

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİZİK  
ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DİLOVASI/KOCAELİ BÖLGESİNDEKİ TOPRAK  
NUMUNELERİNDEKİ DOĞAL VE YAPAY RADYOAKTİVİTE  
KONSANTRASYONLARININ BELİRLENMESİ**

**SEVDA SENEM DOĞAN**

**KOCAELİ 2019**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİZİK**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

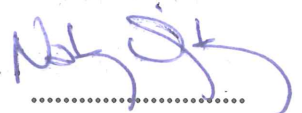
**DİLOVASI/KOCAELİ BÖLGESİNDEKİ TOPRAK**  
**NUMUNELERİNDEKİ DOĞAL VE YAPAY RADYOAKTİVİTE**  
**KONSANTRASYONLARININ BELİRLENMESİ**

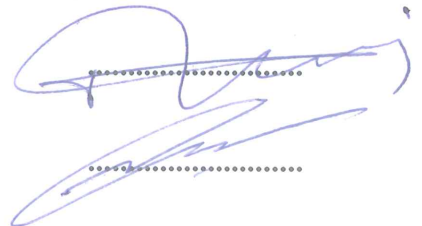
**SEVDA SENEM DOĞAN**

**Prof. Dr. Nalan ÖZKAN GÜRAY**  
**Danışman, Kocaeli Üniv.**

**Doç. Dr. Hayriye SUNDU PAMUK**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**

**Doç. Dr. Nilgün DEMİR**  
**Jüri Üyesi, Bursa Uludağ Üniv.**

  
.....

  
.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 16.07.2019**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince tüm bilgilerini benimle paylaşmaktan kaçınmayan, her türlü konuda desteğini benden esirgemeyen ve tezimde büyük emeği olan danışmanım Prof. Dr. Nalan ÖZKAN GÜRAY'a, ölçümlerim ve sonuçlarım için emeğini benden esirgemeyen Prof. Dr. Taygun GÜRAY'a, ölçümlerin laboratuvarında titizlikle yürütüp yardımcı olan arkadaşım Ezgi TANTOĞLU'na, tezin yazım aşamasında yol gösterici ve yardımcı olan değerli büyüğüm, Öğretim Görevlisi Ahmet KARAYEL'e, bu yoğunlukta ve zorlu süreçte yanımda olan eşim Erdal DOĞAN'a ve bu zamana kadar beni maddi, manevi destekleyen ve bugünlere getiren sevgili annem Aysun GÜNEŞ, babam Turan GÜNEŞ'e ve üniversite hayatım boyunca hep yanımda, arkamda olan sevgili büyüklerim babannem Emine GÜNEŞ, dedem Sezai GÜNEŞ'e en derin minnet ve sevgilerimi sunarım .

Temmuz 2019

Sevda Senem DOĞAN

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
GİRİŞ .....	1
1. TEMEL BİLGİLER .....	4
1.1. Radyasyon .....	4
1.1.1. İyonlaştırıcı radyasyon .....	4
1.1.2. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon .....	5
1.2. Radyoaktivite.....	5
1.2.1. Başlangıçta mevcut olan radyonüklitler (primordial) .....	6
1.2.1.1. <sup>238</sup> U (Uranyum) serisi .....	7
1.2.1.2. <sup>235</sup> U (Aktinyum) serisi .....	8
1.2.1.3. <sup>232</sup> Th (Toryum) serisi .....	8
1.2.2. Kozmik ışınlarının etkileşileri sonucu oluşan (kozmojenik).....	9
1.2.3. İnsan üretimi radyonüklitler .....	9
1.3. Radyoaktif Bozunma Kanunu .....	10
1.4. Aktivite.....	11
1.5. Yarı Ömür (t <sub>1/2</sub> ) .....	11
1.6. Ortalama Ömür.....	11
1.7. Biyolojik Yarı Ömür (t <sub>1/2B</sub> ) .....	12
1.9. Zincirleme Radyoaktif Bozunma .....	13
1.10. Radyoaktif Denge.....	13
1.11. Radyoaktivite ve Radyasyon Doz Birimleri .....	16
1.11.1. Aktivite birimi .....	16
1.11.2. Soğurulma doz birimleri.....	16
1.11.3. Biyolojik (eşdeğer) doz .....	16
1.11.4. Işınlama doz birimi.....	16
1.12. Gama Radyasyonunun Madde İle Etkileşimi .....	17
1.12.1. Fotoelektrik olay .....	17
1.12.2. Compton saçılması .....	17
1.12.2. Çift oluşumu.....	18
2. DENEY DÜZENEGİ .....	20
2.1. Gama Sayım Sistemi .....	20
2.2. Yarı İletken Dedektörler.....	22
2.3. HPGe Gama Spektroskopisi .....	23
2.4. Veri Analizi İçin Ön Çalışmalar (Gama Sayım Sistemi).....	25
2.4.1. Enerji kalibrasyonu .....	25
2.4.2. Verim kalibrasyonu .....	26
2.4.3. Pik alan hesabı.....	27
2.4.4. Aktivite ve spesifik aktivite hesabı .....	28

2.4.5. Hata hesabı .....	29
3. DENEY VE HESAPLAMALARI .....	30
3.1. Numune Alınacak Yerin Coğrafi Yapısı .....	30
3.2. Numunelerin Toplanması .....	32
3.3. Numunelerin Radyasyon Ölçümü için Hazırlanması .....	34
3.3.1. Numunelerin sayımı .....	35
3.4. Deneysel Hesaplamalar ve Yorum .....	36
3.4.1. Enerji kalibrasyonu .....	36
3.4.2. Verim kalibrasyonu .....	37
3.4.3. Aktivite .....	38
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	39
4.1. Numunelerin Aktivite Değerleri .....	39
4.2. Yorum .....	57
KAYNAKLAR .....	59
EKLER .....	61
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	63
ÖZGEÇMİŞ .....	64

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Elektromanyetik Spektrumu .....	4
Şekil 1.2.	Kararlılık Eğrisi .....	6
Şekil 1.3.	$^{238}\text{U}$ (Uranyum) bozunma ürünleri şeması.....	8
Şekil 1.4.	$^{235}\text{U}$ (Aktinyum) serisinin radyoaktif bozunum zinciri.....	8
Şekil 1.5.	$^{232}\text{Th}$ (Toryum) serisinin bozunum şeması .....	9
Şekil 1.6.	a: Fotoelektrik olay örneği b: Karakteristik X Işını yayınlanması örneği.....	18
Şekil 1.7.	Compton Saçılması .....	18
Şekil 1.8.	Çift Oluşumu.....	19
Şekil 2.1.	Dedektör Sisteminin Genel Elektronik Şeması.....	20
Şekil 2.2.	Tipik Germanyum Dedektör ve Dewar Sistemi.....	21
Şekil 2.3.	Yarı İletken Dedektör Şeması.....	23
Şekil 2.4.	ORTEC GEM25P4-70 HPGe Gama Dedektör Sistemi.....	24
Şekil 2.5.	HPGe Dedektörünün açık ve üstten görünümü .....	25
Şekil 2.6.	MAESTRO-32 çok kanallı analizörü ve NaI(Tl) detektörü kullanılarak $^{137}\text{Cs}$ kaynağı için elde edilen spektrum.....	27
Şekil 2.7.	Pik alan hesabında kullanılan parametrelerin gösterimi: B fon sayımı, Na pik altında kalan toplam alan, Nnet pik altındaki net alan (fon sayımı çıkarılmış), Ci ise i kanaldaki toplam sayımdır. (Pik 6 kanal genişliğinde seçilmiştir) .....	28
Şekil 3.1.	Dilovası görsel haritası .....	30
Şekil 3.2.	Dilovası İlçesi ve Çevresinin Google Earth Uydu Görüntüsü .....	31
Şekil 3.3.	Numunelerin toplandığı bölgenin haritada gösterimi .....	32
Şekil 3.4.	Toprak numunelerini alma aletleri.....	34
Şekil 3.5.	Numune kapları.....	35
Şekil 3.6.	Enerji kalibrasyon grafiği .....	37
Şekil 3.7.	Verim grafiği.....	37
Şekil 4.1.	Tüm toprak numuneleri için $^{238}\text{U}$ spesifik aktiviteleri .....	55
Şekil 4.2.	Tüm toprak numuneleri için $^{232}\text{Th}$ spesifik aktiviteleri .....	55
Şekil 4.3.	Tüm toprak numuneleri için $^{40}\text{K}$ spesifik aktiviteleri .....	56
Şekil 4.4.	Tüm toprak numuneleri için $^{137}\text{Cs}$ spesifik aktiviteleri.....	56
Şekil 4.5.	Tüm toprak numuneleri için $^{238}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ ve $^{137}\text{Cs}$ spesifik aktivite değerlerinin gösterimi .....	57
Şekil 4.6.	$^{238}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ için yüksek ve düşük olan bölgelerin grafikte gösterimi.....	58

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1.	Başlangıç (Primordial) nüklitler .....	7
Tablo 1.2.	$^{238}\text{U}$ 'in radyoaktif bozunum zinciri.....	7
Tablo 1.3.	Başlangıç (Primordial) nüklitler .....	9
Tablo 1.4.	İnsan üretimi olan Radyonüklitler .....	10
Tablo 1.5.	Radyoaktivite ve radyasyon doz birimleri ve birim dönüşümleri.....	17
Tablo 2.1.	Enerji kalibrasyonunda kullanılan radyonüklitlerin yayınladıkları enerji değerleri .....	26
Tablo 3.1.	Toplanan numunelerin koordinatları .....	33
Tablo 3.2.	Toplanan numunelerinin kütleleri.....	35
Tablo 3.3.	Spektrumdaki gama enerjilerine karşılık gelen kanal numaraları .....	36
Tablo 4.1.	100000 saniye sayılan 19072017D10 toprak numunesi .....	39
Tablo 4.2.	99964 saniye sayılan 19072017D5 toprak numunesi .....	40
Tablo 4.3.	99975 saniye sayılan 19072017D11 toprak numunesi .....	40
Tablo 4.4.	99964 saniye sayılan 19072017D13 toprak numunesi .....	41
Tablo 4.5.	199932 saniye sayılan 19072017D14 toprak numunesi .....	41
Tablo 4.6.	99956 saniye sayılan 19072017D19 toprak numunesi .....	42
Tablo 4.7.	199939 saniye sayılan 19072017D21 toprak numunesi .....	42
Tablo 4.8.	99791 saniye sayılan 19072017D24 toprak numunesi .....	43
Tablo 4.9.	99961 saniye sayılan 19072017D26 toprak numunesi .....	43
Tablo 4.10.	99916 saniye sayılan 19072017D1 toprak numunesi .....	44
Tablo 4.11.	99972 saniye sayılan 19072017D3 toprak numunesi .....	44
Tablo 4.12.	99736 saniye sayılan 25072017D22 toprak numunesi .....	45
Tablo 4.13.	94581 saniye sayılan 25072017D25 toprak numunesi .....	45
Tablo 4.14.	99973 saniye sayılan 19072017D15 toprak numunesi .....	45
Tablo 4.15.	146578 saniye sayılan 22022019DEK1 toprak numunesi.....	46
Tablo 4.16.	119536 saniye sayılan 19072017D2 toprak numunesi .....	47
Tablo 4.17.	87836 saniye sayılan 22022019DEK2 toprak numunesi.....	47
Tablo 4.18.	106115 saniye sayılan 19072017D4 toprak numunesi .....	47
Tablo 4.19.	99767 saniye sayılan 19072017D6 toprak numunesi .....	48
Tablo 4.20.	230541 saniye sayılan 19072017D6BTN toprak numunesi .....	49
Tablo 4.21.	89242 saniye sayılan 19072017D7 toprak numunesi .....	49
Tablo 4.22.	89054 saniye sayılan 19072017D8 toprak numunesi .....	49
Tablo 4.23.	86744 saniye sayılan 19072017D9 toprak numunesi .....	50
Tablo 4.24.	88450 saniye sayılan 19072017D12 toprak numunesi .....	51
Tablo 4.25.	99824 saniye sayılan 19072017D16 toprak numunesi .....	51
Tablo 4.26.	82520 saniye sayılan 19072017D17 toprak numunesi .....	52
Tablo 4.27.	82607 saniye sayılan 19072017D20 toprak numunesi .....	52
Tablo 4.28.	84715 saniye sayılan 19072017D23 toprak numunesi .....	53
Tablo 4.29.	99881 saniye sayılan 19072017D18 toprak numunesi .....	53
Tablo 4.30.	Her toprak için hesaplanan spesifik aktivitelerinin değerleri .....	54

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$A_0$	: Başlangıç Radyoaktivitesi
$t_{1/2}$	: Yarı Ömür
$\tau$	: Ortalama Ömür
$\lambda$	: Bozunma Sayısı
$e^-$	: Elektron
$e^+$	: Pozitron
$p$	: Proton
$T_e$	: Elektronun Kinetik Enerjisi
$E_\gamma$	: Foton Enerjisi
$B_e$	: Elektronun Bağlanma Enerjisi
$K_\alpha$	: Karakteristik X Işını
$I_\gamma$	: Fotonun Yayınlanma Olasılığı
$\tau$	: Ortalama Ömür
$t_{1/2 B}$	: Biyolojik Yarı Ömür
$t_{1/2 \text{ etkin}}$	: Etkin Yarı Ömür
$\alpha$	: Alfa
$\beta$	: Beta
$\gamma$	: Gama
$\epsilon$	: Verim
$m$	: Kütle
$c$	: Işık Hızı
$\nu$	: Nötrino
$n$	: Nötron

## Kısaltmalar

A	: Aktivite
ADC	: Analog Dijital Çevirici
CaCO <sub>3</sub>	: Kalsiyum Karbonat
Cs	: Sezyum
dk	: Dakika
E	: Enerji
FWHM	: Pikin Maksimum Yarı Tam Genişliği
Ge	: Germanyum
HPGe	: Yüksek Saflıkta Germanyum
I	: İyot
K	: Potasyum
keV	: Kilo Elektronvolt
kg	: Kilogram
KN	: Kanal Numarası
MCA	: Çok Kanallı Analizör



MDA	: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)
MeV	: Milyon Elektronvolt
N	: Nötron Sayısı
N	: Radyoaktif Çekirdek Sayısı
NCRP	: National Council on Radiation Protection and Measurement (Radyasyondan Korunma ve Ölçme Ulusal Konseyi)
pH	: Hidrojen İyonu Yoğunluğu
s	: Saniye
sa	: Saat
SA	: Spesifik Aktivite
Te	: Tellür
Th	: Toryum
TOM	: Toplam Organik Madde Miktarı
U	: Uranyum
y	: Yıl
Z	: Atom numarası
Xe	: Ksenon

## **DİLOVASI/KOCAELİ BÖLGESİNDEKİ TOPRAK NUMUNELERİNDEKİ DOĞAL VE YAPAY RADYOAKTİVİTE KONSANTRASYONLARININ BELİRLENMESİ**

### **ÖZET**

Dilovası, Türkiye'nin en büyük organize sanayi bölgesidir. Bu bölgede radyoaktivite seviyeleri hakkında bilgi bulunmadığı için Dilovası ilçesindeki belirlenen koordinatlardaki radyasyon riskini belirlemek ve radyoaktivite seviyelerinin veritabanını oluşturmak amacı ile 29 farklı toprak örneği toplandı. Toprak örneklerinde  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve  $^{137}\text{Cs}$ 'nin aktivite konsantrasyonları % 25 verime sahip HPGe (High Purity Germanium) dedektörü kullanılarak belirlendi.

