

T.C.
KAFKAS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**AKYAKA, ARPAÇAY ve SUSUZ İLÇELERİ TOPRAKLARINDA DOĞAL
RADYOAKTİVİTE SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ**

İlyas ÇAĞLAR
YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Gülçin CENGİZ

MAYIS-2014

KARS

T.C. Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi İlyas ÇAĞLAR'ın Yrd. Doç. Dr. Gülçin CENGİZ'in danışmanlığında yüksek lisans tezi olarak hazırladığı "Akyaka, Arpaçay ve Susuz İlçeleri Topraklarında Doğal Radyoaktivite Seviyelerinin Belirlenmesi" adlı bu çalışma, yapılan tez savunması sınavı sonunda jüri tarafından Lisansüstü Eğitim Yönetmeliği uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir.

26.05.2014

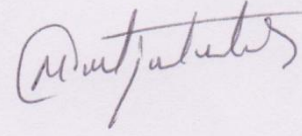
Adı ve Soyadı

İmza

Başkan: Yrd. Doç. Dr. Gülçin CENGİZ

Üye : Prof. Dr. Mevlüt KARABULUT

Üye. : Yrd. Doç. Dr. Mehtap EJDER KORUCU



Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun/...../..... gün ve/.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Muzaffer ALKAN
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim dalında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

“Akyaka, Arpaçay ve Susuz İlçeleri Topraklarında Doğal Radyoaktivite Seviyelerinin Belirlenmesi” adlı bu tez çalışmasının deneysel çalışmaları Kafkas Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Radyasyon Ölçüm Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmayı bana öneren ve gerçekleştirmemde benden bilgi, hoşgörü ve güler yüzünü esirgemeyen, araştırmalarımnda engin ve derin bilgisi ile bana yol gösteren, tezimin yazımına kadar her aşamasında değerli zamanını bana ayıran, karşılaştığım zorluklarda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Yrd. Doç. Dr. Gülçin CENGİZ’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa no

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ÖZET.....	vi
ABSTRACT	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xii
RESİMLER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Radyasyon.....	9
1.1.1. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon.....	9
1.1.2. İyonlaştırıcı Radyasyon	10
1.2. Radyasyon Kaynakları.....	12
1.2.1. Doğal Radyasyon Kaynakları	13
1.2.1.1. Kozmik ışınlar.....	14
1.2.1.2. Yeryüzü kaynaklı doğal radyasyon.....	15
1.2.2. Yapay Radyasyon Kaynakları	20
1.3. Radyasyon Birimleri	21
1.3.1. Aktivite Birimi.....	22
1.3.2. Işınlama Birimi	22
1.3.3. Soğurulmuş Doz	22
1.3.4. Eşdeğer Doz Birimi	23
1.3.5. Etkin Doz Birimi	24
1.4. Radyoaktivite	25
1.4.1. Radyoaktif Bozunma Kanunu.....	26
1.4.2. Yarı Ömür.....	27
1.4.3. Ortalama Ömür	28
1.4.4. Ardışık Bozunma Kanunu	29
1.4.5. Bozunum Türleri.....	32
1.4.5.1. Alfa (α) Bozunumu	32

1.4.5.2. Beta (β) Bozunumu	33
1.4.5.3. Gama (γ) Bozunumu	34
2. GAMA IŞINLARININ MADDE İLE ETKİLEŞMESİ	35
2.1. Fotoelektrik olay	36
2.2. Compton Saçılması	37
2.3. Çift Oluşumu ve Yok Oluş	39
3. GAMA SPEKTROMETRİSİ	42
3.1. Sintilasyon Dedektörleri	43
3.1.1. NaI(Tl) Sintilasyon Dedektörü	44
3.2. Detektör Ayırma Gücü	50
3.3. Dedektör Verimi	51
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	53
4.1. Enerji Kalibrasyonu	53
4.2. Verim Kalibrasyonu	56
4.3. Pik Alanı Hesabı	57
4.4. Standartla Karşılaştırma Yöntemi	59
4.5. Toprak Örneği Alma ve Örnek Hazırlama Yöntemleri	60
4.6. Ölçüm Sahası	61
5. SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR	63
5.1. Toprak Örneklerinde ^{40}K 'nin Aktivite Konsantrasyonu	63
5.2. Toprak Örneklerinde ^{137}Cs 'nin Aktivite Konsantrasyonu	65
5.3. Toprak Örneklerinde ^{226}Ra (^{238}U)'in Aktivite Konsantrasyonu	67
5.4. Toprak Öneklerinde ^{232}Th 'nin Aktivite Konsantrasyonu	69
KAYNAKLAR	76
EKLER	84
ÖZGEÇMİŞ	86

ÖZET

Çevredeki doğal ve yapay radyoaktivite, tüm canlıların maruz kaldığı radyasyonun temel kaynağıdır. Doğal çevresel radyoaktivite ^{40}K ve ^{238}U ve ^{232}Th gibi promordial nüklidlerden ve bunların bozunum ürünlerinden kaynaklanmaktadır. Bu radyonüklidler çevredeki tüm ortamlarda çeşitli ölçeklerde bulunmaktadır. Doğal olarak var olan radyonüklidlerin yanı sıra ^{137}Cs gibi birçok yapay orijinli radyonüklid, farklı süreçlerle çevreye yayılmaktadır.

Bundan dolayı; çevredeki radyonüklid dağılımının ve radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesi, bu radyonüklidlerden dolayı maruz kalınan radyasyonun etkilerinin belirlenebilmesi için büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, topraktaki radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesi herhangi bir radyoaktif serpinti ile eşzamanlı olarak doğal background aktivitesindeki değişiklikleri tespit edebilmek için çok önemlidir. Böylece, çevrede olası herhangi bir radyoaktif serpentinin izlenmesi mümkün olacaktır.

Bu tezde, Arpaçay, Susuz ve Akyaka ilçelerinde farklı örnek istasyonlardan toplanan toprak örneklerindeki aktivite konsantrasyonları gama spektrometresi NaI(Tl) sodyum iyodür dedektörü kullanılarak ölçüldü. Toprak örneklerinde doğal radyonüklidlerin yanı sıra, bir fisyon ürünü olan ^{137}Cs tespit edildi ve bu radyonüklidin olası kaynağı tartışıldı. Sonuçlar grafik halinde verildi ve ölçülen aktiviteler Türkiye'nin ve dünyanın farklı bölgelerinde yapılan benzer çalışmalarla karşılaştırıldı. Bu çalışmada Kars ilinden üç ilçeden toplanan toprak örneklerindeki ^{226}Ra (^{238}U), ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs ortalama aktivite konsantrasyonlarının, Türkiye ve Dünya çapında yapılmış diğer çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür.

2014, 86 sayfa

Anahtar Kelimeler: Doğal Radyoaktivite, Gama Işını Spektroskopisi, Toprak, Aktivite Konsantrasyonu.

ABSTRACT

The natural or artificial radioactivity present in the environment is the main source of radiation exposure for all livings. Natural environmental radioactivity arises mainly from primordial radionuclides, such as ^{40}K and the nuclides from the ^{238}U and ^{232}Th series and their decay products. These radionuclides are present in various degrees in all media in the environment. Besides naturally occurring radionuclides, many radionuclides of artificial origin such as ^{137}Cs have been released into the environment by different processes.

Therefore, the knowledge of radionuclide distribution and radiation levels in the environment is important for assessing the effects of radiation exposure due to these radionuclides. Moreover, measurement of natural radioactivity levels in soil is very important in determine variation in natural background activity with time as a result of any radioactive release. Hence, it will be possible to monitor any radioactive release in environment.

In this thesis, the activity concentrations in soil samples collected from different sampling stations in Arpaçay, Susuz and Akyaka regions were measured using gamma-ray spectrometry (sodium iodide NaI(Tl) detector). In addition to natural radionuclides, ^{137}Cs was detected in the soil samples and the possible origins of this radionuclide were discussed. The results have been presented by graphics and the measured activities were compared with the results of similar studies carried out for different parts of Turkey and the world. In this study, the main activity concentrations of ^{226}Ra (^{238}U), ^{232}Th , ^{40}K and ^{137}Cs in soil samples collected from three districts in Kars were found to be compatible with the results of the other studies conducted in different locations in Turkey and around the world.

2014, 86 page

Keywords: Natural Radioactivity, Gamma-Ray Spectrometry, Soil, Activity Concentration

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Aktivite
D	Soğurulmuş doz
E	Elektron
E	Etkin doz
H	Eşdeğer doz
M	Kütle
n	Nötron
p	Proton
t_{1/2}	Yarılanma süresi
W	Ağırlık faktörü
α	Alfa parçacığı
β	Beta parçacığı
γ	Gamma ışınları
λ	Radyoaktif bozunma sabiti

İndisler

T	Doku
R	Radyasyon
e	Elektron yükü

Kısaltmalar

TAEK	Türkiye Atom Enerji Kurumu
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
UV	Ultraviolet
EM	Elektromanyetik Dalga
IAEA Agency)	Uluslar Arası Atom Enerji Kurumu (International Atomic Energy Agency)
PMT	Foto Çoğaltıcı Tüp (Photomultiplier tube)

MCA	Çok Kanallı Analizör (Multi Channel Analysers)
PA	Ön Yükselteç (Preamplifikatör)
MA	Ana Yükselteç (Amplifikatör)
PC	Bilgisayar
ADC	Sayısal-Örneksele Dönüştürücü (Analog-to-Digital Converter)
HV	Yüksek Voltaj Kaynağı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa no

Şekil 1.1: Elektromanyetik radyasyonun enerji spektrumu.....	9
Şekil 1.2: İyonlaştırıcı radyasyonun giricilikleri	12
Şekil 1.3: Kozmik ışınlardan alınan radyasyon dozunun yüksekliğe göre değişimi.....	15
Şekil 1.4: U-238'in bozunma ürünleri şeması.	17
Şekil 1.5: Th-232'in bozunma ürünleri şeması.....	18
Şekil 1.6: Kararlı çekirdekler için N-Z grafiği	25
Şekil 1.7: Radyoaktif bir numune miktarının zamanla değişimi.	27
Şekil 1.8: Ardışık bozunma grafiği.....	31
Şekil 2.1: Fotoelektrik olay, Compton saçılması ve Çift oluşumun baskın olduğu bölgeler	36
Şekil 2.2: Fotoelektrik olay.....	37
Şekil 2.3: Compton saçılmasının şematik gösterimi	38
Şekil 2.4: Çift oluşumunun şematik diyagramı	40
Şekil 2.5: 30 mm kalınlığındaki NaI dedektörü için hesaplanan etkileşme olasılıkları.....	41
Şekil 3.1: Sintilasyon dedektör şeması.	43
Şekil 3.2: NaI(Tl) foto-çoğaltıcı tüpün şematik diyagramı	46
Şekil 3.3: NaI(Tl) dedektörünün kurulum şeması.	47
Şekil 3.4: Çok kanallı analizörde kanal numarası ve puls yüksekliği arasındaki ilişki.....	49
Şekil 3.5: Gaussiyen yapılı pikin enerji çözünürlüğünü gösteren şema	51
Şekil 3.6: Kaynaktan dedektöre gelen parçacıkların, dedektörle etkileşmeleri.....	51
Şekil 4.1: NaI(Tl) dedektörünün enerji kalibrasyonu.	56
Şekil 4.2: NaI(Tl) dedektörünün mutlak verim eğrisi.	57
Şekil 4.3: Gama pik alanının hesaplanmasında kullanılan parametrelerin gösterimi.....	58
Şekil 4.4: Toprak numunesi almanın şematik gösterimi	61
Şekil 5.1: Arpaçay bölgesinden alınan toprak örneklerindeki K-40 dağılımı.	64

Şekil 5.2: Akyaka bölgesinden alınan toprak örneklerindeki K-40 dağılımı.....	64
Şekil 5.3: Susuz bölgesinden alınan toprak örneklerindeki K-40 dağılımı.	65
Şekil 5.4: Arpaçay bölgesinden alınan toprak örneklerindeki Cs-137 dağılımı.....	66
Şekil 5.5: Akyaka bölgesinden alınan toprak örneklerindeki Cs-137 dağılımı.	66
Şekil 5.6: Susuz bölgesinden alınan toprak örneklerindeki Cs-137 dağılımı.....	67
Şekil 5.7: Arpaçay bölgesinden alınan toprak örneklerindeki Ra-226 dağılımı.....	68
Şekil 5.8: Akyaka bölgesinden alınan toprak örneklerindeki Ra-226 dağılımı.....	68
Şekil 5.9: Susuz bölgesinden alınan toprak örneklerindeki Ra-226 dağılımı.....	69
Şekil 5.10: Arpaçay bölgesinden alınan toprak örneklerindeki Th-232 dağılımı.....	70
Şekil 5.11: Akyaka bölgesinden alınan toprak örneklerindeki Th-232 dağılımı.....	70
Şekil 5.12: Susuz bölgesinden alınan toprak örneklerindeki Th-232 dağılımı.....	71
Şekil 5.13: K-40 aktivite konsantrasyonlarının, sırasıyla Dünya, Türkiye, Doğu Anadolu Bölgesi, Kars, Akyaka, Arpaçay ve Susuz ortalaması.	72
Şekil 5.14: Cs-137aktivite konsantrasyonlarının, sırasıyla Dünya, Türkiye, Doğu Anadolu Bölgesi, Kars, Akyaka, Arpaçay ve Susuz ortalaması	73
Şekil 5.15: Ra-226 aktivite konsantrasyonlarının, sırasıyla Dünya, Türkiye, Doğu Anadolu Bölgesi, Kars, Akyaka, Arpaçay ve Susuz ortalaması	74
Şekil 5.16: Th-232 aktivite konsantrasyonlarının, sırasıyla Dünya, Türkiye, Doğu Anadolu Bölgesi, Kars, Akyaka, Arpaçay ve Susuz ortalaması	75

TABLULAR DİZİNİ

Sayfa no

Tablo 1.1: Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozlarının oransal değerleri	13
Tablo 1.2: Radyasyon dozunun kaynaklara göre dağılımı	13
Tablo 1.3: Doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozlarının oransal değerleri.....	14
Tablo 1.4: Yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozunun oransal değerleri	21
Tablo 1.5: Radyasyon birimleri ve dönüşüm faktörleri	21
Tablo 1.6: Farklı radyasyon tipleri için kalite faktörleri	24
Tablo 4.1: Enerji kalibrasyonu için önerilen izotoplar.....	54

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa no

Resim 4.1: NaI(Tl) Sintilasyon dedektörü.....	53
Resim 4.2: Toprak numunesi alınan istasyonlar.	62

1. GİRİŞ

İnsanlar yaşamları boyunca doğal kaynaklı iyonlaştırıcı radyasyona ve bazen de insan yapımı iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmaktadır. Bundan dolayı; çevredeki radyonüklid dağılımının ve radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesi, maruz kalınan hem karasal (terrestrial) hem de kozmik kaynaklı iyonlaştırıcı radyasyonun etkilerinin belirlenebilmesi için büyük önem taşımaktadır. Doğal radyasyon kaynakları, dünya nüfusunun maruz kaldığı toplam radyasyon dozunun yaklaşık olarak % 80'lik kısmını oluşturmaktadır. Dünya nüfusunun doğal radyasyon kaynaklarından maruz kaldığı yıllık ortalama etkin doz, UNSCEAR (United Nations Scientific Commite on the Effect of Atomic Radiation) tarafından kişi başına 2,4 mSv/y olarak rapor edilmiştir[1,2].

Dış uzay ve güneşten gelen kozmik ışınlar, kozmik ışınların oluşturduğu kozmojenik radyonüklidiler, yerkabuğunda bulunan radyoizotoplar ve bunların bozunma ürünleri insanların maruz kaldığı başlıca doğal radyasyon kaynaklarıdır. Nükleer silah denemeleri ve nükleer kazalar, nükleer yakıt çevrimi, nükleer güç üretiminden çevreye salınan radyonüklidler, tıpta teşhis ve tedavi amacıyla kullanılan yöntemler, tüketici ürünleri ve endüstriyel uygulamalar ise yapay radyasyon kaynaklarını oluşturmaktadır. Yaşayan tüm organizmalar bu radyasyon kaynaklarından kaçınılmaz bir şekilde ve sürekli olarak ışınlanmaktadır. Özellikle son yüz yıl içerisinde, nükleer silah denemeleri ve nükleer kazalar sonucu çevresel radyoaktivite seviyesinde küresel düzeyde artış meydana gelmiş ve bazı bölgelerde çevresel radyoaktivite seviyesindeki yerel artış, ekosisteme zarar verecek boyutlara ulaşmıştır[3].

İnsanların yaşamları boyunca maruz kaldığı doğal radyasyonun önemli kısmını karasal orijinli radyonüklidiler oluşturmaktadır. Karasal orijinli radyasyon kaynakları, milyarlarca yıl önce dünyanın oluşumundan beri yerkabuğunda var olan ve henüz tamamen bozunmamış çok uzun yarı ömürlü radyonüklidlerdir. Promordial olarak da adlandırılan bu radyonüklidlerin en önemlileri ^{40}K (yarı ömrü = $1,28 \times 10^9$ yıl), ^{87}Rb (yarı ömrü = $4,7 \times 10^{10}$ yıl), ^{238}U (yarı ömrü = $4,47 \times 10^9$ yıl) ve ^{232}Th (yarı ömrü = $1,41 \times 10^{10}$ yıl) dir. ^{235}U bozunum serisindeki gibi diğer bazı radyonüklidler doğal radyoaktivite seviyelerine katkıları çok az olduğu için göz ardı edilmektedir[4].

Toprağın aktivite konsantrasyonu, doğal arkaplan radyasyonunun temel belirleyici faktörlerinden biridir. Kayaların yanı sıra coğrafi volkanik yapılar; ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K gibi doğal radyonüklid içeren fosfat, granit ve tuz bakımından oldukça zengindirler. Kayalar; doğal süreçler aracılığıyla ufalandıklarında yağmur ve akıntı suları aracılığıyla toprağa taşınırlar ve topraktaki doğal radyoaktivitenin artmasına neden olurlar. Doğal radyasyon kaynaklarına ek olarak toprak aktivitesi insan yapımı aktiviteden de etkilenir. Örneğin ^{137}Cs , nükleer test ve kazalar kanalıyla çevreye yayılan bir fisyon ürünüdür. Topraktaki ^{137}Cs birikimi, yarı ömrünün 30,2 yıl ve gama radyasyonu yayımladığı için çok önemlidir.

Toprakta bulunan radyoizotoplar, gama radyasyonunu önemli ölçüde etkiler ve topraktaki doğal radyoaktivite ölçümleri, herhangi bir radyoaktif serpinti ile eşzamanlı olarak doğal arkaplan aktivitesindeki değişiklikleri tespit edebilmek için çok önemlidir.

Karasal kaynaklı doğal radyasyon seviyelerini belirlemek amacıyla; topraktaki radyonüklidlerin aktivitelerinin belirlenmesi ve bunlardan kaynaklanan doz hesaplamalarına yönelik, bütün dünyada farklı yöntemlerle birçok çalışma yapılmış ve yapılmaktadır. Bu çalışmaların bir kısmı daha önce hiç ölçüm yapılmamış bölgelerde yapılırken, bir kısmı da belli bölgelerde değişim olup olmadığını izlemek amacıyla yapılan çalışmalardır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir[2,5].

2003 yılında M.K. Fasasi ve ekibi tarafından, Nijerya'da yapılan çalışmada; katran kumundaki doğal radyoaktivite, Coaxial Germanyum dedektörü kullanılarak ölçülmüştür. Bu çalışmada ^{214}Bi (^{238}U) aktivitesi $165.64 \pm 2.91 \text{ Bqkg}^{-1}$, ^{208}Tl (^{232}Th) aktivitesi 150.25 ± 2.91 ve ^{226}Ra aktivitesi $60.97 \pm 2.27 \text{ Bqkg}^{-1}$ olarak ölçülmüştür[6].

2004 yılında L.C. Sujo ve ekibi tarafından, Meksika'da yapılan çalışmada yüksek çözünürlüklü gama spektrometresi kullanılarak ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th serilerinin konsantrasyonları toprak için belirlenmiştir. ^{238}U ve ^{232}Th serilerinin aktivite konsantrasyonları 30 Bqkg^{-1} civarında bulunmuştur. Sıvı sintilasyon sayacı kullanılarak içme suyundaki radon konsantrasyonu ise $4.3\text{-}42 \text{ kBq/m}^3$ aralığında bulunmuştur [7].

M. Tzortzis tarafından 2003 yılında yapılan çalışmada; HPGe dedektörü kullanılarak, Kıbrıs'ın karakteristik jeolojik kayalarında ^{232}Th aktivite konsantrasyonu 1.3-52.8 Bqkg^{-1} aralığında, ^{238}U aktivite konsantrasyonu 0.9-90.3 Bqkg^{-1} aralığında ve ^{40}K aktivite konsantrasyonu ise 13-894 Bqkg^{-1} aralığında ölçülmüştür[8].

Malczewski ve ekibi tarafından, Polonya'da HPGe dedektörü kullanılarak kaya ve topraklardaki doğal ve antropojenik radyoaktivite düzeyleri incelenmiş ve sonuçta ^{40}K aktivitesinin 320-1200 Bqkg^{-1} aralığında, ^{228}Ac (^{232}Th serisi) aktivitesinin 25-62 Bqkg^{-1} aralığında ve ^{226}Ra aktivitesinin 31-122 Bqkg^{-1} aralığında değiştiği bulunmuştur[9].

2003 yılında Hindistan'da S.Saravanan ve ekibi tarafından, NaI(Tl) dedektörü kullanılarak yapılan çalışmada; Tamilnadu bölgesi topraklarının doğal background radyasyonu ölçülmüştür. Toprakların aktivite düzeyleri: ^{40}K aktivitesi 73.1-120 Bqkg^{-1} aralığında ve ortalama 96.0 Bqkg^{-1} , ^{232}Th aktivitesi 21.6-69.6 Bqkg^{-1} aralığında ve ortalama 43.9 Bqkg^{-1} ve ^{226}Ra aktivitesi 31.8-52.0 Bqkg^{-1} aralığında ve ortalama 42.9 Bq/kg^{-1} olarak ölçülmüştür. Radyum eşdeğer aktivitesi 68.3-149.0 Bqkg^{-1} aralığında ortalama 113 Bqkg^{-1} olarak hesaplanmıştır[10].

J. Al-Jundi ve ekibi tarafından 2003 yılında HPGe dedektörü kullanılarak yapılan çalışmada; Ürdün'ün Amman-Akaba karayolu boyunca toplanan toprak örneklerindeki doğal radyoaktivite seviyeleri tayin edilmiştir. Doğal radyoaktivite konsantrasyonları ^{238}U için 22-104 Bqkg^{-1} aralığında, ^{232}Th için 21-103 Bqkg^{-1} aralığında ve ^{40}K için 138-601 Bqkg^{-1} aralığında bulunmuştur[11].

S. Singh ve ekibi tarafından 2003 yılında Hindistan'da yapılan çalışmada; NaI(Tl) dedektörü kullanılarak topraklardaki doğal radyoaktivite ölçülmüş ve sonuçta ^{40}K aktivite konsantrasyonu 143,7-228,9 Bqkg^{-1} ; ^{232}Th aktivite konsantrasyonu 35.2-122.8 Bqkg^{-1} ve ^{226}Ra aktivite konsantrasyonu 25.1-75.7 Bqkg^{-1} aralığında bulunmuştur. Ayrıca bu çalışmada, Radyum eşdeğer aktivitesi 90.88-275.33 Bqkg^{-1} aralığında hesaplanmıştır[12].

J. Singh ve ekibi tarafından 2009 yılında HPGe dedektörü kullanılarak yapılan çalışmada; Hindistan'ın Upper Siwaliks ve Punjab bölgesinde yapılan çalışmada, toprak örneklerindeki doğal radyoaktivite seviyeleri tayin edilmiştir. Doğal radyoaktivite konsantrasyonları ^{226}Ra için 28.3 ± 5.0 – 81.0 ± 1.7 Bqkg⁻¹ aralığında, ^{232}Th için 61.2 ± 1.3 – 140.3 ± 2.6 Bqkg⁻¹ aralığında ve ^{40}K için 363.4 ± 4.9 – 1002 ± 11.2 Bqkg⁻¹ aralığında bulunmuştur. Yine bu çalışmada toplam soğrulmuş doz oranı ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K için 71.1 – 162.0 nGyh⁻¹ hesaplanmıştır[13].

T. Santawamaitre ve ekibi tarafından HPGe dedektörü kullanılarak 2011 yılında gama ışını spektrometresi aracılığıyla Tayland'da yapılan bir çalışmada; ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K doğal radyonüklidlerinin aktivite konsantrasyonları tayin edilmiştir. Aktivite konsantrasyonları ^{238}U için 55.3 ± 1.2 – 65.2 ± 1.4 Bqkg⁻¹ aralığında, ^{232}Th için 60.7 ± 1.2 – 69.1 ± 1.3 Bqkg⁻¹ aralığında ve ^{40}K için 393.4 ± 13 – 478 ± 16 Bqkg⁻¹ aralığında bulunmuştur. Soğrulmuş gama doz oranı 81.6 ± 1.9 – 90.4 ± 2.1 nGyh⁻¹ aralığında ve yıllık eşdeğer etkin doz ise 100.1 ± 2.3 – 110.8 ± 2.5 µSv olarak hesaplanmıştır[14].

G. Song ve ekibi tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada; Çin'in Guandong bölgesinde gama ışını spektrometresi kullanılarak ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K doğal radyonüklidlerinin konsantrasyonları ölçülmüştür. Ortalama aktivite konsantrasyonları ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K için sırasıyla 140 ± 37 Bq kg⁻¹, 134 ± 41 Bqkg⁻¹, 187 ± 80 Bqkg⁻¹, 608 ± 203 Bqkg⁻¹ olarak tespit edilmiştir. Havada soğrulan doz oranı, 86 – 237 nGyh⁻¹ ve yıllık etkin doz oranı ise 0.20 – 0.060 mSv olarak hesaplanmıştır[15].

Z. Morsy ve ekibi tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada; Mısır'ın Ebo Zaabal kentinde ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K doğal radyonüklidlerinin aktivite konsantrasyonları toprak bitki ve su örneklerinde HPGe dedektörü kullanılarak tayin edilmiştir. Toprak, bitki ve su örnekleri için ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla ^{238}U için 6.57 , 10.16 ve 5.44 Bqkg⁻¹, ^{232}Th için 8.46 , 8.33 ve 6.04 Bqkg⁻¹ ve ^{40}K için 136.3 , 216.8 ve 119.2 Bqkg⁻¹ bulunmuştur. Bu çalışmada toprak örnekleri için havada soğrulmuş doz oranı, 14.2 ± 0.83 nGyh⁻¹ ve yıllık etkin doz oranı ise $0,0174\pm 0.001$ mSv olarak hesaplanmıştır[16].

M.S. Hamideeen ve J. Sharaf tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada; Ürdün'ün Russaifa bölgesindeki Fosfat tepeleri boyunca toplanan toprak örneklerindeki doğal olarak meydana gelen karasal radyonüklidlerin (^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K) aktivite konsantrasyonları HPGe dedektörü kullanılarak tayin edilmiştir. Aktivite konsantrasyonları ^{238}U için 5.3-1201.1 Bqkg⁻¹ aralığında, ^{232}Th için 2.2-31.2 Bqkg⁻¹ aralığında ve ^{40}K için 19.4-288.4 Bqkg⁻¹ aralığında bulunmuştur. Soğrulmuş doz oranı ise 26.1-563.2 nGyh⁻¹ aralığında tespit edilmiştir[17].

R. Ravisankar ve ekibi tarafında 2012 yılında yapılan çalışmada; Hindistan'ın Tamil Nadu bölgesinde toprak örneklerindeki radyoaktivite seviyeleri NaI(Tl) sintilatör dedektörü kullanılarak tayin edilmiştir. Radyoaktivite konsantrasyonları, ^{238}U için 2.17-23.53 Bqkg⁻¹ aralığında, ^{232}Th için 13.54-89.89 Bqkg⁻¹ aralığında ve ^{40}K için 625.09-2207.3 Bqkg⁻¹ aralığında bulunmuştur. Yine bu çalışmada soğrulmuş doz oranı, 41.63-132.40 nGyh⁻¹ aralığında ve yıllık etkin doz oranı ise 0.049-0.158 mSv aralığında hesaplanmıştır[18].

M. Krmar ve ekibi tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada; Sırbistan'ın kuzeyinde Tuna nehri kenarlarında 21506 km²' lik alandan toplanan toprak örneklerindeki ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K doğal radyonüklidlerinin konsantrasyonları HPGe dedektörü kullanılarak tayin edilmiştir. Toprak örneklerindeki ortalama aktivite konsantrasyonları ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K için sırasıyla, 52±9, 53.7±8.6, 39.6±7.6 ve 553±92 Bqkg⁻¹ olarak bulunmuştur[19].

B.Y. Almayahi ve ekibi tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada; Malezya Yarımadasının kuzeyinde toprak örneklerindeki radyoaktivite miktarları, HPGe dedektörü kullanılarak tayin edilmiştir. Toprak örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla 57±3, 68±4 ve 427±17 Bqkg⁻¹ olarak bulunmuştur. Bu çalışmada soğrulmuş doz oranı 88 nGyh⁻¹ ve yıllık etkin doz oranı ise 108 µSv olarak hesaplanmıştır[20].

E.O. Agbalagba ve R.A. Onoja tarafından 2012 yılında Nijerya'da yapılan bir çalışmada; NaI(Tl) sintilatör dedektörü kullanılarak toprak örneklerindeki ^{238}U , ^{232}Th ve

^{40}K doğal radyonüklidlerinin aktivite konsantrasyonları tayin edilmiştir. Aktivite konsantrasyonları sırasıyla; ^{226}Ra için ortalama $41.0\pm 5 \text{ Bqkg}^{-1}$, ^{232}Th için ortalama $29.7\pm 4 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve ^{40}K için ortalama $412.5\pm 20 \text{ Bqkg}^{-1}$ bulunmuştur. Yine bu çalışmada soğurulmuş doz oranı ortalama $30\pm 5.5 \text{ nGyh}^{-1}$, yıllık etkin doz oranı $37\pm 6.8 \mu\text{Sv}$ olarak hesaplanmıştır[1].

Karasal kaynaklı doğal radyasyon seviyelerinin belirlenmesi için; topraktaki radyonüklidlerin aktivitelerinin belirlenmesine yönelik ülkemizde de birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

2000 yılında G. Karahan ve A. Bayulken tarafından, Türkiye-İstanbul yüzey topraklarındaki doğal radyonüklid aktivite konsantrasyonları, HPGe dedektörü kullanılarak ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K için sırasıyla 21, 37 ve 342 Bqkg^{-1} olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada yerden 1metre yükseklikteki soğurulmuş gama dozu oranı 65 nGyh^{-1} olarak tespit edilmiştir[21].

