil 1.7. β^- Bozunumu

β^+ bozunumu: Eğer ki aktif bir çekirdeğin kararsızlığı nötron azlığından yada proton fazlalığından kaynaklanıyorsa Denklem (1.21)' de de görüleceği gibi protonlardan biri nötron ve pozitif yüklü elektrona (pozitrona) dönüşür.

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu \quad (1.21)$$

Bu bozunum esnasında nötron çekirdekte kalırken pozitronun dışarı fırlatıldığı bilinmektedir. Böylece Denklem (1.22)' de görüldüğü gibi pozitron yayımlayan ve kütle sayısı değişmeyecek olan bir radyonüklidin proton sayısı bir eksilerek kendinden bir önceki elementin (izobar) atomuna dönüşür.

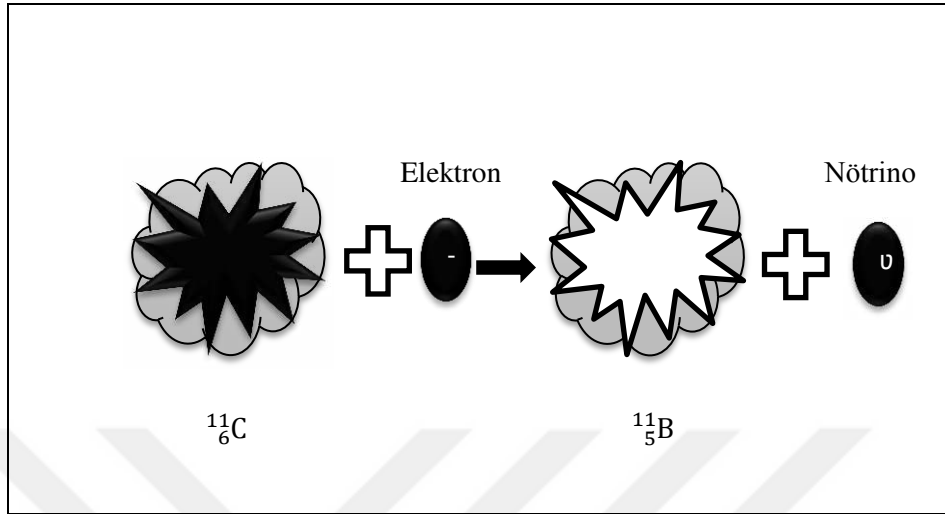
$$^A_Z X_N \rightarrow ^A_{Z-1} X'_{N+1} + e^+ + \nu \quad (1.22)$$

Şekil 1.8. β^+ Bozunumu

Elektron Yakalama: Eğer radyoaktif bir çekirdek için kararsızlık, proton fazlalığından kaynaklanıyorsa atomun çekirdeğe yakın (K, L) yörüngelerinde pozisyon almış olarak bulunan elektronlarından biri çekirdek tarafından yakalanır. Denklem (1.23)' de gösterildiği gibi elektronla bir proton birleşerek nötron ve nötrino haline dönüşmüş olur. Denklem (1.24)' e göre elektron yakalama olayında çekirdekten parçacık salınmazken pozitron bozunumunda olduğu gibi proton sayısı bir eksilmiş olur ve kütle numarası aynı kalır. Bu süreç içerisinde çekirdek tarafında yakalanarak boşalan elektron yörüngesine bremsstrahlung (frenleme) radyasyonu adı verilen x ışınları yayınlamaya başlar ve üst yörüngelerde bulunan başka bir elektron geçer.

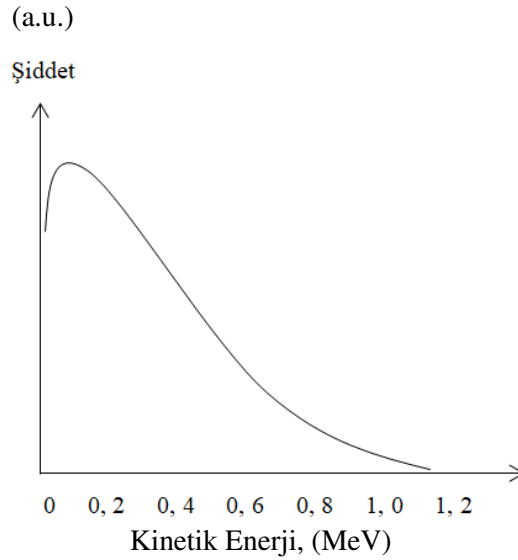
$$p + e^- \rightarrow n + \nu \quad (1.23)$$

$${}^A_Z X_N + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1} X'_{N+1} + \nu \quad (1.24)$$



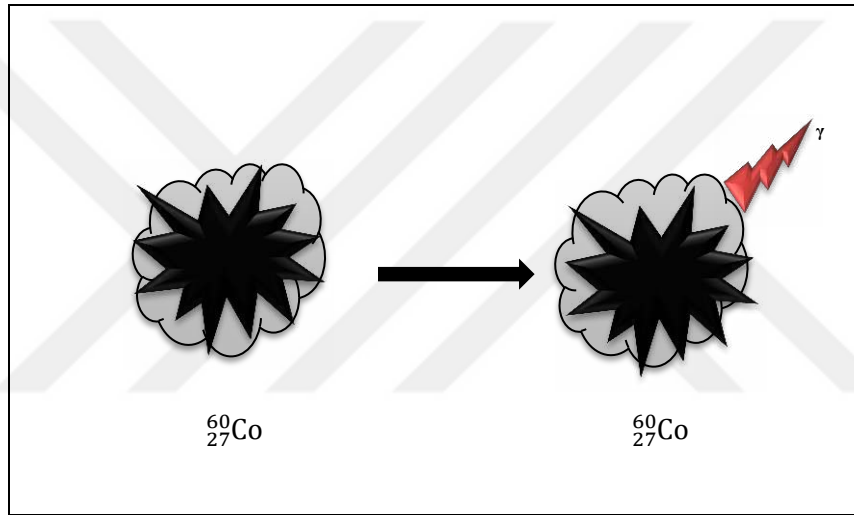
Şekil 1.9. Elektron Yakalama

Beta bozunumuna ait, nötrino ve antinötrino denilen yüksüz ve kütsüz parçacıkların yayımlandığı bu üç süreç irdelendiğinde, proton ve nötron sayılarının bir birim değişmesine karşın kütle numarasının sabit kaldığı değerlendirilmesi yapılabilir. Şekil 1.10’ da görüldüğü üzere beta bozunumunda yayımlanan elektronların enerjileri sürekli bir spektruma sahiptir.

Şekil 1.10. β^- Bozunumu Sonrasında Yayımlanan Elektronların Enerji Spektrumları

1.7.3. Gama Bozunumu

Aktif bir çekirdekteki enerji fazlalığı sebebiyle yada bir bozunum olayı sonucunda radyasyon yayınladıktan sonra hala yarı kararlı durumda olan bu çekirdek çoğu zaman hemen kararlı hal durumuna geçemez. Şekil 1.11’ de görüldüğü gibi fazla kalan bu enerji, hemen elektromanyetik özellikte bir gama radyasyonu şeklinde yayımlanır. İzomerik bozunma adı da verilen ve bu şekilde bozunan yarı kararlı nüklidin atom ve kütle sayıları da değişmez.



Şekil 1.11. Gama Bozunumu

Genellikle 10^{-9} saniyeden daha küçük olan gama yayınlanmasının yarı ömrü, diğer bozunumlarla kıyaslandığında çok kısa olduğu bilinmekler birlikte saat, hatta gün mertebesinde yarı ömürlü gama yayınlanması olayı var olup enerji spektrumları kesikli durumdadır.

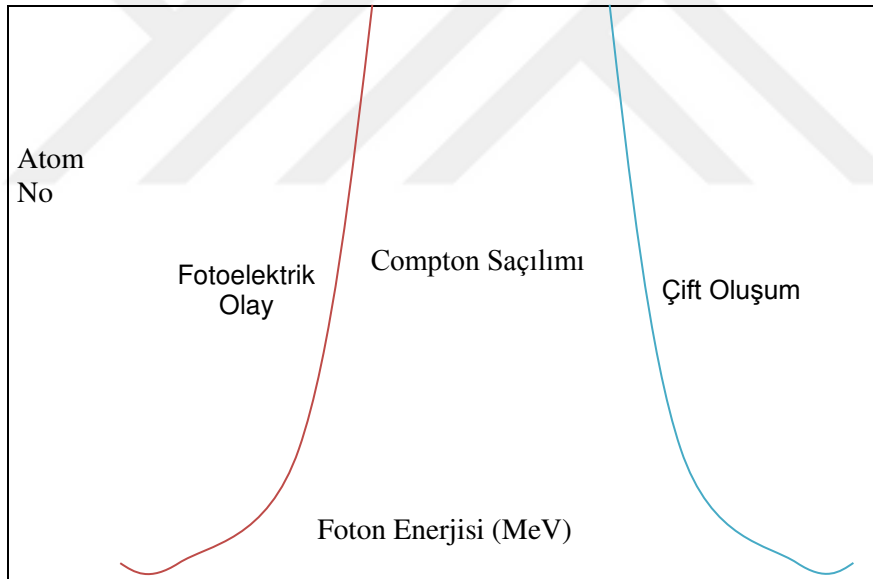
1.8. Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimi

Yüksek frekans ve düşük dalga boyuna sahip x ve gama ışınları elektromanyetik dalgalardır. Özellikle gama ışınları fotoelektrik olayı, compton saçılımı ve çift oluşum olaylarında parçacık davranışı göstermektedir. Foton

anlamına gelen küçük enerji paketlerinden oluşmaktadır. Denklem (1.25)'de ki gibi ifade edilen radyasyonun belli bir frekansı için bütün paketlerde taşınan enerji aynıdır.

$$E = h.v \quad (1.25)$$

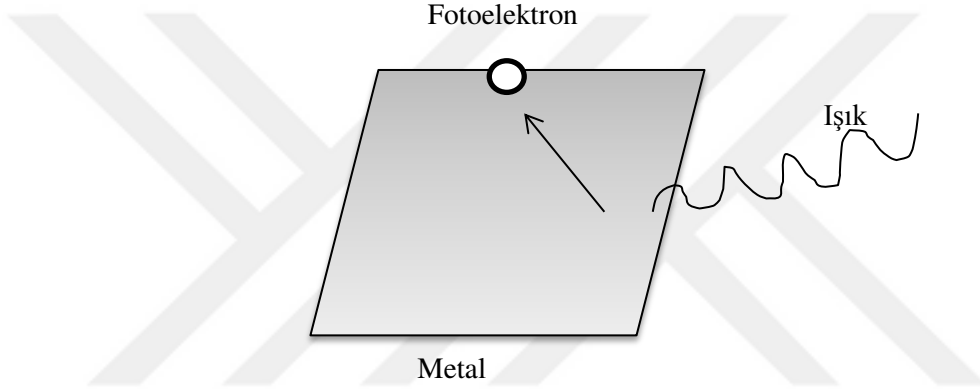
Fotonlar, maddenin içinden geçerken madde atomları ile etkileşimler yaparlar ve sonuçta da ortama enerji bırakarak ya soğurulurlar ya da saçılıma uğrarlar. Yüklü parçacıkların madde ile etkileşiminde başlıca üç olay meydana gelmektedir. Fotoelektrik Olay, Compton Saçılımı ve Çift Oluşum olayları detaylı bir şekilde alt başlıklarda açıklanmaktadır.



Şekil 1.12. Elektromanyetik Radyasyonun Alüminyum ile Etkileşimi (Krane, 2001)

1.8.1. Fotoelektrik Etki

Şekil 1.13' te görüldüğü gibi, düşük enerjili bir foton maddde ile etkileşerek içinden geçtiği ortamdaki atomların K veya L yörüngesindeki bir elektrona (foto electron) bütün enerjisini verir ve o elektronu pozitif yüklü olan çekirdeğin bağlayıcılığından kurtarır. X-ışını yayımlayarak yörüngeden boşalan elektron boşluğunu ise dış yörüngedeki başka bir elektron doldurulur.



Şekil 1.13. Fotoelektrik Etki

Denklem (1.26)' da yazıldığı gibi, bu olay sırasında gelen fotonun enerjisinin bir bölümü elektronu bağlı olduğu atomdan koparabilmek için kullanılırken, geri kalan kısmı ise koparılan elektrona kinetik enerji olarak aktarılır.

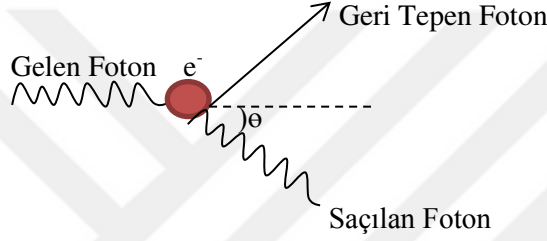
$$h\nu = E_{\text{Bağlanma}} + E_{\text{Kinetik}} \quad (1.26)$$

1.8.2. Compton Saçılması

Şekil 1.14 incelendiğinde, atoma gevşek olarak bağlanmış bir dış yörünge elektronuna, enerjisi kendisinden daha büyük olan bir fotonun çarpması sonucunda meydana gelen olay ile Compton Saçılması meydana geldiği açık bir şekilde görülmektedir. Elektronun kütleli bir parçacık olmasından kaynaklı fotonun bütün

enerjisini soğurması, momentumun korunumu gereği mümkün değildir. Bu sebepten dolayı foton, enerjisinin bir kısmını elektrona vererek saçılıma uğrar ve aşağıda şekilde gösterildiği gibi yoluna devam eder. Saçılan foton ile elektron arasındaki açı, fotonun enerjisine bağlı olup gelen fotonun dalgaboyu ile saçılan fotonun dalgaboyu arasındaki fark, Denklem (1.27) bağıntısı ile ifade edilir.

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos \theta) \quad (1.27)$$



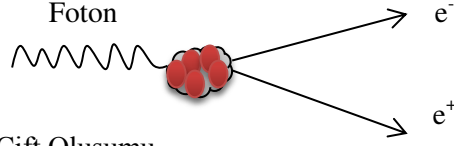
Şekil 1.14. Compton Saçılması

Buradaki h/mc , Compton Dalga Boyu olarak adlandırılır. Fotonlar sadece Compton saçılımı ile tamamen soğurulamadığı için yüksek enerjili fotonlar enerjileri belirli bir seviyeye düşene kadar Compton saçılımına uğrar ve bu andan sonra da kısmen enerjisi azalan fotonlar fotoelektrik olayla soğurulurlar.

1.8.3. Çift Oluşumu

Yeteri kadar büyük enerjiye sahip bu foton eğer çekirdeğin çok yakınından geçerse, kütlesi bulunmayan fotonun enerjisinden kaynaklı çekirdek yakınında aynı zamanda biri negatif yüklü elektron diğeri pozitif yüklü pozitron olmak üzere iki parçacık meydana gelir ve bunun sonucunda da elektromanyetik bir dalgadan madde oluşmuş olur.

$$h\nu = m_{e^+} + m_{e^-} + T_{e^+} + T_{e^-} \quad (1.28)$$



Şekil1.15. Çift Oluşumu

Açıklandığı gibi böyle bir çift oluşumunun meydana gelebilmesi için, Denklem (1.28)'e göre foton enerjisinin en az 2×0.511 , yani 1,022 MeV olması gerekmektedir. Foton enerjisinin daha büyük olduğu durumlar düşünüldüğünde bu enerjinin kalan kısmı elektron ve pozitrona kinetik enerji olarak aktarılır. Oluşan elektron, atomla serbest elektronlar gibi etkileşir fakat pozitron bir yörünge elektronu ile birleşir ve zıt yönlü iki foton yayarak yok olur ve bu foton ise fotoelektrik yolla soğurulur.

1.9. Radyoaktivite Birimleri

ICRU (International Commity of Radiation Units –Uluslararası Radyasyon Birimleri Komitesi) tarafından önceden aktivite için Curie (Ci), soğrulan doz için Rad, eşdeğer doz birimi için rem ve ışınlama (poz) için de Roentgen birimleri radyasyon etkilerini ve aktiviteyi belirlemek için kullanılmaktaydı. Ancak, sonrasında ICRU tarafından MKS birim sisteminin kabul edilmesiyle SI birimleri kullanılmaya başlandı.

Yukarıda detaya girilmeden bahsedilen birimler için Çizelge 1.6'da radyoaktivite birimleri ve aralarındaki ilişkileri verilerek bir tanımlama getirilecek olursa;

Curie için eski birim, bir radyoaktif madde miktarının saniyede $3,7 \times 10^{10}$ bozunma meydana getirmesi olarak tanımlanırken yeni birim Becquerel (Bq) olup saniyede 1 bozunma meydana getiren madde miktarı olarak tanımlanır.

İşınlama (poz) eski birim sistemine göre, 1 Roentgen (R) normal koşullarda, yani 760 mmHg ve 0 °C' de havanın 1 kilogramında $2,58 \times 10^{-4}$ Coulomb değerinde

artı ve eksi yüklü iyonlar meydana getiren x-ışını ve γ miktarı olarak tanımlanırken yeni birim sistemine göre bu birim soğurucunun değil radyasyon demetinin niteliği hakkında bilgi verir.

Soğrulan doz için eski birimde Rad (Radiation Absorbed Dose), herhangi bir maddenin gramı başına 100 erg' lik enerji soğrulması olarak tanımlanırken yeni birim sistemi olan SI birim sistemine göre de birimi Gray (Gy) olup 1 kilogramlık herhangi bir maddeye 1 joule enerji verebilen radyasyon dozu olarak tanımlanır.

Eşdeğer doz birimi eski sisteme göre, iyonize edici radyasyonların biyolojik madde üzerindeki etkisini belirtmek amaçlı kullanılıp biyolojik etki radyasyonun geçişte bıraktığı enerjiyle doğru orantılı olup birimi rem iken (Roentgen Equivalent Man) yeni birim sisteminde birimi Sievert (Sv) olarak belirlenmiştir ve boyutu Joule/kg' dir.

Çizelge 1.6. Radyoaktivite Birimleri

Büyüklik	SI Birimi ve Sembolü	Eski Birimler ve Sembolü	Dönüşüm Faktörü
Aktivite	Becquerel (Bq)	Curie (Ci)	$1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
Işınlama	Röntgen (C/kg)	Röntgen (R)	$1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}$
Soğrulan Doz	Gray (Gy) (J/kg)	Rad (rad)	$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$
Eşdeğer Doz	Sievert (Sv)	Rem (rem)	$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$

1.9.1. Çevresel Radyoaktivite

Günümüz teknolojisiyle de üretilen radyasyonun birçok yapısı ile doğal ortamda karşılaşılır. Bu radyasyon türlerini yararlı ve zararlı durumlarına göre

sınıflayabiliriz ve hatta kamuoyu tarafında bilinen en önemli radyasyon kaynağı olan güneş ışığının aşırı zararlılığına da dikkat çekilmelidir. Buna ek olarak insanoğlunun çoğu dikkatini; pozitif iyonlar ve negatif elektronlar oluşturarak atomları deforme edebilen, biyolojik zarara neden olabilen ve x ışınları, gama ışınları, alfa parçacıkları, beta parçacıkları, nötronlar ve kozmik ışınları olarak bilinen iyonize radyasyon sınıfına verir.

Özellikle büyük oranda maruz kalındığında bu radyasyonların tamamı, kansere neden olabilirken belli oranlarda kullanıldığında ise günümüzde bilinen birçok kanser tedavisinde kullanılabilir. Zararlı ve yararlı olarak sınıflandırdığımız, bu radyasyon türleri çevrenin kaçınılmaz bir parçası olmuşlardır. Dünya üzerindeki doğal radyoaktivite düşünecek olunduğunda, uzun yarı ömürlü radyoaktif çekirdeklerin varlığından bahsedilebilirken güneş ve uzaydaki diğer olaylar ile de dünyamızın kozmik ışınlar aracılığıyla radyasyona maruz bırakıldığı vurgusu yapılabilir.

Günümüzde radyasyonun etkileri üzerine bilgiler, radyasyona maruz kalan grup ve bireylerin çalışmalarından, hayvan deneylerinden, hücresel ve moleküler seviyedeki çalışmalardan kaynaklanmaktadır. Bu çalışmalar ile yüksek seviyede radyasyona maruz kalındığında, kısa sürede ölüm meydana gelme olasılığının yüksekliğinden bahsedilirken düşük seviyelerinde kanser riskinin azaldığı belirtilmiştir. Hayvan deneylerinden de anlaşılabileceği gibi, doğum öncesi radyasyon maruziyeti zekâ geriliği ve diğer tarifi yapılan rahatsızlıklara neden olmaktadır (Nuclear Science, 2003).

1.9.2. Doğal Çevredeki Radyoaktivite

Çizelge 1.7’ de ortalama miktarları verilen ve dünyada doğal olarak bulunan radyonüklitler ^{238}U , ^{235}U ve ^{232}Th olarak sınıflandırılabilir. Ayrıca beta parçacığı yayan çekirdekler içerisinde bilinen ^{40}K ve ^{87}Rb ’da buna eklenir. ^{238}U 8 alfa ve 6 beta olarak ^{226}Ra ve ^{222}Rn gibi en uzun yarı ömürlü izotoplarını içeren zincirleme bozunumları ile ^{206}Pb olarak kararlı hale gelir. Üç zincirde incelendiğinde ana

çekirdeklerinin yarı ömürlerinin, ürün çekirdeklerinin yarı ömürlerinden daha uzun olduğu görülmektedir. Bu radyonüklitler ve onların ürünlerine ek olarak bilinen ^{14}C 'ün, kozmik ışınlar tarafından sürekli olarak üretildiği bilinmektedir (Nuclear Science, 2003).

Çizelge 1.7. Doğal Radyonüklitlerin Yarı Ömürleri ve Ortalama Bollukları (Nuclear Science, 2003)

	^{40}K	^{87}Rb	^{232}Th	^{238}U
Yarı Ömür (milyon yıl)	1.277	47.5	14.05	4.468
Üst Kıtasaal Kabuk				
Elemental Bolluk (ppm)	28000	112	10.7	2.8
Aktivite (Bq/kg)	870	102	43	35
Aktivite (nCi/kg)	23	2.7	1.2	0.9
Aktivite (kCi/km ³)	66	8	3.3	2.6
Okyanus				
Elemental Konsantrasyon (mg/litre)	399	0.12	1×10^{-7}	0.0032
Aktivite (Bq/litre)	12	0.11	4×10^{-7}	0.040
Aktivite (nCi/litre)	0.33	0.003	1×10^{-8}	0.0011
Okyanus Sedimentleri				
Elemental Bolluk (ppm)	17000		5.0	1.0
Aktivite (Bq/kg)	500		20	12
Aktivite (nCi/kg)	14		0.5	0.3
İnsan vücudu				
Toplam Aktivite (Bq)	4000	600	0.08	0.4 ^a
Toplam Aktivite (nCi)	100	16	0.002	0.01

1.9.3. Tipik Radyasyon Dozları

NCRP tarafından Çizelge 1.8'de belirtildiği gibi Amerika'da maruz kalınan radyasyon kaynaklarının en önemlileri verilmiştir. Yerkabuğu tabandaki muhtemel yarıklar vasıtasıyla eve girdiği bilinen ve maruz kalınan tek büyük kaynak, topraktaki ^{226}Ra 'nın bozunumundan meydana gelen radondur. Radon dozu

çoğunlukla ^{222}Rn ürünün solunmasından kaynaklanmakta olup toprağın altının, boşluğunun ve evin yapısının içerdiği radyuma bağlı olarak evden eve değişiklik gösterir. 2.0 mSv/y (200 mrem/y)'lık ortalama etkin doz, ortalama radon konsantrasyonuna karşılık gelmektedir (Nuclear Science, 2003).