$^{238}\text{U}$  izotopunun en yüksek spesifik aktivite değeri  $48,61 \pm 2,2 \text{ Bq kg}^{-1}$  (D20),  $^{232}\text{Th}$  izotopunun en yüksek spesifik aktivite değeri  $57,96 \pm 2,07 \text{ Bq kg}^{-1}$  (D22),  $^{40}\text{K}$  izotopunun en yüksek spesifik aktivite değeri  $160,75 \pm 0,01 \text{ Bq kg}^{-1}$  (D17) ve  $^{137}\text{Cs}$  izotopunun ise en yüksek spesifik aktivite değeri  $8,57 \pm 0,06 \text{ Bq kg}^{-1}$  (D17) olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada, numune örneklerinin büyük bir kısmında oldukça düşük radyoaktivite seviyeleri gözlenmiştir. Ölçülen bu radyoaktivite seviyeleri çevresel sağlık sorunu oluşturmayacak düzeydedir.

**Anahtar Kelimeler:** Spesifik Aktivite, HPGe Gama Spektroskopisi, Toprakta Doğal ve Yapay Radyonüklidler, Dilovası.

## NATURAL AND ARTIFICIAL RADIOACTIVITY CONCENTRATIONS OF SOIL SAMPLES IN DİLOVASI DISTRICT OF KOCAELİ, TURKEY

### ABSTRACT

Dilovası is Turkey's largest organized industrial zone. Since there was no information about radioactivity levels in this region, 29 different soil samples were collected in order to determine the radiation risk at the determined coordinates in Dilovası district and to create a database of radioactivity levels. Activity concentrations of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in soil samples were determined by using HPGe (High Purity Germanium) detector with 25% yield.

Highest specific activity value of  $^{238}\text{U}$  isotope  $48.6 \pm 2.2$  Bq kg<sup>-1</sup> (D20), highest specific activity value of  $^{232}\text{Th}$  isotope  $58.0 \pm 2.1$  Bq kg<sup>-1</sup> (D22), highest specific activity of  $^{40}\text{K}$  isotope value of  $160.75 \pm 0.01$  Bq kg<sup>-1</sup> (D17) and the highest specific activity value of  $^{137}\text{Cs}$  isotope was determined as  $8.57 \pm 0.06$  Bq kg<sup>-1</sup> (D17).

In this study, very low radioactivity levels were observed in the majority of sample samples. These measured radioactivity levels do not cause environmental health problems.

**Keywords:** Specific Activity, HPGe Gamma Spectroscopy, Natural and Artificial Radionuclides in Soil, Dilovası.

## GİRİŞ

Tüm canlılar hayatları boyunca doğal ve yapay radyasyona maruz kalmaktadırlar. Doğal Radyasyon, insanların katkısı ve etkisi olmadan oluşan radyasyonlardır. İnsanlar maruz kaldığı doğal radyasyon dozunun % 87'sini yer kabuğunda bulunan  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  ve bu radyonüklidlerin bozunma ürünleri ile doğal radyonüklid olan  $^{40}\text{K}$ 'dan almaktadırlar [1]. Dünya üzerinde yaşayan bu canlılar yaşamı süresince maruz kaldıkları radyasyonun temel kaynağı doğal radyasyon olduğundan nerede yaşadığımızı, toprağın bileşimine, içinde yaşadığımız binaların yapı malzemelerine, hava koşullarına, yüksekliğe bağlı olarak bu doğal radyoaktivite seviyeleri, yoğun şekilde yaşanan ve zaman geçirilen bölgelerde belirlenip bilinmesi gerekir. Bir Bölgenin doğal radyoaktivite farkı yer kabuğunun jeolojik yapısına, deniz seviyesi yüksekliğine ve kimyasal özelliğine bağlı olarak değişmektedir. Doğal radyasyon düzeylerinin hassaslıkla belirlenmesi gelecekte alınacak önlemler açısından önemlidir. Ancak bu şekilde, bölgenin doğru radyoaktivite analizi yapılabilir.

Tüm canlıların etkilenip maruz kaldığı bir diğer doğal radyasyon kaynağı da kozmik ışınlardır. İnsanlar 1895 yılına kadar sadece doğal radyasyonlara maruz kaldılar. 1895 yılında X ışınlarının ve 1942'de de nükleer reaktörlerinin keşfiyle, radyoizotopların bol ve ucuz elde edilebilmesi ile günlük yaşamımızda çeşitli yapay radyonüklidler üretilmeye başlandı. 1960'lı yıllarda yapılmaya başlanan yeraltı ve yerüstü nükleer deneyimler sonucu oluşan radyoizotoplar, radyoaktif yağışlar şeklinde yayılarak çeşitli ülkeleri etkilemiş, 26 Nisan 1986'da Çernobil Nükleer Elektrik Santralinde oluşan kazadan sonra radyoaktif dumanlar ilk olarak atmosferin 2000 metre yüksekliğine erişmiş, daha sonra etkin rüzgarların yönlerine göre hava akımlarının etkisi altında sırası ile İskandinavya'ya, Orta Avrupa'ya, Güneydoğu Avrupa'ya ve Türkiye'ye ulaşmıştır. Mayıs 1986'nın ilk haftası ile başlayan yağışlarla bitki örtüsüne, toprağa bulaşmış ve radyoaktif kirlenmeye neden olmuştur [2].

Nükleer bomba denemeleri sonucu meydana gelen nükleer serpintiler ve radyasyonun Tıbbi Tarımsal ve Endüstriyel amaçla kullanılmasındaki artışlar insanların günümüzde yapay radyasyona maruz kaldığı anlamına gelmektedir. Nükleer silahların, denemelerin ve Nükleer Santrallerinde meydana gelen kazaların sebep olduğu bu radyoaktif serpintiler birçok ülke ve ülke halkının hemen hemen hepsinde tehlikelere maruz kalmalarına yol açabilmektedir. Farklı türlerdeki iyonlaştırıcı radyasyon türlerinin farklı biyolojik etkileri gözlemlenmiş olup bu etkenlerde yüksek biyolojik zararlar verebilirler. Bu sebeple iyonlaştırıcı radyasyonların nicel ölçümlerini sağlayacak birçok metodların bulunması gerekmiştir. İyonlaştırıcı radyasyonun ölçümleri ve algılanabilir olması ise dedektörler ile sağlanır. Bu ışınlarının tespiti için de birçok dedektör sistemi geliştirilmiştir [3].

Bu çalışmada, Kocaeli ilinde bulunan yüz ölçümü 123 km<sup>2</sup> olan Dilovası bölgesinden, sanayinin fazla potansiyele sahip olduğu yerlerden toprak örnekleri toplanmıştır. Toplanan numuneler de, doğal radyoaktif elementlerin (<sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th ve <sup>40</sup>K) ve Çernobilden kaynaklı radyonüklid (<sup>137</sup>Cs) elementinin gama spektroskopi yöntemiyle aktiviteleri Kocaeli Üniversitesi Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarında HPGe (High Purity Dedector) dedektörü ile belirlenmiştir. Böylece Kocaeli İli Dilovası ilçesi topraklarının, insan sağlığı, çevre kirliliği açısından doğal radyasyon seviyesi incelenmiş ve belirlenmiştir.

Kocaeli'nin Dilovası bölgesinde toprak numuneleri ile ilgili yapılmış herhangi bir çalışma mevcut değildir. Bu açıdan, bu çalışma ile bölgede bir veri tabanı elde edilmeye çalışıldı. Veri tabanının elde edilmesi ile çevresel doğal radyasyon miktarlarının belirlenmiş ve bu belirlilik ile birlikte herhangi olası nükleer kaza sonrasında seviye tespiti açısından da önemli bir adım atılmıştır.

Bu çalışmanın 1. bölümde temel bilgiler verilmiştir. Burada radyasyon kavramı ve iyonlaştırıcı radyasyon türleri ayrıntılı bir biçimde açıklanmıştır. Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarına değinilip, incelediğimiz gama radyasyonunun madde ile etkileşimlerinden bahsedilmiştir.

2. Bölümünde, gama radyasyon düzeylerinin belirlenmesinde kullanılan gama spektroskopi sisteminin düzeneği ve deneyde kullanılan sistemin özelliklerinden bahsedilmiştir.

3. Bölümünde, çalışmanın yapıldığı bölgedeki numunelerin sayıma hazır hale getirilmesi ve numunelerin fiziksel kimyasal özelliklerinin belirlenmesi anlatılıp, numunelerin sayımları ve hesaplarından bahsedilmiştir.

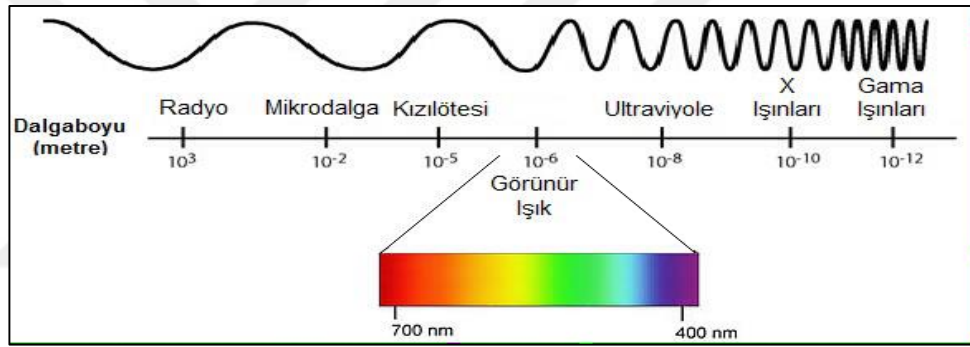
Son olarak 4. Bölümde ise elde edilen sonuçlar verilmiş ve değerlendirmesi yapılmıştır.



## 1. TEMEL BİLGİLER

### 1.1. Radyasyon

Kararsız çekirdeklerin, kararlı hale geçebilmek için ortama yaydıkları ışınlara radyasyon denir. Radyasyon, parçacık ve dalga tipli olmak üzere iki grupta toplanır. Parçacık radyasyonu, belli bir kütle ve enerjiye sahip çok hızlı hareket eden parçacıklardan oluşur. Dalga tipi radyasyon ise yüksek enerjili elektromanyetik dalgalardır. Görünür ışık, televizyon dalgaları, ultraviyole dalgaları en bilinen elektroanyetik dalgalar olup canlılar bu dalgaların etkisinde kalır.



Şekil 1.1. Elektromanyetik Spektrumu [4]

Radyasyon, ayrıca madde üzerinde meydana getirdiği etkiye göre; iyonlaştırıcı radyasyon ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak iki grupta toplanabilir.

#### 1.1.1. İyonlaştırıcı radyasyon

Atomla etkileşime girecek kadar güçlü enerjiye sahip (alfa veya beta parçacığı gibi hareket eden) yüklü parçacıkların bir dış etken ile atomun elektronlarından bir kaç tanesinin koparılması ile meydana getirdikleri etkiye

iyonlaştırma (iyonizasyon) denir. X Işınları, Gama Işınları, Alfa, Beta, Kozmik Işınlar ve Nötronlar olarak iyonlaştırıcı radyasyonlardır.

### 1.1.2. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon

Atomla etkileşime girecek kadar güçlü, kuvvetli, etkileşimli olmayan enerji seviyelerindeki elektromanyetik dalgaların atomların yörüngesinin de oluşan değişim hücre içinde büyük bir etkiye neden olmaz buna iyonlaştırıcı olmayan radyasyon denir Ultraviyole Işımlar, Kızılötesi Işımlar, Radyo Dalgaları ve Kozmik Işımlar iyonlaştırıcı olmayan radyasyonlardandır.

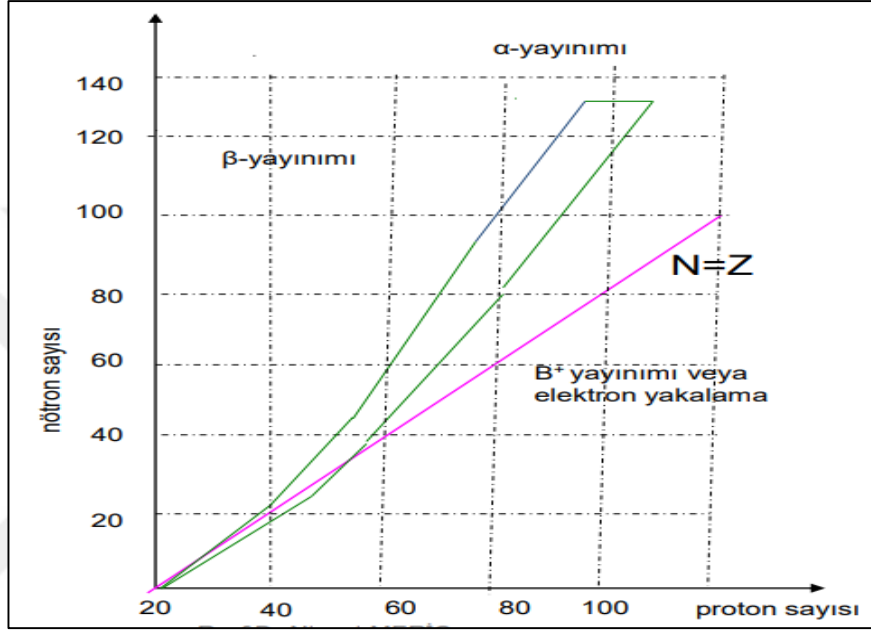
### 1.2. Radyoaktivite

Henri Becquerel'in 1896'da radyoaktiviteyi keşfetmesi ile atom ve çekirdeği hakkındaki fiziki bilgilere ulaşılmaya başlamıştır. Becquerel, kalın bir kağıda sarılmış olan uranyum ve potasyum sülfat içerikli numune, karanlık odada fotoğraf levhalarının yanına bırakıldı. Levhalar karanlık odada banyo edilmelerine rağmen ışığa maruz kalmış gibi netice verdiler. Becquerel bu deneyi tekrarladıktan sonra fotoğraf levhalarını etkileyen şeyin uranyum tuzundan yayınlanan radyasyon olduğuna karar verdi. Daha sonra yapılan çalışmalarda aynı radyasyonun havanın iyonlaşmasına da neden olduğu bulundu. Uranyum tuzundan başka bazı maddelerin de radyasyon yayınladıkları gözlemlendi ve bu olaya 'radyoaktivite', bu şekilde radyasyon yayınlayan elementlere de 'radyoaktif elementler' denildi. Becquerel'in keşfinden 2 yıl sonra 1898'de Marie Curi ve kocası Pierre Curie polonyum ve radyum adı verdikleri iki radyoaktif madde daha keşfettiler. Daha sonraki yıllarda da toryum, aktinyum, radyotoryum, mezotoryum ve diğer radyoaktif elementler bulunmuştur. Günümüzde ise elementlerin yüzlerce radyoaktif izotopları bilinmektedir [5].

Doğada var olan atomların bir kısmı kararlı çekirdeklere sahip iken, diğer kısım ise kararsız çekirdeklere sahiptirler. Şekil 1.2'de, nötron ve proton sayılarına göre oluşturulmuş olan kararlı ve kararsız çekirdeklerin dağılım grafiği bize, kararsız çekirdeklerin, kararlı çekirdeklerin oluşturmuş olduğu kararlılık eğrisinin her iki tarafında da olduğunu göstermektedir. Hafif elementlerin kararlı izotoplarında nötron sayısının proton sayısına oranı  $N/Z=1$ 'dir. Proton sayısı arttıkça protonlar arası elektrostatik itme kuvveti nükleonlar arasındaki çekim kuvvetlerinden daha büyük olduğundan çekirdekler kararsız hale dönüşürler.