Karakelle ve ekibi tarafından yapılan çalışmada; Kocaeli toprak örneklerindeki doğal radyoaktivite, HPGe dedektörü kullanılarak tayin edilmiştir. ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu 2 ± 0.6 ile $25\pm 6 \text{ Bqkg}^{-1}$ aralığında ^{238}U aktivite konsantrasyonu 11 ± 4 ile $49\pm 10 \text{ Bqkg}^{-1}$ aralığında, ^{40}K aktivite konsantrasyonu 161 ± 30 ile $964\pm 127 \text{ Bqkg}^{-1}$ aralığında ve ^{232}Th aktivite konsantrasyonu 11 ± 3 ile $65\pm 13 \text{ Bqkg}^{-1}$ aralığında ölçülmüştür[22].

2005 yılında F.S. Ereeş ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada; Manisa ili yüzey topraklarında doğal radyoaktivite konsantrasyonları NaI(Tl) sintilatör dedektörü kullanılarak tespit edilmiştir. Toprak örneklerindeki radyonüklidlerin ortalama konsantrasyonları ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K için sırasıyla, 28.5, 27.0 ve 340.0 Bqkg^{-1} olarak bulunmuştur. Ayrıca bu çalışmada ortalama yıllık etkin doz kişi başına $66 \mu\text{Sv}$ olarak bulunmuştur[23].

2007 yılında A. Bozkurt ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada; HPGe dedektörü kullanılarak Şanlıurfa yüzey topraklarındaki radyonüklid ortalama aktivite

konsantrasyonları ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K için sırasıyla 20.8, 24.95 ve 298.6 Bqkg^{-1} ve ^{137}Cs fisyon ürününün konsantrasyonu ise 9.08 Bqkg^{-1} olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada ortalama soğrulmuş doz oranı $60,9 \text{ nGyh}^{-1}$ ve bu radyonüklidlerden kaynaklanan yıllık etkin doz ise $46.9 \mu\text{Sv}$ olarak ölçülmüştür[24].

2007 yılında E. Kam ve A. Bozkurt Kastamonu ilinde yapılan çalışmada; HPGe dedektörü kullanılarak toprak örneklerindeki radyoaktivite konsantrasyonları ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K için sırasıyla 32.93, 27.17 ve 431.43 Bqkg^{-1} ve ^{137}Cs fisyon ürününün konsantrasyonu ise $8,02 \text{ Bqkg}^{-1}$ olarak ölçülmüştür[25].

2008 yılında N. Çelik ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada; Giresun topraklarındaki doğal radyoaktivite seviyeleri HPGe dedektörü kullanılarak tespit edilmiştir. Ortalama aktivite konsantrasyonları ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs için sırasıyla $33\pm 13 \text{ Bqkg}^{-1}$, $43\pm 14 \text{ Bqkg}^{-1}$, $733\pm 86 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve $318\pm 46 \text{ Bqkg}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Yine bu çalışmada, ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklidlerinden kaynaklanan ortalama etkin doz, $92 \mu\text{Sv}$ ve ^{137}Cs radyonüklidinden kaynaklanan ortalama etkin doz ise $11 \mu\text{Svy}^{-1}$ olarak ölçülmüştür[26].

2008 yılında M. Değerlier ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada; Adana ilinin yüzey topraklarındaki doğal radyonüklid konsantrasyonları HPGe dedektörü kullanılarak tayin edilmiştir. Ortalama aktivite konsantrasyonları ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K için sırasıyla 17.6, 21.1 ve 297.5 Bqkg^{-1} olarak bulunmuştur. Yine aynı çalışmada ortalama dış gama doz oranı 67 nGyh^{-1} ve yıllık etkin doz oranı ise $82 \mu\text{Sv}$ bulunmuştur[27].

H. Taşkın ve ekibi tarafından 2009 yılında yapılan çalışmada; Kırklareli topraklarındaki radyonüklidlerin aktivite konsantrasyonları, HPGe dedektörü kullanılarak tayin edilmiştir. ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs radyonüklidlerinin ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla, 37 ± 18 , 28 ± 13 , 40 ± 18 , 8 ± 5 ve $667\pm 281 \text{ Bqkg}^{-1}$ bulunmuştur. Bu çalışmada, ortalama gama dozu oranı $118\pm 34 \text{ nGyh}^{-1}$ ve yıllık etkin doz oranı ise $144 \mu\text{Sv}$ olarak hesaplanmıştır[5].

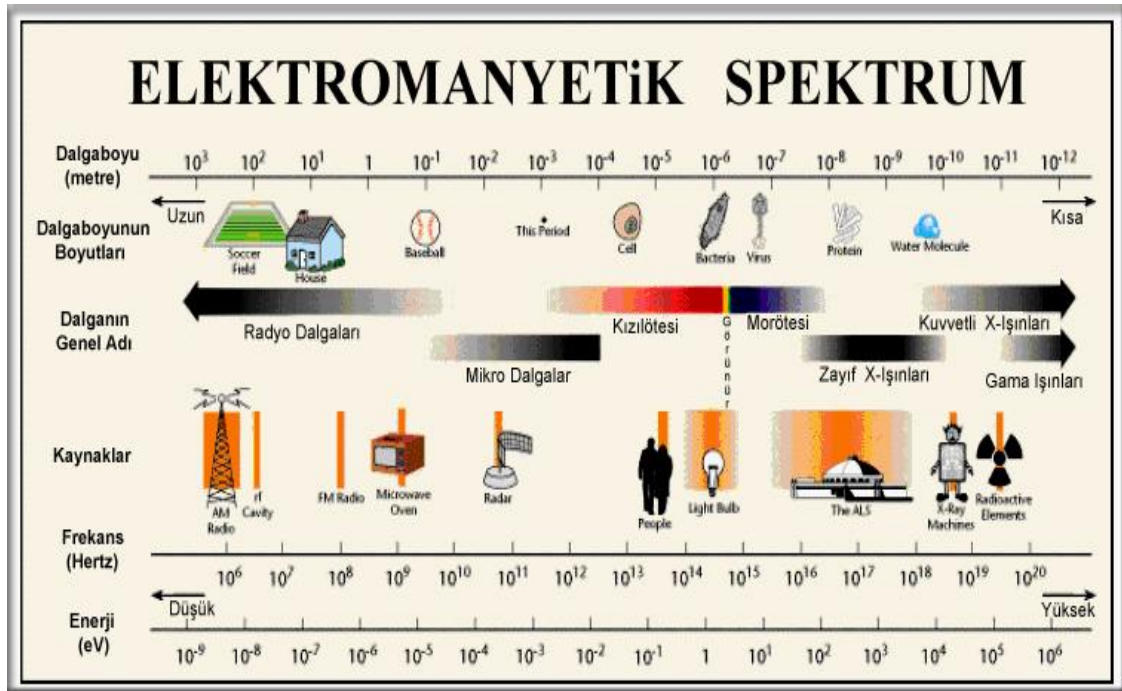
N. Çelik ve ekibi tarafından 2009 yılında yapılan çalışmada; HPGe dedektörü kullanılarak Doğu Karadeniz Bölgesinde toprak örneklerindeki doğal radyonüklid konsantrasyonları tespit edilmiştir. Aktivite konsantrasyonları ^{226}Ra için 12–120 Bqkg⁻¹, ^{232}Th için 13–121 Bqkg⁻¹ ve ^{40}K için 204–1295 Bqkg⁻¹ aralıklarında bulunmuştur. Bu radyonüklidlerin yanı sıra ^{137}Cs radonüklidinin aktivite konsantrasyonu toprak, liken ve yosun örneklerinde tespit edilmiş ve ^{137}Cs radonüklidinin aktivite konsantrasyonu toprak örneklerinde 27–755 Bqkg⁻¹ aralığında, liken örneklerinde 29–879 Bqkg⁻¹ aralığında ve yosun örneklerinde ise 67–1397 Bqkg⁻¹ aralığında bulunmuştur. Değerlerdeki bu farklılık topraktan radyonüklidlerin suyla uzaklaştırılması ve bitkilerde ise sabit kalmasına bağlanmıştır[28].

N. Çelik ve ekibi tarafından 2010 yılında yapılan çalışmada; gama spektrometresi yöntemi kullanılarak Ordu ili topraklarında ve Ordu ilinde kullanılan yapı malzemelerindeki radyonüklid konsantrasyonları tespit edilmiştir. Bu çalışmada doğal radyonüklidlerin yanı sıra ^{137}Cs radonüklidinin aktivite konsantrasyonu da tespit edilmiştir. Toprak örneklerindeki aktivite konsantrasyonları, ^{226}Ra için 13.4–151.7 Bqkg⁻¹, ^{232}Th için 14.3–98.5 Bqkg⁻¹, ^{40}K için 303–1107 Bqkg⁻¹ ve ^{137}Cs için 67.4–257.3 Bqkg⁻¹ aralıklarında bulunmuştur. Yapı malzemelerindeki ortalama aktivite konsantrasyonları ise ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K için sırasıyla 34.5, 26.9 ve 378.4 Bqkg⁻¹ olarak bulunmuştur[29].

2011 yılında A. Kurnaz ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada; Trabzon yüzey topraklarındaki doğal radyonüklid konsantrasyonları ve bir fisyon ürünü olan ^{137}Cs konsantrasyonu HPGe dedektörü kullanılarak tespit edilmiştir. Ortalama aktivite konsantrasyonları ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs için sırasıyla 41, 35, 437 ve 21 Bqkg⁻¹ olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada havadaki soğurulmuş gamma doz oranı 59 nGyh⁻¹ ve karasal gama radyasyonundan kaynaklanan yıllık ortalama etkin doz ise 72 µSv olarak hesaplanmıştır[30].

1.1. Radyasyon

Radyasyon, en temel anlamda doğal ya da yapay radyoaktif çekirdeklerin kararlı yapıya geçebilmek için hızlı parçacıklar ve elektromanyetik dalga şeklinde yayınladıkları fazla enerjileri ve boşlukta ve madde içerisinde hareket edebilen enerji olarak tanımlanabilir. Radyasyon, parçacık tipi radyasyon ve dalga tipi radyasyon olmak üzere iki kısımda incelenebilir. Parçacık radyasyonu; belli bir kütle ve enerjiye sahip çok hızlı hareket eden parçacık formundaki radyasyondur. Parçacık tipi radyasyona örnek olarak; alfa, beta parçacıkları ve nötronları verebiliriz. Dalga tipi radyasyon; belli bir enerjiye sahip ancak kütsüz radyasyondur. Dalga tipi radyasyon, titreşim yaparak ilerleyen elektrik ve manyetik enerji dalgaları gibidir. Bütün dalga tipi radyasyonlar, ışık hızıyla (3×10^8 m/s) hareket ederler[31].



Şekil 1.1: Elektromanyetik radyasyonun enerji spektrumu[35].

1.1.1. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

Etkileştiği madde içerisindeki atomları, yeteri kadar enerjisi olmadığı için iyonlaştıramayan sadece uyarabilen radyasyondur. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonun

atomların yörüngesinde sebep olduğu değişim, organizma üzerinde büyük bir hasara neden olmaz[33]. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon, 10 nm veya daha uzun dalga boylu ($\lambda \geq 10$ nm) elektromanyetik radyasyondur. Elektromanyetik spektrumun bu kısmı Şekil 1.1'de gösterildiği gibi; radyo dalgalarını, mikro dalgaları, görülebilir ışık ($\lambda = 770-390$ nm) ve morötesi (ultravioleto $\lambda = 390-10$ nm) bölgeyi kapsamaktadır[32].

1.1.2. İyonlaştırıcı Radyasyon

İyonlaştırıcı radyasyon, etkileştiği madde içerisindeki atomlardan elektron kopararak yüklü parçacıklar (iyonlar) oluşturan radyasyondur. Yüksek enerjili parçacık ve elektromanyetik dalgaların, atom yakınından geçerken oluşturdukları elektron yörüngesindeki değişimler ya da elektronun yörüngesinden çıkması iyonlaştırıcı radyasyonun etkileridir[33].

İyonlaşma olayı herhangi bir maddede meydana gelebileceği gibi insanlar da dahil tüm canlılarda meydana gelebilir. Bu nedenle gerekli önlemler alınmadığı takdirde, iyonlaştırıcı radyasyonlar tüm canlılar için zararlı olabilecek radyasyon türüdür. Başlıca iyonlaştırıcı radyasyon türleri, alfa radyasyonu, beta radyasyonu x-ışınları, γ -ışınları ve nötronlardır[34].

Alfa radyasyonu (α), kararsız atom çekirdeklerinden yayınlanan, pozitif yüklü helyum çekirdeğidir. Büyük kütleli bir parçacıktır, havadaki menzilleri (sadece 1-2 cm) kısadır ve ince kağıt veya cilt tarafından tamamen soğurulabilir. Bununla beraber, alfa parçacıkları yüklü parçacıklar oldukları için, solunum ya da sindirim yoluyla vücuda alındığında yakınındaki akciğer veya mide dokularının yüksek radyasyon dozuna maruz kalmasına ve özellikle solunum sisteminden geçerken kemik yüzeylerinde ve kırmızı kemik iliğinde tahribata neden olabilir.

Beta radyasyonu (β), kararsız bir atom çekirdeğinden yayınlanan elektrondur. Çok küçük kütleleri nedeniyle beta parçacıklarının doku veya malzemeler içine giricilikleri alfa parçacıklarından daha fazladır. Havada birkaç metre gidebilirler ve beta parçacıkları birkaç milimetre kalınlığındaki plastik, cam veya metal tabakalar tarafından

tamamen soğurulabilir. Beta parçacıkları α parçacıklarından daha az iyonlaşmaya sebep olurlar ve normal olarak cildin üst tabakasından öteye geçemezler. Ancak yüksek enerjili beta yayınlayıcılar ile aşırı derecede ışınlanma cilt yanıklarına neden olabilir. Bu tip beta yayınlayıcılar, solunum yada sindirim yoluyla vücuda alındığı takdirde tehlikeli olabilirler.

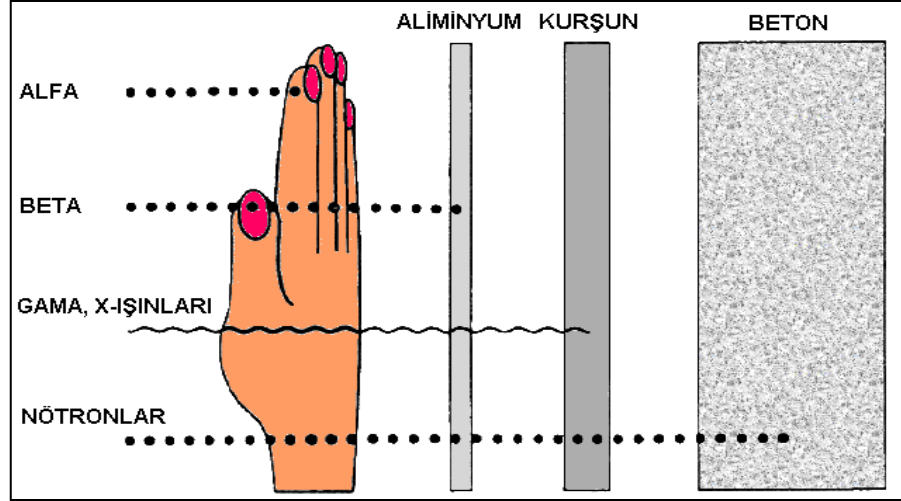
Nötron radyasyonu (n), Nötronlar özellikle nükleer reaktörlerde fisyon ve füzyon sırasında, kararsız atom çekirdeğinden yayınlanan yüksüz parçacıklardır. Nötronlar kozmik ışınların bir bileşeni olmasının yanı sıra genellikle yapay olarak üretilir. Nötronlar elektriksel olarak yüksüz parçacıklar olmaları nedeniyle çok girici olabilirler. Nötronlar doğrudan bir iyonlaşmaya sebep olmazlar. Ancak madde veya doku ile etkileştiklerinde iyonlaşmaya neden olan beta veya gama radyasyonlarının yayınlanmasına neden olurlar. Bu nedenle nötron radyasyonundan kaynaklanan ışınlamanın azaltılması ciddi zırhlama gerektirir. Nötronlar kalın beton, su veya parafin kütleleriyle durdurulabilirler[34].

Gama radyasyonu (γ); Bir radyoaktif bozunma (α veya β bozunumu) sonucunda uyarılmış durumda kalan kararsız atom çekirdeğinin taban enerji seviyesine geçerken yayınladığı yüksek enerjili fotonlar gama radyasyonu (ışınları) olarak adlandırılır. Gama ışınları, kütsüz ve yüksüzdürler. Şekil 1.1'de görüldüğü gibi elektromanyetik spektrumun en yüksek enerjili (dalga boyu en kısa) kısmını oluştururlar. Yüksek enerjilerinden dolayı madde içerisine giricilikleri α ve β parçacıklarına göre daha fazladır.

Gama radyasyonu madde içinden geçerken, elektronlarla etkileşerek atomlarda iyonlaşmaya neden olur. Bu nedenle, gama radyasyonu sindirim veya solunum yoluyla vücuda alınmadan da iç organlara ciddi radyasyon dozu verebilir. Çok girici olan bu radyasyona karşı, kurşun yada çelik gibi, yoğunluğu yüksek ve kalın malzemelerle zırhlama sağlanabilir[34,37]

X-ışınları, yüksek enerjili bir elektron demetinin çok hızlı yavaşlatılması veya atomların iç yörüngelerindeki elektron geçişleri ile meydana gelen ve gama

radasyonuna benzer yüksek enerjili fotonlardır. X-ışınları da gama ışınlar gibi çok girici olduğundan, yoğunluğu yüksek olan malzemelerle zırlıma gerektirir. Zırlımanın olmadığı durumlarda iç organlara ciddi radyasyon dozu verebilir. Şekil1.2’de iyonlaştırıcı radyasyon türlerinin giricilikleri gösterilmiştir[34].

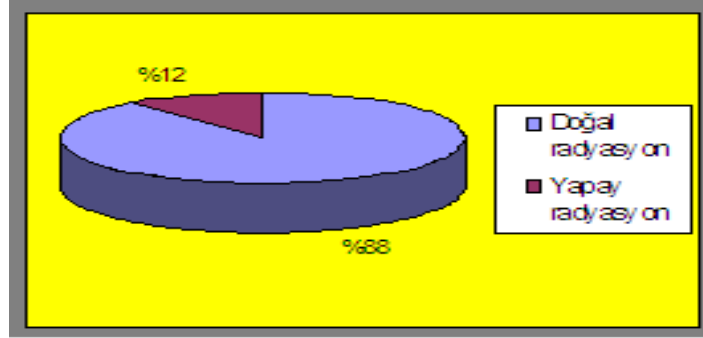


Şekil 1.2: İyonlaştırıcı radyasyonun giricilikleri[35].

1.2. Radyasyon Kaynakları

İnsanoğlu varoluşundan bu yana, sürekli olarak ve kaçınılmaz bir şekilde radyasyonla iç içe yaşamak zorunda kalmıştır. Dünyanın oluşumuyla birlikte tabiatta yerini alan çok uzun ömürlü (milyarlarca yıl) radyoaktif elementler ve dış uzaydan gelen kozmik ışınlar yaşadığımız çevredeki doğal radyasyon düzeyini oluşturmaktadır. Geçtiğimiz yüzyılda bu doğal düzey, nükleer bomba denemeleri ve bazı teknolojik ürünlerin kullanımı ile bir hayli artış göstermiştir. Maruz kalınan doğal radyasyon seviyesinin büyüklüğünü belirleyen birçok neden vardır. Yaşanılan yer, bu yerin toprak yapısı, barınılan binalarda kullanılan malzemeler, mevsimler, kutuplara olan uzaklık ve hava şartları bu nedenlerden bazılarıdır. Yağmur, kar, alçak basınç, yüksek basınç ve rüzgar yönü gibi etkenler de doğal radyasyon seviyesinin büyüklüğünü belirler. Radyasyon kaynaklarını, doğal ve yapay olmak üzere iki sınıfa ayırabiliriz[36]. Tablo 1.1’de doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozlarının oransal değerleri verilmiştir.

Tablo 1.1: Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozlarının oransal değerleri[35].



Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozunun dünya ortalaması 2.7 mSv/yıl'dır. Bu dozun, radyasyon kaynaklarına göre dağılımı ise Tablo 1.2' de verilmiştir.

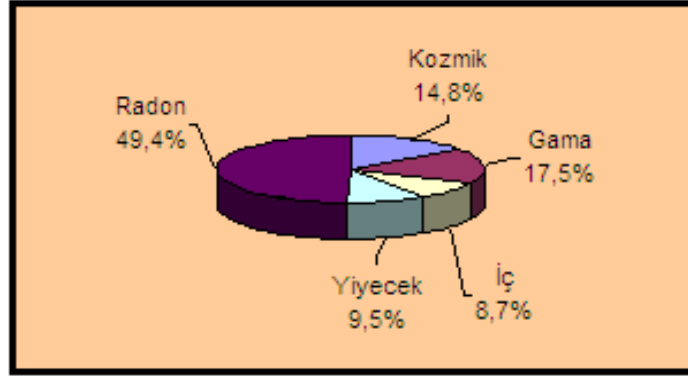
Tablo 1.2: Radyasyon dozunun kaynaklara göre dağılımı[35].

Kozmik	0,39 mSv
Gama	0,46 mSv
İç	0,23 mSv
Radon	1,30 mSv
Tıbbi	0,30 mSv
Serpinti	0,007 mSv
Mesleki	0,002 mSv
Atıklar	0,001 mSv
Tüketici Ürünleri	0,0005 mSv

1.2.1. Doğal Radyasyon Kaynakları

Doğal radyasyonlar, Güneş'ten, yıldızlardan gelen kozmik ışınlarla yer kabuğunda (taşa, toprakta, havada, suda, bitkilerde ve tüm canlılarda) bulunan doğal radyoaktif maddelerden yayılan radyasyonlardır. Doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozlarının oransal değerleri Tablo 1.3'de verilmiştir.

Tablo 1.3: Doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozlarının oransal değerleri[35].

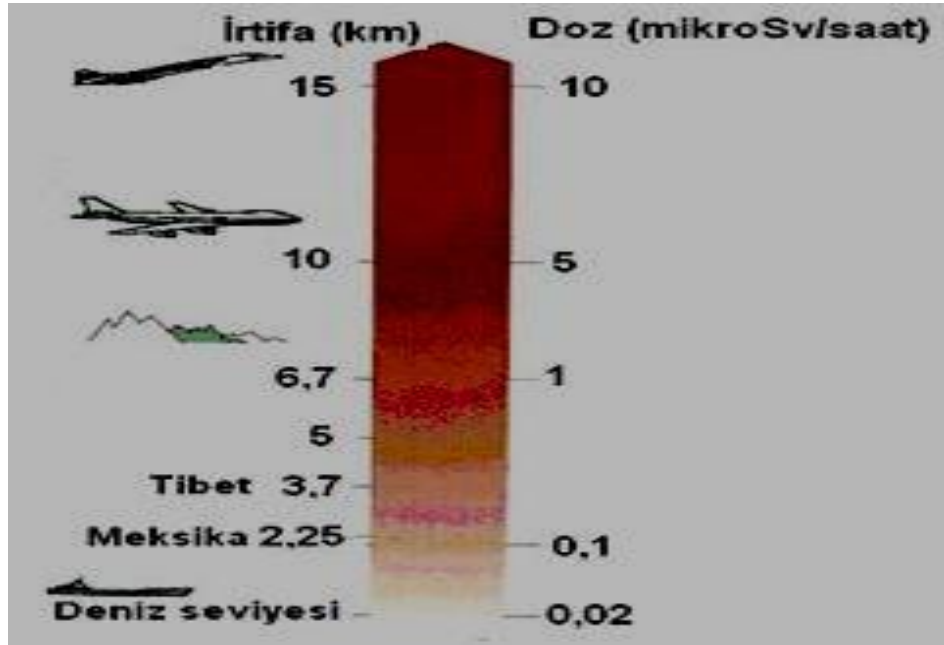


1.2.1.1. Kozmik ışınlar

Doğal radyasyonun bir kısmını Güneş ve yıldızlardan kaynaklanan yüksek enerjili kozmik ışınlar oluşturmaktadır. Bu ışınların büyük bir kısmı dünya atmosferinden geçmeye çalışırken tutulurlar. Sadece küçük bir miktarı yerküreye ulaşır. Kozmik ışınlar %93 hızlı protonlardan (hidrojen atomu çekirdeklerinden), %6,3 alfa parçacıklarından (helyum atomu çekirdeklerinden) ve bir miktar da trityum ve karbon 14 çekirdeklerinden oluşur. Bunlar; atmosferdeki hava molekülleriyle ve atomlarıyla çarpışarak yeni çekirdekler üretip, enerjilerini gitgide aktararak azalır ya da yitirilirlir. Bunun sonunda, kozmik ışınlardan ikincil ve daha sonraki bir dizi tepkimelerle üretilen protonlar, nötronlar, elektronlar, mezonlar ve gamalar (fotonlar) gibi daha birçok ışın yeryüzüne ulaşmaktadır. Mezonlar, kütleleri elektronla proton arasında olan ve atom çekirdeklerindeki komşu parçacıklar arasında büyük bir hızla gidip gelen, çok kısa ömürlü elementer parçacıklardır. Yeryüzünde; deniz düzeyindeki kozmik ışınların %90'ı mezonlardan oluşur. Ancak bunlar saniyeden çok daha kısa bir sürede bozunarak, elektriksel yüklerine göre ya bir elektronla ya da bir pozitronla birlikte iki nötrino yayarlar. Mezonların şiddeti, bir metre kalınlığındaki kurşunu geçerken bile ancak %50 azalır. Bu nedenle, mezonlar derin maden ocaklarında ve derin deniz diplerinde de ölçülmüşlerdir.

Kozmik ışınların şiddeti, dünyanın manyetik alanına ve yerden yüksekliğe bağlı olarak değişmektedir. Deniz düzeyinden yükseldikçe, kozmik ışınların şiddeti yaklaşık olarak

her 1500 metrede iki katına çıkar ve dolayısıyla yüksek yerleşim yerlerinde yaşayanların, uçak personelinin, uzun uçuş yapan insanların alacakları radyasyon dozu da artar. Deniz düzeyindeki bir yerleşim yerinde kozmik ışınlardan kaynaklanan yıllık ortalama radyasyon dozu, 0,25-0,3 mSv iken, deniz seviyesinden 3000 metre yükseklikte 1,1 mSv ve 10.000 m yüksekliğindeyse ortalama 44 mSv'e yükselmektedir. Bu radyasyon dozu, deniz düzeyindeki değerinin 150 katına yakındır. Bu nedenle kozmik ışınlardan uçak personelinin aldığı radyasyon dozları, nükleer reaktörlerde, nükleer tıpta ve diğer nükleer araştırma merkezlerindeki radyasyonla uğraşan personel gruplarının aldıkları yıllık ortalama dozdan çok fazladır.[35].



Şekil 1.3: Kozmik ışınlardan alınan radyasyon dozunun yüksekliğe göre değişimi[35].

1.2.1.2. Yeryüzü kaynaklı doğal radyasyon

Yeryüzü kaynaklı doğal radyasyonlar, çevredeki toprak, su, hava ve yapı malzemesi gibi daha birçok ortamda doğal olarak bulunan radyoaktif maddelerden yayılan radyasyonlardır. Bu doğal radyoaktif maddelerin çoğu milyarlarca yıl (yerküresinin jeolojik yaşı kadar) yarılanma süresine sahip olmakla birlikte, bunların bozunumuyla meydana gelen radyoizotopların yarılanma süreleri çok daha kısadır. Ayrıca yüksek enerjili kozmik ışınlar, atmosferin yukarı tabakalarında sürekli olarak yeni radyoaktif

maddeler de üretmektedir. Bunlar arasında özellikle trityum (^3H) ve karbon (^{14}C) radyoizotopları hava akımlarıyla ve çeşitli yağışlarla yeryüzüne inerler.

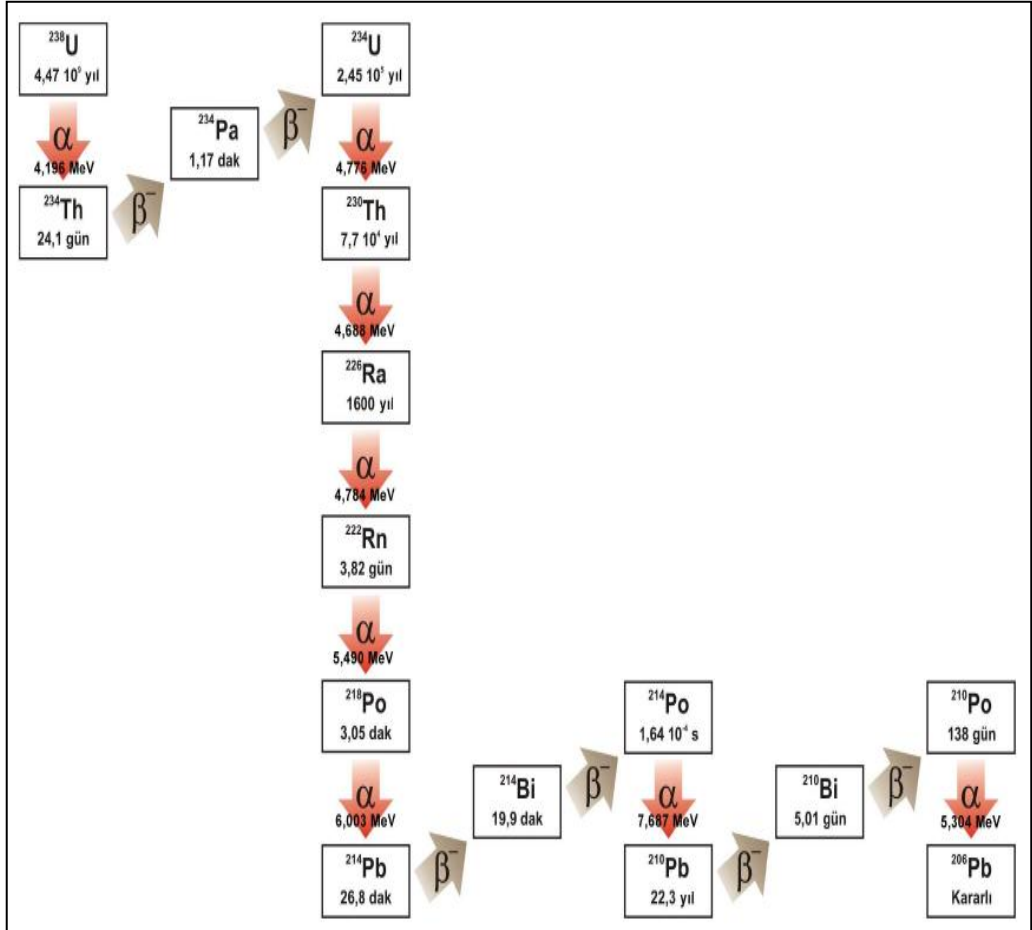
Dünyanın başlangıcından beri var olan ve yer kabuğunda bulunan karasal radyasyonu çeşitli radyonüklidler oluşturmaktadır. Soğruldukları doza göre insanlar için en önemli olan radyonüklidlerin başında ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th ile bunların bozunum ürünleri olan çeşitli radyonüklidler gelmektedir. Bunların tümü bir dizi radyoaktif bozunma sonucunda kurşuna (Pb) dönüşerek, atom çekirdekleri kararlı duruma geçerek son bulurlar[37].