Çizelge 1.8. ABD'deki Ortalama Radyasyon Dozları, 1980-1982 (Her Yıl Etkin Doz) (Nuclear Science, 2003)

Radyasyon Kaynağı	Açıklamalar	Etkin Doz	
		mSv/y	mrem/y
Doğal Kaynaklar			
İçerideki Radon	Topraktaki ^{222}Rn Sızıntısı Kaynaklı	2.0	200
Vücuttaki Radyonüklitler	Başlangıçtaki ^{40}K ve ^{238}U Ürünü	0.39	39
Karasal Radyasyon	Toprakta Yayılan Gama Işını Kaynaklı	0.28	28
Kozmik Işımlar	2000 m Yükseklikten Elde Edilen Işımlar	0.27	27
Kozmojenik	Özellikle ^{14}C	0.01	1
Toplam (Yuvarlanmış)		3.0	300
Medikal Kaynaklar			
Tanısal X-Işımları	Diş Muayeneleri Hariç	0.39	39
Medikal Tedaviler	Tanı için Kullanılan Radyonüklitler	0.14	14
Toplam		0.53	53
Diğer			
Tüketici Malzemeleri	İçme Suyu, Bina Materyalleri	0.1	~10
Mesleki Açıdan	ABD Nüfusu Üzerinden Ortalama	0.01	1
Nükleer Yakıt Döngüleri	Potansiyel Reaktör Kazaları Hariç	0.0005	0.05
TOPLAM(Yuvarlanmış)		3.6	360



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Nükleer reaksiyonlarda veya radyoaktif bozunma süreci içinde gama ışını salınımı olur. Çıkan gama ışınının tespit edilip ölçülmesi nükleer enerjinin seviyesi hakkında temel bilgi verir. Çekirdek tarafından yayılan gama ışınlarının enerjisi 0,1 ile 20 MeV aralığındadır. Bu enerji aralığında yüksek enerji çözünürlüğüne sahip Germanyum (Ge) yarıiletken dedektörler (High Purity Germanium Detector - HPGe) çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bölümde Gama ışını spektrometresi deneyleri kapsamında HPGe dedektörü kullanılarak daha önce yapılmış, çevre radyoaktivite ölçüm çalışmalar özetlenmiştir.

2000 yılında Iqbal ve arkadaşları tarafından Pakistan'da yapılan çalışmada yapı ve inşaat malzemesi olarak yaygın kullanılan mermer içerisindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivitelerinin deneysel ölçümleri matris çevirme tabanlı spektral sökme tekniği ile NaI(Tl) gama spektrometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örnekler, Pakistan'da ki çeşitli jeolojik oluşumlardan toplanmıştır. Spektrometrenin kalibrasyonu için IAEA referansı olan RG kullanılmıştır. Sırasıyla ^{40}K , ^{226}Ra ve ^{232}Th den dolayı meydana gelen 1460,8, 1764,5 ve 2614,6 keV foto pikleri, ilgili aktivite ölçümleri için kullanılmıştır. ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K için dünya çapındaki çeşitli jeolojik materyaller üzerinde düşük alt seviye ölçümlerine doğru ölçülen aktivite konsantrasyonu sırasıyla spesifik değerler içinde 4–63, 9–40 ve 7–105 Bq kg⁻¹ mevcut olduğu tespit edilmiştir. Radium eşdeğerlik aktivitesi, 25-99 Bq kg⁻¹ aralığında tespit edilmiştir. 0,19 ve 0,26 değerleri mermer örneklerinin ortalama harici ve dâhili aktivite indisi olarak belirlenmiştir (Iqbal M. ve ark., 2000).

2002 yılında Wallbrink ve arkadaşları tarafından yapılan bu çalışmada ^{137}Cs ve diğer gama yayan radyonüklitlerin HPGe gama spektrometrik yöntem kullanarak aktivitelerini belirlemek için gerekli olan temel yöntem, donanım ve yazılımı özetlenmiştir. Çevresel seviyedeki örneklerde radyoaktivite analizi karmaşık bir görevdir. Ekipman pahalı olabilir ve iyi hassasiyetle doğru analizlere

ulaşmak için gereken beceri seviyesi çok yüksektir. Kapsamlı bir kalite güvence programının yanı sıra laboratuvarlar arası karşılaştırmalara katılım ihtiyacı devam etmektedir. Giriş bölümünde belirtildiği gibi, bu bölümün eksiksiz olması ya da bir kullanım kılavuzu olarak kullanılması amaçlanmıştır. (Wallbrink, P. J. ve ark., 2002).

2003 yılında Tzortzis Michalis ve arkadaşlarının güney Kıbrısta yaptıkları çalışma ile görünen jeolojik kaya oluşumlarının tüm baskın tiplerde karasal gama radyasyonu, yüksek çözünürlüklü gama ışın spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür. 11 mineralli şişeler içinde mühürlü farklı kaya tiplerinden elde edilen toprak numuneleri toplanmış ve her biri 24 saat boyunca ölçülmüştür. Gama ışın spektral ölçümünden aktivite konsantrasyonu ^{232}Th için 1,3 ile 52,8 Bqkg⁻¹ arasında, ^{238}U için 0,9 ile 90,3 Bqkg⁻¹ arasında, ^{40}K için 13 ile 894 Bqkg⁻¹ arasında belirlenmiştir. Sırayla toryum, uranyum ve potasyum için elementel konsantrasyon ortalama değerleri (2,8±0,7) ppm, (1,3±0,3) ppm ve (0,6±0,1)% olarak bulunmuştur. Açık havadaki soğurulmuş doz oranları jeolojik özelliklere göre 0,1–50nGyh⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Açık havada kişi başı etkin doz hızları % 20 doluluk faktörü varsayarak 0,1 ile 61,4µSvyr⁻¹ arasında tespit edilmiştir (Tzortzis, M. ve ark., 2003).

2005 yılında Júnior ve arkadaşları tarafından Brezilya'nın batısında yer alan Pernambuco eyaletinde 40 bin metrekare alanda toprak numuneleri içerisindeki ^{40}K belirlenme çalışmaları yapılmıştır. Radyometrik ölçümler için yüksek çözünürlüklü gama ışın spektrometresi ile gama spektrometrik metot kullanılmıştır. 78 toprak örneğinin örnekleme 25 m aralıklarla yapılmıştır. ^{40}K 'nin spesifik aktiviteleri, 1,46 MeV'nin foto pikine dayalı olarak hesaplanmıştır. Ortalaması 1,827 Bq kg⁻¹ olan değerler 541 ile 3,572 Bq kg⁻¹ arasında bulunmuştur. Bu değerler, zeminin 1 metre üstünde, havadaki emilim oranlarının yanı sıra element konsantrasyonlarının belirlenmesine de izin vermiştir. Değerler sırasıyla% 1,7 ila% 11,5 (ortalama% 6) ve 23,4 ila 154,3 nGy h⁻¹ (ortalama 79 nGy h⁻¹) arasında değişmiştir (Júnior, J.A.S. ve ark., 2005).

2006 yılında Osmanlıoğlu tarafından yapılan çalışmada, Türkiye’ de endüstriyel uygulamalar, araştırma ve tıp alanında kullanılan radyoaktif malzemelerin kullanımı üzerinden meydana gelen sıvı radyoaktif atıklar araştırılmıştır. Sıvı radyoaktif atıklardan birkaç anahtar radyonüklidin (^{137}Cs , ^{60}Co , ^{90}Sr ve $^{110\text{m}}\text{Ag}$) kaldırılması için doğal zeolit çalışılmıştır. Bu çalışmanın amacı zeolit arıtmasının laboratuvar testleri ve atık arıtma tesisindeki kombine sürecin (kimyasal çökeltme ve soğurma) dekontaminasyon faktörü (DF) üzerindeki etkisini incelemektir. Bu çalışmada emilim ve çökeltme teknikleri, düşük seviyede ki sıvı atık (LLW) dekontaminasyonuna adapte edilmiştir. Kimyasal çökelti esnasında sorbentler kullanıldığından etkili dekontaminasyon gerçekleştirilmiştir. Doğal zeolit örnekleri Türkiye’ de farklı zeolit oluşumlarından alınmıştır. Farklı formlardaki zeolit minerallerinin iyon değişim özelliklerinin karşılaştırılması Gördes zeolitinin radyonüklitler için dinamik arıtma şartları altında ve kimyasal çökeltme işlemi için uygun bir katkı maddesi olan en uygun doğal emici olduğunu göstermektedir. Zeolit, ^{137}Cs ve $^{110\text{m}}\text{Ag}$ için yüksek seçiciliğe sahip emici olarak gösterilir. Potasyum iyonları bulunmadığı takdirde doğal zeolit ^{60}Co ve ^{90}Sr radyonüklitlerini sıvı atıktan kaldırmakta etkilidir. Bu sıvı atık arıtımın sonucunda dekontaminasyon faktörü 430 olarak 30 °C de 0,5 mm zeolit örneği kullanılarak sağlanmıştır (Osmanlıoğlu, A. E., 2006).

2006 yılında Veiga ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma da Brezilya'nın (SP), (RJ) , (ES) ve (BA) gibi dört kıyısı boyunca toplanan kum örnekleri için ^{40}K , ^{226}Ra ve ^{232}Th tarafından üretilen doğal radyonüklitlerinin gama ışını aktivitelerinin dağılımı ve onlara ait yıllık etkin doz oranları belirlenmiştir. Bazı özel plajlar için, yıllık etkin doz oranlarının veya gama ışın radyasyon aktivite indislerinin değerleri, doğal kaynaklar ve Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı tarafından önerilen sınırlar nedeniyle inşaat malzemeleri için dünya çapında ortalama $2,4 \text{ mSv y}^{-1}$ maruziyetini aşmaktadır. Ortalama radyum eşdeğerlik aktivite değerleri, Mambucaba'da (RJ) 696 Bq kg^{-1} , Buena'da (RJ) 1621 Bq kg^{-1} , Anchieta'da (ES) 2289 Bq kg^{-1} , Meaipe'de (ES) 10205 Bq kg^{-1} , Guarapari (ES) 'de 83425 Bq kg^{-1} ,

Vitória'da (ES) 531 Bq kg⁻¹, Serra (ES)' de 2026 Bq kg⁻¹, São Mateus'de (ES) 3240 Bq kg⁻¹, Porto Seguro'da (BA) 3075 Bq kg⁻¹ ve Itacaré (BA) 'da 1841 Bq kg⁻¹ olarak bulunmuş ve değerlendirilmiştir. Bu değerler, OECD tarafından konutlar için inşaat malzemelerinin güvenli kullanımı için belirlenen 370 Bqkg⁻¹'nin sınırının üzerinde olduğu bildirildi (Veiga, R. ve ark., 2006).

2007 yılında Kam ve arkadaşları Türkiye'nin kuzeyinde bulunan Kastamonu şehrindeki radyoaktivite ölçümlerini yapmışlardır. Türkiye'nin kuzeybatı kısmında bulunan Kastamonu ilindeki kültürel ve turistik hareketlenmelerinden dolayı son zamanlarda ulusal ilgi haline gelmiştir. Bu çalışmada içerideki radon konsantrasyonları, yüzey toprağı ve içme suyundaki radyonüklit aktiviteleri ve havadaki iç/dış soğurulan gama doz ölçümleriyle bölgenin çevresel radyoaktivite seviyeleri belirlenmiştir. İçerideki ²²²Rn aktivite konsantrasyonu 2,48 mSv yıllık etkin doza eşdeğer 98,4 Bq/m³ olarak bulunmuştur. İçerideki ve dışarıdaki soğurulan gama dozlarının 0,33 mSv/y'lık toplam gama radyasyon seviyesi (doğal ve kozmik bölge) ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu değerler sırasıyla 54,81 ve 48,03 nGy/s olarak ölçülmüştür. Çalışma alanından toplanan toprak örneklerindeki aktivite konsantrasyonları doğal radyonüklitler ²³⁸U, ²³²Th ve ⁴⁰K için sırasıyla 32,93, 27,17 ve 431,43 Bq/kg ve fisyon ürünü ¹³⁷Cs için 8,02 Bq/kg olarak belirlenmiştir. Bu doğal radyoaktivite kaynakları 60 µSv/y karasal gama seviyesinde sonuçlanmıştır. Bölgeden toplanan su örnekleri yıllık 1,83 µSv'lık etkin doza neden olan 0,0089 Bq/l toplam alfa ve 0,271 Bq/l toplam beta aktivitelerinin ortalaması elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen ölçüm sonuçları çalışılan bölgenin doğal sınırlarda olan fon (background) radyasyonuna sahip bir bölge olduğunu göstermiştir ancak ülkenin diğer bölgelerinden önemli bir farkı olmadığını göstermiştir (Kam, E. ve ark., 2007).

2008 yılında Chang ve arkadaşlarının Güney Kore'de yaptıkları çalışmada, ülke çapında üretim ve tüketimde kullanılan 17 çeşit yerli ve 18 çeşit ithal örnek maden ürünlerinin endüstriyel saf mineral olarak doğal radyoaktivite düzeyleri değerlendirilmiştir. Hedef endüstriyel madenler iki grupta kategorize edilmiştir. İlk

grup kil, silis kumu, karbonat, katranlı ve antarasit kömürü, demir cevheri, demir titanat, titanyum dioksit minerali ve fosfat cevheri gibi düşük seviyeli radyoaktif metalik ve metalik olmayan ham madenleri kapsamaktadır. Diğer grup ise zirkon ve monazitten oluşan yüksek seviye radyoaktif madenlerden oluşmaktadır. Bu çalışmada gama spektrometresi ile 164 yerli ve ithal örnek analiz edilmiştir. ^{40}K 0,00131 den 2,69 Bq g⁻¹ a, ^{226}Ra ve ^{232}Th sırasıyla 0,0006 dan 0,630 a ve 0,0008 dan 0,474 Bq g⁻¹ aralığında değişiklik gösterir. Sonuç olarak hiçbir üründen antropojenik radyoaktif sinyal alınmamıştır (Chang, B.U. ve ark., 2008).

2008 yılında Kobeissi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma ile Lübnan'da yapı malzemelerinde kullanılan kum, çimento, çakıl, alçıtaşı ve boyada, doğal olarak oluşan radyonüklitlerin (^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{214}Bi , ^{228}Ac , ^{212}Pb , ^{212}Bi ve ^{40}K) konsantrasyonu gama spektroskopisi ve ^{39}CR dedektör kullanılarak ölçülmesi amaçlanmıştır. Kum örnekleri, ülkenin güneyindeki 10 farklı kum bankasından toplanmıştır. Farklı tip ve formlardaki çakıl örnekleri birkaç ocaktan toplanmıştır. Shaka Co. tarafından üretilen beyaz ve gri çimento elde edilmiştir. Kumdaki gama spektroskopi ölçümleri, Ra konsantrasyonu $4,2 \pm 0,4$ ila $60,8 \pm 2,2$ Bq kg⁻¹ ve Ra eşdeğerlik konsantrasyonu değerleri $8,8 \pm 1,0$ ila $74,3 \pm 9,2$ Bq kg⁻¹ arasında olduğunu vermiştir. En yüksek Ra konsantrasyonu, sırasıyla $73,2 \pm 3,0$ ve $76,3 \pm 3,0$ Bq kg⁻¹ olan gri ve beyaz çimentoda bulunmuştur. Çakıl sonuçları, ortalaması $27,5 \pm 1,3$ Bq kg⁻¹ olan $20,2 \pm 1,0$ ile $31,7 \pm 1,4$ Bq kg⁻¹ arasında Ra konsantrasyonunu göstermiştir. ^{39}CR dedektörü ile boyadaki radon konsantrasyonu belirlenmiştir. Kumda ortalama ^{222}Rn konsantrasyonu, 704 ± 139 Bq m⁻³ ortalama değerine sahip kum bankaları arasında 291 ± 69 ve 1774 ± 339 Bq m⁻³ arasında değişmektedir. Çakıl için aralığın ortalama değeri 608 ± 85 Bq m⁻³ olan 52 ± 9 ila 3077 ± 370 Bq m⁻³ arasında bulunmuştur. ^{222}Rn 'nin hava ve kitle ekshalasyon oranları da hesaplanarak, sırasıyla 44 ± 7 ve 2226 ± 267 mBq m⁻² h⁻¹ ve $0,40 \pm 0,07$ ile $20,0 \pm 0,3$ mBq kg⁻¹ h⁻¹ arasında bulunmuştur (Kobeissi, M.A. ve ark., 2008).

2010 yılında Turhan ve arkadaşlarının yaptığı çalışma, yapı sanayisinde beton imalatındaki uçucu külün kullanımının radyolojik açıdan güvenilirliğini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Kömür yakıtlı 11 termik santralden toplanan uçucu kül örneklerinde bulunan ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın spesifik aktiviteleri HPGe dedektörlü gama spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları radyum eşdeğer aktivite, gama indeksi, soğurulan gama doz oranı ve içeride dışsal maruz kalmadan dolayı yıllık etkin dozun hesaplanmasıyla betonda çimento yerine uçucu külün kullanımının radyolojik açıdan güvenilirliğini hesaplamak için kullanılmıştır. Değerlendirilen sonuçlar kömür yakıtlı Kangal termik santralinin %30'luk uçucu kül içeren beton karışımı örneği hariç tüm beton karışımı örneklerinin önerilen güvenilirlik limitleri içinde olduğunu göstermektedir (Turhan, Ş. ve ark., 2010).

2010 yılında Senthilkumar ve arkadaşlarının yaptıkları bu çalışma ile gama ışını spektrometresi kullanılarak Thanjavur'dan (Tamil Nadu, Hindistan) toplanan 10 toprak örneğinde doğal olarak bulunan radyonüklitler ^{232}Th , ^{238}U ve ^{40}K 'dan gelen karasal gama radyasyonu ve ilişkili doz oranlarını değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Radyonüklitlerin aktivite profili, Thanjavur'da düşük seviyeli aktivitenin varlığını açıkça göstermiştir. İncelenen tüm toprak örneklerinden elde edilen ^{232}Th , ^{238}U ve ^{40}K 'nın geometrik ortalama aktivite konsantrasyonları, sırasıyla $42,9 \pm 9,4 \text{ Bq kg}^{-1}$, $14,7 \pm 1,7 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve $149,5 \pm 3,1 \text{ Bq kg}^{-1}$ 'dir. Topraktaki ^{232}Th , ^{238}U ve ^{40}K 'lık aktivite konsantrasyonu, bu alanlarda tortulu şist, hornblend-biyotit gnays ve kuvarsofeldspathic gnays gibi metamorfik kayaçların varlığına bağlıdır. Soğurulmuş gama doz oranlarının açık alandaki hava koşullarının aritmetik ortalaması $43,3 \pm 9 \text{ nGy h}^{-1}$ olan 32 nGy h^{-1} ve $59,1 \text{ nGy h}^{-1}$ arasında olduğu hesaplanmıştır. Bu değer, dünya ortalaması 60 nGy h^{-1} olan ağırlıklı ortalama daha azdır. Thanjavur sakinleri, $53,1 \pm 11 \mu\text{Sv y}^{-1}$ aritmetik ortalaması olan $39,2$ ile $72,6 \mu\text{Sv y}^{-1}$ arasında değişen harici gama radyasyon maruziyetine (etkin doz) tabi tutulur. Çalışma alanının toprak radyoaktivitesinden belirlenen harici aktivite indisinin değerleri önerilen güvenli seviyelerin altındadır (Senthilkumar, B. ve ark., 2010).

2011 yılında Boukhenfouf ve Boucenna' nın yaptıkları bu çalışma ile mineral içeriğinden dolayı, toprakların doğal bir radyoaktif kaynak olduğu ve doğal kaynaklı olanlar dışındaki radyoaktivite kaynaklarından biri olan gübre kullanımının yaygın olmasından kaynaklandığını tespit etmişlerdir. Bu çalışmanın temel amacı, Cezayir'de üretilen çeşitli ticari gübrelerde radyoaktivitenin içeriğini belirlemek ve uygulamalarından dolayı uzun süreli maruziyet için bile işlenmiş bir topraktaki radyolojik etkilerini tahmin etmek üzere doğal fosfat gübrelerinin yerel üretimindeki doğal radyonüklitlerin akışını değerlendirmektir. Bu amaçlar için, Cezayir'in dışındaki Setif bölgesinden ve bu alanda kullanılan fosfat gübrelerinden bakir ve döllenmiş topraklar toplanmıştır. Gama spektrometresi, Setif'in alanlarından alınan beş tip örnekte (iki farklı çeşit gübreler, bakir ve döllenmiş topraklar ve sulama için kullanılan su) ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K nedeniyle doğal olarak meydana gelen aktivite konsantrasyonunu belirlemek için kullanılmıştır. Sonuçlar, bu radyonüklitlerin ortalama konsantrasyonlarının, ilk gübre NPK için $134,7 \pm 24,1$, $131,8 \pm 16,7$, 11644 ± 550 Bq / kg ve ikinci gübre (NPKs) için $190,3 \pm 30$, $117,2 \pm 10,3$, 5312 ± 249 Bq / kg bulunduğunu göstermektedir. Bakir ve döllenmiş topraklar için karşılık gelen değerler sırasıyla $47,01 \pm 7,3$, 33 ± 7 , $329,4 \pm 19,7$ Bq / kg ve $53,2 \pm 10,6$, $50,0 \pm 7$, $311,4 \pm 18,7$ Bq / kg dır. Kuyu suyu için, değerler 1,93 ve 0,12 Bq / kg dır; Ancak üçüncü değer Minimum Tespit Edilebilir Aktivitenin (MDA) altındadır. Tüm örnekler için radyum eşdeğerlik aktivitesi (Ra_{eq}), alfa ve gama indisleri de hesaplanmıştır. Veriler tartışılmış ve literatürde verilenlerle karşılaştırılmıştır (Boukhenfouf, W., Boucenna, A., 2011).

2012 yılında Solak ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada Adana'daki inşaat yapım alanlarından ve bayilerden toplanan 14 farklı bina materyalinin toplam 117 örnek için doğal radyoaktivite seviyesi belirlenmiştir. Bu çalışmada HPGe dedektörlü gama ışın spektrometresi kullanılmıştır. Çalışılan bina materyali örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite konsantrasyonları sırası ile 2.1 ile 88.2 Bq/kg, 1.8 ile 52.7 Bq/kg ve 68.1 ile 847.5 Bq/kg arasında bulunmuştur. İçerideki soğurulmuş doz hızı ve buna karşılık gelen yıllık etkin doz

oranı, bina materyallerinin kullanımında potansiyel olarak maruz kalınan risk için değerlendirilmiştir. Harici ve dâhili indeksin elde edilen değerleri önerilen en üst seviyenin altında bulunmuştur. Belirlenen etkin yıllık doz değerlerinin tümü 0.3 mSv (AB, 1999)'lık önerilen seviyeden düşüktür (Solak, S. ve ark., 2012).

