

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇEVRESEL RADYOAKTİVİTE ÖLÇÜM AMAÇLI GAMA
SPEKTROSKOPİ SİSTEMİNİN KALİBRASYONU VE TEST
ÖLÇÜMLERİNİN YAPILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ESMA MIZRAK

Anabilim Dalı: Fizik

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Recep Taygun GÜRAY

KOCAELİ, 2010

**ÇEVRESEL RADYOAKTİVİTE ÖLÇÜM AMAÇLI GAMA
SPEKTROSKOPİ SİSTEMİNİN KALİBRASYONU VE TEST
ÖLÇÜMLERİNİN YAPILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esmâ MIZRAK

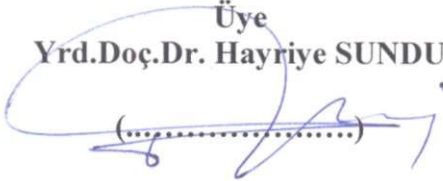
Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 18 HAZİRAN 2010

Tezin Savunulduğu Tarih: 12 TEMMUZ 2010

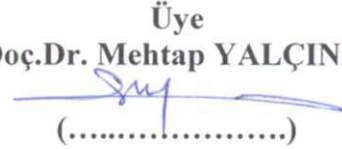
**Tez Danışmanı
Yrd.Doç.Dr. Taygun GÜRAY**


(.....)

**Üye
Yrd.Doç.Dr. Hayriye SUNDU**


(.....)

**Üye
Yrd.Doç.Dr. Mehtap YALÇINKAYA**


(.....)

KOCAELİ, 2010

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜRLER

1942 yılında Enrico Fermi tarafından ilk reaktör denemesi ve Amerikalılar tarafından da Meksika çölünde Temmuz 1945'te tarihin ilk atom bombası denemesi yapılmıştır. Böylelikle doğal radyasyonun dışında yapay radyasyonda hayatımıza girmiştir. İnsanlık tarihinin son yarım yüzyılı içerisinde, süratli ve yaygın teknolojik gelişmelere bağlı olarak dünyanın her yanında çevre kirlenmesi çeşitli boyutlarıyla gündemimizi meşgul etmeye başlamıştır. Ancak çevresel radyoaktif kirliliğin payı hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır. Bu çalışmada çevresel örneklerde, gıda ve endüstriyel ürünlerde, radyonüklitlerin aktivite seviyelerinin belirlenmesine katkıda bulunmak amacıyla yapılmıştır.

Laboratuar ortamında çalışma imkânı sağlayan ve bu çalışma süresince benden bilgisini, desteğini esirgemeyen, bana her konuda yardımcı olan değerli tez danışmanım R. Taygun GÜRAY'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez yazımında benden yardımını esirgemeyen sevgili Caner YALÇIN'a içten teşekkür ederim.

Bana her zaman güvenen, inanan, moral veren, her zaman yanımda olup, benden desteğini esirgemeyen sevgili eşim Daimi DİKME'ye gönülden teşekkür ederim.

Son olarak, yanımda olmasalar da yanımda olduklarını ve sevgilerini her zaman hissettiren haklarını ödeyemeyeceğim sevgili aileme en derin minnetlerimi sunarım.

Esmâ MIZRAK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜRLER	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ÖZET.....	vii
İNGİLİZCE ÖZET	viii
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
1.1. Yapılan Bazı Çevresel Radyoaktivite Çalışmaları	3
1.2. Bu Çalışmanın Amacı	13
BÖLÜM 2. TEMEL KAVRAMLAR	14
2.1. Radyoaktivite.....	14
2.1.1. Doğal radyoaktivite ve radyoaktif seriler.....	14
2.2. Bozunum Türleri	17
2.2.1. Alfa bozunumu.....	17
2.2.2. Beta bozunumu.....	18
2.2.3. Gama bozunumu	20
2.3. Radyoaktif Bozunum Kanunu	21
2.3.1. Zincirleme radyoaktif bozunum.....	23
2.4. Yarı-Ömür ($t_{1/2}$)	25
2.5. Ortalama Ömür (τ)	25
2.6. Biyolojik Yarı-Ömür (t_B)	26
2.7. Etkin Yarı-Ömür (t_{etkin})	26
2.8. Radyoaktivite ve Radyasyon Doz Birimleri	26
2.8.1. Aktivite birimi.....	26
2.8.2. Soğurulma (Absorblanma) doz birimi	27
2.8.3. Işınlama doz birimi	27
2.8.4. Eşdeğer doz birimi	27
2.9. Doğal Radyasyon Kaynakları	28
2.9.1. Kozmik ışınlar.....	30
2.9.2. Topraktaki doğal radyoaktivite	31
2.10. Yapay Radyoaktiflik	31
2.10.1. Yapay radyasyon kaynakları	32
BÖLÜM 3. GAMA SPEKTROSKOPİ SİSTEMİ	33
3.1. Gama Işınının Madde İle Etkileşimi	33
3.1.1. Fotoelektrik olay	33
3.1.2. Compton saçılması.....	34
3.1.3. Çift oluşum.....	35
3.2. Gama Işını Dedektörleri	37
3.2.1. Sintilasyon dedektörleri	38
3.2.2. Yarı iletken dedektörler (HPGe Detektörler).....	39
3.3. Dedektör Seçimi.....	40
3.4. Gama Spektroskopisi Sisteminin Elektronikleri	42

BÖLÜM 4. DENEY VE HESAPLAMALAR	44
4.1. Numune Hazırlama	44
4.1.1. Karayosunu toprak numunesi	44
4.1.2. Su numuneleri	45
4.2. Hesaplamalar	46
4.2.1. Fotopik alanı	46
4.2.2. Aktivite.....	47
4.3. Hata (Belirsizlik).....	51
4.3.1. Toplama ve çıkarmada hata	52
4.3.2. Çarpmada hata.....	52
4.3.3. Bölmede hata.....	53
BÖLÜM 5. SONUÇ VE TARTIŞMA	54
5.1. Gama Spektroskopi Sisteminin Kalibrasyonu	54
5.1.1. Enerji kalibrasyonu	54
5.1.2. FWHM kalibrasyonu.....	57
5.1.3. Sayım (Fotopik) verim kalibrasyonu	58
5.2. Sonuç ve Tartışma.....	66
KAYNAKLAR	71
EKLER.....	74
ÖZGEÇMİŞ	78

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Kararlılık Eğrisi	15
Şekil 2.2: ²³⁸ U Bozunum Serisi.....	16
Şekil 2.3: ²³² Th Bozunum Serisi.....	16
Şekil 2.4: ²²⁷ Ac Bozunum Serisi.....	17
Şekil 2.5 : Alfa Bozunumu.....	18
Şekil 2.6: Beta Bozunumu	18
Şekil 2.7: Pozitron Bozunumu	19
Şekil 2.8: Elektron Yakalama Olayı	20
Şekil 2.9: Gama Bozunumu	21
Şekil 2.10: Dünya Genelinde Doğal ve Yapay Radyasyon Kaynaklarından Alınan Dozların Oranları	29
Şekil 2.11: Dünya Genelinde Doğal Radyasyon Kaynaklarından Maruz Kalınan Radyasyon Dozlarının Oransal Değerleri	29
Şekil 2.12: Yapay Radyasyon Kaynaklarından Maruz Kalınan Küresel Radyasyon Dozunun Oransal Değerleri.....	32
Şekil 3.1: Fotoelektrik Olay	34
Şekil 3.2: Compton Saçılması	35
Şekil 3.3: Çift oluşum	35
Şekil 3.4: Gama ışını etkileşimi ve bunların baskın olduğu bölgeler	36
Şekil 3.5: Gama Işınının Maddeyle etkileşimi.....	37
Şekil 3.6: NaI Sintilasyon Dedektör Şeması.....	39
Şekil 3.7: Yarı İletken Dedektör Şeması.....	40
Şekil 3.8: Kocaeli Üniversitesi Fizik Bölümü, Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarında bulunan HPGe Gama Işın dedektörü.....	41
Şekil 3.9: Kaynaktan Yayınlanan Radyasyonların Enerji Ölçümlerinde Kullanılan Elektronik Düzeninin Şematik Gösterimi.....	42
Şekil 4.1: Pikin Altındaki Toplam Alan.....	46
Şekil 5.1: Enerji Kalibrasyon Eğrisi	56
Şekil 5.2: FWHM kalibrasyon eğrisi	58
Şekil 5.3: Verim Kalibrasyonu Eğrisi	61
Şekil 5.4: Karayosunu Toprağı radyonüklit-spesifik aktivite grafiksel gösterimi.....	63
Şekil 5.5: Su Numunesi 02 Radyonüklit-Spesifik Aktivite Grafiksel Gösterimi.....	64
Şekil 5.6: Su Numunesi 03 Radyonüklit-Spesifik Aktivite Grafiksel Gösterimi.....	65
Şekil 5.7: Su Numunesi 04 Radyonüklit-Spesifik Aktivite Grafiksel Gösterimi.....	66

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1: Orta ve Doğu Karadeniz topraklarında ki ¹³⁷ C radyoaktivite değerleri.....	3
Tablo 1.2: İstanbul çevresinde topraktaki radyoaktivite değerleri.....	5
Tablo 1.3: Güney Mısır toraklarındaki radyoaktivite değerleri.....	6
Tablo 1.4: Hindistan Kalpakkam topraklarındaki radyoaktivite değerleri.....	6
Tablo 1.5: Vojvodina toprağındaki radyoaktivite değerleri.....	7
Tablo 1.6: Fırtına Vadisi toprağındaki radyoaktivite değerleri.....	9
Tablo 1.7: Doğu Karadeniz bölgesinin Trabzon'dan Sarp'a kadar olan sahil kesimin toprağındaki radyoaktivite değerleri.....	10
Tablo 1.8: Edremit Körfezi'nde topraktaki radyoaktivite değerleri.....	11
Tablo 1.9: Adana çevresinde topraktaki radyoaktivite değerleri.....	12
Tablo 1.10: Batı Sırbistan topraklarındaki radyoaktivite değerleri.....	12
Tablo 2.1: Radyasyon birimleri ve dönüşüm faktörleri.....	28
Tablo 3.1: Dedektör özellikler.....	42
Tablo 4.1: IAEA'den gelen toprak ve su numunelerinin ölçülen bürüt kütleleri.....	44
Tablo 4.2: Karayosunu toprağındaki radyonüklitler ve bunların bozunma parametreleri.....	49
Tablo 4.3: Su numunesi 02'deki radyonüklitler ve bunların bozunma parametreleri.....	50
Tablo 4.4: Su numunesi 03'deki radyonüklitler ve bunların bozunma parametreleri.....	50
Tablo 4.5: Su numunesi 04'deki radyonüklitler ve bunların bozunma parametreleri.....	51
Tablo 5.1: Standart kaynaktaki radyonüklitler ve fotopik enerji değerleri.....	55
Tablo 5.2: 3600 saniye sayım alınarak elde edilen verim kalibrasyonu sonuçları.....	60
Tablo 5.3: Toprak numunesindeki radyonüklitler ve spesifik aktivite sonuçları.....	62
Tablo 5.4: Su numunesi 02'deki radyonüklitler ve spesifik aktivite sonuçları.....	63
Tablo 5.5: Su numunesi 03'deki radyonüklitler ve spesifik aktivite sonuçları.....	64
Tablo 5.6: Su numunesi 04'deki radyonüklitler ve spesifik aktivite sonuçları.....	65
Tablo 5.7: Karayosun toprak numunesi ²³⁸ U aktivitesinin belirlenmesi için kullanılan radyonüklitler ve spesifik aktiviteleri.....	67
Tablo 5.8: Karayosun toprak numunesi ²³² Th aktivitesinin belirlenmesi için kullanılan radyonüklitler ve spesifik aktiviteleri.....	68

SİMGELER DİZİNİ

A	Aktivite
A_0	Başlangıç radyoaktivitesi
E	Enerji
N	Radyoaktif çekirdek sayısı
λ	Bozunma sabiti
$t_{1/2}$	Yarı ömür
τ	Ortalama ömür
t_B	Biyolojik yarı-ömür
t_{etkin}	Etkin yarı-ömür
α	Alfa
β	Beta
γ	Gama
e^-	Elektron
e^+	Pozitron
n	Nötron
ν	Nötrino
p	Proton
ε	Verim
T_e	Elektronun kinetik enerjisi
E_γ	Foton enerjisi
S_A	Spesifik Aktivite
$S_{A(\text{Lab})}$	Laboratuarda ölçülen spesifik aktivite
$S_{A(\text{IAEA})}$	IAEA spesifik aktivite değerleri
I_γ	Bir paralanmadaki gama yayınlama olasılığı
E_b	Elektronun bağlanma enerjisi
m	Kütle
c	Işık hızı
ADC	Analog dijital çevirici
MCA	Çok kanallı analizör
Ge	Germanyum
R	Fotonların hızı
N_{net}	Sayım pikinin altındaki net alan
HPGe	Yüksek saflıkta Germanyum
FWHM	Pikin yarı yüksekliğinde ki tam genişliği
MeV	Milyon elektronvolt
IAEA	Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı
keV	Kilo elektronvolt

ÇEVRESEL RADYOAKTİVİTE ÖLÇÜM AMAÇLI GAMA SPEKTROSKOPİ SİSTEMİNİN KALİBRASYONU VE TEST ÖLÇÜMLERİNİN YAPILMASI

ESMA MIZRAK

Anahtar Kelimeler: Çevresel Radyoaktivite, Kocaeli, Gama Spektroskopisi

Özet: Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP No: 2007 / 036) kapsamında, endüstriyel atıkların bilinmeyen radyoaktif etkileri ve yakın gelecekte Türkiye’de bir reaktör veya reaktörler kurulacağı göz önünde tutulacak olursa, hem bu alanda yetişmiş eleman ihtiyacına cevap vermek, hem de olası bir radyoaktif kontaminasyonun belirlenmesi ve rutin takipler yapılabilmesi için, Nükleer Araştırma Laboratuvarında bir Gama Spektroskopisi sistemi kurulmuştur.

Bu tezde, HPGe dedektör sisteminin, enerji, yarı-yükseklikteki-tam-genişlik (FWHM) ve fotopik verimi kalibrasyonları yapılmıştır. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı tarafından düzenlenen IAEA-CU-2009-03 “dünya genelinde, karayosunu toprağında ve asitlendirilmiş sudaki doğal ve yapay radyonüklidlerin belirlenmesi yeterlilik testi’ne” başvurularak, ajanstan gelen bir toprak ve üç adet su örneğinin spesifik aktiviteleri ölçülmüştür.

CALIBRATION OF A GAMMA SPECTROSCOPY SYSTEM WITH THE SCOPE OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY MEASUREMENT AND TAKING ITS TEST MEASUREMENTS

ESMA MIZRAK

Keywords : Environmental Radioactivity, Kocaeli, Gamma Spectroscopy

Abstract: A Gamma Spectroscopy system has been set up in the Nuclear Research Laboratory at Kocaeli University under the University Scientific Research Project (Grant No: BAP 2007/036) “Gamma Spectrometer: Industrial and Environmental Radioactivity” in order to make routine measurements of environmental radiation levels in Kocaeli region in case of a possible radioactive contamination, and in order to provide qualified people to fields of radiation physics, considering unknown radioactive affects of industrial waste and that nuclear plants could be built in the near future in Turkey.

In this thesis project, the HPGe gamma detector system was calibrated in terms of energy, full-width-half-maximum (FWHM), and photopeak efficiency. We applied the IAEA-CU-2009-03 “world wide open proficiency test on the determination of natural and artificial radionuclides in moss-soil and spiked water”, which is organized by International Atomic Energy Agency. Specific activities in one soil and three water samples were measured.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Evrenin oluşumundan itibaren ve dünya olduğu günden beri yer kabuğunda radyoaktif maddeler mevcuttur. İnsanlar doğduğu günden ölünceye kadar doğal radyasyonlara maruz kalmaktadırlar. İnsan vücudunda da ^{14}C ve ^{40}K gibi doğal radyoaktif maddeler mevcuttur ve insanlar vücutlarında bulunan bu radyoaktif maddelerden dolayı her yıl belli bir radyasyon dozu almaktadırlar. Öte yandan insanlar ve diğer canlılar yaşamları boyunca uzaydan gelen kozmik radyasyonlar ve yer kabuğu kökenli Uranyum, Toryum ve Potasyum gibi doğal radyoaktif elementler sebebiyle her an radyasyon ortamı içinde yaşamaktadırlar. Dünyada her şey, az miktarda da olsa radyoaktif atomları içermektedir. Yer kabuğu, solunan hava, gıdalar ve güneş sistemi doğal radyasyon kaynaklarını oluşturmaktadırlar. Yani radyasyonu, yaşamın gerçeği veya bir parçası olarak kabul etmek zorundayız çünkü çevremizdeki doğal ve yapay kaynaklardan, iç ve dış ışınlama yoluyla her an radyasyona maruz kalırız ve bundan kaçınmamız mümkün değildir.

İnsanlar 1895 yılına kadar radyasyondan habersizdi. 1895 yılında Wilhelm Conrad Röntgen tarafından tesadüf eseri X-ışınlarının bulunmasıyla, radyasyon insanların hayatına girdi. 1942 yılında Enrico Fermi tarafından ilk reaktör denemesi yapıldı ve Amerikalılar Temmuz 1945'te tarihin ilk atom bombasını Meksika çölünde denedi. Nükleer silah denemeleri, nükleer santral kazaları, nükleer yakıt çevrim tesisleri, nükleer atık geri kazanım tesisleri ve nükleer atıklar, çevresel radyoaktiviteyi arttırdı ve böylece hayatımıza yapay radyoaktif elementlerde girmiş oldu.

26 Nisan 1986 günü Çernobil Nükleer güç santralının 4. ünitesi rutin bakıma alınacağı zaman, durdurma işlemleri sırasında, güvenlik yönünden önemli olan elektrik kesilmesi ile ilgili özel bir deney esnasında gerçekleşen kaza sonucunda büyük miktarda radyoaktif materyal çevreye yayılmıştır. Radyonüklitler değişen meteorolojik şartlara bağlı olarak önce İskandinavya'ya daha sonra Orta Avrupa'ya

ve Güneydoğu Avrupa ile Türkiye'ye ulaşmış, yağışlarla bitki örtüsü ve toprağa bulaşarak radyoaktif kirlenmeye neden olmuştur.

Çevresel radyoaktivite üzerine 50 yıldan daha uzun bir süredir çalışma yapılmaktadır. 1986 yılında Çernobil nükleer santrali kazası özellikle kuzey yarımkürede ciddi boyutlarda radyoaktif dağılıma neden olmuştur. Bu radyoaktif dağılıma neden olan radyonüklidler gama yayan ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{131}I , ^{132}Te , ^{132}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{140}La radyoizotoplardır. Çernobil kazası nedeniyle kazanın ilk zamanlarında, ^{131}I başta olmak üzere kısa yarı ömürlü radyonüklitler ile ^{134}Cs ve ^{137}Cs gibi radyonüklitlerden dış ışınlanmaya, radyoaktif kirliliğe sahip gıdaların tüketilmesi sonucunda da iç ışınlanmaya maruz kalınmıştır. ^{137}Cs radyonükliti; insanların aldığı radyasyon dozuna önemli katkısı, uzun yarı ömrü (30.08 yıl) ve ölçüm kolaylığı nedeniyle çevresel radyoaktivite çalışmalarında genelde referans olarak seçilir.

Radyonüklitler insanlar üzerinde doğrudan ya da insana kadar uzanan besin zincirine karışarak dolaylı yoldan etkili olur. Atmosferdeki radyoaktif maddeler yağışlarla yeryüzüne düşmekte, akarsulara karışmakta, bitkiler tarafından absorbe edilmekte, buradan otçullara, oradan da etçillere geçerek gıda zincirinin üst halkasını teşkil eden insanlara ulaşmaktadır. Topraktaki radyonüklitlerin davranışları, dağılımı ve taşınması üzerine olan çalışmalar insanların aldıkları dozların tespiti için önemlidir. Çünkü toprak; radyonüklitlerin biyolojik sistemlerdeki varlığı için ana kaynaktır. Toprakta biriken radyonüklitler zamanla toprağın alt katmanlarına yönelmekte ve toprağın alt kısmına doğru ilerleyerek, bitkilerin köklerine kadar ulaşmakta ve bitkilerin gelişimi sırasında, bitkilere transfer olmaktadır. Bu durumda, özellikle ^{137}Cs ve ^{90}Sr gibi uzun yarılanma ömürlü radyonüklitler de dikkate alınmalıdır. Radyonüklitlerin topraktaki hareket yönü ve hızı; toprağın yapısı, içeriği, bitkinin cinsi, sulama koşulları, hava durumu gibi pek çok doğal süreçten özellikle de birikimin olduğu dönemdeki şartlara bağlıdır.

Son yıllardaki teknoloji alanındaki hızlı gelişime paralel olarak radyasyonun tıpta, sanayide, haberleşmede ve tarımda kullanımı da artmaktadır [1-5].

1.1. Yapılan Bazı Çevresel Radyoaktivite Çalışmaları

50 yıldan uzun bir süredir tüm dünya da çevresel radyoaktivite üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle Çernobil nükleer reaktör kazasından sonra meydana gelen tahribatların dışında çevremiz doğal bir laboratuvar ortamı olmuş ve dünyada çevresel radyoaktivite araştırmaları yoğunlaşmıştır.

Ortadoğu Teknik Üniversitesi'nde, 1992 yılında Orta ve Doğu Karadeniz sahilinde işlenmemiş alanlardan toplanan toprak örneklerinde ^{137}Cs aktiviteleri belirlenmiştir [6]. Toplam 147 yüzey toprağı örneğı 0-3 cm derinlikten alınıp, tüm numuneler oda sıcaklığında beş hafta kurutulmuş içlerinde bulunan taş, ot ve odun gibi yabancı maddelerden arındırılıp 1mm gözenekli elek ile elenip, darası alınmış ve sayım kaplarına alınıp 2000 s ile 20000 s arasında farklı sürelerde NaI(Tl) dedektörü kullanılarak sayım alınmıştır. Ölçülen Spesifik aktivite değerleri Tablo 1.1'de verilmiştir.

Tablo 1.1: Orta ve Doğu Karadeniz topraklarındaki ^{137}C radyoaktivite değerleri [6].

Numune Numarası	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Numune Numarası	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Numune Numarası	Spesifik Aktivite (Bq/kg)
1	113±57	51	700±100	101	607±58
2	133±53	52	700±100	102	2755±126
3	165±54	53	972±90	103	1733±87
4	<40	54	911±91	104	303±25
5	101±50	55	1329±81	105	849±40
6	223±64	56	2527±154	106	1684±101
7	334±61	57	244±81	107	3369±135
8	105±42	58	2406±169	108	7196±283
9	<40	59	792±106	109	6145±245
10	147±49	60	<40	110	1556±81
11	140±47	61	<40	111	283±40
12	<40	62	1017±107	112	3133±152
13	187±47	63	362±56	113	667±40
14	129±43	64	166±41	114	1718±81
15	<40	65	237±68	115	12069±485
16	<40	66	2876±124	116	6956±270
17	60±15	67	<40	117	1455±61
18	<40	68	1215±87	118	1113±61
19	209±52	69	715±60	119	3339±143
20	103±34	70	897±59	120	283±40

Tablo 1.1: (Devam) Orta ve Doğu Karadeniz topraklarındaki ¹³⁷C radyoaktivite değerleri [6].

Numune Numarası	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Numune Numarası	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Numune Numarası	Spesifik Aktivite (Bq/kg)
21	<40	71	520±37	121	9256±322
22	138±34	72	248±45	122	3303±176
23	199±44	73	895±47	123	3296±151
23	<40	74	555±55	124	4566±199
25	180±40	75	956±56	125	4078±184
26	<40	76	4276±171	126	303±40
26	234±47	77	2747±116	127	1919±81
28	860±115	78	1170±63	128	1273±61
29	1611±170	79	4904±195	129	3538±151
30	382±64	80	5111±206	130	6828±263
31	304±61	81	2254±102	131	162±20
32	775±96	82	3092±141	132	1232±61
33	<40	83	2760±110	133	1535±61
34	1298±105	84	3935±187	134	707±40
35	1997±151	85	2751±126	135	5712±220
36	<40	86	533±53	136	4318±199
37	222±40	87	2303±93	137	848±40
38	349±58	88	1706±73	138	1030±61
39	169±14	89	6204±270	139	2302±101
40	183±46	90	2135±84	140	1656±81
41	407±58	91	1849±87	141	3190±101
42	1153±102	92	955±56	142	626±40
43	362±56	93	3607±169	143	1797±81
44	<40	94	7432±303	144	565±40
45	<40	95	2022±87	145	3083±117
46	1287±120	96	4247±202	146	2883±156
47	1085±102	97	2600±116	147	1413±81
48	2004±152	98	5055±202		
49	151±50	99	3409±144		
50	356±51	100	6754±283		

Çekmece Nükleer Araştırma Merkezi ve İstanbul Teknik Üniversitesi'nde 1998-1999 yılları arasında İstanbul çevresinde toprak örneklerindeki radyonüklidlerin analizi yapılmıştır [7]. 35 bölgeden 0 - 10 cm derinliğinde toplamda 105 toprak örneği alınmıştır. Tüm numuneler kurutulmuş, 1mm'lik elek ile elenip homojenleştirilmiştir. Elenen topraklar 1000 ml hacimli Marinelli kaplara konulmuştur. Tartılıp ağız dikkatli ve sıkıca kapatılıp dengeye ulaşması için 30 gün bekletilmiştir. HPGe-Gama spektrometre sistemi ile ölçümler yapılarak belirlenen spesifik aktivite değerleri Tablo 1.2'de verilmiştir.

Tablo 1.2: İstanbul çevresinde topraktaki radyoaktivite değerleri [7].