Atom numarası 82'den büyük olan çekirdeklerin çok büyük bir kısmı kararsızdır. Kararsız çekirdekler parçalanarak yeni bir çekirdek oluştururlar ve oluşan bu yeni çekirdeğe 1. ürün denir. Eğer 1. üründe kararsız bir çekirdeğe sahipse parçalanarak yeni bir çekirdek meydana getirir. Bu yeni çekirdeğe de 2. ürün denir. Bu parçalanma olayı kararsız çekirdek kararlı hale gelinceye kadar devam eder. Böylece meydana gelen seriye 'Bozunma Serisi' veya 'Bozunma Zinciri' denilmektedir [5].



Şekil 1.2. Kararlılık Eğrisi [6]

1500'ün üzerinde farklı radyonüklit vardır. Bu radyonüklitler, başlangıçta oluşan yani dünyanın oluşumundan önce mevcut olan (Primordial), kozmik ışınlarının etkileşimleri sonucu oluşan (Kozmojenik) ve insan üretimi ile oluşan radyonüklitlerdir.

### 1.2.1 Başlangıçta mevcut olan radyonüklitler (primordial)

Radyoaktif izotopların çoğu, yeryüzünün yaşına kıyasla çok uzun yarı ömüre sahiptirler. Bu yüzden halen kararlı çekirdeklere bozunmaktadırlar.

Primordial radyonüklitler  $^{235}\text{U}$  (yarı ömrü  $7,10^8$  yıl),  $^{238}\text{U}$  (yarı ömrü  $4,5 \times 10^9$  yıl) ve  $^{232}\text{Th}$  (yarı ömrü  $1,4 \times 10^{10}$  yıl)'dır.

Tablo 1.1. Başlangıç (Primordial) nüklitler [7]

Nüklit	Sembol	Yarı Ömür	Doğal Aktivite
Uranyum 235	<sup>235</sup> U	7,04x10 <sup>8</sup> yıl	Tüm doğal uranyumun 0,72 % si
Uranyum 238	<sup>238</sup> U	4,47x10 <sup>9</sup> yıl	Tüm doğal uranyumun % 99,2745'i; Yaygın kaya çeşitlerindeki toplam uranyum 0,5 ilr 4,7 ppm
Toryum 232	<sup>232</sup> Th	1,41x10 <sup>10</sup> yıl	10,7 ppm kabuk ortalama yaygın kaya çeşitlerinde 1,6 ile 20 ppm
Radyum 226	<sup>226</sup> Ra	1,60x10 <sup>3</sup> yıl	Kireçtaşında 0,42 pCi/g (16 Bq/kg) ve volkanik kayalarda 1,3 pCi/g (48 Bq/kg)
Radon 222	<sup>222</sup> Rn	3,82 gün	Asal gazlar; US'deki havada yıllık ortalama konsantrasyon 0,016 pCi/L (0,6 Bq/m <sup>3</sup> ) den 0,75 pCi/L (28 Bq/m <sup>3</sup> ) değişir.
Potasyum 40	<sup>40</sup> K	1,28x10 <sup>9</sup> yıl	Toprak – 1-30 pCi/g (0,037-1,1 Bq/g)

Doğal radyoizotoplar atom numaraları 81-92 arasında değişen ağır çekirdeklerden oluşur. Bu kendiliğinden oluşan radyoaktif bozunma türü ürünler  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  bozunumu ile kararlı bir kurşun (Pb) izotopuna kadar bozunurlar. A kütle numaralarına bağlı olarak, dört seriden oluşurlar. Seriler ise aşağıda ki şekilde de ifade edilmektedir.

$A = 4n$  Toryum serisi

$A = 4n+1$  Neptinyum serisi

$A = 4n+2$  Uranyum serisi

$A = 4n+3$  Aktinyum serisi

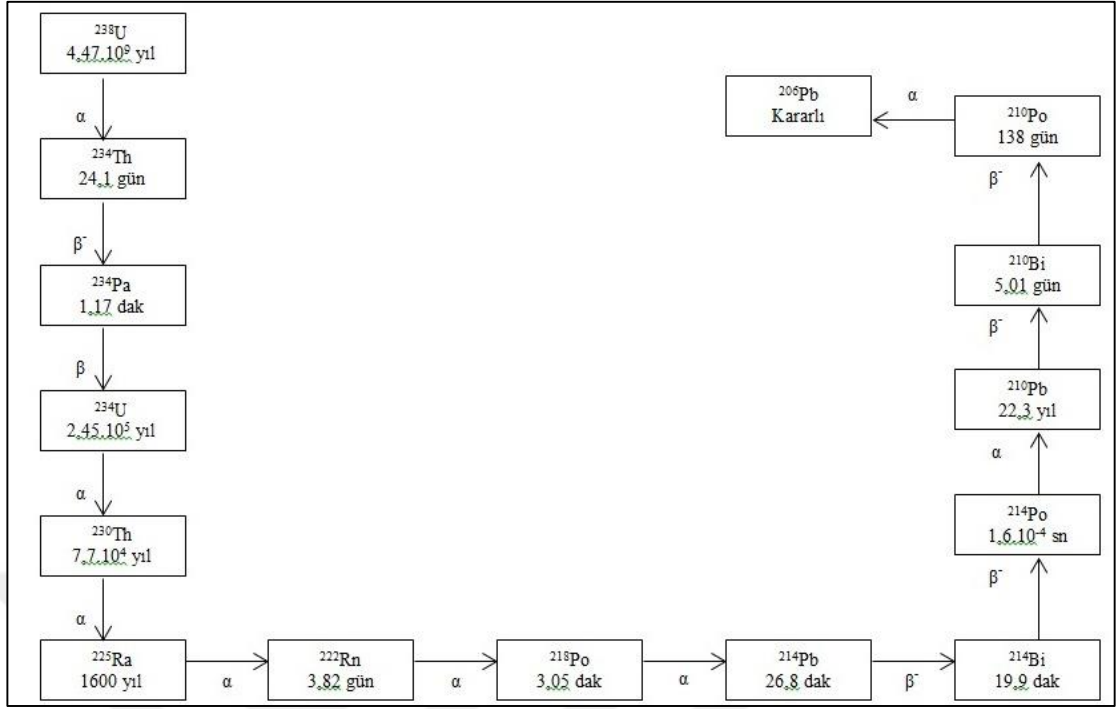
### 1.2.1.1. <sup>238</sup>U (Uranyum) serisi

Uranyum serisinin bozunma zincirinin ara ürünleri ve yayılan radyasyon çeşitleri ile birlikte aşağıda verilmiştir.

Bunların ise yarılanma süreleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

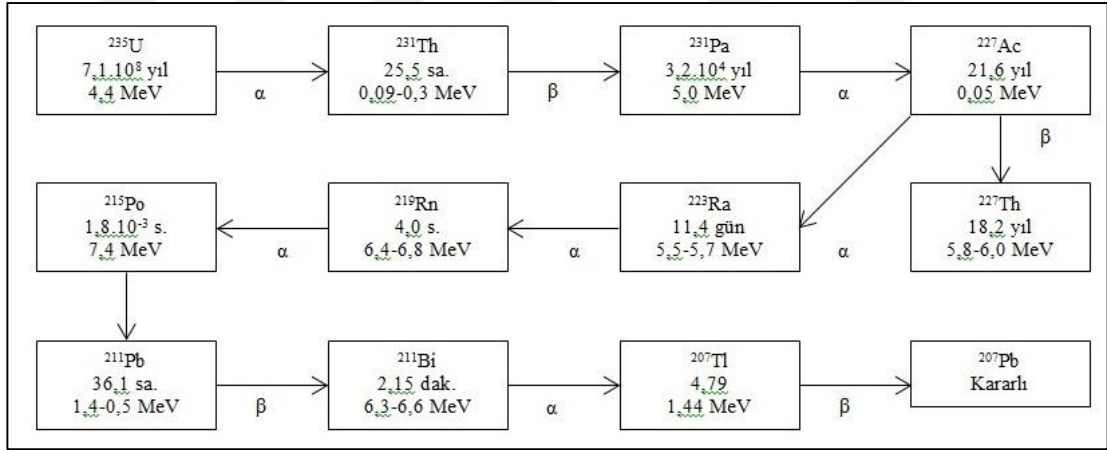
Tablo 1.2. <sup>238</sup>U'in radyoaktif bozunum zinciri [8].

Bozunma Zincirinin Ara Ürünleri	Yayılan Radyasyon Çeşitleri	Yarılanma Süresi
238-Uranyum	alfa	4 468 000 000 Yıl
238-Uranyum	alfa	24.1 Gün
Protaktinyum-234 m	beta,gama	1.17 Gün
234-Uranyum	alfa	45000 Yıl
230-Toryum	alfa	80000 Yıl
226-Radyum	alfa	1602 Yıl
222-Radon	alfa	3.823 Gün
218-Polonyum	alfa	3.05 Dakika
214-Kurşun	beta	26.8 Dakika
214-Bizmut	beta	19.7 Dakika
214-Polonyum	alfa	0.000164 Saniye
210-Kurşun	beta	22.3 Yıl
210-Bizmut	beta	5.01 Gün
210-Polonyum	alfa	138.4 Gün
206-Kurşun	Kararlı (radyoaktif Değil)	



Şekil 1.3.  $^{238}\text{U}$  (Uranyum) bozunma ürünleri şeması [9]

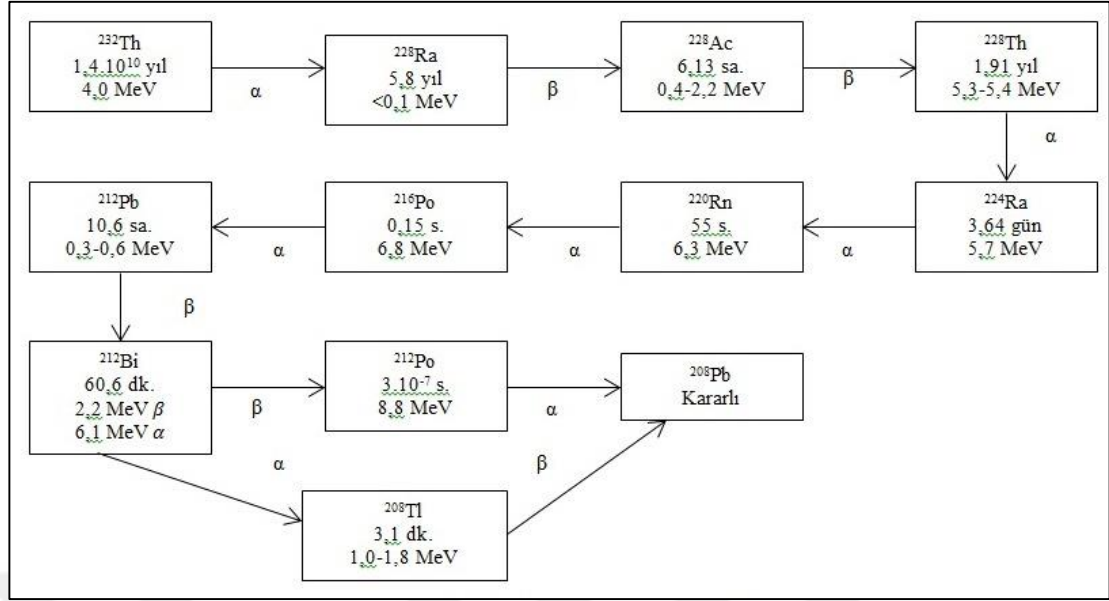
### 1.2.1.2. $^{235}\text{U}$ (Aktinyum) serisi



Şekil 1.4.  $^{235}\text{U}$  (Aktinyum) serisinin radyoaktif bozunum zinciri [10]

### 1.2.1.3. $^{232}\text{Th}$ (Toryum) serisi

$^{238}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$  arasındaki temel fark,  $^{232}\text{Th}$ 'in zincirdeki çok uzun ömürlü tek radyonüklit olmasıdır.  $^{232}\text{Th}$  serileri; ilki  $^{232}\text{Th}$  kendisi, ikincisi  $^{228}\text{Ra} \rightarrow ^{224}\text{Ra}$  ve sonuncusu  $^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$  olmak üzere üç alt seriye ayrılır.



Şekil 1.5.  $^{232}\text{Th}$  (Toryum) serisinin bozunum şeması [11]

### 1.2.2. Kozmik ışınlarının etkileşileri sonucu oluşan (kozmojenik)

Atmosferin daha alt taraflarında olup, kozmik radyasyonla etkileşir ve radyoaktif nüklitler üretilir. Uzun yarı ömürlü fakat başlangıç nüklitlerine kıyasla ömürleri daha kısadır. Aşağıdaki tablo hariç diğer bazı kozmik ışınların etkileşimi sonucu oluşan radyonüklitlere;  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{80}\text{Kr}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{Si}$ ,  $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{37}\text{Ar}$ ,  $^{33}\text{P}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{38}\text{Mg}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{38}\text{S}$ ,  $^{31}\text{Si}$ ,  $^{18}\text{F}$ ,  $^{39}\text{Cl}$ ,  $^{38}\text{Cl}$  ve  $^{34}\text{Cl}$  örnek verebiliriz.

Tablo 1.3. Başlangıç (Primordial) nüklitler [7]

Nüklit	Simge	Yarılanma Süresi	Kaynak	Doğal Radyoaktiviteleri
Karbon 14	$^{14}\text{C}$	5730 yıl	Kozmik ışın tepkimeleri, $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$	0,22 Bq/g organik maddede
Hidrojen 3 (Tritiyum)	$^3\text{H}$	12,3 yıl	Kozmik ışınların N ve O ile çarpışmalarıyla oluşan $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$	$1,2 \times 10^{-3}$ Bq/kg
Berilyum 7	$^7\text{Be}$	53,28 gün	Kozmik ışınların N ve O ile çarpışmalarıyla	0,01 Bq/kg

### 1.2.3 İnsan üretimi radyonüklitler

Doğal miktarlarına göre küçük olup bu nüklitlerin çoğu kısa yarı ömürlüdür. Yarı ömürleri, sembolleri ve bunlara karşılık gelen kaynakları aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 1.4. İnsan Üretimi olan Radyonüklitler (Adana İli Meltem Değerlier)

Nüklid	Sembol	Yarı Ömür	Kaynak
Tritiyum	<sup>3</sup> H	12,3 yıl	Savaş silahı, fisyon reaktörlerinde
İyot 131	<sup>131</sup> I	8,04 gün	Savaş silahı test materyali, fisyon reaktörleri, tiroid hastalıklarının teşhis ve tedavisinde kullanılmaktadır.
İyot 129	<sup>129</sup> I	1,57x10 <sup>7</sup> yıl	Savaş silahı, fisyon reaktörlerinde
Sezyum 137	<sup>137</sup> Cs	30,17 yıl	Savaş silahı, fisyon reaktörlerinde
Stronsiyum 90	<sup>90</sup> Sr	28,78 yıl	Savaş silahı, fisyon reaktörlerinde
Teknetyum 99	<sup>99</sup> Tc	2,11x10 <sup>5</sup> yıl	<sup>99</sup> Mo ürünüdür. Medikal teşhislerde önemli bir radyoaktif materyaldir.
Plutonyum 239	<sup>239</sup> Pu	2,41x10 <sup>4</sup> yıl	<sup>238</sup> U'ın nötron bombardımanında üretilmektedir. ( <sup>238</sup> U+n→ <sup>239</sup> U→ <sup>239</sup> Np+β→ <sup>239</sup> Pu+β)

### 1.3. Radyoaktif Bozunma Kanunu

Bir atom çekirdeğinin alfa parçacığı, beta parçacığı ve gamma ışını, herhangi bir parçacık yayınlaması veya çekirdeğin kabuğuk kısmından bir elektron yakalaması olayına 'radyoaktif bozunma' denir. Deneysel veriler bize göstermektedir ki radyoaktif bozunma üstel bir kanuna göre gerçekleşmektedir. Bu kanunun türetilmesi ancak bozunmanın rastgele bir tabiata sahip olduğu kabullenilirse, yani hangi atomun ne zaman bozunacağıının bilinmemesi durumunda mümkün olur. Bozunmamış bir radyoaktif çekirdeğin gelecekteki bir zamanda bozunma ihtimaline  $\lambda$  (bozunma sabiti denir ve simgesi  $\lambda$ ) diyelim ve  $\lambda \ll 1$  olduğunu kabul edelim. Bu durumda bir dt zaman aralığında çekirdeğin bozunma ihtimali  $\lambda dt$  olacaktır. Şayet verilen bir numunede t anında N tane bozunmamış radyoaktif çekirdek olup ve numuneye yeni radyoaktif çekirdekler ilave edilmiyorsa küçük bir dt zaman aralığında bozunacak olan çekirdeklerin sayısı dN, N ile orantılıdır [5, 11].

$$dN = -\lambda N dt \quad (1.1)$$

Burada orantı katsayısı  $\lambda$ ,

$$\lambda = \frac{dN / dt}{N} \quad (1.2)$$

ile verilir ve bozunma sabitidir. Diferansiyel denklem çözümü ile,

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = - \int_0^t \lambda dt \quad (1.3)$$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.4)$$

elde edilir. Burada  $N_0$ ,  $t = 0$  anındaki radyoaktif çekirdek sayısı,  $N(t)$  ise  $t$  anındaki radyoaktif çekirdek sayısıdır. Bu bağıntıya göre kalan çekirdeklerin sayısı eksponansiyel olarak azalmaktadır [5].