2014 yılında Kaynar ve arkadaşlarının Türkiye'nin batısında bulunan Akhisar, Gölarmara, Gördes ve Sindirgi çevresinde yaptıkları radyoaktivite ölçümleri, radyoaktivite artışının jeolojik oluşum ile ilişkisini değerlendirmek için yapılmıştır. Toprak numunelerinde bulunan ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th radyonüklitlerinin radyoaktivite yoğunlukları NaI(Tl) gama spektrometrik yöntemle ölçülmüş olup aynı zamanda su örnekleri içindeki radyum aktivite yoğunlukları ZnS(Ag) alfa sayıcısı tarafından toplayıcı odası metodu ile analiz edilmiştir. Toprak numunelerinde bulunan ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th radyoaktivite değer aralıkları sırasıyla 2,80–2347,77, 9,90–256,19 ve 9,66–106,53 Bq kg⁻¹ olarak belirlenmiştir. Su örneklerindeki ^{226}Ra aktivite aralığı 0,03 Bq L⁻¹(0,89pCi/L) den 0,80 Bq L⁻¹ (21,58pCi/L) dir. Buna ek olarak havada bulunan soğurulmuş gama doz hızı (nGy h⁻¹), yıllık etkin doz hızı (mSv year⁻¹) ve radyum eşdeğer aktivite (Bq kg⁻¹) hesaplanmış ve uluslararası standart değerlerle karşılaştırılmıştır (Çam, S. ve ark., 2014).

2017 yılında Calin ve arkadaşları tarafından Romanya'da yapılan çalışmada, yapı malzemelerinin ^{40}K , ^{232}Th ve ^{226}Ra (^{238}U) gibi temel doğal radyonüklitler içerdiği tespit edilmiştir. Araştırma Romanya' da yapı endüstrisinde kullanılan farklı orijinli volkanik, kalker, zirkonyum mineralleri, silis alüminyum v.b. farklı tipteki hammaddelerin içeresindeki ^{40}K , ^{232}Th ve ^{226}Ra aktivite konsantrasyonunun ölçülmesine dayanmaktadır. Bu malzemeler, iyonize radyasyondan kaynaklı halk ve çalışanların ışınlanmasına öncülük ettiği için önemlidir. Tahmine dayalı radyolojik tehlikenin aktivite konsantrasyonları radyum eşdeğerlik, absorblanmış doz, yıllık etkin doz, harici aktivite indisi, dâhili aktivite indisi, gama ve alfa indisleri ve doz ölçütü gibi radyolojik parametreler analiz edilerek yapılır. Bu malzemeler kullanılarak nüfus sağlığı için indekslerin analizinden doğan radyolojik

tehlike önemli sonuçlar verebilir. Bu çalışmada ölçülen birçok malzeme oldukça düşük seviyede radyoaktivite göstermektedir (Calin, M. R. ve ark., 2017).

2017 yılında Hamarneh I. F. tarafından Riyad Suudi Arabistan’ da yapılan çalışmada, yapılarda sıklıkla iç ve dış mekân amaçlı kullanılan farklı tiplerde mermer, granit ve seramik karoların ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları gama spektroskopisi ile belirlenmiştir. Granitte ^{226}Ra ve ^{40}K , seramik örneklerinde ise ^{232}Th aktivitesi yüksek bulunurken, mermer örnekleri ise her üç radyonüklid için düşük yoğunluk göstermiştir. Uranyum, toryum ve radyum eş değerlik, iç ve dış aktivite indisleri, gama ve alfa indisleri gibi çeşitli radyolojik indislerin konsantrasyonunu hesaplamak için aktivite ölçümleri kullanılmıştır. Ayrıca iç mekân hava, yıllık etkin doz eşitliği ve yıllık gonadal doz eşitliğindeki soğurulmuş gama doz oranı gösterilmiştir. Ekseriyetle, hesaplanan parametreler yapı malzemeleri için güvenli kullanımı gösteren izin verilen limitlerin altında seviyeler göstermiştir. Solunan radondan dolayı tehlike kısmı kadar çalışılan ürünlerdeki radyasyon dozunun doğal radyonüklitlerin göreceli katkısı tahmin edilmektedir. Ömür boyu risk değerlendirmesi incelenen örneklerde bulunan gama kaynaklarına maruz kalma değerlerini 10^{-4} ve 10^{-3} olarak gösterilmiştir (Hamarneh, I. F., 2017).

2017 yılında G. Sankaran Pillai ve arkadaşlarının Hindistan’ ın Pudukkottai bölgesinde yapmış oldukları çalışma ile diğer bölgelere de ihraç edildiği tespit edilen kum, tuğla, taş v.b. yapı malzemelerinin doğal olarak var olduğu tespit edilmiştir. Bu yüzden bu yapı malzemeleri içerisindeki doğal radyoaktivite analizi inşaat amaçlı kullanımdan önce önemlidir. WHO, toprak ve yapı malzemelerinden kaynaklı yapı içi radon birikiminin insan akciğer hastalıkları için önemli faktörlerden biri olduğunu raporlamıştır. Bu çalışmanın ana gayesi, Pudukkottai’ deki yapı malzemeleri içerisindeki ve olası radyolojik riski değerlendirmek için doğal olarak meydana gelen radyoaktif malzemelerin ölçümüdür. NaI(Tl) dedektör kullanılarak toplamda 118 adet yapı malzemesi örneği içerisindeki ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K incelenmiştir. Yapı malzemelerinin ortalama radyum eşdeğerlikleri aşağıdaki gibi azalan düzende korunmaktadır. Bu değerler Taş ($299 \pm 206 \text{ Bq kg}^{-1}$) > Toprak

($145 \pm 54 \text{ Bq kg}^{-1}$) Kum ve Çimento ($117 \pm 28 \text{ Bq kg}^{-1}$) > Tuğla ($110 \pm 26 \text{ Bq kg}^{-1}$)'dır. Tanımlanan 7 taş ocağı için yapılan çalışmada radyum eş değerlik 2008 yılında UNSCEAR tarafından belirlenen izin verilen sınır olan ($>370 \text{ Bq kg}^{-1}$) den daha yüksek olduğu kaydedilmiştir. Bu bölgeden temin edilen ve kullanılan diğer tüm yapı malzemelerinde düşük seviyede radyum eş değerlik kaydedilmiştir. Aynı zamanda ADRA, I_γ ve H_{in} gibi önemli radyolojik parametrelerde hesaplanmıştır. Sonuçlar, gözlemlenen malzemeler içerisinde herhangi bir artışın olmadığını ifade etmiştir. Bu yüzden, yukarıda adı geçen bölgelerde kullanılan yapı malzemelerinin radyoaktivite açısından herhangi bir tehlike teşkil etmeyeceği belirtilmiştir (Pillai, G.S.ve ark., 2017).

2017 yılında Amira Kasumović ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Bosna Hersek'te sıklıkla yapı malzemelerinde kullanılan örneklerdeki spesifik aktiviteler olan ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K ölçümleri değerlendirilmiştir. Ölçümler eş eksenli HPGe dedektör olan gama spektrometresi ile yapılmıştır. Aynı zamanda seçilen yapı malzemeleri için solunan yüzey radon ve solunan yığın değerleri ölçülmüştür. Spesifik aktivitelerin değerleri ^{232}Th için $3,16 \pm 0,81 \text{ Bq kg}^{-1}$ ile $64,79 \pm 6,16 \text{ Bq kg}^{-1}$ aralığında, ^{226}Ra için $2,46 \pm 0,95 \text{ Bq kg}^{-1}$ ile $53,89 \pm 3,67 \text{ Bq kg}^{-1}$ aralığında, ^{40}K için $28,44 \pm 7,28 \text{ Bq kg}^{-1}$ ile $557,30 \pm 93,38 \text{ Bq kg}^{-1}$ aralığında belirlenmiştir. Yapı malzemelerindeki radyoaktif nüklitlerden kaynaklanan gama ışını emisyonundan dolayı kapalı alandaki havanın soğurulmuş doz oranı ve düzeltilmiş yıllık etkin doza ek olarak radyum eşdeğer aktivitesi, aktivite konsantrasyon indeksi, harici ve dahili aktivite indisi insanlar için tehlikesini değerlendirmek için hesaplanmıştır. İncelenmiş tüm yapı malzemelerindeki doğal radyoaktif nüklitlerin ölçülen spesifik aktiviteleri diğer Avrupa ülkelerinin yapı malzemeleri için yayınlanan sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Bu çalışma sonuçlarının komşu ülkelerden ve Avrupa Birliği üyesi ülkelerde kullanılan yapı malzemeleri için verilen verilere benzer olduğu kaydedilebilir. Yapı malzemelerindeki tüm radyolojik tehlike parametreleri güvenli kullanım için tavsiye edilen limitler içerisinde olduğu görülmüştür (Kasumović, A.ve ark., 2017).

2017 yılında Nataša Todorović ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalar ile seramik sanayisinde kullanılan zirkon, zirkosil, zirkobit, zirkon silikat v.b. gibi bazı materyallerin doğal radyoaktivitesini ve onların ilişkili olduğu radyasyon tehlikeleri belirlendi. Harici aktivite indisi, radyum eş değerlik aktivitesi, toplam soğurulmuş doz oranları ve yıllık etkin doz tüm ölçülen materyaller için türetilmiş ve Sırbistan'da seramik sanayisinde çalışmış olan işçiler için tavsiye olunan değerler ile değerlendirilen harici radyasyon indisi karşılaştırılmıştır (Todorović, N. ve ark., 2017).

2017 yılında Altun ve arkadaşları tarafından yapılan bu çalışmada çeşitli bölgelerde üretilen Türk Portland çimentosunun doğal radyoaktivite seviyeleri ve bazı radyolojik parametreleri belirlenmiştir. Çimento örneklerinin aktivite konsantrasyonu ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K yüksek saflıktaki germanyum radyasyon dedektörü ile gama ışın spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür. PC örnekleri sırayla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K için 33,0, 16,7 ve 239,5 Bq kg⁻¹ aktivite konsantrasyonuna sahiptir. Çimento örnekleri içerisindeki ortalama radyum eşdeğerlik aktivite değeri 75,4 Bq kg⁻¹ olarak bulunmuştur. Çimento örnekleri içerisindeki radyum eşdeğerlik aktivite değerleri kabul edilebilen değer olan 370 Bq kg⁻¹ den daha düşüktür. Hesaplanan radyolojik parametrelerin kabul edilebilir seviyelerin altında olduğu tespit edilmiştir (Altun, M.ve ark., 2017).

2017 yılında Jorge Sanjurjo ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada insanların doğal iyonize radyasyona maruz kalması radyoaktif izotopların hem sindirimi ve solunumu gibi dâhili kaynaklardan hem de mevcut yer kabuğundaki kozmik kaynaklar ve temel radyonüklitlerde oluşan harici kaynaklardan dolayı olduğu anlaşılmıştır. Düşük dozda gama radyasyonu yayan ^{40}K , ^{238}U in bozunum serileri radyoizotopları ve ^{232}Th temel radyonüklitlerdir. Gama salınımı, jeolojik radyasyondan dolayı hem açık havada, meskenlerde kullanılan jeolojik materyallerden dolayı hem de kapalı alanlarda meydana gelebilir. Ortalama olarak insanları etkileyen toplam doza daha az katkıda bulunduğu için bu radyasyon insan yapımı kaynaklardan daha az dikkat çeker. Fakat yapı malzemesi olarak kullanılan

yüksek konsantrasyonlu radyonüklitler içeren coğrafi alanlar ve kayalar vardır böylece nispeten yüksek gama doz maruziyeti içeren bir kaynak olur. Özellikle malzeme uygulamasında belirgin varyasyonları olan kapalı alanlarda, ıslama değerlendirmesi zordur. Yine de bazı önlemler ve yapı malzemeleri üzerindeki doz ıslamaları denetlemek için düzenlemeler önerilmiştir. Bu çalışma, yapılar için kullanılan jeolojik materyallerin gama radyasyonunu hakkında bilgi vermiştir. Ayrıca, bu çalışmada yapı malzemelerinde kullanılan materyallerin içerdiği radyonüklitlerden kaynaklanan radyasyon ıslamaları da tartışılmıştır (Sanjurjo, J.ve ark., 2017).

2017 yılında Raghu ve arkadaşlarının yaptığı bu çalışma ile yapı malzemeleri olarak kullanılan kum örneklerinin ve radyolojik tehlikelerinin doğal olarak oluşan radyoaktivite düzeylerini araştırılması amaçlanmıştır. Doğal radyoaktivite ölçümlerinin incelenmesi ve bunlarla ilişkili radyasyon tehlikelerinin gama ışını spektrometre sistemi kullanılarak incelenmesi amacıyla Tiruvannamalai bölgesinden farklı kum ocaklarından on beş adet kum örneği toplanmıştır. Kum numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları NaI(Tl) dedektörü kullanılarak ölçülmüş ve ortalama aktivite konsantrasyonlarının dünya ortalama değerleri ile karşılaştırıldığında ^{232}Th değeri 3,98 kat daha büyük iken ^{226}Ra değeri 7,66 kat ve ^{40}K değeri 1,03 kat daha düşük olduğu bulunmuştur. Kum örnekleri ile ilişkili radyolojik tehlikeler, bina inşaatlarına uygunluğunu değerlendirmek için radyasyon indeksleri kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, incelenen kumun çalışma alanındaki konutların yapımında kullanılabileceğini göstermiştir. Bu çalışmada incelenen kumlar, herhangi bir radyolojik diziler olmaksızın yapı inşası için önerilmektedir. Bu analiz, konutta yapı malzemesi olarak kullanılan kumdaki radyasyon tehlikelerini değerlendirmek için çok faydalı olacaktır ve veri tabanının yanı sıra söz konusu alanın radyolojik haritasını elde etmek için bir başlangıç adımıdır (Raghu, Y. ve ark., 2017).

2017 yılında Xhixha ve arkadaşları tarafından Arnavutluk’ ta yapılan çalışmada, konutlarda kullanımlarından dolayı radyasyona maruz kalan nüfusu değerlendirmek amacıyla çimento üretim sektöründe kullanılan çimento ve hammaddelerin doğal radyoaktivitesi incelenmektedir. Sonuçlar, kireçtaşının çimentolarda ^{226}Ra aktivite konsantrasyonunun varlığına başlıca katkıda bulunduğunu göstermektedir. Aluminosilikat malzemelerinin, esas olarak ^{40}K ve ^{232}Th ’nin varlığına olan katkısı, esas olarak farklı tipte hammaddelerin kullanılma olasılığından dolayı yüksek değişkenlik göstermektedir. Aktivite konsantrasyonu Portland kireçtaşı çimentolarına göre Portland çimentolarında ^{226}Ra için 12,0 ila 16,1 Bq kg⁻¹, ^{232}Th için 46,2-51,2 Bq kg⁻¹ ve ^{40}K için 133,7–168,8 Bq kg⁻¹ değerleri olarak daha yüksek bulunmuştur. 2013/59 / EURATOM Konsey Direktifi tarafından önerilen ve Arnavutluk mevzuatında yeni değiştirilen aktivite yoğunlaşma indeksi (ACI), çimentoların inşaat malzemesi olarak kullanılmasından dolayı radyolojik tehlikeyi değerlendirmek için bir tarama aracı olarak benimsenmiştir. ACI, 0,26’den 0,31’e kadar değişir; bu da, bu yapı malzemelerinin, konutlarda kullanımları nedeniyle insanlar için önemli bir risk oluşturmadığı sonucuna varılmasını sağlar. Bu sonuç, 0,33 ila 0,38 mSv y⁻¹ arasında değişen yıllık etkili doz oranının hesaplanmasıyla doğrulanmaktadır (Xhixha, F. S. G. ve ark., 2017).

2018 yılında Joel ve arkadaşları tarafından yapılan bu çalışmada Nijerya’da üretilen ve Çin’den ithal edilen doğal radyoaktivite içeren tuğlalar içerisindeki radyonüklitlerin ölçümü gama spektrometresi kullanılarak yapılmıştır. Nijerya ve Çin’den temin edilen 17 çeşit tuğla örneğindeki bazı radyoizotopların tespiti için yüksek saflıktaki germanyum dedektörü kullanılmıştır. Nijerya ve Çin’den temin edilen tuğlalar için ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ’ın ortalama aktivite konsantrasyonu sırasıyla $68,2 \pm 0,5$; $173,9 \pm 9,2$ ve 490 ± 15 Bq/kg ve $58,2 \pm 0,5$, $161,5 \pm 9,4$ ve $455,7 \pm 15,1$ Bq/kg olduğu tespit edilmiştir. Soğurulmuş doz oranı, radyum eşdeğerlik aktivitesi, harici aktivite indisi, dâhili aktivite indisi, yıllık etkin doz, gama aktivite indisi ve alfa aktivite indisi gibi radyolojik tehlike indisleri hem

Nijerya hem de Çin den temin edilen tuğlalar için belirlenmiştir. Elde edilen ortalama değerler sırayla 354,56 ve 317,16 Bq/kg; 169,22 nGyh⁻¹ ve 153,92 nGyh⁻¹; 0,95 ve 0,87; 1,14 ve 1,08; 1,59 mSv/y ve 1,52 mSv/y; 1 ve 1,15 ve; 0,34 ve 0,29 dır. Bu çalışmadan elde edilen ortalama radyum eşdeğerlik değeri her iki tip tuğla için uluslararası referans değeri olan 370 Bq/kg'dan daha küçük olduğu belirtilmiştir (Joel, E. S. ve ark., 2018).



3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde araştırma konusu olan, zeolit ve mika örneklerinin temin edilmesi, radyoaktivite ve elemental analiz işlemi için hazırlanması ve doğal olarak içerdiği radyonüklitlerin aktivite derişimlerinin ölçülmesi amacıyla kullanılan gama ışını spektrometresine ilişkin ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

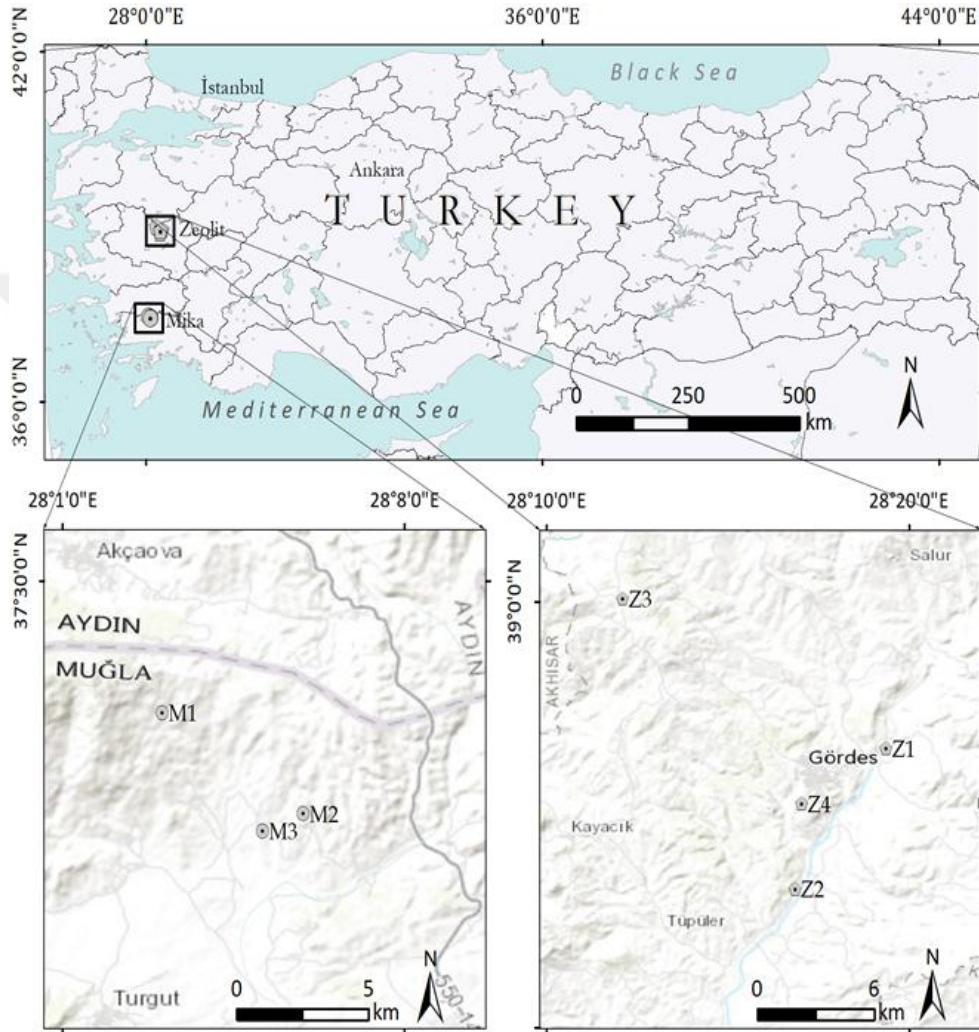
3.1. Örneklerinin Toplanması

Bu çalışmada 88 adet farklı doğal zeolit örneği incelenmiştir. Endüstride yaygın olarak kullanılan kalsiyum klinoptilolit zeolit mineral grubunun en çok olduğu, ayrıntılı etüdü yapılan tek zeolit sahası olan, 18 milyon ton görünür zeolit rezerve sahip Manisa Gördes’de bulunan ve ticari amaçlı olarak işletilen 4 farklı zeolit ocağından farklı örnekler toplanmıştır. 84 adet mika örneği ise Muğla, Yatağan Hisarardı’nda bulunan ve ticari amaçlı olarak işletilen 3 farklı mika ocağından toplanmıştır. Örneklerin alındığı bölge Şekil 3.1’ de gösterilmiştir.

3.2. Örneklerin Hazırlanması

Kütleleri 1,5-2 kg olan her bir zeolit ve mika örnekleri poşetler içinde Çukurova Üniversitesi Fizik Bölümü Gülten Günel Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarına getirilmiştir, toplandıkları yerlerin bilgisini içerecek şekilde kodlanmıştır ve laboratuvar ortamında kurumaya bırakılmıştır. Daha sonra bu örnekler, dedektör verim kalibrasyonunun yapıldığı referans standart malzemeler ile hemen hemen aynı büyüklük ve geometriye sahip olmaları amacıyla öğütücünden geçirilerek toz haline getirilmiştir ve Şekil 3.2’ de görüldüğü gibi gözenek büyüklüğü 1 mm olan elekten geçirilmiştir. Elenmiş örnekler, net kütle miktarını belirlemek için sıcaklığı 110 °C’ye ayarlanmış etüvde 20 saat süreyle kurutulmuştur. Örnekler 5x6 cm boyutundaki silindirik örnek kaplarına konulmuş ve tartım işlemleri yapılmıştır. Daha sonra kapların sızdırmazlığı sağlanarak radyum (^{226}Ra) ve bozunum ürünleri arasındaki kalıcı dengenin sağlanabilmesi için

her bir örnek, radyoaktivite ölçme işlemine kadar en az bir ay Şekil 3.3' de görüldüğü gibi bekletilmiştir.



Şekil 3.1. Örneklerin Toplandığı Yeri Gösteren Harita

a)



b)



c)



Şekil 3.2. Örneklerin Hazırlanmasında Kullanılan a) Öğütücü, b) Elekler c) Fırın



Şekil 3.3. Radyoaktivite Ölçümü için Hazırlanmış Örnekler

3.3. Gama Işını Spektrometresi

Çevresel örneklerdeki doğal radyoaktif serilere ait radyonüklitlerin belirlenmesi için gama spektrometrisi, alfa spektrometrisi, sıvı sintilasyon sayacı ve toplam alfa/beta orantılı sayaçlar gibi analitik yöntem veya teknikler kullanılmaktadır. NaI(Tl) (verimi yüksek, çözme gücü düşük) ve yarı iletken HPGe (verimi düşük, çözme gücü yüksek) dedektörlerinin kullanıldığı gama ışını spektrometrik yöntem, radyokimyasal ayırma işlemlerine gerek duyulmadan doğrudan kullanılabilmekte ve radyonüklitleri aynı anda nitel ve nicel ölçebilmektedir. Gama ışın spektrometrik yöntem, gama ışını yayan izotopların algılanması ve ölçülmesinde kullanılan tahribatsız, hızlı ve güvenilir bir analiz yöntemidir (Gilmore, 2000). Gama ışın spektrometresi bir tek ölçümle ve daha az örnek hazırlanmasıyla örnekteki çeşitli gama ışını yayan radyonüklitleri

belirlemeye izin verir. Yatay eksen durumu enerjisi hakkında fikir veren ölçüm, spektrum çizgileri ile verilir ve büyüklüğü radyonüklitin aktivitesiyle orantılı olarak verilir. Gama ışın spektrometrik yöntem birçok alanda yaygın olarak kullanılır ve bu alanlar; nükleer tesislerin izlenmesi, sağlık fiziki, nükleer tıp, malzeme araştırma, gıda, tarım, biyoloji, çevre ve radyoizotopların endüstriyel kullanımları gibi çeşitli alanlar olarak tanımlanır.