Bölge	U-238			Th-232			K-40 (Bq/kg)	Cs-137 (Bq/kg)
	Ra-226 (Bq/kg)	Pb-214 (Bq/kg)	Bi-214 (Bq/kg)	Ac-228 (Bq/kg)	Pb-212 (Bq/kg)	Tl-208 (Bq/kg)		
Silivri	23±9	16±1	16±4	34±8	42±3	27±4	404±20	9±2
B.Çekmece	33±4	28±3	25±2	29±7	28±4	31±3	343±7	3.0±0.3
Mimarsinan	14±3	10±2	11±2	37±6	41±3	26±3	375±17	6±1
Catalca	26±8	10±2	19±3	30±3	43±3	25±3	256±14	19±1
Kayabaşıkoyu	20±8	17±2	19±4	44±7	55±4	36±4	355±20	15±1
Bağcılar	37±3	18±1	26±1	47±6	42±5	43±6	318±4	20.5±0.3
Mahmutbey	26±7	17±3	22±5	41±4	53±4	38±3	394±19	14±1
Arnavutköy	37±5	14±1	25±2	35±3	45±1	24±1	333±8	10.6±0.4
Kanallar	46±9	16±1	34±2	36±3	49±2	30±1	235±7	41±1
Habibler	21±8	13±3	20±6	34±6	44±3	31±4	239±9	51±2
Arnavutköy	48±8	22±3	34±4	18±2	17±3	18±3	426±20	20±1
Terkos	17±7	12±1	16±4	38±5	45±3	31±3	290±14	26±1
Yedikule	15±3	9±2	12±4	35±6	47±4	27±4	423±20	7±1
Kınalı Ada	18±3	14±3	15±5	34±4	45±5	28±4	117±20	81±3
Şişli	26±6	17±2	20±2	40±4	52±3	35±3	251±13	6±1
Sarıyer	41±8	23±1	29±3	50±5	83±2	48±4	421±55	-
Kavak	7±1	3±1	6±2	22±3	22±3	19±4	190±18	11±1
Tarabya	19±6	12±2	17±4	23±7	32±3	17±3	632±23	2±1
Rumeli Feneri	14±4	9±2	11±3	16±3	21±4	12±3	1204±31	3±1
Kilyos(Kum)	8±4	3±1	3±1	10±1	10±1	9±2	152±10	12±1
Kilyos(Toprak)	9±5	4±1	6±1	13±2	16±3	11±2	164±12	18±1
Beylerbeyi	20±6	10±2	17±4	42±6	53±4	36±4	555±27	15±1
OrtaÇeşme	37±9	15±2	27±6	53±8	68±4	44±4	572±22	13±1
Cubuklu	19±6	11±2	16±5	47±7	69±3	46±5	453±19	-
Omerli	56±6	23±1	40±2	57±4	80±1	59±5	213±6	-
Sultan Beyliği	48±11	18±2	34±5	68±14	78±4	51±4	354±17	11±1
Acisu Koyu	10±3	6±2	8±3	16±2	21±2	11±3	240±14	34±1
Umraniye	54±11	31±3	40±5	59±16	91±4	56±4	253±16	7±1
Camlica	32±8	23±1	23±6	61±6	62±4	80±10	171±14	42±2
Kartal	59±7	26±2	40±3	48±3	79±10	51±2	474±13	9±1
Tuzla	26±7	21±3	24±7	51±7	71±3	35±4	448±25	15±1
Gokcedere	7±1	6±1	6±1	21±4	30±3	16±3	470±24	33±2
Gokcedere(Orman)	25±5	16±2	19±3	33±11	35±8	31±6	198±11	4±1
Riva(Kum)	19±3	9±1	13±2	18±1	25±1	13±1	169±5	1.8±0.3
Yalova	45±10	30±3	37±9	60±5	71±4	50±4	565±23	22±2

Mısır Ain-Shams Üniversitesi'nde, 2001 yılında güney Mısır topraklar örneklerinin radyoaktivite analizi yukarıdaki çalışmalara benzer metotlar kullanılarak yapılmıştır [8]. 6 bölgeden toplanan toprak numuneleri analizi HPGe-Gama spektrometre sistemi ile ölçümleri alınmıştır ve Tablo 1.3'de spesifik aktivite sonuçları verilmiştir.

Tablo 1.3: Güney Mısır topraklarındaki radyoaktivite değerleri [8].

Bölge	Ac-228 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Pb-214 (Bq/kg)	Bi-214 (Bq/kg)	Bi-212 (Bq/kg)	Tl-208 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)	U-238 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)
Southeastern	3.4±0.2	4.6±0.2	5.36±0.3	5.1±0.3	4.2±0.2	4.0±0.2	292.8±14.6	5	3.88
Port-Said	9.1±0.5	7.4±0.4	12.1±0.6	9.9±0.5	7.9±0.4	7.6±0.4	421.5±21.1	9.76	8.2
Domietta	5.9±0.4	26.3±1.3	21.4±1.1	23.3±1.3	4.7±0.2	4.7±0.2	659.6±33.0	23.68	5.13
Burg El-Burullus	6.5±0.3	14.4±0.7	11.6±0.6	11.9±0.6	11.0±0.6	8.4±0.4	469.9±23.5	12.63	8.66
Karoun	2.5±0.2	5.3±0.3	6.0±0.3	4.4±0.3	0.84±0.04	2.3±0.1	430.6±21.5	5.21	1.86
Suez	9.7±0.4	18.7±1.0	15.4±0.8	16.1±0.7	11.6±0.6	9.1±0.5	322.8±16.1	16.69	10.09

Anna Üniversitesi'nde, 2002 yılında Hindistan Kalpakkam toprak örneklerinin radyoaktivite analizi yukarıdaki çalışmalara benzer metotlar kullanılarak yapılmıştır [9]. 40 bölgeden 0-5 cm'e derinliklerden toprak örnekleri toplanmıştır. HPGe-Gama spektrometre sistemi ile ölçümler alınmıştır ve Tablo 1.4'de spesifik aktivite sonuçları verilmiştir.

Tablo 1.4: Hindistan Kalpakkam topraklarındaki radyoaktivite değerleri [9].

Bölge	U-238 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)
Kokkilimedu	61	724	225
Keelankalani	10	37	854
Manamai	10	54	826
Kunnathur	13	63	326
Arambakkam	5	37	300
Vengampakkam	9	23	275
Poonthandalam	13	41	577
Meyyur	59	776	403
Sadras	43	591	255
Mahabalipuram	14	94	321
Poonjeri	19	85	486
Kadambadi	13	29	309
Melakkuppam	8	55	262
Kariacheri	8	41	272
Amaipakkam	9	65	200
Neikuppi	12	64	511
Perambakkam	6	33	209
Vitilapuram	13	87	659
Pudupattinam	13	75	505
Devneri	71	761	323
Paiyanur	14	45	348
Manamathi	14	53	350
Kulpanthandalam	10	88	266
Oradam	15	50	290
Tirukalikundram	10	57	338

Tablo 1.4: (Devam) Hindistan Kalpakkam topraklarındaki radyoaktivite değerleri [9].

Bölge	U-238 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)
Mullikolathur	11	68	309
Nerumbur	15	63	612
Panankattu cheri	14	43	521
Ayapakkam	16	60	472
P.Managalam	11	63	567
Voyalur	9	43	423
Kadalur	9	55	477
Kovalam	6	20	390
Thaiyur	12	52	371
Nemmeli	7	33	241
Chingleput	15	47	460
Mamandur	9	32	318
Maduranthagam	10	15	231
Cheyyur	20	69	593
Mugaiyur	10	62	555

Novi Sad Üniversitesi'nde, 2004 yılında Vojvodina'da toprak örneklerinin radyoaktivite analizi yukarıdaki çalışmalara benzer metotlar kullanılarak yapılmıştır [10]. 50 bölgeden 0-2 cm derinliklerden toprak örnekleri alınmıştır. HPGe-Gama spektrometre sistemi ile ölçümler alınmıştır ve Tablo 1.5'de spesifik aktivite sonuçları verilmiştir.

Tablo 1.5: Vojvodina Toprağındaki radyoaktivite değerleri [10].

Bölge	U-238 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)	Cs-137 (Bq/kg)
Becej	60±30	26.8±1.4	51.7±2.5	720±30	8.8±0.7
Nadalj	54±17	44.1±1.9	52±3	553±29	13.3±1.2
Srbobran	48±16	39.2±2.5	49.4±2.5	515±26	9.0±1.3
Palic	24±9	19.9±1.8	23.5±2.6	310±20	8.3±0.9
Coka	42±16	35.3±1.4	53.3±2.6	619±27	12.0±1.0
Tornjos	58±17	43±3	54±3	492±27	10.0±1.1
B.Novo Selo	35±11	30.2±1.9	36.7±2.3	464±21	6.0±0.7
Srpski Miletic	64±29	40.5±2.7	57±3	580±30	6.4±0.8
Orlovat	53±15	37.0±2.5	54.7±2.8	630±30	9.6±0.8
Kikinda	43±18	29.0±2.8	55.9±2.9	710±40	11.7±1.3
Petrovaradin	60±18	42.2±2.0	62±3	590±30	13.8±1.6
Kac	56±27	44.1±2.6	48±3	600±30	8.1±1.1
Idvor	41±19	21.3±2.4	34±4	350±26	7.2±1.1
Boka	53±18	44.2±2.1	64±4	550±30	10.3±1.1
Sanad	49±14	34.9±2.0	51±3	640±40	9.3±1.2
Kula Lipar	56±23	43.2±2.3	54±3	493±27	7.8±1.3
Parage	66±19	45.5±2.9	57±4	560±30	9.4±1.4

Tablo 1.5: (Devam) Vojvodina toprağındaki radyoaktivite değerleri [10].

Bölge	U-238 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)	Cs-137 (Bq/kg)
Rivica	63±16	45.2±2.8	63±3	560±30	8.5±0.7
Visnjicevo	55±17	51.0±2.1	63±3	610±30	8.1±1.1
Maglic	39±15	40.6±2.5	52.3±2.8	513±28	5.7±0.9
Sid	69±16	44.4±2.2	59±3	567±28	7.5±0.7
Vrsac	50±20	31.9±2.2	59±4	580±30	12.6±1.4
Crepaja	44±24	36.4±2.3	50.7±2.5	480±30	17.5±1.4
Gakovo	55±16	41.6±2.5	52±3	475±25	7.0±0.9
Zrenjanin	49±23	40.4±1.8	50.1±2.4	526±25	8.5±1.1
Padina	55±22	41.0±2.4	55±3	534±29	12.3±1.1
Deliblato	51±14	41.5±2.7	54.3±2.9	501±23	28.2±1.9
R.Sancevi	52±16	40.5±2.6	54±3	610±30	6.9±1.4
BoGojevo	42±17	37±3	48.2±2.8	543±28	9.2±1.0
Rusko Selo	53±14	34.9±1.5	54±3	730±40	19.7±1.2
Morovic	56±18	50.9±1.8	59±3	571±26	7.8±0.7
Ruma Irig	50±16	50.4±2.0	60±3	557±29	7.7±0.9
A.Santic	60±17	46.6±2.4	54.4±2.7	470±30	6.7±0.7
Bavaniste	59±17	43±4	55.2±2.9	550±30	55±3
Pecinci Popinci	56±16	39.4±2.9	56±3	534±28	11.5±1.6
R.Krstur	56±15	48.6±2.0	53.7±2.6	523±24	7.7±0.7
Zednik	49±22	40.1±2.6	50.5±2.6	488±28	11.1±1.5
Horgos	31±9	19.7±1.0	22.0±1.5	238±13	1.1±0.3
Ilandza	57±20	42.3±2.4	57±3	550±40	18.4±1.5
Kozjak	52±16	40.1±2.7	50.1±2.7	500±30	15.5±1.3
Zabalj	45±17	41.8±2.4	59±3	640±30	10.5±1.0
Margita	30±24	26.2±1.7	54.8±2.8	551±23	48.7±2.4
Begejci	56±18	50.9±1.8	59±3	571±26	7.8±0.7
B.Arandjelovo	50±16	50.4±2.0	60±3	557±29	7.7±0.9
Torda	55±16	40.3±2.0	59±3	660±30	15.5±1.3
Kumane	49±22	37.9±2.0	55.0±2.7	720±30	6.8±0.6
Donji Tovarnik	50±23	40±3	62±3	600±30	9.4±1.1
Obedska Bara	72±21	43.3±2.5	62±3	630±30	11.9±1.1
Indjija	57±23	44±3	59±3	580±30	6.7±0.9
Sr.Mitrovica	49±15	39.9±2.4	55±3	536±24	5.9±0.6

Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde, 2007 yılında Fırtına vadisinden toplanan toprak örneklerinde çevresel radyasyon çalışmaları yapılmıştır [11]. 40 noktadan, 0-15 cm derinliğinden alınan yüzey toprak örneklerinin radyoaktivite analizi yukarıdaki çalışmalara benzer metotlar kullanılarak yapılmıştır. Bir HPGe-Gama ışın dedektörü kullanılarak radyonüklitlerin konsantrasyonları belirlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları Tablo 1.6'da verilmektedir.

Tablo 1.6: Fırtına Vadisi toprağındaki radyoaktivite değerleri [11].

Bölgelerin Denizden Uzaklıkları (km)	Ra-226 (Bq/kg)	Pb-214 (Bq/kg)	Bi-214 (Bq/kg)	Ac-228 (Bq/kg)	Tl-208 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)	Cs-137 (Bq/kg)
1	24.59±0.98	20.08±0.40	18.2±0.4	20.74±0.83	22.56±0.68	462.35±4.62	30.29±1.21
4	47.47±1.90	27.23±0.54	24.7±0.5	32.81±1.31	34.85±1.05	663.09±6.63	33.62±1.34
7	15.29±0.61	16.26±0.33	14.1±0.3	18.74±0.75	26.56±0.80	214.12±2.14	146.35±5.85
11	22.41±0.90	13.62±0.27	13.1±0.3	18.84±0.75	22.19±0.67	516.75±5.17	18.53±0.74
13	24.96±1.00	13.76±0.28	9.9±0.2	10.28±0.41	10.70±0.32	280.85±2.81	87.30±3.49
16	17.48±0.70	11.56±0.23	8.91±0.18	13.51±0.54	13.97±0.42	429.14±4.29	36.87±1.47
20	25.12±1.00	16.26±0.33	17.4±0.4	24.13±0.97	23.79±0.71	295.69±2.96	109.39±4.38
22	16.83±0.67	15.82±0.32	15.3±0.3	16.23±0.65	16.79±0.50	337.75±3.38	92.92±3.72
25	23.92±0.96	16.52±0.33	12.6±0.3	18.08±0.72	19.46±0.58	426.71±4.27	143.07±5.72
28	17.85±0.71	11.66±0.23	11.3±0.2	12.60±0.50	13.92±0.42	105.35±1.05	89.00±3.56
32	28.95±1.16	15.06±0.30	13.5±0.3	15.75±0.63	17.41±0.52	378.26±3.78	18.95±0.76
35	126.7±5.1	77.07±1.54	64.0±1.3	69.76±2.79	71.82±2.15	1033.1±10.3	60.12±2.40
37	119.4±4.8	80.30±1.61	71.4±1.4	73.33±2.93	76.09±2.28	989.63±9.90	80.52±3.22
41	97.59±3.90	56.29±1.13	42.8±0.9	58.64±2.35	59.76±1.79	863.62±8.64	232.44±9.30
44	83.90±3.36	54.52±1.09	45.8±0.9	50.90±2.04	51.68±1.55	1152.9±11.5	59.90±2.40
47	188.3±7.5	93.19±1.86	86.2±1.7	86.60±3.46	105.2±3.2	784.95±7.85	99.21±3.97
50	104.5±4.2	75.64±1.51	62.6±1.3	63.24±2.53	68.84±2.0	936.76±9.37	103.12±4.12
53	155.9±6.2	76.23±1.52	72.0±1.4	74.71±2.99	83.11±2.49	1019.2±10.2	121.09±4.84
56	129.9±5.2	66.38±1.33	61.7±1.2	73.71±2.95	82.53±2.48	744.90±7.45	78.46±3.14
59	184.6±7.4	70.64±1.41	61.2±1.2	66.93±2.68	70.28±2.11	1234.7±12.4	55.10±2.20

Kocaeli Üniversitesi'nde 2006 yılında, Türkiye'nin Doğu Karadeniz Bölgesinin Trabzon'dan Sarp'a kadar olan sahil kesiminden, 2004-2005 yılları arasında toplanan toprak örneklerinin Cs-137 aktivite analizi yapılmıştır [3]. 41 bölgeden 0-10 cm derinliklerinden toprak örnekleri alınıp, içlerinde bulunan taş, ot ve odun gibi yabancı maddelerden arındırılıp 15 gün süreyle oda sıcaklığında kurutulmuştur. Her örnek kurutulduktan sonra iyice öğütölüp ve 1 mm gözenekli elekten geçirilip, darası alınmış bir sayım kabına yerleştirilmiştir. Daha sonra her kabın ağızı, dışarıdan hava girmeyecek şekilde kapatılıp, 50.000 ile 10.000 saniye arasındaki sürelerde sayılmıştır. HPGe-Gama spektrometre sistemi ile ölçümler alınmıştır ve Tablo 1.7'de bu çalışmanın spesifik aktivite sonuçları verilmiştir.

Tablo 1.7: Doğu Karadeniz Bölgesinin Trabzon'dan Sarp'a kadar olan sahil kesimin toprağındaki radyoaktivite değerleri [3].

Örnek Numarası	Kütle(g)	N _{net}	t (s)	A(Bq)	S _A (Bq/kg)
Trabzon	161.5	214	25	0.9±0.09	6.3±0,6
Yomra	171	219	50	1±0.1	6±0.6
Yomra	119.2	4762	25	22.5±0.4	189±1.5
Yomra	161.1	834	50	20.08	12±0.5
Arsin	137.5	1367	25	6.5±0,194	47±1.4
Araklı	80	2813	50	7±0.13	83±1.6
Sürmene	140.6	3021	25	14±0.3	102±2
Sürmene-Of	125.1	1084	25	5±0.2	41±1.4
Of	130.9	3420	25	16±0.3	124±2.2
Of –İyidere	116.8	13.82	50	33±0.3	280±2.5
İyidere	131.3	2983	25	14±0.3	107±2
Derepazarı	103	23.939	50	57±0.4	551±4
Rize	122.5	7892	25	37±0.4	305±3.5
Rize-Çayeli	150	461	50	1±0.06	7±0.5
Çayeli	134.1	7661	25	36±0.4	270.5±3
Çayeli-Pazar	147.3	8866	50	21±0.23	142.5±1.6
Çayeli-Pazar	140.5	1665	50	4±0.1	28±0.7
Pazar	111.5	45.285	50	107±0.5	968.5±4.5
Pazar-Ardeşen	152.8	2247	25	11±0.23	70±1.6
Ardeşen	105.4	28.586	50	68±0.04	643±0.4
Ardeşen-Fındıklı	125	3960	10	47±0.8	375±6
Araklı-Fındıklı	118	1989	10	24±0.5	200±4.6
Fındıklı	102.7	20134	50	48±0.3	465±0.3
Fındıklı-Arhavi	141.8	596	10	6±0.3	42±2
Arhavi	146.5	2081	10	25±0.6	168±7
Arhavi-Hopa	86.1	8609	50	20.4±0.2	237±2.6
Hopa	51.4	2217	10	27±0.6	510.4±12
Hopa-Kemalpaşa	183.5	174	10000	2±0.18	11±0.9
Kemalpaşa	134.1	794	50	2±0.4	14±3
Sarp	174.4	159	10	2±0.17	11±0.9
Beşikdüzü	65.9	3255	10	39±0.7	585±11
Akçabat	156.4	48	50	0.08±0.04	0.5±0.25
Trabzon-Yomra	148.7	296	10	3.5±0.3	23.37±1.7
Trabzon-Of	11.9	55	10	0.6±0.03	5.5±0.24
Çayeli	149.3	348	10	4±0.24	28±1.6

Tablo 1.7: (Devam) Doğu Karadeniz Bölgesinin Trabzon'dan Sarp'a kadar olan sahil kesimin toprağındaki radyoaktivite değerleri [3].

Örnek Numarası	Kütle(g)	Nnet	t (s)	A(Bq)	S _A (Bq/kg)
Rize-Pazar	124,9	13039	50	31±0.3	247±2.3
Rize	90,1	1069	10	13±0.4	140±4.6
Ardeşen	131.2	1428	10	17±0.5	129±3.5
Hopa	135,6	10261	50	24±0.25	179±1.8
Hopa-Kemalpaşa	61,1	2181	10	26±0.6	423±9
Sarp	131	2467	10	29±0.6	223±4.5

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi'nde, 2007-2008 yılları arasında Edremit Körfezinde toprak örneklerindeki çevresel radyasyon çalışmaları yapılmıştır [12]. Edremit, Akçay, Altınoluk, Küçükkuuyu alanlarında farklı noktalardan toplanan yüzey toprak örneklerinin radyoaktivite analizi yukarıdaki çalışmalara benzer metotlar kullanılarak yapılmıştır. Bir HPGe-Gama ışın dedektörü kullanılarak radyonüklitlerin konsantrasyonları belirlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları Tablo 1.8'de verilmektedir.

Tablo 1.8: Edremit Körfezi'nde topraktaki radyoaktivite değerleri [12].

Bölge	Ra-226 (Bq/kg)	Pb-214 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	Bi-214 (Bq/kg)	Ac-228 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)
Edremit	82±4.59	52±1.45	93±2.13	46±1.33	87±2.52	872±13.9
Akçay	78±1.87	63±0.50	67±0.80	58±0.58	65±0.97	844±5.9
Altınoluk	64±2.81	76±0.98	35±1.01	67±1.07	30±1.23	391±7.0
Küçükkuuyu	81±3.72	59±1.06	94±1.69	61±1.15	85±2.12	842±11.8

Çekmece Nükleer Araştırma Merkezi ve Çukurova Üniversitesi'nde, 2007-2008 yılları arasında Adana çevresindeki toprak örneklerindeki radyonüklidlerin analizi yukarıdaki çalışmalara benzer metotlar kullanılarak yapılmıştır [13]. 38 bölgeden 0-30 cm derinliklerden toprak örnekleri alınmıştır; spesifik aktivite sonuçları Tablo 1.9'da verilmektedir.

Tablo 1.9: Adana Çevresinde topraktaki radyoaktivite değerleri [13].

Bölge	U-238 Serisi			Th-232 Serisi			K-40 (Bq/kg)	Cs-137 (Bq/kg)	U-238 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)
	Ra-226 (Bq/kg)	Pb-214 (Bq/kg)	Bi-214 (Bq/kg)	Ac-228 (Bq/kg)	Tl-208 (Bq/kg)					
Yüreğir	16.5±1.3	11.2±0.4	9.9±0.4	17.4±0.7	18.4±0.6	209.4±3.8	13.2±0.5	12.6±0.7	17.9±0.6	
Aladağ	8.0±0.6	5.8±0.2	5.1±0.3	6.1.0±0.4	5.0±0.3	99.8±2.5	30.6±0.3	6.3±0.4	5.6±0.4	
Karaisali	26.2±1.1	20.5±0.3	21.2±0.4	23.5±0.5	27.2±0.5	402.5±3.4	3.1±0.1	22.6±0.6	25.3±0.5	
Pozantı	13.9±0.9	9.6±0.3	9.5±0.3	8.4±0.4	10.7±0.4	158.1±2.6	3.5±0.1	11.0±0.5	9.6±0.4	
Feke	65.6±3.7	45.2±0.9	46.0±1.1	47.3±1.5	51.0±1.3	552.0±7.1	8.1±0.4	52.3±1.9	49.1±1.4	
Saimbeyli	37.8±1.7	30.2±0.5	25.7±0.5	42.5±0.9	47.0±0.8	506.4±5.1	4.5±0.2	31.2±0.9	44.8±0.9	
Yumurtalık	14.1±0.8	10.5±0.2	10.5±0.3	11.4±0.4	12.6±0.4	254.3±2.8	6.3±0.2	10.8±0.5	12.2±0.4	
Ceyhan	16.1±1.2	12.3±0.4	10.8±0.4	15.2±0.7	16.7±0.6	267.4±4.4	8.0±0.3	13.1±0.7	15.9±0.6	
Karataş	12.3±0.9	9.1±0.3	9.8±0.3	8.7±0.4	8.4±0.3	144.1±2.2	0.5±10.3	10.4±0.5	8.5±0.4	
Kozan	36.5±2.4	27.8±0.6	26.1±0.6	46.2±1.0	47.7±0.8	642.7±5.5	6.1±0.3	30.1±1.2	46.9±0.9	
İmamoğlu	21.5±0.8	17.3±0.3	16.2±0.3	17.4±0.5	19.2±0.4	344.0±3.2	0.2±0.1	18.3±0.5	18.3±0.6	
Tufanbeyli	38.4±1.5	28.6±0.4	24.3±0.4	40.3±0.8	42.5±0.7	442.9±4.7	6.6±0.2	30.5±0.8	41.3±0.8	

Prishtina Üniversitesi, Educons Üniversitesi ve Kragujevac Üniversitesi'nde, 2009 yılında batı Sırbistan toprak örneklerindeki radyonüklidlerin analizi yukarıdaki çalışmalara benzer metotlar kullanılarak yapılmıştır [14]. 20 noktadan alınan toprak örneği 0-30 cm derinliklerden alınmıştır; spesifik aktivite sonuçları Tablo (1.10)'da verilmektedir.

Tablo 1.10: Batı Sırbistan topraklarındaki radyoaktivite değerleri [14].