#### 1.4. Aktivite

Aktiflik ( $A$ ), verilen bir numunedeki birim zamandaki bozunma sayısıdır. Bozunma hızı olarak tanımlanabilir ve birimi bozunma/s'dir.

Denklem (1.4) bağıntısı kullanılarak aktiflik,

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N \quad (1.5)$$

şeklinde elde edilir. (1.5) bağıntısından görüldüğü gibi bir numunenin aktif olması radyoaktif çekirdeklerin sayısına ( $N$ ) ve bozunma sabitine ( $\lambda$ ) bağlıdır [11].

#### 1.5. Yarı Ömür ( $t_{1/2}$ )

Yarı ömür ( $t_{1/2}$ ), çekirdeklerin sayısının yarıya düşmesi için ya da aktifliğin yarıya düşmesi için gerekli olan süredir. Denklem (1.4)'de yerine yazılırsa yarı ömür,

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \quad (1.6)$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}} \quad (1.7)$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1.8)$$

şeklinde elde edilir. Burada  $t_{1/2}$  zaman biriminde olduğundan  $\lambda$ 'nın birimi  $s^{-1}$  dir [5].

#### 1.6 Ortalama Ömür

Bozunmanın üstel ifadesi radyoaktif çekirdeklerin tamamen bozularak yok olabilmesi için sonsuz uzunlukta bir zaman gerektiğini göstermektedir. Hangi çekirdeğin ne zamana bozunacağını bilemediğimizden dolayı herhangi bir çekirdek sıfır ile sonsuz zaman aralığında bir ömüre sahip olabilir. Buna göre bir çekirdeğin ne kadar yaşayacağı bilinmez. Bu durumda ortalama ömürden söz etmek daha doğrudur.

Ortalama ömür ( $\tau$ ), bütün radyoaktif çekirdeklerin ömürleri tek tek toplanıp toplam çekirdek sayısına bölünerek elde edilir. Varsayalım ki,  $t_1, t_2, t_3$  ömürlerine sahip çekirdeklerin sayısı sırasıyla  $dN_1, dN_2, dN_3$  olsun. Bu durumda ortalama ömür;

$$\tau = \frac{t_1 dN_1 + t_2 dN_2 + t_3 dN_3 + \dots}{dN_1 + dN_2 + dN_3 + \dots} \quad (1.9)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (1.9) ifadesini  $N_0 = dN_1 + dN_2 + dN_3$  olmak üzere integral formunda da yazabiliriz.

$$\tau = \frac{\int_0^{N_0} t dN}{\int_0^{N_0} dN} = \frac{\int_0^{N_0} t dN}{N_0} \quad (1.10)$$

( $dN$ )' in yerine (1.4) eşitliğinden değerini yazdıktan sonra integrali alacak olursak,

$$\tau = \frac{- \int_0^{N_0} \lambda t N_0 e^{-\lambda t} dt}{N_0} = - \int_0^{\infty} \lambda t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (1.11)$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \text{ şeklinde elde edilir.} \quad (1.12)$$

### 1.7. Biyolojik Yarı Ömür ( $t_{1/2B}$ )

Vücudumuza, besin zinciri vasıtasıyla sindirim sistemimizden, solunum yoluyla yada enjeksiyon yoluyla radyoaktif madde alınabilir. Alınan radyoaktif maddenin yarısının vücuttan dışarı atılabilmesi için geçecek olan zaman biyolojik yarı ömür olarak tanımlanır. Vücut içerisine alınmış her radyoaktif maddenin belli bir biyolojik yarı ömrü vardır [12].

### 1.8. Etkin Yarı Ömür ( $t_{1/2etkin}$ )

Radyoaktif maddenin vücutta etkili olduğu süre efektif yarı ömür ( $t_{1/2etkin}$ ) olarak ifade edilir.

Bir radyoaktif maddenin, biyolojik yarı ömrünün tersi ile fiziksel yarı ömrünün tersleri toplamı etkin yarı ömrünün tersini verir [12]. Aşağıdaki denklem ile gösterilir.

$$\frac{1}{t_{1/2\text{etkin}}} = \frac{1}{t_{1/2}} + \frac{1}{t_{1/2B}} \quad (1.13)$$

### 1.9. Zincirleme Radyoaktif Bozunma

Doğada bulunan ve insan yapımı olan radyoaktif izotoplar peş peşe bozunabilirler. Ana radyoaktif element, kendinden farklı bir ürüne bozunur ve eğer bozunma sonucu oluşan üründe radyoaktif ise hem ana element hem de ana elementin ürünü kendinden farklı başka bir elemente bozunur. Bu bozunma kararlı bir çekirdek oluşuncaya kadar devam eder. Radyoaktif çekirdeklerin herhangi bir t anındaki bozunma denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1 \quad (1.14)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (1.15)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 \quad (1.16)$$

Bu radyoaktif elementteki çekirdeklerin sayısının t=0 anında

$N_1(0) = N_{10}$  ;  $N_2(0) = N_{20}$  ;  $N_3(0) = N_{30}$  olduğunu kabul edersek, (1.14), (1.15) ve (1.16) diferansiyel denklemlerinin çözümünden;

$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t} \quad (1.17)$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (1.18)$$

$$N_3 = N_{10} \left( 1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) \quad (1.19)$$

elde edilir. Denklem (1.17), (1.18), (1.19) eşitlikleri kullanılarak herhangi bir t anı için mevcut olan atomların sayısı bulunabilir [11].

### 1.10. Radyoaktif Denge

Peş peşe parçalanma kanununda bulunan eşitliklerin iki özel durumunu ele alacağız.

Birinci durum:  $\lambda_1 \cong \lambda_2$



$\lambda_1$  bozunma sabitine sahip ana çekirdeğin  $\lambda_2$  bozunma sabitine sahip olan 1. ürüne bozunduğunu ele alalım ve ortalama ömürlerinin aynı olduğunu varsayalım.

Denklem (1.18) eşitliğinin türevi alınıp sıfıra eşitlenirse;  $N_2$ 'nin maksimuma ulaştığı  $t_m$  süresini bulabiliriz.

$$t_m = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \log_e \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (1.20)$$

elde edilir.  $t_m$  zamanından sonra 1. ürünün bozunma hızını inceleyecek olursak  $\lambda_1$  ve  $\lambda_2$  den hangisi küçük ise 1. ürünün bozunma hızı üzerinde o etkili olacaktır.

$\lambda_1 < \lambda_2$  ise; (1.18) eşitliğinin sağ tarafındaki  $e^{-\lambda_2 t}$  terimi  $e^{-\lambda_1 t}$  teriminden daha hızlı sıfıra gidecektir. Bu yüzden  $e^{-\lambda_2 t}$  terimi ihmal edilebilir. Böylece;

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

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \quad (1.21)$$

veya

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (1.22)$$

elde ederiz.

(1.22) ve (1.6) eşitliklerini kullanarak;

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (1.23)$$

(1.22) eşitliği bize 1. ürünün, ana elementin bozunma hızıyla bozunduğunu gösterir. (1.23) eşitliği aktivite oranlarının sabit olduğunu ifade eder.

Bu durum bize ana element ile 1. ürün elementinin geçici dengede olduğunu söyler.  $\lambda_1 > \lambda_2$  ise; eşitliğin sağ tarafındaki  $e^{-\lambda_1 t}$  terimi  $e^{-\lambda_2 t}$  teriminden daha hızlı sıfıra gideceğinden,  $e^{-\lambda_1 t}$  terimi ihmal edilir. Böylece;

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10}(e^{-\lambda_2 t}) \quad (1.24)$$

elde edilir. (1.24) eşitliği bize belli bir süreden sonra 1. ürünün kendi bozunma sabiti ile bozunacağını, yani belirli bir süreden sonra ortamdaki ana elementin biteceğini söyler. 1. üründe kendi bozunma hızıyla bozunmasına devam edecektir.

İkinci durum ise  $\lambda_1 \ll \lambda_2$

(1.18) bağıntısında ana elementin yarı ömrünün 1. ürün elementinin yarı ömrüne oranla daha uzun olduğu durumu ifade eder.

Bu durumda;  $\lambda_2 - \lambda_1 \cong \lambda$  ve  $e^{-\lambda_1 t} \cong 1$  olacağından (1.18) ile verilen eşitlik;

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10}(e^{-\lambda_2 t}) \quad (1.25)$$

şeklini alır. Denklem (1.25) bağıntısına göre de t süresi 1. ürünün ortalama ömrü  $\tau_2$ 'ye göre çok büyük ise  $e^{-\lambda_2 t}$ 'de 1' in yanında ihmal edilebilir. Denklem (1.27) eşitliği;

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{10} \quad (1.26)$$

eşitliğine indirgenmiş olur. (1.26)' e göre 1. ürün elementinin miktarı  $N_2$  sabit olacaktır. Bununla birlikte ana elementin yarı ömrü çok büyük olacağından başlangıçtaki miktarı  $N_{10}$  hemen hemen  $N_1$ ' e eşit olacaktır.

Böylece (1.26) eşitliği ;

$$\lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1 \quad (1.27)$$

şeklini alır. (1.26) kalıcı denge şartıdır. Ana element ile ürün element miktarlarının bozunma sabitleriyle ters orantılı olduğunu göstermektedir.

## **1.11. Radyoaktivite ve Radyasyon Doz Birimleri**

### **1.11.1. Aktivite birimi**

Bir radyoaktif numunenin radyoaktivitesi, bozunma/s olarak tanımlanır. Diğer bir birim ise, 1 gram Radyum'un aktivitesidir. Bu aktivite 1 Curie olarak tanımlanır ve Ci sembolü ile gösterilir. Ci'nin binde birine mCi (miliküri), milyonda birine  $\mu$ Ci (mikroküri) denir.  $\mu$ Ci araştırma ve klinik tetkiklerde kullanılan radyoaktivite miktarıdır. Tedavide kullanılan miktar ise mCi seviyesindedir [15].

### **1.11.2. Soğurulma doz birimleri**

Soğurulma doz birimi iyonlaştırıcı radyasyonun kütlede maddeye verilen enerji miktarıdır. Soğurulma doz birimi Rad ile gösterilir. Işınlanan maddenin 1 kg'ına karşılık  $10^2$  joule'lük enerji veren radyasyonun miktarıdır. Bu doz birimi sadece hem parçacık hem foton özellikli soğurulan enerji miktarını gösteren radyasyonlara uygulanabilen bir büyüklüktür ve radyasyon demeti ile birlikte, soğurucu maddenin bir özelliğini gösterir.

Soğurulma doz birimi SI birimleri sisteminde Gray (Gy) olarak belirlenmiş ve 1 Gy ışınlanan maddenin 1 kg'ına karşılık 1 joule'lük enerji veren radyasyon miktarıdır [15].

### **1.11.3. Biyolojik (eşdeğer) doz**

İyonlaştırıcı radyasyonların zararlı biyolojik etkilerini ölçmek için klasik kullanımdan gelen röntgen equivalent man kelimelerinin ilk harflerinden oluşan 'rem' birimi kullanılmaktadır.

Biyolojik doz birimi olan bu rem aynı biyolojik etkiyi meydana getiren 1 Röntgenlik X ve  $\gamma$  ışınının meydana getirdiği radyasyon miktarıdır. SI birim sisteminde doz eşdeğer birimi joule/kg olup adı Sievert (Sv) dir [15].

### **1.11.4. Işınlama doz birimi**

Bu doz birimi ise X veya  $\gamma$  ışınlarının havada oluşturdukları iyonizasyon etkilerini ölçmede kullanılır. Işınlama birimi olan Röntgen, normal hava şartlarında ( $0^\circ\text{C}$  ve

760 mm Hg basıncı) havanın 1 kg'ında  $2,58 \times 10^{-4}$  Coulomb'a sahip elektrik yükünden + ve - iyonlar oluşturan X ve  $\gamma$  ışınları için tanımlanır [15].

Tablo 1.5. Radyoaktivite ve radyasyon doz birimleri ve birim dönüşümleri

Büyüklik	SI Birimi	Özel Birim	Dönüşüm
Aktivite	Bq	Ci	1 Bq=27,03x10 <sup>-12</sup> Ci 1 Ci=3,7x10 <sup>10</sup> Bq
Soğurulma	Gy J/kg	Rad	1 Gy=100 rad 1 rad=10 <sup>-2</sup> Gy
Doz Eşdeğeri	Sv J/kg	Rem	1 Sv= 100 rem 1 rem=10 <sup>-2</sup> Sv
Işınlanma	C/kg	R	1 C/kg=3,876x10 <sup>3</sup> R 1 R=2,58x10 <sup>-4</sup> C/kg

## 1.12 Gama Radyasyonunun Madde İle Etkileşimi

Gama ve X ışınları madde ile üç şekilde etkileşime girer: Fotoelektrik olay, Compton saçılması ve Çift oluşumu.