Dünya çapında 200,000'den daha fazla kullanılan gama ışını spektrometresi, temel olarak gama ışının etkileşeceği dedektör ortamından ve etkileşme sonucunda oluşan sinyalleri işleyen elektronik sistemden ve spektrumun gösterildiği monitörden oluşmakta olup akademik ve sanayi laboratuvarlarında ve izlenimlerde kullanıldığı bilinmektedir.

Bu yöntem ile ölçme işlemi; gama ışını fotonlarının algılanması, gama ışını fotonları ile dedektör malzemesi arasındaki etkileşmeye bağlı olup enerjilerinin ölçülmesini esas alır.

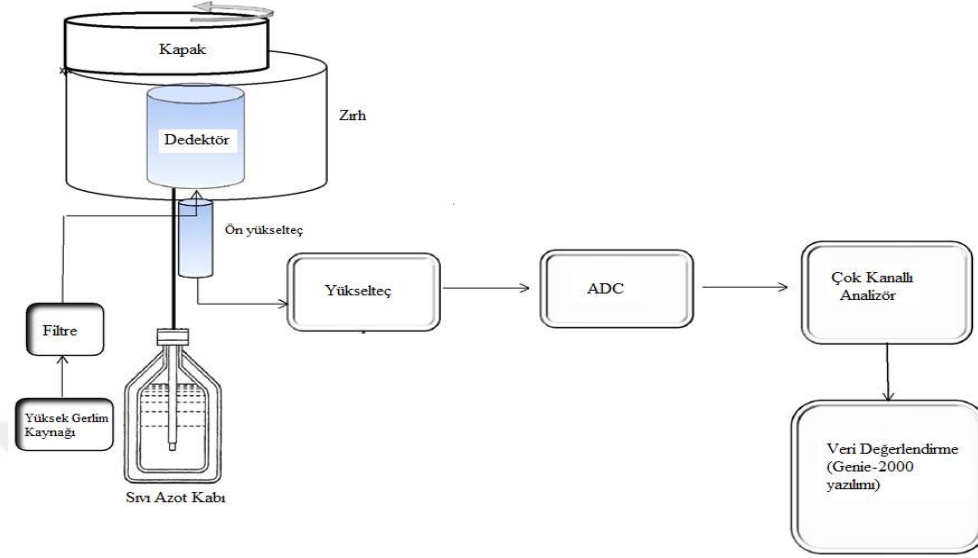
Gama ışını fotonları, maddenin atomik elektronları, nükleonları ve çekirdek çevresindeki elektrik alanı ile etkileşim içinde olduğu bilinmektedir. Madde ile fotoelektrik etki, compton saçılması ve çift oluşumu olarak isimlendirilen üç farklı şekilde etkileşen gama ışını fotonları, etkileşimleri süresince ya tamamen soğurulur, ya esnek ya da esnek olmayan şekilde saçılırlar (Pittauerova, 2013).

Yarı iletken dedektörlerin dizaynı, negatif yük (elektron) veya pozitif yük (deşik) taşıyıcılarının fazla olan n ve p tipi materyallerin temas ettirilmesi ile oluşur. Elektron ve deşikten arınmış bir hassas bölgenin oluşumu ters besleme altındaki dedektör sayesinde meydana gelir. Derin hassas bölge elde etmek için gerekli olan saf madde ile dedektör veriminin yüksek olması sağlanır. Elektron-deşik çifti üretimi bir fotonun, birleşim yerinden geçip valans bandından iletim bandına yükseltilmesi ile olur. İçerideki elektrik alan, elektronları birleşim yerinin pozitif, deşikleri de negatif tarafa doğru sürükler. Bu da bir sayıcı ile sayılabilen bir vuru (puls) meydana getirir.

Gama Işını spektrometresi, dedektör kristaline ulaşan gama ışınlarının enerjisiyle orantılı olarak oluşan vuruların bir önyükselteç ve yükselteçte işlendikten sonra elde edilen sinyalin analog sayısal dönüştürücüde (ADC) sayısal hale getirilmesi ve sonrasında çok kanallı analizörün (MCA) hafızasında spektrum olarak kaydedilmesine imkân veren bir sistemdir. Gama ışını spektrometresinde en yaygın olarak kullanılan yarıiletken dedektörü, yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dur. Yüksek saflıkta germanyum dedektörlü, Gama spektrometresi Şekil 3.4’de gösterilmiştir.

HPGe düşük bant aralığına sahip olduğu için bu dedektörler yük taşıyıcılarının ters sızıntı akımı kabul edilebilir bir seviyeye azaltmak için soğutulmalıdır. Aksi takdirde, sızıntı akımın indüklediği gürültü dedektörün enerji çözünürlüğünü yıkar. 77 °K sıcaklığa sahip sıvı azot bu tür dedektörler için yaygın soğutma elamandır. Dedektör LN2 kriostata yerleştirilen veya bağlanan vakum odasına monte edilmiştir. Böylece hassas dedektör yüzeyleri nem ve diğer kontaminasyondan korunur.

Gama ışınlarının dedektör ile etkileşmesi sonucunda oluşan yük, ön yükselteç ile toplanır. Ön yükselteçte vuru şekillendirmesi yapılmaz. Dedektöre yüksek empedans vererek yükselteç ve dedektör arasında bir empedans uyuşturucu olarak görev yapar. Ön yükselteçler akıma hassas, gerilime hassas ve yüke hassas olmak üzere farklı şekilde tasarlanabilirler. Yüksek çözünürlüklü gama ışını spektrometresinde, genellikle kazancın dedektör kapasitansından bağımsız olmasından dolayı yüke hassas ön yükselteçler kullanılır (Gilmore, 2000).



Şekil 3.4. Gama Işını Spektrometresi

Ön yükselteçten çıkan kuyruklu vurular, vuru yüksekliğinin ölçülmesi için uygun değildir. Bu kuyruklu vurular yükselteç tarafından büyütülerek daha kısa oluşma zamanlı ve çok daha hızlı azalım zamanı olan vurulara dönüştürülürler (Knoll, 2000). Şekillendirmenin istenmeyen etkilerini düzeltmek için, yüksek çözünürlüklü gama ışını spektroskopisinde kullanılan yükselteçlerde sıfır kutup düzeltmesi ve taban seviye düzeltmesi sağlanır.

Dedektöre gelen gama ışını, enerjisiyle orantılı yükseklikte oluşur ve yükselteçte şekillendirilen darbeler çok kanallı analizörde yüksekliklerine göre sıralanırlar. Çok kanallı analizöre gelen darbenin yüksekliği ve buna karşılık gelen kanal numarası arasındaki ilişki doğrusal olmalıdır. Sıfır ayarı yapılmasına imkân veren analog-sayısal dönüştürücü, küçük genlikli gürültü darbelerinin engellenmesini sağlar. İlgilenilen enerji aralığı ve dedektörün ayırma gücü spektrumun elde edilmesinde kullanılır. Genellikle HPGe dedektörlerde yarı yükseklikteki tam genişlik (YYTG) 4 kanal olarak kabul edilir. Germanyum dedektörlerde 1000 keV–1500 keV enerji aralığında YYTG=2 keV olduğundan kanal başına 0,5 keV enerji düşmektedir. Eğer ilgilenilen enerji aralığı, 4096 veya 8192 kanal olarak

seçiliyor ise, ilgilenilen enerji aralığı 2000 keV'den daha yüksek anlamına gelmektedir.

Genel olarak değerlendirecek olursak, duyarlı bir HPGe sistemi, dedektör verimi ile doğrudan orantılıdır anlamı çıkmaktadır. Aşağıda üç farklı şekilde tanımlanan bir HPGe dedektörün verimi, belli bir sayıdaki gama ışınlarının ne kadar sinyal oluşturduğuna bağlıdır.

1) Mutlak Verim: Kaynak tarafından yayılan gama ışınlarının şiddetinin dedektör tarafından oluşturulan sayımların sayısına oranıdır.

2) Öz (intrinsic) verim: Dedektöre çarpan gama ışınlarının miktarı dedektör tarafından oluşturulan sayım darbelerin sayısına oranıdır. Bir dedektörün öz verimi, giriş penceresi üzerindeki bir paralel ışın olayındaki fotonların sayısı üzerinden tanımlanır ve kaynak tarafından yayımlanan fotonların sayısı belirtilmez.

Bu tanım herhangi kaynak dedektör geometrisine bağlı olmadığı için avantajlıdır. Farklı dedektörleri karşılaştırmak için sık sık kullanılır; ama radyoaktif örneğin ölçümünde daha az önemlidir.

3) Bağlı Verim: HPGe dedektörlerinin bağlı verimi, 7,65 cm x 7,65 cm ebadındaki NaI(Tl) sintilasyon dedektörüne 25 cm uzaklıktaki ^{60}Co kaynağından yayınlanan 1,33 MeV enerjili gama ışınının oluşturduğu verime göre belirlenmektedir.

3.3.1. Gama Spektrometrik Analizler

Örneklerin içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerinin aktivite derişimleri, teknik özellikleri Çizelge 3.1'de verilen HPGe dedektörlü (Canberra GX5020) gama ışını spektrometresi kullanılarak yapılmıştır. Çukurova Üniversitesi Fizik Bölümü Gülten Günel Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarında bulunan gama ışını spektrometresi, Şekil 3.5'de gösterilmektedir. Dedektör, laboratuvar ortamındaki doğal fon radyasyonunu en aza indirebilmek için, Canberra Model 767 kurşun zırh (9,5 mm kalınlığındaki çelik iskelet içinde 100 mm kalınlığında) ile zırhlanmış olup, zırh içerisindeki etrafa saçılan radyasyonu en aza düşürmek için

ise dedektör zırhın merkezine konumlandırılmıştır. 50 L hacimli vakumlu (çift duvarlı) sıvı azot kabı soğutma için kullanılmıştır.

Dedektör, ileri sayısal sinyal işleme (DSP) içeren ve tam özellikli 16K çok kanallı sayısal spektrum analizörüne (DSA-1000) bağlıdır. DSA-1000, fotopikleri otomatik olarak bulan, değerlendiren, belirsizliğini hesaplayan, hafızası ile gerektiğinde radyonüklitleri belirleyen ve aktivite analizlerini yapabilen Genie-2000 gama spektroskopi yazılım ile çalışmaktadır (Gören, 2016).

3.3.2. 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 gerekmektedir. Enerji kalibrasyonu için genelde ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{241}Am vb. gama enerjileri bilinen radyonüklitlerden oluşan nokta standart kaynaklar kullanılmaktadır (Demir, 2015). 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 doğru denklemine bazen de ikinci veya üçüncü dereceden bir polinoma uydurularak (fit edilerek) kanal sayısı ile gama ışını enerjisi arasındaki ilişki bulunur.

Çizelge 3.1. Yüksek Safılıkta Germanyum Dedektörün Özellikleri

Dedektör Modeli	Canberra GX5020 HPGe
Bağıl Verim	% 50
Enerji Ayırma Gücü (^{60}Co'ın 1332,5 keV Enerjideki Yarı Maksimumdaki Tam Genişliği) ve Tepe/Compton Oranı	2 keV ve 60: 1
Dedektör Geometrisi ve Kristal Tipi	Kapalı Uçlu, Eş Eksenli ve p-tipi Ge
Çapı ve Yüksekliği	65,5 mm ve 62,5 mm
Pencere Malzemesi, Kalınlığı	Al, 1 mm ve 15,9 cm ²
Pencereden Uzaklık	5 mm
Kriyostat ve Azot Kabı	Dikey Geometrili



Şekil 3.5. Gama Işını Spektrometresi

Örneklerin ölçümlerinde kullanılan gama ışıını spektrometresinin enerji kalibrasyonu, ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co ve ^{40}K noktasal standart kaynaklar kullanılarak yapılmış ve elde edilen veriler birinci dereceden bir doğru denklemine uyarlanmıştır (Demir, 2015).

3.3.3. HPGe Dedektörün Tam Pik Verim Kalibrasyonu

Dedektörün 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 bilinen, farklı geometrilerdeki katı veya sıvı standart kaynaklar kullanılarak gama ışını enerjilerinin bir fonksiyonu olarak doğrudan deneysel ölçümler sonucunda belirlenir (Demir, 2015).

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 kaynaklar önerilmektedir (Demir, 2015). Ölçümlerde kullanılan HPGe dedektörünün tam enerjili fotopik verim kalibrasyonu, Uluslararası Atom Enerjisi tarafından üretilen ve özellikleri Çizelge 3.2’de verilen RGU-1, RGTh-1 ve RGK-1 standart referans malzemeler kullanılarak yapılmıştır. İlk olarak referans malzemelerin her biri aktivite ölçümü yapılacak örnek kaplarına yerleştirilmiş ve dedektör üzerine konularak sayılmıştır. Daha sonra ilgilenilen her bir gama ışını fotopikin verimi (ε), aşağıda verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\varepsilon = \frac{NS}{P \cdot t \cdot A} \quad (4.1)$$

Burada,

NS : İlgilenilen gama ışını foto-pikine ait net alan (sayım),

P : İlgili gama ışınının yayınlanma olasılığı,

t : Sayım süresi (s) ve

A : Becquerel (Bq) cinsinden referans malzemenin aktivitesidir.

Çizelge 3.2. RGU-1, RGTh-1 ve RGK-1 Referans Malzemeler

Referans malzeme	Element	Derişim
RGU-1	Uranyum	$400 \pm 2 \mu\text{g/g}$
	Toryum	$1 \mu\text{g/g}$ 'dan daha az
	Potasyum	$20 \mu\text{g/g}$ 'dan daha az
RGTh-1	Toryum	$800 \pm 16 \mu\text{g/g}$
	Uranyum	$6,3 \pm 0,4 \mu\text{g/g}$
	Potasyum	$0,02 \pm 0,01 \mu\text{g/g}$
RGK-1	Potasyum	$44,8 \pm 0,3\%$
	Uranyum	$0,001 \mu\text{g/g}$ 'dan daha az
	Toryum	$0,01 \mu\text{g/g}$ 'dan daha az

3.3.4. Uygun Gama Işını Fotopiklerin Seçilmesi

^{226}Ra 'nın aktivite derişimini, gama ışını yayınlayan uzak ürün radyonüklitlerin aktivite derişiminden bulmak için ^{226}Ra - ^{222}Rn arasındaki kalıcı dengenin sağlanması gerekmektedir. Bu dengenin sağlanması durumunda ana çekirdek ^{226}Ra 'nın aktivite derişimini ölçmek için, uzak bozunum ürünleri 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 (Demir, 2015). ^{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. ^{40}K 'ın aktivite derişimi ise 1460,8 keV enerjili kendi gama ışını fotopiki kullanılarak hesaplanabilir.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu kesimde; (1) zeolit ve mika örneklerinin doğal olarak içerdği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerinin aktivite derişimlerine, (2) zeolit ve mika örneklerinin radon emisyon katsayılarına, (3) radon kütle salım hızlarına, (4) zeolit ve mika örneklerinin yapı malzemesi olarak kullanılmasının radyolojik değerdendirilmesine ve (5) zeolit ve mika ocaklarında çalışan yetişkin bireylerin aldıkları radyasyon dozunun değerdendirilmesine ilişkin elde edilen veriler analiz edilerek tartışıldı.

4.1. Zeolit ve Mika Örneklerinin Radyonüklit Derişimleri

Bu çalışmada, 172 örneğin doğal olarak içerdği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerinin aktivite derişimleri çalışma ilkesi Bölüm 3'te verilen gama ışını spektrometresi kullanılarak ölçüldü. Radyonüklitlerin Bq/kg cinsinden aktivite derişimi (A), aşağıda verilen formül ile belirlendi:

$$A = \frac{NS}{\varepsilon \cdot P \cdot M \cdot t} \quad (4.1)$$

Burada,

NS : İlgilenilen gama ışını foto-pikine ait net alan (sayım),

ε : Tam enerjili foto-pik verimi,

P : İlgilenilen gama ışınının yayınlanma ihtimali,

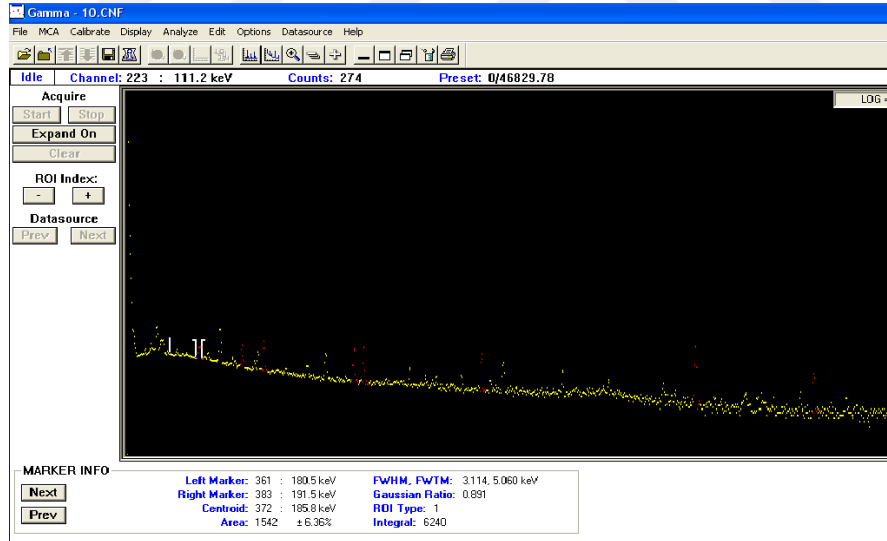
M : Kg cinsinden örneğin kütlesi ve

t : Saniye cinsinden sayım süresidir.

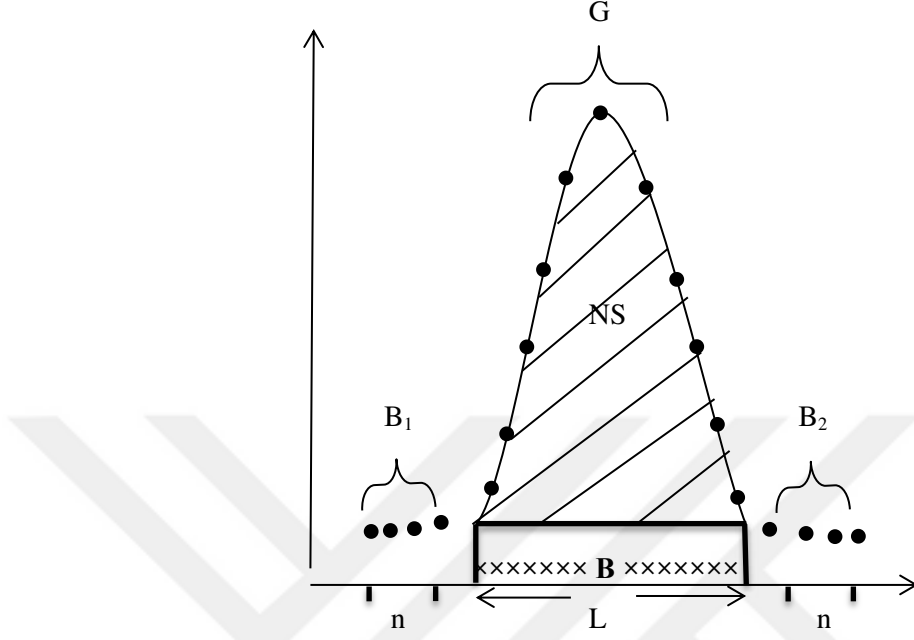
^{226}Ra 'nın aktivite derişimi, ^{226}Ra - ^{222}Rn arasında dengenin kalıcı dengenin var olduğu kabulü ile ^{214}Pb 'e ait 295,2 ve 351,9 keV ve ^{214}Bi 'e ait 609,3 keV ve 1764,5 keV enerjili gama ışını foto-piklerinin ağırlıklı ortalaması alınarak

belirlendi. ^{232}Th 'nin aktivite derişimi, ilgilenilen ^{228}Ac 'e ait 338,4 keV ve 911,2 keV ve ^{208}Tl 'e ait 583,2 keV enerjili gama ışını foto-piklerinin ağırlıklı ortalaması alınarak belirlendi. ^{40}K 'ın aktivite derişimi, ilgilenilen 1460,8 keV enerjili kendi gama ışını foto-piki ile belirlendi (Demir, 2015; Atıcı, 2016). Radyonüklitlerin aktivite derişimlerinin belirlenmesinde kullanılan her bir gama ışını foto-pikinin net sayım alanı için aşağıda verilen süreç takip edildi:

1. Örnek kabı dedektör üzerine yerleştirildi,
2. İlgilenilen foto-piklerin pik belirsizlikler %3'ün altında kalacak şekilde ölçme işlemi (sayım) yapıldı,
3. Şekil 4.1' de görüldüğü gibi elde edilen gama ışını spektrumunda, Şekil 4.2' de ilgilenilen foto-piklerin alanları ve belirsizlikleri, Genie-2000 yazılımı kullanılarak belirlendi.

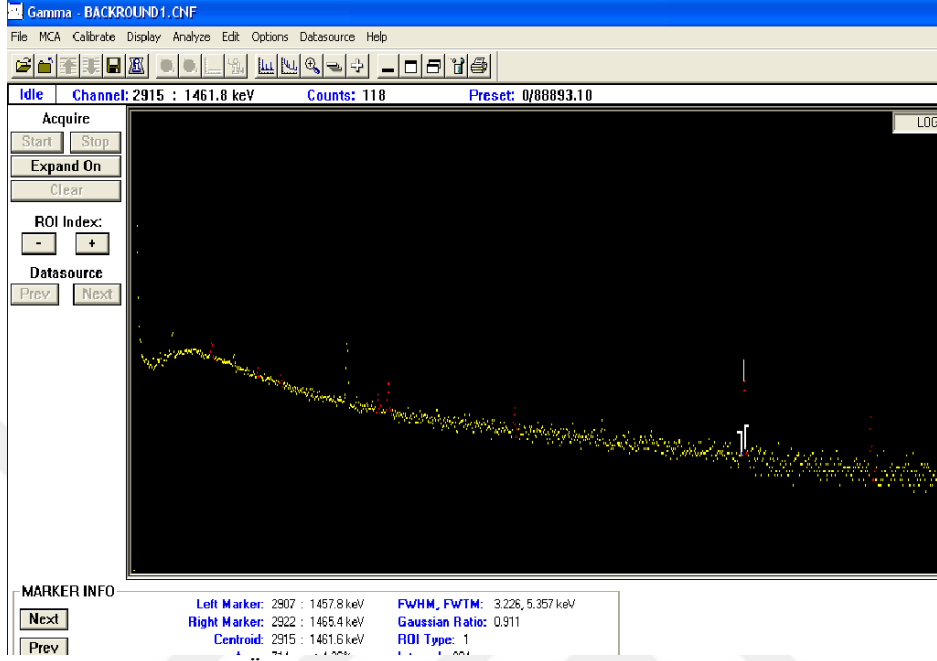


Şekil 4.1. Gama Işını Spektrumu



Şekil 4.2. Fotopik Alanı

4. Bu foto-pik alanından, Şekil 4.3' te görülen belli aralıklarla yapılan laboratuvar ortamı (background) ölçümlerine ait gama ışını spektrumundaki ilgilenilen gama ışını foto-piklerinin alanları çıkarıldı.