Numune Numarası	U-238 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)	Cs-137 (Bq/kg)
3	90±30	42.2±1.6	58.7±2.4	441±24	31.3±1.3
21	60±14	45.6±2.7	70±3	360±15	33.5±1.7
25	77±28	36.2±1.3	52±2.2	408±21	24.1±1.1
26	62±19	42.9±2.8	63±4	452±25	28.7±2
27	98±35	43.8±2.3	59±4	446±29	27.3±1.9
37	12±9	7.8±0.7	18.5±1.2	121±15	2.6±0.4
38	28±22	9.9±0.8	11.5±0.8	227±15	41.9±1.8
45	80±50	41.5±1.9	60±2.9	406±25	87±4
46	67±22	38.5±2	58±3	410±24	12.1±1.5
51	47±12	28.8±2.7	46.1±2.6	444±19	57±3
52	43±18	27.9±1.4	43.5±2.5	458±27	55.3±2.3

1.2. Bu Çalışmanın Amacı

İnsanlık tarihinin son yarım yüzyılı içerisinde, süratli ve yaygın teknolojik gelişmelere bağlı olarak dünyanın her yanında çevre kirlenmesi çeşitli boyutlarıyla gündemimizi meşgul etmeye başlamıştır [5].

Türkiye`de, endüstriyel faaliyet açısından ön sıralarda yer alan Kocaeli ili ve İzmit, yeterli önlemlerin alınmaması nedeniyle Türkiye ortalamasının çok üzerinde bir çevre kirliliği ile karşı karşıyadır ve bunun içerisinde radyoaktif kirliliğin payı hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır.

Bu nedenle, öncelikle Kocaeli ve daha sonra Türkiye genelinde toprak ve bitki gibi çevresel örneklerde, gıda ve endüstriyel ürünlerde, radyonüklitlerin aktivite seviyelerinin belirlenmesi için Kocaeli Üniversitesi Fizik Bölümünde, 2007/036 numaralı Bilimsel Araştırmalar Projesi kapsamında, bir gama spektroskopi laboratuvarı kurulmasına karar verilmiştir. Bu tezin amacı, bu proje kapsamındaki gama spektrometresinin kalibrasyonlarının ve test ölçümlerinin yapılmasıdır.

Bölüm 1`de çevresel radyoaktiviteyi arttıran faktörlerden, şimdiye kadar yapılmış bazı çevresel radyoaktivite çalışmalarından ve bu çalışmanın amacından bahsedilmektedir. Bölüm 2`de radyoaktivite, doğal ve yapay radyoaktivite hakkında bilgi verilmektedir. Bölüm 3`te gama ışın dedektör tipleri ve bunlar hakkında teorik bilgiler verilmektedir. Bölüm 4`te Kocaeli Üniversitesi Fizik Bölümünde kullanılan gama spektroskopi sistemi kalibrasyonundan bahsedilmektedir. Bölüm 5`te, yaptığımız deneysel çalışmalar, hesaplamalar ve sonuçları yer almaktadır. En son olarak Bölüm 6`da tartışma ve yorum kısmına yer verilmektedir.

BÖLÜM 2. TEMEL KAVRAMLAR

2.1. Radyoaktivite

Radyoaktivite, kararsız atom çekirdeklerinin kararlı hale gelebilmek için dışarıdan enerji almadan radyasyon yayarak bozunmaları olayıdır.

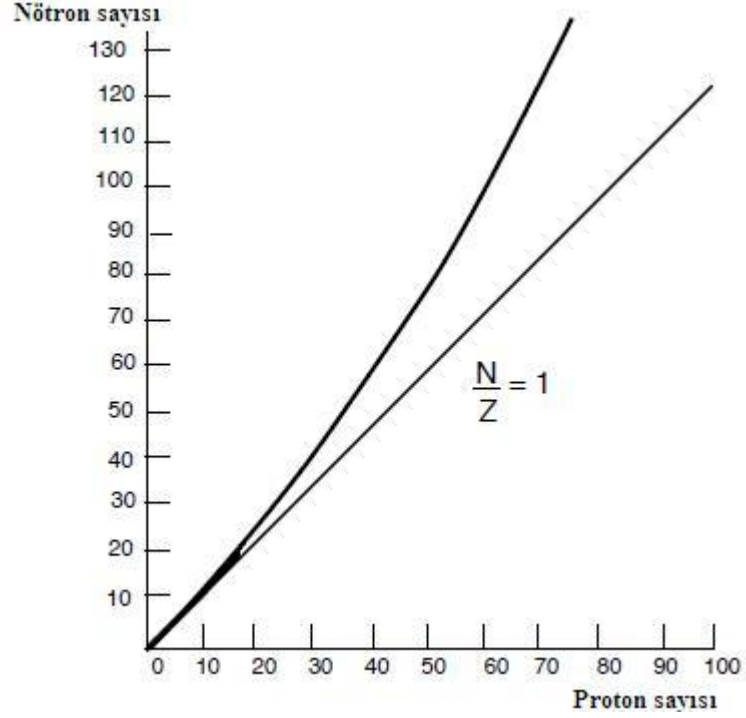
1895 yılında Wilhelm Conrad Röntgen'in X-ışınlarını keşfinden sonra, 1896 yılında Henry Becquerel'in uranyumun kendiliğinden, gözle görülemeyen girici ışınlar yaydığını belirlemesiyle radyoaktivite keşfedildi. Bu buluşların ardından Curie ve diğer bilim adamları tarafından yapılan çalışmalar, bu alanda yapılan yeni gelişmelere zemin hazırladı. Radyoaktivite doğal ve yapay olmak üzere iki çeşittir [3,15].

2.1.1. Doğal radyoaktivite ve radyoaktif seriler

Radyoaktif element doğada kendiliğinden bulunuyor veya doğada bulunan diğer radyoizotopların bozunmasından ortaya çıkıyorsa buna doğal radyoaktivite denir.

Doğada bulunan radyoizotop sayısı 340 civarındadır [15]. Bunların 70 tanesi bilinen ağır radyoaktif elementler içinde yer alır. Atom numarası $Z = 82$ 'den büyük elementler radyoaktif özelliğe sahiptirler. Kararlılık, çekirdekteki nötron ve proton sayısı ile alakalıdır. Nötron ve/veya proton sayısı çift ise çekirdek kararlıdır. Örneğin bilinen 274 kararlı çekirdekten 105 tanesinde nötron veya proton sayılarının çift olduğu, 165 tanesinde hem nötron hem de proton sayılarının çift olduğu ve sadece 4 tanesinde nötron ve proton sayılarının tek olduğu biliniyor. Atom kütlesi küçük olan çekirdeklerde nötron sayısının protona oranı ($n/p \cong 1$) bir veya bire çok yakınsa çekirdek kararlıdır. Atom kütlesi büyük olan çekirdekler de ise nötron/proton oranı yaklaşık 1,5 gibi bir değerde ise çekirdek kararlıdır. Proton ve/veya nötron sayısı sihirli

sayı (2, 8, 20, 50, 82, 126) ise, çekirdek çok kararlıdır [15,16]. Şekil 2.1’de kararlılık eğrisi verilmiştir.

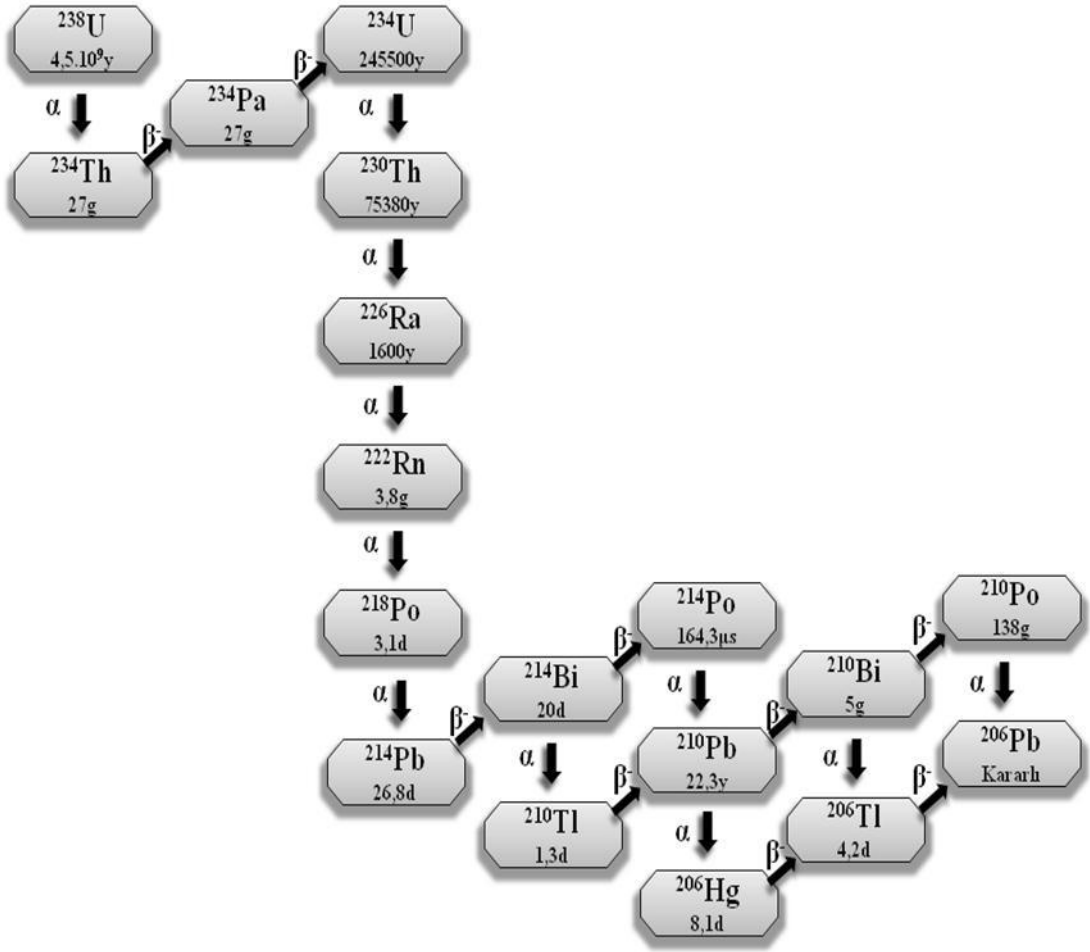


Şekil 2.1: Kararlılık Eğrisi [17].

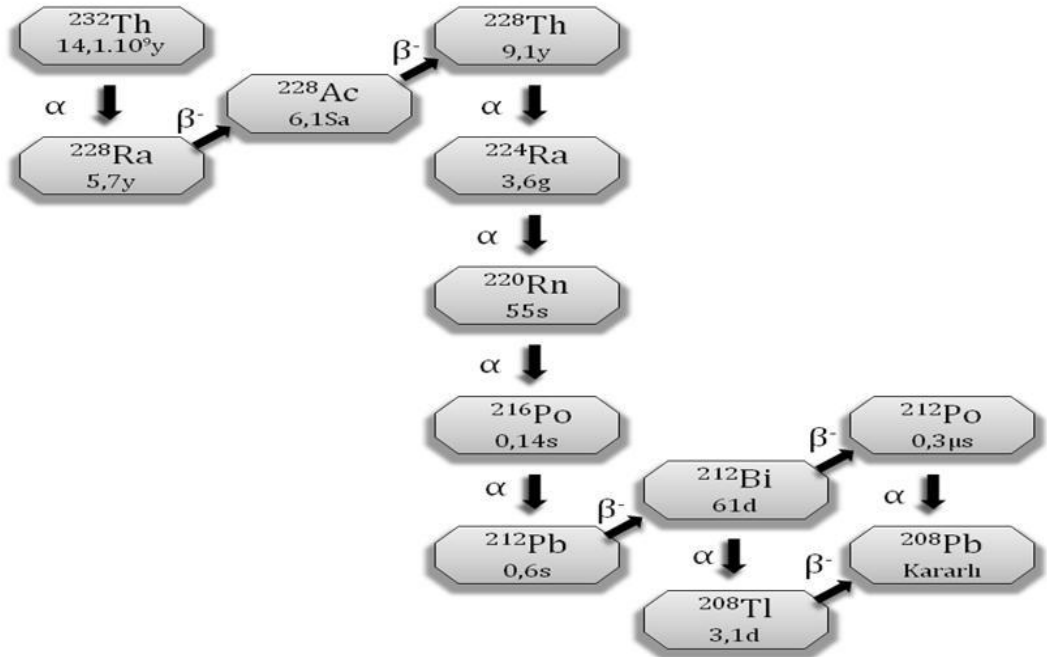
Evren henüz yeni oluşmaya başladığı zamanlarda birçok izotopun radyoaktif olduğu tahmin edilmektedir. Birkaç radyoaktif elementin yarı-ömrü dünyanın yaşına kıyaslanabilecek kadar uzundur. Ağır kararsız çekirdekler zincirleme bir bozunum ile kararlı hale gelinceye kadar bozunup “Bozunum serilerini” veya “Bozunum zincirlerini” oluştururlar.[3] Ağır elementlerden ($Z > 82$) oluşan doğal radyoaktif izotoplar üç seri altında toplanırlar:

1. Uranyum serisi (^{238}U kaynaklı)
2. Toryum Serisi (^{232}Th kaynaklı)
3. Aktinyum Serisi (^{235}U kaynaklı)

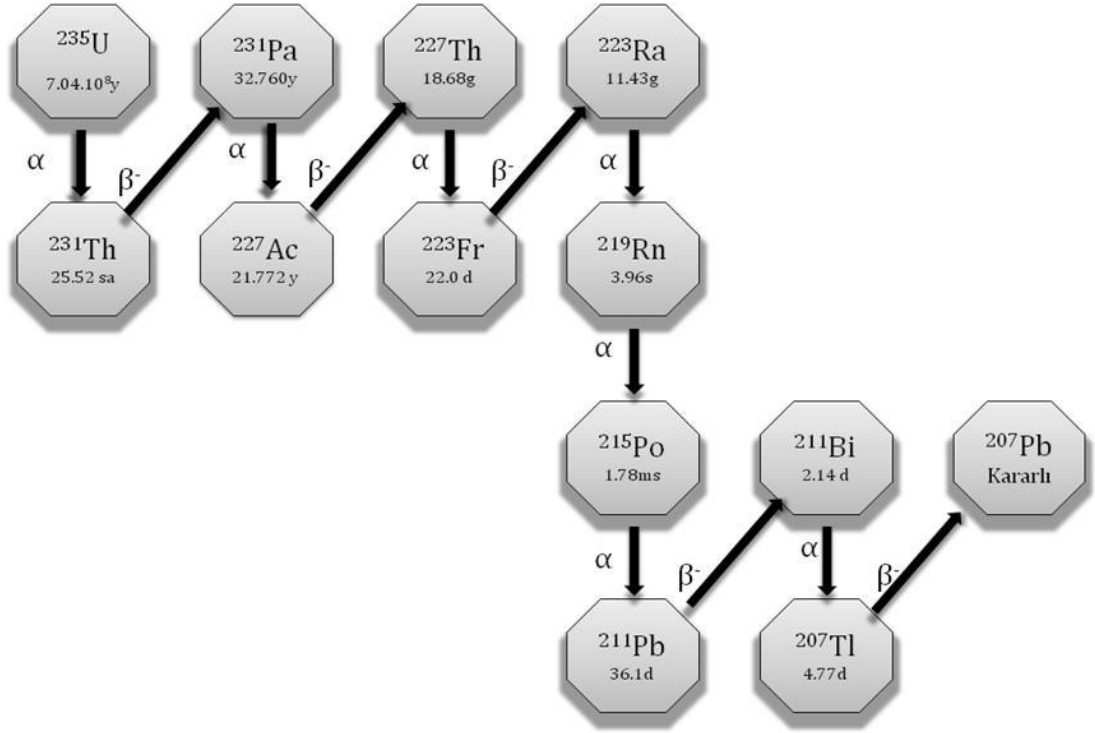
Bu seriler ve bu serilerin bozunum ürünleri Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’te gösterilmiştir.



Şekil 2.2: ^{238}U Bozunum Serisi.



Şekil 2.3: ^{232}Th Bozunum Serisi.



Şekil 2.4: ²²⁷Ac Bozunum Serisi.

2.2. Bozunum Türleri

Radyoaktif çekirdekler kararlılık nötron/proton oranına sahip değillerdir. Kararlı hale gelinceye kadar radyoaktif çekirdek bozunması olarak adlandırılan bir süreçle, alfa (α : ${}^4_2\text{He}^{++}$), beta (β) ve gama (γ) radyasyonlarından birini veya birkaçını yayınlamakla kararlı hale gelebilirler.

2.2.1. Alfa bozunumu

Kararsızlık proton ve nötron fazlalığından kaynaklanıyorsa çekirdek alfa (α : ${}^4_2\text{He}$) yayınlamakla bozunur. Alfa bozunumu daha çok atom numarası büyük izotoplarda görülür. Doğal olarak bulunan radyoaktif maddelerin yayınladıkları alfa parçacıklarının enerjileri genellikle 9MeV'in altındadır. Alfa parçacıkları +2 elektrik yüküne sahiptirler. Gircilikleri düşüktür. Alfa parçacıkları erişim uzaklıklarının kısa oluşundan dolayı dış radyasyon tehlikesi yaratmasalar da, sahip oldukları elektrik yükünden dolayı madde içinden geçerken yoğun bir iyonlaşma oluştururlar bu

nedenle de alfa parçacıkları yayınlayan maddeler sindirim, solunum veya yaralar yolu ile vücuda girdikleri takdirde çok tehlikeli olabilirler [18].



Şekil 2.5 : Alfa Bozunumu [18]

Alfa bozunum denklemi aşağıdaki gibidir:

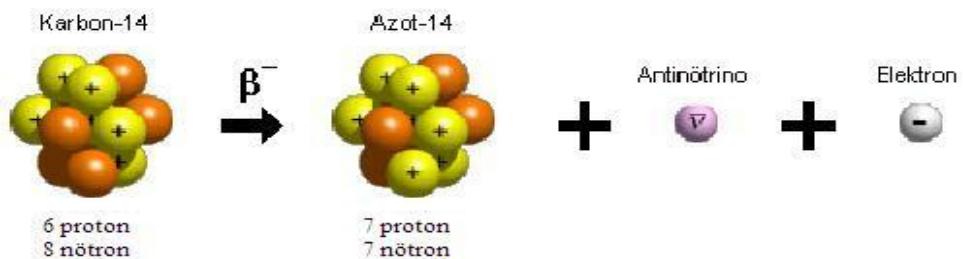


2.2.2. Beta bozunumu

Beta parçacıkları kendilerini yayınlayan radyonüklitlerin bir karakteristiği olduklarından bu radyonüklitin tanımlanmasında referans olarak tanımlanırlar. Beta parçacıkları tek elemanter yükleri nedeniyle yüksek enerjilere çıkmadıkları sürece madde içine fazla nüfuz edemezler. Beta bozunumunun üç farklı türü vardır:

β^- bozunumu :

Eğer kararsızlık nötron fazlalığından kaynaklanıyorsa, çekirdekteki enerji fazlalığını gidermek için nötronlardan biri proton ve elektrona parçalanır (Denklemler 2.2). Proton çekirdekte kalırken, elektron hızla atomdan dışarı atılır.



Şekil 2.6: Beta Bozunumu [18].

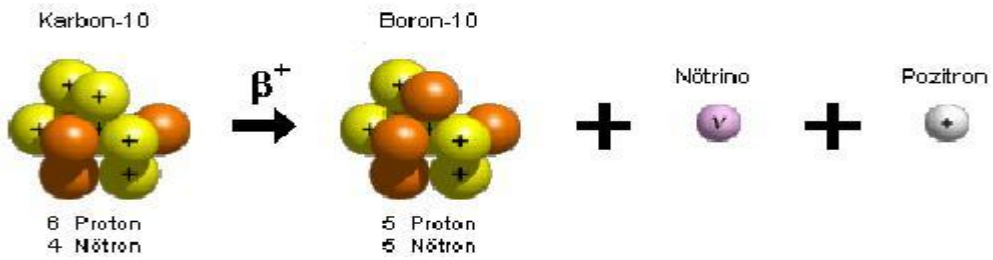
$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu} \quad (2.2)$$

Bu yüksek hızlı elektrona beta parçacığı adı verilir. Bu şekilde beta yayılımı yapan radyonüklitin atom numarası bir artarak kendinden bir sonraki elementin izobar atomuna dönüşür. Bu bozunuma da kütle sayısı değişmediği için izobarik bozunma adı verilir ve bozunma denklemi aşağıdaki gibidir.

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e + \bar{\nu} \quad (2.3)$$

β^+ bozunumu :

β^+ pozitif yüklü bir elektron olarak düşünülebilir ve pozitron olarak anılır. Atomun kararsızlığı nötron azlığından veya proton fazlalığından kaynaklanıyorsa protonlardan biri nötron ve pozitif yüklü elektrona (pozitrona) dönüşür. Nötron çekirdekte kalır, pozitron dışarı fırlatılır (Denklemler.2.4). Böylece pozitron yayımlayan radyonüklitin proton sayısı bir eksilerek kendinden bir önceki elementin izobar atomuna dönüşür, fakat kütle sayısı değişmez [18].



Şekil 2.7: Pozitron Bozunumu [18].

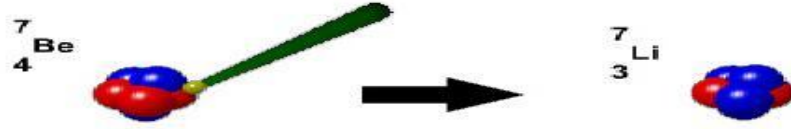
$$p \rightarrow n + e^{+} + \nu \quad (2.4)$$

Bozunma denklemi aşağıdaki gibidir:

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_{+1} e + \nu \quad (2.5)$$

Elektron yakalama olayı :

Çekirdek proton fazlalığından dolayı kararsız ise atomun çekirdeğe yakın elektronlarından biri çekirdek tarafından yakalanır; elektron yakalama olayı β^+ bozunumuna rakip bir reaksiyondur. Elektronla bir proton birleşerek nötron ve nötrino haline dönüşür (Denklem.2.6).



Şekil 2.8: Elektron Yakalama Olayı [18].



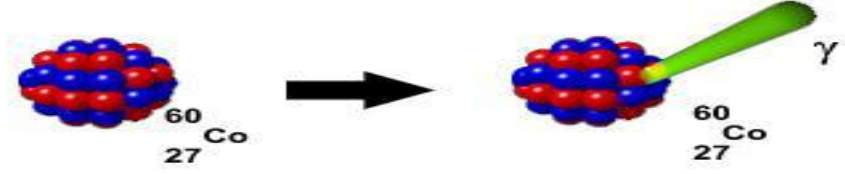
Pozitron bozunmasında olduğu gibi proton sayısı bir eksilir. Kütle numarası ise aynı kalır. Bu olayda boşalan elektron yörüngesine üst yörüngelerdeki başka bir elektron geçer ve frenleme radyasyonu adı verilen X-ışınları yayınlanır. Denklemi aşağıdaki gibidir [18]:



2.2.3. Gama bozunumu

Çekirdek bozunuma uğrayıp bir alfa veya beta yayınladıktan sonra, ürün çekirdek çoğu zaman uyarılmış enerji seviyesinde kalır. Bu durumdaki çekirdek ikinci bir bozunum ile foton yayınlayarak daha düşük enerji seviyesine ve sonunda taban enerji seviyesine düşer. Çekirdeğin uyarılmış enerji seviyesinden temel enerji seviyesine düşerken yayınladığı fotonlara gama (γ) ışını denir. Gama ışınlarının enerjileri tipik olarak 0,1 - 10 MeV arasındadır. Gama ışınlarının kütleleri yoktur ve yüksüzdürler, dolayısı ile elektrik ve manyetik alanda saptırılamazlar; yüksek enerjilerinden dolayı

madde içerisinde yol alabilirler, ışık hızı ile yayılırlar ve gazları iyonlaştırıcı özellikleri vardır.



Şekil 2.9: Gama Bozunumu [18].

Gama bozunum denklemi aşağıdaki gibidir:



2.3. Radyoaktif Bozunum Kanunu

Radyoaktif maddelerin bozularak aktivitelerini kaybetmelerine ‘Radyoaktif Bozunum’ denir. Herhangi bir çekirdeğin ne zaman bozunacağı bilinemez. Bozunmamış her bir çekirdeğin gelecek bir saniye içinde bozunma olasılığına bozunma sabiti denir ve λ ile gösterilir. Her radyonüklitin kendine ait bir bozunma sabiti vardır. Bu olasılık, atomun yaşı ne olursa olsun sabit olup radyoaktif bozunmanın istatistiksel teorisinin temel varsayımdır. Radyoaktif bozunma hızı veya radyoaktivitenin zamanla değişimi olasılık yasalarıyla hesaplanabilmektedir [19].

Herhangi bir t anında N tane bozunmamış radyoaktif çekirdek varsa, dt zaman aralığında bozunacak dN çekirdek sayısı, N ile orantılıdır [19].

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt \quad (2.9)$$

Burada bozunma sabiti λ ,

$$\lambda = -\frac{(dN / dt)}{N} \quad (2.10)$$

Yukarıdaki ifade, $t=0$ anında N_0 tane bozunmamış çekirdek olduğu varsayılarak aşağıdaki gibi çözülebilir.

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = - \int \lambda dt \quad (2.11)$$

Denklem 2.11 genel çözümü aşağıdaki gibidir.

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.12)$$

Denklem 2.12 “Üstel Radyoaktif Bozunum Kanunu” olarak anılır.

Radyoaktif elementin birim zamandaki bozunma sayısı, yani bozunma hızına “Aktivite” denir. Aktivite, sadece saniyedeki parçalanma sayısını vermekte, yayınlanan radyasyonun türü veya enerjisi hakkında bilgi vermemektedir. Aktivite (A) Denklem 2.15 ile verilir,

$$A(t) = \left| \frac{dN}{dt} \right| \quad (2.13)$$

böylece,

$$A(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t} = \lambda N(t) \quad (2.14)$$

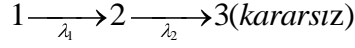
ve

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.15)$$

şeklini alır. Burada A_0 başlangıç ($t = 0$) aktivitesidir.