### 1.12.1. Fotoelektrik olay

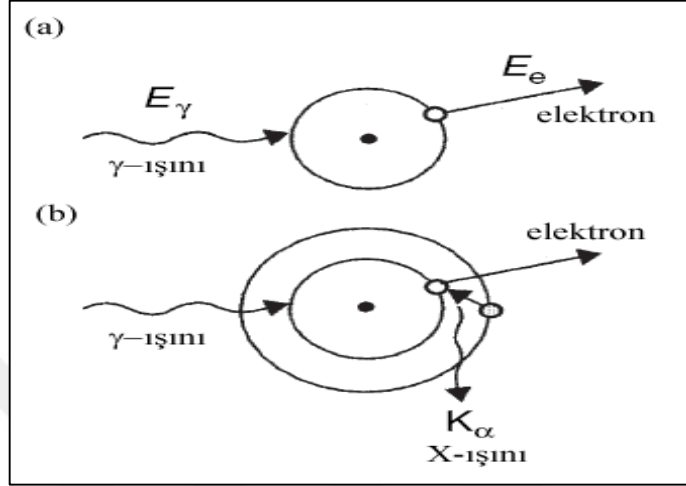
Düşük enerjili, enerjileri yaklaşık 100keV civarında olan fotonlar için en önemli enerji kaybı bu olaydır. Fotoelektrik olayda düşük enerjili foton, etkileştiği atomun bağlı olan elektronlarından birinin enerjisinin tamamını vererek atomun iç yörüngelerindeki bir elektronun atomun dışına fırlatılmasına neden olur. Fırlatılan bu elektrona fotoelektron denir. Şekil 1.6'da fotoelektrik olay ve X ışını yayınlanması gösterilmiştir [13].

Detektöre gelen gamma ışınları atom elektronlarından biriyle etkileşime girerek, atomun dışına elektronların fırlatılmasına sebep olur ve yörüngedeki boşalan elektronun yeri bir üst yörüngeden bir elektronla doldurulup, karakteristik X ışını (Ka) yayınlanıp (Şekil 1.6(b)) gözlenir [11,13].

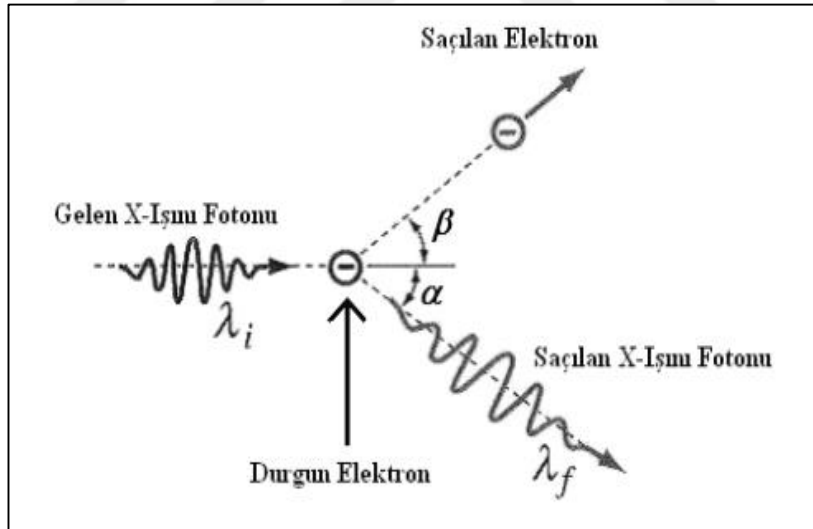
### 1.12.2. Compton saçılması

Bir elektronla etkileşime giren bir X ışını veya  $\gamma$  ışınının enerjisindeki azalma veya dalga boyundaki artma Compton Saçılması olarak tanımlanabilir. Dalga boyundaki bu artışlar Compton kayması olarak adlandırılır.

Fotonlar enerji düşüşüyle belli bir açıda saçılırlar ve bu saçılma nedeni ile de açığa enerji çıkmaktadır. Gelen foton birkaç kez compton saçılmasına uğrar bunun nenedide çıkan bu enerji elektronlara kinetik enerji olarak aktarılır. Böylece enerjisi azaldıkça fotoelektrik soğurulma olasılığı artar.



Şekil 1.6. a: Fotoelektrik olay örneği b: Karakteristik X Işını yayınlanması örneği [14]

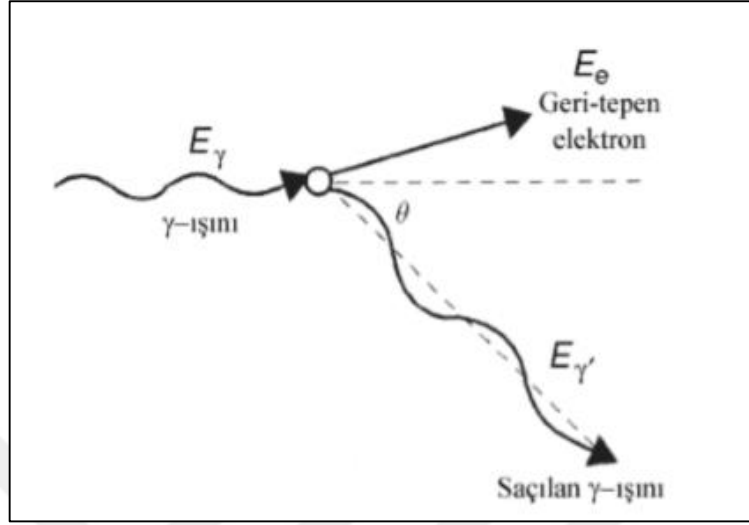


Şekil 1.7. Compton Saçılması [16]

### 1.12.2. Çift oluşumu

Çift oluşumu, çekirdeğin etki alanına giren bir fotonun bir elektron ile bir pozitrona dönüşmesi olayıdır. Atomun çekirdeğine çarparak oluşan bu elektron ile pozitronun kütleleri eşit fakat zıt işaretlidirler. Çift oluşumun meydana gelebilmesi için eşik enerjisi  $2m_0c^2$  (1,022 MeV) olmalıdır. 1,02 MeV'den daha büyük enerjili bir foton,

yüksek atom numaralı bir element çekirdeğinin yakın tarafından geçerken yok olur ve elektron-pozitron çifti meydana gelir [17].



Şekil 1.8. Çift Oluşumu [17]

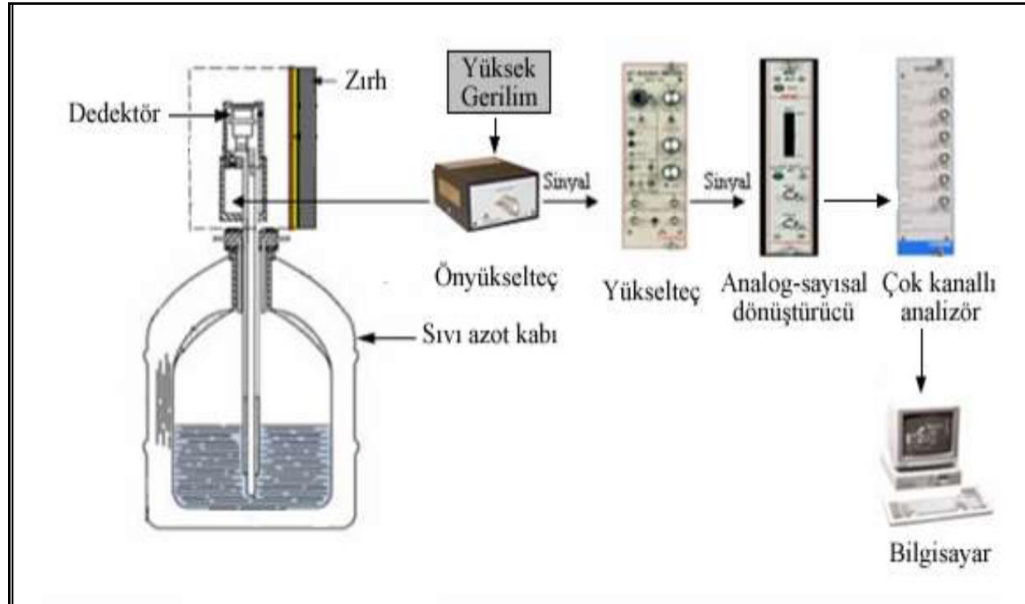
## 2. DENEY DÜZENEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında Gama Spektroskopisi ile ölçümler gerçekleştirilmiştir.

### 2.1 Gama Sayım Sistemi

Gamma Spektroskopisi sistemi, gama ışınları yayınlayan radyonüklit örneklerin aktivite seviyelerini belirlemek için, bu radyonüklit örneklerinden yayımlanan gama ışınlarını enerjilerine bağlı olarak sayan bir sistemdir. Gamma spektroskopisi sisteminin en önemli parçası dedektör kristalidir. Gama ışını, dedektör kristaliyle enerjisine bağlı olarak etkileşmeye girer ve bu etkileşme sonucunda da enerjisine göre bir sinyal pulsu elde edilir [16].

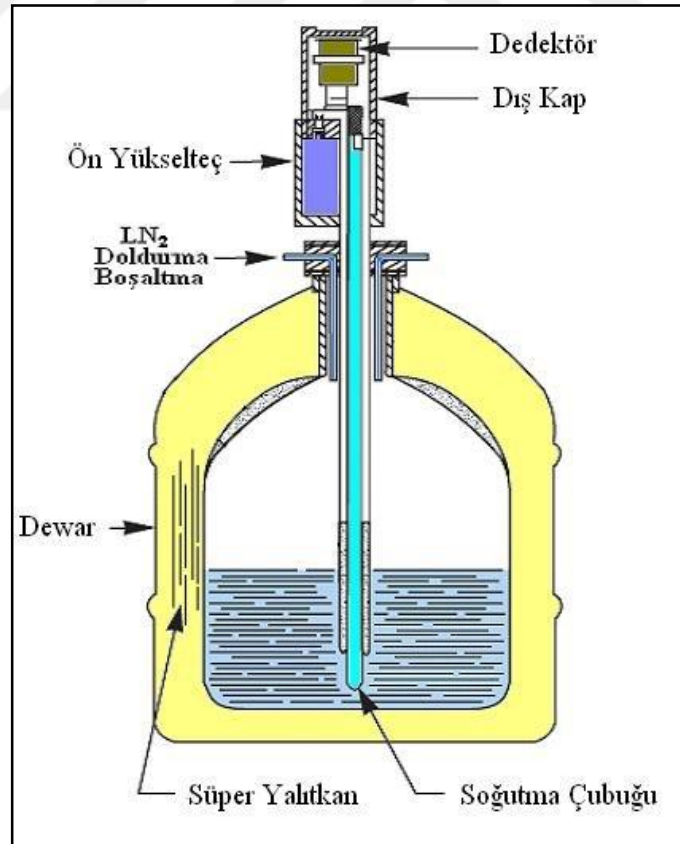
Dedektör sisteminin genel elektronik şeması aşağıda Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Burada sistem Yüksek voltaj kaynağı (HV), Ö; ön yükselteç (preamplifier), Y; yükselteç (amplifier), çok kanallı analizör (MCA)’dan oluşmaktadır.



Şekil 2.1. Dedektör Sisteminin Genel Elektronik Şeması [19]

Dedektör kristali radyasyonu algıladıktan sonra yüksek voltaj kaynağı ile birlikte kristale gelen radyasyon tarafından oluşturmuş olan yükler toplanır ve bir elektrik pulsu oluşturulur. Sonra yüksek voltaj kaynağı tarafından oluşturulan elektrik pulsunun sinyal/gürültü oranı ise ön yükselteç ile artırılır ve bu sinyalin yükseltece zayıflamadan gitmesi sağlanır. Sinyal ise bu yükseltece geldikten sonra burada pulsun genliği spektrumun analizi yapılacak kadar artırılır ve pulsun şekli düzeltilir. Yükseltilmiş ve şekli düzeltilmiş olan pulslar çok kanallı analizör ile birlikte dijital hale dönüştürülüp genliğiyle orantılı bir hafıza kanalına kaydedilirler. Bu kanalların her biri birbirinden farklı enerji değerlerine karşılık gelir ve sayım süresince gelen pulsların birikmesiyle spektrum oluşur. Bilgisayarda ise çok kanallı analizörden gelen veriler depolanır ve analiz işlemleri yapılmaya başlanır.

Şekil 2.2’de tipik bir germanyum dedektör ve dewar sistemi gösterilmiştir. Bu sistemde dedektör kristalinin çalışma sırasında soğutması sağlanması için dedektörün dewarına sıvı azot ( $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) doldurulmaktadır.



Şekil 2.2. Tipik Germanyum Dedektör ve Dewar Sistemi [16]



## 2.2. Yarı İletken Dedektörler

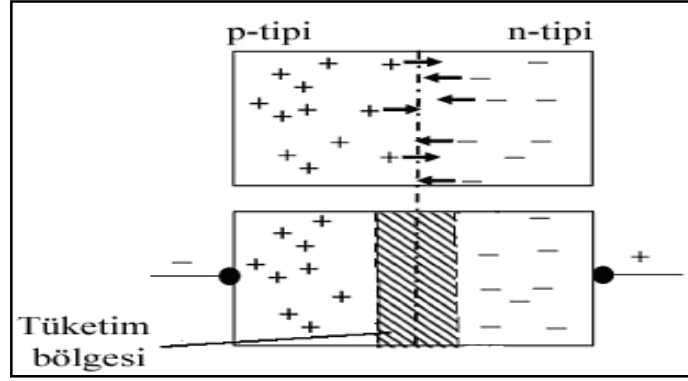
Yarı iletken olarak bilinen dedektörler, yük taşıyıcılarına göre iki grupta incelenir. Yük taşıyıcıları elektron olanlara n tipi, yük taşıyıcıları boşluk olanlara p tipi yarı iletken denir. Elektronlar yarı iletken olduğunda değerlik bandında boşluklar bırakıp iletim bandına geçerler. Değerlik bandına geçen burda oluşan boşluklar komşu elektronlar ile hemen doldurulurlar. Bu boşlukların doldurulmasından sonra yeni boşluklar oluşur ve sanki boşluklar kristal içinde hareket ediyormuş gibi gözükür.

Yarı-iletkenlerde katkı maddeleri, iletimi kontrol edebilmek için kullanılır. Yarı iletkenimiz n tipi olduğunda; Bu katkı maddesinin beş eğerlikli olması dört elektronu kovalent bağ yapıp, beşinci elektronu kristal örgüsü içinde serbest olarak hareket eder. Eğer katkı üç değerlikli ise üç elektron kovalent bağ yapar ve kovalent bağ yapamayan bir boşluk meydana gelir. Bu da p-tipi yarı iletkendir [18].

Yarı iletken dedektörlerde, n-tipi ve p-tipi materyallerin temas ettirilmesi ile oluşan n-tipi materyalden çıkan elektronlar p-tipi materyale doğru hareket halinde olup, temas bölgesinde yük taşıyıcıları nötür hale gelir ve bu bölgeye tüketim bölgesi denir.

Yarı iletken dedektörün şeması ve tüketim bölgesi Şekil 2.3'de gösterilmektedir (Gilmore 2008). Yarı iletken dedektörlerde gamma radyasyonu tüketim bölgesine girerek elektron-boşluk çiftleri oluşturur. Gerilim uygulanması ile tüketim bölgesinde ki elektronlar ile boşluklar zıt yönde hareket ettirilirlir. Burada oluşan elektronların sayısı puls oluşturur. Oluşan bu pulsün genliği gelen gamma radyasyonunun enerjisi ile orantılıdır. Ge(Li) ve Si(Li) dedektörleri yarı-iletken dedektörlerinin yaygın olarak kullanılanlarıdır (Krane 2001). Yarı iletken dedektörü yüksek verimde olmasını istersek derin tükenme bölgesine ihtiyaç duyarız. Derin tükenme bölgesinin oluşması içinde birçok sayıda saf olan germanyum gibi maddeler kullanılmalıdır [16].

Çok düşük ölü zamana sahip olan bu yarı iletken dedektörler çok yüksek sayma hızına sahiptirler. Yüklü partiküller için çok iyi enerji ayırma kabiliyetine sahip olup partikül spektrometresi için de uygundur. Yaklaşık 25 – 300 V gibi çok düşük voltajlarda çalışır. Bu da yarı iletken dedektörlerin en önemli avantajlarından [19].