Uranyum; tabiatta hiçbir zaman serbest olarak bulunmaz ancak çeşitli elementlerle birleşerek uranyum minerallerini meydana getirir. Oksijenle birleşmesi en kolaydır. Hemen her tip kayaç içerisinde ve sulara az miktarda da olsa bulunabilir[42]. Uranyum doğal elementlerin en ağırlı olup atom çekirdeğinde 92 proton, 146 nötron ve 7 enerji düzeyinde 92 elektron bulunur. Atom yarıçapı 1,43 Å, erime noktası 1132 °C ve kaynama noktası 3927 °C'dir. Ayrıca uranyum değişik sıcaklıklarda farklı özellikler gösteren allotropik bir metaldir[43]. Uranyumun doğada kütle sayıları 230, 234, 235 ve 238 olmak üzere 4 izotopu bulunur. Bunlardan *U-236* 'ın bulunma oranı % 99,28 olup genellikle *U-234* ile dengededir[44].

Radyoaktif enerjinin en önemli kısımları, üç bozunum serisinden meydana gelir. Bu seriler *U-238*, *U-235* ve *Th-232*' dir. *U-235*, aktinyum serisinin ana izotopu olup bulunma oranı % 0,71'dir. Doğada bulunan radyoaktif elementlerin çoğunluğu uranyum-238'in bozunma zincirinde yer alır. Uranyum-238, 14 esas çekirdeğin başıdır ve alt serilere bölünür. Uranyum-238 için bozunma zinciri Şekil 1.4'de gösterilmiştir. *U-230* ise *U-238* serisinin bir üyesi olup yarı ömrü 20,8 gündür[44].

Uranyum, radyoaktif bozunma serisinin ana elemanı *U-238*'dir. Bu nüklidler, Şekil 1.4'de görüldüğü gibi, 8 alfa ve 6 beta parçacık emisyonu içerir. Uranyum serisinin elemanları (kolları) büyük sıklıkla kararsızlık halinde bulunmakla birlikte sabit bolluk oranını muhafaza etmişlerdir. Uranyum serisinin gamma spektrumu, farklı enerjilerde birçok gamma ışını içermesinden dolayı komplekstir. Fakat nicel ölçümler yapabilmek

için karakteristik bir piki yoktur. Uranyumun kendisinin karakteristik gamması olmamasına karşılık, nicel analizler yapabilmek için Bi-214'ün 1,76 MeV'lik piki kullanılır[38].

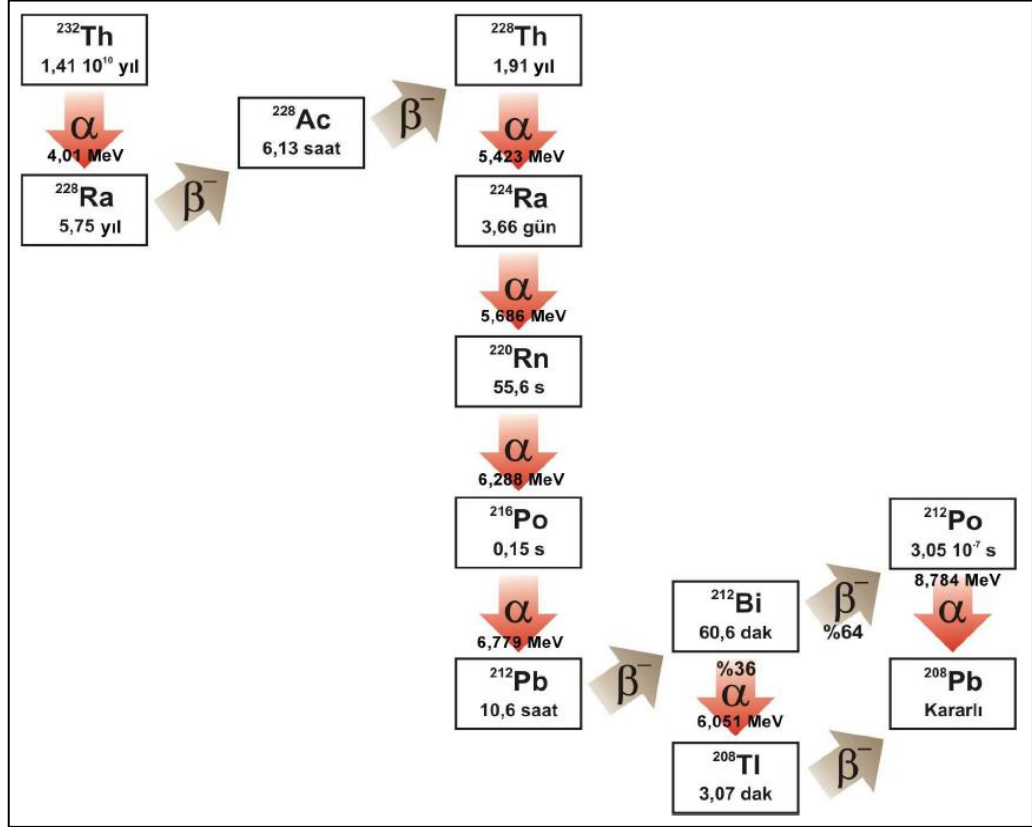


Şekil 1.4: U-238'in bozunma ürünleri şeması[38].

Toryum; 1828 yılında Jöns Jacob Berzelius tarafından keşfedilen ve periyodik tabloda aktinit serisinin ikinci üyesi olan toryum, yer kabuğunun % 0,0007'lik kısmını oluşturmaktadır. Toryum; uranyum gibi doğada serbest halde bulunmayıp, 60 civarında mineralin yapısı içinde yer almaktadır. Şekil 1.5'de görüldüğü gibi Toryum serisi 11 ürün nükleoit içerir. Kompleks bir gama spektrumu verir ve hemen hemen hepsi daima kararsızdırlar.

Toryumun en önemli radyo izotopu atom numarası 90, atom ağırlığı 232,0381 olan Th-232'dir ve buda kararlı Pb-208 izotopuna bozunur. Th-232'nin yarı ömrü 1.39×10^{10} yıl, spesifik aktivitesi ise 4.1 Bq/mg'dır. Doğal kaynakların jeolojik ölçüm ve tahlilleri

amacıyla karakteristik üç gama enerjisi 1.461 MeV (K), 1.764 MeV (U) ve 2.615 MeV (Th) kullanılır[45].



Şekil 1.5: Th-232'in bozunma ürünleri şeması[45].

Potasyum; K-40, potasyumun doğal radyoaktif izotopu olup, yer kabuğunun % 2,6'sını oluşturur ve doğal olarak en bol bulunan radyoaktif izotoptur. Doğada bulunan 3 potasyum izotopu vardır. Bunlar sırasıyla; K-39, K-41 ve K-40'tır ve bu izotoplardan sadece K-40 radyoaktiftir. K-40'ın yarı ömrü, $1,26 \cdot 10^9$ yıl ve spesifik aktivitesi 3,3 Bq/g' dır.

K-40; iki çeşit bozunma yapmaktadır. Birincisi, Ca-40'a bozunduğu beta ışıması, ikincisi ise Ar-40'a bozunduğu elektron yakalamasıdır ve bozunumu sonucunda oluşan bu ürün çekirdekler kararlıdır. Bu bozunumlarda; %89,3 bozunma sabiti ile yayılan β^- parçacıklarının enerjileri, 1.311 MeV iken; %10,7 bozunma sabiti ile oluşan elektron yakalama olayı sonucu 1460,8 keV'lik γ -ışını yayınlanır[68].

Radyum ilk olarak 1898 yılında, Marie ve Pierre Curie tarafından bulunmuştur. Radyum α , β ve γ ışınları yayar. Berilyum ile karıştırıldığı zaman nötron üretir. Radyumun bütün izotopları radyoaktiftir. $U-226$ ailesi elemanı olup, toprakta, kayalarda, yapı malzemelerinde, su ve gıda maddelerinde bulunmakta ve oldukça geniş bir dağılım göstermektedir. 10 ton uranyum minerali içerisinde 1 g radyum bulunmaktadır. Uranyumun radyoaktif parçalanması sonucunda ve radyum klorür tuzunun elektrolizi ile elde edilebilir. Atom numarası 88'dir. Kütle numarası 213'den 230'a kadar, yarı ömrü ise 10^{-3} saniyeden 1620 yıla kadar değişen yapay ve doğal 14 radyoaktif izotopu olduğu bilinmektedir. ^{223}Ra , ^{224}Ra , ^{226}Ra ve ^{228}Ra radyumun doğal izotoplarıdır[44].

Radon, 1900 yılında, Friedrich Ernst Dorn tarafından keşfedilmiştir. Renksiz, kokusuz, tatsız, 86 atom numarası ile periyodik cetvelin soy gazlar sınıfında yer alan radon; kaya, toprak ve sudaki doğal uranyumun radyoaktif bozunması sonucunda oluşur. Bu bozunma zincirinin ana atomları, bütün doğal malzemelerde bulunabilir. Bu yüzden radon, tüm yüzey kaya ve toprak parçalarından ve yapı malzemelerinden ortama salınır.

Radonun; ^{222}Rn (Radon), ^{220}Rn (Toron), ^{219}Rn (Aktinon) olmak üzere üç doğal izotopu vardır. Doğal radyoaktif çevrede çok az bulunan Aktinon (^{219}Rn), toprağın yüzey tanecikleri arasında oluşsa bile yarı ömrünün çok kısa (3,98 s) olması sebebi ile hemen bozunmaya uğrar. Yarı ömrü (54,5 s) Aktinona göre daha uzun olan Toron (^{220}Rn) toprak gazında ve yer atmosferinde bir yoğunluk oluşturur. Üç radon izotopu arasında en uzun yarı ömürlüsü (3,85 gün) ^{222}Rn 'dir. ^{226}Ra 'nın bozunumu sonucu oluşur.

Radon izotopları içinde gerek doğada bulunma çokluğu gerekse yarı ömrünün gün mertebesinde olması nedeniyle ^{222}Rn , atmosferde diğer radon izotoplarından daha çok bulunur. Radon, uranyum ve radyumun bulunduğu her yerde bulunur. Araştırmalar radon gazının, biri toprakta diğeri ise yer altı ve yüzey sularında olmak üzere başlıca iki ortamda bulunduğunu ve atmosfere bu ortamlardan yayıldığını göstermektedir. Kapalı ortamlarda radon gazı konsantrasyonunun kontrolü amacıyla, ülkeler ve uluslararası kuruluşlar tarafından limit değerler belirlenmiştir. Limit değerlerin aşılması halinde, radon konsantrasyonunu düşürücü tedbirlerin alınması tavsiye edilmektedir.

Uluslararası Atom Enerji Ajansı Temel Güvenlik Standartları çerçevesinde, radon için tavsiye edilen düzeyler $200-600 \text{ Bq/m}^3$ olarak belirlenmiştir. Türkiye'de müsaade edilebilir radon konsantrasyonu ise 400 Bq/m^3 'tür[38].

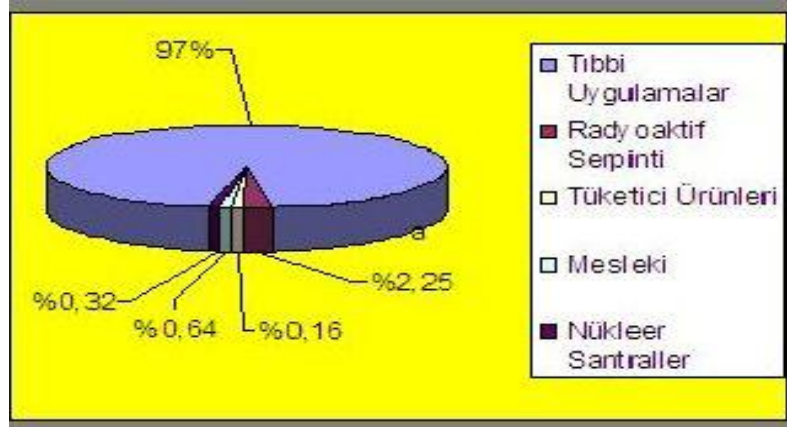
1.2.2. Yapay Radyasyon Kaynakları

İnsanlar doğal radyasyon kaynaklarının yanı sıra, hızla ilerleyen teknolojinin getirdiği yapay radyasyon kaynaklarından da ışınlanmaktadır. Gelişmiş endüstriyel ekonomilerin ve yüksek yaşam standartlarının, doğada mevcut olmayan bazı radyasyon kaynakları kullanılmadan süreklilik gösterebileceğini düşünmek şimdilik pek mümkün gözükmemektedir. İşte bu yüzden insanoğlu, teknolojik gelişiminin gereği olarak, bazı radyasyon kaynaklarını yapay yollarla üretme ihtiyacı duymuştur. Bu kaynaklar, birçok işin daha iyi, daha kolay, daha çabuk, daha ucuz ve daha basit yapılmasına olanak sağlar. Bazı durumlarda ise alternatifleri yok gibidir.

Yapay radyasyon kaynakları da tıpkı doğal radyasyon kaynakları gibi belli miktarlarda radyasyon dozuna maruz kalınmasına neden olurlar. Ancak bu doz miktarı, talebe bağlı olarak artsa da, doğal kaynaklardan alınan doza göre çok daha düşüktür. Doğal radyasyon kaynaklarının aksine tamamen kontrol altında olmaları da maruz kalınacak doz miktarı açısından önemli bir özelliktir.

Nükleer bomba denemelerinden kaynaklanan radyoaktif serpintiler (fallout), Çernobil kazası gibi nükleer reaktör kazaları sonucunda meydana gelen serpintiler, nükleer reaktörlerin işletilmesi sırasında ortaya çıkan radyoaktif maddeler, tıbbi, zirai ve endüstriyel amaçla kullanılan X ışınları ve yapay radyoaktif maddeler başlıca yapay radyasyon kaynaklarıdır. Bunların yanı sıra bilim ve teknoloji uygulamalarında kullanılan iyonlaştırıcı radyasyon kaynakları, iyonlaştırıcı ışınlar yayan televizyon gibi aygıtlar, çeşitli aygıtlarda kullanılan radyoaktif kaynaklar az da olsa başlıca yapay radyasyon kaynaklarıdır[37]. Toplumda oluşan radyasyon dozlarına yukarıda verilen kaynakların katkıları Tablo 1.4'de verilmiştir.

Tablo 1.4: Yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozunun oransal değerleri[35].



1.3. Radyasyon Birimleri

Uluslararası Radyasyon Birimleri Komitesi (ICRU), radyasyon çalışmalarında kullanılan kavramlar olan aktivite, ışınlama dozu, soğurulma dozu ve doz eşdeğeri için özel birimler tanımlamıştır. Bunlar sırasıyla; Curie (Ci), Röntgen (R), rad ve rem'dir. Bu özel birimler yerine tüm dünyada kullanılan birimlerin aynı olması düşüncesi ile M.K.S. sistemini esas alan "Uluslararası Birimler Sistemi (SI)" kullanılmaktadır. Aynı kavramlar için SI birimleri sırasıyla Becquerel (Bq), Coulomb/kg, Gray (Gy), ve Sievert (Sv) olarak seçilmiştir. Tablo 1.5'de dönüşüm birimleri ve dönüşüm faktörleri verilmiştir[35].

Tablo 1.5: Radyasyon birimleri ve dönüşüm faktörleri[39].

Büyüklik	SI Birimi ve Sembolü	Eski Birimler ve sembolü	Dönüşüm Faktörü
Aktivite	Becquerel(Bq)	Curie (Ci)	1Ci = 3.7×10^{10} Bq
İşinlama	Röntgen (C/kg)	Röntgen (R)	1 C/kg = 3876 R
Soğurulmuş Doz	Gray (Gy) (j/kg)	Rad (rad)	1 Gy=100 rad
Eşdeğer Doz	Sievert (Sv)	Rem (rem)	1 Sv=100 rem

1.3.1. Aktivite Birimi

Aktivite birimleri, Becquerel (Bq) veya Curie (Ci)' dir. Curie, aktivitenin özel birimi olup, saniyede 3.70×10^{10} çekirdeğin parçalandığı bir maddenin aktivitesi, 1 Ci' dir. Aktivitenin SI' ye göre yeni birimi Becquerel'dir ve saniyede bir çekirdeğin parçalandığı maddenin aktivitesi 1 Bq'dir. Bu iki birimin birbirine dönüşümü $1 \text{Ci} = 3.70 \times 10^{10} \text{Bq} = 37 \text{GB}$ (giga becquerel) olarak gerçekleşmektedir. Görüldüğü gibi Ci, Bq' e göre daha büyük değerlerde bir birim olup, genelde aktivitesi büyük olan, Becquerel ise aktivitesi küçük olan radyasyon kaynakları için kullanılır[40].

1.3.2. Işınlama Birimi

Işınlama birimi, hava içinden geçen bir radyasyon demetinin meydana getirdiği iyonlaşmanın ölçüsü olup enerjileri 3MeV'e kadar olan X-ışınları ya da γ -ışınları için tanımlanmıştır. Özel birimi Röntgen (R)'dir ve normal hava şartlarında (0°C , 760 mm Hg basınç altında) havanın 1 kg'ında 2.58×10^{-4} C' luk elektrik yükü değerinde pozitif ve negatif iyonlar oluşturan x ve gama ışını miktarı 1 Roentgen olarak tanımlanır. Roentgen'in SI sistemindeki karşılığı Coulomb/kg'dır ve "1 Coulomb/kg; normal hava şartlarında havanın 1 kg'ında 1 Coulombluk elektrik yükü değerinde pozitif ve negatif iyonlar oluşturan X ve gama ışını miktarı" şeklinde tanımlanmıştır. Bu iki birimin birbirine dönüşümü $1 \text{C/kg} = 3876 \text{R}$ veya $1 \text{R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$ şeklindedir[35,40].

1.3.3. Soğurulmuş Doz

Soğurulmuş doz her ortam ve her türdeki iyonlaştı radyasyonlar için tanımlanmış bir birim olup, Radyasyonun insan dokusu gibi herhangi bir maddenin birim kütlesine aktardığı enerji miktarını göstermektedir.

Soğurulmuş doz için kullanılan eski birim rad (Roentgen Absorbed Dose)'dir. 1Rad herhangi bir malzemenin 1 kilogramına 10^{-2} joulluk enerji veren radyasyon miktarı olarak tanımlanmıştır. SI birim sisteminde soğurulmuş (absorblanan) doz birimi gray

(Gy) olup, 1kg'lık bir maddeye 1 joule'lük enerji veren herhangi bir radyasyon dozu miktarıdır. $1 \text{ Rad} = 10^{-2} \text{ J/kg}$ olup, SI biriminde ise $1 \text{ Gray(Gy)} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$ tır[35,37].

1.3.4. Eşdeğer Doz Birimi

Farklı radyasyon tiplerinin biyolojik maddeler ile etkileşim yolları farklıdır. Eşit miktarda soğurulmuş dozlar aynı biyolojik etkiye neden olmayabilir. Bu nedenle farklı radyasyon tiplerinin, bir doku ya da organ üzerinde oluşturacağı biyolojik hasarları inceleyebilmek için yeni bir niceliğe gereksinim duyulmuştur. Bu nicelik eşdeğer doz olarak adlandırılır.

Eşdeğer doz, soğurulmuş dozun belirli bir radyasyon tipinin doku içindeki enerji dağılımını dikkate alan kalite faktörü ile çarpımına eşittir ve H_T ile sembolize edilmiştir. Dokuda eşdeğer doz;

$$H_T = \sum W_R D_{TR} \quad (1.1)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada; D_{TR} , R radyasyonundan kaynaklanan ve T dokusu üzerinden ortalaması alınmış soğurulmuş doz ve W_R ise radyasyon ağırlık faktörüdür. Bu şekilde tanımlandığında eşdeğer doz, farklı radyasyon tiplerine maruz kalması durumunda belirli bir doku veya organın hasar görme olasılığının göstergesidir.

Eşdeğer dozun eski birimi Rem (Roentgen Equivalent Man)'dir. SI birim sisteminde ise Eşdeğer dozun birimi Joule/kg olup Sievert (Sv) adı verilmiştir. Sievert ile Rem arasındaki ilişki $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$ ve $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ olarak verilir.

Kalite faktörü, iyonlaştırıcı radyasyonların madde içerisinden geçerken birim yol başına kaybettiği enerjinin bir göstergesidir. Radyasyonun tipine ve enerjisine bağlı bir değerdir. Her bir radyasyon türü için farklı kalite faktörü değeri verilmektedir Tablo 1.6'da çeşitli radyasyon tipleri için kalite faktörleri verilmiştir. [34,35,37].

Tablo 1.6: Farklı radyasyon tipleri için kalite faktörleri[35].

Radyasyon Tipi	W_R
X ve Gama Işınları	1
Elektronlar ve Beta Parçacıkları	1
Nötronlar; enerjileri < 10 keV	3
Nötronlar; enerjileri > 10 keV	10
Alfa Parçacıkları	20

1.3.5. Etkin Doz Birimi

Ağırlıklı eşdeğer dozların toplamı etkin doz olarak ifade edilir ve vücuttaki çeşitli organ ve dokuların radyasyona duyarlılığı farklı olduğundan, bunları karşılaştırabilmek ve vücudun tümünün etkilendiği dozu belirleyebilmek için kullanılır. Aynı zamanda etkin doz radyasyonun enerji ve tipini dikkate alır ve tüm vücudun radyasyona maruz kalması durumunda ortaya çıkabilecek toplam sağlık hasarının iyi bir göstergesidir. Vücuttaki tüm doku ve organların eşdeğer dozunun doku ağırlık faktörü ile çarpılması sonucunda elde edilen değerlerin toplamı etkin doz değerini verir ve etkin doz;

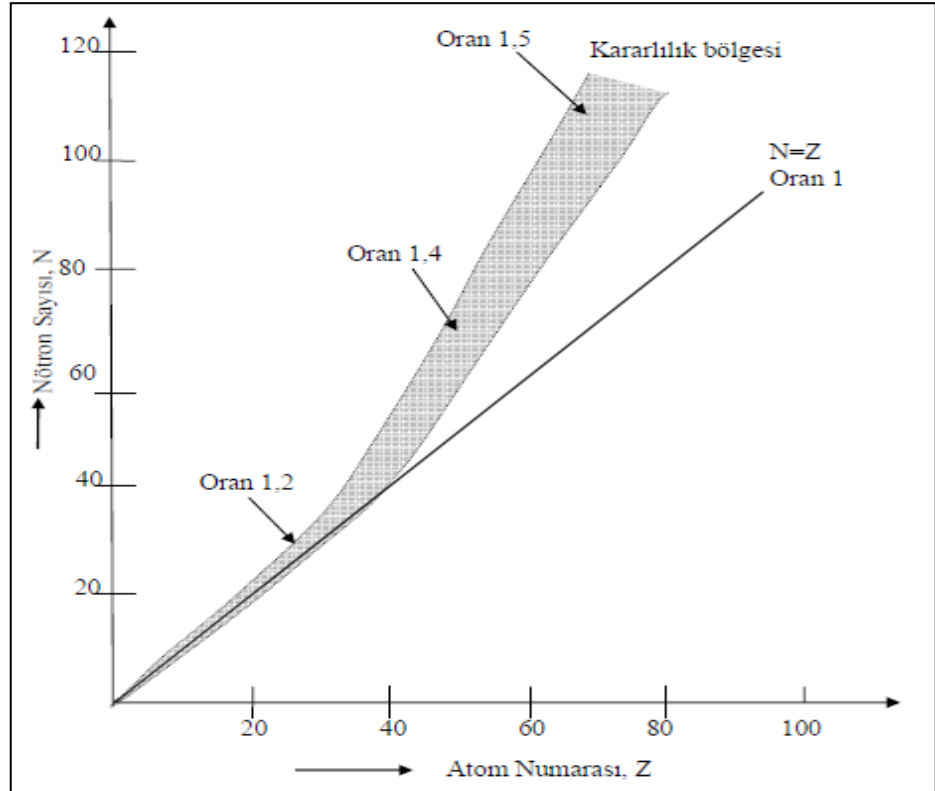
$$E = \sum_T W_T H_T \quad (1.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada W_T ; T dokusu veya organının ağırlık faktörü ve H_T ; T dokusu veya organının eş değer dozudur. Ek.1’de bazı doku ve organların doku ağırlık faktörleri verilmiştir. Etkin doz birimi Sievert’tir ve radyasyondan korunma amaçlı mili Sivert(mSv) kullanılır[35,37].

1.4. Radyoaktivite

Radyoaktivite kararsız olan bir elementin, çeşitli parçacıklar salarak veya ışıma yaparak kararlı ve başlangıçtakinden fiziksel ve kimyasal olarak farklı bir elemente dönüştüğü bir süreç olarak tanımlanabilir. Her atomun çekirdeği şüphesiz kararsız değildir; yani radyoaktivite çekirdek için ayırt edici fiziksel bir özelliktir. Kararsız olan çekirdekler; alfa (α), beta (β) ve gamma (γ) gibi yüksek enerjili parçacıklar salarak kararlı hale gelirler. Kararlı çekirdekler de dışarıdan uyarılma yoluyla kararsız hale getirilebilir. Bu olay yapay radyoaktivite olarak adlandırılır[48,49].

Kararlılık bir genelleme değildir ancak bazı çekirdeklere özgüdür ve nötron sayısının proton sayısına oranına (N/Z değerine) bağlıdır. Şekil 1.6'da bilinen çekirdeklerin nötron ve proton sayılarına göre dağılımı verilmiştir. Görüldüğü gibi kararlılık eğrisi ve civarındaki dar kararlılık bölgesi N=Z olan hafif çekirdekleri temsil ederken daha ağır çekirdeklere gidildikçe N/Z>1 olmaktadır. En ağır kararlı çekirdek ${}_{83}\text{Bi}^{207}$ ve bu oran yaklaşık olarak 1,5'tir. N/Z>1,5 olan diğer tüm çekirdekler ise kararsızdırlar[48].



Şekil 1.6: Kararlı çekirdekler için N-Z grafiği[48].

1.4.1. Radyoaktif Bozunma Kanunu

Fiziksel açıdan bir radyoaktif numune içindeki herhangi bir atomun, ne zaman bozunacağını bilmek mümkün değildir. Radyoaktif bozunma zamana göre rastgele gerçekleşir ve ancak istatistik ve de olasılık kuramları çerçevesinde bazı özellikleri bulunabilir. Önemli bir yaklaşım tek tek çekirdeklerle ilgilenmek değil zamana göre daima sabit kalan bir nicelik olan bir kavramı, bir radyoaktif çekirdeğin birim zamanda bozunma olasılığını incelemektir. Bu olasılık radyoaktif bozunma sabiti olarak adlandırılmakta ve genellikle λ ile gösterilmektedir. Radyoaktivitenin bozunma yasasına göre, radyoaktif çekirdeğin yaşı ne olursa olsun bozunma olasılığı (λ) sabittir.

Radyoaktif bir çekirdekte birim zaman aralığında meydana gelen bozunma sayısı çekirdeğin bozunma hızı veya aktivitesi olarak tanımlanır. Eğer herhangi bir t anında N tane radyoaktif çekirdek varsa ve numuneye dışarıdan çekirdek ilave edilmiyorsa sonsuz küçük dt zaman aralığı içinde bozunan çekirdek sayısı, denklem

$$dN(t) = -\lambda N(t)dt \quad (1.3)$$

ile verilir. Denklem 1.3'den anlaşılacağı üzere kısa bir dt süresindeki bozunma sayısı bozunmamış atomların sayısı (N) ve dt zaman aralığıyla doğru orantılıdır. Baştaki eksi işareti zamanla radyoaktif atomların azaldığını göstermektedir. 1.3 denklemini düzenlersek,

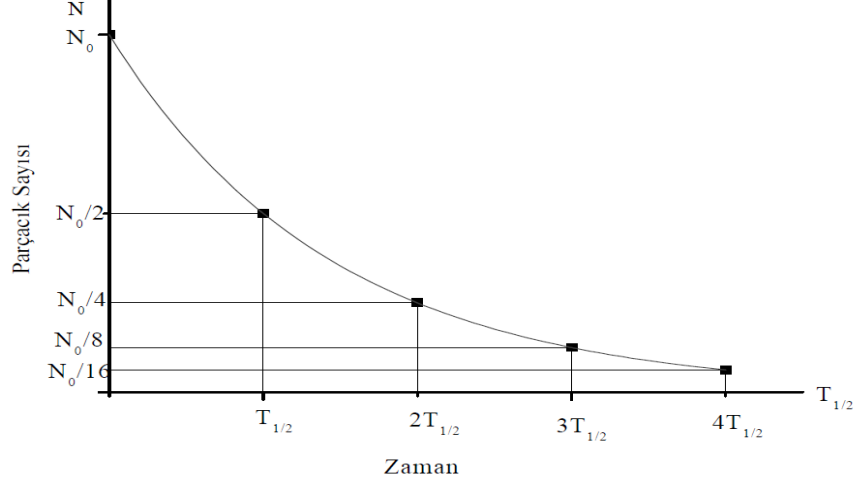
$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (1.4)$$

olur ve (1.4) denkleminin t=0 iken radyoaktif atomların sayısının N_0 olduğu farz edilerek integrali alınırsa;

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

elde edilir. Burada t zamanı, N(t) t zamanı sonunda arta kalan çekirdek sayısını, N_0 başlangıçtaki (t=0 iken) çekirdek sayısını ve λ radyoaktif numunenin bozunma sabitini

gösterir ve birimi s^{-1} dir. Şekil 1.7’de bir radyoaktif çekirdeğin üstel bozunma denklemine ait çekirdek sayısındaki değişimi gösterilmektedir. Radyoaktif çekirdek sayısının zamanla (Denklem 1.5) değişim gösterdiği bu kanuna radyoaktif bozunma kanunu denir.



Şekil 1.7: Radyoaktif bir numune miktarının zamanla değişimi[48].

Çoğu kez, verilen bir radyoaktif numunedeki mevcut radyoaktif atomların sayısını bilmekten ziyade, birim zamanda bozunmaya uğrayan atomların sayısını bilmek daha önemlidir. Bu sayı radyoaktif numunenin aktifliği kullanılarak bulunur. Aktiflik, verilen bir numunede saniyedeki parçalanma sayısı olarak tanımlanır. 1.5. denkleminin her iki tarafının zamana göre türevi alınarak aktiflik;

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N \quad (1.6)$$

olarak bulunur. Böylece bir numunenin aktifliği; mevcut atomların sayısına (N) ve bozunma sabitine (λ) bağlıdır[47,48].

1.4.2. Yarı Ömür

Bir radyonüklidin aktivitesinin başlangıçtaki değerinin yarısına düşmesi için geçen süre, yarılanma süresi veya yarı ömür olarak tanımlanır ve $t_{1/2}$ sembolü ile gösterilir. Diğer bir

şekilde, göz önüne alınan atom çekirdeğinin yarısının bozunumu için geçen zaman olarak da ifade edilir. Denklem (1.3)'de $N = \frac{N_0}{2}$ ve $t = \frac{t}{2}$ değerleri yerine konduğunda

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{\frac{1}{2}}} \text{ veya } t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

elde edilir. Burada bilindiği gibi λ bozunma sabiti (parçalanma sabiti) olup ne kadar büyükse yarı ömür o kadar kısadır[47].