2.3.1. Zincirleme radyoaktif bozunum

Radyoaktif çekirdek, bozunuma uğradıktan sonra ürün çekirdekte radyoaktif ise aşağıdaki gibi bir zincirleme reaksiyon meydana gelir.



Denklem 2.9'a benzer şekilde, dt zaman aralığında bozunan çekirdeklerin sayısı:

$$dN_1 = -\lambda_1 \cdot N_1 \cdot dt \quad (2.16)$$

$$dN_2 = \lambda_1 \cdot N_1 \cdot dt - \lambda_2 \cdot N_2 \cdot dt \quad (2.17)$$

$$dN_3 = \lambda_2 \cdot N_2 \cdot dt - \lambda_3 \cdot N_3 \cdot dt \quad (2.18)$$

Denklem 2.16, 2.17 ve 2.18 çözüldüğünde, t anındaki ana çekirdek ve ürün çekirdeklerin sayıları aşağıdaki gibi bulunur:

$$N_1(t) = N_{10} e^{-\lambda_1 t} \quad (2.19)$$

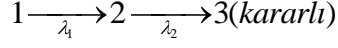
$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_{20} \cdot e^{-\lambda_2 t} \quad (2.20)$$

$$N_3(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \left(\frac{e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_3 - \lambda_1} - \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_3 - \lambda_2} \right) + \frac{\lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_2} N_{20} e^{-\lambda_2 t} + C e^{-\lambda_3 t} \quad (2.21)$$

Burada, N_{10} , N_{20} ve N_{30} radyoaktif çekirdeklerin başlangıç değerleridir, C ise denklem 2.18'in çözümünden gelen bir integral sabitidir ve denklem 2.22'deki gibi elde edilir.

$$C = N_{30} - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \left(\frac{1}{\lambda_3 - \lambda_1} - \frac{1}{\lambda_3 - \lambda_2} \right) - \frac{\lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_2} N_{20} \quad (2.22)$$

Özel bir durum olarak 3 numaralı çekirdeğin kararlı olduğu düşünülürse, yani



$$dN_3 = \lambda_2 \cdot N_2 \cdot dt \quad (2.23)$$

şeklini alır. Denklem 2.23 çözüldüğünde, t anındaki ana çekirdek ve ürün çekirdeklerin sayısı aşağıdaki gibi bulunur.

$$N_3(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} e^{-\lambda_1 t} + N_{20}(1 - e^{-\lambda_2 t}) + N_{10} + N_{30} \quad (2.24)$$

Eğer ana çekirdeğin yarı ömrü, ürün çekirdekleri yarı ömrüne göre çok uzun ise radyonüklitler arasında kalıcı denge oluşur. $\lambda_2 \gg \lambda_1$ olduğundan dolayı, $\lambda_2 - \lambda_1 \cong \lambda_2$ ve $e^{-\lambda_1 t} \cong 1$ olur. Bu durumda:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{10}(1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.24)$$

$t \gg \frac{1}{\lambda_2}$ olduğundan $e^{-\lambda_2 t}$ sifira yaklaşır.

$$N_2 = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) N_{10} \text{ ana çekirdeğin yarı ömrü çok uzun olduğundan dolayı } N_{10} = N_1$$

yaklaşımı söz konusu olur. O halde,

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \quad (2.25)$$

elde edilir. Bir radyoaktif seride ana çekirdeğin yarı ömrü, ürünlerinin yarı ömrüne kıyasla çok uzun ise belli bir süre sonra seri radyoaktif dengeye ulaşır. Seri

radioaktif dengede ise, bozunma ile oluşan ürün çekirdek miktarı ile yine bu ürün çekirdeğin bozunumuyla kaybolan çekirdek sayısı eşitlenir.

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_n N_n \quad (2.26)$$

Seri dengede iken, ana çekirdeğin aktivitesi herhangi bir ürünün aktivitesinin belirlenmesi ile tayin edilebilir [19,20].

2.4. Yarı-Ömür ($t_{1/2}$)

Bir radioaktif maddenin bozularak, çekirdek sayısının yarıya inmesi için geçen zamana yarılanma süresi veya yarı-ömür denir. Bu yarı-ömre aynı zamanda fiziksel yarı-ömür de denir [1]. Başlangıçtaki radioaktif çekirdek sayısı N_0 olsun, yarıya indiği süreyi bulmak için denklem 2.12 kullanıldığında:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda t_{1/2}} \quad (2.27)$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (2.28)$$

yarı-ömür elde edilir.

2.5. Ortalama Ömür (τ)

Ortalama ömür bozunma sabitinin tersine eşit olup, radyoizotopun ortalama olarak ne kadar süre aktif kalacağını gösterir [1].

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{t_{1/2}}{0.693} = 1.44 * t_{1/2} \quad (2.29)$$

ile ifade edilir.

2.6. Biyolojik Yarı-Ömür (t_B)

Solunum veya sindirim yoluyla veya enjeksiyonla bir canlıya verilmiş radyoaktif maddenin biyolojik olaylarla yarısının canlının doku ve organlarından atılması için geçen süreye biyolojik yarı-ömür denir [1].

2.7. Etkin Yarı-Ömür (t_{etkin})

Radyoaktif maddenin vücutta etkili olduğu süreye etkin yarı-ömür denir. Etkin yarı-ömür fiziksel yarı-ömür ve biyolojik yarı-ömür arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir [1,18].

$$\frac{1}{t_{etkin}} = \frac{1}{t_{1/2}} + \frac{1}{t_B} \quad (2.30)$$

2.8. Radyoaktivite ve Radyasyon Doz Birimleri

2.8.1. Aktivite birimi

Çok uzun yarı-ömürlü bir radyoaktif madde olan Radium standart alınarak, bu çekirdeğin birim zamanda bozunan (parçalanan) miktarı radyoaktivite birimi olan Curie (Ci) olarak tanımlanmıştır. SI birim sisteminde, aktivite birimi Becquerel (Bq) olup, 1 Bq, saniyede bir parçalanmayı ifade eder. Ci ve Bq arasında dönüşüm katsayıları aşağıdaki gibidir [1,15,18].

$$1\text{Bq} = 1 \text{ bozunma / s} \quad (2.31)$$

$$1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq} \quad (2.32)$$

$$1\text{Bq} = 2,703 \times 10^{-11} \text{ Ci} \quad (2.33)$$

2.8.2. Soğurulma (Absorblanma) doz birimi

SI birim sisteminde soğurulma doz birimi olarak Gray (Gy) tanımlanmış ve 1 Gy ışınlanan maddenin 1 kg'ına 1 joule'lük enerji veren herhangi bir radyasyon dozudur. Eski birim rad olup, 1 rad 1 gram materyalde absorbe edilen 100 erglik enerji soğurumuna eşittir [1,15,18].

$$1\text{rad} = 10^{-2}\text{Gy} \quad (2.34)$$

2.8.3. Işınlama doz birimi

X veya γ ışınlarının havayı iyonlaştırmalarının bir ölçüsüdür. Işınlama birimi Röntgen, normal hava şartlarında (0 °C ve 760 mmHg basıncı) havanın 1 kg'ında $2,58 \times 10^{-4}$ Coulomb'luk elektrik yükü değerinde + ve – iyonlar oluşturan X ve γ radyasyon miktarı olarak tanımlanır. Röntgen sadece ışınlama birimi olup, ne demetteki foton sayısını ne de enerjisini verir. Işınlamaya uğrayan bir maddedeki soğurma dozunu ifade etmez. SI biriminde ışınlama birimi olarak “Coulomb/kg” kullanılmaktadır [1,15,18].

$$1\text{R} = 2,58 \times 10^{-4}\text{C} / \text{kg} \quad (2.35)$$

$$1\text{C} / \text{kg} = 3,876 \times 10^3 \text{R} \quad (2.36)$$

şeklinde ifade edilir.

2.8.4. Eşdeğer doz birimi

Soğrulan dozun oluşturduğu zararlı iyonlaştırıcı radyasyonların biyolojik etkilerinin bir ölçüsü olmalı ve buna bağlı bazı faktörleri kapsamalıdır. Eşdeğer doz birimi, biyolojik etkiyi hesaba katacak bir faktörle soğrulan doz çarpılarak elde edilir ki; bu faktöre kalite faktörü denir. SI birim sisteminde doz eşdeğer birimi joule / kg olup bunun özel adı Sievert (Sv) dir. Eski birimi ise Rem dir. İyonizasyon etkisi arttıkça kalite faktörü artar. Kalite faktörü X, γ ve β ışınları için 1 iken, düşük enerjili

nötronlar için 3, yüksek enerjili nötronlar için 10, ağır çekirdekler ve α için 20'dir [1,15,18].

$$\text{Eşdeğer doz birimi} = \text{Kalite faktörü} * \text{Soğrulan doz} \quad (2.37)$$

$$1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv} \quad (2.38)$$

şeklindedir.

Tablo 2.1'de radyasyon birimleri ve aralarındaki dönüşüm katsayıları görülmektedir.

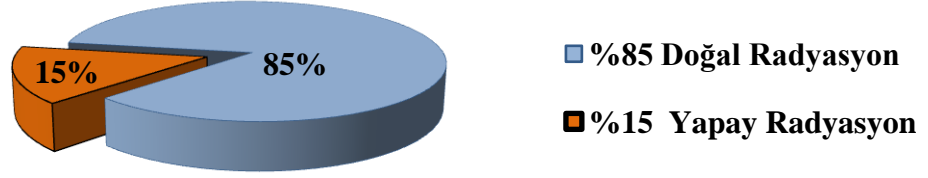
Tablo 2.1: Radyasyon Birimleri ve Dönüşüm Faktörleri.

Radyasyon Birimleri	Özel Birim	SI Birimi	Dönüşüm
Aktivite	Ci	Bq s ⁻¹	1Bq = 2.703 x 10 ⁻¹¹ Ci 1 Ci = 3.7 x 10 ¹⁰ Bq
Soğurulma	Rad	Gy (J / kg)	1 Gy = 100 rad 1 rad = 10 ⁻² Gy
Işınlanma	R	C / kg	1 C / kg = 3.876 x 10 ³ R 1 R = 2.58 x 10 ⁻⁴ C / kg
Doz Eşdeğeri	Rem	Sv (J / kg)	1Sv = 100 rem 1 rem = 10 ⁻² Sv

2.9. Doğal Radyasyon Kaynakları

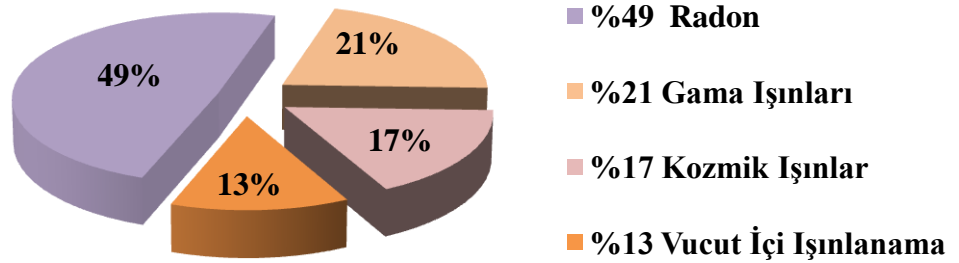
Çevredeki doğal ortam insanın maruz kaldığı en büyük radyasyon kaynaklarını içermektedir. Dünyanın oluşumuyla birlikte tabiatta yerini alan çok uzun ömürlü (milyarlarca yıl) radyoaktif elementler yaşadığımız çevrede, normal ve kaçınılmaz olarak kabul edilen doğal bir radyasyon düzeyi oluşturmuşlardır [21]. İnsanlar, dış uzay ve güneşten gelen kozmik ışınlar, yer kabuğunda bulunan radyoizotoplar, toprak ve yapı malzemeleri, su ve gıdalar gibi doğal kaynaklardan ışınlanmaktadır. Bunların yanı sıra enerji üretimi, tıp, endüstri, araştırma, tarım, hayvancılık gibi pek çok alanda kullanımı kaçınılmaz olan yapay kaynaklar nedeni ile doz almaktadır. Yeryüzündeki tüm canlılar ve cansızlar doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından, dış ve iç ışınlanma yoluyla her an radyasyona maruz kalmaktadır. Gama ve betalar dış ışınlamalarla, alfalar ise iç ışınlamalarla daha çok zarar verirler. Maruz kalınan radyasyonun büyük bir kısmı doğal kaynaklıdır [1,3,15]. Şekil 2.10'de Dünya

genelinde doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından alınan dozların oranları verilmiştir.



Şekil 2.10: Dünya Genelinde Doğal ve Yapay Radyasyon Kaynaklarından Alınan Dozların Oranları [22].

Doğal radyasyondan kaynaklanan ışınlanma, Uzaydan dünya atmosferine gelen yüksek enerjili kozmik ışınlar ve yer kabuğunda bulunan doğal radyoaktif izotoplardan olmak üzere iki ana nedenden kaynaklanır. İnsanların aldıkları dış radyasyon dozları dünyanın her yerinde aynı değildir. Şekil 2.11’de dünya genelinde doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri verilmiştir.



Şekil 2.11: Dünya Genelinde Doğal Radyasyon Kaynaklarından Maruz Kalınan Radyasyon Dozlarının Oransal Değerleri [22].

Toprak ve kayalarda yüksek konsantrasyonlarda bulunan ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K gibi radyonüklitler, kozmik ışınların atmosferdeki reaksiyonları sonucu üretilen yüksek enerjili nötronlar, protonlar, elektronlar ve müonlar ve yapı malzemelerinden çıkan gama ışınları dış radyasyon kaynaklarını oluşturmaktadırlar. Atmosferde bulunan toz ve partiküllerdeki doğal radyoizotoplar ve yapı malzemelerinden çıkan ^{222}Rn ve ^{220}Rn gibi radyoaktif gazlar, sindirim ve solunum yoluyla vücuda alındıklarında iç ışınlamalara sebep oldukları için bunlar aynı zamanda iç radyasyon kaynakları olarak da bilinirler [3,15,23].

2.9.1. Kozmik ışınlar

Kaynağı toprak dışında olan ve devamlı yer kabuğu üzerine yağan radyasyondur. Dünyamız uzaydan gelen yüksek enerjili parçacıklarla sürekli olarak bombardıman edilmektedir. Kozmik ışınların varlığı 1910 yılında, kullanılan kurşun zırhlara rağmen radyasyon sayıcılarında oluşumu önlenemeyen iyonizasyon sonucu fark edilmiştir. Kozmik ışınların kaynağının güneş ve uzaydaki belirsiz sayıdaki yıldızlar olduğu düşünülür. Güneş patlamalarından sonra kozmik akıda görülen artış, ışık akısında güneş kaynaklı kozmik ışınların büyük payı olduğunu kanıtlar. Kozmik ışınlar ikiye ayrılır [15,23].

a) Birincil kozmik ışınlar :

Dünyanın atmosferi, litosferi ve hidrosferini oluşturan maddelerle etkileşime girmeyen ışınlar 'birincil kozmik ışınlar' denir. Bunların %85'i proton ve %12'sini helyum iyonları, %2'sini elektronlar, geri kalanını ise ağır parçacıklar oluşturmaktadır. Atmosferin üst tabakalarına ulaşan kozmik radyasyonun yoğunluğu dünyanın manyetik alanının etkisiyle azalmaktadır. Böylece en fazla ışın yoğunluğu ve doz hızı jeomanyetik kutuplarda, en düşük ışın yoğunluğu ve doz hızı ise ekvator bölgesinde ortaya çıkmaktadır. Başka bir deyişle, dünyanın manyetik alanı kozmik radyasyona karşı kısmen bir kalkan görevi yapmaktadır [15,23].

b) İkincil kozmik ışınlar :

Atmosferdeki yüksek enerjili parçacıklar, havayı oluşturan atom ve moleküller (oksijen, Azot) ile etkileşerek proton, nötron, pion, muon, foton ve düşük atom numaralı çekirdekler olmak üzere yüklü ve yüksüz ikincil parçacıkların meydana gelmesine sebep olurlar. Bunlara 'ikincil kozmik ışınlar' denir.

Başlangıçtaki parçacık, çok sayıda başka parçacık oluşturur. Yaklaşık olarak dokuz muon kütlesi bir proton kütlesine eşittir. Muonlar yüksek enerjileri ve küçük kütleleriyle madde içine girmede avantaja sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı derin maden ocaklarında ya da 10cm kalınlığındaki kurşun zırh içindeki radyasyon

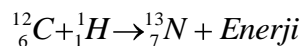
sayıcılarında sayılabilmektedir. Kozmik ışınların bir bölümü ise yer yüzeyine kadar devam eden atmosfer kalınlığı içinde absorbe edilir ve yer yüzeyine varamaz. Deniz seviyesinde kozmik radyasyon sebepli doz eşdeğerinin %70'i muonlar, %15'i elektron ve fotonlar, %10'u nötronlar ve %1-2'si proton ve yüklü pionlardan kaynaklanmaktadır. Uçakların uçuş yüksekliğinde nötronlar, elektronlar, fotonlar, pozitronlar ve protonlar, daha yükseklerde ise ağır çekirdekler bulunmaktadır [15,23].

2.9.2. Topraktaki doğal radyoaktivite

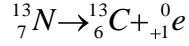
Toprakta yüksek konsantrasyonda bulunan ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K gibi doğal radyoizotoplar ve bunların bozunma ürünleri toprağın radyoaktif olmasına sebep olmaktadır. ^{238}U , ^{232}Th birer radyoaktif seri oluşturan radyonüklitlerdir. Bu seriler içinde oluşturulan radyonüklitlerin çoğu kısa ömürlü olduklarından ve sürekli oluşturduklarından çevrede her zaman bulunabilirler. ^{40}K canlı ve cansız maddelerde yaygın ve bol miktarda bulunur. Doğal radyoizotoplar daha çok volkanik, fosfat, granit ve tuz kayalarında yüksek konsantrasyonlarda bulunurlar. Bu kayalar doğa şartlarına bağlı olarak zamanla ufalanarak çok küçük parçalar halinde yağmur veya akıntı sularıyla toprağa karışırlar. Böylece toprağın doğal radyoaktivitesini artırırılar. Dünyanın jeolojik yapısı incelendiğinde belli kalınlıktaki toprak tabakasının hemen altında kaya yataklarının olduğu görülür. Bu kaya yataklarının da radyoaktiviteye sebep olduğu tahmin edilmektedir. Karasal radyonüklitler çevresel ortamlarda homojen bir dağılım göstermez [3,15,23].

2.10. Yapay Radyoaktiflik

Eğer kararlı bir çekirdek bazı taneciklerle bombardıman edilirse yapay radyoaktiflik meydana gelir. Bombardımanı yapan taneciklerin enerjisi yeteri kadar büyükse çekirdek bunlarla birleşerek yeni bir çekirdek oluşturur. Eğer bu yeni oluşan çekirdek kararsızsa radyoaktif bozunmaya uğrar. Örneğin, ^{12}C çekirdeği enerjisi arttırılmış protonlarla bombardıman edilirse radyoaktif hale gelir.



Yeni oluşan $^{13}_7N$ çekirdeği radyoaktiftir ve radyoaktif bozunmaya uğrayacaktır.

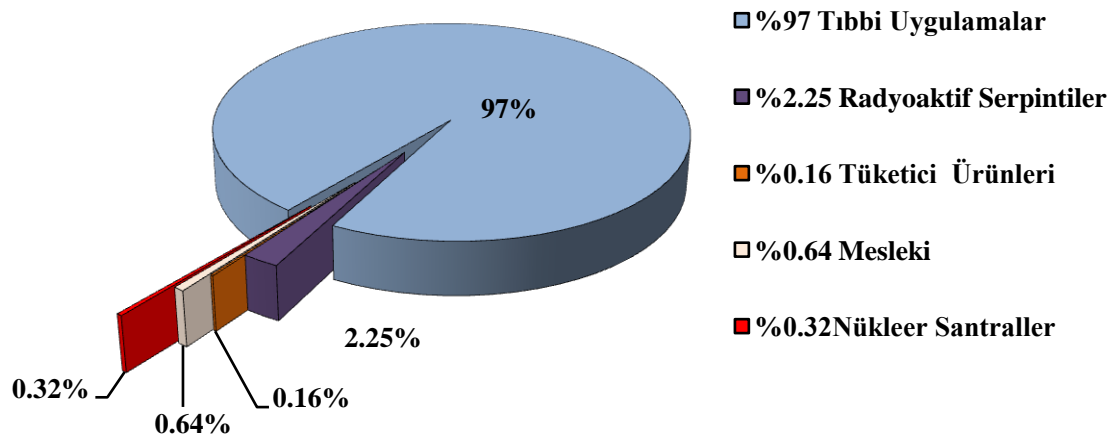


Çekirdek tepkimeleri ile tabiatta bulunmayan elementlerin izotopları sentezlenebilir.

2.10.1. Yapay radyasyon kaynakları

Yapay radyasyon kaynakları da tıpkı doğal radyasyon kaynakları gibi belli miktarlarda radyasyon dozuna maruz kalınmasına neden olurlar. Bu doz miktarı, doğal kaynaklardan alınan doza göre çok daha düşüktür.

Tıbbi, zirai ve endüstriyel amaçla kullanılan X ışınları ve yapay radyoaktif maddeler, Atmosferde ve yeraltında yapılan nükleer silah denemeleri, nükleer silah üretimi, nükleer güç üretimi, nükleer yakıt çevrimi, radyoizotop üretimi ve kullanımı ile nükleer kazalardan çevreye verilen radyonüklitler çevre radyoaktivite seviyesinde artışa neden olan yapay radyasyon kaynaklarıdır [24]. Şekil 2.12’te yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozunun oransal değerleri verilmiştir.



Şekil 2.12: Yapay Radyasyon Kaynaklarından Maruz Kalınan Küresel Radyasyon Dozunun Oransal Değerleri [24].

BÖLÜM 3. GAMA SPEKTROSKOPİ SİSTEMİ

Gama spektroskopisi sistemi, gama ışın radyasyonları yayınlayan radyonüklitlerin aktivite seviyelerini belirleyebilmemiz için, bu radyonüklitlerden yayımlanan gama ışınlarını enerjilerine bağlı olarak sayan bir sistemdir. Gama ışını, sistemin en önemli parçası olan dedektör kristali ile etkileşmeye girerek, enerjisine bağlı olarak bir sinyal oluştuğundan, bu bölümde ilk olarak gama ışınının madde ile etkileşmesi ele alınacaktır.

3.1. Gama Işınının Madde İle Etkileşimi

1 keV'den daha enerjili gama ışınlarının tespitinde, gama ışınları ile dedektördeki madde arasındaki enerji değişimi ve enerji kaybı gibi işlevler kullanılır. Pek çok durumda gama ışınlarından yüklü parçacıklara iletilen şey kinetik enerjidir ve gelen gama ışınının tayfsal özelliklerini öğrenmemiz için ölçülür. Gama ışınının madde ile etkileşmesinde üç önemli mekanizma vardır [25]:

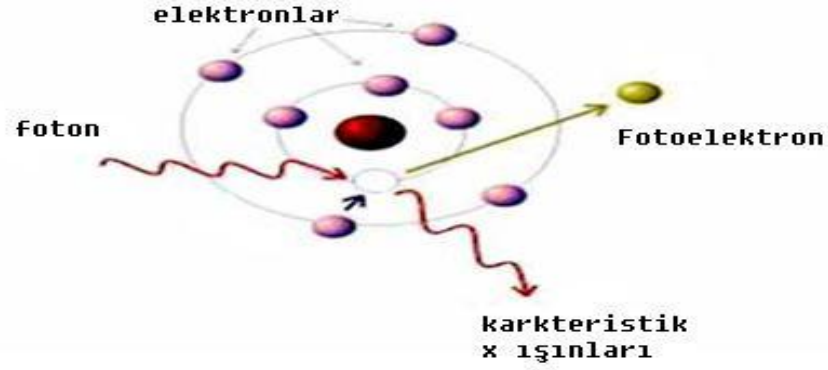
- 1) Fotoelektrik Olay
- 2) Compton Saçılması
- 3) Çift Oluşumu

3.1.1. Fotoelektrik olay

Fotoelektrik soğurma, dedektör kristalinin yüzeyi ile gelen gama ışınlarının etkileşmesi sonucu olur. Foton etkileşime girdiği maddenin iç yörüngelerinden bir elektronu atom dışına fırlatırken kendi enerjisinin tamamını kaybeder, fakat bu enerji tamamen elektronlara kinetik enerji olarak aktarılmaz. Bir kısmı dışarıya atılan elektronu uyarmak için kullanılır. Bu elektronlara fotoelektron denir. Fotoelektronların kinetik enerjisi T_e , gelen gama ışınının enerjisi E_γ (hv), elektronu

uyarmak için gerekli olan enerji E_b ise fotoelektrona aktarılan kinetik enerjiyi şöyle hesaplayabiliriz [19,25].

$$T_e = E_\gamma - E_b \quad (3.1)$$



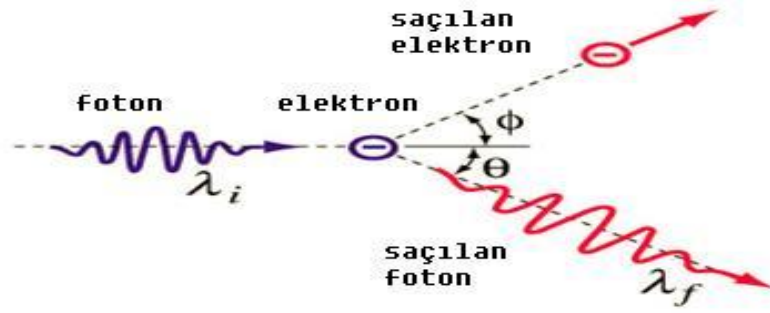
Şekil 3.1: Fotoelektrik Olay [18].