Şekil 4.3 Background Ölçümlerine Ait Gama Işını Spektrumu

Her bir zeolit ve mika örneğinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimine ilişkin ölçme belirsizlikleri aşağıdaki formül ile hesaplandı:

$$\Delta A = A \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta NS}{NS}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}\right)^2 + \left(\frac{\Delta M}{M}\right)^2} \quad (4.2)$$

Burada,

A ve ΔA : Aktivite derişimi ve derişim belirsizliği,

NS ve ΔNS : Net sayım ve net sayım belirsizliği,

P ve ΔP : Gama ışını yayınlanma ihtimali ve belirsizliği,

ϵ ve $\Delta \epsilon$: Dedektör verimi ve verim belirsizliği ve

M ve ΔM : Örnek kütlesi ve belirsizliğidir.

Mika ve zeolit örnekleri için ölçülebilir en düşük aktivite (ÖEA) değerleri aşağıdaki formül ile hesaplandı (Currie, 1968):

$$\text{ÖEA (Bq/kg)} = \frac{KF \cdot \sigma_{NB}}{\varepsilon \cdot P \cdot t \cdot M} \quad (4.3)$$

Burada,

KF: % 95 güvenilirlik seviyesindeki kapsam faktörü (1,64) ve

σ_{NB} : İlgilenilen foto-piklerin laboratuvar ortamı (background) standart sapmasıdır. Ortalama ÖEA değerleri, zeolit örneklerinin ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitleri için sırasıyla, 0,3 Bq/kg, 0,3 Bq/kg ve 3,3 Bq/kg, mika örneklerinin sırasıyla, 0,4 Bq/kg, 0,4 Bq/kg ve 5 Bq/kg olarak hesaplandı.

Zeolit ve mika örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişim değerlerine ait tanımlayıcı istatistiki bilgiler, Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de verildi. Zeolit ve mika örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimine ilişkin Pearson korelasyon katsayı matrisi, sırasıyla Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'de verildi. ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişim değerlerinin histogram eğrisi, zeolit örnekleri için Şekil 4.4 ve mika örnekleri için Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Çizelge 4.1'den görülebileceği gibi zeolit örneklerinde ölçülen ^{226}Ra 'nın aktivite derişimi, ortalama değeri 70,9 Bq/kg olmak üzere <ÖEA ila 136,3 Bq/kg aralığında, ^{232}Th 'nin aktivite derişimi, ortalama değeri 122,5 Bq/kg olmak üzere <ÖEA ila 179,8 Bq/kg aralığında ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, ortalama değeri 1025,5 Bq/kg olmak üzere 472,4 Bq/kg ila 1675,2 Bq/kg aralığında değişmektedir. Çarpıklık değerlerinin sıfırdan küçük ve basıklık değerlerinin de sıfırdan biraz büyük olması, dağılımların normale yakın olduğunu göstermektedir. Çizelge 4.3'den zeolit örneklerinde ölçülen ^{226}Ra ile ^{232}Th arasında (Pearson katsayısı:0,7) ve ^{226}Ra ile ^{40}K arasında (Pearson katsayısı:0,4) kuvvetli bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Şekil

4.4' den ^{226}Ra 'nın aktivite derişiminin, zeolit örneklerinin %11'inde, 0 Bq/kg - 50 Bq/kg, %72'sinde 51 Bq/kg - 100 Bq/kg ve %17'sinde ise 101 Bq/kg - 140 Bq/kg aralığında olduğu görölmektedir. ^{232}Th 'nin aktivite derişiminin, zeolit örneklerinin %32'inde, 0 Bq/kg - 120 Bq/kg, %52'sinde 121 Bq/kg - 140 Bq/kg ve %17'sinde ise 141 Bq/kg - 180 Bq/kg aralığında olduğu görölmektedir. ^{40}K 'ın aktivite derişiminin, zeolit örneklerinin %26'sında, 0 Bq/kg - 1000 Bq/kg, %64'ünde 1001 Bq/kg - 1250 Bq/kg ve %10'unda ise 1251 Bq/kg - 1700 Bq/kg aralığında olduğu görölmektedir. Çizelge 4.2'den de görülebileceğı gibi mika örneklerinde ölçülen ^{226}Ra 'nın aktivite derişimi, ortalama değeri 8,2 Bq/kg olmak üzere <ÖEA ila 27,0 Bq/kg aralığında, ^{232}Th 'nin aktivite derişimi, ortalama değeri 37,6 Bq/kg olmak üzere <ÖEA ila 71,0 Bq/kg aralığında ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, ortalama değeri 2706,8 Bq/kg olmak üzere 2208,4 Bq/kg ila 3424,7 Bq/kg aralığında değışmektedir. Çarpıklık değerlerinin sıfırdan küçük ve basıklık değerlerinin de sıfırdan biraz büyük olması, dağılımların normale yakın olduğunu göstermektedir. Çizelge 4.4'den mika örneklerinde ölçülen ^{226}Ra ile ^{232}Th arasında (Pearson katsayısı:0,6) ve ^{226}Ra ile ^{40}K arasında (Pearson katsayısı:0,5) kuvvetli bir ilişkinin olduğu görölmektedir. Şekil 4.5'den ^{226}Ra 'nın aktivite derişiminin, mika örneklerinin %46'sında, 0 Bq/kg - 5 Bq/kg, %33'ünde 6 Bq/kg - 15 Bq/kg ve %21'sinde ise 16 Bq/kg - 30 Bq/kg aralığında olduğu görölmektedir. ^{232}Th 'nin aktivite derişiminin, mika örneklerinin %44'ünde, 0 Bq/kg - 35 Bq/kg, %39'unda 36 Bq/kg - 55 Bq/kg ve %17'sinde ise 56 Bq/kg - 75 Bq/kg aralığında olduğu görölmektedir. ^{40}K 'ın aktivite derişiminin, mika örneklerinin %33'ünde, 0 Bq/kg - 2600 Bq/kg, %37'sinde 2601 Bq/kg - 2750 Bq/kg ve %30'unda ise 2751 Bq/kg - 3450 Bq/kg aralığında olduğu görölmektedir.

Çizelge 4.1. Zeolit Örneklerinde Ölçülen Radyonüklit Aktivite Derişimleri için Tanımlayıcı İstatistiki Bilgiler

	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Ortalama	70,9	122,5	1025,5
Standart Hata	2,8	3,0	24,9
Ortanca	64,1	130,1	1057,9
Standart Sapma	26,6	28,2	233,5
Basıklık	0,8	3,7	0,6
Çarpıklık	-0,3	-1,5	-0,6
En küçük	< ÖEA	< ÖEA	472,4
En büyük	136,3	179,8	1675,2
Örnek sayısı	88	88	88

Çizelge 4.2. Mika Örneklerinde Ölçülen Radyonüklit Aktivite Derişimleri için Tanımlayıcı İstatistiki Bilgiler

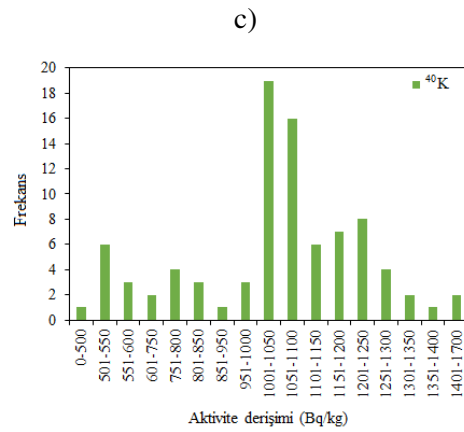
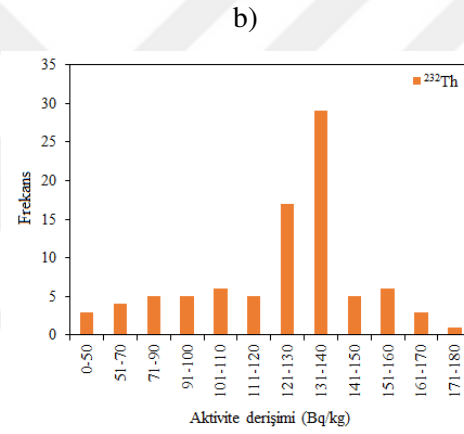
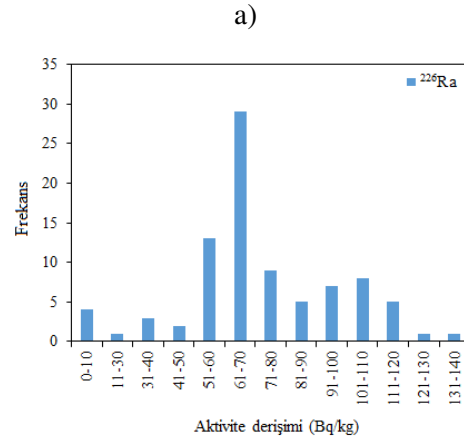
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Ortalama	8,2	37,6	2706,8
Standart Hata	0,9	1,8	24,7
Ortanca	5,7	37,5	2664,8
Standart Sapma	7,9	16,4	226,5
Basıklık	-0,4	-0,1	1,3
Çarpıklık	0,8	-0,3	1,0
En küçük	< ÖEA	< ÖEA	2208,4
En büyük	27,0	71,0	3424,7
Örnek sayısı	84	84	84

Çizelge 4.3. Zeolit için Pearson Korelasyon Katsayı Matrisi

	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
²²⁶ Ra	1		
²³² Th	0,7	1	
⁴⁰ K	0,4	0,4	1

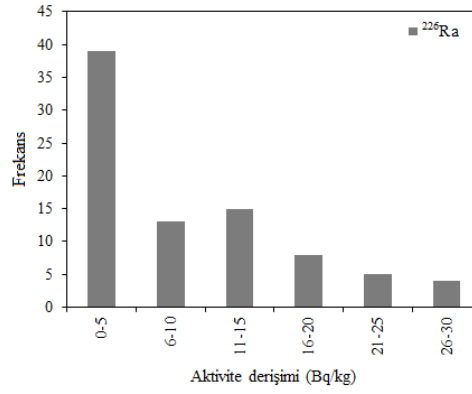
Çizelge 4.4. Mika için Pearson Korelasyon Katsayı Matrisi

	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
²²⁶ Ra	1		
²³² Th	0,6	1	
⁴⁰ K	0,5	0,2	1

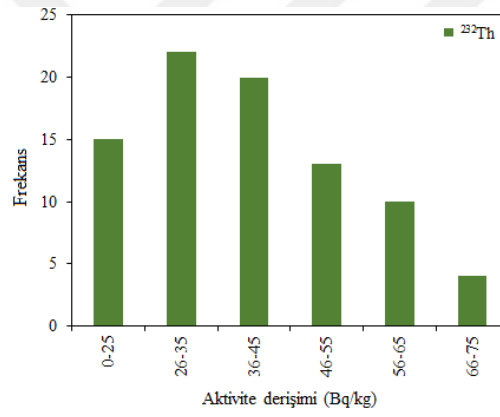


Şekil 4.4. Zeolit Örneklerindeki a) ^{226}Ra , b) ^{232}Th ve c) ^{40}K 'ın Histogram Eğrisi

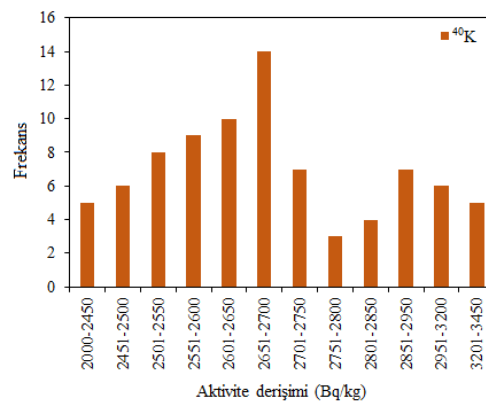
a)



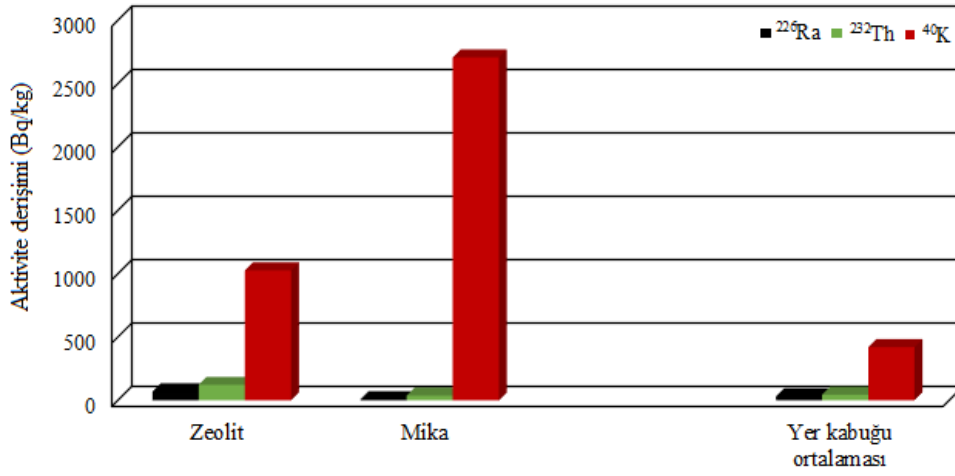
b)



c)

Şekil 4.5. Mika Örneklerindeki a) ^{226}Ra , b) ^{232}Th ve c) ^{40}K 'ın Histogram Eğrisi

UNSCEAR raporunda, yer kabuğunda ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimleri, sırasıyla 32 Bq/kg, 45 Bq/kg ve 420 Bq/kg olarak verilmiştir (UNSCEAR, 2008). Zeolit ve mika örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimlerinin birbirleriyle ve yer kabuğu ortalaması ile karşılaştırılması Şekil 4.6' da verilmiştir.



Şekil 4.6. Zeolit ve Mika Örneklerinde Ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın Ortalama Aktivite Derişimlerinin Yer kabuğu Ortalaması ile Karşılaştırılması

4.1.1. Zeolit Ocaklarının Radyonüklit Dağılımı

Zeolit örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimleri, ölçme belirsizlikleri ile Z1 kodlu ocak için Çizelge 4.5, Z2 kodlu ocak için Çizelge 4.6, Z3 kodlu ocak için Çizelge 4.7 ve Z4 kodlu ocak için Çizelge 4.8'de verildi. Her bir ocağın ortalama ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişim değerlerinin hem birbirleri hem de yer kabuğu ortalaması ile karşılaştırılması ise Şekil 4.7' de gösterildi. Çizelge 4.5'ten görülebileceği gibi Z1 kodlu zeolit ocağında ölçülen ^{226}Ra 'nın aktivite derişimi, ortalama değeri 97,0 Bq/kg olmak üzere 62,9 Bq/kg - 136,3Bq/kg aralığında, ^{232}Th 'nin aktivite derişimi, ortalama değeri 129,2 Bq/kg olmak üzere 96,1 Bq/kg - 165,7 Bq/kg aralığında ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, ortalama değeri 819,0 Bq/kg olmak üzere 710,0 Bq/kg - 1202,2 Bq/kg aralığında değişmektedir.

Çizelge 4.6'dan görülebileceği gibi Z2 kodlu zeolit ocağında ölçülen ^{226}Ra 'nın aktivite derişimi, ortalama değeri 54,3 Bq/kg olmak üzere $< \text{ÖEA}-75,0$ Bq/kg aralığında, ^{232}Th 'nin aktivite derişimi, ortalama değeri 96,4 Bq/kg olmak üzere 62,3 Bq/kg - 117,2 Bq/kg aralığında ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, ortalama değeri 541,0 Bq/kg olmak üzere 472,4 Bq/kg - 584,3 Bq/kg aralığında değişmektedir. Çizelge 4.7'den görülebileceği gibi Z3 kodlu zeolit ocağında ölçülen ^{226}Ra 'nın aktivite derişimi, ortalama değeri 87,6 Bq/kg olmak üzere 32,6 Bq/kg - 113,7 Bq/kg aralığında, ^{232}Th 'nin aktivite derişimi, ortalama değeri 127,6 Bq/kg olmak üzere 43,2 Bq/kg - 179,8 Bq/kg aralığında ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, ortalama değeri 1225,4 Bq/kg olmak üzere 992,0 Bq/kg - 1675,2 Bq/kg aralığında değişmektedir. Çizelge 4.8'den görülebileceği gibi Z4 kodlu zeolit ocağında ölçülen ^{226}Ra 'nın aktivite derişimi, ortalama değeri 59,0 Bq/kg olmak üzere $< \text{ÖEA} - 66,0$ Bq/kg aralığında, ^{232}Th 'nin aktivite derişimi, ortalama değeri 126,8 Bq/kg olmak üzere $< \text{ÖEA} - 137,0$ Bq/kg aralığında ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, ortalama değeri 1044,7 Bq/kg olmak üzere 934,2 Bq/kg - 1114,3 Bq/kg aralığında değişmektedir. ^{226}Ra aktivite derişiminin en yüksek değeri Z1 ocağında ölçülürken Z2 ocağında bir ve Z4 ocağında iki zeolit örneğinin aktivite derişimi ÖEA değeri olan 0,3 Bq/kg'ın altında ölçüldü. ^{232}Th aktivite derişiminin en yüksek değeri Z3 ocağında ölçülürken Z4 ocağında bir zeolit örneğinin aktivite derişimi ÖEA değeri olan 0,3 Bq/kg'ın altında ölçüldü. ^{40}K aktivite derişiminin en yüksek değeri Z3 ocağında ölçülürken en düşük değeri Z2 ocağında ölçüldü. Ölçme sonuçları Z1 kodlu ocakta ölçülen ^{226}Ra ve ^{232}Th 'nin ortalama aktivite derişiminin ve Z3 kodlu ocakta ölçülen ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişiminin, diğer üç ocağın ortalama aktivite derişiminden daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Çizelge 4.5. Z1 Kodlu Zeolit Ocağının Radyonüklit Dağılımı

Örnek kodu	Aktivite Derişimi (Bq/kg)					
	²²⁶ Ra		²³² Th		⁴⁰ K	
Z1-1	121,0	± 3,8	150,6	± 9,1	824,3	± 52,8
Z1-2	110,9	± 3,6	141,9	± 8,7	736,0	± 50,9
Z1-3	117,6	± 4,0	148,9	± 9,1	780,5	± 51,7
Z1-4	112,4	± 4,0	137,3	± 8,8	710,0	± 51,0
Z1-5	62,9	± 3,5	106,9	± 8,1	813,5	± 57,0
Z1-6	80,3	± 4,4	105,9	± 8,4	765,6	± 55,8
Z1-7	67,2	± 4,5	96,1	± 9,4	766,6	± 63,4
Z1-8	86,5	± 3,1	120,5	± 7,6	815,4	± 52,4
Z1-9	74,7	± 4,1	117,7	± 9,0	776,1	± 56,4
Z1-10	136,3	± 5,0	165,7	± 11,1	1202,2	± 79,7
Ortalama	97,0		129,2		819,0	
En küçük	62,9		96,1		710,0	
En büyük	136,3		165,7		1202,2	

Çizelge 4.6. Z2 Kodlu Zeolit Ocağının Radyonüklit Dağılımı

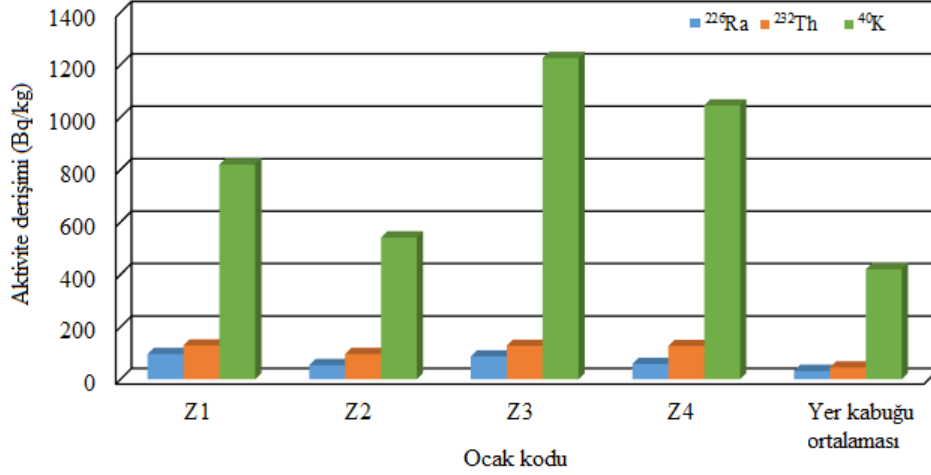
Örnek kodu	Aktivite Derişimi (Bq/kg)					
	²²⁶ Ra		²³² Th		⁴⁰ K	
Z2-1	62,5	± 2,8	107,5	± 7,1	547,7	± 41,2
Z2-2	39,9	± 4,1	92,3	± 9,6	548,1	± 59,0
Z2-3	52,4	± 3,2	93,0	± 7,3	526,3	± 46,5
Z2-4	69,1	± 4,7	94,1	± 8,8	545,6	± 50,5
Z2-5	66,2	± 4,7	93,5	± 8,4	584,3	± 52,3
Z2-6	39,1	± 3,7	86,2	± 8,3	528,2	± 57,8
Z2-7	20,4	± 2,7	106,2	± 9,9	553,9	± 54,2
Z2-8	< ÖEA		62,3	± 12,9	472,4	± 57,4
Z2-9	75,0	± 4,2	111,7	± 8,9	537,7	± 49,3
Z2-10	64,0	± 2,8	117,2	± 7,6	566,0	± 43,4
Ortalama	54,3		96,4		541,0	
En küçük	< ÖEA		62,3		472,4	
En büyük	75,0		117,2		584,3	