Her radyonüklid; saniyenin bir kaç kesrinden, bir kaç milyar yıl aralığında değişen kendine özgü bir yarılanma süresine sahiptir. Yaklaşık olarak, iyot-131 için 8 gün, sezyum-137 için 30 yıl, karbon-14 için 5730 yıl, plütonyum-239 için 24 000 yıl olan yarılanma süresi, uranyum-238 için 4,47 milyar yıldır. Birbirini takip eden yarılanma sürelerinde, bir radyonüklidin aktivitesi, ilk değerinden 1/2, 1/4, 1/8 vb. oranlarda bozunuma uğrayarak azalır. Böylece gelecekte herhangi bir zaman için, geriye kalan aktivite tahmin edilebilir. Radyonüklidin miktarı azaldıkça, yayımlanan radyasyon miktarı da orantılı olarak azalır[34].

1.4.3. Ortalama Ömür

Radyoaktivitenin istatistiksel karakteri nedeni ile radyoaktif bir atomun ömrü, sıfır ile sonsuz arasında herhangi bir değer olabilir. Buna göre bir atomun ne kadar var olacağı bilinmemekle beraber, ancak bir grup atomun ortalama ömründen söz edilebilir. Bu nedenle radyoaktif atomlar için, yarı ömürden farklı bir tanım verilir. τ ortalama ömür (bazen de yalnızca ömür de denir) radyoaktif atomların tek tek ömürleri toplamının ortalamasıdır. $t_1, t_2, t_3 \dots$ ömürlerine sahip atomların sayıları sırası ile $dN_1(t), dN_2(t)$ olsun. Buradan ortalama ömür;

$$\tau = \frac{t_1 dN_1 + t_2 dN_2 + t_3 dN_3 + \dots}{dN_1 + dN_2 + dN_3 + \dots} \quad (1.7)$$

şeklinde yazılabilir. $N_0 = dN_1 + dN_2 + dN_3 + \dots$ olmak üzere bu ifadeyi integral şeklinde yazabiliriz.

$$\tau = \frac{\int_0^{N_0} t dN}{\int_0^{N_0} dN} = \frac{\int_0^{N_0} t dN}{N_0} \quad (1.8)$$

dN yerine 1.3 denklemindeki değeri yazılarak integrali alınacak olursa

$$\tau = \frac{-\int_0^{\infty} \lambda t N_0 e^{-\lambda t} dt}{N_0} = \int_0^{\infty} \lambda t e^{-\lambda t} dt \quad (1.9)$$

$\tau = \frac{1}{\lambda}$ bulunur[47]. Buradan görüldüğü gibi ortalama ömür, parçalanma (bozunma) sabitinin tersidir.

1.4.4. Ardışık Bozunma Kanunu

Hem doğal olarak bulunan radyoaktif izotoplarda, hem de yapay olarak meydana getirilen radyoaktif izotoplarda bozunma ardışık parçalanmalar şeklinde meydana gelebilir. Ana radyoaktif element başka bir ürüne bozunur. Eğer bu ürün de radyoaktif ise, o da başka elementlere bozunur. Birçok durumlarda bu peş peşe bozunma ana maddenin ürüne ve ürünün de kararlı bir radyoaktif elemente bozunmasıyla sınırlıdır. Verilen herhangi bir zamanda bozunma ürününün atomlarının sayısı, şu şekilde hesaplanabilir: Herhangi bir t anında, λ_1 bozunma katsayısı ile ürüne bozunacak ana elementin atomlarının sayısı N_1 olsun. Ürün elementinin atomlarının sayısını N_2 ile gösterelim. Bunlarda λ_2 bozunma katsayısı ile bir elemente bozunacaklardır. Bu kararlı elementteki atomların sayısı ise, N_3 olsun. Bunlara ek olarak $t = 0$ iken $N_1 = N_{10}$, $N_2 = N_{20} = 0$ ve $N_3 = N_{30} = 0$ olduğunu varsayalım. Bu durumda, aktifliğin saniyedeki bozunma sayısı şeklindeki tanımından şu denklemleri yazabiliriz:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (1.10)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (1.11)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 \quad (1.12)$$

(1.10) bağıntısı N_1 'in bozunma hızını verir. (1.11) bağıntısı N_2 tipindeki atomların $\lambda_1 N_1$ hızıyla üretildikleri ve $\lambda_2 N_2$ hızıyla bozduklarını göstermektedir. (1.12) denklemiyle N_3 atomlarının üretim hızı elde edilir. (1.10) denkleminin $t = 0$ 'da $N_1 = N_{10}$ şartıyla integrali alınırsa,

$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t} \quad (1.13)$$

elde edilir. Bu değer (1.11) denkleminde yerine konursa;

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2 \quad (1.14)$$

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} \quad (1.15)$$

elde edilir. Bu denklemin her iki tarafı $e^{\lambda_2 t}$ ile çarpılırsa;

$$\frac{d}{dt}(N_2 e^{\lambda_2 t}) = \lambda_1 N_{10} e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} \quad (1.16)$$

bulunur. Gerekli işlemler yapılırsa, ürün çekirdeğin t anındaki sayısı için,

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t}) \quad (1.17)$$

elde edilir. N_3 'ü bulmak için (1.12) denkleminde N_2 yerine konursa,

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t}) \quad (1.18)$$

Her iki tarafın integrali alınır ve gerekli işlemler yapılırsa,

$$\int dN_3 = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \left[\int_0^t e^{-\lambda_1 t} dt - \int_0^t e^{-\lambda_2 t} dt \right] \quad (1.19)$$

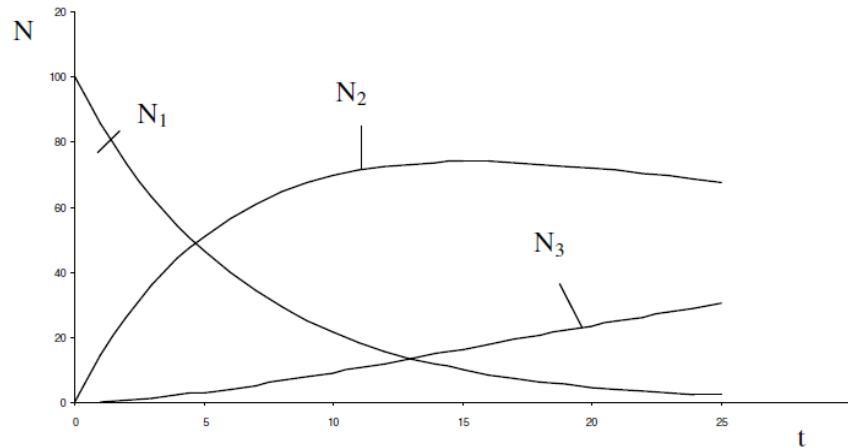
$$N_3 = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \left(-\frac{1}{\lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \Big|_0^t + \frac{1}{\lambda_2} e^{-\lambda_2 t} \Big|_0^t \right) \quad (1.20)$$

$$N_3 = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \left(-\frac{1}{\lambda_1} e^{-\lambda_1 t} + \frac{1}{\lambda_1} e^0 + \frac{1}{\lambda_2} e^{-\lambda_2 t} + \frac{1}{\lambda_2} e^0 \right) \quad (1.21)$$

$$N_3 = -\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \quad (1.22)$$

$$N_3 = N_{10} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} + 1 \right) \quad (1.23)$$

elde edilir. (1.13), (1.17) ve (1.18) denklemleri yardımıyla herhangi bir t anında mevcut olan çekirdeklerin N_1 , N_2 ve N_3 sayıları bulunabilir. Bunların zamanla değişimi Şekil 1.8'deki gibidir. Tabiatta kendiliğinden radyoaktif olan, ^{238}U ve ^{232}Th , serilerinin üyelerini ardışık bozunmaya örnek olarak verebiliriz[47].



Şekil 1.8: Ardışık bozunma grafiği[47].

1.4.5. Bozunum Türleri

Radyoaktif çekirdekler kendiliğinden bozunuma uğrarlar. Bu süreç üç şekilde gerçekleşebilir. Alfa ve beta bozunumlarında kararsız bir çekirdek, alfa ya da beta parçacıkları yayarak daha kararlı bir çekirdek haline gelmeye çalışır. Gama bozunumu ise, çekirdeğin cinsi değişmeden uyarılmış bir durumdan taban duruma bozunmasıdır.

Radyoaktif bozunmada kütle ve elektrik yükü korunur. Buna göre; bozunmadan önceki toplam elektrik, bozunmadan sonraki toplam elektrik yüküne ve bozunmadan önceki kütle numaralarının toplamı, bozunmadan sonraki kütle numaralarının toplamına eşittir[49].

1.4.5.1. Alfa (α) Bozunumu

Atom numaraları 83'ten büyük olan yani kararsız elementler (ağır elementler) kararlı nötron/proton oranına erişmek için, hem proton hem de nötron kaybederek kararlı hale geçmeye çalışırlar. 2 proton, 2 nötrona sahip helyum çekirdeği yayımlayarak parçalanırlar (denklem 1.24). Bu helyum çekirdeklerine alfa parçacıkları denir. Bu bozunumda proton ve nötron sayıları ayrı ayrı korunur. Ayrıca denklem 1.25'de görüldüğü gibi toplam enerji de korunmalıdır.



$$Q = \Delta mc^2 = [m(X) - m(Y) - m({}^4_2He)]c^2 \quad (1.25)$$

Bozunum nedeniyle ortaya çıkan enerjinin büyük kısmını, momentumun korunumu gereğince küçük kütleye sahip olan alfa parçacığı alır[45]. α bozunmasına bir örnek olarak,



verebiliriz. Burada yarı-ömür 1600 yıldır ve α -parçacığının kinetik enerjisi yaklaşık 4.8 MeV'dir[50].

1.4.5.2. Beta (β) Bozunumu

Beta ışınları da alfa ışınları gibi kararsız çekirdeklerin kararlı hale geçerken yaydığı ışınlardır. Beta bozunumunun üç farklı türü vardır. Bunlar:

β^- bozunumu: Eğer bir radyonüklidin kararsızlığı çekirdekteki nötron fazlalığından kaynaklanıyorsa, çekirdekteki enerji fazlalığını gidermek için nötronlardan birini proton ve elektron haline dönüştür. Proton çekirdekte kalırken, elektron hızla atomdan dışarı atılır. Bu yüksek hızlı elektrona beta parçacığı (veya negatron) adı verilir. Bu şekilde beta emisyonu yapan radyonüklidin atom numarası bir artarak kendinden bir sonraki elementin izobar atomuna dönüşür. Bu bozunmada kütle sayısı değişmediği için izobarik bozunma adı verilmiştir. Bu bozunmaya ait reaksiyon denklemi;



şeklinindedir. Bu ifade bir nötronun bozularak bir proton, bir elektron ve bir anti nötrino meydana geldiğini göstermektedir.

β^+ bozunumu: Bu bozunma pozitif beta veya pozitron bozunumu olarak adlandırılır. Atomun kararsızlığı nötron azlığından veya proton fazlalığından kaynaklanıyorsa çekirdek enerji fazlalığını gidermek için β^+ bozunumu yapar. Denklem 1.28'den de görüldüğü gibi protonlardan biri bozularak bir nötron, bir pozitif yüklü elektron(pozitron) ve bir nötrinoya dönüşür.



Nötron çekirdekte kalır, pozitron dışarı fırlatılır. Böylece pozitron yayımlayan radyonüklidin proton sayısı (atom numarası) bir eksilerek kendinden bir önceki elementin (izobar) atomuna dönüşür, fakat kütle sayısı değişmez[50].

Elektron Yakalama Olayı: Çekirdek proton fazlalığından dolayı kararsız ise atomun çekirdeğe yakın yörüngelerdeki elektronlarından biri çekirdek tarafından yakalanır. Elektronla bir proton birleşerek nötron ve nötrino haline dönüşür (Denklem 1.29). Bu bozunumda çekirdekten parçacık salınmaz ancak pozitron bozunmasında olduğu gibi proton sayısı bir eksilir. Kütle numarası ise aynı kalır (Denklem 1.30). Bu olayda boşalan elektron yörüngesine üst yörüngelerdeki başka bir elektron geçer ve Bremsstrahlung (frenleme) radyasyonu adı verilen x ışınları yayınlanır.



Yukarı da bahsedilen her üç beta bozunumunda da proton ve nötron sayıları bir birim değişmesine rağmen kütle numarası sabit kalır. Ayrıca her üç bozunumda nötrino ve anti nötrino denilen yüksüz ve kütesiz parçacıkların yayımlandığı görülmektedir[50].

1.4.5.3. Gama (γ) Bozunumu

Gamma ışınları (γ) yüksüz ve kütesiz yüksek enerjili elektromagnetik dalgalardır. Alfa ve beta bozunması yapan bir çekirdek, uyarılmış durumdan enerji yayınlarak taban enerji seviyesine geçer. Bu geçiş sırasında çekirdekten yayınlanan fotonlar γ ışınları olarak adlandırılır. Alfa ve beta bozunmasından farklı olarak, gama ışıması yapan çekirdeğin kütle ve atom numaraları değişmez. Yalnız çekirdeğin enerjisi azalır ve kararlı hale geçer. Çekirdek, gama ışıması sonucu başka çekirdeğe dönüşmez. Bu bozunmaya ait reaksiyon denklemi



şeklindedir. Çekirdek ne kadar yüksek enerji seviyesinde uyarılmış halde kalmışsa, çekirdekten yayınlanacak gama ışınları o kadar yüksek enerjili olacaktır[45].

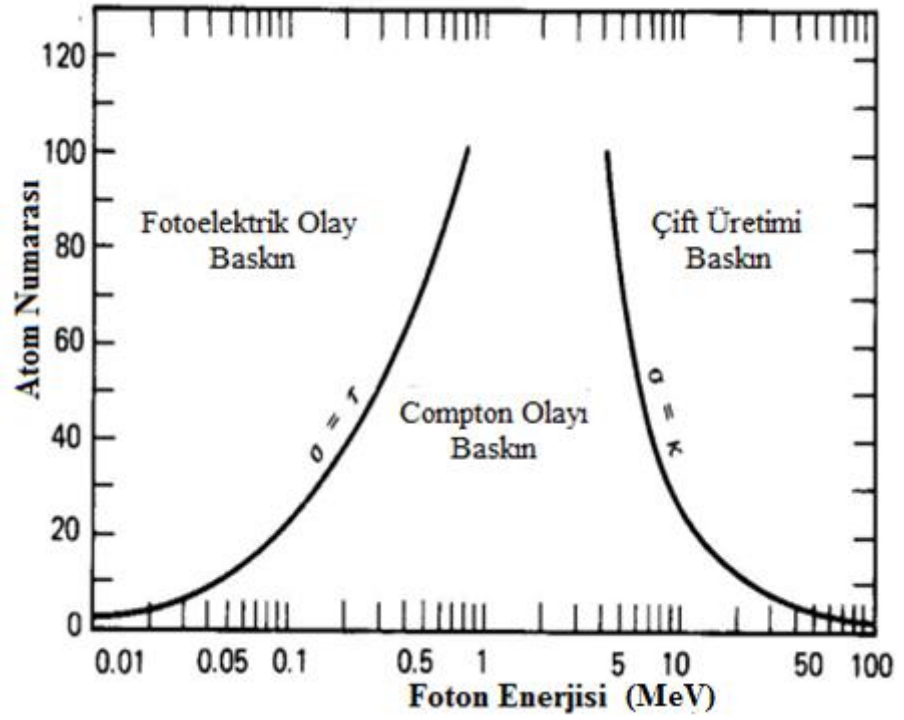
2. GAMA IŞINLARININ MADDE İLE ETKİLEŞMESİ

Gama ve X ışını gibi bütün elektromanyetik radyasyonlar birçok olayda parçacıklara benzer davranış gösterdiği için, çok küçük enerji paketleri anlamına gelmek üzere bu radyasyonların birim elemanına foton adı verilmiştir. Bir foton, durgun kütlesi ve yükü sıfır olan, ışık hızıyla ($c = 3 \times 10^8$ m/s) hareket eden ve $E = hv$ (burada h Planck sabitidir) enerjisine sahip bir parçacıktır. Bir fotonun dalga özelliği yalnızca düşük enerjili ölçümlerde kullanılır. Diğer tüm durumlarda, fotonların tespiti parçacıklar gibi etkileşimlerine dayanır[32].

Fotonlar yüksüz oldukları için madde içinden geçerken direkt olarak uyarma ve iyonizasyon yapmazlar. Bundan dolayı, fotonların ölçümü ortamın elektronlarıyla etkileşimlerine dayanır. Madde içine giren fotonlar, madde atomuna bağlı elektronlar, serbest elektronlar ve çekirdekle etkileşerek hızlı elektronlar oluştururlar. Fotonun doğasını kavramamızı sağlayan bu elektronlar, üzerlerine gelen fotonların enerjisine eşit büyüklükte bir enerjiye sahiptirler[32,51].

Fotonların madde ile etkileşmesinde çok sayıda olası etkileşim mekanizması olmasına rağmen, radyasyon ölçümlerinde temel olan üç tanesi büyük rol oynamaktadır. Bunlar, Compton saçılması, fotoelektrik etki ve çift oluşumu olayları olarak tanımlanır. Bu etkileşimlerin meydana gelme olasılıkları, fotonun enerjisine ve etkileşime girdiği malzemenin atom numarasına bağlı olarak değişmektedir[32,51]. Şekil 2.1'de gelen fotonun enerjisine ve fotonun etkileşime girdiği malzemenin atom numarasına bağlı olarak, foto elektrik olay, compton saçılması ve çift oluşumu olaylarının baskın olduğu bölgeler gösterilmektedir.

Şekil 2.1'den de görülebileceği gibi düşük enerjili fotonlarda ve büyük Z (atom numaralı) numaralı atomlarda fotoelektrik olay baskındır. Çift oluşumu; yüksek enerjili fotonlarda (ortalama olarak 10 MeV'den büyük enerjilerde) ve büyük Z numaralı atomlarda baskındır. Compton saçılması etkileşimi ise tüm Z 'ler için mümkün olup orta enerjilerde (ortalama olarak 100 keV ile 10 MeV arası enerjilerde) baskındır[51].



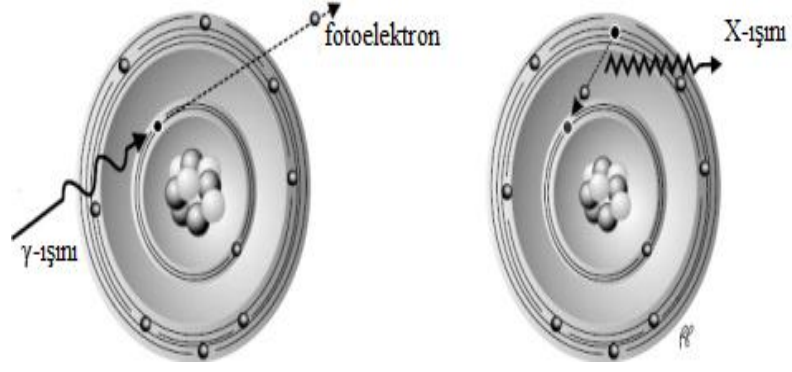
Şekil 2.1: Fotoelektrik olay, Compton saçılması ve Çift oluşumun baskın olduğu bölgeler[51].

2.1. Fotoelektrik olay

Detektör üzerine düşen gama ışınları ilk olarak detektörün yüzey elektronlarıyla etkileşir ve gama ışınları tüm enerjisini kaybeder. Ancak gama ışınlarının bu enerjilerinin tamamı, elektronlara kinetik enerji olarak yansımaz ve bir kısmı elektronları serbest hale getirir. Serbest halde bulunan bu elektronlar fotoelektronlar olarak adlandırılır. Gelen gama ışınının enerjisi (E_γ) ve elektronu koparmak için gerekli olan enerji (E_b) olmak üzere bir foto elektronun kinetik enerjisi Denklem 2.1 ile verilir. Foto elektrik olayın şematik diyagramı, Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

$$T_e = E_\gamma - E_b \quad (2.1)$$

Burada T_e , fotoelektronun kinetik enerjisi, E_b ise elektronun bağlanma enerjisidir.



Şekil 2.2: Fotoelektrik olay[35].

Fotoelektrik olay sonucu, serbest hale geçen fotoelektrondan boşalan yerleri, elektronların doldurması ile birlikte karakteristik X-ışınları veya Auger elektronları açığa çıkar. Açığa çıkan bu X-ışınları, ikincil elektronlar tarafından soğurularak kinetik enerjiye dönüştürülür. Buda bir anlamda kayıp enerjiyi engellemek olacaktır[32].

Fotoelektrik olayın meydana gelme olasılığı veya fotoelektrik tesir kesiti, soğurucu atomun Z sayısı ile doğru, gelen fotonun enerjisi ile ters orantılıdır. Fotoelektrik soğurma olasılığı (τ), düşük enerjilerde Z^4 yüksek enerjilerde ise Z^5 ile doğru orantılıdır. Fotoelektrik olayın bu Z ye kuvvetle bağımlılığı, gama ışınları için kullanılan zırhın yüksek Z 'li materyallerden seçilmesinin en önemli nedenidir. Bundan dolayı gama spektrometresinde kullanılan birçok detektör yüksek atom numaralı materyallerden seçilir[32,54].

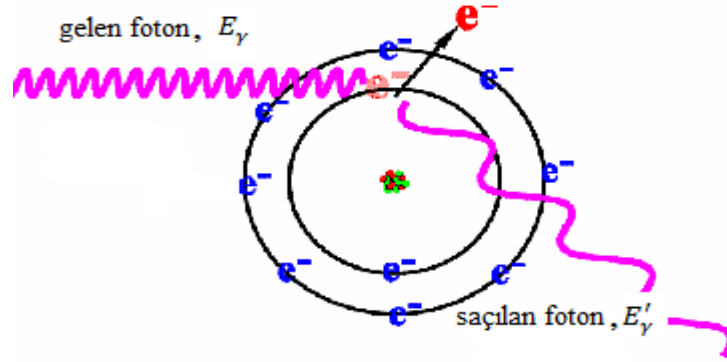
Fotoelektrik olay, gama ışını spektroskopisi için en ideal etkileşmedir. Detektörle etkileşen gama ışın enerjisinin çoğu fotoelektronlar tarafından taşınır, geriye kalan kısmı ise X ışınları veya Auger elektronları tarafından taşınır. İdeal bir dedektörde; bu enerjilerin toplamı, dedektöre gelen gama ışının enerjisine eşit olacaktır. Bu da gelen gama ışınlarının enerjisinin doğru bir şekilde ölçülmesini sağlamaktadır[32].

2.2. Compton Saçılması

Compton Saçılması serbest bir elektron ile yüksek enerjili bir fotonun çarpışması olayıdır. Tabi ki normal şartlar altında elektronlar madde içinde bağlı durumdadır.

Fakat fotonun enerjisi elektronun bağlanma enerjisinden yüksek ise, bağlanma enerjisi göz ardı edilip elektronun serbest olduğu düşünülür[39].

Elektron kütleli bir parçacık olduğu için fotonun bütün enerjisini soğurması momentumun korunumu gereği mümkün değildir. Şekil 2.3' te de gösterildiği gibi, sadece fotonun hareket doğrultusu ve enerjisi değişir. Dolayısıyla foton, enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır saçılma uğrayarak yoluna devam eder[32,39].



Şekil 2.3: Compton saçılmasının şematik gösterimi[35].

Gamma ışını, enerjisinin (E_{γ}) düşmesiyle (E'_{γ}) bir açıyla saçılabilir ve bu saçılmayla ortaya çıkan enerji kaybı,

$$T_e = E_{\gamma} - E'_{\gamma} \quad (2.2)$$

denklemleri ile verilir. Denklem 2.2'den de görüldüğü gibi bu enerji kaybı elektronlara kinetik enerji olarak aktarılır. Saçılan gamma ışınının enerjisi, saçılmadan sonra daha azdır ve kristal ile tekrar etkileşebilir veya etkileşme yapmadan kristali terk edebilir. Saçılan gama ışınının tekrar etkileşme olasılığı, dedektörün büyüklüğüne ve yapıldığı malzemeye, ilk etkileşmenin konumuna ve saçılan gamma ışınının enerjisine bağlı olarak değişebilir. Ayrıca gamma ışını bir ya da birden fazla Compton saçılması da yapabilir[32,52]. Enerji düştükçe, fotoelektrik soğurulmanın oluşma olasılığı da artar. Bundan dolayı gamma ışını enerjisinin sadece bir kısmını da, Compton saçılması ile tamamını da (Compton Saçılmasını takip eden fotoelektrik soğurulmayla) kristalde

kaybedebilir. Elektronun kinetik enerjisi, enerji ve çizgisel momentumun korunumu kullanılarak;

$$T_e = E_\gamma - E'_\gamma = \frac{E_\gamma^2(1 - \cos \theta)}{m_e c^2 + E_\gamma(1 - \cos \theta)} \quad (2.3)$$

denklemini ile hesaplanır. Burada $m_e = 9,1110^{-31}$ kg değeri ile elektronun durgun kütlesi ve $c = 3 \times 10^8$ m/s ışığın boşluktaki hızıdır[52].

Compton saçılmasında foton ile elektron arasında oluşan açı, foton enerjisine bağlıdır. Küçük saçılma açıları için foton enerjisi kaybı küçüktür. Saçılma olasılığı (σ), saçılmayı yapan maddenin “Z” atom numarası ile değişir. Compton saçılması orta foton enerjilerinde en çok olan bir etkileşme olasılığıdır. Compton olayı ile etkileşme olasılığı yüksek ve düşük foton enerjilerinde azalır[51].

2.3. Çift Oluşumu ve Yok Oluş

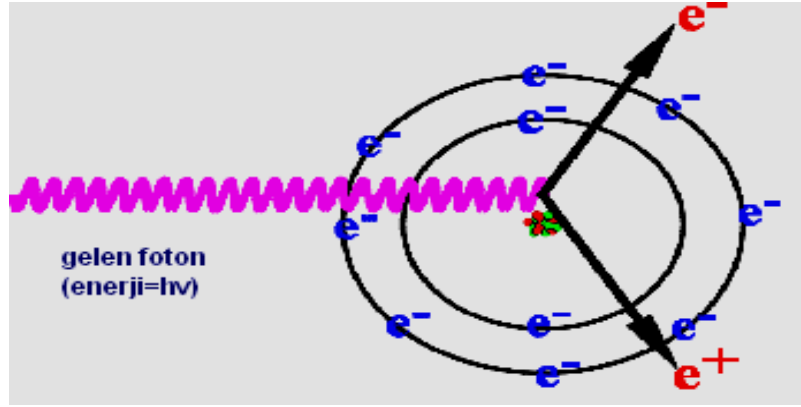
Çift oluşumu, bir fotonun elektron-pozitron çiftine dönüşmesi olayıdır ve bu etkileşme, soğurucu atomun çekirdek alanı içinde gerçekleşir. Çift oluşumu olayında foton, enerjisinin tamamını çekirdeğe aktararak yok olur ve bir elektron-pozitron çifti oluşturur. Elektron-pozitron çiftinin oluşumu için gerekli enerji, elektronun durgun kütlesi pozitronun durgun kütlesine eşit olduğundan $2m_e c^2$ ye eşittir. Dolayısıyla bu oluşum için gerekli minimum foton enerjisi en az 1,022 MeV olmalıdır[35,53]. Eğer gelen fotonun enerjisi bu değeri aşarsa fazla enerji elektron-pozitron çiftinin kinetik enerjileri olur ve

$$E_{e^-} + E_{e^+} = h\nu - 2m_e c^2 \quad (2.4)$$

denklemini ile verilir. Bu denklemde çekirdeğin geri tepme enerjisi çok küçük olduğundan ihmal edilmiştir. Oluşan Pozitron kinetik enerjisinin çoğunu kaybettikten sonra soğurucu ortamdaki bir elektronla birleşerek pozitronyum (karasız ve yarı ömrü 10^{-8} sn) olarak adlandırılan hidrojen benzeri bir atom meydana getirir. Daha sonra

pozitronyum atomu bozularak(anhilasyon) zıt yönlü ve eşit enerjili iki foton meydana getirir. Enerjinin korunumu gereği her bir fotonun enerjisi 0,511 MeV'dir[35].

Eğer çift oluşum olayı detektörü çevreleyen maddelerde meydana gelirse oluşan yok olma gamalarının biri detektöre girebilir. Bundan dolayı, darbe yüksekliği 511 keV ile orantılı bir pik oluşur. Spektrum başlangıcından itibaren 511 keV de gözlenen bu pike yok olma piki denir. Pozitron (β^+) emisyonu yapan bir kaynak olduğunda, detektör yüzeyindeki pozitronların durdurulması sonucu yine spektrumda 511 keV de yok oluş piki görülür[53].



Şekil 2.4: Çift oluşumunun şematik diyagramı[35].

Çift oluşum olayının meydana gelme ihtimali (κ), gama foton enerjisinin artmasıyla artar. Aynı zamanda gama foton şiddetinin çift oluşum olayı ile azalması, soğurucu maddenin atom numarasının karesi (Z^2) ile orantılıdır[51].

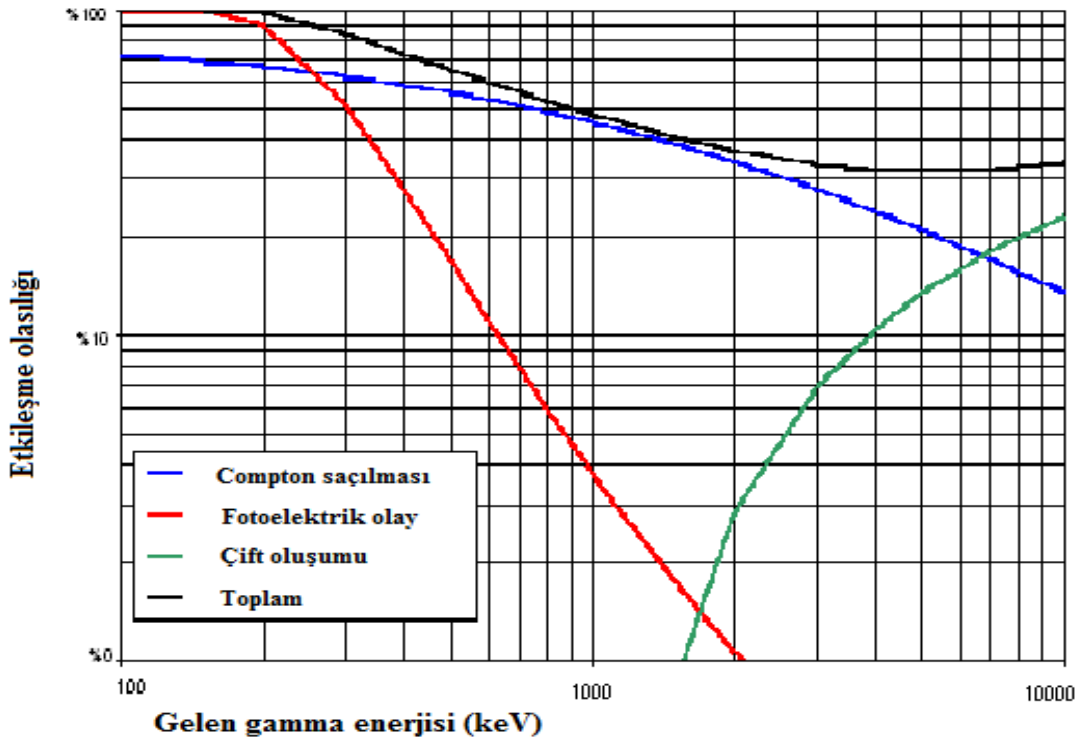
Radyasyonun t kalınlıklı bir maddelerde soğurulmasını ölçmek için yapılan deneyde, kaynaktan çıkan gama ışınları (şiddet= I_0), dar bir aralıktan geçtikten sonra hedef tarafından saçılır veya soğurulur. Geri kalan fotonlar (şiddeti= I) dedektöre ulaşırlar. Dedektöre ulaşan fotonlar, hedefte hiç etkileşme yapmayan fotonlardır. Bir fotonun yok olması için birim uzunluk başına toplam olasılık μ (toplam lineer inceltme katsayısı) olarak adlandırılır. Bu olasılık, fotoelektrik soğurma (τ), Compton saçılması (σ) ve çift oluşumu (κ) olasılıklarının toplamıdır[52].