Gelen fotonun enerjisi arttıkça bu olayın olma olasılığı azalır ve soğurucu atomun atom numarası arttıkça olma olasılığı artar.

3.1.2. Compton saçılması

Gelen foton, maddenin zayıf bağlı veya serbest elektronları ile etkileşir. Elektronlar ile elastik saçılma yaparak enerjisinin ve momentumunun bir kısmını elektronlara aktarır ve düşük enerjili başka bir foton olarak yoluna devam eder. Gama ışını, enerjisinin düşüşüyle beraber bir açıyla saçılabilir ve bu saçılmayla ortaya çıkan enerji kaybı, elektronlara kinetik enerji olarak geçer. Gelen gama ışını bir veya daha fazla Compton saçılmasına uğrayabilir. Enerjisi düştükçe fotoelektrik soğrulma olasılığı artar. Bundan dolayı gama ışını enerjisinin sadece bir kısmını veya saçılmayı takip eden fotoelektrik soğrulmayla tamamını da kristalde kaybedebilir. Gelen fotonun enerjisi E_γ , çıkan fotonun enerjisi E'_γ , ise elektronlara aktarılan kinetik enerjiyi şöyle hesaplayabiliriz [19,25].

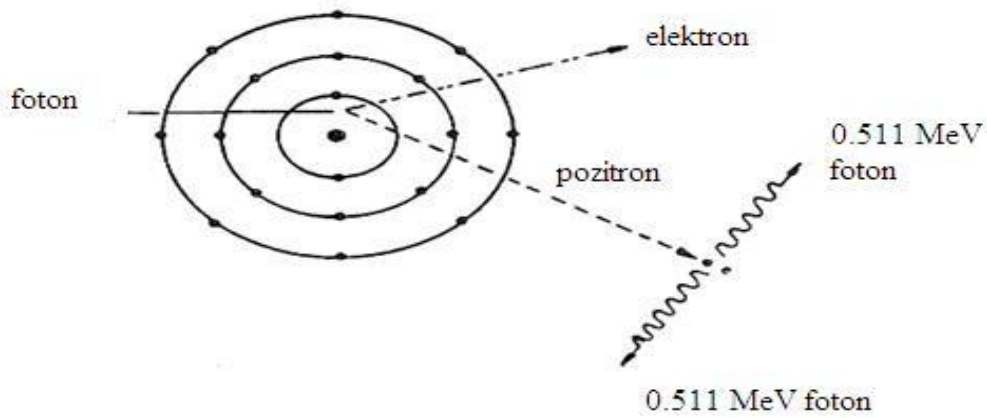
$$T_e = E_\gamma - E'_\gamma = \frac{E_\gamma^2(1 - \cos\theta)}{mc^2 + E_\gamma(1 - \cos\theta)} \quad (3.2)$$



Şekil 3.2: Compton Saçılması [18].

3.1.3. Çift oluşum

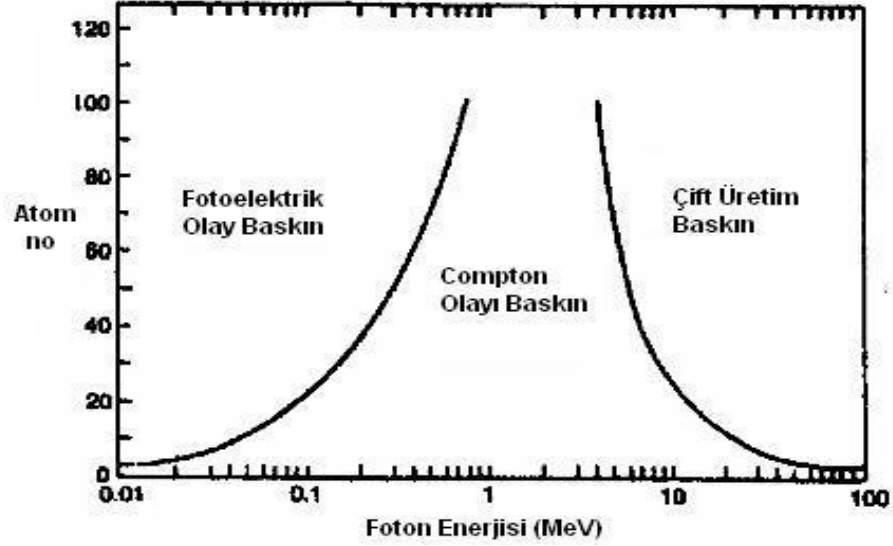
Gelen foton atom çekirdeğine çarpar ve bir elektron pozitron çifti oluşturur. Kalan enerjisini maddeye verir ve kaybolur. Bir elektron veya pozitronun durgun kütle enerjisi 0.511 MeV'dir. Bu nedenle çift oluşumun enerjisi 1.022 MeV' den büyük fotonların madde ile etkileşmesi sonucu gerçekleşir. Oluşan elektronlar serbest elektronlar gibi diğer atomlar ile etkileşir. Pozitron ise ortamdaki başka bir elektronu yakalayarak, 0.511 MeV' lik birbirine zıt iki yönde gama ışını yayınlırlar. Gama ışınlarına "yok olma radyasyonu" denir. Bu yolla oluşan gamalar fotoelektrik olay ile soğrulabilirler. Gelen foton enerjisi 5 MeV' den fazla ise çift oluşum fotoelektrik ve compton saçılmasına oranla daha baskındır [19,25].



Şekil 3.3: Çift oluşum [18].

Şekil 3.4'te de görüldüğü gibi düşük enerjili fotonlar, daha büyük olasılıkla fotoelektrik olay ile soğrulurlar. Gama ışınlarının enerjisi arttıkça fotonun soğrulma

olasılığı azalır ve compton saçılması daha baskın olur. 5 MeV üzerindeki enerjilerde ise çift oluşum baskındır.

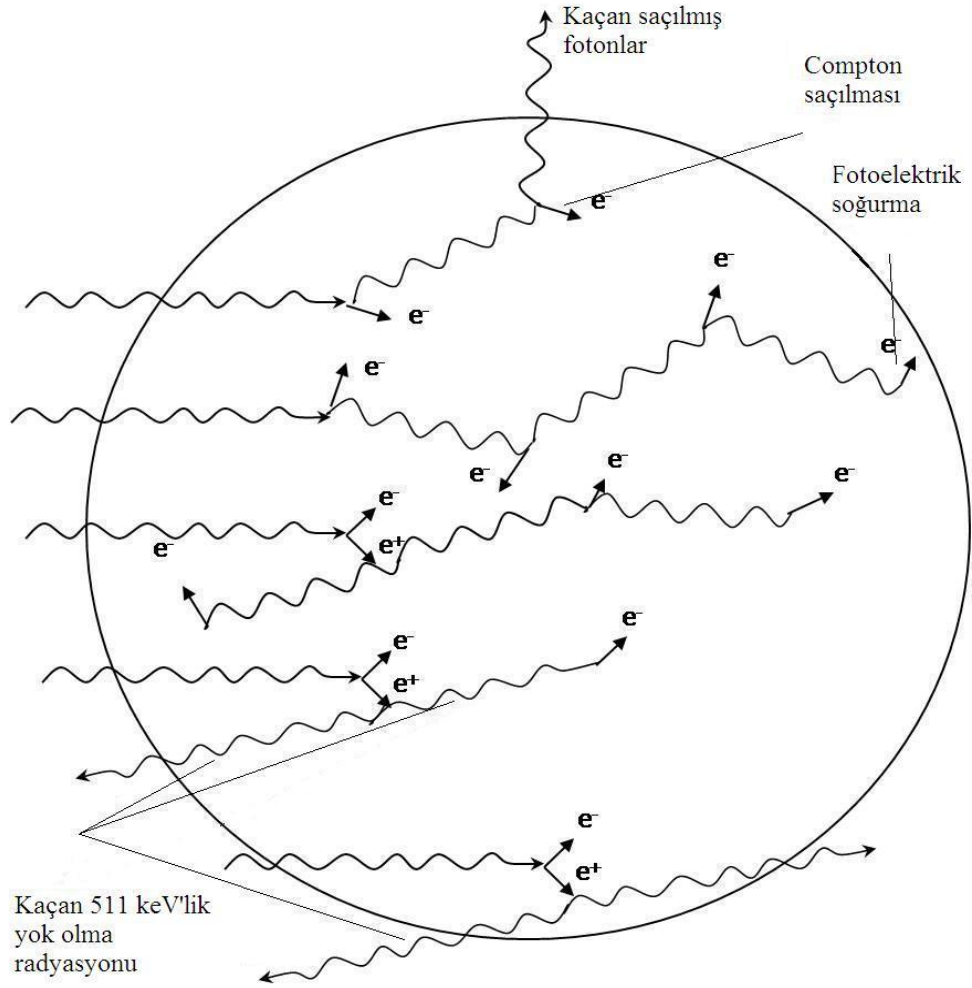


Şekil 3.4: Gama ışını etkileşimi ve bunların baskın olduğu bölgeler [19].

Dedektöre giren foton, Şekil 3.5’te gösterildiği gibi, dedektör kristali ile aşağıdaki gibi etkileşebilir [25].

- Birkaç kez Compton saçılması yapar ve enerjisinin tamamını kaybetmeden dedektörü terk edebilir,
- Fotoelektrik soğurma yoluyla enerjisini direk dedektöre aktarabilir,
- Birkaç Compton saçılmasından sonra fotoelektrik soğurma yapar ve enerjisinin tümünü kaybedebilir,
- Çift üretim ile bir elektron pozitron çifti üretilir, oluşan pozitron bir elektron ile yok olur ve iki foton üretilir. Oluşan iki foton da, enerjilerini fotoelektrik soğurum ile dedektöre aktarabilir,
- Çift yokolma fotonlarından biri dedektörü terk edebilir,

- Çift yokolma fotonlarından her ikisi de dedektörü terk edebilir,



Şekil 3.5: Gama Işınının Maddeyle etkileşimi [19].

3.2. Gama Işını Dedektörleri

Nükleer radyasyonu belirlemek için kullanılan tüm dedektörler benzer çalışma prensiplerine sahiptirler. Radyasyon dedektöre girer, dedektör materyalinin atomlarıyla etkileşir, enerjisinin bir kısmını veya tamamını dedektör atomlarına aktararak kaybeder ve atom yörüngelerinden daha düşük enerjili elektronların salınmasına neden olur. Bu elektronlar, uygulanan bir yüksek voltajın oluşturduğu elektrik alan yardımıyla toplanır ve analiz edilmek için elektronik devre tarafından ya akım pulsu yada voltaj şekline dönüştürülür. Dedektör materyalinin seçimi ölçülecek radyasyonun tipine bağlıdır. Gama ışınlarının ölçümünde yaygın olarak kullanılan dedektörler şöyledir;

1) Sintilasyon Dedektörleri

2) Yarıiletken Dedektörler

Bu dedektörlerin çalışması, gama ışınlarının, kullanılan dedektör materyali içinde iyonlaşarak enerji kaybetmesi gerçeğine dayanır [19,25].

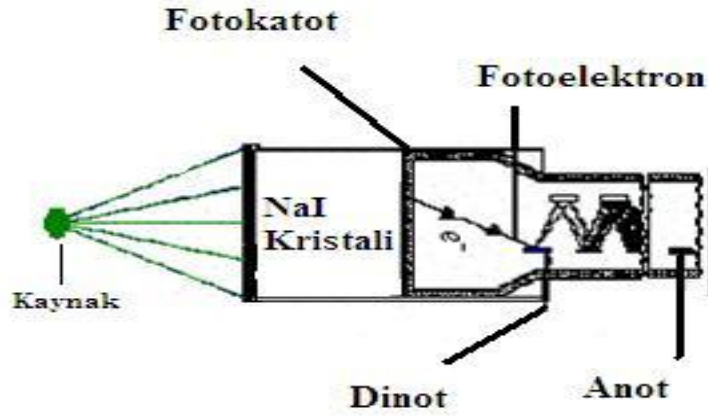
3.2.1. Sintilasyon dedektörleri

Gama ışınlarının algılanması için popüler bir yöntem olan kristal sintilatörler kullanılmaktadır. Genel anlamda sintilatörler, yüksek enerjili yüklü parçacıklar ona çarptığında, düşük enerjili, (yani gözle görülebilir dalgaboylarında) fotonlar yayınlayan kristallerdir.

Sintilasyon dedektörü kristaline gelen gama ışınları, atomları uyarılmış düzeye çıkaran çok sayıda etkileşme yapar. Uyarılmış durumlar hızla, görünür dalga boyunda veya görünür dalga boyuna yakın ışık yayınlar. Işık, foto duyarlı yüzeye (fotokatoda) çarparak fotoelektrik olay yolu ile foton başına bir fotoelektron salınmasına neden olur. Bu ikincil elektronlar fotoçoğaltıcı tüpte çoğaltılır, hızlandırılır ve çıkış pulsları haline dönüştürülür [19].

Fotoelektronlar, elektrik alan sayesinde Dinot (dynode) adı verilen metal bir plakaya doğru hızlandırılır. Dinot'a çarpan elektronlar, birçok yeni elektronun serbest bırakılmasını sağlarlar. İlk dinottan fırlatılan elektronlar, elektrik alan sayesinde ikinci dinota hareket eder ve bu böylece devam eder. Her dinot, bir öncekinden daha yüksek potansiyeldedir. Ortalama olarak bir fotoçoğaltıcı tüpte 10- 12 dinot bulunur. Yani elektronlar, 10- 12 kez bir dinottan diğerine hareket eder. Elektronlar, dinotlara her çarpışta çoğaltılır ve hızlandırılır. Son dinottaki yük miktarı, tübe giren foton sayısı ile orantılıdır. Foton sayısı ile kristale gelen gama ışınlarının sayısı da orantılı olduğundan dolayı, çıkış voltajı direk olarak gelen gama ışını ile orantılıdır [19,25].

Sintilatörler organik ve inorganik olabilirler. Ölçme amacına uygun olarak farklı sintilatörler kullanılır. Alfalar için gümüşle aktive edilmiş ZnS kristali, Betalar için naftalin, stilben olabileceği gibi en fazla antresen, gamalar için inorganik madde olan NaI veya CsI kristalleridir [26]. Foton yayınlanma olasılığını arttırmak ve ışığın soğrulmasını azaltmak için aktivatör konur. En çok kullanılan aktivatörde Tl ve Na'dur. Aktivatörler yeni enerji durumları oluştururlar ve aktivatör durumları arasında ışık yayınımları olur. Genellikle gamalar için, NaI(Tl) yani talyum aktifleyici ile sodyum iyodid kristali kullanılmaktadır [19]. Şekil 3.6'da NaI sintilasyon dedektör şeması verilmiştir.



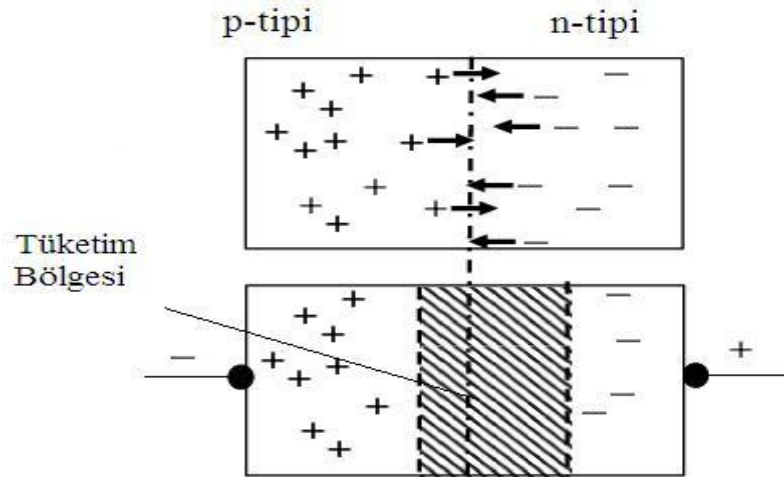
Şekil 3.6: NaI Sintilasyon Dedektör Şeması.

3.2.2. Yarı iletken dedektörler (HPGe Detektörler)

Yarı iletken dedektörler, yük taşıyıcılarına göre ikiye ayrılır. Yük taşıyıcıları elektron olan iletkenler n tipi, yük taşıyıcıları boşluklar (deşikler) ise p tipi yarı iletken denir. Bir yalıtkanda yasak enerji aralığı 5 eV iken bir yarı iletkende 1 eV'tur. Az sayıda elektron değerlik bandında boşluk bırakarak iletim bandına geçer. Bu boşluklar komşu elektronlar ile doldurulur. Yeni bir boşluk oluşur böylece boşluklar kristal içinde hareket ediyor görünür. Yarı iletkende iletimi kontrol etmek için az miktarda katkı ilave edilir. Bu katkı üç veya beş değerliklidir. Katkı beş değerlikliyse, dört elektron kovalent bağ yapar, beşinci elektron örgü içinde hareket eder. Bu n tipi yarı iletkenidir. Katkı üç değerlikliyse, üç elektron kovalent bağ yapar ve bir boşluk kalır. Bunada p tipi yarıiletken denir.

p-tipi ve n-tipi materyallerin birbiriyle temas ettirilmesi halinde, n-tipi materyalden çıkan elektronlar p-tipi materyale eklem boyunca yayılırlar ve buradaki boşluklarla birleşirler. Yük taşıyıcılarının nötr hale geldikleri bölgeye “tükenme bölgesi” denir. Radyasyon, tükenme bölgesine girer ve burada elektron-boşluk çiftleri oluşturur. Uygulanan voltaj, bu elektron-boşluk çiftlerinin sürüklenmesine neden olur. Elektronlar bir yönde hareket ederken, boşluklar diğer yönde hareket eder ve biriken elektronların toplam sayısı, sayıcı ile sayılabilen bir elektronik puls oluşturur. Bu puls’un genliği radyasyonun enerjisiyle orantılıdır. Yarıiletken dedektörlerin en yaygın kullanılanları, Ge(Li), Si(Li) dedektörleridir [19,25].

Dedektör veriminin yüksek olması için, derin tükenme bölgesi gerekir. Derin tükenme bölgesi elde etmek için de oldukça saf madde kullanılmalıdır. Çok saf germanyum (Hyper-pure Germanium) dedektörleri buna güzel bir örnektir. Bu türde safsızlık az, direnç yüksek dolayısıyla çözme gücü çok yüksektir. Diğer bir avantajı da saf germanyum dedektörlerinin besleme gerilimi uygulanmadığı zaman oda sıcaklığında tutulabilir olmasıdır. Dezavantajları ise çalışırken sıvı azot sıcaklığında tutma gereği ve düşük verime sahip olmasıdır.



Şekil 3.7: Yarı İletken Dedektör Şeması [25].

3.3. Dedektör Seçimi

Gama ışınları yüksüz olduğundan kendileri iyonizasyon yapmazlar. Ölçülebilmeleri için enerjilerinin bir kısmını veya tamamını madde ile etkileşerek elektronlara

aktarmalıdır fakat hiçbir etkileşmeye girmeden maddeyi geçebilirler bu nedenle dedekte edilmeleri zordur. Dedektör seçiminde dedektör verimi, enerji-zaman çözme gücü gibi özelliklere dikkat edilir. Gama Işın aktivitelerinin belirlenmesi için en çok kullanılanlar Ge ve NaI dedektörleridir.

NaI, Ge'dan daha yüksek atom numarasına sahip olduğundan foton soğrulma olasılığı bu dedektörde fazladır ve bu nedenle verimi de daha yüksektir, daha ucuzdur ve çalışma şartları daha basittir. NaI için soğutma gerekli değildir, fakat nem çekicidir bu nedenle de kapalı tutulmalıdır. Günümüzde, nükleer spektroskopi daha karmaşık bozunmalar ile çalışmak durumunda olduğundan, çözme gücü kritik bir öneme sahip olmaktadır. Ge dedektörünün enerji çözme gücü NaI dedektörüne kıyasla çok fazladır. Bu özellik reaksiyon sonucu ölçülen gama spektrumları için çok önemlidir [3,25].



Şekil 3.8: Kocaeli Üniversitesi Fizik Bölümü, Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarında bulunan HPGe Gama Işın dedektörü.

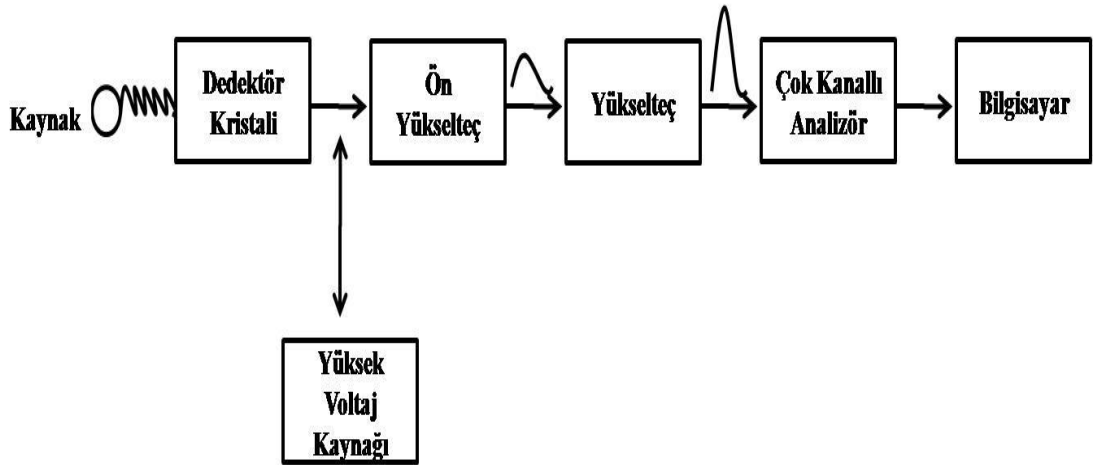
Deneyimizde gama ışın aktivitelerini ölçmek için kullandığımız HpGe gama dedektörü özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Dedektör özellikleri.

Dedektör Modeli	ORTEC GEM25P4-10
Çözünürlük (FWHM)	1.71 (1.33 MeV, ⁶⁰ Co için)
Çözünürlük (FWHM)	0.65 (122 keV, ⁵⁷ Co için)
Pik / Compton Oranı	58 / 1(⁶⁰ Co için)
Bağlı Verim	25.2 (1.33MeV, ⁶⁰ Co için)
Dedektör Çapı	57.7 mm
Kurşun Kalınlığı	10 cm
Kalay Kalınlığı	1 mm
Bakır Kalınlığı	1.5 mm

3.4. Gama Spektroskopi Sisteminin Elektroniği

Kaynaktan yayınlanan radyasyonların enerji ölçümlerinde kullanılan elektronik düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.9’da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.9: Kaynaktan Yayınlanan Radyasyonların Enerji Ölçümlerinde Kullanılan Elektronik Düzeneğinin Şematik Gösterimi.

Dedektör kristali gelen radyasyonu algılar ve yüksek voltaj kaynağı, kristale gelen radyasyonun oluşturduğu yükleri toplar ve bu sayede bir elektrik pulsu oluşturur. Uygulanan yüksek voltaj ile dedektörde oluşturulan pulsun sinyal/gürültü oranı ön yükselteç ile artırılır. Uygun empedans değerli çıkış sağlayarak sinyalin yükseltece

zayıflamadan gitmesini sağlar. Yükseltece gelen puls genliği burada spektrumun analizi yapılabilecek kadar yükseltilir ve pulsun şeklini düzeltilir. Yükselteçten gelen her darbenin yüksekliği çok kanallı analizör MCA/ADC (analog to digital converter) ile dijital hale dönüştürölür ve genliği ile orantılı olarak bir hafıza kanalına yerleştirilir. Her kanal belirli enerjiye karşılık gelir ve sayım süresince gelen pulsların birikmesiyle spektrum oluşur. Her radyoaktif izotoptan farklı enerjide gama ışınları geldiğinden, radyoaktif izotopları karakterize eden piklerden oluşun bu spektrum ile radyoaktif materyallerin analizini gerçekleştirmek mümkündür. Çok kanallı analizörden elde edilen veriler bilgisayarda depolanır ve daha sonra bu verilerin çevrim dışı analizi yapılabilir.

BÖLÜM 4. DENEY VE HESAPLAMALAR

Tüm örneklerin aktivite seviyeleri gama spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir. Örnekler standartlarla aynı sayım geometrisini sağlamak için, aynı boyuttaki kaplarda, aynı hacim ve benzer yoğunlukta sayım alınmıştır.

4.1. Numune Hazırlama

Uluslararası atom enerjisi ajansından gönderilen yaklaşık 150 gramlık bir toprak numunesi ve yaklaşık 570 gramlık asitlendirilmiş (HNO_3) üç su numunesi içindeki radyonüklitlerin aktiviteleri gama spektroskopisi kullanılarak belirlenmiştir. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı'ndan (IAEA) gelen kodlamaya göre örneklerin ölçülen bürüt kütleleri Tablo (4.1)'de verilmiştir.

Tablo 4.1: IAEA'dan gelen toprak ve su numunelerinin ölçülen bürüt kütleleri.

Numune Kodu	Numune Tipi	Bürüt Kütle (g)
01	Karayosunu-Toprağı (Moss-Soil)	188.20
02	Asitlenmiş Su (Spiked water)	582.67
03	Asitlenmiş Su (Spiked water)	568.98
04	Asitlenmiş Su (Spiked water)	577.25

4.1.1. Karayosunu toprak numunesi

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansından (IAEA) gönderilen toprak örneği, Seiberdorf laboratuvarı elemanlarının katılımıyla Macaristan Tarım Bakanlığı tarafından Macaristan'ın kuzeybatısında 'Gerecse Dağı' bölgesinde bulunan altmışlı yıllardan beri terk edilmiş eski kırmızı mermer madeninden toplanmıştır. Düz ve geniş yüzeyli taşların üzeri, serpinti ile geçmiş kırk yıl süresince birikmiş yapay ve doğal radyonüklidlerin yanı sıra karayosunuyla da kaplanmıştır. Toplanan karayosunu toprağı, kaya yüzeyi ve canlı karayosunu arasında kalan hava şartları ile yıpranmış taşlar ve çürümüş parçaların bir karışımıdır.