Şekil 2.3. Yarı İletken Dedektör Şeması [16]

### 2.3 HPGe Gama Spektroskopisi

Gamma ışınları iyonizasyon yapamayan yüksüz parçacıklar olduklarından dolayı ölçülebilmeleri için sahip oldukları enerjilerinin bir kısmını ya da tamamını etkileştikleri maddenin atomlarını uyarılmış seviyelere çıkarmak için kullanılmalıdırlar. Dedektördeki madde ile hiçbir etkileşmeye girmeden ortamı terk edebilirler. Bundan dolayı gözlenebilmeleri oldukça zordur. Kullanmak istediğimiz dedektörün seçimini yaparken, enerji ve zaman çözme gücü, dedektörün verimi gibi özellikleri ile birlikte dikkate alınmalıdır.

NaI dedektörleri, Ge dedektöründen daha fazla atom numarasına sahiptir ve bu nedenle NaI dedektörlerinde gelen gamma radyasyonu fotonunun soğurulma olasılığı yüksek olduğu için verimi Ge dedektörlerinden daha yüksektir. Ayrıca NaI dedektörleri daha ucuzdur ve çalışması için gerekli olan şartlar daha basittir. NaI dedektörü için soğutma gerekli değildir fakat nem çekicidir. Bu nedenle kapalı tutulmaları gerekmektedir. Ge dedektörünün çözme gücü NaI dedektöründen çok daha iyidir.

Safılık oranı çok ve direnç yüksek olduğundan ayırma gücü çok yüksektir. Çözme gücü yüksektir. 662 keV'de NaI çözme gücü (FWHM) 40 keV ise Ge için aynı değer 1 keV'dir (Krane 2001). Kullanılmadığı zamanlarda oda sıcaklığında bırakılabilirler. Dedeksiyon işlemi düşük sıcaklıklarda yani sıvı azot sıcaklığında gerçekleştirilmelidir. Zira kaçak akım veya elektron gürültü miktarı hayli fazla olur. Bu özellik reaksiyon sonucu ölçülen karmaşık gama spektrumları için çok önemlidir. Ge dedektörünün bu özelliği, dedekte edilen gamma radyasyonunun piklerinin en iyi

şekilde elde edilmesine dolayısıyla sonuçları da en doğru şekilde analiz etmemize olanak sağlar [11].



Şekil 2.4. ORTEC GEM25P4-70 HPGe Gama Dedektör Sistemi [20]

HPGe dedektörü % 25,2 bağıl verime, dedektör çapı 57,7 mm, dedektör uzunluğu 44,5 mm, dedektörün Al kabının kalınlığı 3 mm, Bias voltajı + 4400 V' a sahiptir. 1,33 MeV  $^{60}\text{Co}$  için performans özelliklerinde ise enerji çözünürlüğü (FWHM) ise 1,71 KeV, Pik/Compton oranı 58:1'dir. 30 litre olan bu HPGe dedektörü sıvı azot kullanılarak soğutulmaktadır ve 40 keV ile 10 MeV'lik enerji aralığında kullanışlıdır. [21].

Ortamda dedektör etrafından gelebilecek doğal gama ışınlarının ve kozmik ışınların dedektöre ulaşmasını engellemek amacıyla dedektör de 9,5 mm çelikle koruyucu kaplama ve 10 cm kalınlığında kurşun zırh kullanılmıştır. Ayrıca kurşun zırha gelen gamma ışınlarının kurşun ile etkileşime girmesiyle oluşturduğu X ışınlarının dedektöre ulaşmasını engellemek amacıyla da kurşun zırhın iç yüzeyi 1 mm kalay ve 1,5 mm bakır levha ile kaplanmıştır. Burada daha sonra Gamma Vision (Ortec

GammaVision-32 6.07) yazılım programı, HPGe dedektöründe gamma ışını spektrumlarının analizlerinin yapılabilmesi için kullanılmıştır.



Şekil 2.5. HPGe Dedektörünün açık ve üstten görünümü [20]

## 2.4. Veri Analizi İçin Ön Çalışmalar (Gama Sayım Sistemi)

Piklerin Hangi radyoaktif çekirdeklere ait olduklarını bulmak ve spesifik aktivitelerini hesaplanması için ilk olarak enerji ve verim kalibrasyonlarının yapılması gerekmektedir.

### 2.4.1. Enerji kalibrasyonu

Kalibrasyonun amacı, bir radyasyon ölçüm cihazının belirli bir ışınlama veya soğurma dozu karşısında piklerin konumu ve gama ışın enerjilerinin arasındaki ilişkiyi bizlere verir. Radyasyon dozunun kesin olarak kalibrasyon için belirli bir noktada bilinmesi gereklidir. Aktivitesi bilinen standart bir radyoaktif kaynağa ihtiyaç vardır. Bu standart kaynağın ölçülen spektrumuyla radyoaktif maddenin farklı mesafelerinde bilinen radyasyon şiddetleri kullanılarak kalibrasyon işlemi yapılmaktadır.

Tablo 2.1. Enerji Kalibrasyonunda kullanılan radyonüklitlerin yayınladıkları enerji değerleri [23]

Gama Işın Enerjisi (keV)	Nüklid	Yarı Ömür	Dallara ayrılma oran (%)	Aktivite ( $\mu\text{Ci}$ )	Her saniyede gamalar	Toplam Belirsizlik
60	Am-241	432,17 $\pm$ 0,66 yıl	36	0,03056	407,1	3,0 %
88	Cd-109	462,6 $\pm$ 0,7 gün	23071	0,3140	421,7	3,1 %
122	Co-57	271,79 $\pm$ 0,09 gün	85,6	0,01084	343,3	3,1 %
159	Te-123m	119,7 $\pm$ 0,1 gün	84,0	0,01610	500,4	3,0 %
320	Cr-51	27,706 $\pm$ 0,007 gün	31656	0,3434	1253	3,0 %
392	Sn-113	115,09 $\pm$ 0,04 gün	64,89	0,05371	1290	3,0 %
514	Sr-85	64,849 $\pm$ 0,004 gün	98,4	0,06820	2483	3,0 %
662	Cs-137	30,17 $\pm$ 0,16 yıl	85,1	0,04888	1539	3,0 %
898	Y-88	106,630 $\pm$ 0,025 gün	94,0	0,09344	3250	3,0 %
1173	Co-60	5,272 $\pm$ 0,001 yıl	99,86	0,05652	2088	3,0 %
1333	Co-60	5,272 $\pm$ 0,001 yıl	99,98	0,05652	2091	3,0 %
1836	Y88	106,630 $\pm$ 0,025 gün	99,36	0,09344	3435	3,0 %

Standart bir kaynağın spektrumunu elde edilmesi ile hangi kanalın hangi enerjiye karşılık (enerji/kanal) geldiği belirlenmelidir. Bu piklere ait enerji değerleri bir bilgisayar programı ile pik taraması yaptırılıp fit edilerek kalibrasyon eğrisinin denklemini elde ederiz. Numunelerin spektrumunda bulunan radyoaktif çekirdeklerin türleri böylece enerjilerini tespit ederek belirlenebilir.

Kalibrasyon denklemi;

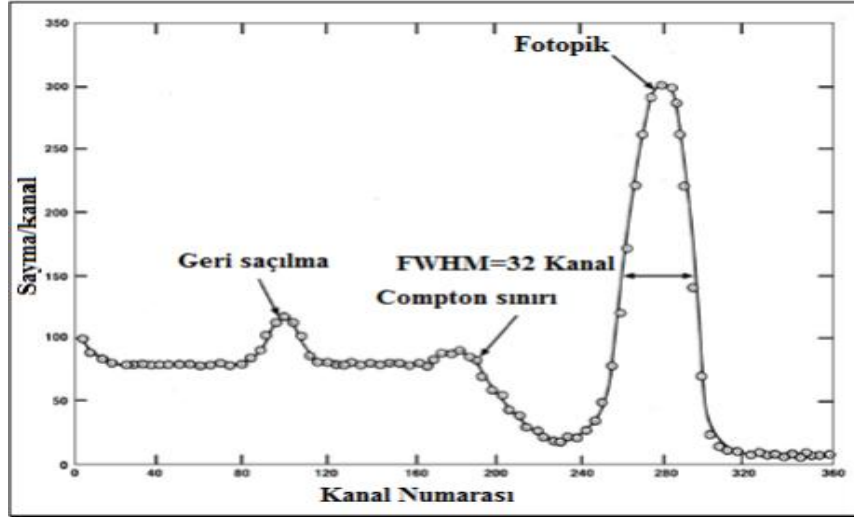
$$E \text{ (keV)} = A + B \cdot \text{KN} \quad (2.1)$$

formülü kullanılarak verilir. Burada E ilgilenilen pikin keV cinsinden enerjisi, A doğrunun y eksenini kestiği değer, B eğim ve KN kanal numarasını belirtir.

Standart kaynak kullanmadan fon sayımı spektrumu, kozmik ışınlardan kaynaklanan 511,10 keV olup, diğer iki pik  $^{40}\text{K}$  ve  $^{208}\text{Tl}$  (1460,8 ve 2614,5 keV) olan üç pikten de yararlanılıp enerji kalibrasyonu yapılabilir [16]. Kalibrasyon eğim grafiği aşağıdaki bir örnekte gösterilmiştir.

#### 2.4.2. Verim kalibrasyonu

Verim, sayım sisteminin radyasyonu algılayabilme yeteneğinin ölçüsü olarak açıklanabilir. Verim, spektrumda sayılan sayımların sayısı ile kaynaktan yayılan gama ışınları sayısı arasında ilişki kurar. Gama spektroskopisinde, ilgilendiğimiz pikin altında kalan alan radyoaktivite miktarını temsil eder. Radyoaktivite belirlememiz için ilgili pik alanına ve verime ihtiyaç vardır.



Şekil 2.6. MAESTRO-32 çok kanallı analizörü ve NaI(Tl) detektörü kullanılarak  $^{137}\text{Cs}$  kaynağı için elde edilen spektrum [25]

Pik verimi, aktivitesi kesin olarak bilinen standart kaynaklar kullanılarak belirlenir. Standart kaynaklar ile sayımları yapılacak olan numuneler aynı geometri ve yoğunluğa sahip olmalıdır.

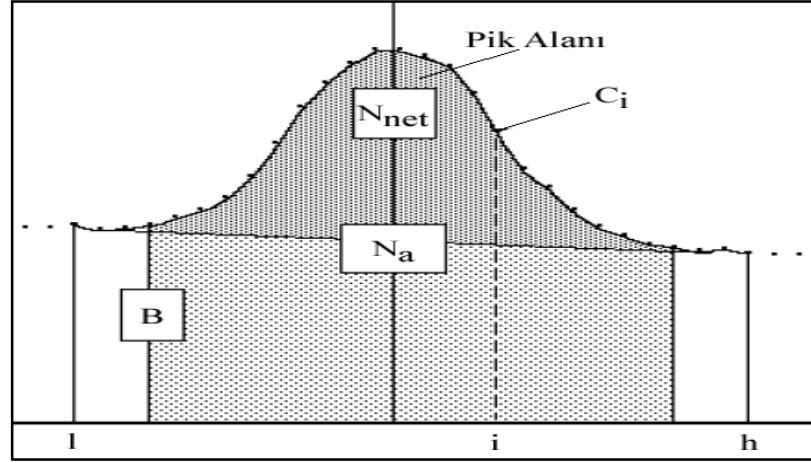
Pik verimi;

$$\epsilon_{\gamma} = \frac{N_{\text{net}}}{A \cdot t \cdot I_{\gamma}} \quad (2.2)$$

Burada,  $E_{\gamma}$  enerjisi için sayım verimi,  $N_{\text{net}}$ ,  $E_{\gamma}$  enerjili fotonun oluşturduğu pik alanı,  $t$  standart kaynağın dedektördeki sayım süresi,  $A$  kullanılan gama standart kaynaktaki bulunan radyonüklidlerin bilinen aktivitesi,  $I_{\gamma}$  radyonüklidin bozunumunda yayınlanan fotonun yayınlanma olasılığıdır [18].

### 2.4.3. Pik alan hesabı

HPGe dedektörü ile aktivite hesaplamak için ilgilendiğimiz pikin altında kalan net alan hesaplanmalıdır. Burada pik altında kalan alanı hesaplama yöntemlerinden Covell metodu anlatılacaktır. Bu metod yaygın olarak tek bir pikin alanını doğru şekilde hesaplamak için kullanılır. Şekil 2.7’de alanı hesaplanacak pik gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Pik alan hesabında kullanılan parametrelerin gösterimi: B fon sayısı, N<sub>a</sub> pik altında kalan toplam alan, N<sub>net</sub> pik altındaki net alan (fon sayısı çıkarılmış), C<sub>i</sub> ise i kanaldaki toplam sayıdır. (Pik 6 kanal genişliğinde seçilmiştir [23])

$$\sigma_{N_{net}} = \sqrt{N_a + B \left( \frac{h-1.5}{6} \right) \left( \frac{h-1.5}{h-1+1} \right)} \quad (2.3)$$

şeklinde net alandaki hata hesabı ifade edilir.

#### 2.4.4. Aktivite ve spesifik aktivite hesabı

Dedektörün verim ve enerji kalibrasyonu yapıldıktan sonra aktivite hesaplamalarında kullanılacak piklerin verim ve enerji değerleri elde edilir. Sayım sonrası elde edilen spektrumda ilgilenilen piklerin net alanları fon radyasyonu düzeltilmesi yapılarak hesaplanır. Elde edilen değerler,

$$A = \frac{N_{net}}{\epsilon_{\gamma} t I_{\gamma}} \quad (2.4)$$

denklemleri kullanılarak gama aktivitesi hesaplanır. Burada A hesaplanan aktivite, N<sub>net</sub> net pik alanı,  $\epsilon_{\gamma}$  ilgilenilen pik için dedektör verimi, t sayım süresi, I gama enerjisinin yayılma olasılığıdır.

Bulunan aktivite, ölçümü alınan numunenin kütlesine bölünerek Bq/kg biriminde spesifik aktivite,

$$SA = \frac{A}{m} \quad (2.5)$$

denklemleri ile bulunur. Burada, SA spesifik aktivite (Bq/kg), m numunenin kütlesi (kg)'dir.

#### 2.4.5. Hata hesabı

Deneysel ölçümlerdeki büyüklükler, belirli bir hata (belirsizlik) içerir.

Bir f fonksiyonunun  $f = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  bağılı olduğu büyüklükler  $x_i$  ve hataları  $\Delta x_i$  ise, f fonksiyonunun ölçümlerindeki hata  $\Delta f$ :

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{df}{dx_i} \Delta x_i \right)^2} \quad (2.6)$$

formülü ile hesaplanır.

Aktivite için toplam hata değerlendirilmesinde göz önüne alınması gereken hata kaynakları;

Net pik alanındaki hata ( $\Delta N_{net}$ ), yayınlanma olasılığı için hata  $\Delta I_\gamma$ , sayım süresi için hata ( $\Delta t$ ), Belli enerjiler için hesaplanan verim hataları ( $\Delta \epsilon_\gamma$ ) olup, (2.7) denkleminde ilgilendiğimiz duyarlılıktan küçük olan hatalar hesaba katılmaz.)

$$\Delta A = \sqrt{\left( \frac{\Delta N_{net}}{N_{net}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta I_\gamma}{I_\gamma} \right)^2 + \left( \frac{\Delta t}{t} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \epsilon_\gamma}{\epsilon_\gamma} \right)^2} \quad (2.7)$$

ifadesinden aktivitedeki hata hesaplanır.