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (2.5)$$

Denklem 2.5' deki tüm büyüklükler 1/uzunluk boyutundadır. Hedef materyalin herhangi bir t kalınlığını geçen radyasyon, (2.6) denklemi ile hesaplanır,

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (2.6)$$

Şekil 2.5, 30 mm. kalınlığındaki bir NaI dedektörü için, inceltme katsayılarının değerlerini göstermektedir. Görüldüğü gibi düşük enerji değerlerinde fotoelektrik etkileşme olasılığı fazla ve enerji değeri arttıkça bu olasılık azalmakta, yüksek enerjilerde ise, çift üretim etkileşme olasılığı baskın hale gelmektedir[52,54].



Şekil 2.5: 30 mm kalınlığındaki NaI dedektörü için hesaplanan etkileşme olasılıkları[52].

3. GAMA SPEKTROMETRESİ

Detektör ve diğer elektronik modüllerin uygun kombinasyonu, gama spektrometresi veya gama spektrometrik sistem olarak adlandırılır. Gama ışını spektrometresi, gama ışını yayan radyoizotopların tanımlanmasını ve aktivitelerinin nicel olarak tespit edilmesini sağlayan bir yöntemdir. Gama ışınlarının algılanmasında spektral bilgi (enerjiye bağlı dağılım); NaI(Tl) gibi sintilasyon detektörleri ve Ge(Li) ve HPGe gibi yarı iletken detektörler ile elde edilmektedir[35].

Detektör materyalinin seçimi; ölçülecek radyasyon tipine ve radyasyon hakkında mevcut bilgiye bağlıdır. Radyasyonun enerjisini ölçmek için, çıkış puls genliğinin radyasyon enerjisi ile orantılı olduğu detektörler seçilmelidir; bu da ancak sökülecek elektronların sayısının fazla olacağı bir detektör materyali seçmekle mümkün olur. Ayrıca bir detektör seçilirken dikkat edilmesi gereken noktalar; detektörün verimi, çözünürlüğü, kullanım alanına uygunluğu ve amaca uygun olarak X-ışını veya gama ışınlarının enerji değerleridir.

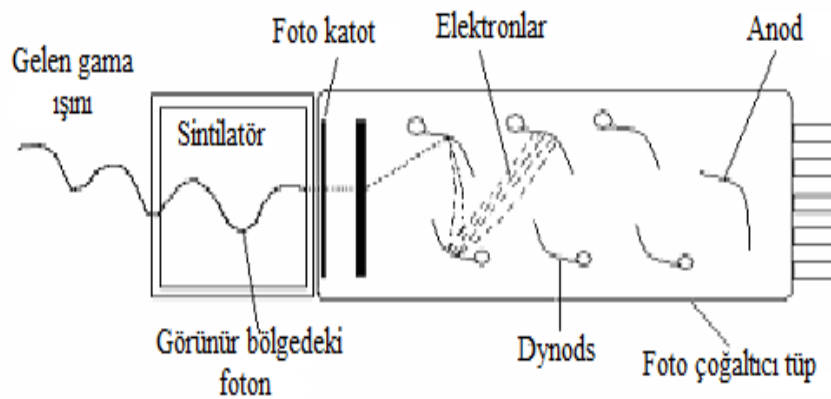
Gelen gama ışınının enerjisine bağlı olarak, detektörden elde edilen elektrik darbeleri, bir seri elektronik modülden geçirilerek enerji dağılımlı gama spektrumu olarak gözlenir. Bu spektrum analiz edilerek gama ışını yayan radyoizotopların nitel ve nicel tanımlanması yapılır. Çevresel örneklerde radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalarda, yaygın olarak gama spektrometre sistemleri kullanılmaktadır[35].

Bu yöntemle örneklerin hazırlanması karışık işlemler gerektirmez. Örneklerin analizi doğrudan, tahribatsız ve hızlı bir şekilde yapılabilir ve bir tek ölçümle örnek içinde bulunan çok sayıda gama yayınlı radyonüklid'in aynı anda gözlenmesi mümkündür. Gamalar yüksek enerjili elektromanyetik dalgalar olduğu için madde içinden geçerken yoğunluklarının azalması çok az olur, dolayısı ile örnek içindeki soğurulması ihmal edilebilecek kadar önemsizdir. Böylece sayım istatistiğinin iyi olması ve analiz süresinin kısaltılması amacıyla örnek miktar büyük tutulabilir[53].

3.1. Sintilasyon Dedektörleri

Üzerine düşen radyasyon enerjisi ile orantılı olarak dışarıya görünür ışık yayan cisimlere, sintilatör denilir. Örneğin sodyum iyodür, sezyum iyodür, antresan, naftalin ve fenantren gibi bazı maddelere bir tek yüklü parçacık, X-ışını veya γ -ışını çarptığı zaman, bu maddeler bir ışık pırlıtsı meydana getirirler. Bu gibi maddelere sintilatörler adı verilir. Sintilatörlerden yayılan görülebilir ışıklara da, sintilasyon denir ve bu ışık pırlıtları elektrik pulslarına dönüştürülür ki, daha sonra bu pulslar yükseltilek, sayılabilir anlamlı sinyallere dönüştürülürler. Radyasyon enerjisini önce ışık fotonlarına ve daha sonra foto çoğaltıcı tüp yardımıyla elektrik pulslarına dönüştüren dedektörlere de sintilasyon dedektörleri (sayaçları) adı verilir[47].

Sintilasyon detektörleri; sintilatör ve foto çoğaltıcı tüp olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Detektöre gelen gama ışını, ilk olarak sintilatör maddesi ile etkileşir. Etkileşme sonucu uyarılmış durumda kalan atom, taban duruma geçerken görünür bölgede foton yayınlamasına sebep olur. Yayılan fotonların şiddeti detektörle etkileşen gamanın enerjisiyle doğru orantılıdır. Yayınlanan foton, foto çoğaltıcı tüp içerisinde elektronlara dönüştürülerek bir puls ölçümü yapılır. Şekil 3,1'de bir sintilasyon dedektörü cihazı şematik olarak gösterilmiştir[55].



Şekil 3.1: Sintilasyon dedektör şeması[55].

Foto çoğaltıcı tüp yüzeyinde bulunan foto katot sayesinde gelen foton, foto elektrik olay, compton saçılması ve çift oluşumu sonucu bu yüzeyden elektron koparır. Ancak

bu elektronun oluşturduğu puls yeterli olamayacağı için foto çoğaltıcı tüp içerisinde elektron, belirli ve artan potansiyellerin olduğu bölgelerde hızlandırılarak “dynode” adı verilen elektrotlara çarparak buradan daha fazla elektron kopmasına sebep olur. Bunun sonucunda elektronlar foto çoğaltıcı tüpün anod kısmına doğru gelir ve foto çoğaltıcı tüpün çıkış kısmında yüksek bir puls oluşur. Gözlenen pulsun yüksekliği gama ışınının enerjisiyle doğru orantılı olacaktır[55].

Sintilatörler organik ve inorganik olabilirler. Gama ışını dedektörlerinde çoğunlukla kullanılan dedektörler, inorganik maddeler olan sodyum iyodür (NaI) veya sezyum iyodür (CsI) gibi alkali halde (herhangi bir halojen asit tuzu) tuzlardır. Bu maddelere foton yayınlama olasılığını arttırmak ve ışığın kendiliğinden soğurulmasını azaltmak amacıyla bir miktar katkı eklenir. Bu maddeye, aktivatör (aktifleyici) denir. Talyum ve sodyum genellikle en çok kullanılan aktivatörlerdir. Genellikle pek çok dedektör, NaI(Tl) yani talyum aktifleyici ile sodyum iyodür kristali, ya da CsI(Na) yani sodyum aktifleyici ile sezyum iyodür şeklinde ifadelerle açıklanır[52].

Uygun sintilasyon kristali kullanılarak parçacık tipi radyasyonların da sayımı yapılabilmektedir. ZnS kristali, alfa parçacıklarının sayımında, antrasen fosforu, beta parçacıklarının sayımında çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu dedektörler sayım ve aynı zamanda enerji ayırımı için kullanılır[33].

3.1.1. NaI(Tl) Sintilasyon Dedektörü

NaI(Tl) kristali, X-ışınları ve gamma-ışınlarının dedeksiyonunda oldukça fazla kullanılmaktadır. Bu kristal ekonomik olmasının yanında, iyi bir gamma-ışını çözünürlüğü sağlar ve çok iyi bir enerji ayırma gücüne sahiptir. 3"x3" boyutlarında bir kristal kullanılarak ¹³⁷Cs'nin 662 keV'lik gamma ışını için %7,5 ile %8,5 oranında bir enerji ayırımı elde etmek mümkündür. NaI(Tl) sintilatöründe; iyodun yüksek atom numarasına sahip olması, foton soğurulma ihtimalini artırır ve gama ışını dedeksiyonunda yüksek verim elde edilmesini sağlar[56].

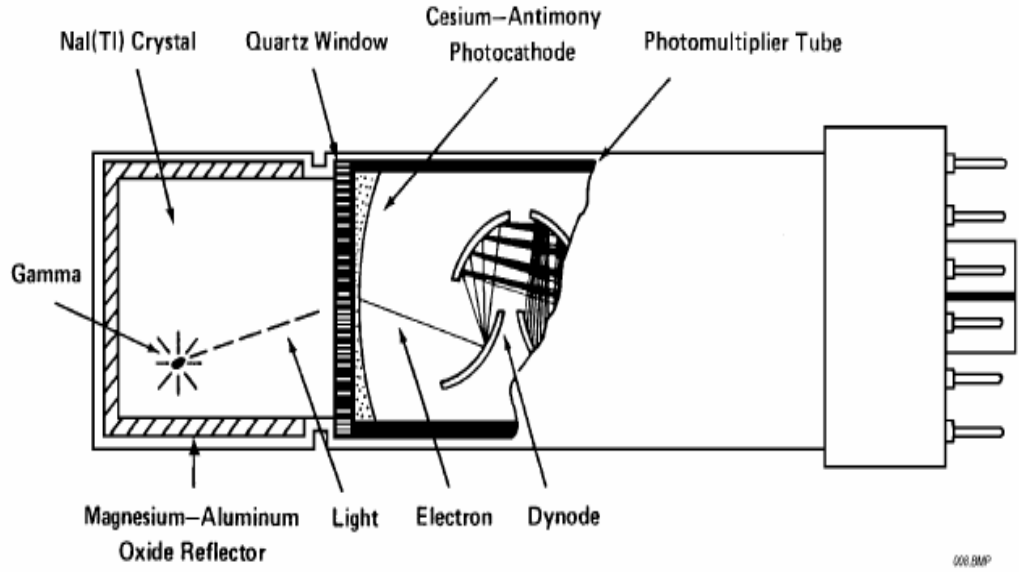
NaI sintilatörlerinde foton yayınlanma olasılığını arttırmak için aktivatör olarak Talyum kullanılmaktadır. Bu tip sintilatörlere, katkılı sintilatörler denir. Katı maddelerdeki elektronların enerji bant teorisine göre valans bandı ile iletim bandı arasında kalan bölgede saf atomlar için bir valans elektronu bulunmamaktadır.

Aktivatör kullanıldığında, iletim bandı ile valans bandı arasındaki bölgeye elektron durumları ilave edilerek, uyarılmış durumdaki elektronun iletim bandından taban duruma inerken aktivatör maddesinin uyarılmış enerji seviyesinden, taban duruma inme olasılığının ortaya çıkmasına ve bunun sonucunda katkısız sintilatörlere göre enerjisi daha düşük olan görünür bölgede fotonların yayılmasına sebep olacaktır.

Ayrıca katkılı sintilatörlerin bir avantajı da daha büyük kristallerin yapılmasında kullanılmasıdır. Bu da detektörün verimini arttıracaktır, yani bir kaynaktan çıkan gama ışınlarını gözleme olasılığı artacaktır[55].

NaI(Tl) sintilatör dedektöründe; bina yapı malzemelerinden ve çevreden gelebilecek katkı radyasyonunu en aza indirmek amacıyla tabanlarda ve yan yüzlerde kurşun bloklar bulunmaktadır.

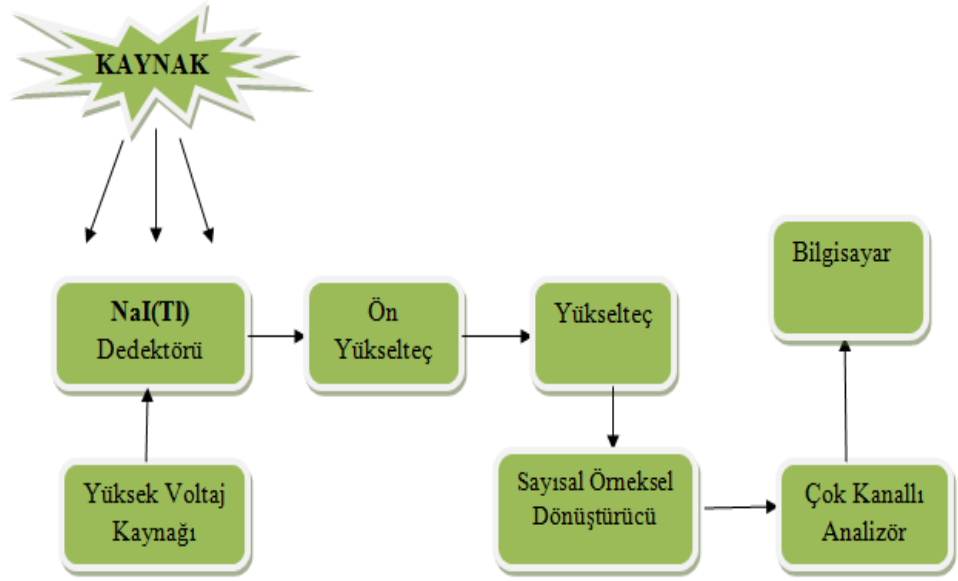
NaI(Tl) kristali nem kapıcı olduğundan, foto-çoğaltıcıya optik kontak yapılan yüzü haricinde bütün çevresi Al levha ile kaplıdır (Şekil 3.2). Bu levhanın iç kısmı magnezyum oksit ile kaplıdır, bu ışık yansıtıcı olarak iş görür. Bir yüklü parçacık veya fotonun sebep olduğu ilk iyonlaştırmadan dolayı kristalin içinde serbest elektronlar meydana gelir. Bu elektronların kristalin atom veya moleküllerine bağlanması işleminde görünür bölgede, yaklaşık 3300 Å dan 5000 Å a kadar değişen dalga boyunda ışık yayınlanır. Sintilatörler kendi ışıkları için şeffaf olduklarından kristalden yayınlanan ve yüzeylerden yansıyan bu ışınlar foto-çoğaltıcı tüpün foto katodu üzerine düşerler. Foto katodun yüzeyi, ince bir sezyum-antimon alaşımı levhadan yapılmış olduğundan, burada gelen ışınlar buradan elektron yayınlanmasına neden olurlar[47].



Şekil 3.2: NaI(Tl) foto-çoğaltıcı tüpün şematik diyagramı[47].

Foto-çoğaltıcı, her bir çoğaltıcıda peş peşe ve voltaj artmalar olacak şekilde, yaklaşık 800 ile 1500 Volt arasında bir voltajda çalıştırılır. Bu ise, elektronların foto katottan son çoğaltıcıya kadar giderken sayılarının peş peşe artması neticesini verir. Çoğalmanın veya toplam kazancın (yani, foto katottan yayınlanan her bir elektrona karşılık son çoğaltıcıdan yayınlanan elektron sayısının) 10^6 ile 10^7 civarında olması mümkündür. Bu elektron çoğalmasında elde edilen darbenin yüksekliği, gelen foton veya parçacığın enerjisiyle orantılıdır. Bu darbeler büyütülerek bir sayıcı ile sayılabilirler. Yerin manyetik alanının etkisinin üstesinden gelebilmek için foto-çoğaltıcı bir manyetik perdeleyici ile çevrilir[47].

Genel olarak gama spektrometre sistemi NaI(Tl) gibi sintilasyon veya Ge(Li) ve HPGe gibi yarı iletken bir detektör (D), bir ön yükseltici (PA), bir adet yüksek voltaj filtresine sahip güç kaynağı (HV), yükseltici (MA), analog sayısal dönüştürücü (ADC), çok kanallı analizör (MCA) ve bilgisayar (PC) yazıcıdan oluşur[62]. NaI(Tl) sintilatör detektörlü kurulum şeması Şekil 3.3' de gösterilmiştir.



Şekil 3.3: NaI(Tl) dedektörünün kurulum şeması.

Dedektörün çalışabilmesi için dedektöre voltaj (çalışmada kullandığımız dedektör için 700 V) verilir. Kaynaktan yayılan radyasyon dedektörle etkileşerek soğurulan enerji ile orantılı bir akım darbesi meydana getirir. Bu darbe, yükselticiler yardımıyla voltaj darbesine çevrilir, yükseltilir, şekillendirilir ve ADC'ye gelir. Burada bilgiler çok kanallı analizöre (MCA) gelir. Analizörden sayısal hale çevrilen bilgiler, ekranda spektrum olarak gözlenir. Bu spektrum veya spektrumla ilgili bilgiler MCA'ya bağlı uygun bir bilgisayarda görülür[38].

Ön yükselteç (P.M): Gama ışınlarının dedektör ile etkileşmesi sonucunda oluşan yük ön yükselteç ile toplanır. Ön yükselteçler, dedektörden gelen bu pulsları depolanan enerji ile orantılı olarak şekillendirerek voltaj sinyaline dönüştürür.

Ön yükselteçler, 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. Ön yükselteçlerde yük-duyarlı olanları genellikle rutin kullanımlar için tercih edilir, ancak düşük fiyatlı voltaj-duyarlı tipleri de yaygın kullanılır. Gamma spektrometrelerinde; yük duyarlı yerine, voltaj duyarlı ön yükselteçler tercih edildiğinde küçük sorunlar ortaya çıkmaktadır.

Akım-duyarlı ön yükselteç, hızlı zaman ölçme uygulamaları için özellikle şarttır ve normal enerji spektrumları için kullanılmamaktadır[57].

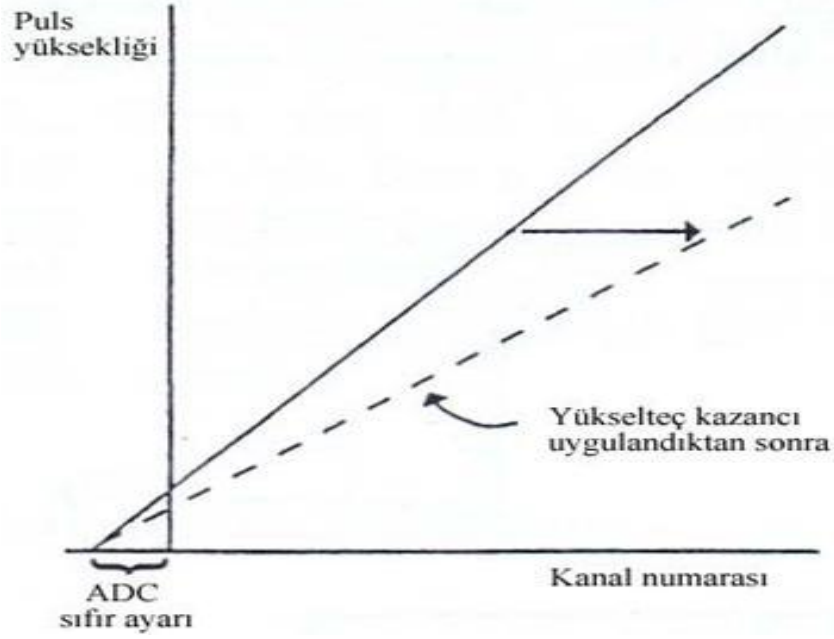
Yükselteçler (MA): Yükselteçler ön yükselteçten gelen sinyali yükseltmek, yeniden şekillendirmek ve şekillendirmek için gerekli olan gelen sinyal bilgilerini saklamak amacıyla kullanılır.

Dedektör sistemleri ve bilgisayardaki gelişmeler basit sınıtasyon sistemlerinin, bilgisayarlara doğrudan bağlanabileceği anlamına gelir. Bu tüm fonksiyonların taşınabilir sistemde bulunmasını sağlar. ORTEC *digiBASE*TM sistemci ön yükselteç, yüksek voltaj kaynağı ve dijital sinyal işlemcisini foto-çoğaltıcıya sadece basit bir USB kablosuyla uygun donanımlı bilgisayara bağlanacak şekilde foto-çoğaltıcıya dahil eder. Yükselteçlerin en önemli özellikleri şunlardır.

1. Sinyal büyütme
2. Toplanan yükün doğru bir şekilde ölçüleceği ve balistik zarar etkisinin olmayacağı bir puls şekillenmesi
3. Puls yığılmasını en fazla yüklemeyi asgari tutacak şekilde yüksek sayım hızlarında puls şekillenmesi
4. Ayrı ayrı her pulsun sinyal-gürültü oranının analiz edilebilmesi için en iyi puls şekillenmesi
5. Yüksek sayım hızlarındaki performansını korumak için puls yığılması ve temel seviye korunması için aktif devreler içermelidir[58].

Çok Kanallı Analizör (M.C.A): Dedektöre gelen gama-ışını enerjisiyle orantılı yükseklikte oluşan pulsların yükselteçte şekillendirilmesinden sonraki işlem bu pulsların çok kanallı analizörde yüksekliklerine göre sıralanmasıdır. Bu birim ADC'deki verileri depolayıp, spektrum olarak gösteren; verilerin kanal olarak tanımlanan hafızada saklanmasını, analizini ve rapor edilmesini sağlayan, enerji kalibrasyonu yapan bir programdır. Gama spektrometrelerinde, MCA'lar bilgi saklama ve işleme ünitesidir.

Prensipite, çok kanallı analizöre gelen pulsun yüksekliği ve bu puls yüksekliğine karşılık gelen kanal numarası arasındaki ilişki doğrusal olmalıdır (Şekil.3.4). Küçük genlikli gürültü pulslarının engellenmesi için, analog-sayısal dönüştürücü sıfır ayarı yapılmasına imkan verir. Çok kanallı analizörde integral ve diferansiyel olmak üzere iki farklı doğrusallık tanımlanır.



Şekil 3.4: Çok kanallı analizörde kanal numarası ve puls yüksekliği arasındaki ilişki[57].

İntegral doğrusallık, puls yüksekliği ve kanal numarası arasındaki doğrusallıktan sapmanın ölçüsüdür. Diferansiyel doğrusallık ise kanal genişliklerinin kararlılığını gösterir ve integral doğrusallığa göre daha hassastır. Sintilasyon spektrometresi MCA sistem üzerinde herhangi özel bir yer teşkil etmez. Genellikle, yarı iletken dedektörle karşılaştırıldıklarında düşük çözünürlüklü olduklarından dolayı spektrum boyutları çok daha küçük olabilir[57].

Sayısal Örneksele Dönüştürücü: Bir MCA'nın kalbi, elektrik pulsunun sayısal niceliğe çeviren analog-sayısal dönüştürücü, ADC (Analog to Digital Converter) birimi olup darbe yüksekliğinin analog büyüklüğünü (volt), kanal başına düşen sayısal niceliğe dönüştürür[55].

Kaydedici: MCA'dan veya MCA bağlantılı bilgisayardan alınan bilgilerin kaydedilmesi için, yazıcı veya grafik çizici kullanılır. Topraktaki radyoaktivite değerlerinin belirlenmesi süresince gama spektrometrik analizleri, etrafı kurşunla zırhlanmış NaI(Tl) detektörü ile buna bağlı çok kanallı analizör ve ilgili elektronik birimlerden oluşmuş bir gama ölçüm sisteminden yapılmıştır. Deney sonucunda elde edilen veriler uygun yazılım programlı sistemi ile otomatik olarak elde edilmiştir[55].

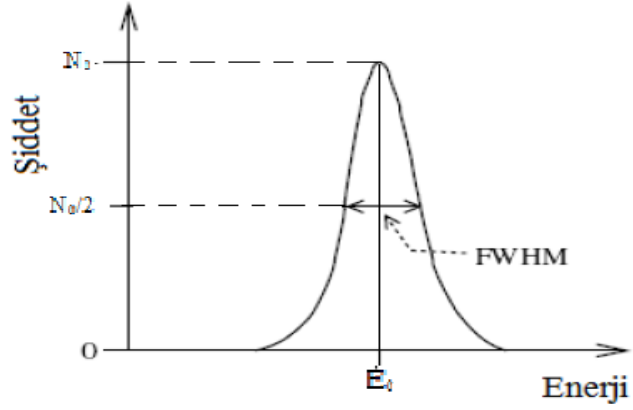
3.2. Detektör Ayırma Gücü

Radyasyon enerjisi ölçmek amacıyla tasarlanmış detektörler için, en önemli faktör enerji ayırma gücüdür. Bir dedektörün ayırma gücü, birbirine yakın iki farklı enerjideki gama ışınlarını ayırt edebilme ölçüsüdür. Genel olarak, ayırma gücü, detektöre tek enerjili bir radyasyon gönderilip, spektrumun gözlenmesi ile ölçülür. İdeal olarak, görülmesi gereken keskin bir Dirac-delta fonksiyon tepesi iken tepe yapısı genelde Gaussiyen biçimli olmakla birlikte sonlu bir genişliğe sahiptir. Bu genişlik üretilen uyarılmış ve iyonlaşmış atom sayısındaki dalgalanmaya bağlıdır[52].

Gelen radyasyonun enerjisini ölçmek için tasarlanan bir dedektörün performansı bir tek enerjili kaynağın puls dağılımının genişliği ile nitelendirilir. Kalınlık, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi gausyen tepenin maksimum yüksekliğinin yarısındaki genişlik ile ölçülür ve FWHM (full width at half maximum) veya Γ ile gösterilir Bir dedektörün farklı enerjilerde parçacıkları tanımlayabilme özelliği, enerji çözünürlüğü olarak adlandırılır ve denklem 3.1'deki oran ile verilir[32].

$$R(E_0) = \frac{\Gamma}{E_0} \quad (3.1)$$

Enerji çözünürlüğünü etkileyen üç önemli faktör vardır. İlki dedektörde üretilen yük taşıyıcılarının sayısındaki istatistiksel dalgalanmalardır. Diğerleri ise dedektörün kendi içindeki, önyükselteçteki ve yükselteçteki elektronik gürültü ve dedektörde üretilen yüklerin tamamının toplanamamasıdır[32,46].

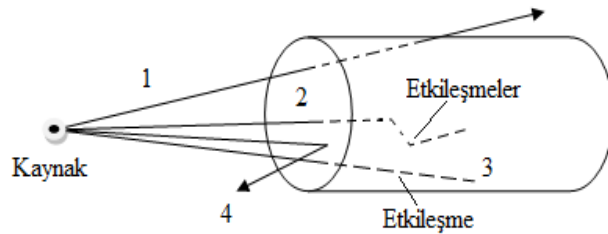


Şekil 3.5: Gaussiyen yapılı pikin enerji çözünürlüğünü gösteren şema[46].

Denklem 3.1 genel olarak, yüzde ile verilir. Bir NaI(Tl) dedektörü, 1 MeV enerjili bir γ -ışını için yaklaşık olarak % 8 veya % 9 ayırma gücüne sahiptir. Buna karşın germanyum dedektörlerinde aynı enerji için dedektörün ayırma gücü, % 0.1 civarındadır. Örneğin ^{137}Cs 'nin 661,7 keV deki piki için NaI(Tl) dedektörünün FWHM'si 45 keV iken HPGe dedektörünün FWHM'si 30 kat daha az olup 1,5 keV'dir[35].

3.3. Dedektör Verimi

Bir parçacık dedektöre ile etkileştiğinde ölçülebileceği kesin değildir. Ölçümün olup olmayacağı, parçacığın enerjisine ve tipine, dedektörün tipine, yapıldığı malzemeye ve büyüklüğüne bağlıdır. Şekil 3.6'da verildiği gibi parçacık, (1) dedektörle etkileşme yapmadan gidebilir, (2) dedektör içinde etkileşmeler yaparak soğurulabilir, (3) uygun elektronik aletlerle ölçülemeyecek kadar küçük sinyal meydana getirebilir, (4). dedektör penceresinden saçılarak dedektör ile etkileşemeyebilir[32,46].



Şekil 3.6: Kaynaktan dedektöre gelen parçacıkların, dedektörle etkileşmeleri[46].

Dedektör verimi, mutlak (absolute efficiency) ve gerçek (intrinsic efficiency) olarak ikiye ayrılır. Mutlak verim (ε_{abs}), kaynaktan saçılan fotonların dedektör tarafından ölçülebilme olasılığını, gerçek verim (ε_i) ise, dedektöre çarpan fotonların ölçülebilme olasılığını anlatmaktadır. Yani, mutlak verim dedektörde alınan sayımların kaynaktan yayımlanan gama ışınlarına oranı, gerçek verim ise dedektör tarafından üretilen sinyallerin gelen gama ışınlarına oranıdır. Mutlak verim ve gerçek verim arasındaki ilişki,

$$\varepsilon_i = \frac{4\pi}{\Omega} \times \varepsilon_{abs} \quad (3.2)$$

denklemleri ile verilir. Burada Ω , dedektörün kapladığı katı açıdır. Bu ifaden de görüldüğü gibi; Mutlak verim dedektörün kapladığı katı açığa, yani alanı ve kaynaktan uzaklığına bağlıdır. Dairesel bir dedektör için $\Omega = \pi a^2 d$ olarak verilir. Gerçek verim ise, katı açıdan bağımsız, dedektör materyaline, radyasyon enerjisine ve dedektörün kalınlığına bağlıdır[35,52].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Toprak örneklerinin gama spektrometrik analizleri, Kafkas Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Radyasyon Ölçüm Laboratuvarında, Resim 4.1’de gösterilen NaI(Tl) 3"x3" diGiBASE Maestro-32 sintilasyon dedektörü kullanılarak yapılmıştır. Bilgisayar programı olarak Scintivision™-32 (A35-B32) programı kullanılmıştır. Ölçüm cihazı, ayrıntılı olarak Bölüm 3’de tanıtılmıştır.