400 kg'dan daha çok ham madde Seibersdorf laboratuvarının Reference material grubu işbirliğinde, Macaristan Tarım Bakanlığının radyoanalitik laboratuvarında 2005 ve 2006 yılında toplanmış ve işlem görmüştür. Materyaller bir silindir değirmende öğütülmüş ve 150 µm'den küçük eleme sistemiyle elenerek homojenleştirilmiştir. Homojenleştirilen numuneler test için kaplara konulmuştur ve Kocaeli Üniversitesi Nükleer Arştırma Laboratuvarına, içindeki radyonüklitlerin belirlenmesi için gönderilmiştir.

Toprak numunesinin, 9 Şubat 2010 tarihinde, orijinal kabı içerisinde 2 dakika boyunca çalkalanarak, homojen olması sağlandı. Uzunca bir süre bekledikten sonra kap açılarak, standart kaynakların bulunduğu kaplar ile özdeş bir kaba 170 cc'yi kaplayacak şekilde doldurularak, ağzı sıkıca kapatılıp para film ile izole edildi. ^{222}Rn ve ürünlerinin dengeye gelmesi için dört hafta süreyle bekletildi. 29 Mart 2010 tarihinde HpGe dedektörü ile 8 saatlik ve 24 saatlik sayımlar alındı. Spesifik aktivite sonuçlarının kuru toprak bazında ölçülmek istenmiş olduğundan, numune bir etüv içerisinde 50 °C sıcaklıkta 5 gün süreyle kurutuldu.

4.1.2. Su numuneleri

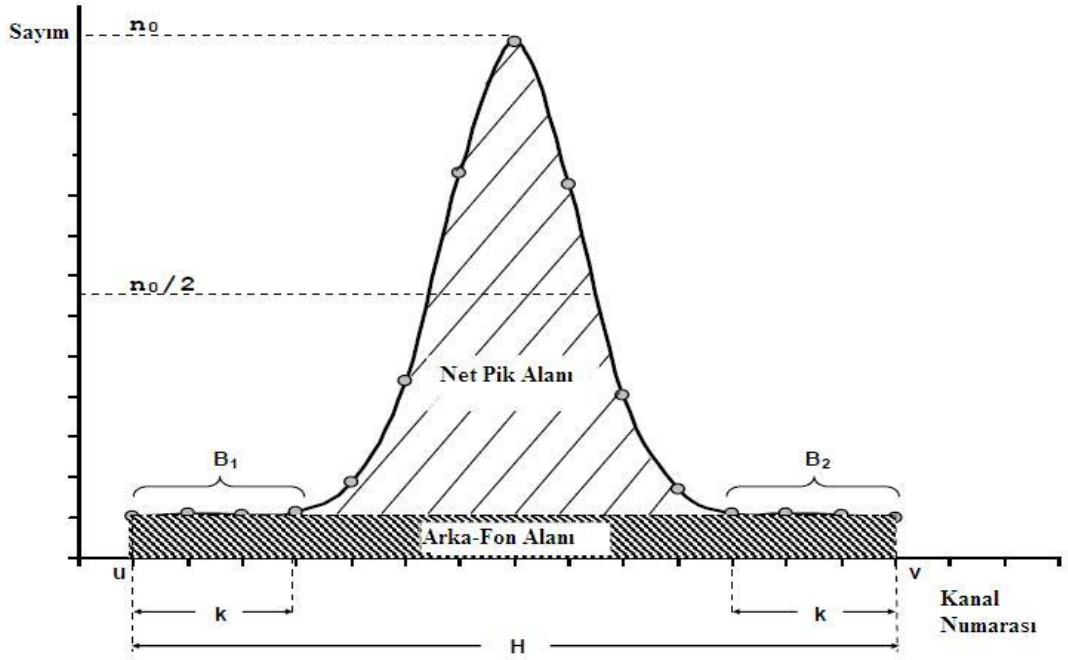
Su örnekleri, Seibersdorf, Avusturya bölgesindeki içme suyu kaynaklarından alınarak yollanmıştır. %2 m/m nitrik asit ile asitlendirilmiştir ve sertifikalı radyonüklitlerin bir karışımını içeren standart solüsyonların bilinen miktarlarıyla karıştırılarak, kaplara konulmuştur. Laboratuvarımıza üç su numunesi gama yayınlayan radyonüklitlerin aktivitelerinin belirlenmesi için gönderilmiştir.

Su numuneleri 30 Mart 2010 tarihinde iyice çalkalandıktan sonra 170 cc'lik kaplara konulup daraları alınarak sıkıca kapatıldıktan sonra para film ile izole edildiler. Üç su numunesi de dedektöre konularak 8 saatlik ve 24 saatlik sayımlar alındı. Su örneklerindeki radyonüklitlerin gama aktivitelerinin belirlenmesi için standart kaynak kullanılarak verim kalibrasyonunun yanı sıra, enerji ve FWHM kalibrasyonları ve hesaplamaları yapılmıştır (Kesim 5.1).

4.2. Hesaplamalar

4.2.1. Fotopik alanı

Fotopik alanı, ilgilenilen enerji pikinin arka-fon sayımının (background) üstündeki toplam sayım olan net pik alanıdır (Canberra 1986). Covel metodu olarak da bilinen bu pik alanı hesaplama metodunda, önce pikin uç noktalarındaki kanal sayısı belirlenir. Sonra, her bir kanalda biriken sayımların toplamından arka fon alanı çıkarılarak net pik alanı (N_{net}) belirlenir (Net pik alanı (N_{net}) = Toplam pik alanı - Arkafon alanı) [28] ve denklem 4.1-6 izlenerek hesaplanabilir.



Şekil 4.1: Pikin Altındaki Toplam Alan [28].

$$Toplam Alan = \sum_{i=u}^v C_i \quad (4.1)$$

$$H = v - u + 1 \quad (4.2)$$

$$B_1 = \frac{1}{k} \left(\sum_{i=u}^{u+k-1} C_i \right) \quad (4.3)$$

$$B_2 = \frac{1}{k} \left(\sum_{i=v-k+1}^v C_i \right) \quad (4.4)$$

$$\text{Arka - Fon Alanı} = \frac{H}{2} \times (B_1 + B_2) \quad (4.5)$$

$$N_{\text{net}} = \sum_{i=u}^v C_i - \left(\frac{H}{2} \times (B_1 + B_2) \right) \quad (4.6)$$

Burada,

u: Piki başlangıç kanal numarası

v: Piki bitiş kanal numarasını

C_i : i.kanaldaki sayım miktarı

H: Piki oluşturan tüm kanalların sayısı

B_1, B_2 : sırasıyla piki sol ve sağ taraflarındaki arka-fon ortalama sayım miktarları

K: piki sağ ve sol uç taraflarında devam eden ve süreklilik gösteren kanalların sayısını ifade etmektedir.

4.2.2. Aktivite

Birim zamanda bozunan (parçalanan) çekirdek sayısı olarak tanımlanabilen aktivite, denklem 4.7 ile belirlenebilir.

$$A = \frac{N_{\text{net}}}{\epsilon t} \quad (4.7)$$

Burada, ϵ dedektör fotopik verimi, t sayım süresi ve I bir parçalanmadaki ilgili gama (γ) yayınlama olasılığıdır.

A, radyonüklitlerin, sayımın yapıldığı gün için gama aktivite değeri olduğundan ve Uluslararası Atom Enerjisi Ajansından gelen numunelerin referans tarihindeki aktivite değerleri (A_0) istendiğinden, denklem 2.15'den,

$$A_o = A e^{\left(\frac{\ln 2}{t_{1/2}}\right)t_0} \quad (4.8)$$

elde edilir. Burada, t_0 numunenin referans tarihi ile sayım anına kadar geçen süre ve $t_{1/2}$ radyonüklitin yarılanma süresidir.

Örneklerinin spesifik aktivitesi S_A (Bq/kg) aşağıdaki gibi hesaplanabilir,

$$S_A = \frac{A}{m} \quad (4.9)$$

Burada, m toprak örneğinin kütlesidir.

Tablo 4.2, Tablo 4.3, Tablo 4.4, Tablo 4.5 gama ışın enerjileri, bu enerjilerdeki gama ışınlarının yayınlanma olasılıkları, verim kalibrasyonu sonucunda elde ettiğimiz verimleri, sayım yaptığımız gün elde ettiğimiz aktivite değerleri, referans tarihindeki aktiviteleri ve referans tarihindeki aktivitelerine göre hesapladığımız spesifik aktivite ölçüm-hesaplama sonuçlarını vermektedir.

Tablo 4.2: Karayosunu toprağındaki radyonüklitler ve bunların bozunma parametreleri.

Karayosunu Toprağı	E (keV)	I _γ (%)	t _{1/2} (Gün)	ε (%)	N _{net}	A (Bq)	A ₀ (Bq)
¹³⁷ Cs	661,657	85,1	10986,72	1,28±0,04	56379±244	60±2	61±2
⁴⁰ K	1460,822	10,66	4,56E+09	0,64±0,02	4585±71	78±3	78±3
²⁴¹ Am	59,54	35,9	157899	0,83±0,03	66±70	0,3±0,3	0,3±0,3
⁶⁰ Co	1173,228	99,85	1924,28	0,78±0,02	45±21	0,07±0,03	0,07±0,03
	1332,492	99,98	1924,28	0,7±0,02	13±13	0,02±0,02	0,02±0,02
¹³⁴ Cs	604,72	97,62	753,798	1,38±0,04	65±32	0,06±0,03	0,06±0,03
	795,864	85,46	753,798	1,09±0,03	36±27	0,04±0,3	0,05±0,04
	569,331	15,373	753,798	1,46±0,05	81±39	0,4±0,2	0,5±0,2
²¹² Pb	238,632	43,6	0,443	3,26±0,13	6231±103	5,1±0,2	5,1±0,2
²¹⁰ Pb	46,539	4,25	8103	0,16±0,02	474±125	80±23	80±23
²¹⁴ Pb	351,9321	35,6	0,01861	2,29±0,09	2497±107	3,6±0,2	3,6±0,2
	295,228	18,42	0,01861	2,70±0,11	1583±99	3,7±0,3	3,7±0,3
	241,995	7,251	0,01861	3,22±0,13	766±77	3,8±0,4	3,8±0,4
²¹⁴ Bi	609,32	45,49	0,01381	1,38±0,05	1725±54	3,2±0,1	3,2±0,1
	1120,294	14,92	0,01381	0,81±0,02	387±44	3,7±0,4	3,7±0,4
	1764,491	15,3	0,01381	0,54±0,02	224±16	3,2±0,2	3,2±0,2
²⁰⁸ Tl	583,187	85	0,00212	1,43±0,05	1806±64	1,7±0,1	1,7±0,1
	2614,511	99,754	0,00212	0,35±0,01	576±25	1,9±0,1	1,9±0,1
	860,557	12,5	0,00212	1,02±0,03	236±27	2,1±0,3	2,1±0,3
²²⁸ Ac	338,32	11,27	0,25625	2,37±0,09	1140±87	4,9±0,4	4,9±0,4
	911,204	25,8	0,25625	0,97±0,03	1177±41	5,4±0,3	5,4±0,3
	968,971	15,8	0,25625	0,92±0,03	679±32	5,4±0,3	5,4±0,3
²²⁶ Ra	186,211	3,59	584000	3,9±0,16	551±70	5±1	5±1
²³⁴ Th	92,8	2,1	24,1	3,22±0,10	849±76	15±2	15±2
	63,29	3,7	24,1	1,1±0,78	295±116	8±7	8±7
²³⁵ U	185,715	57,2	2,57E+11	3,91±0,16	340±80	0,18±0,04	0,18±0,04

Tablo 4.3: Su Numunesi 02'deki radyonüklitler ve bunların bozunma parametreleri.

Su Numunesi 02	E (keV)	I γ (%)	t $_{1/2}$ (Gün)	ϵ (%)	N $_{net}$	A (Bq)	A $_0$ (Bq)
¹³⁷ Cs	661,657	85,1	10986,72	1,28±0,04	1568±44	1,7±0,1	1,7±0,1
⁵⁷ Co	136,474	10,68	271,74	4,29±0,16	466±33	1,2±0,1	1,7±0,1
	122,07	85,6	271,74	4,19±0,14	2553±87	0,82±0,04	1,2±0,1
⁶⁰ Co	1173,228	99,85	1925,28	0,78±0,02	670±27	0,99±0,05	1,0±0,1
	1332,492	99,9826	1925,28	0,70±0,02	628±25	1,04±0,05	1,1±0,1
¹³⁴ Cs	569,331	15,373	754,314	1,46±0,05	384±30	2,0±0,2	2,2±0,2
	604,721	97,62	754,314	1,38±0,05	2225±49	1,9±0,1	2,2±0,1
	795,864	85,46	754,314	1,09±0,03	1512±42	2,0±0,1	2,1±0,1
¹⁵² Eu	778,904	12,96	4944,389	1,11±0,03	239±25	1,9±0,2	2,0±0,1
	1408,006	21,07	4944,389	0,66±0,02	225±16	1,9±0,1	1,9±0,1
	121,7817	28,67	4944,389	4,18±0,14	1992±90	1,9±0,1	2,0±0,1
⁵⁴ Mn	834,848	99,976	312,05	1,05±0,03	16±6	0,02±0,01	0,02±0,01
¹³³ Ba	356,01434	62,05	3839,8	2,26±0,09	28±18	0,02±0,02	0,02±0,02

Tablo 4.4: Su Numunesi 03'deki Radyonüklitler ve bunların bozunma parametreleri.

Su Numunesi 03	E (keV)	I γ (%)	t $_{1/2}$ (Gün)	ϵ (%)	N $_{net}$	A (Bq)	A $_0$ (Bq)
¹³⁷ Cs	661,657	85,1	10986,7	1,28±0,04	562±26	0,60±0,03	0,60±0,03
⁵⁷ Co	136,474	10,68	271,74	4,29±0,16	261±24	0,66±0,06	0,9±0,1
	122,07	85,6	271,74	4,19±0,14	728±50	0,24±0,02	0,33±0,03
⁶⁰ Co	1173,228	99,85	1925,28	0,78±0,02	235±18	0,35±0,03	0,37±0,03
	1332,492	99,983	1925,28	0,7±0,02	257±17	0,43±0,03	0,45±0,03
¹³⁴ Cs	569,331	15,373	754,314	1,46±0,05	171±16	0,88±0,09	1,0±0,1
	604,721	97,62	754,314	1,38±0,05	748±29	0,64±0,03	0,7±0,04
	795,864	85,46	754,314	1,09±0,03	564±25	0,70±0,04	0,79±0,04
¹⁵² Eu	778,904	12,96	4944,39	1,11±0,03	100±16	0,8±0,1	0,82±0,13
	1408,006	21,07	4944,39	0,66±0,02	87±9	0,72±0,08	0,73±0,08
	121,7817	28,67	4944,39	4,18±0,14	716±51	0,69±0,05	0,70±0,06
⁶⁵ Zn	1115,5	50,6	244,06	0,82±0,02	7±6	0,02±0,02	0,03±0,02
¹³³ Ba	356,01434	62,05	3839,8	2,26±0,09	23±8	0,02±0,01	0,02±0,01

Tablo 4.5: Su Numunesi 04'deki Radyonüklitler ve bunların bozunma parametreleri.

Su Numunesi 04	E (keV)	I _γ (%)	t _{1/2} (Gün)	ε (%)	N _{net}	A (Bq)	A ₀ (Bq)
¹³⁷ Cs	661,657	85,1	10986,7	1,28±0,04	1535±47	1,6±0,1	1,6±0,1
⁵⁷ Co	136,474	10,68	271,74	4,29±0,16	359±31	0,9±0,1	1,3±0,1
	122,07	85,6	271,74	4,19±0,14	2363±85	0,76±0,04	1,1±0,1
⁶⁰ Co	1173,228	99,85	1925,28	0,78±0,02	671±32	1,0±0,1	1,0±0,1
	1332,492	99,9826	1925,28	0,7±0,02	571±24	0,95±0,05	1,0±0,1
¹³⁴ Cs	569,331	15,373	754,314	1,46±0,05	398±36	2,0±0,2	2,3±0,2
	604,721	97,62	754,314	1,38±0,05	2171±50	1,9±0,1	2,1±0,1
	795,864	85,46	754,314	1,09±0,03	1526±43	1,9±0,1	2,2±0,1
¹⁵² Eu	778,904	12,96	4944,39	1,11±0,03	244±28	2,0±0,2	2,0±0,2
	1408,006	21,07	4944,39	0,66±0,02	201±16	1,7±0,1	1,7±0,1
	121,7817	28,67	4944,39	4,18±0,14	2008±87	2,0±0,1	2,0±0,1
⁶⁵ Zn	1115,5	50,6	244,06	0,82±0,02	9±13	0,03±0,04	0,04±0,05
¹³³ Ba	356,01434	62,05	3839,8	2,26±0,09	71±19	0,06±0,02	0,06±0,02

4.3. Hata (Belirsizlik)

Ölçüm sistemi ve kullanılan malzemelerdeki duyarlılığa bağlı olarak, deneysel bulguların ölçülebilen verilerinden yararlanılarak, belirsizlik analizi adı verilen hassas bir yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemde ölçülmesi gereken büyüklük U, doğrudan ölçülebilen x,y,z... değişkenlerinden oluşan bir fonksiyon ve bu değişkenlerin hata payları σ_x, σ_y ve $\sigma_z \dots$ ise, U fonksiyonunun belirsizliği σ_u , denklem 4.10'daki gibidir [29].

$$\sigma_u = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots} \quad (4.10)$$

4.3.1. Toplama ve çıkarmada hata

Denklem 4.11 gibi toplama veya çıkarma işlemlerine sahip bir U fonksiyonu göz önüne alalım,

$$U(X,Y)= A.X \pm B.Y \quad (4.11)$$

burada A ve B birer sabittir. Bu durumda U'nun hata değeri aşağıdaki gibi hesaplanır [29].

$$\sigma_U = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial X}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial Y}\right)^2 \sigma_y^2} = \sqrt{A^2 \sigma_x^2 + B^2 \sigma_y^2} \quad (4.12)$$

4.3.2. Çarpmada hata

Denklem 4.13 gibi çarpma işlemine sahip bir U fonksiyonu göz önüne alalım,

$$U(X,Y)= A.X.Y \quad (4.13)$$

burada A bir sabittir. Bu durumda U'nun hata değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\sigma_U = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial X}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial Y}\right)^2 \sigma_y^2} = A \cdot \sqrt{Y^2 \sigma_x^2 + X^2 \sigma_y^2} \quad (4.14)$$

Ayrıca, denklem 4.14,

$$\sigma_U = U \cdot \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{X^2} + \frac{\sigma_y^2}{Y^2}} \quad (4.15)$$

şeklinde de yazılabilir [29].

4.3.3. Bölmede hata

Denklem 4.16 gibi bölme işlemine sahip bir U fonksiyonu göz önüne alalım,

$$U(X,Y)=A \cdot \frac{X}{Y} \quad (4.16)$$

burada A bir sabittir. Bu durumda U'nun hata değeri aşağıdaki gibi hesaplanır,

$$\sigma_U = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial X}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial Y}\right)^2 \sigma_y^2} = A \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{Y}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{X}{Y^2}\right)^2 \sigma_y^2} \quad (4.17)$$

Ayrıca, denklem 4.18,

$$\sigma_U = U \cdot \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{X^2} + \frac{\sigma_y^2}{Y^2}} \quad (4.18)$$

şeklinde de yazılabilir [29].

BÖLÜM 5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Tüm numuneler 15 Kasım 2009 referans tarihiyle elimize ulaşmıştır. Numunelerin sayımı referans tarihlerinden 136 gün sonra yapılmıştır. Numunelerin aktivite seviyelerinin belirlenmesi için 24 saatlik sayımlar alınmış ve ölü zaman düzeltmeleri yapılmıştır. Arka-fon sayımının tespit edilmesi amacıyla detektörde boş örnek kabıyla 76650 s süreyle sayım yapılmıştır. Numunelerin sayımından arka-fon sayımı çıkarılarak, arka-fon sayım düzeltmesi de yapılmıştır. Spesifik aktiviteyi hesaplamak için toprak numunesinin kuru kütlesi 148.76 g, üç adet su numunesinin kütleleri ise sırasıyla, 168.53 g, 168.5 g ve 168.16 g olarak tartılmıştır. Dedektör sisteminin enerji ve sayım verimi (fotopik verimi), aktivitesi bilinen standart kaynaklar kullanılarak hesaplanmış ve numunelerin aktivite değerleri Bölüm 4'de anlatıldığı gibi belirlenmiştir.

5.1. Gama Spektroskopi Sisteminin Kalibrasyonu

Elde edilen spektrumların analizlerinin yapılabilmesi için HPGe gama sayım dedektörü ve GamaVision-32 software Programı kullanılarak yapılmış olan kalibrasyonlar şunlardır;

- Enerji kalibrasyonu
- FWHM kalibrasyonu
- Verim kalibrasyonu

5.1.1. Enerji kalibrasyonu

Çok kanallı analizöre gelen her puls, yüksekliklerine göre bir kanalda sayım olarak kayıt edilmektedir. Her kanal bir enerji değerine karşı gelmektedir. Ancak puls yükseklikleri, fotoçoğaltıcı tüpe uygulanan yüksek gerilim ve yükseltecin kazancı ile

değişir ve bu değişim, bir kanala karşılık gelen enerji değerini değiştirmektedir. Dedektöre gelen fotonların enerjisini tam olarak belirleyebilmek için sayım sisteminin enerji kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir. Enerji kalibrasyonu ile aslında çok kanallı analizör kalibre edilmiş olur.

Enerji kalibrasyonun yapılabilmesi için yayımladığı gama ışınlarının enerjisi ve yayımlanma olasılıkları bilinen radyonüklitleri içeren herhangi bir kaynağın kullanılması yeterlidir. Radyoaktif kaynak dedektörün önüne konularak yeterince istatistik sağlanıncaya kadar sayım alınır. Elde edilen spektrumda bilinen enerjilerde, gözlenen piklerden en az iki tanesi seçilerek, fotopik merkezlerinin karşı geldiği kanal numaraları, kullanılan radyoizotopların yayımladığı enerji değerlerine göre birinci dereceden veya ikinci dereceden bir polinoma fit edilerek, kalibrasyon eğrisinin denklemi elde edilir. Tablo 5.1’de standart kaynaktaki radyonüklitler, enerjileri ve karşı gelen kanal numaraları verilmiştir.

Tablo 5.1: Standart Kaynaktaki radyonüklitler ve fotopik enerji değerleri ve kanal numarası.

Radyonüklitler	Bozunum Türleri	E (keV)	Kanal Numarası
²¹⁰ Pb	β^-	46,539	123,41
²⁴¹ Am	α	59,5409	157,73
¹⁰⁹ Cd	ϵ	88,0336	233,08
⁵⁷ Co	ϵ	122,07	323,32
¹³⁹ Ce	ϵ	165,8576	439,49
²⁰³ Hg	β^-	279,1952	739,98
¹¹³ Sn	ϵ	391,698	1038,57
⁸⁵ Sr	ϵ	514,0067	1363,27
¹³⁷ Cs	β^-	661,657	1754,99
⁸⁸ Y	β^+	898,042	2382,08
⁶⁰ Co	β^-	1173,228	3112,29
⁶⁰ Co	β^-	1332,492	3534,89
⁸⁸ Y	β^+	1836,063	4871,1

Gama-Vision yazılımının kalibrasyon (Calibrate) menüsünde enerji ve verim kalibrasyonunu menülerini içermektedir. Spektrumunun enerji kalibrasyonu için kalibrasyon seçeneğindeki alt menü olan enerji kalibrasyonu seçilir ve standart kaynaktaki bulunan enerjisi bilinen radyonüklitlerin fotopik merkezleri seçilip

enerjileri girilir ve kaydedilir. Gama-Vision programı da fotopiklerin merkezlerinin karşı geldiği kanal numaralarına göre enerji değerlerini ikinci dereceden bir polinoma fit ederek kalibrasyon yapmaktadır. Denklem 5.1’de ikinci dereceden bir fit denklemi verilmiştir.

$$E = A_0 + A_1C + A_2C^2 \quad (5.1)$$

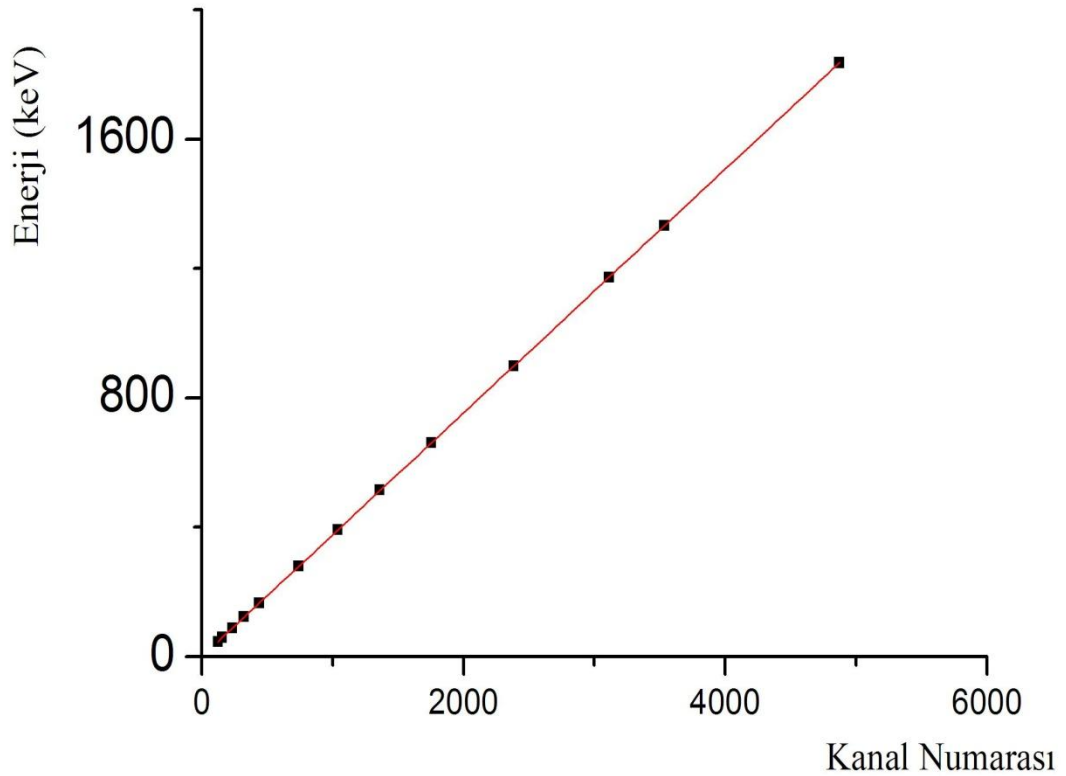
burada, C kanal numarasıdır. Tablo 5.1’deki değerlere göre, denklem 5.1’deki katsayılar aşağıdaki gibi bulunmuştur:

$$A_0 = 0,1366$$

$$A_1 = 0,376990$$

$$A_2 = -1,93869 \cdot 10^{-8}$$

Şekil 5.1’de HPGe detektörün enerji-kanal kalibrasyon grafiği gösterilmiştir.