Çizelge 4.7. Z3 Kodlu Zeolit Ocağının Radyonüklit Dağılımı

Örnek kodu	Aktivite Derişimi (Bq/kg)		
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Z3-1	79,9 ± 3,1	138,0 ± 8,5	1170,9 ± 67,1
Z3-2	82,0 ± 4,7	105,5 ± 8,3	1154,1 ± 68,7
Z3-3	72,1 ± 4,9	105,1 ± 9,3	1090,7 ± 71,7
Z3-4	78,7 ± 2,7	131,1 ± 7,8	1119,4 ± 58,8
Z3-5	51,8 ± 4,3	82,7 ± 9,3	1066,0 ± 73,4
Z3-6	73,6 ± 3,5	139,2 ± 8,8	1149,7 ± 66,6
Z3-7	79,9 ± 2,9	140,4 ± 8,4	1147,4 ± 60,2
Z3-8	106,4 ± 4,4	179,8 ± 11,4	1523,1 ± 88,6
Z3-9	68,8 ± 5,1	75,3 ± 9,1	1171,9 ± 78,0
Z3-10	104,3 ± 3,4	138,8 ± 8,5	1339,3 ± 69,3
Z3-11	100,9 ± 3,5	134,0 ± 8,4	1363,8 ± 73,8
Z3-12	98,2 ± 3,3	124,1 ± 7,7	1206,6 ± 64,9
Z3-13	76,8 ± 4,2	88,7 ± 8,0	1197,4 ± 72,6
Z3-14	94,0 ± 4,9	118,2 ± 9,7	1195,6 ± 77,2
Z3-15	94,0 ± 3,1	130,0 ± 7,8	1211,8 ± 63,3
Z3-16	99,3 ± 3,6	140,6 ± 8,8	1275,0 ± 69,7
Z3-17	98,8 ± 3,2	131,0 ± 7,9	1247,1 ± 64,8
Z3-18	104,0 ± 3,6	137,4 ± 8,6	1286,2 ± 71,3
Z3-19	85,6 ± 3,1	128,7 ± 8,1	1220,8 ± 68,0
Z3-20	40,9 ± 6,1	68,1 ± 12,6	1312,5 ± 110,9
Z3-21	101,6 ± 3,9	163,0 ± 10,3	1236,1 ± 74,6
Z3-22	103,9 ± 4,4	152,0 ± 10,4	1239,8 ± 82,9
Z3-23	98,2 ± 6,2	140,7 ± 11,3	1114,6 ± 83,6
Z3-24	72,1 ± 6,5	125,8 ± 12,3	1148,4 ± 97,0
Z3-25	113,7 ± 5,2	163,1 ± 11,8	1283,2 ± 84,3
Z3-26	112,8 ± 4,9	153,6 ± 10,7	1188,5 ± 79,1
Z3-27	32,6 ± 7,0	43,2 ± 9,1	992,0 ± 96,4
Z3-28	107,1 ± 4,4	159,3 ± 10,5	1197,9 ± 77,0
Z3-29	96,8 ± 6,9	110,7 ± 10,6	1202,5 ± 90,9
Z3-30	100,4 ± 3,6	154,8 ± 9,6	1259,8 ± 70,5
Z3-31	85,1 ± 13,3	153,6 ± 28,1	1675,2 ± 204,0
Ortalama	87,6	127,6	1225,4
En küçük	32,6	43,2	992,0
En büyük	113,7	179,8	1675,2

Çizelge 4.8. Z4 Kodlu Zeolit Ocağının Radyonüklit Dağılımı

Örnek kodu	Aktivite Derişimi (Bq/kg)		
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Z4-1	6,6 ± 2,7	64,1 ± 8,8	934,2 ± 74,7
Z4-2	< ÖEA	69,2 ± 7,7	997,4 ± 66,4
Z4-3	< ÖEA	< ÖEA	965,4 ± 87,7
Z4-4	42,9 ± 4,5	83,8 ± 8,1	1019,0 ± 72,8
Z4-5	66,0 ± 2,6	135,3 ± 8,2	1034,6 ± 60,5
Z4-6	64,2 ± 2,6	137,0 ± 8,3	1114,3 ± 61,2
Z4-7	59,0 ± 2,2	133,7 ± 7,7	1064,1 ± 53,4
Z4-8	57,4 ± 2,1	127,6 ± 7,4	1032,9 ± 52,3
Z4-9	58,4 ± 2,3	128,5 ± 7,6	1053,5 ± 56,1
Z4-10	61,6 ± 2,4	136,8 ± 8,0	1064,5 ± 56,7
Z4-11	61,6 ± 2,3	125,5 ± 7,3	1033,5 ± 53,4
Z4-12	59,6 ± 2,4	132,2 ± 7,9	1077,0 ± 58,3
Z4-13	60,6 ± 2,3	134,0 ± 7,8	1040,4 ± 53,8
Z4-14	60,4 ± 2,4	129,3 ± 7,7	1091,9 ± 57,6
Z4-15	59,4 ± 2,4	131,8 ± 7,8	1074,1 ± 57,5
Z4-16	60,0 ± 2,2	133,6 ± 7,6	1059,9 ± 53,7
Z4-17	60,4 ± 2,4	127,5 ± 7,7	1061,2 ± 57,7
Z4-18	57,8 ± 2,1	126,0 ± 7,2	1016,4 ± 51,8
Z4-19	63,5 ± 2,3	135,0 ± 7,8	1076,3 ± 55,4
Z4-20	60,5 ± 2,3	130,6 ± 7,7	1077,8 ± 56,6
Z4-21	62,5 ± 2,3	134,1 ± 7,7	1046,4 ± 53,8
Z4-22	64,1 ± 2,4	136,8 ± 7,9	1058,9 ± 55,6
Z4-23	63,2 ± 2,3	131,2 ± 7,6	1049,7 ± 53,7
Z4-24	60,5 ± 2,4	128,6 ± 7,8	1068,3 ± 58,1
Z4-25	59,0 ± 2,6	135,8 ± 8,5	1041,0 ± 62,8
Z4-26	59,8 ± 2,4	132,2 ± 7,8	1027,5 ± 55,6
Z4-27	65,2 ± 2,4	135,1 ± 7,9	1022,9 ± 55,1
Z4-28	61,4 ± 2,4	134,3 ± 8,0	1041,4 ± 56,9
Z4-29	60,5 ± 2,4	128,0 ± 7,7	1045,4 ± 57,1
Z4-30	63,1 ± 2,4	128,2 ± 7,7	1025,7 ± 56,6
Z4-31	60,0 ± 2,4	128,6 ± 7,7	1038,3 ± 57,0
Z4-32	61,5 ± 2,2	135,6 ± 7,8	1038,9 ± 52,9
Z4-33	62,1 ± 2,3	130,3 ± 7,6	1041,6 ± 54,1
Z4-34	59,4 ± 2,7	133,9 ± 8,3	1088,2 ± 66,0
Z4-35	60,9 ± 2,1	129,8 ± 7,3	1045,7 ± 49,3
Z4-36	63,6 ± 2,5	133,4 ± 8,1	1056,9 ± 57,2
Z4-37	57,9 ± 2,2	127,9 ± 7,4	1027,9 ± 51,3
Ortalama	59,0	126,8	1044,7
En küçük	< ÖEA	< ÖEA	934,2
En büyük	66,0	137,0	1114,3



Şekil 4.7. Zeolit Ocaklarında Ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'in Ortalama Aktivite Derişimlerinin Yerkabuğu Ortalaması ile Karşılaştırılması

4.1.2. Mika Ocaklarının Radyonüklit Dağılımı

Mika örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'in aktivite derişimleri, ölçme belirsizlikleri ile M1 kodlu ocak için Çizelge 4.9, M2 kodlu ocak için Çizelge 4.10 ve M3 kodlu ocak için Çizelge 4.11'de verildi. Her bir ocağın ortalama ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişim değerlerinin hem birbirleri hem de yer kabuğu ortalaması ile karşılaştırılması ise Şekil 4.8' de gösterildi. Çizelge 4.9'dan görülebileceği gibi M1 kodlu mika ocağında ölçülen ^{226}Ra 'nın aktivite derişimi, ortalama değeri 17,2 Bq/kg olmak üzere 5,5 Bq/kg - 27,0 Bq/kg aralığında, ^{232}Th 'nin aktivite derişimi, ortalama değeri 42,6 Bq/kg olmak üzere 24,1 Bq/kg - 71,0 Bq/kg aralığında ve ^{40}K 'in aktivite derişimi, ortalama değeri 2979,9 Bq/kg olmak üzere 2644,7 Bq/kg - 3424,7 Bq/kg aralığında değişmektedir. Çizelge 4.10'dan görülebileceği gibi M2 kodlu mika ocağında ölçülen ^{226}Ra 'nın aktivite derişimi, ortalama değeri 14,6 Bq/kg olmak üzere < ÖEA - 18,3 Bq/kg aralığında, ^{232}Th 'nin aktivite derişimi, ortalama değeri 51,5 Bq/kg olmak üzere 28,3 Bq/kg - 69,4 Bq/kg aralığında ve ^{40}K 'in aktivite derişimi, ortalama değeri 2626,1 Bq/kg olmak üzere 2446,5 Bq/kg - 3132,6 Bq/kg aralığında değişmektedir. Çizelge 4.11'den görülebileceği gibi M3

kodlu mika ocağında ölçülen ^{226}Ra 'nın aktivite derişimi, ortalama değeri 7,2 Bq/kg olmak üzere < ÖEA -13,5 Bq/kg aralığında, ^{232}Th 'nin aktivite derişimi, ortalama değeri 36,2 Bq/kg olmak üzere < ÖEA - 61,8 Bq/kg aralığında ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, ortalama değeri 2607,6 Bq/kg olmak üzere 2208,4 Bq/kg - 2865,8 Bq/kg aralığında değişmektedir. ^{226}Ra aktivite derişiminin en yüksek değeri M1 ocağında ölçülürken M2 ocağında 2 ve M3 ocağında 24 mika örneğinin aktivite derişimi ÖEA değeri olan 0,3 Bq/kg'ın altında ölçüldü. ^{232}Th aktivite derişiminin en yüksek değeri M1 ocağında ölçülürken M3 ocağında 4 mika örneğinin aktivite derişimi ÖEA değeri olan 0,3 Bq/kg'ın altında ölçüldü. ^{40}K aktivite derişiminin en yüksek değeri M1 ocağında ölçülürken en düşük değeri M3 ocağında ölçüldü. Ölçme sonuçları M1 kodlu ocakta ölçülen ^{226}Ra ve ^{40}K 'nın ortalama aktivite derişiminin ve M2 kodlu ocakta ölçülen ^{232}Th 'nin ortalama aktivite derişiminin, diğer üç ocağın ortalama aktivite derişiminden daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Çizelge 4.9. M1 Kodlu Mika Ocağının Radyonüklit Dağılımı

Örnek kodu	Aktivite Derişimi (Bq/kg)					
	²²⁶ Ra		²³² Th		⁴⁰ K	
M1-1	20,8	± 2,1	41,7	± 5,3	2886,3	± 135,3
M1-2	14,0	± 1,6	35,1	± 4,7	3005,0	± 135,0
M1-3	10,2	± 3,0	40,3	± 10,0	3217,8	± 158,1
M1-4	5,5	± 1,8	68,1	± 13,6	3174,5	± 169,2
M1-5	14,2	± 2,2	29,3	± 4,6	3214,6	± 149,9
M1-6	19,1	± 1,9	44,0	± 5,3	3202,2	± 150,9
M1-7	15,3	± 2,2	37,4	± 5,3	3147,5	± 149,1
M1-8	19,2	± 1,8	49,5	± 5,4	3424,7	± 147,5
M1-9	9,0	± 2,3	45,6	± 9,3	3318,2	± 168,2
M1-10	24,6	± 2,3	47,4	± 5,5	2858,1	± 131,2
M1-11	23,4	± 2,6	49,9	± 6,4	2825,3	± 141,0
M1-12	25,5	± 2,1	51,8	± 5,0	2821,2	± 129,5
M1-13	24,5	± 2,7	71,0	± 7,1	2871,3	± 134,6
M1-14	26,6	± 2,1	51,9	± 5,3	2874,3	± 132,6
M1-15	27,0	± 2,2	55,9	± 5,3	2873,9	± 131,2
M1-16	20,0	± 3,7	26,1	± 8,6	3025,3	± 154,1
M1-17	25,4	± 2,3	53,8	± 5,7	2910,8	± 133,6
M1-18	9,9	± 1,1	26,0	± 2,9	2644,7	± 106,8
M1-19	10,5	± 1,1	27,9	± 3,1	2744,3	± 110,2
M1-20	12,0	± 1,4	28,9	± 3,4	2679,9	± 114,8
M1-21	11,9	± 1,4	31,2	± 3,6	3023,3	± 126,1
M1-22	9,9	± 1,3	24,1	± 3,4	2813,8	± 117,9
Ortalama	17,2		42,6		2979,9	
En küçük	5,5		24,1		2644,7	
En büyük	27,0		71,0		3424,7	

Çizelge 4.10. M2 Kodlu Mika Ocağının Radyonüklit Dağılımı

Örnek kodu	Aktivite Derişimi (Bq/kg)					
	²²⁶ Ra		²³² Th		⁴⁰ K	
M2-1	16,9	± 1,3	65,8	± 4,6	2625,4	± 102,7
M2-2	15,5	± 1,2	59,3	± 4,2	2636,5	± 103,7
M2-3	5,9	± 1,6	41,7	± 5,9	2495,6	± 107,5
M2-4	< ÖEA	± ---	29,7	± 5,9	2477,1	± 110,1
M2-5	< ÖEA	± ---	28,3	± 4,5	2446,5	± 103,1
M2-6	15,2	± 1,5	58,0	± 4,9	2534,6	± 101,3
M2-7	16,0	± 1,4	60,0	± 4,6	2660,3	± 108,0
M2-8	18,3	± 1,4	69,4	± 4,9	3132,6	± 121,2
Ortalama	14,6		51,5		2626,1	
En küçük	< ÖEA		28,3		2446,5	
En büyük	18,3		69,4		3132,6	

Çizelge 4.11. M3 Kodlu Mika Ocağının Radyonüklit Dağılımı

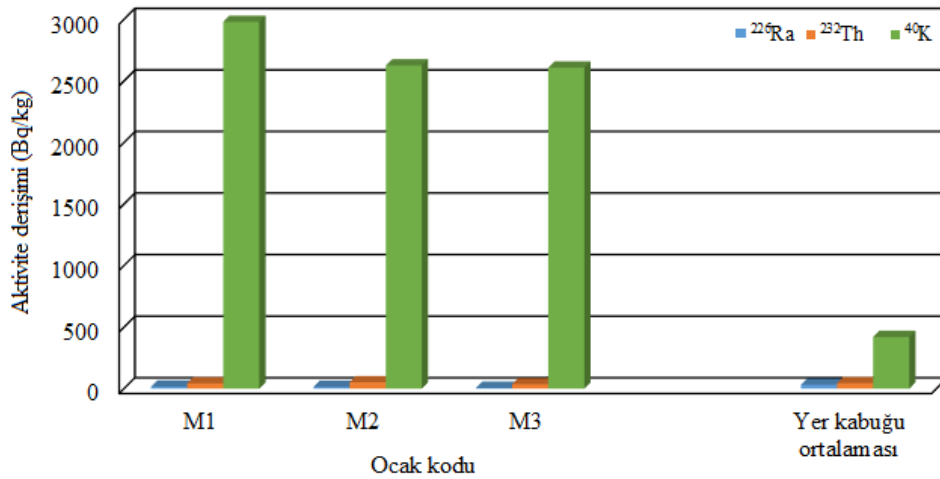
Örnek kodu	Aktivite Derişimi (Bq/kg)					
	²²⁶ Ra		²³² Th		⁴⁰ K	
M3-1	< ÖEA		57,1	± 5,2	2598,3	± 103,8
M3-2	4,3	± 1,1	61,8	± 5,6	2673,9	± 105,7
M3-3	10,5	± 1,1	55,6	± 4,7	2505,4	± 99,0
M3-4	< ÖEA		< ÖEA		2661,1	± 114,0
M3-5	< ÖEA		30,8	± 5,4	2706,6	± 105,8
M3-6	2,0	± 0,9	38,6	± 6,2	2496,1	± 104,6
M3-7	13,2	± 1,1	59,1	± 4,2	2533,6	± 99,6
M3-8	12,0	± 1,1	58,5	± 4,0	2543,4	± 97,9
M3-9	4,4	± 1,5	18,5	± 4,8	2634,0	± 109,8
M3-10	3,4	± 1,2	35,0	± 5,5	2680,7	± 109,4
M3-11	< ÖEA		34,5	± 6,5	2460,8	± 106,5
M3-12	3,7	± 1,0	47,7	± 6,2	2479,1	± 102,8
M3-13	6,1	± 1,4	13,1	± 2,8	2701,0	± 120,1

Çizelge 4.11. Devamı

M3-14	< ÖEA	20,2 ± 4,7	2589,6 ± 106,8
M3-15	2,8 ± 0,7	13,2 ± 3,1	2727,3 ± 116,8
M3-16	< ÖEA	25,9 ± 6,1	2617,3 ± 109,1
M3-17	2,9 ± 0,9	34,4 ± 4,6	2619,1 ± 105,2
M3-18	2,5 ± 1,0	26,1 ± 4,5	2687,3 ± 107,9
M3-19	< ÖEA	24,9 ± 4,5	2805,0 ± 114,5
M3-20	5,4 ± 1,4	34,5 ± 5,1	2716,8 ± 106,3
M3-21	< ÖEA	9,7 ± 4,0	2558,2 ± 107,2
M3-22	< ÖEA	7,7 ± 3,1	2573,3 ± 105,0
M3-23	< ÖEA	29,4 ± 4,2	2631,8 ± 108,0
M3-24	8,5 ± 1,7	38,7 ± 4,9	2686,1 ± 105,6
M3-25	< ÖEA	34,4 ± 6,5	2587,5 ± 115,0
M3-26	< ÖEA	18,8 ± 4,9	2674,9 ± 112,1
M3-27	< ÖEA	22,5 ± 5,8	2766,1 ± 122,3
M3-28	7,7 ± 1,6	31,4 ± 4,0	2760,7 ± 117,0
M3-29	12,6 ± 1,0	54,5 ± 3,7	2601,8 ± 100,7
M3-30	2,7 ± 0,9	40,9 ± 5,3	2583,3 ± 102,6
M3-31	< ÖEA	35,7 ± 6,0	2578,2 ± 116,5
M3-32	3,1 ± 1,0	45,9 ± 4,9	2653,7 ± 105,4
M3-33	12,2 ± 1,1	53,5 ± 4,0	2742,9 ± 106,1
M3-34	9,6 ± 1,0	42,1 ± 3,5	2523,4 ± 97,6
M3-35	< ÖEA	28,7 ± 5,9	2416,4 ± 100,2
M3-36	< ÖEA	35,3 ± 5,7	2750,9 ± 111,7
M3-37	< ÖEA	34,2 ± 6,6	2714,1 ± 114,4
M3-38	< ÖEA	34,9 ± 5,5	2553,9 ± 104,8
M3-39	13,5 ± 1,0	59,3 ± 4,2	2485,0 ± 97,2
M3-40	< ÖEA	34,8 ± 5,3	2445,7 ± 99,3
M3-41	< ÖEA	< ÖEA	2507,5 ± 113,3

Çizelge 4.11. Devamı

M3-42	< ÖEA	< ÖEA	2545,5 ± 113,2
M3-43	5,4 ± 1,7	39,1 ± 6,0	2865,8 ± 115,7
M3-44	13,0 ± 1,0	49,7 ± 3,5	2606,9 ± 99,3
M3-45	< ÖEA	< ÖEA	2560,7 ± 106,2
M3-46	< ÖEA	39,1 ± 4,6	2208,4 ± 88,7
M3-47	4,2 ± 1,0	30,3 ± 5,1	2626,7 ± 103,8
M3-48	3,1 ± 0,9	39,8 ± 4,8	2286,2 ± 93,8
M3-49	12,3 ± 1,0	52,0 ± 3,6	2686,8 ± 99,7
M3-50	9,3 ± 1,1	38,7 ± 3,5	2511,9 ± 109,9
M3-51	9,0 ± 1,2	37,6 ± 3,6	2679,7 ± 105,9
M3-52	< ÖEA	18,5 ± 4,8	2672,6 ± 112,6
M3-53	4,8 ± 1,2	42,0 ± 5,3	2668,5 ± 104,9
M3-54	11,9 ± 0,9	42,0 ± 3,2	2657,7 ± 99,7
Ortalama	7,2	36,2	2607,6
En küçük	< ÖEA	< ÖEA	2208,4
En büyük	13,5	61,8	2865,8

Şekil 4.8. Mika Ocaklarında Ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın Ortalama Aktivite Derişimlerinin Yerkabuğu Ortalaması ile Karşılaştırılması

4.2. Radon Emisyon Katsayısı ve Radon Kütle Salım Hızı

^{226}Ra 'nın alfa bozunumu sonucunda oluşan radon (^{222}Rn), tatsız, kokusuz, renksiz, soy gaz sınıfında yer alan ve yarılanma süresi 3,82 gün olan radyoaktif bir elementtir. Kapalı ortamlardaki radon gazı derişiminin yaklaşık %30'u, yapı malzemelerinden ileri gelmektedir (UNSCEAR, 2000). Dolayısıyla yapı malzemeleri aynı zamanda konut, okul ve iş yeri gibi kapalı ortamlardaki radonun ikincil kaynağını oluşturmaktadır. Uzun zaman aralığında radon ve bozunum ürünlerine maruz kalma, akciğer kanser riskini artırmaktadır. Bu yüzden yapı malzemelerinin saldığı radon derişiminin, her bir yapı malzemesinin veya yapı malzemelerinin üretilmesi aşamasında katkı maddesi olarak kullanılan her bir malzemenin radon emisyon katsayılarının (radon exhalation coefficients) ve radon kütle salım hızlarının (radon mass exhalation rates) bilinmesi önem arz etmektedir. Radon emisyon katsayısı (REK), ^{226}Ra 'nın bozunumu sonucunda oluşan toplam radon miktarının bir kesri olarak tanımlanabilir, boyutsuzdur ve yüzde olarak da ifade edilebilir. REK aktif veya pasif radon ölçme cihazları kullanılarak doğrudan veya gama ışını spektrometrik yöntem ile dolaylı olarak ölçülebilir. REK' in gama ışını spektrometrik yöntem ile iki ölçme işlemine bağılı olarak aşağıda verilen formül kullanılarak belirlendi (TR, 474):

$$\text{REK} = \frac{\text{SH}_{\text{denge}} - \text{SH}_0}{\text{SH}_{\text{denge}}} \quad (4.4)$$

Burada SH_{denge} : ^{222}Rn ve bozunum ürünleri (^{218}Po , ^{214}Po , ^{214}Pb ve ^{214}Bi) arasındaki kalıcı dengenin sağlandığı durumda, 352 keV enerjili gama ışını fotopiki (^{214}Pb radyonüklitinden yayınlanan) ile 609 keV enerjili gama ışını fotopikinin (^{214}Bi radyonüklitinden yayınlanan) sayım hızlarının ağırlıklı ortalaması ve SH_0 : ^{222}Rn ve bozunum ürünleri arasında dengenin olmadığı durumda başlangıç şartlarında söz konusu iki gama ışını foto pikinin sayım hızlarının ağırlıklı ortalamasıdır.

Radon kütle salım hızı (RKSH), aşağıda verilen formül kullanılarak belirlendi (UNSCEAR, 1988):

$$RKSH = \lambda_{Rn} \cdot A_{Ra} \cdot REK \quad (4.5)$$

Burada,

λ_{Rn} : ^{222}Rn 'nin bozunum sabiti ($2,1 \times 10^{-6}$ 1/s),

A_{Ra} : Zeolit ve mika örneklerinde ölçülen ^{226}Ra 'nın aktivite derişimi (Bq/kg) ve

REK: Zeolit ve mika örnekleri için belirlenen radon emisyon katsayısıdır.

4.2.1. Zeolit ve Mika Örnekleri için Ölçülen Radon Emisyon Katsayısı

Zeolit ve mika örneklerinde ölçülen radon emisyon katsayılarına ait tanımlayıcı istatistiki bilgi, Çizelge 4.12'de verildi. Zeolitin radon emisyon katsayısı ortalama değeri %4 olmak üzere %1 ila %9 arasında değişmektedir. Mikanın radon emisyon katsayısı ortalama değeri %10 olmak üzere %4 ila %21 arasında değişmektedir. Zeolit ve mika ocaklarının REK değerleri, Çizelge 4.13'te verildi. Zeolit ocaklarında en büyük REK değeri Z4 kodlu ocak için en düşük REK değeri ise Z1 kodlu ocak için ölçüldü. Mika ocaklarında en büyük REK değeri M3 kodlu ocak için en düşük REK değeri ise M1 kodlu ocak için ölçüldü.