### 3. DENEY VE HESAPLAMALARI

#### 3.1. Numune Alınacak Yerin Coğrafi Yapısı

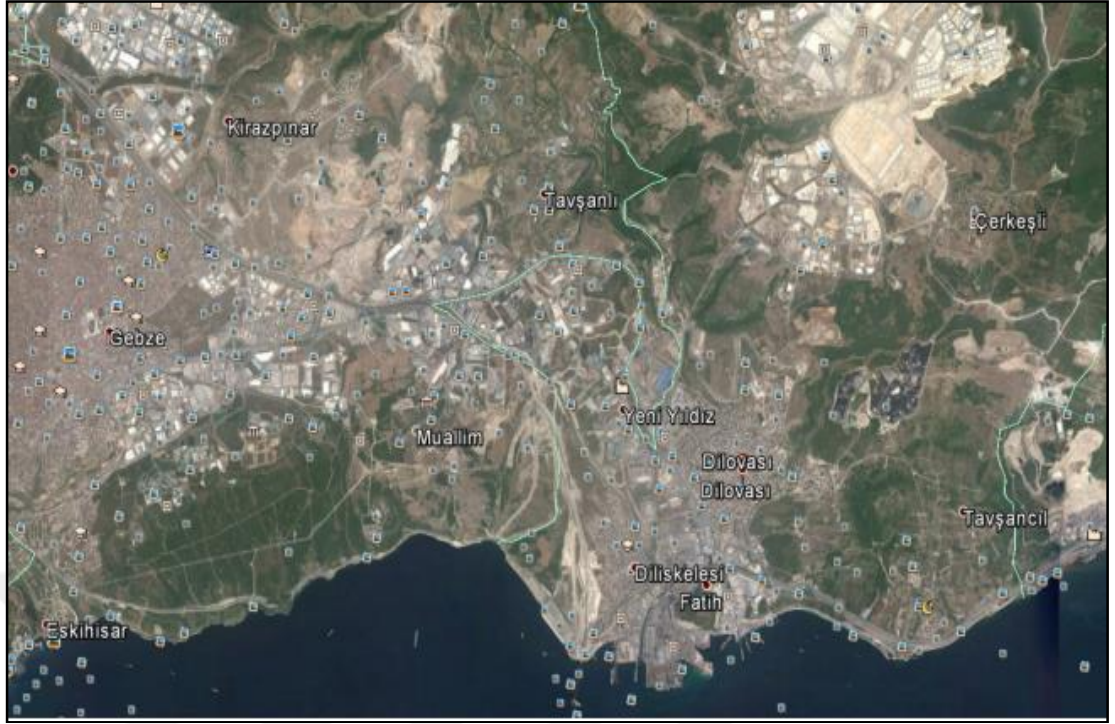
Dilovası ilçesi, 2008 yılında Gebze'den ayrılarak ilçe olmuştur. İki bin hektarlık Gebze iline 10 km, İstanbul iline 45 km, Kocaeli iline 35 km uzaklıktadır (Şekil 3.1). Dilovası'nın merkezi denizden 45 m yükseklikte.



Şekil 3.1. Dilovası görsel haritası

Anadolu yakasını Avrupa yakasına bağlayan kara, deniz ve demir yolları ilçemizden geçmekte olup, 9 adet önemli deniz limanları bulunmaktadır. Ayrıca Sabiha Gökçen Havalimanı ilçeye 30 km mesafede bulunmaktadır. Ulaşım imkânları açısından zengin olduğundan bir ticaret merkezi haline gelip sanayileşme artmıştır. Gün geçtikçe bölgede fabrika sayısı ve nüfus hızla artmaktadır. 2016 yılı Genel Nüfus Sayımına göre İlçe'nin Nüfusu 46.099'dur. Yüz ölçümü 123 km<sup>2</sup> (48,3 mi<sup>2</sup>) ve rakım 45 m (148ft)'tir [24,25].

Dilovası sınırları içerisinde 12 km uzunluğundaki dil deresi geçerek izmit körfezine dökülür. Bölge Dilovası adını sahilde karanın denize doğru dil şeklinde olduğu için almıştır. İzmit Körfezi'nin karşı kıyıya en yakın yeri Diliskelesi'dir.



Şekil 3.2. Dilovası İlçesi ve Çevresinin Google Earth Uydu Görüntüsü

Dilovası ilçesinin ekonomisi sanayiye dayalıdır. İlçe sınırlarında 5 tane OSB (Organize Sanayi Bölgesi) ve 1 tane Sanayi sitesi mevcuttur. Dilovası da aktif olan sanayi kuruluşlarından bazıları burada olup Türkiye'nin en büyük sanayi kuruluşlarındandır. Dilovasında olan Organize Sanayi Bölgeleri yaklaşık 2.200 hektar alandadır. OSB de 193 tane sanayi kuruluşu ve 20.000 çalışanı ile ülke ekonomisinde önemli rol oynar. Dilovası OSB 822 hektar, Makina OSB 300 hektar, GEBKİM (Kimyacılar) OSB 243 hektar, İMES OSB (Makina İhtisas) 300 hektar, Kömürcüler OSB 78 hektar, Mermerciler Sanayi Sitesi 270 hektar alana yayılmıştır.

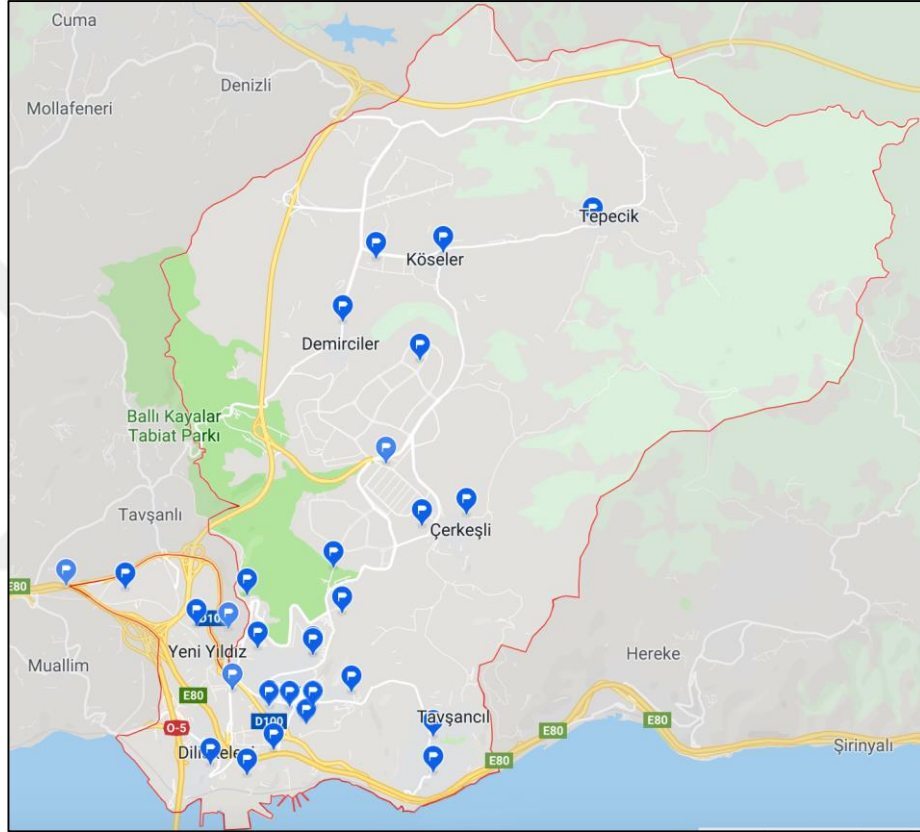
Kroman Çelik A.Ş., İstanbul Demir Çelik A.Ş., Total A.Ş., Solventaş A.Ş., Altıntel Liman, Terminal İşletmeleri A.Ş., Poliport A.Ş., Yılport A.Ş., Kızılkaya A.Ş. ve Belde A.Ş. Faaliyet gösteren limanlar arasındadır.

Dilovası OSB, çeşitli kuruluşları içeren OSB olup bu bölgede ağırlıklı olarak metal ve kimya sektöründe faaliyet gösterilmektedir. Dilovası ilçesinde faaliyet gösteren en büyük metal ve sanayi kolları, Cam Sanayi, Temel Kimya ve Plastik Sanayi, Demir Çelik ve Döküm Sanayi, Madeni Eşya Araç Gereç Sanayi, Motorlu Taşıt Yapımı ve Yan Sanayi, Endüstriyel Elektrikli Makina ve Cihazlar Yapımı şeklinde listelenebilir.

### 3.2. Numunelerin Toplanması

Bu çalışma için, Dilovası ilçesinden 29 farklı bölgeden numune toplanmıştır. Alınan numunelerin koordinatları Tablo 3.1’de verilmiştir. Koordinat belirlemede Magellen eXplorist 500 LE model GPS cihazı kullanılmıştır.

Toprak numunelerinin alındığı bölgeler Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Numunelerin toplandığı bölgenin haritada gösterimi

Toprak numuneleri toplanırken, demir halka, çekiç, el küreği, ip, naylon poşet, etiket, ip, Gps cihazı, bilgi formu ve kamera gibi malzemeler kullanıldı. Şekil 3.4 (a), (b) ve (c)’de numune alma aletleri gösterilmektedir. Toprak numunelerini alma aleti olarak, 10 cm çapında 5 cm yüksekliğinde demir halka kullanılarak, toprak yüzeyinden itibaren 0-5 cm derinlikten çekiç yardımı ile toprağa çakılıp, kürek yardımı ile naylon poşetlere numune alma işlemi yapıldı. Bu işlem 1m x 1m alandan 4 numunenin toplanıp aynı kaptaki birleştirilmesi ile tek bir numune elde edildi (Şekil 3.4 (c)). Her bir numuneden yaklaşık 2 kg alındı. Numune alırken kullanılan aletler her numune alma işlemi sonrasında saf su ile yıkanıp kontaminasyon engellendi.

Tablo 3.1. Toplanan numunelerin koordinatları

Mevkii	Numune Kodu	Koordinatlar	
D1 ÇOBANTUR	19072017D1	40° 47' 49K	029° 31' 45D
D2 ARITMA	19072017D2	40° 48' 10K	029° 32' 03D
D3 GEBKİM	19072017D3	40° 48' 27K	029° 33' 11D
D4 İHTİSAS	19072017D4	40° 49' 32K	029° 33' 54D
D5 MAKİNA	19072017D5	40° 50' 36K	029° 34' 22D
D6 GÜNEŞSPOR	19072017D6	40° 47' 37K	029° 37' 56D
D6BATIN	19072017D6BTN	40° 47' 33K	029° 32' 54D
D7LDRKOZMETİK	19072017D7	40° 47' 37K	029° 32' 09D
D8 ORHANGAZİ	19072017D8	40° 47' 59K	029° 33' 18D
D9 MARSHAL	19072017D9	40° 46' 53K	029° 32' 47D
D10 KAYAPINAR	19072017D10	40° 47' 09K	029° 32' 55D
D11 TURGUTÖZL	19072017D11	40° 47' 10K	029° 33' 26D
D12 TAVŞANCIL	19072017D12	40° 46' 42K	029° 34' 33D
D13 ZİYATOPTAN	19072017D13	40° 46' 20K	029° 34' 33D
D14 YILPORT	19072017D14	40° 46' 18K	029° 32' 03D
D15 YILPORT	19072017D15	40° 46' 34K	029° 32' 22D
D16 ÇERKEŞLİ	19072017D16	40° 48' 53K	029° 34' 24D
D17 İSTİKLAL	19072017D17	40° 49' 02K	029° 35' 05D
D18 DEMİRCİLER	19072017D18	40° 51' 01K	029° 33' 19D
D19 MAKİNASAN	19072017D19	40° 51' 39K	029° 33' 46D
D20 KÖSELER	19072017D20	40° 51' 43K	029° 34' 41D
D21 TEPECİK	19072017D21	40° 52' 07K	029° 36' 44D
D22 MUALLİM	25072017D22	40° 48' 16K	029° 29' 32D
D23 ESAKİMYA	25072017D23	40° 48' 14K	029° 30' 20D
D24 YENİYILDIZ	25072017D24	40° 47' 51K	029° 31' 19D
D25 İZOCAM	25072017D25	40° 47' 11K	029° 31' 48D
D26 DİLİSKELESİ	25072017D26	40° 46' 25K	029° 31' 30D
D1EKYAĞMURSNRS	22022019DEK1	40° 47' 05K	029° 32' 35D
D2EKYAĞMURSNRS	22022019DEK2	40° 47' 09K	029° 32' 19D



Şekil 3.4. Toprak numunelerini alma aletleri

### 3.3. Numunelerin Radyasyon Ölçümü için Hazırlanması

Toplanan numuneler oda sıcaklığında 1 mm genişlikte gözeneklere sahip çelik elek yardımıyla içerisindeki odun ve taş gibi yabancı maddeler çıkarılarak herbiri elek ile elendi ve radon dengesine gelmesi için 4 hafta boyunca kurumaya bırakıldı.

Homojen hale gelen numuneler Kocaeli Üniversitesi Fizik laboratuvarında bulunan etüve koyularak 60°C 'de 48 saat boyunca kurutuldu.

Sayım yapılacak kabın darası alınarak, kuruyan numuneler Şekil 3.5'te gösterilen sayım kaplarına koyularak net ağırlıkları belirlendi. Sayım kapları üzerine cam kalemi ile numune kodları yazıldı.

Sayım kaplarının kapakları kapatılıp hava almayacak şekilde parafin ile izole edildi. Uranyum serisi elementlerinde doğru tespit yapılması açısından Radonun dengeye gelmesi gerekmektedir. Bu yüzden izole edilen sayım kapları, sayım yapılmadan önce 4 hafta boyunca bekletildi.



Şekil 3.5. Numune kapları

### 3.3.1. Numunelerin sayısı

Sayımaya hazır olan her numune Kocaeli Üniversitesi Fizik Laboratuvarında bulunan ORTEC GEM2574-70 model HPGe Gama dedektörüne koyulup 24 saat sürelerde sayımaya alındı.

Tablo 3.2. Toplanan numunelerinin kütleleri

Numune Kodu	Brüt Kütle (g)	Boş Kap Ortalama (g)	Net Kütle (g)
19072017D12	231,78	30,65	201,13
19072017D13	216,49	30,65	185,84
19072017D14	225,25	30,65	194,6
19072017D15	149,9	30,65	119,25
19072017D16	220,03	30,65	189,38
19072017D17	157,85	30,65	127,2
19072017D18	147,53	30,65	116,88
19072017D19	260,86	30,65	230,21
19072017D20	218,01	30,65	187,36
19072017D21	204,83	30,65	174,18
25072017D22	159,18	30,65	128,53
25072017D23	212,3	30,65	181,65
25072017D24	233,3	30,65	202,65
25072017D25	259,42	30,65	228,77
25072017D26	209,43	30,65	178,78
19072017D1	250,43	30,65	219,78
19072017D2	223,9	30,65	193,25
19072017D3	228,19	30,65	197,54
19072017D4	227,89	30,65	197,24
19072017D5	246,94	30,65	216,29
19072017D6	204,13	30,65	173,48
19072017D6BTN	138,55	30,65	107,9
19072017D7	221,81	30,65	191,16
19072017D8	150,42	30,65	119,77
19072017D9	203,42	30,65	172,77
19072017D10	190,86	30,65	160,21
19072017D11	239,83	30,65	209,18
22022019DEK1	176,93	30,65	146,28
22022019DEK2	97,21	30,65	66,56

### 3.4. Deneysel Hesaplamalar ve Yorum

#### 3.4.1. Enerji kalibrasyonu

Bu tez çalışmasında enerji ve verim kalibrasyonu için, Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) ile birlikte çalışmış olan An Eckert & Zeigler Company Isotope Product Laboratuvar firmasına ait 85548a-443 numaralı, 1 Ağustos 2011 12:00 referanslı, 1,6 g/cc yoğunluğuna sahip multinüklid standart kaynak (Ek-A) kullanılıp, standart kaynağın soğurma etkisi (self-absorpsiyon) iptal edilmiştir.