Şekil 5.1: Enerji Kalibrasyon Eğrisi

5.1.2. FWHM kalibrasyonu

FWHM (Pikin yarı yükseklikteki tam genişliği) kalibrasyonu için yine kalibrasyon menüsünden enerji kalibrasyonu seçilir ve açılan pencerede FWHM seçilir. Gama-Vision programı fotopiklerin merkezlerinin karşı geldiği kanal numaralarına veya enerjiye karşı gelen yarı yükseklikteki tam genişlik (FWHM) değerlerini ikinci dereceden bir polinoma fit ederek kalibrasyon yapmaktadır.

$$F = B_0 + B_1C + B_2C^2 \quad (5.2)$$

burada, F kanallara göre FWHM dır. Denklem 5.2'deki katsayılar aşağıdaki gibi bulunmuştur:

$$B_0 = 2,3061$$

$$B_1 = 0,000775$$

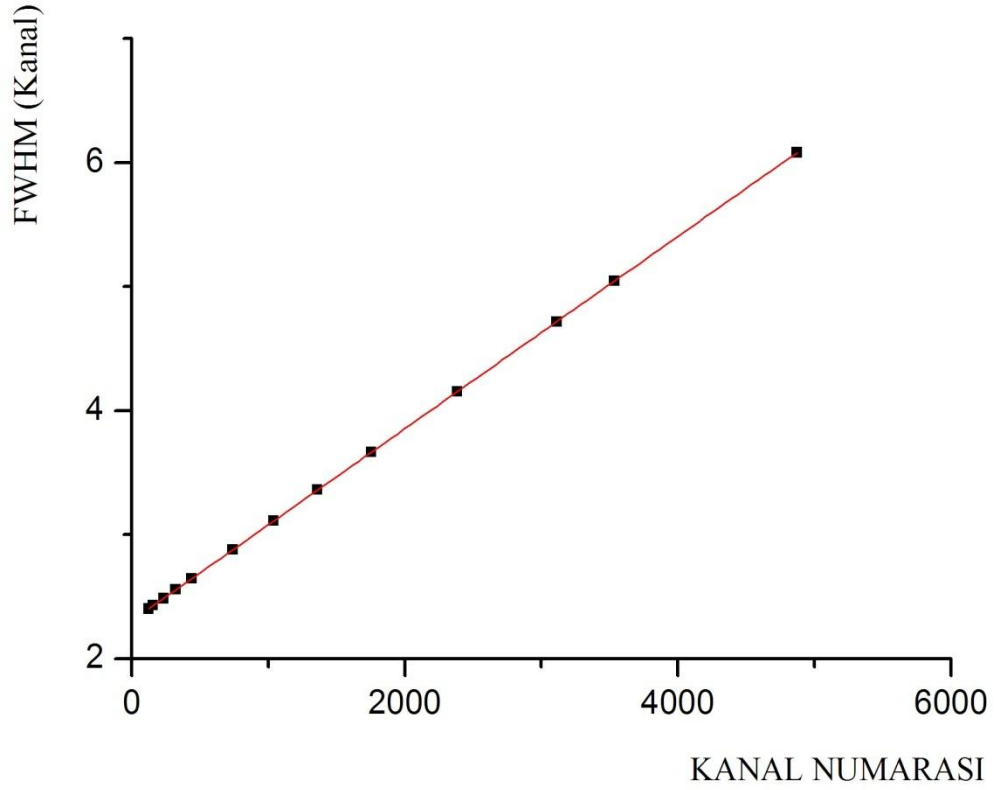
$$B_2 = -1,91259 \cdot 10^{-8}$$

Enerjide FWHM hesabı için,

$$F(E) = F(C) \times (A_1 + 2A_2 \times C) \quad (5.3)$$

burada, F(E) enerjide FWHM, F(C) kanalda FWHM'yi ifade ederken, A₁ ve A₂ sabitleri ise denklem 5.1'deki enerji kalibrasyonu sabitlerini ifade etmektedirler.

Şekil 5.2'de HPGe detektörün FWHM-kanal kalibrasyon grafiği gösterilmiştir.



Şekil 5.2: FWHM kalibrasyon eğrisi

5.1.3. Sayım (Fotopik) verim kalibrasyonu

Sayım verimi, belli bir dedektör-kaynak geometrisi için, dedektör tarafından sayılan gama sayım miktarının, kaynaktan yayımlanan gama sayım miktarına oranıdır. Verim, bir bozunma sonucu yayılan bir fotonun, dedektör tarafından algılanma olasılığı olarak da tanımlanabilir. Kullanım amacına göre pek çok şekilde tanımlanabilir.

Sayım verimi diğer bir deyişle fotopik verimi, ilgilenilen gama piki alanının kaynaktan yayılan gama ışınlarının sayısına oranıdır. Fotopik alanı, dedektör tarafından soğurulan fotonların sayısı ile orantılı olduğundan, bu alan ilgilenilen gama fotonunun enerjisine direk olarak bağlıdır. Fotopik verimi, fotopik altındaki sayım hızının, kaynaktan gelen E enerjili fotonların yayım hızına oranı olarak da ifade edilebilir [30]. Yayım hızı R ,

$$R = A \times I_{\gamma} \quad (5.4)$$

ise, E enerjili bir gama fotonu için fotopik verimi,

$$\varepsilon(E) = \frac{n(E)}{R(E)} \quad (5.5)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada;

R(E) : Birim zamanda kaynaktan yayımlanan E enerjili gama ışını sayısı

A: Kaynağın aktivitesi

I_{γ} : Gamma ışınlarının yayılma olasılığı

$\varepsilon(E)$: Enerjiye bağlı fotopik verimi

n(E): Fotopik altındaki sayım hızı

Verim kalibrasyonun yapılabilmesi için, standart kaynaklar kullanılır. Standart kaynaklar ölçülecek numunelerle aynı geometri ve yoğunlukta olmalıdır, aktivitesi net olarak bilinmelidir ve standart kaynağın yaydığı gama ışını enerjileri, ölçüm yapılacak enerji aralığına mümkün olduğunca yayılmış olmalıdır.

Standart kaynaklar (Ek-A) dedektör karşısına yerleştirilip ve yeterince yüksek sayım istatistiği (Tablo 5.2) sağlanıncaya kadar sayım yapılmıştır; aktivitesi en düşük olan radyoizotop için sayımdaki belirsizlik %10'dur. Elde edilen spektrumdan, standart kaynakta bulunan radyonüklidlerin net olarak bilinen aktiviteleri Denklem 5.6'da yerine konularak, bu radyoizotoplardan yayımlanan gamaların enerjileri için dedektör sisteminin fotopik verimleri ölçülmüş ve sonuçlar Tablo 5.2'de verilmiştir.

$$\varepsilon(E) = \frac{N_{net}}{AtI_{\gamma}} \quad (5.6)$$

Denklem 5.6'da t sayım süresi olup, N_{net}/t denklem 5.5'deki sayım hızı n(E)'ye eşittir.

Tablo 5.2: 3600 saniye sayım alınarak elde edilen verim kalibrasyonu sonuçları.

Radyonüklitler	E(keV)	A ₀ I _γ	t _{1/2} (Gün)	A I _γ	N	ε (%)
²¹⁰ Pb	46,54	442,8±31,0	8139,5	430,8±30	2453±247	0,16±0,02
²⁴¹ Am	59,54	388,1±11,6	157742	387,6±11,6	11332±237	0,83±0,03
¹⁰⁹ Cd	88,03	544,4±16,3	462,6	336,0±10,1	35630±328	2,94±0,09
⁵⁷ Co	122,07	479,5±14,9	271,79	210,9±6,5	30840±304	4,19±0,14
⁵⁷ Co	136,47	59,83±1,9	271,79	26,3±0,8	4151±235	4,29±0,16
¹³⁹ Ce	165,86	575,6±17,3	137,64	113,7±3,4	16896±263	4,14±0,16
²⁰³ Hg	279,20	1757±53	46,595	14,6±0,4	1359±276	2,84±0,11
¹¹³ Sn	391,70	1819±55	115,09	261,6±7,8	19486±249	2,07±0,08
⁸⁵ Sr	514,01	3434±103	64,849	109,9±3,3	5910±158	1,60±0,06
¹³⁷ Cs	661,66	2166±65	11012	2122,5±63,7	102787±368	1,28±0,04
⁸⁸ Y	898,04	5252±158	106,63	647,6±19,4	22342±214	0,98±0,03
⁶⁰ Co	1173,23	2951±89	1924,28	2627,8±78,8	71948±289	0,78±0,02
⁶⁰ Co	1332,49	2955±89	1924,28	2631,4±78,9	64176±269	0,70±0,02
⁸⁸ Y	1836,06	5553±167	106,63	684,7±20,5	12679±122	0,52±0,02

Fotopik verim kalibrasyonu, verimin enerjiye bağımlılığının, Tablo 5.2'deki değerlerin, argümanı bir polinom olan bir fonksiyona (Denklem 5.7) fit edilmesiyle, belirlenmiştir.

$$\varepsilon = e^{\left(\sum_{i=1}^6 a_i E^{2-i}\right)} \quad (5.7)$$

burada, E gama fotonunun enerjisidir (MeV) ve a_i katsayıları aşağıdaki gibi bulunmuştur:

$$a_1 = -0,393094$$

$$a_2 = -4,839712$$

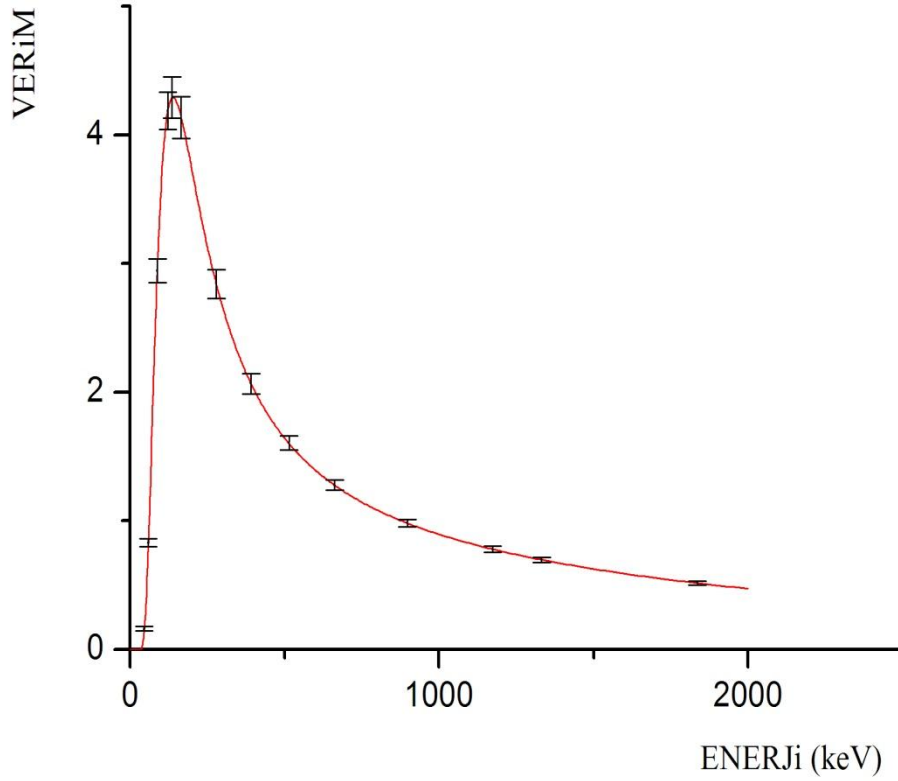
$$a_3 = 0,574923$$

$$a_4 = -0,059182$$

$$a_5 = 0,002038$$

$$a_6 = -0,000032$$

Şekil 5.3 gama sayım (HPGe) detektörünün, standart kaynaktaki radyoizotoplar ile belirlenmiş verim değerleri ve denklem 5.7'deki fit edilmiş olan fonksiyonun eğrisini göstermektedir.



Şekil 5.3: Verim Kalibrasyonu Eğrisi

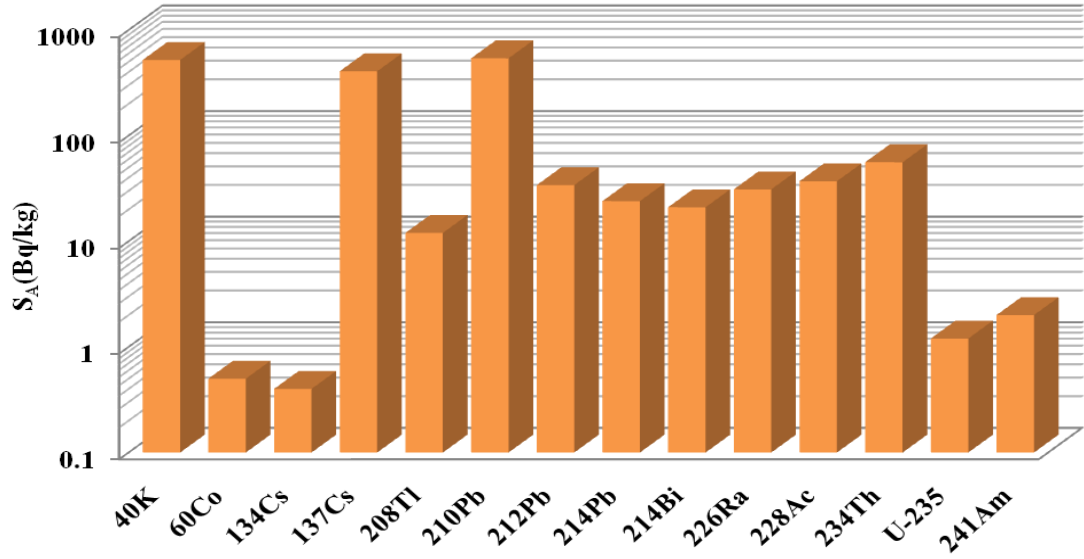
Enerji, FWHM ve fotopik verim kalibrasyonları, GammaVision-32 yazılımındaki kalibrasyon menüsündeki, kalibrasyonu kaydetme (Save Calibration) seçeneği ile kaydedilip, istenilen spektrumda bu kalibrasyonlar yine kalibrasyon menüsü altındaki kalibrasyonu çağır (recall calibration) seçilerek kaydedilen dosyadan çağrılabilirler ve böylece istenilen bir spektruma uygulanabilirler.

Fotopik verim kalibrasyonu ile, numunelerimizdeki radyonüklitlerin verimleri hesaplanabilmiş ve her numune için Bölüm 4'te anlatılmış olan net sayım, aktivite (Bq) ve spesifik aktivite (Bq/kg) hesaplamaları yapılmıştır. Tablo 5.3'de karayosunu toprak numunesindeki radyonüklitler ve spesifik aktivite sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.3: Toprak Numunesindeki Radyonüklitler Ve Spesifik Aktivite Sonuçları.

Karayosunu Toprağı	E (keV)	S _A (Bq/kg)
¹³⁷ Cs	661,657	407±13
⁴⁰ K	1460,822	521±20
²⁴¹ Am	59,54	2±2
⁶⁰ Co	1173,228	0,5±0,2
	1332,492	<mda
¹³⁴ Cs	604,72	0,4±0,2
	795,864	0,3±0,3
	569,331	3±2
²¹² Pb	238,632	34±2
²¹⁰ Pb	46,539	540±156
²¹⁴ Pb	351,9321	24±1
	295,228	25±2
	241,995	26±3
²¹⁴ Bi	609,32	21±1
	1120,294	25±3
	1764,491	21±2
²⁰⁸ Tl	583,187	12±1
	2614,511	13±1
	860,557	14±2
²²⁸ Ac	338,32	33±3
	911,204	37±2
	968,971	36±2
²²⁶ Ra	186,211	31±4
²³⁴ Th	92,8	98±13
	63,29	56±46
²³⁵ U	185,715	1,2±0,3

Şekil 5.4'de karayosunu toprağı numunesindeki radyonüklitlerin spesifik aktivite sonuçlarının kütle numaralarına göre grafiğı verilmiştir.

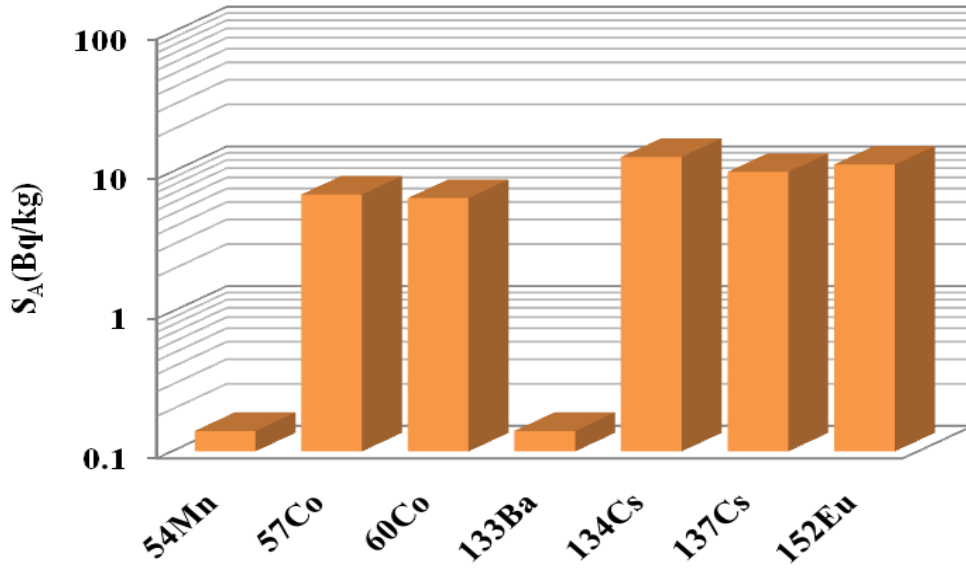


Şekil 5.4: Karayosunu Toprağı radyonüklit-spesifik aktivite grafiksel gösterimi.

Tablo 5.4,5 ve 6'te, sırasıyla su numuneleri 02, 03 ve 04 (Spiked water)'deki radyonüklitler ve spesifik aktivite sonuçları verilmiştir. Ayrıca, Şekil 5.5, 6 ve 7'de sırasıyla su numunelerinin radyonüklit spesifik aktivite sonuçlarının kütle numaralarına göre grafikleri görülmektedir.

Tablo 5.4: Su Numunesi 02'deki radyonüklitler ve spesifik aktivite sonuçları.

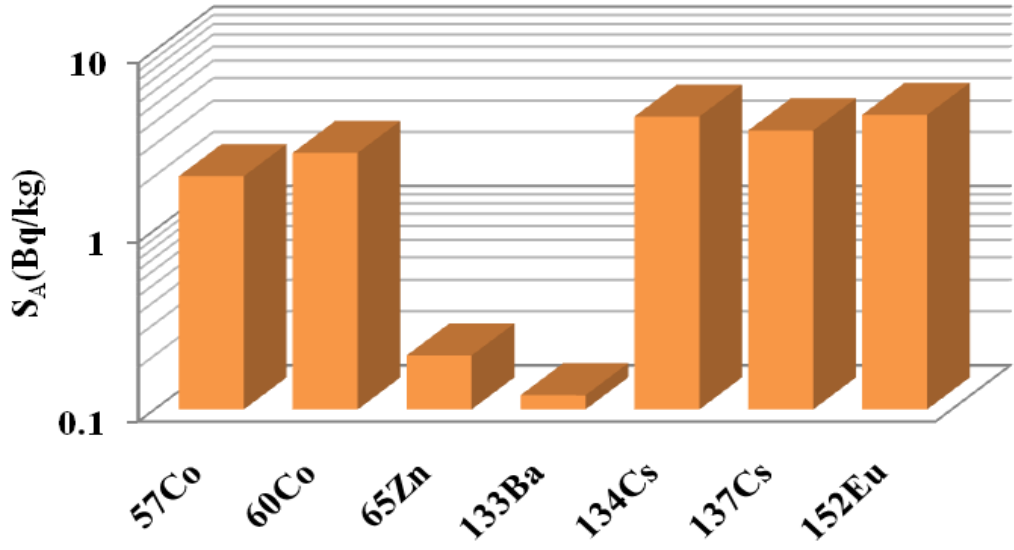
Su numunesi 02	E (keV)	S_A (Bq/kg)
^{137}Cs	661,657	10,0±0,4
^{57}Co	136,474	9,9±0,8
	122,07	6,9±0,3
^{60}Co	1173,228	6,2±0,3
	1332,492	6,5±0,3
^{134}Cs	569,331	13,3±1,1
	604,721	12,8±0,5
	795,864	12,6±0,5
^{152}Eu	778,904	11,6±1,3
	1408,006	11,3±0,8
	121,7817	11,6±0,7
^{54}Mn	834,848	0,14±0,05
^{133}Ba	356,01434	0,14±0,09



Şekil 5.5: Su Numunesi 02 Radyonüklit-Spesifik Aktivite Grafiksel Gösterimi

Tablo 5.5: Su Numunesi 03'deki radyonüklitler ve spesifik aktivite sonuçları.

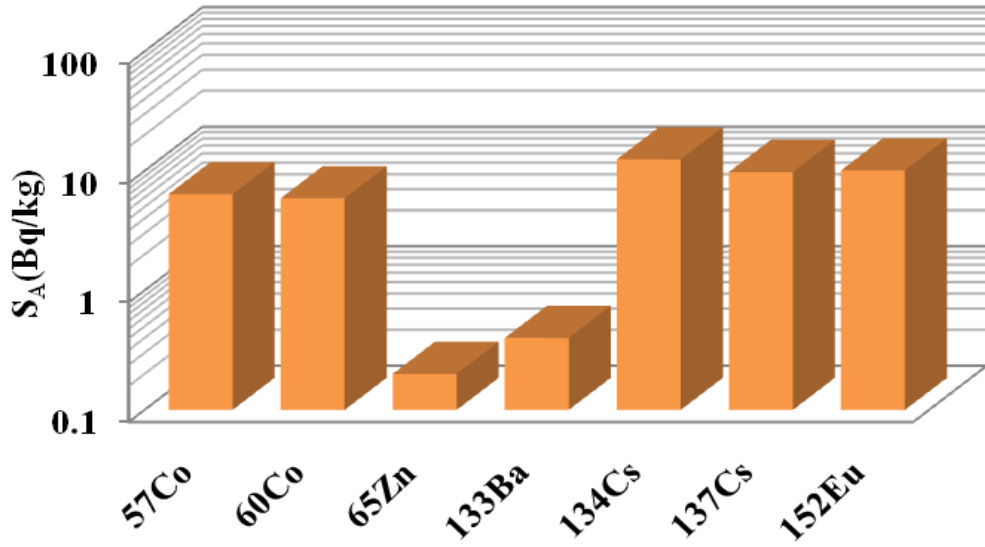
Su numunesi 03	E (keV)	S _A (Bq/kg)
¹³⁷ Cs	661,657	3,6±0,2
⁵⁷ Co	136,474	5,5±0,5
	122,07	2,0±0,2
⁶⁰ Co	1173,228	2,2±0,2
	1332,492	2,7±0,2
¹³⁴ Cs	569,331	5,9±0,6
	604,721	4,3±0,2
	795,864	4,7±0,3
¹⁵² Eu	778,904	4,9±0,8
	1408,006	4,4±0,5
	121,7817	4,1±0,3
⁶⁵ Zn	1115,5	0,2±0,1
¹³³ Ba	356,01434	0,12±0,04



Şekil 5.6: Su Numunesi 03 Radyonüklit-Spesifik Aktivite Grafiksel Gösterimi.

Tablo 5.6: Su Numunesi 04'deki Radyonüklitler Ve Spesifik Aktivite Sonuçları.