Resim 4.1: NaI(Tl) Sintilasyon dedektörü.

4.1. Enerji Kalibrasyonu

Çok kanallı analizöre gelen her puls, yüksekliklerine göre bir kanalda sayım olarak sayılır. Her kanal, bir enerji değerine karşı gelmektedir. Ancak puls yükseklikleri, fotoçoğaltıcı tüpe uygulanan yüksek gerilim ve yükseltecin kazancı ile değişir. Bu değişim, bir kanala karşılık gelen enerji değerini değiştirmektedir. Bu nedenle, sistemde enerji kalibrasyonu yapmak bir zorunluluktur[52].

Bilgisayar hafızasında toplanan spektrumların analiz edilmesi için, hangi kanalın hangi enerjiye karşılık geldiğinin bilinmesi gerekir. Böylece numunede bulunan radyoaktif çekirdek türleri bulunabilir.

Enerji kalibrasyonu ile çok kanallı analizör (MCA) kalibre edilir. Kalibrasyon işleminden sonra, MCA da kanal başına düşen enerji hesaplanır. Elde edilen kalibrasyon ifadesi, daha sonra bilinmeyen bir numunenin MCA da oluşacak piklerinin nitel olarak tanımlanmasında kullanılır[62].

Sayım sisteminin enerji kalibrasyonu, değişik enerjilere sahip standart gama kalibrasyon kaynakları kullanılarak yapılır. En çok kullanılan kalibrasyon kaynakları Tablo 4.1’de verilmiştir. Kullanılacak standart kaynakların seçiminde 50–1500 keV enerji aralığında ve olabildiğince tek veya az sayıda gama enerjili (enerji kalibrasyonu için değil ama verim kalibrasyonu için önemli), uzun ömürlü kaynaklar tercih edilir[61,62].

Tablo 4.1: Enerji kalibrasyonu için önerilen izotoplar[35].

Radyonüklid	Yarılanma süresi	E (keV)	f_{γ}
Am-241	432.70 yıl	59.54	0.359
Co-57	271.80 gün	122.06 - 136.47	0.855 - 0.106
Co-60	5.27 yıl	1173.24 - 1332.50	0.9990 - 0.9998
Cs-137	30.10 yıl	661.67	0.851
Mn-54	312.10 gün	834.84	0.99975
Na-22	1.61 yıl	1274.52	0.9994

Enerjisi bilinen radyoaktif kaynaklar detektöre yerleştirilir ve yeterli istatistik alınana kadar sayılır. Kalibrasyon işleminde kullanılan bu kaynakların spektrumda oluşturduğu piklerin tepe noktalarına göre, o enerjideki piklerin hangi kanallarda oluştuğu tespit edilir. Elde edilen bu spektrumda gözlenen piklerden düşük ve yüksek enerjili bölgede bulunan en az iki tanesi seçilerek bilinen enerjilere karşı gelen kanal numaraları,

$$\langle K \rangle = \left[\sum_{k=1}^N k(C_k - C_c) \right] / \left[\sum_{k=1}^N (C_k - C_c) \right] \quad (4.1)$$

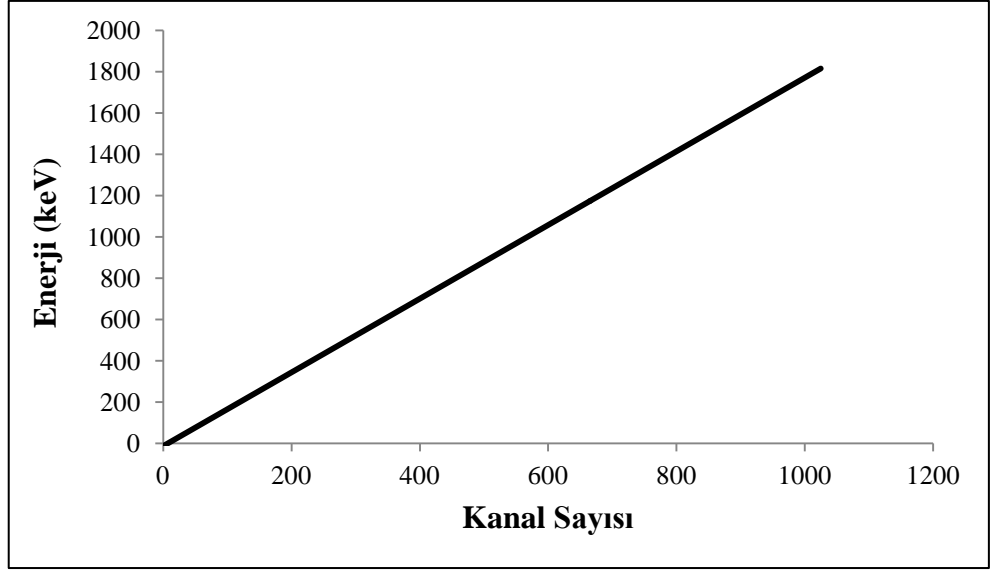
ifadesinden belirlenerek kaydedilir. Burada $\langle K \rangle$; pikin ağırlık merkezi, N ; pikin başlangıcından bitiş kanalına kadar olan kanal sayısı, C_k , k kanalındaki sayım değeri, C_c ise kanal başına ortalama Compton zemin sayım değeridir. Ancak pratikte pik ağırlık merkezi yerine, pikin tepe noktasına (en yüksek 2–3 sayımın alındığı kanalların ortalamasına) karşı gelen kanal numarası da kullanılabilir. Sonra bu kanallardaki enerji değerleri, bir fonksiyona fit edilerek kalibrasyon eğrisinin denklemi elde edilir. Bu şekilde MCA'nın tüm kanalları kalibre edilmiş olur. Temelde kalibrasyon eğrisinin mükemmel bir doğru olması gerekir. Ancak gerek yükselticide gerekse doğrusal yükselticideki çevirme ve yükseltmelerin tam doğrusal olmaması nedeniyle standart kaynaklarla elde edilen enerji değerleri doğrusallıktan sapabilir. Kalibrasyon eğrisinin denklemi aşağıdaki denklemdeki gibi logaritmik, üssel veya eksponansiyel bir denkleme eşitlenir.

$$E = a_0 + a_1 \langle K \rangle + a_2 \langle K \rangle^2 + \dots \quad (4.2)$$

ifadesiyle verilir. Burada; E : ilgililenilen pikin enerjisi (keV), $\langle K \rangle$: kanal numarası, a_0 : başlangıç kanalındaki enerji, a_1 : eğim (keV/kanal) ve a_2 : doğrusallıktan sapma katsayısı (keV/kanal²)'dir.

Bilinen enerjilere karşı gelen pik ağırlık merkezleri yukarıdaki ifadede yerine konarak [Kanal] vs [Enerji] grafiğinden detektörün enerji kalibrasyonunu belirleyen a_0 , a_1 ve a_2 sabitleri hesaplanır. Böylece enerjinin kanal numarasına göre değişimini gösteren birinci ($E = a_0 + a_1 \langle K \rangle$) veya ikinci dereceden ($E = a_0 + a_1 \langle K \rangle + a_2 \langle K \rangle^2$) polinom denklemi bulunmuş olur[62].

Çalışmada kullandığımız dedektör; standart kaynaklar, ²⁴¹Am'in 59.54 keV'lik enerjisi, ⁵⁷Co'nin 122.07 keV'lik enerjisi, ¹³⁴Cs'ün 604.66 ve 795.76 keV'lik enerjisi kullanılarak kalibre edildi. Şekil 4.1' de kullandığımız NaI(Tl) detektörünün enerji-kanal kalibrasyon grafiği görülmektedir.



Şekil 4.1: NaI(Tl) dedektörünün enerji kalibrasyonu.

4.2. Verim Kalibrasyonu

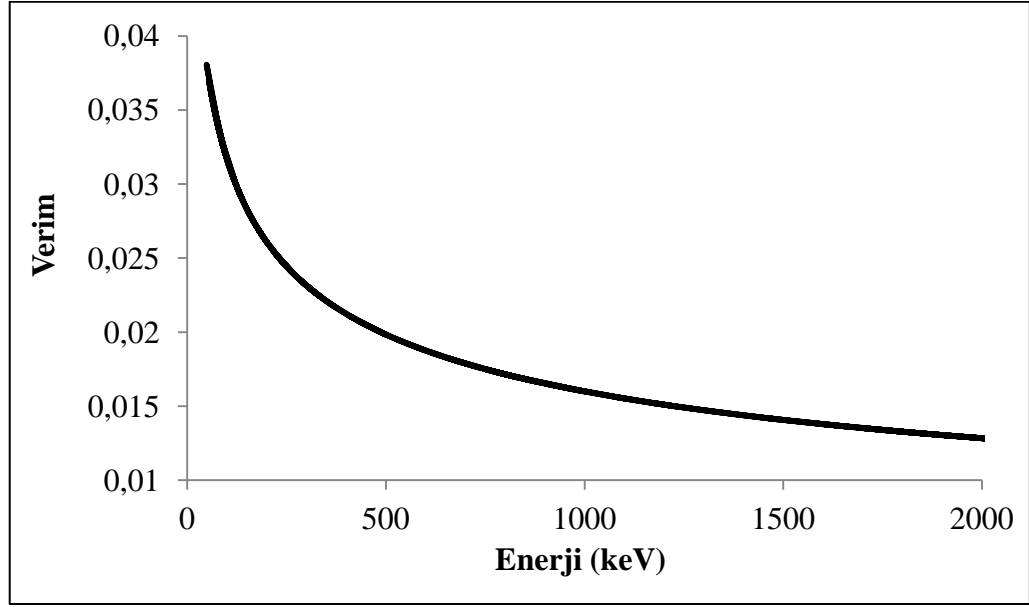
Gama spektrometresinde belirlenmesi gereken en önemli parametre verimdir. Dedektör verimi, dedektörde sayılabilir büyüklükte puls üreten fotonların sayısının, dedektöre gelen fotonların sayısına oranı ya da dedektörde sayılabilir büyüklükte puls üreten fotonların yüzdesi olarak tanımlanır.

Verim tayini için genelde, aktivitesi kesin olarak bilinen, belirli geometri ve yoğunluklarda standart kaynaklar kullanılır. Gama aktiviteleri (A) bilinen standart kaynaklarla alınan spektrumdan dedektör verimi, aşağıdaki ifadeden yararlanarak, değişik gama enerjileri için belirlenir.

$$\mathcal{E}_\gamma = \frac{N}{A \cdot \gamma \cdot t_s \cdot K} \quad (4.3)$$

Burada N, ilgilenilen tam enerji pikinin (fotopik) düzeltilmiş net alanı, A, ilgili fotopik'in ait olduğu radyonüklid'in aktivitesi, γ ilgilenilen fotopik E_γ enerjisine karşılık gelen gamma yayınlanma ihtimali, t_s numune spektrumunun elde edilmesi için geçen, saniye cinsinden sayım süresi, K ise düzeltme faktörüdür[38,61].

Bu işlem çok sayıdaki değişik gama enerjileri için yapılarak elde edilen verim değerleri ile enerji grafiği çizilir. Şekil 4.2’de bu çalışmada kullanılan NaI(Tl) detektörün mutlak verim eğrisi görülmektedir.



Şekil 4.2: NaI(Tl) dedektörünün mutlak verim eğrisi.

4.3. Pik Alanı Hesabı

Gama spektrometresi kullanılarak yapılan aktivite ölçümleri veya nicel analizlerde fotopik alanı doğru alınmamışsa, diğer işlemler ne kadar hassas olursa olsun, sonuç hatalı bulunur. Net fotopik alanı hesaplanmasında çeşitli yöntemler vardır. Burada verilen, ilgilenilen pike diğer bitişik piklerden hiçbir girişimin olmadığı durumda geçerli olan, yaygın bir yöntemdir. Genel olarak tek bir pikin net alanının doğru bir şekilde alınması için aşağıdaki yöntem uygulanır[62].

Fotopik alanı, ilgilenilen enerjideki pikin sürekli Compton fonunun (background) üstündeki toplam sayım olarak tanımlanır. Covell metodu olarak da bilinen bu pik alanı hesaplama metodunda, önce pikin uç noktalarındaki kanal sayısı tespit edilir. Sonra, her bir kanalda biriken sayımların toplamından doğal fon alanı çıkarılarak net pik alanı (N_p) belirlenir. Pik alanının hesabı Şekil 4.3’de verilen örnek tek bir pik üzerinde açıklanmıştır.

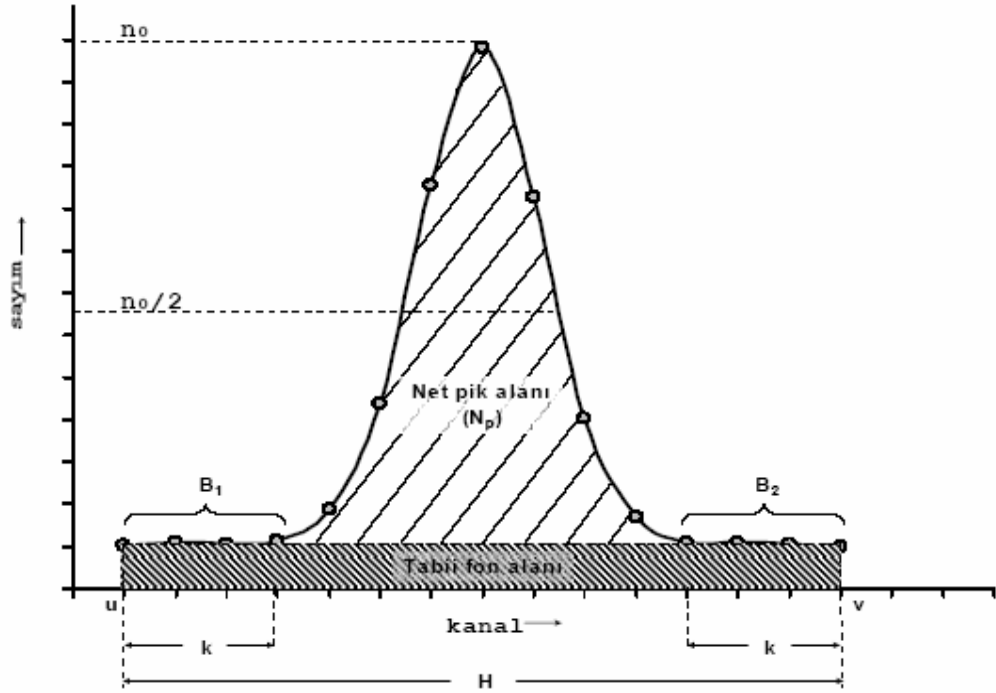
$$\text{Net Pik Alanı}(N_p) = \text{Toplam Alan} - \text{Doğal Fon Alanı} \quad (4.4)$$

$$\text{Toplam Alan} = \sum_{i=u}^v X_i \quad (4.5)$$

$$\text{Doğal Fon Alanı} = \frac{H}{2} \times (B_1 + B_2) \quad (4.6)$$

$$\text{Net Pik Alanı} = \sum_{i=u}^v X_i - \left\{ \frac{H}{2} \times (B_1 + B_2) \right\} \quad (4.7)$$

formülüyle hesaplanabilirler. Burada; u: pikin başlangıç kanal numarasını, v: pikin bitiş kanal numarasını, H: piki oluşturan tüm kanalların sayısını ($H = v - u + 1$), xi: i. kanaldaki sayım miktarını ve B_1 ve B_2 sırasıyla pikin sağ ve sol tarafındaki doğal fon ortalama sayım miktarını ifade etmektedir (Şekil 4.3) ve 4.8 ve 4.9 denklemleriyle hesaplanırlar.



Şekil 4.3: Gama pik alanının hesaplanmasında kullanılan parametrelerin gösterimi[59].

$$B_1 = \frac{1}{k} \left\{ \sum_{i=u}^{u+k-1} X_i \right\} \quad (4.8)$$

$$B_2 = \frac{1}{k} \left\{ \sum_{i=v-k+1}^v X_i \right\} \quad (4.9)$$

k: pikin sağ ve sol uç taraflarında devam eden ve süreklilik gösteren kanalların sayısını ifade eder[59,62].

4.4. Standartla Karşılaştırma Yöntemi

Standartla karşılaştırma yöntemi; Bir örneğin radyoaktivitesinin belirlenmesi için, aynı geometride, aktivitesi bilinen, aynı radyonüklidlere ve benzer matrise ve yoğunluğa sahip bir referans örneğin sayımının kullanıldığı alternatif ve güvenilir bir yöntemdir[35].

Bu yönteme göre, örnekleri ölçeceğimiz geometri ile aynı geometride daha önceden aktivitesi bilinen aktif uranyum, toryum ve potasyum standartları ölçülür, sayım hızları bulunur ve daha sonra aynı geometride hazırlanan örnekler ölçülür. Standardın aktivitesi bilindiği için sayım hızları oranından örneklerin aktivitesi kolaylıkla ve güvenli bir şekilde hesaplanabilir[63].

A_s : Standardın aktivitesi, A_x : örneğin aktivitesi, m_s : standardın kütlesi, m_x : örneğin kütlesi. t_s : Standartın sayım süresi, t_x : örneğin sayım süresi olmak üzere:

$$\frac{A_s}{A_x} = \frac{(Sayım)_s t_x m_x}{(Sayım)_x t_s m_s} \quad (4.10)$$

Sayım / t = Sayım hızı olarak gösterilirse örneğin aktivitesi;

$$A_x = A_s \times \frac{(sayım hızı)_x m_s}{(sayım hızı)_s m_x} \quad (4.11)$$

denklemleri ile hesaplanır. Bu yöntemin avantajları, sayım hızları oranlanırken dedektör verimlerinin birbirini yok etmesi ve bunun sonucunda da verime bağlı hataların ortadan ve gerçek çakışma düzeltilmesi gibi düzeltilmesi çok zor olan ve sonuca fazladan belirsizlik getiren bazı düzeltmelerin ortadan kalkmasıdır[35,63].

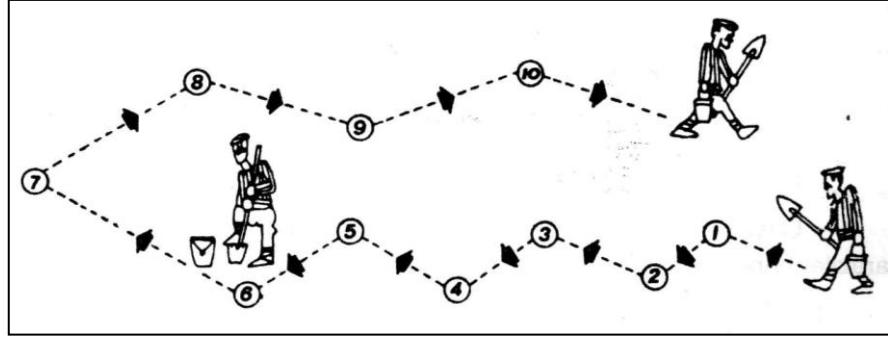
4.5. Toprak Örneği Alma ve Örnek Hazırlama Yöntemleri

Doğal radyoaktivite tayininde örneklerin toplanması ve hazırlanması işlemleri, deneysel çalışmaların önemli bir aşaması olup amaca uygun bir şekilde yapılması gerekmektedir.

Toprak numunesinin alınması, iklim şartlarına bağlıdır. Sıcaklık ve rutubet şartlarının uygun olduğu, yıl boyunca herhangi bir zamanda numune alınabilir. Numune alınırken toprak, numune alanın ayağına bulaşacak kadar ıslak olmadığı gibi, numune alma aletlerine zorluk çıkaracak kadar da kuru olmamalıdır. Ancak toprak kirliliği ve diğer problemlerde, çalışmalar için en uygun olan zamanda numune alınmalıdır.

Toprak örnekleri için ölçüm noktaları belirlenirken çalışma alanının homojen bir dağılım göstermesine, bölgeyi tanımlamasına ve ayrıca yerleşim alanlarına yakın, ekim yapılmamış, otsuz, açık ve düz alanlar olmasına dikkat edilmelidir. Toprak yüzeyinin yağmur ve akıntı suları ile zarar görmemiş ve ileride zarar görmeyecek olmasına, mümkün oldukça vadi eteklerinden uzak yerler olmasına ve yüksek bitkiler ve bunların dal ve yapraklarıyla gölgelenmemiş olması dikkat edilmelidir. Ayrıca örnek toplanırken; önceden gübre veya kireç konulmuş yerlerden, hayvan gübresi yığılan yerlerden, tarlanın çukur ve tümsek yerlerinden ve su arkı ve yollara yakın kısımlarından örnek alınmamasına dikkat edilmelidir.

Örnekler; tespit edilen alanın bir ucundan öbür ucuna doğru düz bir çizgi üzerinde ilerleyerek Şekil 4.4'deki gibi zig-zak'lar çizilerek her bir istasyonum10 farklı noktasından alınmıştır. Örnekler alınırken, toprak yüzeyi temizlenerek yüzeyden yaklaşık olarak 15 cm kadar bir derinlikten numune toplama aracı ile alınmış ve içerisinde taş, ot, odun parçaları, ağaç kabukları gibi yabancı cisimler ayıklanmıştır.



Şekil 4.4: Toprak numunesi almanın şematik gösterimi[38].

Daha sonra her bir istasyondan alınan örnekler birleştirilerek naylon torbalara konmuş ve torbalar etiketlenmiştir. Toplam 17 istasyondan her biri, yaklaşık olarak 2 kg olan 17 adet toprak örneği toplanmış ve toplanan örnekler daha sonra laboratuara getirilmiştir.

Toprak örnekleri içlerinde bulunan taş, ot ve odun gibi yabancı maddelerden iyice arındırıldıktan sonra kuru zeminde serilerek 15 gün süreyle laboratuvar ortamında kurutulmuştur. Toprakta bulunan nemi buharlaştırma ile azaltmak ve çok küçük parçacıklar haline gelebilecek şekilde öğütemek amacıyla kurutma işlemi yapılmıştır. Kurutma işlemi esnasında, buharlaşma ile kaybolacak radyoaktivite miktarı ihmal edilebilecek düzeydedir.

Laboratuvar ortamında kurutulan toprak numunelerinin her biri, ayrı ayrı elekten geçirilmiştir. Daha sonra elekten geçirilen toprak numuneleri mikserle, toz haline getirilmiştir. Toz haline getirilen toprak numuneleri, 100 ml hacimli, 65x55 mm ebatlı, darası alınmış vida kapaklı şeffaf patolojik numune kaplarına yerleştirilip hassas teraziyle tartılarak, ağırlıkları kilogram cinsinden kaydedildi. Toprak içerisinde bulunan; Toryum, Radium ve bunların bozunma ürünlerinin dengeye gelmesini sağlamak amacıyla kapların ağız kısmı hava geçirmeyecek şekilde sıkıca kapatılmış ve yaklaşık kırk günlük süreyle bekletilmiştir.

4.6. Ölçüm Sahası

Bu çalışmada, ölçüm sahası olarak Akyaka, Susuz ve Arpaçay ilçe merkezleri ve çevresi seçilmiştir. Resim 4.2’de kırmızı imleçle işaretlenen noktalar Arpaçay, beyaz imleçle

işaretlenen noktalar Akyaka ve sarı imleçle işaretlenen istasyonlar ise Susuz ilçelerinde toprak numunelerinin alındığı istasyonları göstermektedir. Örnekleme noktaları, GPS (global position system) ile belirlenmiş ve konumlar kaydedilmiştir. Örnekleme noktalarının koordinatları, Ek 2’de verilmiştir. Bu istasyonlardan alınan toprak örneklerinin doğal radyoaktivite konsantrasyonları deneysel olarak belirlenmiştir.



Resim 4.2: Toprak numunesi alınan istasyonlar.

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR

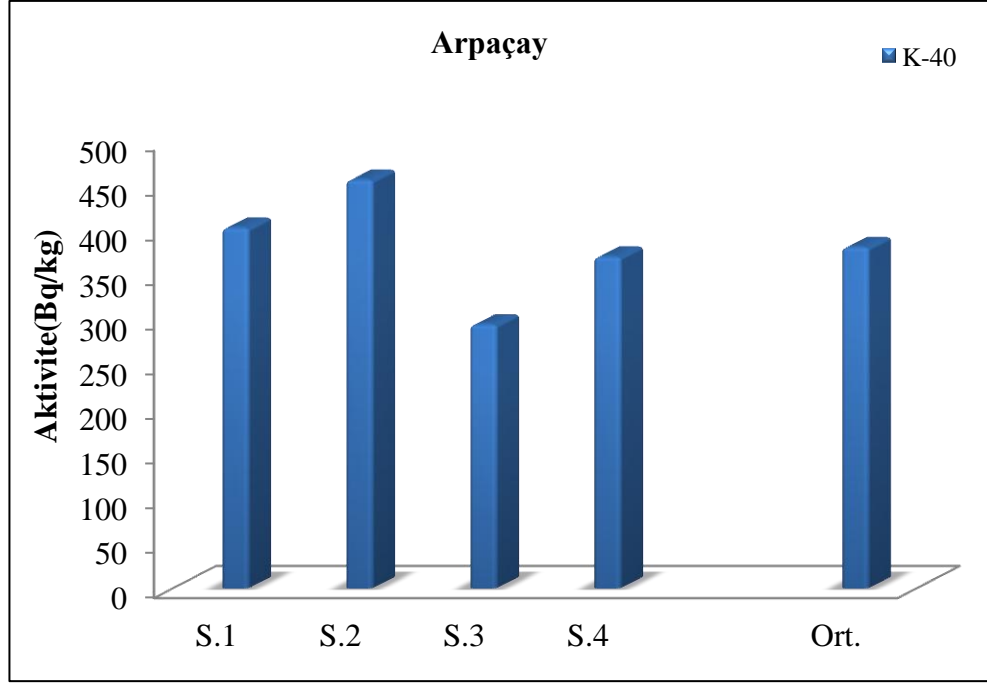
Kars ilinin Akyaka, Arpaçay ve Susuz ilçelerinde 2012 yılının Temmuz ayında toplanan toprak numuneleri, 2012 Ekim ayında NaI(Tl) sintilasyon dedektörüne konularak yaklaşık bir gün (24 saat) boyunca sayılmıştır. Net pik alanını hesaplanırken dışarıdan gelecek katkıların hesaplanabilmesini sağlamak amacıyla, sistemi değiştirmeksizin aynı zaman aralığında örnek olmaksızın doğal fon ölçümü ayrıca gerçekleştirilmiştir.

Toprak örneklerin analizleri, karşılaştırmalı aktivite hesabı kullanılarak yapılmıştır. Bu analizlerde doğal ^{226}Ra (^{238}U), ^{232}Th , ve ^{40}K gibi radyoizotoplarla birlikte, fisyon ürünü olan ve radyoaktif kirlilik seviyesini açıkça gösteren ^{137}Cs radyoizotopunun da konsantrasyonu tespit edilmiştir. Daha sonra bu sonuçlar; Türkiye’de yapılan bazı çalışmalarla daha sonra Kars il merkezi, Doğu Anadolu Bölgesi, Türkiye ortalaması ve Dünya ortalaması ile karşılaştırılmıştır. Bu radyoizotopların aktivite konsantrasyonları aşağıda ayrı ayrı ele alınmaktadır.

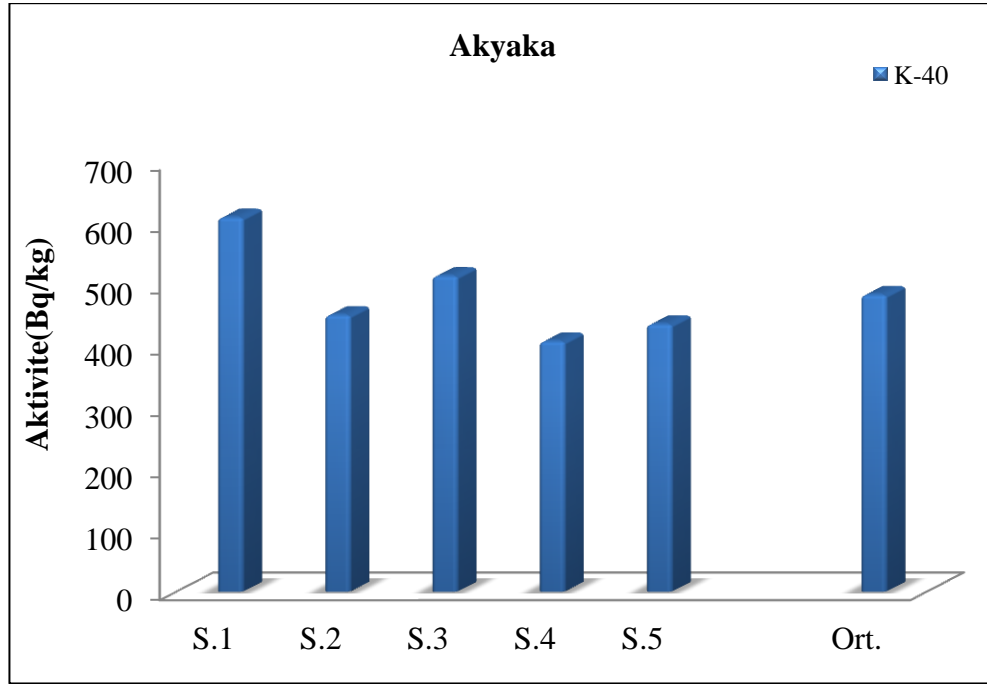
5.1. Toprak Örneklerinde ^{40}K ’nın Aktivite Konsantrasyonu

^{40}K , daha öncede belirtildiği gibi bozunum serilerine ait olmayıp doğada tek başına bulunmaktadır. 1460 keV’de %11 bollukta bir piki vardır. ^{40}K toprakta oldukça yüksek konsantrasyonlarda bulunmaktadır.