Çizelge 4.12. Zeolit ve Mika için Ölçülen Radon Emisyon Katsayılarına İlişkin Tanımlayıcı İstatistik Bilgi

	Emisyon Katsayısı (%)	
	Zeolit	Mika
Ortalama	4	10
Standart Hata	1	1
Ortanca	3	10
Standart Sapma	2	5
Basıklık	0,1	1,1
Çarpıklık	1	1
En küçük	1	4
En büyük	9	21

Çizelge 4.13. Zeolit ve Mika Ocaklarının Radon Emisyon Katsayıları Dağılımı

Ocak kodu	Emisyon Katsayısı (%)		
	En küçük	En büyük	Ortalama
Z1	1	4	2
Z2	2	9	5
Z3	3	7	4
Z4	4	21	7
M1	5	10	10
M2	5	14	9
M3	8	16	11

4.2.2. Zeolit ve Mika Örnekleri için Ölçülen Radon Kütle Salım Hızı

Zeolit ve mika örneklerinde ölçülen radon kütle salım hızlarına ait tanımlayıcı istatistik bilgi, Çizelge 4.14’de verildi. Aktivite derişimi ÖEA değerinden küçük olan zeolit ve mika örnekleri için ^{226}Ra aktivite derişimi olarak ÖEA değeri olan 0,3 Bq/kg alındı. Zeolit radon kütle salım hızı, ortalama değeri

5,95 $\mu\text{Bq/kg s}$ olmak üzere 0,03 $\mu\text{Bq/kg s}$ ile 11,44 $\mu\text{Bq/kg s}$ arasında değişmektedir. Mikanın radon kütle salım hızı, ortalama değeri 1,78 $\mu\text{Bq/kg s}$ olmak üzere 0,07 $\mu\text{Bq/kg s}$ ile 5,86 $\mu\text{Bq/kg s}$ arasında değişmektedir. Zeolit ve mika ocaklarının RKSH değerleri, Çizelge 4.15'te verildi. Zeolit ocaklarında en büyük RKSH değeri Z1 kodlu ocak için en düşük RKSH değeri ise Z2 kodlu ocak için ölçüldü. Mika ocaklarında en büyük RKSH değeri M1 kodlu ocak için en düşük RKSH değeri ise M3 kodlu ocak için ölçüldü.

Çizelge 4.14. Zeolit ve Mika için Ölçülen Radon Kütle Salım Hızlarına İlişkin Tanımlayıcı İstatistik Bilgi

	Radon Kütle Salım Hızı ($\mu\text{Bq/kg s}$)	
	Zeolit	Mika
Ortalama	5,95	1,78
Standart Hata	0,24	0,19
Ortanca	5,38	1,24
Standart Sapma	2,23	1,73
Basıklık	0,80	-0,43
Çarpıklık	-0,28	0,77
En küçük	0,03	0,07
En büyük	11,44	5,86

Çizelge 4.15. Zeolit ve Mika Ocaklarının Radon Kütle Salım Hızları Dağılımı

Ocak kodu	Radon Kütle Salım Hızı ($\mu\text{Bq/kg s}$)		
	En küçük	En büyük	Ortalama
Z1	5,28	11,44	8,17
Z2	0,03	6,29	4,10
Z3	2,74	9,54	7,35
Z4	0,03	5,54	4,68
M1	1,20	5,86	3,74
M2	0,07	3,98	2,40
M3	0,07	2,93	0,88

4.3. Radyolojik Değerlendirme

Bu kısımda, (1) birçok sektörde kullanılabilen zeolit ve mika örneklerinin, inşaat sektöründe, yapı malzemeleri üretiminde özellikle çimento ve beton yapımında kullanılması ve (2) zeolit ve mika ocaklarında çalışan yetişkin bireylerin maruz kalabilecekleri dış ışınlamadan dolayı alabilecekleri radyasyon dozu değerlendirildi.

4.3.1. Zeolit ve Mikanın Yapı Malzemesi Olarak Kullanılmasının Radyolojik Açıdan Değerlendirilmesi

Zeolit ve mikanın yapı malzemesi olarak kullanılmasının radyolojik açıdan değerlendirilmesi, zeolit ve mika örneklerinde ölçülen radyonüklitlerin aktivite derişimleri esas alınarak dış ışınlama (external exposure) ve iç ışınlama (internal exposure) parametreleri hesaplanarak yapıldı.

Binalarda kullanılan yapı malzemelerinin içerdği birden fazla radyonüklitin, yıllık etkin radyasyon dozuna katkıda bulunmasından dolayı izleme amaçlı pratik bir indis olarak önerilen dış ışınlama parametresi aktivite derişim indisi (ADİ), aşağıda verilen formül ile hesaplandı (EC, 1999; Demir, 2015; Atıcı, 2016):

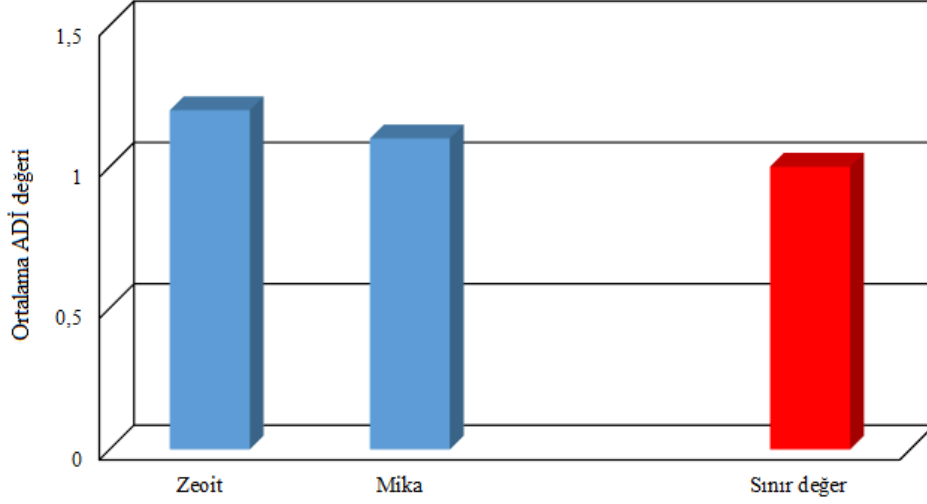
$$ADİ = \frac{A_{Ra}}{300(Bq/kg)} + \frac{A_{Th}}{200(Bq/kg)} + \frac{A_K}{3000(Bq/kg)} \quad (4.6)$$

Burada; A_{Ra} , A_{Th} ve A_K , sırasıyla zeolit ve mika örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın Bq/kg cinsinden aktivite derişimidir. Yapı malzemeleri ve/veya katkı ham maddeleri için hesaplanan ADİ değeri 0,5 olduğunda (0,3 mSv'lik yıllık etkin radyasyon dozuna karşılık gelir), yapı malzemesi, radyoaktiviteye yönelik bütün kontrol ve izlemeden muaf tutulur. ADİ değeri 1 olduğunda (1 mSv'lik yıllık etkin radyasyon dozuna karşılık gelir), yapı malzemesi, herhangi bir kısıtlama olmadan kullanılabilir. ADİ değeri, sınır veya ölçüt olan 1 değerinden daha büyük

olduğunda, yapı malzemelerinin kullanılmasına ve/veya taşınmasına kısıtlama getirilmesi tavsiye edilir (EC, 1999; Demir, 2015; Atıcı, 2016). Zeolit ve mika örnekleri için hesaplanan ADİ değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistiki bilgi, Çizelge 4.16’da verildi. Zeolit ve mika örnekleri için hesaplanan ADİ değerleri sırasıyla, 0,3 ila 1,8 (ortalama: 1,2) ve 0,8 ila 1,5 (ortalama: 1,1) aralığında değişmektedir. Zeolit ve mika örneklerinin ortalama ADİ değerlerinin, birbirleri ve ölçüt veya sınır değeri ile karşılaştırılması, Şekil 4.9’ da gösterildi. Zeolit ve mika ocakları için hesaplanan ADİ değerlerinin, ocaklara göre dağılımı Çizelge 4.17’ de verildi. Zeolit ocaklarında en büyük ADİ değeri, Z3 kodlu ve en küçük ADİ değeri ise Z4 kodlu ocak için hesaplandı. Mika ocaklarında en büyük ADİ değeri, M1 ve M2 kodlu ve en küçük ADİ değeri ise M3 kodlu ocak için hesaplandı.

Çizelge 4.16. Zeolit ve Mika için Hesaplanan ADİ Değerlerine İlişkin Tanımlayıcı İstatistiki Bilgi

	Aktivite Değişim İndisi	
	Zeolit	Mika
Ortalama	1,2	1,1
Standart Hata	0,03	0,02
Ortanca	1,2	1,1
Standart Sapma	0,3	0,1
Basıklık	1,3	-0,3
Çarpıklık	-0,7	0,3
En küçük	0,3	0,8
En büyük	1,8	1,5



Şekil 4.9. Zeolit ve Mika Örneklerinin Ortalama ADİ Değerlerinin Sınır Değer ile Karşılaştırılması

Çizelge 4.17. Zeolit ve Mika Ocaklarının ADİ Değerleri Dağılımı

Ocak kodu	Aktivite Derişim İndisi		
	En küçük	En büyük	Ortalama
Z1	1,0	1,7	1,2
Z2	0,5	1,0	0,8
Z3	0,7	1,8	1,3
Z4	0,3	1,3	1,2
M1	1,0	1,5	1,3
M2	1,0	1,5	1,2
M3	0,8	1,2	1,1

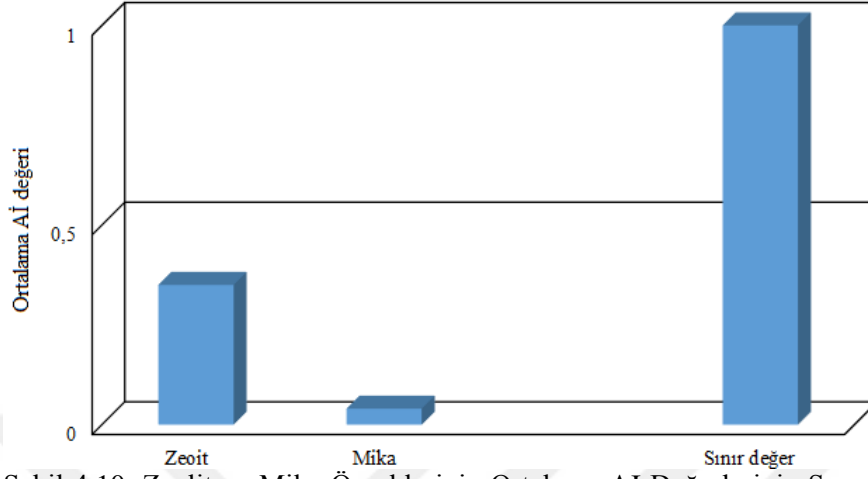
Yapı malzemelerinin içerdği ^{226}Ra 'nın alfa bozunumu ile oluşan ve konut, okul, iş yeri vb. kapalı ortamlarda biriken ^{222}Rn gazının solunmasının sebep olduğu ilave alfa radyasyonunun değerlendirilmesi için türetilen iç ışınlama parametresi alfa indisi (AI), aşağıda verilen formül ile hesaplandı (Demir, 2015; Atıcı, 2016):

$$AI = \frac{A_{Ra}}{200(Bq/kg)} \quad (4.7)$$

Burada, A_{Ra} : Zeolit ve mika örneklerinde ölçülen ^{226}Ra 'nın Bq/kg cinsinden aktivite derişimidir. Yapı malzemeleri ve/veya katkı ham maddeleri için hesaplanan I_α değerinin sınır veya ölçüt olan 1 değerinden büyük olması durumunda, kapalı ortamdaki ^{222}Rn aktivite derişimi, sınır değer olan 200 Bq/m³'ten daha büyüktür (Demir, 2015; Atıcı, 2016). Zeolit ve mika örnekleri için hesaplanan AI değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistiki bilgi, Çizelge 4.18'de verildi. Zeolit ve mika örnekleri için hesaplanan AI değerleri sırasıyla, 0,002 ile 0,681 (ortalama: 0,354) ve 0,002 ile 0,135 (ortalama: 0,041) aralığında değişmektedir. Zeolit ve mika örneklerinin ortalama AI değerlerinin, birbirleri ve ölçüt veya sınır değeri ile karşılaştırılması, Şekil 4.10' de gösterildi. Zeolit ve mika ocakları için hesaplanan AI değerlerinin, ocaklara göre dağılımı Çizelge 4.19'da verildi. Zeolit ocaklarında en büyük AI değeri, Z1 kodlu ve en küçük AI değeri ise Z2 kodlu ocak için hesaplandı. Mika ocaklarında en büyük AI değeri, M1 kodlu ve en küçük AI değeri ise M2 ve M3 kodlu ocak için hesaplandı.

Çizelge 4.18. Zeolit ve Mika için Hesaplanan AI Değerlerine İlişkin Tanımlayıcı İstatistiki Bilgi

	Alfa İndisi	
	Zeolit	Mika
Ortalama	0,354	0,041
Standart Hata	0,014	0,004
Ortanca	0,320	0,029
Standart Sapma	0,133	0,040
Basıklık	0,804	-0,411
Çarpıklık	-0,280	0,776
En küçük	0,002	0,002
En büyük	0,681	0,135



Şekil 4.10. Zeolit ve Mika Örneklerinin Ortalama AI Değerlerinin Sınır Değer ile Karşılaştırılması

Çizelge 4.19. Zeolit ve Mika Ocaklarının AI Değerleri Dağılımı

Ocak kodu	Alfa İndisi		
	En küçük	En büyük	Ortalama
Z1	0,314	0,681	0,485
Z2	0,002	0,375	0,244
Z3	0,163	0,569	0,438
Z4	0,002	0,330	0,279
M1	0,028	0,135	0,086
M2	0,002	0,092	0,055
M3	0,002	0,068	0,021

4.3.2. Ocak Çalışanlarının Maruz Kalabilecekleri Radyasyon Dozunun Değerlendirilmesi

Zeolit ve mika örneklerinin doğal olarak içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerden yayınlanan gama radyasyonuna maruz kalan yetişkin bireylerin (ocak çalışanlarının) aldıkları radyasyon dozu, havada soğurulan gama doz hızı (DH), yıllık etkin radyasyon dozu ve yaşam boyu kanser riski hesaplanarak

değerlendirildi.

Zeolit ve mika ocaklarında havada soğurulan gama-ışını doz hızı (DH) aşağıda verilen formül ile hesaplandı (UNSCEAR, 2008):

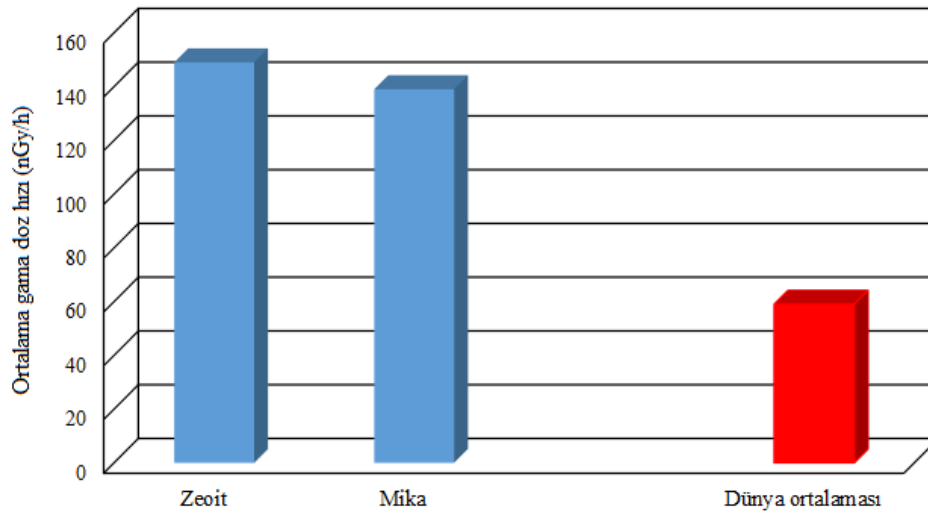
$$DH \text{ (nGy/h)} = 0,462 \times A_{Ra} + 0,604 \times A_{Th} + 0,0417 \times A_K \quad (4.8)$$

Burada A_{Ra} , A_{Th} ve A_K , sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın Bq/kg cinsinden aktivite derişimidir. Zeolit ve mika örnekleri için hesaplanan DH değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistiki bilgi, Çizelge 4.20' de verildi. Zeolit ve mika örnekleri için hesaplanan DH değerleri sırasıyla, 41 nGy/h ila 221 nGy/h (ortalama: 149 nGy/h) ve 105 nGy/h ila 182 nGy/h (ortalama: 139 nGy/h) aralığında değişmektedir. Zeolit ve mika örneklerinin ortalama DH değerlerinin, birbirleri ve dünya ortalaması olan 59 nGy/h ile karşılaştırılması, Şekil 4.11' de gösterildi. Zeolit ve mika ocakları için hesaplanan DH değerlerinin, ocaklara göre dağılımı Çizelge 4.21'de verildi. Zeolit ocaklarında en büyük DH değeri, Z3 kodlu ve en küçük DH değeri ise Z4 kodlu ocak için hesaplandı. Mika ocaklarında en büyük DH değeri, M1 kodlu ve en küçük DH değeri ise M3 kodlu ocak için hesaplandı.

^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerinin, zeolit örnekleri için hesaplanan toplam gama doz hızına olan katkıları, Şekil 4.12' de ve mika örnekleri için hesaplanan toplam gama doz hızına olan katkıları ise Şekil 4.13'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.20. Zeolit ve Mika İçin Hesaplanan DH Değerlerine İlişkin Tanımlayıcı İstatistiki Bilgi

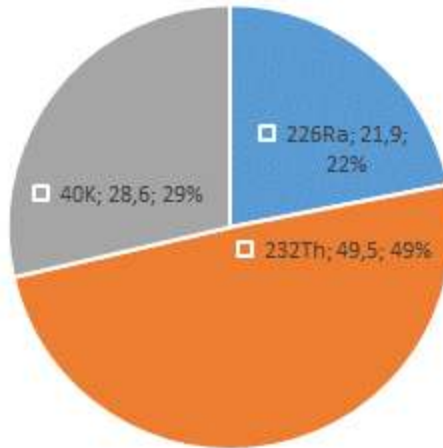
	Gama Doz Hızı (nGy/h)	
	Zeolit	Mika
Ortalama	149	139
Standart Hata	3	2
Ortanca	152	136
Standart Sapma	33	18
Basıklık	1,2	-0,4
Çarpıklık	-0,7	0,3
En küçük	41	105
En büyük	221	182



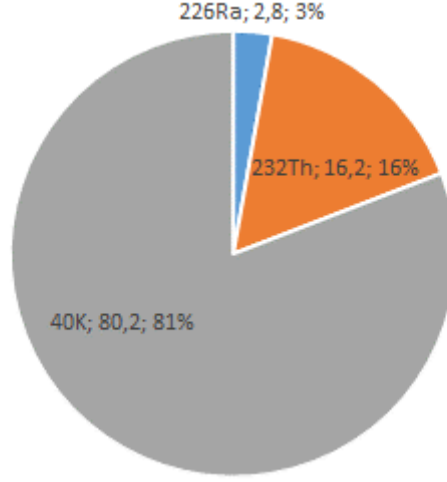
Şekil 4.11. Zeolit ve Mika Örneklerinin Ortalama DH Değerlerinin Dünya Ortalaması ile Karşılaştırılması

Çizelge 4.21. Zeolit ve Mika Ocaklarının DH Değerleri Dağılımı

Ocak kodu	Gama Doz Hızı (nGy/h)		
	En küçük	En büyük	Ortalama
Z1	121	213	157
Z2	57	125	103
Z3	83	221	169
Z4	41	159	144
M1	131	182	158
M2	119	181	146
M3	105	152	131



Şekil 4.12. Radyonüklitlerin Zeolit Örnekleri Ocağı için Hesaplanan Toplam Gama Doz Hızına Katkıları



Şekil 4.13. Radyonüklitlerin Mika Örnekleri Ocağı için Hesaplanan Toplam Gama Doz Hızına Katkıları

Zeolit ve mika ocaklarında çalışan ve gama radyasyonuna maruz kalan yetişkin bireylerin aldıkları yıllık etkin radyasyon dozu (YERD), havada soğurulan gama dozundan etkin doza dönüşüm kat sayısı 0,7 Sv/Gy alınarak ve bireylerin günde 8 saat çalıştığı ve zamanlarının %35'ini açık ortamlarda geçirdiği kabul edilerek aşağıda verilen formül ile hesaplandı (UNSCEAR, 2008):

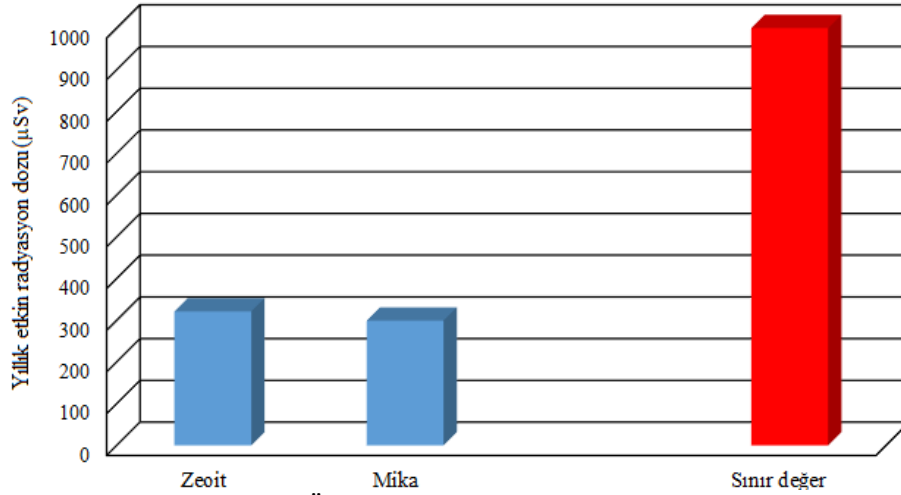
$$\text{YERD} (\mu\text{Sv}) = \text{DH} \times 365,25 \text{ gün} \times 24 \text{ h} \times 0,35 \times 0,7 \text{ Sv/Gy} \times 10^{-3} \quad (4.9)$$

Burada, DH: (4,8) formülü ile hesaplanan açık havada soğurulan gama doz hızıdır. Zeolit ve mika örnekleri için hesaplanan YERD değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistiki bilgi, Çizelge 4.22'de verildi. Zeolit ve mika örnekleri için hesaplanan YERD değerleri sırasıyla, 87 µSv ila 475 µSv (ortalama: 321 µSv) ve 225 µSv ila 390 µSv (ortalama: 299 µSv) aralığında değişmektedir. Zeolit ve mika örneklerinin ortalama YERD değerlerinin, birbirleri ve sınır olan 1000 µSv ile karşılaştırılması, Şekil 4.14'de gösterildi. Zeolit ve mika ocakları için hesaplanan

YERD değerlerinin, ocaklara göre dağılımı Çizelge 4.23'te verildi. Zeolit ocaklarında en büyük YERD değeri, Z3 kodlu ve en küçük YERD değeri ise Z4 kodlu ocak için hesaplandı. Mika ocaklarında en büyük YERD değeri, M1 kodlu ve en küçük YERD değeri ise M3 kodlu ocak için hesaplandı.