Su numunesi 04	E (keV)	S_A (Bq/kg)
^{137}Cs	661,657	9,8±0,4
^{57}Co	136,474	8±1
	122,07	6,4±0,3
^{60}Co	1173,228	6,2±0,3
	1332,492	5,9±0,3
^{134}Cs	569,331	14±1
	604,721	12,5±0,5
	795,864	12,8±0,5
^{152}Eu	778,904	11,9±1,4
	1408,006	10,1±0,9
	121,7817	12±1
^{65}Zn	1115,5	0,2±0,3
^{133}Ba	356,01434	0,4±0,1



Şekil 5.7: Su Numunesi 04 Radyonüklit-Spesifik Aktivite Grafiksel Gösterimi

5.2. Sonuç ve Tartışma

Kesim 2.3’de bahsedildiği gibi, bir radyoaktif seride ana çekirdeğin yarı ömrü, ürünlerinin yarı ömrüne kıyasla çok uzun ise belli bir süre sonra seri radyoaktif dengeye ulaşır. Seri radyoaktif dengede ise, bozunma ile oluşan ürün çekirdek miktarı ile yine bu ürün çekirdeğin bozunumuyla kaybolan çekirdek sayısı eşitlenir. Seri dengede iken, ana çekirdeğin aktivitesi herhangi bir ürününün aktivitesinin belirlenmesi ile tayin edilebilir. ^{238}U serisinde, ^{222}Rn gazının ortamdan kolaylıkla uzaklaşmasıyla denge bozulur. Numune analizi yapılırken, radyoaktif dengenin tekrar oluşması sağlanır. Uranyum ve Toryum aktivitelerini yayınladıkları radyasyonlar ile saptayamayız bu nedenle, serideki radyoaktif ürün çekirdeklerin aktivite ölçümleri ile aktiviteleri belirlenir. ^{238}U radyonüklitinin aktivitesinin belirlenmesi için genellikle ^{226}Ra (186 keV) , ^{214}Bi (609 keV) ve ^{214}Pb (352 keV) ürün çekirdeklerinin aktivitelerine bakılır ve seri radyoaktif dengede olduğundan aktivitelerinin birbirine yakın değerlerde olduğu görülür (Tablo 5.7).

^{232}Th radyonüklitinin aktivite tayininde ise genellikle ^{228}Ac (911 keV), ^{238}Tl (583 keV) ve ^{212}Pb (239 keV) ürün çekirdeklerinin aktivitelerine bakılır. Karayosunu toprak numunesinin spesifik aktivite sonuçlarında da görüldüğü gibi (Tablo 5.3), ^{228}Ac radyonüklitinin incelediğimiz tüm gama enerjilerindeki spesifik aktiviteleri ile

^{212}Pb 'nin spesifik aktivite değeri birbiriyle uyumludur, fakat ^{208}Tl radyonüklitinin incelediğimiz tüm enerjilerindeki aktivite değerleri ^{228}Ac ve ^{212}Pb aktiviteleri ile tamamen uyumsuz sonuçlar vermektedir. Bunun nedeni ise Bölüm 2'de verilmiş olan ^{232}Th serisi şemasından da görüldüğü gibi, ^{212}Bi radyonüklitin alfa bozunumuyla ^{208}Tl ürün çekirdeği oluşmaktadır, aynı zamanda ^{212}Bi , β^- bozunumu yaparak ^{212}Po ürün çekirdeğini de oluşturmaktadır. ^{212}Bi 'nin alfa radyasyonu yayarak bozunma oranı %36 iken, β^- radyasyonu yayarak bozunma oranı %64 tür. ^{208}Tl (583keV) radyonüklitin bir parçalanmadaki gama (γ) yayınlama olasılığı ise %85 oranındadır. Biz sadece ^{208}Tl radyonüklitin gama enerjisine bağlı aktivitesini hesaplamak istiyorsak ^{208}Tl radyonüklitin gama yayınlama olasılığını kullanarak aktivitesini bulabiliriz. Karayosunu toprağı numunesinde uygulanan işlem bu yönde idi. Eğer ^{232}Th radyonüklitin aktivitesini hesaplamak istiyorsak, ^{212}Bi 'nin %36 olasılıkla ^{208}Tl 'e bozunumu ve ^{208}Tl 'in %85 olasılıkla γ yayınlama olasılığını hesaba katmalıyız. Bu iki olasılığın çarpımı ile ^{232}Th aktivitesini belirleyebileceğimiz farklı değerlerde bir olasılık elde ederiz. Eğer ^{232}Th radyoaktif çekirdeğinin aktivitesi belirlenmek isteniyorsa bu yeni olasılık (%30.6) kullanıldığı zaman, ^{208}Tl radyonüklitin aktivitesinin ^{228}Ac ve ^{212}Pb radyonüklitlerinin aktivitesi ile uyumlu sonuçlar verdiği görülecektir. Karayosunu toprak numunesi hesaplamalarında bu düzeltmeler yapıldığında, ^{228}Ac , ^{212}Pb ve ^{208}Tl radyonüklitlerinin spesifik aktivite sonuçları Tablo 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.7: Karayosunu toprak numunesi ^{238}U aktivitesinin belirlenmesi için kullanılan radyonüklitler ve spesifik aktiviteleri.

	Radyonüklit	Enerji (keV)	S_A (Bq/kg)
^{238}U	^{226}Ra	186,211	31±4
	^{214}Pb	351,9321	24±1
		295,228	25±2
		241,995	26±3
		609,32	21±1
	^{214}Bi	1120,294	25±3
		1764,491	21±2

Tablo 5.8: Karayosunu toprak numunesi ²³²Th aktivitesinin belirlenmesi için kullanılan radyonüklitler ve spesifik aktiviteleri.

	Radyonüklit	Enerji (keV)	S_A (Bq/kg)
	²³²Th	²¹²Pb	238,632
²⁰⁸Tl		583,187	32±2
		2614,511	36±2
		860,557	40±5
²²⁸Ac		338,32	33±3
		911,204	37±2
		968,971	36±2

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) tarafından düzenlenen IAEA-CU-2009-03 “dünya genelinde, karayosunu toprağında ve asitlendirilmiş sudaki doğal ve yapay radyonüklidlerin belirlenmesi yeterlilik testi’ne” başvurularak, ajanstan gelen bir toprak ve üç adet su örneğinin spesifik aktiviteleri ölçülmüş ve sonuç raporu ajansa yollanmıştır. IAEA tarafından yapılan ön değerlendirme raporu ise 16 Haziran 2010 tarihinde tarafımıza bildirilmiştir (Ek-B). Bu değerlendirmede 27 radyoaktivite ölçümü içerisinde 20 tane sonucun kabul-edilebilir olduğu (Ek-B’deki tablolarda “A” ile gösterilmektedir), 7 tane kabul-edilebilir sınırlar dışında (Ek-B’deki tablolarda “N” ile gösterilmektedir) olduğu rapor edilmiştir. Bu 7 radyoaktivite ölçümlerinin düşük enerji bölgesinde olduğu gözlenmektedir. Bunun düşük enerji bölgesindeki X ışınlarıyla olabilecek “çakışma etkisi” (coincidence) sebebiyle olduğu ve ayrıca düşük enerji bölgesindeki fotopik veriminin tam doğru olarak belirlenemediği düşünülebilir.

Ek-B’de verilmiş ve laboratuvar sonuçlarının kabul-edilebilirliğinin ölçüsü olan parametreler, laboratuvar ölçüm sonuçlarının IAEA değerlerinden sapma miktarları olarak gösterilmektedir ve aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Bağıl sapma (Relative bias) RB} = \frac{S_{A(\text{Lab})} - S_{A(\text{IAEA})}}{S_{A(\text{IAEA})}} \times 100 \quad (5.8)$$

Laboratuarda belirlediğimiz aktivite değerlerinin kabul-edilebilir olması için $RB \leq MAB$ olmalıdır. Burada MAB Maksimum kabul-edilebilir sapma (Maximum acceptable Bias) dır.

$$Z_{score} = \frac{S_{A(Lab)} - S_{A(IAEA)}}{\sigma} \quad (5.9)$$

burada σ standart sapmadır ve,

$$\sigma = 0.1 \times S_{A(IAEA)} \quad (5.10)$$

ile hesaplanmaktadır.

Eğer $|Z_{score}| \leq 2$ ise ölçüm kabul-edilebilir, $2 < |Z_{score}| < 3$ ise kuşkuludur ve diğer parametreler ile değerlendirilir, $|Z_{score}| \geq 3$ ise sonuç kesinlikle kabul edilemezdir.

$$A1 = |S_{A(IAEA)} - S_{A(Lab)}| \quad (5.11)$$

$$A2 = 2.58 \times \sqrt{\Delta S_{A(Lab)}^2 + \Delta S_{A(IAEA)}^2} \quad (5.12)$$

Doğruluğun (Trueness) sağlanabilmesi için $A1 \leq A2$ olmalıdır.

$$\text{Kesinlik (Precision) } P(\%) = \sqrt{\left(\frac{\Delta S_{A(IAEA)}}{S_{A(IAEA)}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_{A(Lab)}}{S_{A(Lab)}}\right)^2} \times 100 \quad (5.13)$$

Laboratuarda belirlediğimiz aktivite değerlerinin kabul-edilebilir olması için $P \leq LAP$ olmalıdır. Burada LAP kabul-edilebilir kesinlik sınırı (Limit of Acceptable Precision) dır.

LAP ve MAB değerleri Ek-B de bulunmaktadır.

u-test ise, denklem 5.14 ile hesaplanır.

$$u - \text{Test} = \frac{S_{A(\text{IAEA})} - S_{A(\text{Lab})}}{\sqrt{\Delta S_{A(\text{IAEA})}^2 + \Delta S_{A(\text{Lab})}^2}} \quad (5.14)$$

Doğruluk (Trueness) değerinin uyumsuz olduğu 2 tane ve kesinlik (P) değerinin uyumsuz olduğu 5 tane ölçüm sonucu bulunmaktadır. IAEA’de bu ölçümlerin kabul edilmesi için doğruluk (trueness) ve kesinliğin (Precision) her ikisinin de kabul-edilebilir olması gerekmektedir. Bu nedenle 4 numunede bulunan 27 radyonüklitten 7 tanesi kabul-edilebilir bulunmamıştır.

KAYNAKLAR

- [1]. Görür, Ş., “Çevresel Radyoaktivite İle Bu Çevrede Yasayanlara Ait Diş örneklerindeki Radyoaktivite Arasındaki İlişkinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Adana, 1-26, (2006)
- [2]. Erdurmuş, B., “İzmit Körfezi’nde Cs-137 ve Po-210 Radyonüklitlerinin Seviyelerini Ve Ürünlerine Toprakdan Transfer Faktörlerini Saptamak”, Yüksek Lisans Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, 1-25, (2007)
- [3]. Duran, S. U., “Doğu Karadeniz Bölgesinde Toprakta Radyasyon Ölçümü”, Yüksek Lisans Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, 20-55, (2006)
- [4]. Gür, F., Yaprak, G., “Gediz Havzasında Radyosezyum Dağılımı”, **Ege Üniversitesi Nükleer Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 1-3, (2001)
- [5]. Arıkan, İ. H., “Çevresel Radyasyonun Canlılığın Sürdürülebilirliğine Etkileri”, Doktora Tezi, **Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü**, Ankara, 1-26, (2007)
- [6]. Güray, R. T., “Cesium-137 Levels In Surface Soils Over The Black Sea Coast Of Turkey”, Yüksek Lisans Tezi, **Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 10-50, (1992)
- [7]. Karahan, G., Bayulken, A., “Assessment of gamma dose rates around Istanbul (Turkey)”, **Journal of Environmental Radioactivity 47**, 213-221, (2000).
- [8]. Sroor, A., El-Bahi, S. M., Ahmed, F., Abdel-Haleem, A. S., “Natural Radioactivity And Radon Exhalation Rate Of Soil İnsouthern Egypt”, **Applied Radiation and Isotopes 55**, 873–879, (2001).
- [9]. Kannan, V., Rajan, M.P., Iyengar, M.A.R., Ramesh, R., “Distribution Of Natural And Anthropogenic Radionuclides İn Soil And Beach Sand Samples Of Kalpakkam (India) Using Hyper Pure Germanium (HPGe) Gamma Ray Spectrometry”, **Applied Radiation and Isotopes 57**, 109–119, (2002).
- [10]. Bikit, I., Slivka, J., Conkic, Lj., Krmar, M., Veskovic, M., Zikic-Todorovic, N., Varga, N., Curcic, S., Mrdja, D., “Radioactivity OF The Soil İn Vojvodina”, **Journal of Environmental Radioactivity 78**, 11-19, (2005).
- [11]. Kurnaz, A., Küçükömeroğlu, B., Keser, R., Okumusoglu, N. T., Korkmaz, F., Karahan, G., Çevik, U., “Determination Of Radioactivity Levels And Hazards Of Soil And Sediment Samples İn Firtina Valley (Rize, Turkey)”, **Applied Radiation and Isotopes 65**, 1281-1289, (2007).

- [12]. KAM, E., ILGAR, R., “Determination Of Environmental Radioactivity Of Drinking Water, Soil And Air in Edremit Gulf Shores”, *Journal of New World Sciences Academy*, 1306-3111, (2007).
- [13]. Karahan, G., Değerlier, M., Özger, G., “Radioactivity Concentrations And Dose Assessment For Soil Samples Around Adana, Turkey”, *Journal of Environmental Radioactivity* **99**, 1018-1025, (2008)
- [14]. Dugalic, G., Krstic, D., Jelic, M., Nikezic, D., Milenkovic, B., Pucarevic, M., Zeremski-Skoric, T., “Heavy Metals, Organics And Radioactivity In Soil Of Western Serbia”, *Journal of Hazardous Materials* **177**, 697-702, (2010).
- [15]. Özger, A. G., “Ceyhan, Yumurtalık Ve Pozantı Bölgelerinin dogal Radyoaktivite Düzeylerinin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü*, Adana, 1-65, 2005
- [16]. Tanyel, B., “Nükleer Fizik”, *Ege Üniversitesi basımevi*, İzmir, 110-115, (1994)
- [17]. Açık Öğretim Fakültesi, <http://www.aof.anadolu.edu.tr/kitap/EHSM/1222/unite13.pdf>, (**Ziyaret tarihi:10 Haziran 2010**)
- [18]. Seyrek, E., “Radyo İzotopların Üretimi Ve Radyoterapide Kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Eğitim Fakültesi Fizik Eğitimi Anabilim Dalı*, Ankara, 1-26, (2007)
- [19]. Krane, K. S., “Nükleer Fizik”, 1.Cilt, *Palme yayıncılık*, Ankara, 160-230, (2001).
- [20]. Arya, A. P., “Fundamental of Nuclear Physics”, 2nd ed, *Allyn and Bacon inc*, Boston, 19-41, (1968).
- [21]. T.A.E.K.1., <http://www.taek.gov.tr/ogrenci/r05.html>, (**Ziyaret Tarihi:15 Haziran 2010**)
- [22]. T.A.E.K.2., 2010, <http://www.taek.gov.tr/tr/bilgi-kosesi/radyasyon-insan-ve-cevre/81-radyasyonla-birlikte-yasiyoruz/181-dogal-radyasyonkaynaklari.html> (**Ziyaret Tarih: 30 Mayıs 2010**)
- [23]. Değerlier, M. “Adana İli Ve Çevresinin Çevresel Doğal Radyoaktivitesinin Saptanması Ve Doğal Radyasyonların Yıllık Etkin Doz Eşdeğerinin Bulunması”, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü*, Adana, 1-33, (2007)
- [24]. T.A.E.K.3., 2010, <http://www.taek.gov.tr/ogrenci/r05.html> (**Ziyaret Tarihi: 30 Mayıs 2010**)
- [25]. Akkoyun, S., “Gama Yön Tayini”, Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 10-30, (2007)

[26]. Yülek, G. G., “Radyasyon Fiziği ve Radyasyondan Korunma”, 1.Cilt, *Sek yayınları*, Ankara, 107-120, (2001).

[27]. Gilmore, G. R., “Practical Gamma-Ray Spectrometry”, 2nd ed, *John Wiley and Sons, inc.*, New York, 20-38, (2008)

[28]. Karadağ, M., “²⁴¹Am-be izotopik nötron kaynağı kullanılarak nötron aktivasyon analizi ile altın için dedekte edilebilir minimum miktarın belirlenmesi”, *Gazi Üniversitesi Eğitim Fakültesi*, Cilt 24, 115-124, (2004)

[29]. Knoll, G. F., “Radiation Detection and Measurement”, 3rd ed, *John Wiley and Sons, inc.*, New York, 80-430,(2000)

[30]. Debertin, K., Helmer, R.G., “Gamma and X-Ray Spectrometry With Semiconductor detectors ”, Amsterdam, 205-253, (1988)

EKLER

Ek-A



Eckert & Ziegler

Isotope Products

24937 Avenue Tibbitts
Valencia, California 91355

Tel 661-309-1010
Fax 661-257-8303

CERTIFICATE OF CALIBRATION MULTINUCLIDE STANDARD SOURCE

Customer: ECKERT & ZIEGLER ISOTOPE PRODUCTS GMBH Source No.: 1364-53-3
P.O. No.: 36977 Reference Date: 1-May-09 12:00 PST
Catalog No.: EG-ML Contained Radioactivity: 1.283 μ Ci 47.47 kB

Physical Description:

A. Capsule type: Customer supplied 170mL container
B. Nature of active deposit: Multinuclide distributed in 1.0 g/cc epoxy matrix
C. Active diameter/volume: Approximately 170mL (170.0 grams)
D. Backing: Plastic
E. Cover: Plastic

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity (μ Ci)	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 \pm 0.2 years	4.18	0.2863	442.8	7.0 %
60	Am-241	432.17 \pm 0.66 years	36.0	0.02914	388.1	3.0 %
88	Cd-109	462.6 \pm 0.7 days	3.63	0.4053	544.4	3.0 %
122	Co-57	271.79 \pm 0.09 days	85.6	0.01514	479.5	3.1 %
166	Ce-139	137.640 \pm 0.023 days	79.9	0.01947	575.6	3.0 %
279	Hg-203	46.595 \pm 0.013 days	81.5	0.05827	1757	3.0 %
392	Sn-113	115.09 \pm 0.04 days	64.9	0.07573	1819	3.0 %
514	Sr-85	64.849 \pm 0.004 days	98.4	0.09432	3434	3.0 %
662	Cs-137	30.17 \pm 0.16 years	85.1	0.06880	2166	3.0 %
898	Y-88	106.630 \pm 0.025 days	94.0	0.1510	5252	3.0 %
1173	Co-60	5.272 \pm 0.001 years	99.86	0.07988	2951	3.0 %
1333	Co-60	5.272 \pm 0.001 years	99.98	0.07988	2955	3.0 %
1836	Y-88	106.630 \pm 0.025 days	99.4	0.1510	5553	3.0 %

Method of Calibration:

This source was prepared from weighed aliquots of solutions whose concentrations in μ Ci/g were determined by gamma spectrometry.

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP participates in a NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (as in NRC Regulatory Guide 4.15).
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
- Overall uncertainty is calculated at the 99% confidence level.
- This source has a working life of 1 year.

Quality Control

17 Apr 09
Date

EZIP Ref. No.: 1364-53

ISO 9001 CERTIFIED

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Industrial Gauging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504

EK B**Acceptance Limits**

Parameter Table 1 for Sample 1, Moss-Soil, Gamma emitting Radionuclides

Analyte	LAP(%)	MAB(%)
Ac-228	20	20
Am-241	25	20
Bi-214	20	20
Cs-137	20	20
K-40	20	20
Pb-210	20	20
Pb-212	20	20
Pb-214	20	20
Ra-226	20	20
Th-234	25	20
Tl-208	20	20

Parameter Table 2 for Sample 2, Spiked Water

Analyte	LAP(%)	MAB(%)
Co-57	10	10
Co-60	10	10
Cs-134	10	10
Cs-137	10	10
Eu-152	10	10

Parameter Table 3 for Sample 3, Spiked Water

Analyte	LAP(%)	MAB(%)
Co-57	10	10
Co-60	10	10
Cs-134	10	10
Cs-137	10	10
Eu-152	10	10

Parameter Table 4 for Sample 4, Spiked Water

Analyte	LAP(%)	MAB(%)
Co-57	10	10
Co-60	10	10
Cs-134	10	10
Cs-137	10	10
Eu-152	10	10

Evaluation on Sample 1, Moss-Soil, Gamma emitting Radionuclides
Reference Date: 15th of November 2009

Analyte	IAEA Value [Bq/kg d.m.]	IAEA Unc [Bq/kg d.m.]	Lab Value [Bq/kg d.m.]	Lab Unc [Bq/kg d.m.]	Lab Unc %	Rel. Bias %	z-Score	u-Test	Ratio Lab/IAEA	A1	A2	Trueness	P(%)	Precision	Final Score
Ac-228	37.0	2.0	37	2	5.41	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	7.30	A	7.64	A	A
Am-241	2.2	0.2	1.72	1.65	107.56	-21.82	-2.18	-0.26	0.78	0.46	4.80	A	107.94	N	N
B-214	24.8	2.0	21	1	4.76	-15.32	-1.53	-1.70	0.85	3.80	5.77	A	9.37	A	A
Cs-137	425	10	406	13	3.20	-4.47	-0.45	-1.16	0.96	19.00	42.32	A	3.97	A	A
K-40	550	20	521	19	3.65	-5.27	-0.53	-1.05	0.95	29.00	71.17	A	5.15	A	A
Pb-210	424	20	540	156	28.89	27.36	2.74	0.74	1.27	116.00	465.77	A	29.27	N	N
Pb-212	37.0	1.5	34	2	5.88	-8.11	-0.81	-1.20	0.92	3.00	6.45	A	7.14	A	A
Pb-214	26.0	2.0	24	1	4.17	-7.69	-0.77	-0.89	0.92	2.00	5.77	A	8.75	A	A
Ra-228	25.1	2.0	31	4	12.90	23.51	2.35	1.32	1.24	5.90	11.54	A	15.17	A	A
Th-234	25.5	3.0	56	46	82.14	119.61	11.96	0.66	2.20	30.50	118.93	A	82.68	N	N
Tl-208	13.0	0.5	11.6	0.6	5.17	-10.77	-1.08	-1.79	0.89	1.40	2.02	A	6.45	A	A

Evaluation on Sample 2, Spiked Water

Reference Date: 15th of November 2009

Analyte	IAEA Value [Bq/kg]	IAEA Unc [Bq/kg]	Lab Value [Bq/kg]	Lab Unc [Bq/kg]	Lab Unc %	Rel. Bias %	z-Score	u-Test	Ratio Lab/IAEA	A1	A2	Trueness	P(%)	Precision	Final Score
Co-57	7.5	0.15	6.9	0.3	4.35	-8.00	-0.80	-1.79	0.92	0.60	0.87	A	4.79	A	A
Co-60	6.0	0.12	6.5	0.3	4.62	8.33	0.83	1.55	1.08	0.50	0.83	A	5.03	A	A
Cs-134	13.9	0.28	12.8	0.5	3.91	-7.91	-0.79	-1.92	0.92	1.10	1.48	A	4.40	A	A
Cs-137	9.5	0.19	10.0	0.4	4.00	5.26	0.53	1.13	1.05	0.60	1.14	A	4.47	A	A
Eu-152	11.3	0.23	11.3	0.8	7.08	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	2.15	A	7.37	A	A

Evaluation on Sample 3, Spiked Water

Reference Date: 15th of November 2009

Analyte	IAEA Value [Bq/kg]	IAEA Unc [Bq/kg]	Lab Value [Bq/kg]	Lab Unc [Bq/kg]	Lab Unc %	Rel. Bias %	z-Score	u-Test	Ratio Lab/IAEA	A1	A2	Trueness	P(%)	Precision	Final Score
Co-57	2.5	0.05	2.0	0.2	10.00	-20.00	-2.00	-2.43	0.80	0.50	0.53	A	10.20	N	N
Co-60	2.1	0.04	2.7	0.2	7.41	28.57	2.86	2.94	1.28	0.60	0.53	N	7.65	A	N
Cs-134	4.6	0.1	4.3	0.2	4.65	-6.52	-0.65	-1.34	0.93	0.30	0.58	A	5.13	A	A
Cs-137	3.2	0.06	3.0	0.2	5.56	12.50	1.25	1.92	1.13	0.40	0.54	A	5.86	A	A
Eu-152	3.7	0.08	4.4	0.5	11.36	18.92	1.89	1.38	1.19	0.70	1.31	A	11.57	N	N

Evaluation on Sample 4, Spiked Water

Reference Date: 15th of November 2009

Analyte	IAEA Value [Bq/kg]	IAEA Unc [Bq/kg]	Lab Value [Bq/kg]	Lab Unc [Bq/kg]	Lab Unc %	Rel. Bias %	z-Score	u-Test	Ratio Lab/IAEA	A1	A2	Trueness	P(%)	Precision	Final Score
Co-57	7.5	0.15	6.4	0.3	4.60	-14.67	-1.47	-3.28	0.85	1.10	0.87	N	5.10	A	N
Co-60	6.0	0.12	5.9	0.3	5.08	-1.67	-0.17	-0.31	0.98	0.10	0.83	A	5.46	A	A
Cs-134	13.9	0.28	12.5	0.5	4.00	-10.07	-1.01	-2.44	0.90	1.40	1.48	A	4.48	A	A
Cs-137	9.5	0.19	9.8	0.4	4.08	3.16	0.32	0.68	1.03	0.30	1.14	A	4.55	A	A
Eu-152	11.3	0.23	10.1	0.9	8.91	-10.62	-1.06	-1.29	0.89	1.20	2.40	A	9.14	A	A

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Diyarbakır'da doğdu. İlköğrenim, Orta ve lise öğrenimini burada tamamlayıp 2001 yılında Kocaeli Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü Programını kazandı. 2006 yılında üniversiteden mezun olup aynı sene Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Programını kazandı ve hala Fizik Yüksek Lisans programında öğrenimini sürdürmektedir.