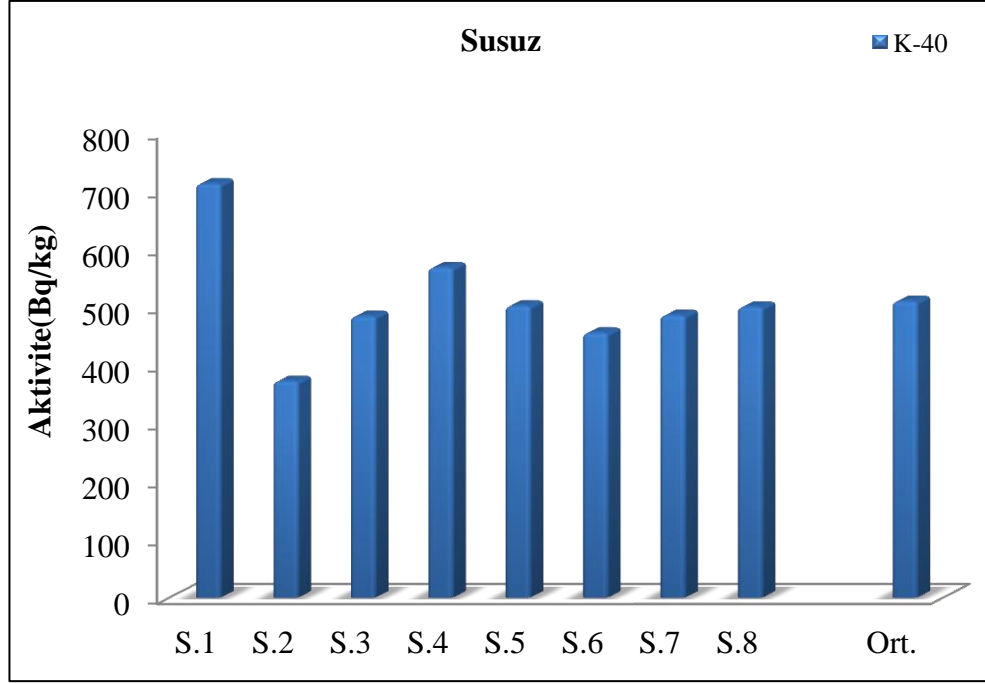
Çalıştığımız toprak örneklerinde, değişik konsantrasyonlarda ^{40}K radyoizotopuna rastlanmıştır. ^{40}K aktivite konsantrasyonu; Arpaçay ilçesinden alınan toprak örneklerinde, $294.9 \pm 20.2 \text{ Bqkg}^{-1}$ ile $465 \pm 20.4 \text{ Bqkg}^{-1}$ değerleri arasında ortalama $383 \pm 19.3 \text{ Bqkg}^{-1}$, Akyaka ilçesinden alınan toprak örneklerinde, $408 \pm 20.2 \text{ Bqkg}^{-1}$ ile $609.7 \pm 20 \text{ Bqkg}^{-1}$ değerleri arasında ortalama $483.8 \pm 20.5 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve Susuz ilçesinden alınan toprak örneklerinde, $468.2 \pm 21.26 \text{ Bqkg}^{-1}$ ile $712.5 \pm 23.1 \text{ Bqkg}^{-1}$ değerleri arasında ortalama $510.4 \pm 21.2 \text{ Bqkg}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3’de ^{40}K ’ın Çalışma bölgelerinden alınan toprak örneklerindeki, aktivite konsantrasyonlarının ilçelere göre dağılımı verilmektedir.



Şekil 5.1: Arpaçay bölgesinden alınan toprak örneklerindeki K-40 dağılımı.



Şekil 5.2: Akyaka bölgesinden alınan toprak örneklerindeki K-40 dağılımı.



Şekil 5.3: Susuz bölgesinden alınan toprak örneklerindeki K-40 dağılımı.

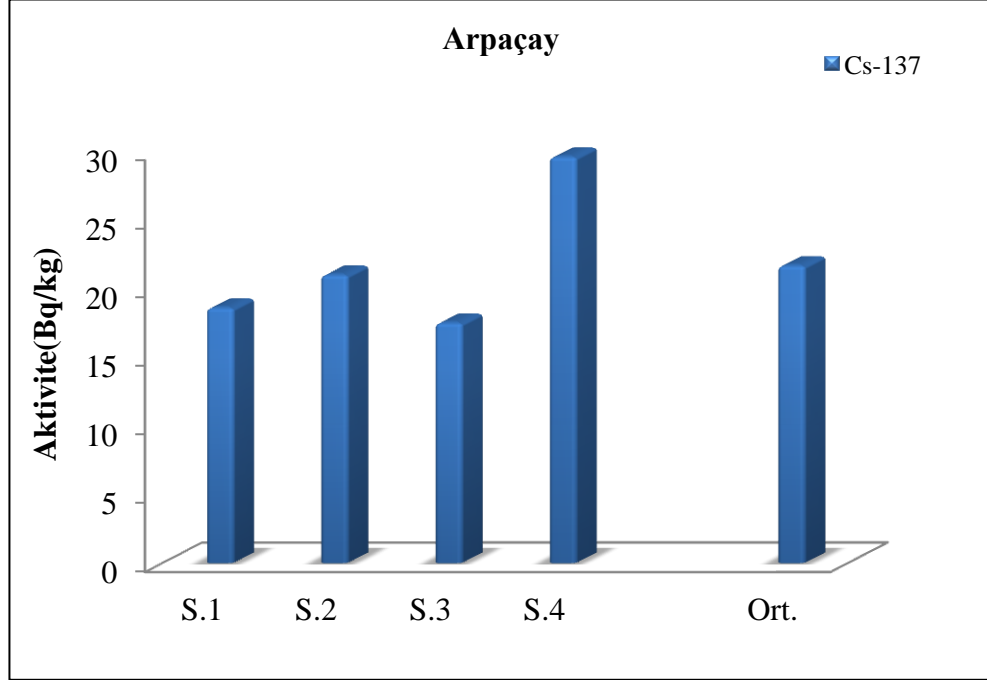
Yapılan bazı çalışmalarda, ^{40}K 'ın ortalama aktivite konsantrasyonunu, Kars il merkezi toprak örneklerinde $536 \pm 52 \text{ Bqkg}^{-1}$ [38], Iğdır toprak örneklerinde, sırasıyla 333 ± 34 ve $423 \pm 24.2 \text{ Bqkg}^{-1}$ [64,65], Doğu Karadeniz bölgesi topraklarında $622.8 \pm 34.4 \text{ Bqkg}^{-1}$ [28] ve Şanlıurfa toprak örneklerinde 298.6 Bqkg^{-1} [24] olarak tespit edilmiştir.

5.2. Toprak Örneklerinde ^{137}Cs 'nin Aktivite Konsantrasyonu

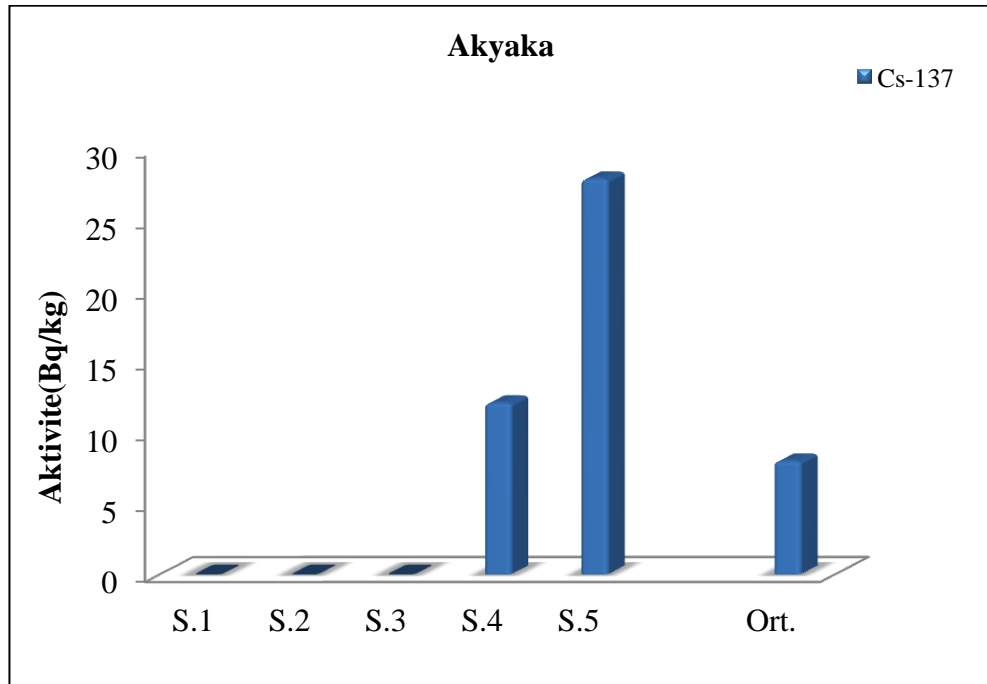
^{137}Cs , fisyon ürünü olup, tabiatta doğal olarak bulunmamaktadır. Yapılan nükleer denemeler veya nükleer kazalar sonucunda çevreye yayılmıştır. ^{137}Cs 'nin yarı ömrü 30,17 yıldır ve 662 keV'de %85 bollukta bir piki vardır.

Çalıştığımız toprak örneklerinde, değişik konsantrasyonlarda ^{137}Cs radyoizotopuna rastlanmıştır ^{137}Cs 'nin aktivite konsantrasyonu; Arpaçay ilçesinden alınan toprak örneklerinde, $17.5 \pm 2.5 \text{ Bqkg}^{-1}$ ile $29.6 \pm 3.6 \text{ Bqkg}^{-1}$ değerleri arasında ortalama $21.7 \pm 3 \text{ Bqkg}^{-1}$, Akyaka ilçesinden alınan toprak örneklerinde, 0 ile $27.9 \pm 2.9 \text{ Bqkg}^{-1}$ değerleri arasında ortalama $8 \pm 2.8 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve Susuz ilçesinden alınan toprak örneklerinde, 0 ile $28.6 \pm 3.2 \text{ Bqkg}^{-1}$ değerleri arasında ortalama $12.6 \pm 2.7 \text{ Bqkg}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir.

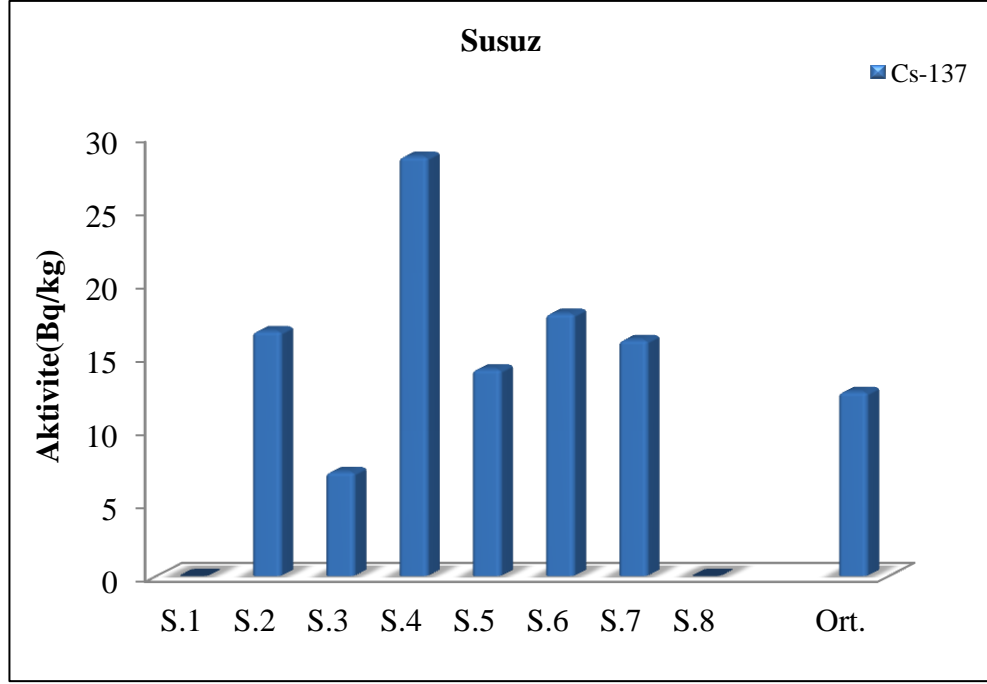
Şekil 5.4, 5.5 ve 5.6'da ^{137}Cs 'nin sırasıyla Arpaçay, Akyaka ve Susuz ilçelerinden alınan toprak örneklerindeki dağılımı verilmektedir.



Şekil 5.4: Arpaçay bölgesinden alınan toprak örneklerindeki Cs-137 dağılımı.



Şekil 5.5: Akyaka bölgesinden alınan toprak örneklerindeki Cs-137 dağılımı.



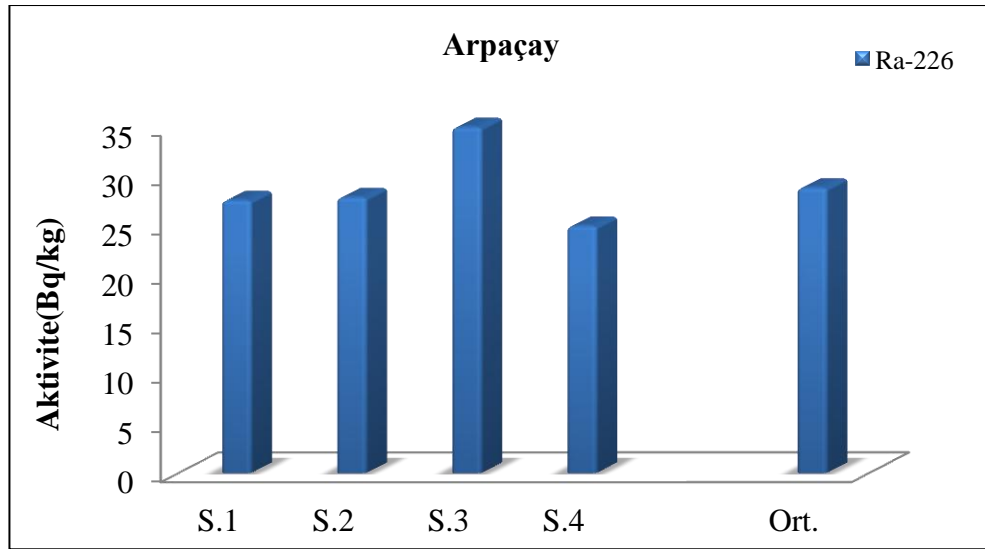
Şekil 5.6: Susuz bölgesinden alınan toprak örneklerindeki Cs-137 dağılımı.

Yapılan bazı çalışmalarda, ^{137}Cs 'nin ortalama aktivite konsantrasyonunu, Kars il merkezi toprak örneklerinde $18 \pm 2.7 \text{ Bqkg}^{-1}$ [38], Iğdır toprak örneklerinde, sırasıyla 18 ± 4 ve $23.6 \pm 2.9 \text{ Bqkg}^{-1}$ [64,65], Doğu Karadeniz bölgesi topraklarında $169 \pm 13.7 \text{ Bqkg}^{-1}$ [28] ve Şanlıurfa toprak örneklerinde 9.08 Bqkg^{-1} [24] olarak tespit edilmiştir.

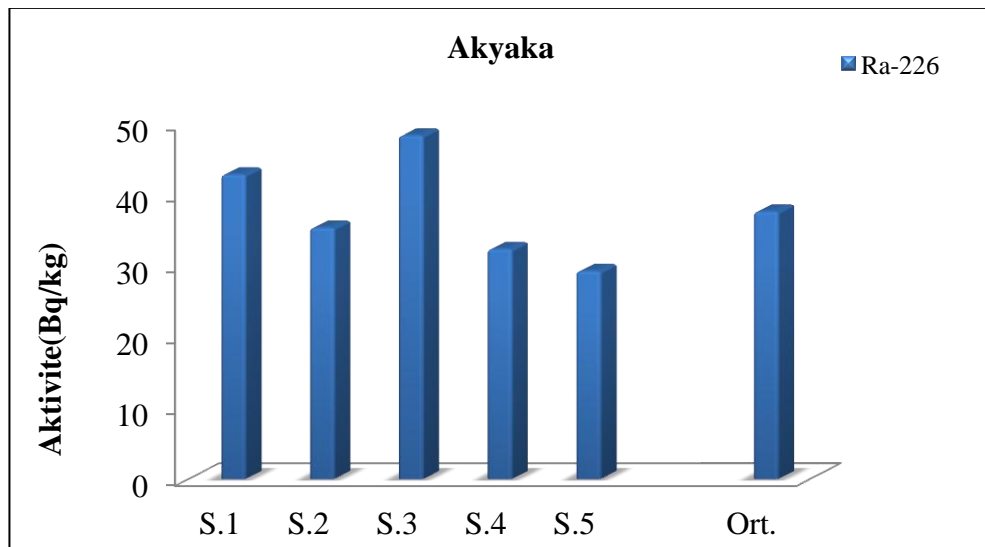
5.3. Toprak Örneklerinde ^{226}Ra (^{238}U)'in Aktivite Konsantrasyonu

Toprak örneklerinde bulunan ^{238}U ve ^{232}Th 'ye ait radyoaktivite değerleri, bu radyonüklidlerin bozunum ürünleri olan doğal radyonüklidlerin gama piklerinden hareketle tayin edilebilmektedir. ^{238}U 'e ilişkin radyoaktivite konsantrasyonu belirlenirken bozunum serisi içinde yer alan ^{214}Bi 'ün farklı enerjili piklerinden yararlanılmıştır. ^{214}Bi , ^{238}U 'in bozunum ürünüdür ve farklı enerjilerde birçok piki vardır. 609 keV, 1120 keV, 1238 keV ve 1764 keV'deki piklerinin bollukları sırasıyla %46, %15, %6 ve %16'dır. Çalışmamızda ^{214}Bi 'ün bolluğu yüksek olan 609, 1120 ve 1764 keV'deki piklerinden yararlanılmıştır.

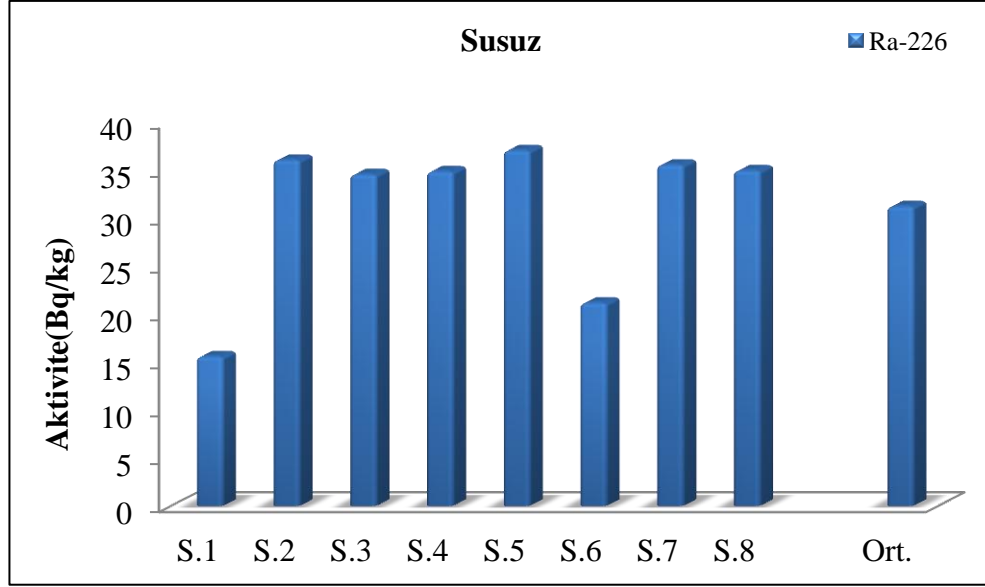
Çalıştığımız toprak örneklerinde, değişik konsantrasyonlarda ^{226}Ra radyoizotopuna rastlanmıştır. ^{226}Ra 'nın aktivite konsantrasyonu; Arpaçay ilçesinden alınan toprak örneklerinde, $25\pm 6.5 \text{ Bqkg}^{-1}$ ile $35\pm 6.8 \text{ Bqkg}^{-1}$ değerleri arasında değişmekle birlikte ortalama $28.9\pm 6.8 \text{ Bqkg}^{-1}$, Akyaka ilçesinden alınan toprak örneklerinde, $29.3\pm 6.4 \text{ Bqkg}^{-1}$ ile $42.9\pm 7.2 \text{ Bqkg}^{-1}$ değerleri arasında ortalama $37.7\pm 7.2 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve Susuz ilçesinden alınan toprak örneklerinde, $15.6\pm 7.5 \text{ Bqkg}^{-1}$ ile $37.1\pm 6.4 \text{ Bqkg}^{-1}$ değerleri arasında ortalama $31.3\pm 7.4 \text{ Bqkg}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9'da ^{226}Ra (^{238}U) aktivite konsantrasyonlarının sırasıyla Arpaçay, Akyaka ve Susuz ilçelerinden alınan toprak örneklerindeki dağılımı verilmektedir.



Şekil 5.7: Arpaçay bölgesinden alınan toprak örneklerindeki Ra-226 dağılımı.



Şekil 5.8: Akyaka bölgesinden alınan toprak örneklerindeki Ra-226 dağılımı.



Şekil 5.9: Susuz bölgesinden alınan toprak örneklerindeki Ra-226 dağılımı.

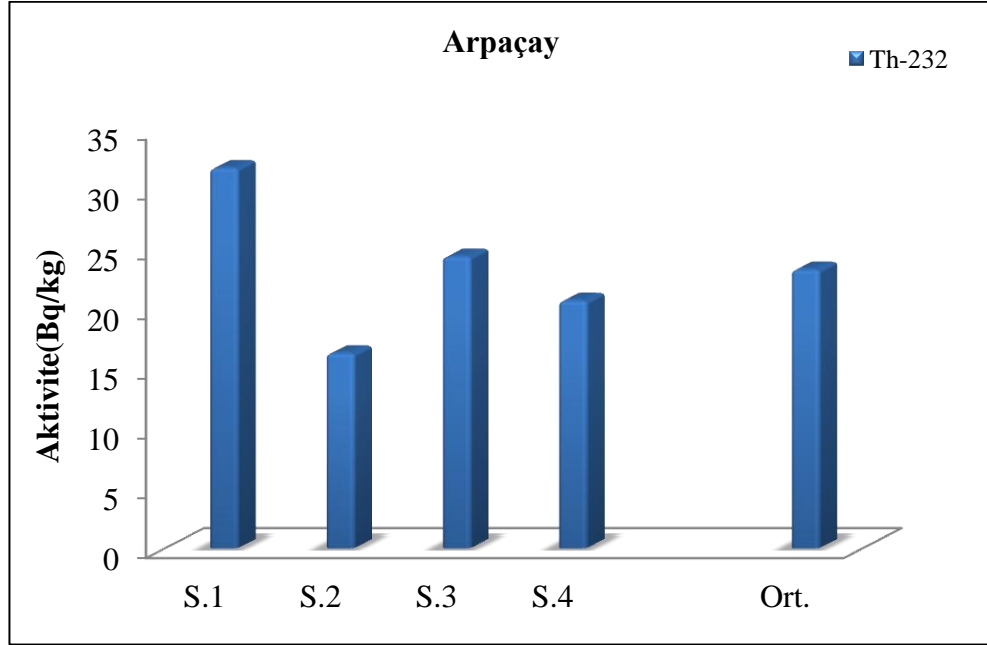
Yapılan bazı çalışmalarda, ^{226}Ra (^{238}U)'nin ortalama aktivite konsantrasyonunu; Kars il merkezi topraklarında $49.79 \pm 5.36 \text{ Bqkg}^{-1}$ [38], Iğdır toprak örneklerinde, sırasıyla 19 ± 4 ve $17.5 \pm 5.9 \text{ Bqkg}^{-1}$ [64,65], Doğu Karadeniz bölgesi topraklarında $55.2 \pm 6.1 \text{ Bqkg}^{-1}$ [28] ve Şanlıurfa toprak örneklerinde 20.8 Bqkg^{-1} [24] olarak tespit edilmiştir.

5.4. Toprak Öneklerinde ^{232}Th 'nin Aktivite Konsantrasyonu

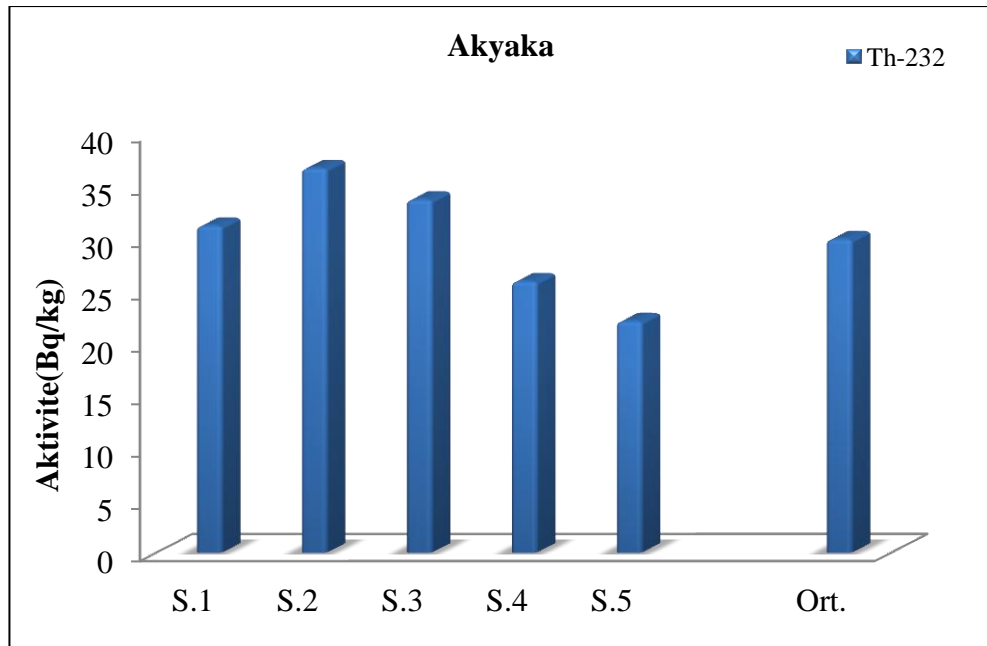
^{232}Th 'nin radyoaktivite konsantrasyonu bulunurken, bozunum serisindeki; ^{208}Tl aktivitesinin farklı enerjilerdeki piklerinin konsantrasyonlarının ortalaması alınmıştır. ^{208}Tl , ^{232}Th 'nin bozunum ürünü olup, 278 keV, 583 keV, 860 keV ve 2615 keV'de pikleri vardır. Bollukları sırasıyla %2.3, %30.7, %4.6 ve %35.6'dır. Çalışmamızda ^{208}Tl 'in bolluğu yüksek olan 583 ve 2615 keV'deki piklerinden yararlanılmıştır.

Çalıştığımız toprak örneklerinde, değişik konsantrasyonlarda ^{232}Th radyoizotopuna rastlanmıştır. ^{232}Th 'nin aktivite konsantrasyonu; Arpaçay ilçesinden alınan toprak örneklerinde, $16.3 \pm 4.8 \text{ Bqkg}^{-1}$ ile $31.8 \pm 5.1 \text{ Bqkg}^{-1}$ değerleri arasında değişmekle birlikte ortalama $23.3 \pm 4.8 \text{ Bqkg}^{-1}$, Akyaka ilçesinden alınan toprak örneklerinde, $22.1 \pm 4.8 \text{ Bqkg}^{-1}$ ile $36.7 \pm 5 \text{ Bqkg}^{-1}$ değerleri arasında ortalama $29.9 \pm 4.9 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve Susuz ilçesinden alınan toprak örneklerinde, $19.2 \pm 5.1 \text{ Bqkg}^{-1}$ ile $45 \pm 5.1 \text{ Bqkg}^{-1}$ değerleri

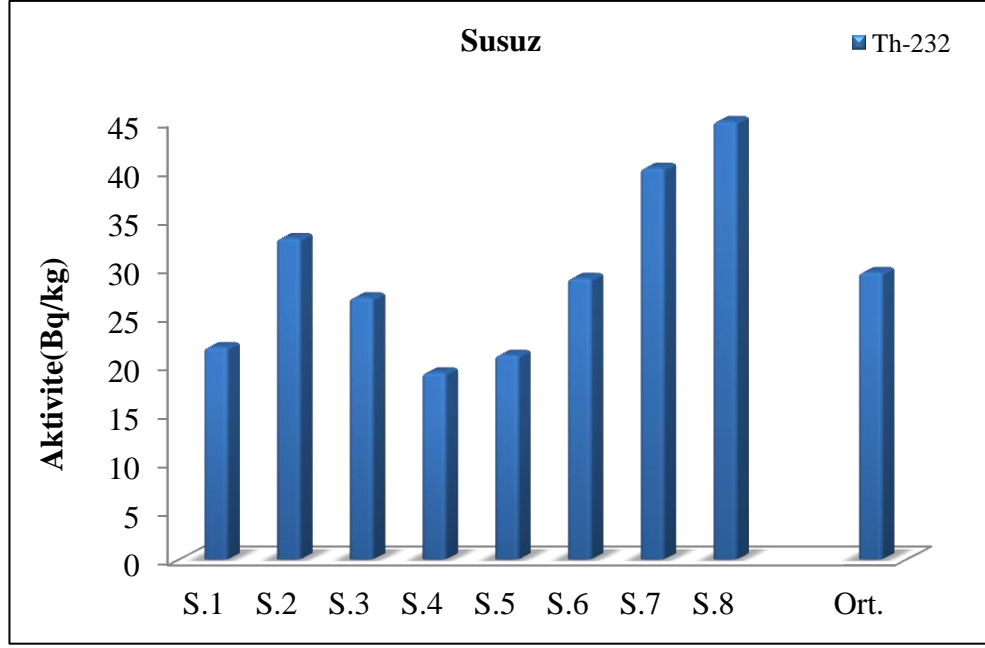
arasında ortalama $29.5 \pm 5 \text{ Bqkg}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.10, 5.11 ve 5.12’de ^{232}Th aktivite konsantrasyonlarının sırasıyla Arpaçay, Akyaka ve Susuz ilçelerinden alınan toprak örneklerindeki dağılımı verilmektedir.



Şekil 5.10: Arpaçay bölgesinden alınan toprak örneklerindeki Th-232 dağılımı.



Şekil 5.11: Akyaka bölgesinden alınan toprak örneklerindeki Th-232 dağılımı.



Şekil 5.12: Susuz bölgesinden alınan toprak örneklerindeki Th-232 dağılımı.