Çizelge 4.22. Zeolit ve Mika İçin Hesaplanan YERD Değerlerine İlişkin Tanımlayıcı İstatistik Bilgi

	Yıllık Etkin Radyasyon Dozu (μSv)	
	Zeolit	Mika
Ortalama	321	299
Standart Hata	8	4
Ortanca Standart Sapma	327	293
Basıklık	70	38
Çarpıklık	1,2	-0,4
En küçük	-0,7	0,3
En büyük	87	225
	475	390



Şekil 4.14. Zeolit ve Mika Örneklerinin Ortalama YERD Değerlerinin Dünya Ortalaması ile Karşılaştırılması

Çizelge 4.23. Zeolit ve Mika Ocaklarının YERD Değerleri Dağılımı

Ocak kodu	Yıllık Etkin Radyasyon Dozu (μSv)		
	En küçük	En büyük	Ortalama
Z1	260	458	337
Z2	123	268	222
Z3	177	475	362
Z4	87	341	309
M1	280	390	339
M2	256	389	313
M3	129	187	161

Yaşam boyu kanser riski (YBKR), belirli bir seviyedeki iyonlaştırıcı radyasyon dozuna maruz kalan bireyler içinde kanser vakasına yakalanan azami sayıyı gösteren bir değer olarak kabul edilir (ICRP, 1990; Atıcı, 2016). Zeolit ve mika ocaklarında çalışan bireyler için YBKR aşağıda verilen formül ile hesaplandı (ICRP, 1990; Atıcı, 2016):

$$\text{YBKR} = \text{YERD} \cdot \text{OY} \cdot F_R \quad (4.10)$$

Burada,

YERD: (4.9) bağıntısı ile hesaplanan yıllık etkin radyasyon doz hızı,

OY: Ortalama yaşam süresi (70 yıl) ve

F_R : Risk faktörü (0,05/Sv)' dir (ICRP, 1990).

Hesaplanan YBKR değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistiki bilgi, Çizelge 4.24'de verildi. YBKR değerleri sırasıyla, $3,1 \times 10^{-4}$ ila $1,7 \times 10^{-3}$ (ortalama: $1,1 \times 10^{-3}$) ve $7,9 \times 10^{-4}$ ila $1,4 \times 10^{-3}$ (ortalama: $1,0 \times 10^{-3}$) aralığında değişmektedir. YBKR değerlerinin, ocaklara göre dağılımı Çizelge 4.25'te verildi.

Çizelge 4.24. Zeolit ve Mika için Hesaplanan YBKR Değerlerine İlişkin Tanımlayıcı İstatistik Bilgi

	Yaşam Boyu Kanser Riski	
	Zeolit	Mika
Ortalama	$1,1 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$
Standart Hata	$2,6 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-5}$
Ortanca	$1,1 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$
Standart Sapma	$2,5 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-4}$
Basıklık	1,2	$-3,8 \times 10^{-1}$
Çarpıklık	$-7,3 \times 10^{-1}$	$3,5 \times 10^{-1}$
En küçük	$3,1 \times 10^{-4}$	$7,9 \times 10^{-4}$
En büyük	$1,7 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-3}$

Çizelge 4.25. Zeolit ve Mika Ocaklarının YBKR Değerleri Dağılımı

Ocak kodu	Yaşam Boyu Kanser Riski		
	En küçük	En büyük	Ortalama
Z1	$9,1 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$
Z2	$4,3 \times 10^{-4}$	$9,4 \times 10^{-4}$	$7,8 \times 10^{-4}$
Z3	$6,2 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$
Z4	$3,1 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$
M1	$9,8 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$
M2	$9,0 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$
M3	$4,5 \times 10^{-4}$	$6,5 \times 10^{-4}$	$5,6 \times 10^{-4}$



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K Radyonüklitlerinin Aktivite Derişimleri

İncelenen 88 adet zeolit örneklerinde ölçülen radyonüklitlerin aktivite derişimleri, yer kabuğu değerleri ile Şekil 4.7' de karşılaştırıldığında, ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişim değerinin, yer kabuğu ortalama değerinden yaklaşık 2 kat ve ^{232}Th 'nin ortalama aktivite derişim değerinin ise yer kabuğu ortalama değerinden yaklaşık 3 kat daha büyük olduğu görülmektedir. Z1 ve Z3 kodlu ocaklarda ölçülen ^{226}Ra 'nın ortalama aktivite derişimi, yer kabuğu ortalamasından yaklaşık 3 kat, Z2 ve Z4 kodlu ocaklarda ölçülen ^{226}Ra 'nın değeri ise yer kabuğu ortalamasından yaklaşık 2 kat daha büyük olarak tespit edilmiştir. Z1, Z3 ve Z4 kodlu ocaklarda ölçülen ^{232}Th 'nin ortalama aktivite derişiminin, yer kabuğu ortalamasından yaklaşık 3 kat ve Z2 kodlu ocakta ölçülen ^{232}Th 'nin ortalama değerinin ise yer kabuğu ortalamasından yaklaşık 2 kat daha büyük olduğu görülmektedir. Z1, Z2, Z3 ve Z4 kodlu ocaklarda ölçülen ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişimi, yer kabuğu ortalamasından, sırasıyla yaklaşık olarak 2, 1.3, 3 ve 2.5 kat daha büyüktür.

İncelenen 84 adet mika örneklerinde ölçülen radyonüklitlerin aktivite derişimleri, yer kabuğu değerleri ile karşılaştırıldığında Şekil 4.8' de, ^{226}Ra ve ^{232}Th 'nin ortalama aktivite derişim değerinin, yer kabuğu ortalama değerinden daha küçük olduğu görülmekle birlikte ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişim değerinin ise yer kabuğu ortalama değerinden yaklaşık 6 kat daha büyük olduğu görülmektedir. M1, M2 ve M3 kodlu ocaklardan temin edilen mika örneklerinde ölçülen ^{226}Ra 'nın ortalama aktivite derişimleri, yer kabuğu ortalamasından daha küçüktür. M1 kodlu ocakta ölçülen ^{232}Th 'nin ortalama aktivite derişimi, yer kabuğu ortalamasına yaklaşık olarak eşit, M2 kodlu ocakta ölçülen ^{232}Th 'nin ortalama aktivite derişimi, yer kabuğu ortalamasından daha büyük ve M3 kodlu ocakta ölçülen ^{232}Th 'nin ortalama aktivite derişimi, yer kabuğu ortalamasından daha küçüktür. M2 ve M3 kodlu ocaklarda ölçülen ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişimi, yer

kabuğu ortalamasından yaklaşık 6 kat ve M1 kodlu ocaklarda ölçülen ^{40}K 'ın değeri ise yer kabuğu ortalamasından yaklaşık 7 kat daha büyüktür.

Zeolit ve mika örneklerinin aktivite derişim sonuçları karşılaştırıldığında, zeolit örneklerinde ölçülen ^{226}Ra ve ^{232}Th 'nin ortalama aktivite derişimi, mika örneklerinde ölçülen ^{226}Ra ve ^{232}Th 'nin ortalama aktivite derişiminden daha büyük iken zeolit örneklerinde ölçülen ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişimi, mika örneklerinde ölçülen ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişiminden daha küçüktür.

5.2. Radon Emisyon Katsayısı ve Radon Kütle Salım Hızları

Zeolit örneklerinde ölçülen ortalama radon emisyon katsayısı ile mika örneklerinde ölçülen ortalama radon emisyon katsayısı karşılaştırıldığında, mika örneklerinin ortalama radon emisyon katsayısının, zeolit örneklerinin ortalama radon emisyon katsayısından 2,5 kat daha büyük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte zeolit örneklerinde ölçülen ortalama radon salım hızı ile mika örneklerinde ölçülen ortalama radon salım hızı karşılaştırıldığında, zeolit örneklerinin ortalama radon salım hızının, mika örneklerinin ortalama radon salım hızından yaklaşık 3 kat daha büyük olduğu görülmektedir. Mika örneklerinden kaynaklanan radon emisyon katsayısının, zeolit örneklerinden kaynaklanan radon emisyon katsayısından daha büyük olmasına rağmen, radon salım hızının zeolit örneklerinden kaynaklanan radon salım hızından küçük olmasının sebebi olarak zeolitte ölçülen ^{226}Ra aktivite derişiminin mikada ölçülenden önemli ölçüde büyük olması olarak gösterilebilir.

5.3. Zeolit ve Mikanın Yapı Malzemesi Olarak Kullanılmasının Radyolojik Değerlendirilmesi

Yapı malzemelerindeki radyoaktivitenin izlenmesine yönelik olarak kullanılan aktivite derişim indisinin sınır değeri ile zeolit ve mika örnekleri için hesaplanan aktivite indisinin ortalama değerleri karşılaştırıldığında, zeolitinin ortalama aktivite derişim indisinin, sınır değerden %20 ve mikanın ortalama aktivite derişim

indisinin ise %10 daha büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca hesaplamalar, ortalama aktivite derişimi en düşük olan zeolit ocağının Z2 ve en düşük olan mika ocağının ise M3 kodlu ocak olduğunu göstermiştir.

Yapı malzemelerindeki radon aktivite derişiminin izlenmesine yönelik olarak kullanılan alfa indisinin sınır değeri ile zeolit ve mika örnekleri için hesaplanan alfa indisinin ortalama değerleri karıştırıldığında, zeolit ve mikanın ortalama alfa indisi değerinin, sınır değerden düşük olduğu görülmektedir.

5.4. Çalışanların Maruz Kalabilecekleri Radyasyon Dozunun Değerlendirilmesi

Ocaklarda yerden 1 m yüksekte havada soğurulan gama doz hızının ortalama değeri ile dünya ortalama değeri karşılaştırıldığında, zeolit ocakları için hesaplanan ortalama gama doz hızının, dünya ortalamasından 3 ve mika ocakları için hesaplanan ortalama gama doz hızının ise 2 kat daha büyük olduğu görülmektedir. Şekil 4.12'den de görülebileceği gibi zeolit ocakları için hesaplanan toplam gama doz hızının yaklaşık %50'si ²³²Th'den ileri gelmektedir. Aynı şekilde, Şekil 4.13'ten de görülebileceği gibi mika ocakları için hesaplanan toplam gama doz hızının yaklaşık %80'ni ⁴⁰K'den ileri gelmektedir.

Bununla birlikte, doz hesaplamaları, zeolit ve mika ocaklarında çalışan işçilerin alabilecekleri yıllık etkin radyasyon dozunun ortalama değerinin, izin verilen yıllık etkin radyasyon dozundan 3 kat daha düşük olduğunu göstermiştir.

Zeolit ve mika ocaklarında çalışan işçilerin kansere yakalanma ihtimalini gösteren yaşam boyu kanser riskinin ortalama değer ile dünya ortalaması olan $2,5 \times 10^{-4}$ ile karşılaştırıldığında, zeolit ve mika ocakları için hesaplanan yaşam boyu kanser riskinin dünya ortalamasına göre 4 kat daha büyük olduğu görülmektedir. Genel olarak ülkemiz maden ocaklarından temin edilen bu örneklerin radyoaktivite derişim değerlerinin dünya ortalamasından yüksek çıkmasının sebeplerini, cevherin mineralojisine, bölgenin jeolojik, jeokimyasal yapısına ve bu minerallerin gözenekli yapıları sebebi ile uranyum, toryum ve potasyum elementlerinin

tutulmaları veya özellikle zeolit minerali ile bu elementler arasındaki kimyasal olaylara bağlılığı ile açıklayabiliriz.

5.5. Öneriler

Radyoaktivite ölçme sonuçları, incelenen zeolit ocakları içinde ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişiminin en küçük olduğu ocağın Z2 kodlu ocak olduğunu göstermektedir. Bilindiğı gibi zeolitler, farklı sektörlerde değışik amaçlara yönelik olarak kullanılabilir. Radyoaktivite açısından özellikle insan ile doğrudan temas olabilecek veya insani yaşam ortamlarında sürekli kullanılabilir zeolit katkıli nihai ürünlerin yapımında Z2 kodlu ocağı ait zeolitlerin kullanılması önerilir. Radyoaktivite ölçme sonuçları, incelenen mika ocakları içinde ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişiminin en küçük olduğu ocağın M3 kodlu ocak olduğunu göstermektedir. Bilindiğı gibi mikalar da farklı sektörlerde değışik amaçlara yönelik olarak kullanılabilir. Aynı şekilde radyoaktivite açısından özellikle insan ile doğrudan temas olabilecek veya insani yaşam ortamlarında sürekli kullanılabilir mika katkıli nihai ürünlerin yapımında M3 kodlu ocağı ait mikaların kullanılması önerilir. Sonuç olarak, incelenen zeolit ve mika ocaklardan temin edilen zeolit ve mika örneklerinin, yapı katkı malzemesi, özellikle de çimento ve beton üretiminde katkı ham maddesi olarak kullanılması, radyolojik açıdan herhangi bir risk oluşturmamaktadır.

KAYNAKLAR

- Altun, M., Sezgin, N., Nemlioglu, S., Karakelle, B., Can, N., 2017. Natural radioactivity and hazard-level assessment of Portland cements in Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Turkey*, Volume 314, Issue 2, Pages 941–948.
- Atici, E., 2016. Kapadokya Bölgesinde Yapı Taşı Olarak Üretilen Tüflerdeki Doğal Radyoaktivitenin Gama Spektrometrik Yöntemle Ölçülmesi. *Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Nevşehir.*
- Boukhenfouf, W., Boucenna, A., 2011. The Radioactivity Measurements in Soils and Fertilizers Using Gamma Spectrometry Technique, Algeria. *Journal of Environmental Radioactivity, Algeria*, Volume 102, Issue 4, Pages 336-339.
- Calin, M.R., Radulescu, I., Chipur, D., Barna, C., Cimpeanu, C., 2017. Chemical Characterization and Radiation Exposure from the Natural Radioactivity in Romanian Building Materials, Romania. *Radiochimica Acta, Romania*, 2017-2872.
- Chang, B.U., Koh, S.M., Kim, Y.J., Seo, J.S., Yoon, Y.Y., Row, J.W., Lee, D.M., 2008. Nationwide survey on the natural radionuclides in industrial raw minerals in South Korea. *Journal of Environmental Radioactivity, South Korea*, Volume 99, Issue 3, March 2008, Pages 455-460.
- Currie, L. A., 1968. Limits for qualitative detection and quantitative determination. *Anal. Chem.* 40, 586–593.
- Currie, L.A., 1968. Limits for Qualitative Detection and Quantitative Determination. *Analytical Chemistry, U.S.A.*, 40 (3), Pages 586–593.
- Çetinel, G., 1993. Dünya’da ve Türkiye’de Zeolit. *M.T.A. Fizibilite Etüd Dairesi Maden Ekonomisi Birimi. Ankara*, 1-31.

- Dayanıklı, Ş.A., 2004. Manisa İlinde Kullanılan Bina Materyallerinde Radyoaktivite Tayini. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Demir, K., 2015. Briket ve Tuğlanın Radyolojik Açıdan Karşılaştırılması. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Nevşehir.
- DPT, 1996. Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu, Diğer Endüstri Mineralleri Çalışma Grubu Raporu Cilt 1, DPT, Ankara.
- E.C. Radiation Protection 112, 1999. Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials. Directorate General Environment, Nuclear Safety And Civil Protection Ec (European Commission).
- Gilmore, G., Hemingway, J.D., Practical Gamma-Ray Spectrometry, John Wiley& Sons, 2000.
- Gören, E., 2016. Kangal Termik Santralının Çevreye Etkileri ve Termik Santral Atıklarının Kullanımının Radyolojik Açıdan Değerlendirilmesi. Yayınlanmış Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Gülseren, B., 1977. M.T.A. Enstitüsünce Bilinen Türkiye Yeraltı Kaynak Envanteri M.T.A., Ankara.
- Hamarneh, I.F., 2017. Radiological Hazards for Marble, Granite and Ceramic Tiles Used in Buildings in Riyadh, Saudi Arabia. Environmental Earth Sciences, Saudi Arabia, 76:516.
- <http://zeolyst.com/html/faq.asp>, 2009.
- IAEA 2004 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, 1990, ICRP. Safety Guide No. RS-G-1.7.
- IAEA, 2013. Technical Reports No: 474.

- ICRP, 1990. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.
- Iqbal, M., Tufail, M., Mirza, S.M., 2000. Measurement of Natural Radioactivity in Marble Found in Pakistan Using a NaI(Tl) Gamma-Ray Spectrometer. *Journal of Environmental Radioactivity, Pakistan*, Volume 51, Issue 2, Pages 255-265.
- Joel, E.S., Maxwell, O., Adewoyin, O.O., Eromosele, C.O.E., Saeed, M.A., 2018. Saeed Comparative Analysis of Natural Radioactivity Content in Tiles made in Nigeria and Imported Tiles from China. *Scientific Reports, Nigeria*, Volume 8, Article number 1842.
- Junior, J., Cardoso, J., Silva, C., Silveira, S., Amaral R., 2005. Analysis of the ^{40}K Levels in Soil Using Gamma Spectrometry, Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology, Brazil*, Volume 48, No. Spe. 2.
- Kahveci, M., 1993. İzmir Çevresinde Yetiştirilen Patateslerde Radyoaktivite Tayini. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Kam, E., Bozkurt, A., 2007. Environmental Radioactivity Measurements in Kastamonu Region of Northern Turkey, Kastamonu. *Applied Radiation and Isotopes, Turkey*, Volume 65, Issue 4, Pages 440-444.
- Kasumović, A., Hankić, E., Kasić, A., Adrović, F., 2017. Natural Radioactivity in Some Building Materials and Assessment of the Associated Radiation Hazards. *Radiochimica Acta, Bosnia and Herzegovina*, Volume 106, Issue 1.
- Kaynar, S.Ç., Saç, M.M., Ereeş, F.S., 2014. Determination of radioactivity levels in Akhisar, Gördes, Gölarmara and Sındırgı regions, Western Turkey, Manisa. *Environmental Earth Sciences, Turkey*, Volume 71, Issue 4, Pages 1581–1592.
- Knoll, G. F., 2000, *Radiation Detection and Measurement*, Third Edit., Wiley, New York, 802 p.

- Kobeissi, M.A., Samad, O.E., Zahraman, K., Milky, S., Bahsoun, F., Abumurad, K.M., 2008. Natural Radioactivity Measurements in Building Materials in Southern Lebanon. *Journal of Environmental Radioactivity*, Lebanon, Volume 99, Issue 8, Pages 1279-1288.
- Köktürk, U., 1995. Zeolit Madenciligi ve Çevre Sağlığına Etkileri. Endüstriyel hammaddeler Sempozyumu, İzmir.
- Krane, K.S., 2001. *Introductory Nuclear Physics*. Oregon State University. ISBN: 978-0-471-32057-9.
- Krane, K.S., 1988. *Introductory Nuclear Physics*. Oregon State University. ISBN: 978-0-471-80553-3.
- Lowder, W.M. and Sobon, L.R., 1956. *Background Radiation*. Rep. NYO-4712. USAEC, D.C., Washington.
- NCRP Report 97, 1988. *Measurement of Radon and Radon Daughters in Air*.
- Nuclear S., 2003. *A Guide to the Nuclear Science Wall Chart*. Contemporary Physics Education Project (CPEP).
- Osmanlioglu, A. E., 2006. Treatment of Radioactive Liquid Waste by Sorption on Natural Zeolite in Turkey. *Journal of Hazardous Materials*, Turkey, Volume 137, Issue 1, Pages 332-335.
- Özger, A.,G., 2005. Ceyhan, Yumurtalık ve Pozantı bölgelerinin Doğal Radyoaktivite Düzeylerinin Belirlenmesi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Pillai, G.S., Jeevarenuka, K., Hameed, P.S., 2017. Radioactivity in Building Materials of Pudukkottai Geological Region, Tamil Nadu, India. *Earth Systems and Environment*, India, (2017) 1: 4.
- Raghu, Y., Chandrasekaran, A., Selvapandian, M., Harikrishnan, N., Ravisankar, R., 2017. Natural Radioactivity Measurement and Radiological Hazards of Sand Samples Used as Building Material in Tiruvannamalai District, Tamilnadu, India. *International Journal of Materials Science*, India, Volume 12, Number 2.

- Rajgerhia L.M., 1987. Ground Mica. MMC Research and Development Wing, India, 1-30.
- Sanjurjo, J., Alves, C., 2017. Geologic Materials and Gamma Radiation in the Built Environment. *Environmental Chemistry Letters*, Volume 15, Issue 4, Pages 561–589.
- Senthilkumar, B., Dhavamani, V., Ramkumar, S., Philominathan, P., 2010. Measurement of Gamma Radiation Levels in Soil Samples from Thanjavur Using Gamm Ray Spectrometry and Estimation of Population Exposure. *Journal of Medical Physics, India*, 35(1): 48–53.
- Solak, S., Turhan, Ş., Uğur, F.A., Gören, E., Gezer, F., Yeğingil, Z., Yeğingil, İ., 2012. Evaluation of Potential Exposure Risks of Natural Radioactivity Levels Emitted from Building Materials Used in Adana, Turkey. *Indoor and Built Environment, Turkey*, Volume 23, Issue 4, Pages 594-602.
- Todorović, N., Mrđa, D., Hansman, J., Todorović, S., Nikolov, J., Krmar, M., 2017. Radiological Impacts Assessment for Workers in Ceramic Industry in Serbia. *Radiation Protection Dosimetry*, Volume 176, Issue 4, Pages 411–417.
- Turhan, Ş., Arikan, İ.H., Yücel, B., Varinlioğlu, A., Köse A., 2010. Evaluation of the Radiological Safety Aspects of Utilization of Turkish Coal Combustion Fly Ash in Concrete Production, Sivas. *Fuel, Turkey*, Volume 89, Issue 9, Pages 2528-2535.
- Turner, D.C., 1975. Mica, Mineral Research Consultative Comittee, London, 1 -22.
- Türkiye’de Kullanılan Yapı Malzemelerindeki Doğal Radyoaktiviteden Kaynaklanan Radyasyon Dozunun Değerlendirilmesi, 2009. TAEK Ankara.
- Tzortzis, M., Tsertos, H., Christofides, S., Christodoulides, G., 2003. Gamma-Ray Measurements of Naturally Occurring Radioactive Samples from Cyprus Characteristic Geological Rocks. *Radiation Measurements, Cyprus*, Volume 37, Issue 3, Pages 221-229.

- UNSCEAR Sources and Effects of Ionizing Radiation, 2000. United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation, United Nations, New York.
- Veiga, R., Sanches, N., Anjos, R.M., Macario, K., Bastos, J., Iguatemy, M., Aguiar, J.G., Santos, A.M.A., Mosquera, B., Carvalho, C., Filho, M.B., Umisedo, N.K., 2006. Measurement of Natural Radioactivity in Brazilian Beach Sands. Radiation Measurements, Brazil, Volume 41, Issue 2, Pages 189-196.
- Wallbrink, P.J., Walling, D.E., He, Q., 2002. Radionuclide Measurement Using HPGe Gamma Spectrometry. Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides, UK, Australia, Pages 67-96.
- Xhixha, F.S.G., Xhixha, M.K., Hasani, F., Xhixha, E., Shyti, M., Kuqi, D.S., Prifti, D., Qafleshi, M., 2017. Natural Radioactivity in Cements and Raw Materials Used in Albanian Cement Industry. Environmental Earth Sciences, Albania, 76:670.

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Adana’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Adana’da tamamladı. 2002 yılında başladığı Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünden 2006 yılında mezun oldu, aynı yıl Çukurova Üniversitesi, Fizik Bölümü Gülten GÜNEL Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarında Yüksek Lisans eğitimine başladı ve bu eğitiminin 1 yılını İngiltere’de geçirdikten sonra Yurda dönerek Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. Yüksek Lisans eğitimini tamamladıktan sonra aynı Üniversite ve Bölümde Doktora eğitimine kabul edildi. Halen Adana Büyükşehir Belediyesinde memur olarak görev yapmakta olup evli ve bir çocuk babasıdır.