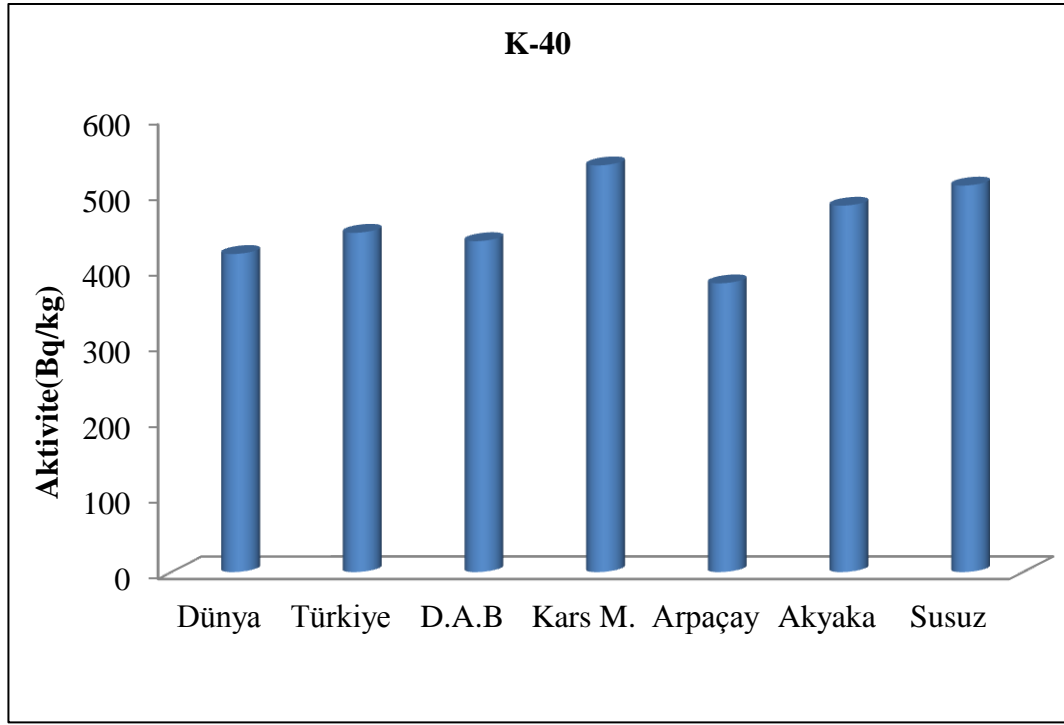
Yapılan bazı çalışmalarda, ^{232}Th 'nin ortalama aktivite konsantrasyonunu; Kars il merkezi toprak örneklerinde, $32\pm 6 \text{ Bqkg}^{-1}$ [38], Iğdır toprak örneklerinde, sırasıyla 18 ± 3 ve $17.5\pm 5.9 \text{ Bqkg}^{-1}$ [64,65], Doğu Karadeniz bölgesi topraklarında $40.5\pm 6.1 \text{ Bqkg}^{-1}$ [28] ve Şanlıurfa toprak örneklerinde 24.95 Bqkg^{-1} [24] olarak tespit edilmiştir.

Şekil 5.13, 5.14, 5.15 ve 5.16'da Dünya, Türkiye, Doğu Anadolu Bölgesi ve Kars topraklarında sırasıyla ^{40}K , ^{137}Cs , ^{226}Ra (^{238}U) ve ^{232}Th aktivite konsantrasyonlarının ortalamalarını gösterilmektedir[28,29].

^{40}K 'in ortalama aktivite konsantrasyonunun; Dünya ortalaması 420 Bqkg^{-1} , Türkiye ortalaması $448.5\pm 7.3 \text{ Bqkg}^{-1}$, Doğu Anadolu Bölgesi $437.3\pm 15.7 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve Kars il merkezi $536\pm 52 \text{ Bqkg}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir[38,66,67]. Ölçümlerden elde ettiğimiz sonuçlarda ^{40}K 'in ortalama aktivite konsantrasyonu Arpaçay Akyaka ve Susuz ilçeleri için sırasıyla; $383\pm 19.3 \text{ Bqkg}^{-1}$, $483.8\pm 20.5 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve $510.4\pm 21.2 \text{ Bqkg}^{-1}$ olarak bulunmuştur.

Ölçümlerden elde ettiğimiz sonuçla karşılaştığımızda Şekil 5.13' den de görüldüğü gibi; Arpaçay ilçesinin ^{40}K aktivite konsantrasyonunun, Dünya, Türkiye, Doğu Anadolu

Bölgesi ve Kars merkez ortalamalarının biraz altında, Akyaka ve Susuz ilçelerindeki ^{40}K 'ın aktivite konsantrasyonu ise Dünya ortalaması, Türkiye ortalaması ve Doğu Anadolu Bölgesinin ortalamasının biraz üstünde ve Kars Merkez ortalamasının biraz altında olduğu görülmektedir.

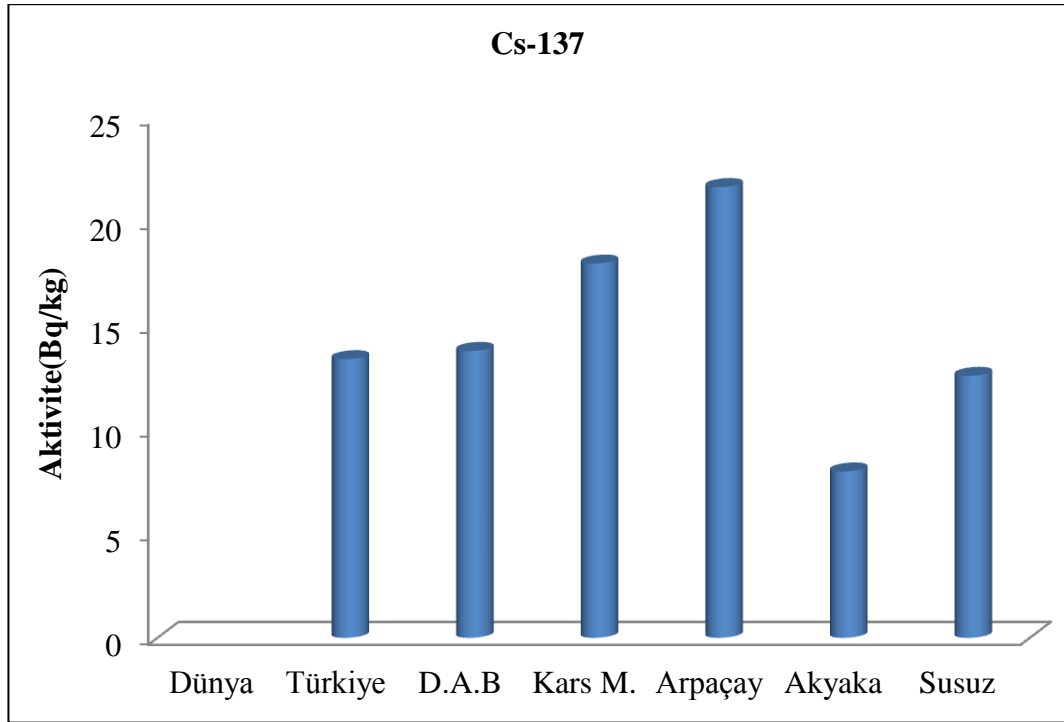


Şekil 5.13: K-40 aktivite konsantrasyonlarının, sırasıyla Dünya, Türkiye, Doğu Anadolu Bölgesi, Kars, Akyaka, Arpaçay ve Susuz ortalaması[38,66,67].

^{137}Cs 'nin ortalama aktivite konsantrasyonunun, Türkiye ortalaması, $13.4 \pm 0.8 \text{ Bqkg}^{-1}$ Doğu Anadolu Bölgesi $13.8 \pm 1.3 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve Kars il merkezi $18 \pm 2.7 \text{ Bqkg}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir[38,66,67]. Ölçümlerden elde ettiğimiz sonuçlarda ^{137}Cs 'nin ortalama aktivite konsantrasyonu Arpaçay Akyaka ve Susuz ilçeleri için sırasıyla; $21.7 \pm 3 \text{ Bqkg}^{-1}$, $8 \pm 2.5 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve $12.6 \pm 2.7 \text{ Bqkg}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Dikkat edilirse, Şekil 5.14'te ^{137}Cs için Dünya ortalaması verilmemiştir. Bu, ^{137}Cs 'nin toprakta doğal olarak bulunmayışı, dolayısıyla kirlenmeye bağlı olarak çok farklılık gösterdiğinden böyle bir ortalama değeri olmamasındandır.

Bu sonuçlarla karşılaştırdığımızda Şekil 5.14' den de görüldüğü gibi; Arpaçay ilçesinin ^{137}Cs aktivite konsantrasyonunun, Dünya, Türkiye, Doğu Anadolu Bölgesi ve Kars

merkez ortalamasının biraz üstünde, Akyaka ilçesinin ^{137}Cs aktivite konsantrasyonunun Dünya, Türkiye, Doğu Anadolu Bölgesi ve Kars merkez ortalamasının biraz altında ve Susuz ilçesinin ^{137}Cs aktivite konsantrasyonunun ise Türkiye ortalaması ile yaklaşık olarak aynı değerde, Doğu Anadolu bölgesi ve Kars ortalamasının ise altında olduğu görülmektedir.

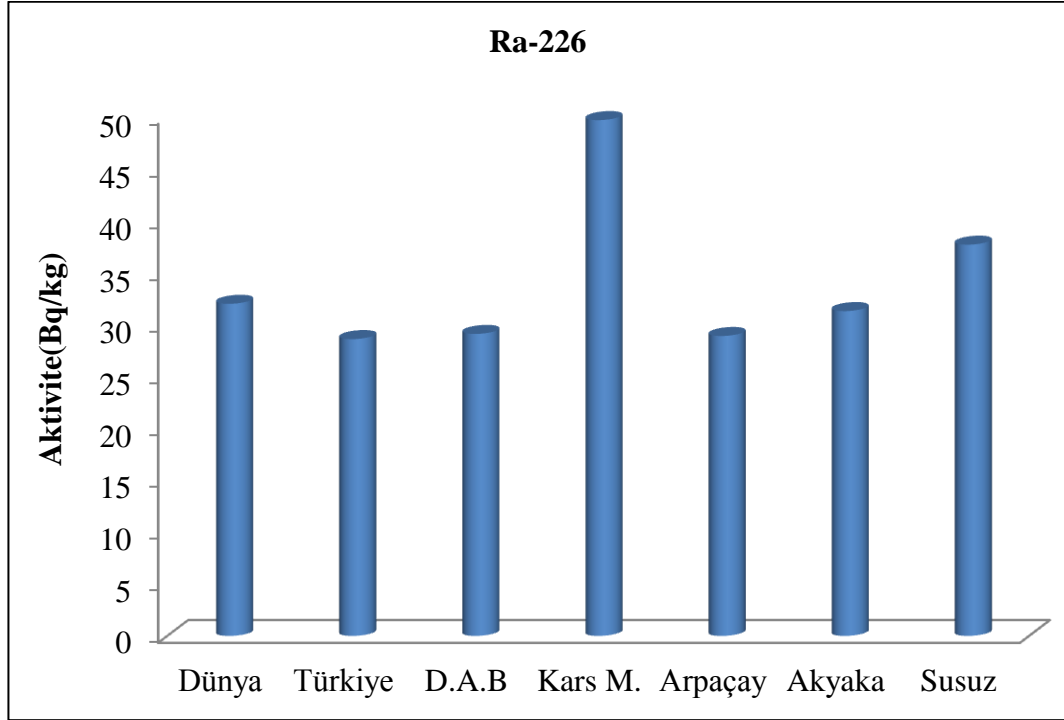


Şekil 5.14: Cs-137aktivite konsantrasyonlarının, sırasıyla Dünya, Türkiye, Doğu Anadolu Bölgesi, Kars, Akyaka, Arpaçay ve Susuz ortalaması[38,66,67].

^{226}Ra (^{238}U) ortalama aktivite konsantrasyonunun; Dünya ortalaması 32 Bqkg^{-1} , Türkiye ortalaması $28.6 \pm 0.7 \text{ Bqkg}^{-1}$ Doğu Anadolu Bölgesi $29.1 \pm 1.7 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve Kars il merkezi $49.79 \pm 5.36 \text{ Bqkg}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir[38,66,67]. Ölçümlerden elde ettiğimiz sonuçlarda ^{226}Ra 'nın ortalama aktivite konsantrasyonu Arpaçay Akyaka ve Susuz ilçeleri için sırasıyla; $28.9 \pm 6.8 \text{ Bqkg}^{-1}$, $31.3 \pm 7.4 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve $37.7 \pm 7.2 \text{ Bqkg}^{-1}$ olarak bulunmuştur.

Ölçümlerden elde ettiğimiz sonuçla karşılaştırdığımızda Şekil 5.15' den de görüldüğü gibi; Arpaçay ve Akyaka ilçelerinin ^{226}Ra (^{238}U) aktivite konsantrasyonunun, Dünya, Türkiye, Doğu Anadolu Bölgesi ortalamaları ile yaklaşık aynı değerde Kars il merkezi

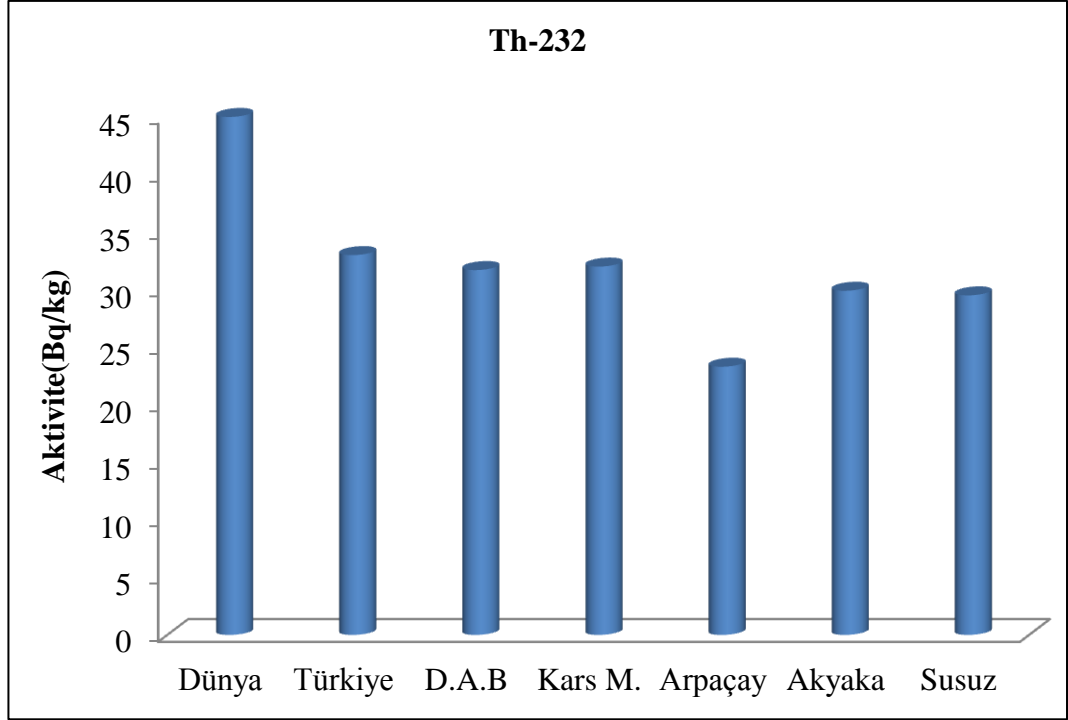
ortalamasının ise biraz altında, Susuz ilçesinin ^{226}Ra (^{238}U) aktivite konsantrasyonunun ise Dünya, Türkiye, Doğu Anadolu Bölgesi ortalamalarının biraz üzerinde ve Kars il merkezi ortalamasının biraz altında olduğu görülmektedir.



Şekil 5.15: Ra-226 aktivite konsantrasyonlarının, sırasıyla Dünya, Türkiye, Doğu Anadolu Bölgesi, Kars, Akyaka, Arpaçay ve Susuz ortalaması[38,66,67].

^{232}Th 'nin ortalama aktivite konsantrasyonunun; Dünya ortalaması 45 Bqkg^{-1} , Türkiye ortalaması $33 \pm 0.7 \text{ Bqkg}^{-1}$, ve Doğu Anadolu Bölgesi $31.7 \pm 1.4 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve Kars il merkezi, $32 \pm 6 \text{ Bqkg}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir[38,66,67]. Ölçümlerden elde ettiğimiz sonuçlarda ^{232}Th 'nin ortalama aktivite konsantrasyonu Arpaçay Akyaka ve Susuz ilçeleri için sırasıyla; $23.3 \pm 4.8 \text{ Bqkg}^{-1}$, $29.9 \pm 4.9 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve $29.5 \pm 5 \text{ Bqkg}^{-1}$ olarak bulunmuştur.

Ölçümlerden elde ettiğimiz sonuçla karşılaştırdığımızda; Arpaçay, Akyaka ve Susuz ilçelerinin ^{232}Th aktivite konsantrasyonlarının Dünya, Türkiye, Doğu Anadolu Bölgesi ve Kars il merkezi ortalamasının biraz altında olduğu görülmektedir.



Şekil 5.16: Th-232 aktivite konsantrasyonlarının, sırasıyla Dünya, Türkiye, Doğu Anadolu Bölgesi, Kars, Akyaka, Arpaçay ve Susuz ortalaması[38,66,67].

Bu çalışma, Türkiye Radyasyon Haritasındaki eksikliği gidermek amacıyla TAEK'in çevresel radyoaktif izleme programı kapsamında, Kafkas Üniversitesiyle imzalamış olduğu işbirliği protokolu kapsamında yürütülmüştür. Bu çalışmayla, Arpaçay, Susuz ve Akyaka ilçelerinin topraklarında doğal radyasyon seviyeleri belirlenmiştir. Çevresel radyoaktif izleme programı kapsamında Kars'ın diğer ilçelerine yönelik çalışmalar devam etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Agbalagba, E.O. at al, 2012. “ γ -Spectroscopy measurement of natural radioactivity and assessment of radiation hazard indices in soil samples from oil fields environment of Delta State, Nigeria” *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 109; 64-70.
- [2] Sroor, A. at al, 2001. “Natural radioactivity and radon exhalation rate of soil in Southern Egypt” *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 55; 873–879.
- [3] Arıkan, İ.H., “Çevresel Radasyonun Canlılığın Sürdürülebilirliğine Etkileri” Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü. Ankara, 2007.
- [4] UNSCEAR (United Nations Scientific Comitee on the Effects of Atomic Radiation) 1998 REPORT “Sources, effects and risks of ionizing radiation”.
- [5] Taskin, H. vd, 2009 “Radionuclide concentrations in soil and lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in Kırklareli, Turkey”. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 100; 49-53.
- [6] Fasasi, M.K. at al, 2003. “Natural radioactivity of the tar-sand deposits of Ondo state, Southwestern Nigeria”. *Nuclear instruments & Methods in Physics Research*, Vol.505; 449-453.
- [7] Sujo, L.C. at al, 2004. “Uranium-238 and Thorium-232 Series concentrations in soil, Radon-222 indoor and drinking water concentrations and dose assessment in the city of Aldama, Chihuahua, Mexico”. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol.77; 205-219.
- [8] Tzortzis, M. at al, 2003. “Gamma-ray measurements of naturally occurring radioactive samples from Cyprus characteristic geological rocks”, *Radiation Measurements*, Vol. 37; 221-229.

- [9] Malczewski, D. et al, 2004. "Assessment of natural and anthropogenic radioactivity levels in rocks and soils in the environs of Swieradow Zdroj in Sudetes, Poland, by in situ gamma-ray spectrometry" *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol.73; 233-245
- [10] Saravanan, S. et al, 2003. "Preliminary measurements of natural radioactivity at Madurai district of Tamilnadu, India", *Radiation Measurements*, Vol.36; 397-389
- [11] Al-Jundia, J. et al, 2003. "Natural radioactivity concentrations in soil samples along the Amman Aqaba Highway, Jordan" *Radiation Measurements*, Vol.36; 555 – 560
- [12] Singh, S. et al, 2003. "Natural radioactivity measurements in soil samples from Hamirpur district, Himachal Pradesh, India", *Radiation Measurements*, Vol 36; 547-549
- [13] Singh, J. et al, 2009. "Comparative study of natural radioactivity levels in soil samples from the Upper Siwaliks and Punjab, India using gamma-ray spectrometry". *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol.100; 94–98
- [14] Santawamaitre, T. et al, 2011. "Study of natural radioactivity in riverbank soils along the Chao Phraya river basin in Thailand". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol.652; 920-924.
- [15] Song, G. et al, 2012. "Natural radioactivity levels in topsoil from the Pearl River Delta Zone, Guangdong, China". *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol.103. 48-53.
- [16] Morsy, Z. et al, 2012. "Determination of natural radioactive elements in Abo Zaabal, Egypt by means of gamma spectroscopy". *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 44; 8-11.

- [17] Hamideen, M.S., Sharaf, J., 2012. "Natural radioactivity investigations in soil samples obtained from phosphate hills in the Russaifaregion". Radiation Physics and Chemistry, Vol. 81; 1559-1562.
- [18] Ravisankar, R. at al, 2012. "Natural radioactivity in soil samples of Yelagiri Hills, Tamil Nadu, India and the associated radiation hazards ". Radiation Physics and Chemistry, Vol. 81;1789-1795.
- [19] Krmar, M. at al, 2012. "Correlations of natural radionuclides in soil with those in sediment from the Danube and nearby irrigation channels". Journal of Environmental Radioactivity, Vol. XXX; 1-5.
- [20] Almayahi, B.A. at al, 2012. "Radiation hazard indices of soil and water samples inNorthern Malaysian Peninsula". Applied Radiation and, Isotopes Vol.70; 2652-2660.
- [21] Karahan, G. ve Bayulken, A., 2000. "Assessment of Gamma Dose Rates Around İstanbul". Journal of Environmental Radioactivity Vol.47; 213-221.
- [22] Karakelle, B. vd, 2002. "Natural radioactivity in soil samples of Kocaeli basin, Turkey". Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 254; 649-651.
- [23] Erees, F.S. vd, 2006. "Assessment of dose rates around Manisa (Turkey)". Radiation Measurements, 41; 598–601.
- [24] Bozkurt, A. vd, 2007. "Assessment of environmental radioactivity for Sanliurfa region of Southeastern Turkey". Radiation Measurements, Vol. 42; 1387–1391.
- [25] Kam E. Bozkurt, A., 2007. "Environmental radioactivity measurements in Kastamonu Region of northern Turkey". Applied Radiation and Isotopes, Vol. 65; 440–444.

- [26] Çelik, N. vd, 2008. “Determination of indoor radon and soil radioactivity levels in Giresun, Turkey”. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 99: 1349–1354.
- [27] Değerliel, M. vd, 2008. Radioactivity concentrations and dose assessment for soil samples around Adana, Turkey”. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 99; 1018–1025.
- [28] Çelik, N. vd, 2009. “Natural and artificial radioactivity measurements in Eastern Black Sea region of Turkey”. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 162; 146–153.
- [29] Çelik, N. vd, 2010. “Gamma ray concentrations in soil and building materials in Ordu, Turkey”. *Radiation Effects and Defects in Solids*, Vol. 165; 1–10.
- [30] Kurnaz, A. vd, 2011. “Radiological maps for Trabzon, Turkey”. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 102; 393-399
- [31] Yaren H., Karayılanoğlu T, “Radyasyon ve insan sağlığı üzerine etkileri TSK Koruyucu Hekimlik Bülteni”, 2005: 4 (4).
- [32] Tsoulfanidis N, *Measurement and Deection of Radiation*, Second edition, University of Missouri-Rolla, 1995.
- [33] Değerlier, M. “Adana İli Ve Çevresinin Çevresel Doğal Radyoaktivitesinin Saptanması ve Doğal Radyasyonların Yıllık Etkin Doz Eşdeğerinin Bulunması”, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [34] TAEK Radyasyon insan ve çevre, iyonlaştırıcı radyasyon, etkileri ve kullanım alanları, güvenli kullanımı için uygulamada olan tedbirler, 2009
- [35] <http://www.taek.gov.tr.>, (Erişim Tarihi: 03 04 2013)

- [36] Coşkun, Ö. “İyonize Radyasyonun Biyolojik Etkileri” S. D. U. Teknik Bilimler Dergisi, Cilt 1, Sayı 2, Yıl 2011
- [37] Bilim ve Teknik Dergisi, İyonlayıcı Radyasyon, Sayı: Nisan 2006
- [38] Reşitoğlu, S., “Kars-İl Merkezi Topraklarında Doğal Radyoaktivite Seviyelerinin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Kafkas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı., Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [39] Gören, E., “Adana İçme Sularında Tritiyum Aktivitesinin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 2011.
- [40] Oyar O. ve Gülsoy U., “Tıbbi Görüntüleme Fiziği”., Dernek Yayınevi., 2003.
- [41] Günoğlu, K., “Afyon Karahisar Yöresi Mermerlerinde Doğal Radyoaktivite Tayini”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [42] Zararsız S., “Uranyum” Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Teknoloji Dairesi., 2005. <http://www.taek.gov.tr> (Erişim Tarihi: 17.06.2013)
- [43] Özbal, Ö., “İzmir Balçova’da Termal Su Kullanılan Binalarda Radon Konsantrasyonu ve Sudaki Radonla Korelasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1999.
- [44] Çelebi, N., “Çevresel Örneklerde Uranyum, Radyum ve Radon Ölçüm Tekniklerinin Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1995.
- [45] Kulalı, F., “Topraktaki Radon Konsantrasyonu Ölçümü Ve Deprem İlişkisinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, 2009.

- [46] Şenyiğit, M., “Nükleer Reaksiyonlar Sonucu Açığa Çıkan Gamma Işınları Ve Nötronların Germanyum Detektör Sistemi İle Etkileşmeleri” Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 2011.
- [47] Arya Atam.P., “Çekirdek Fiziğinin Esasları”. Çeviri Editörü Şahin Y. Balkanlar Yayıncılık, 1989, Erzurum.
- [48] Yeşilbağ, Y.Ö., “Artvin ve Ardahan İlleri Ev İçi Radon Konsantrasyonu ve Çevresindeki Topraklarda Radyoaktivitenin Tayini”, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı., 2008.
- [49] Berber H., Anadolu Üniversitesi Açık Öğretim Fakültesi Yayınları, Ünite 19 “Radyoaktivite”.
- [50] Görür, Ş., “Çevresel Radyoaktivite ile Bu Çevrede Yasayanlara ait Dış Örneklerdeki Radyoaktivite Arasındaki İlişkinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi., Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı., 2006.
- [51] Rittersdorf I., “Gamma Ray Spectroscopy” Nuclear Engineering & Radiological Sciences March 20, 2007.
- [52] Akkoyun, S., “Uzayda Gama Işını Ölçümleri-Bir Geant Simülasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 2006.
- [53] Çavaş, M., “NAI(Tl) Dedektörü ile Topraktaki Radyasyonun Ölçümü ve Maruz Kalınan Dozların Hesabı”., Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı., 2006.
- [54] Almaz, E. “ β^- Parçacıklarının İnternal Bremsstrahlung Spektrumlarının Analizi”, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 2007.

- [55] Say, M., “Gama Spektroskopisi ve Kullanım Alanları”, Lisans Tezi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 2012.
- [56] Zorer, Ö. S., “Bendimahi Çayı’nda Ve Çayın Van Gölü’ne Döküldüğü Noktada Doğal Radyoaktivite Seviyesinin Belirlenmesi” Doktora Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, 2006.
- [57] Gordon R. Gilmore, John Wiley & Sons “Practical Gamma-ray Spectrometry” 2nd Edition Ltd. ISBN: 978-0-470-86196-7 (2008).
- [58] Olçay, İ., “Radyasyon Dedeksiyonunda Kullanılan Yarı-İletken Dedektör Tipleri, Özellikleri ve Kullanım Alanları”, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 2007.
- [59] Keskin, S., “Tuz Gölü Civarından Alınan Toprak Örneklerinde Doğal Radyonüklidlerin Belirlenmesi” Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 2008.
- [60] Gezer, F., “Fosfojips’in Doğal Radyoaktifliğinin Belirlenmesi” Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 2011.
- [61] Gümüş H. “Samsun İli ve Çevresi Gama Radyasyonu Düzeyinin Belirlenmesi Çalışmaları” Samsun Sempozyonu, 2011.
- [62] Ayçık G. A., “Çevre Radyoaktivitesinin İzlenmesinde Örneklem Ölçme Ve Analiz Yöntemleri ” Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, 1992.
- [63] Parmaksız, A.. “Yüksek Çözünürlüklü Gama Spektrometresi ile Fosfojips İçerisindeki Doğal Radyoaktivitenin ölçülmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 2004.

[64] Göksu, V. “Kars-Iğdır yöresinde Toprak ve Sudaki Radyoaktivitenin Tayini” , Yüksek Lisans Tezi, Kafkas Üniversitesi, Fen-Bilimleri Enstitüsü, Kars, 2005.

[65] Akbayır, S., “2005-2007 yılları arasında Iğdır ilinden alınan toprak örneklerindeki radyasyon ölçümü” ,Yüksek Lisans Tezi, Kafkas Üniversitesi, Fen-Bilimleri Enstitüsü, Kars, 2008.

[66] Turhan Ş., Köse A., Varinlioğlu A., Şahin N.K., Arıkan İ., Oğuz F., Yücel B., Özdemir T. 2012 “Distribution of terrestrial and anthropogenic radionuclides in Turkish surface soil samples” Geoderma 187–188, 117–124.

[67] UNSCEAR (United Nations Scientific Comitee on the Effects of Atomic Radiation) Annex B: Exposures from natural radition sources (page116).

[68] Belgin E. E., Kırkan B., Karayel G., Ayçık G.A., “Potasyum Bileşiklerinin Gama Spektrometresinde Verim Kalibratörü Olarak Kullanılabilirliği” X. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi, 6-9 Ekim 2009,71-83.

EKLER

Ek. 1: Bazı doku ve organların doku ağırlık faktörleri[35]

Doku veya Organ	Doku Ağırlık Faktörü(W_T)
Üreme organları	0,20
Kırmızı kemik iliği	0,12
Kolon	0,12
Akciğer	0,12
Mide	0,12
Mesane	0,05
Meme	0,05
Karaciğer	0,05
Yemek borusu	0,05
Troit	0,05
Cilt	0,01
Kemik yüzeyi	0,01

Ek. 2: Arpaçay bölgesinden toprak örneği alınan istasyonlarının koordinatları

İstasyon Adı	Enlem	Boylam	Yükseklik(m)
S.1(Koçköy)	K40°86852°	D43°53903°	1837
S.2(Taşdere Köyü)	K40°86058°	D43°58440°	1813
S.3 (Bardaklı)	K40°83372°	D43°45560°	1728
S.4(Telek Köyü)	K40°85479°	D43°37569°	1683

Ek. 3:Susuz bölgesinden toprak örneği alınan istasyonlarının koordinatları

İstasyon Adı	Enlem	Boylam	Yükseklik(m)
S.1(Susuz)	K40°78264°	D43°12973°	1782
S.2(Kars-Susuz yolu)	K40°66941°	D43°16368°	1826
S.3(Mezra)	K40°71030°	D43°17569°	1751
S.4(Çamçavuş)	K40°72507°	D43°15822°	1693
S.5(Boğazköy 1)	K40°70329°	D43°13299°	1700
S.6(Boğazköy 2)	K40°71240°	D43°10589°	1759
S.7(Çığrılık)	K40°77849°	D43°07378°	2038
S.8(Yolboyu)	K40°75215°	D43°25935°	1640

Ek. 4: Akyaka bölgesinden toprak örneği alınan istasyonlarının koordinatları

İstasyon Adı	Enlem	Boylam	Yükseklik(m)
S.1(Kuyucuk)	K40°74295°	D43°42798°	1641
S.2 (Duraklı)	K40°73985°	D43°51112°	1635
S.3(Akyaka)	K40°73981°	D43°61073°	1536
S.4(Esenyayla)	K40°74337°	D43°65328°	1515
S.5(Şahnalar)	K40°73371°	D43°54300°	1535

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İlyas ÇAĞLAR
Doğum Yeri : Sarıkamış
Doğum Tarihi : 09.03.1986
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İNGİLİZCE

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl):

Lise : SARIKAMIŞ Ş.B.B.K. ANADOLU LİSESİ
Lisans : KAFKAS ÜNİVERSİTESİ (2011)
Yüksek Lisans : KAFKAS ÜNİVERSİTESİ (2014)