Standart kaynak, Am<sup>241</sup>, Cd<sup>109</sup>, Co<sup>57</sup>, Ce<sup>139</sup>, Hg<sup>203</sup>, Sn<sup>113</sup>, Cs<sup>134</sup>, Cs<sup>137</sup>, Cs<sup>134</sup>, Mn<sup>54</sup>, Y<sup>88</sup> ve Zn<sup>65</sup> radyonüklidlerini içermektedir.

Tablo 3.3. Spektrumdaki gama enerjilerine karşılık gelen kanal numaraları

Radyonüklid	Enerji (keV)	Kanal Numarası
<sup>241</sup> Am	59,5409	157,4
<sup>109</sup> Cd	88,0336	233,1
<sup>57</sup> Co	122,0607	323,35
<sup>139</sup> Ce	165,8575	439,5
<sup>203</sup> Hg	279,195	739,5
<sup>113</sup> Sn	391,697	1038,59
<sup>134</sup> Cs	604,721	1605,69
<sup>137</sup> Cs	661,66	1756,11
<sup>134</sup> Cs	795,864	2113,39
<sup>54</sup> Mn	834,848	2217,2581
<sup>88</sup> Y	898	2383,71
<sup>65</sup> Zn	1115,55	3114,56
<sup>88</sup> Y	1836,06	4871,1

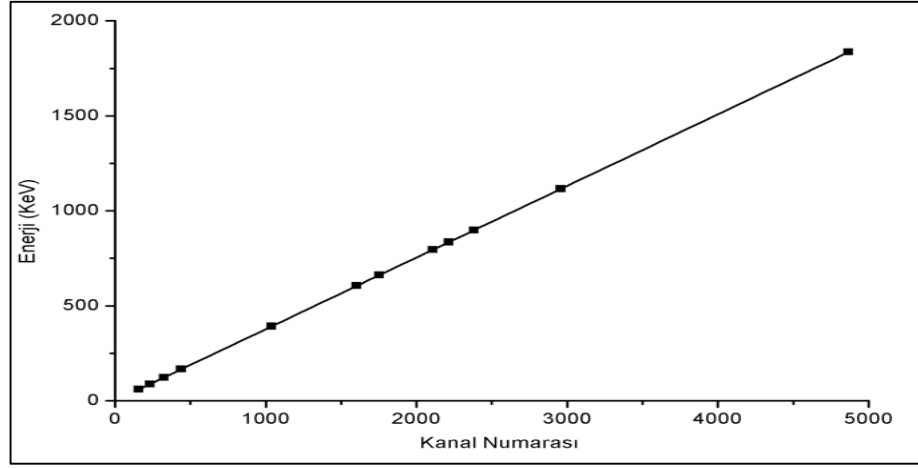
Standart kaynak ile 3600 saniye ölçüm alınarak Tablo 3.3'te gösterilen standart kaynak içindeki radyonüklidlere ait gama enerjilerine karşılık gelen kanal numaraları belirlendi.

Tablodaki değerler kullanılarak kanal numarasına ve enerjisilerine ait enerji kalibrasyonun grafiği çizildi.

Enerji kalibrasyon denklemi;

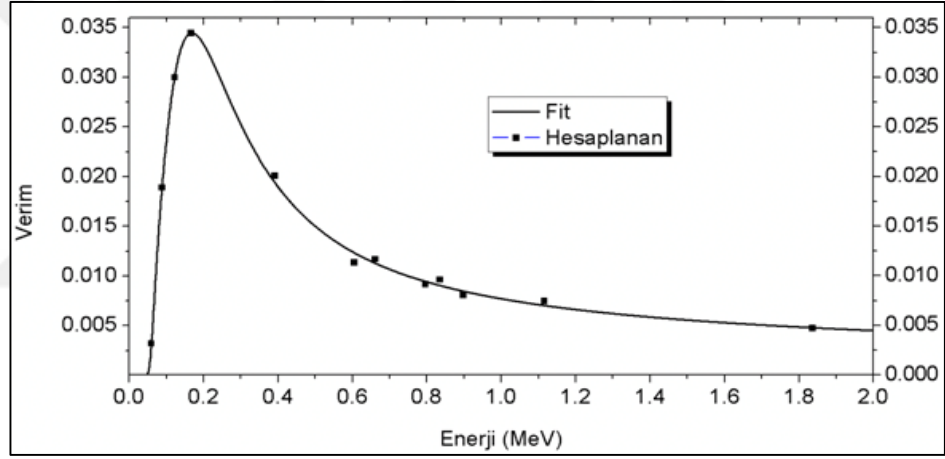
$$E = 0,2015 + 0,37140 *KN \quad (3.1)$$

şeklinde elde edildi.



Şekil 3.6. Enerji kalibrasyon grafiği

### 3.4.2 Verim kalibrasyonu



Şekil 3.7. Verim grafiği

Verim kalibrasyonunda, enerji kalibrasyonu için kullanılan standart kaynak kullanıldı. Aktivitesi belli olan standart kaynak ile aktivite denklemi (2.5) kullanılarak verim değerleri hesaplandı. Hesaplanan verim grafiği Şekil 3.7' de verilmiştir.

Grafikteki değerler fit edilerek, verim kalibrasyonu denklemi;

$$\varepsilon = \exp(-0,035535E + 5,0603370E0 - 0,902960E-1 - 0,129869E-2 + 0,008040E-3 - 0,000207E-4) \quad (3.2)$$

şeklinde elde edildi.



### 3.4.3 Aktivite

Doğal radyasyon olan  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve yapay radyasyon olan  $^{137}\text{Cs}$  için aktivite hesaplanmıştır. Bu aktivite hesabı için;

$$A = \frac{N_{\text{net}}}{\epsilon \gamma t I_{\gamma}} \quad (3.3)$$

Burada A aktivite,  $N_{\text{net}}$ , net pik alanı,  $\epsilon_{\gamma}$  verim değeri, t sayım süresi ve  $I_{\gamma}$  yayınlanma olasılığıdır.

$N_{\text{net}}$  pik alanı için background (fon) sayımı yapılmıştır. Background sayımı için dedektöre boş sayım kabı konularak 100.000 saniye sayım alınmıştır.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması Kocaeli ili Dilovası ilçesi'ndeki toprağın doğal radyoaktivitesinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Dilovası ilçesinden toplam 29 numune alınmış olup gama spektroskopisi ile sayımları yapıp, aktivite ve spesifik aktivite değerleri hesaplanmıştır. Ve aşağıda gama spektroskopi sistemi ile sayımları alınan her bir numune sonuçları tablolar halinde gösterilmiştir.

##### 4.1. Numunelerin Aktivite Değerleri

Gama spektroskopisi sistemini kullanarak sayımlarını saydığımız toprak numunelerinin pik alanı altındaki aktiviteleri, net sayımları ve spesifik aktiviteleri tablolar dizini olarak herbir numune ayrı olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.1. 100000 saniye sayılan 19072017D10 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D10						
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	17,47	4,23	17,4	2,9
		295,21				
		241,98				
	<sup>214</sup> Bi	609,31	17,28	3,97		
		1764,49				
		1120,29				
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	16,06	3,75	16,3	2,8
		2614,53				
		583,19				
	<sup>208</sup> Tl	860,56	4,14	10,33		
		911,21				
		968,97				
<sup>228</sup> Ac	338,32	18,83	4,51			
	661,66			3,26	0,07	3,3
	<sup>137</sup> Cs	661,66	3,26	0,07	3,3	0,07
	<sup>40</sup> K	1461	1,42	<MDA	242,06	<MDA

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.2. 99964 saniye sayılan 19072017D5 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D5						
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	10,5	4,9	10,6	3,2
		295,21				
		241,98				
	<sup>214</sup> Bi	609,31	10,63	4,35		
		1764,49				
		1120,29				
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	12,11	3,76	12,1	2,8
		2614,53	3,73	10,11		
	<sup>208</sup> Tl	583,19				
		860,56				
		911,21	13,53	4,51		
	<sup>228</sup> Ac	968,97				
		338,32				
<sup>137</sup> Cs	661,66	0,28	0,003	0,3	0,003	
<sup>40</sup> K	1461	345,37	<MDA	345,37	<MDA	

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.3. 99975 saniye sayılan 19072017D11 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D11						
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	15,47	4,075	15,5	2,8
		295,21				
		241,98				
	<sup>214</sup> Bi	609,31	15,53	3,73		
		1764,49				
		1120,29				
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	15,31	3,58	14,9	2,5
		2614,53	4,31	9,81		
	<sup>208</sup> Tl	583,19				
		860,56				
		911,21	16,04	3,89		
	<sup>228</sup> Ac	968,97				
		338,32				
<sup>137</sup> Cs	661,66	1,54	0,11	1,5	0,11	
<sup>40</sup> K	1461	165,26	<MDA	165,26	<MDA	

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.4. 99964 saniye sayılan 19072017D13 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D13							
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)	
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	31,56	3,47	30,8	2,3	
		295,21					
		241,98					
	<sup>214</sup> Bi	609,31	30,26	3,03			
		1764,49					
		1120,29					
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	28,25	3,33	28,6	2,4	
		2614,53					
		583,19					
	<sup>208</sup> Tl	860,56	7,76	9			
		911,21					
		968,97					
<sup>228</sup> Ac	338,32	33,03	3,89				
	661,66			7,76	0,03	7,8	0,04
	<sup>137</sup> Cs						
<sup>40</sup> K	1461	382,64	<MDA				

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.5. 199932 saniye sayılan 19072017D14 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D14							
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)	
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	22,49	3,23	21,9	2,1	
		295,21					
		241,98					
	<sup>214</sup> Bi	609,31	21,41	2,81			
		1764,49					
		1120,29					
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	23,08	3,18	23,5	2,08	
		2614,53					
		583,19					
	<sup>208</sup> Tl	860,56	6,13	9,49			
		911,21					
		968,97					
<sup>228</sup> Ac	338,32	25,42	2,89				
	661,66			1,39	0,08	1,4	0,08
	<sup>137</sup> Cs						
<sup>40</sup> K	1461	349,90	<MDA				

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.6. 99956 saniye sayılan 19072017D19 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D19									
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)			
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	46,43	3,15	45,4	2,0			
		295,21							
		241,98							
	<sup>214</sup> Bi	609,31	44,74	2,54					
		1764,49							
		1120,29							
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	54,15	3,1	54,1	1,9			
		<sup>208</sup> Tl					2614,53	13,9	8,72
							583,19		
	<sup>228</sup> Ac	860,56	57,43	2,51					
		911,21							
		968,97							
		338,32							
	<sup>137</sup> Cs	661,66	5,34	0,04	5,3	0,04			
	<sup>40</sup> K	1461	376,09	<MDA	376,09	<MDA			

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.7. 199939 saniye sayılan 19072017D21 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D21									
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)			
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	33,6	3,09	34,7	1,5			
		295,21							
		241,98							
	<sup>214</sup> Bi	609,31	34,97	1,64					
		1764,49							
		1120,29							
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	32,85	3,13	31,8	2,0			
		<sup>208</sup> Tl					2614,53	8,26	8,82
							583,19		
	<sup>228</sup> Ac	860,56	33,22	2,69					
		911,21							
		968,97							
		338,32							
	<sup>137</sup> Cs	661,66	9,7	0,02	8,7	0,02			
	<sup>40</sup> K	1461	459,98	<MDA	459,98	<MDA			

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.8. 99791 saniye sayılan 19072017D24 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D24						
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	51,86	3,11	13,2	1,0
		295,21				
		241,98				
	<sup>214</sup> Bi	609,31	8,81	1,05		
		1764,49				
		1120,29				
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	22,14	3,46	0,24	<MDA
		2614,53				
		583,19				
	<sup>208</sup> Tl	860,56	0,24	<MDA		
		911,21				
		968,97				
<sup>228</sup> Ac	338,32	1,18	<MDA			
	661,66					
<sup>137</sup> Cs	661,66	0,17	0,02	0,2	0,002	
<sup>40</sup> K	1461	225,91	<MDA	225,91	<MDA	

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.9. 99961 saniye sayılan 19072017D26 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D26						
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	26,2	3,64	24,7	2,5
		295,21				
		241,98				
	<sup>214</sup> Bi	609,31	23,49	3,32		
		1764,49				
		1120,29				
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	28,26	3,33	27,9	2,3
		2614,53				
		583,19				
	<sup>208</sup> Tl	860,56	6,99	9,17		
		911,21				
		968,97				
<sup>228</sup> Ac	338,32	30,15	3,23			
	661,66					
<sup>137</sup> Cs	661,66	1,28	0,01	1,3	0,01	
<sup>40</sup> K	1461	323,47	<MDA	323,47	<MDA	

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.10. 99916 saniye sayılan 19072017D1 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D1									
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)			
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	27,18	3,39	26,8	2,3			
		295,21							
		241,98							
	<sup>214</sup> Bi	609,31	26,43	3,03					
		1764,49							
		1120,29							
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	32,63	3,22	32,1	2,2			
		<sup>208</sup> Tl					2614,53	8,19	9,09
							583,19		
	860,56								
	<sup>228</sup> Ac	911,21	34,68	3,28					
		968,97							
		338,32							
	<sup>137</sup> Cs	661,66	1,06	0,01			1,06	0,01	
	<sup>40</sup> K	1461	407,63	<MDA			407,63	<MDA	

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.11. 99972 saniye sayılan 19072017D3 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D3									
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)			
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	11,92	4,8	11,9	3,2			
		295,21							
		241,98							
	<sup>214</sup> Bi	609,31	11,79	4,31					
		1764,49							
		1120,29							
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	14,97	3,62	14,5	2,7			
		<sup>208</sup> Tl					2614,53	4,05	9,54
							583,19		
	860,56								
	<sup>228</sup> Ac	911,21	15,92	4,27					
		968,97							
		338,32							
	<sup>137</sup> Cs	661,66	0,64	0,002			0,64	0,002	
	<sup>40</sup> K	1461	213,22	<MDA			213,22	<MDA	

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.12. 99736 saniye sayılan 25072017D22 toprak numunesi

Numune Kodu: 25072017D22									
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)			
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	50,45	3,3	48,6	2,2			
		295,21							
		241,98							
	<sup>214</sup> Bi	609,31	47,05	3,05					
		1764,49							
		1120,29							
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	57,2	3,2	58,0	2,07			
		<sup>208</sup> Tl					2614,53	13,09	8,99
							583,19		
	860,56								
	<sup>228</sup> Ac	911,21	63,12	2,86					
		968,97							
		338,32							
		<sup>137</sup> Cs	661,66	1,17			0,002	1,2	0,002
		<sup>40</sup> K	1461	463,32			<MDA	463,32	<MDA

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.13. 94581 saniye sayılan 25072017D25 toprak numunesi

Numune Kodu: 25072017D25									
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)			
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	12,97	<MDA	<MDA	<MDA			
		295,21							
		241,98							
	<sup>214</sup> Bi	609,31	34,62	<MDA					
		1764,49							
		1120,29							
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	15,28	<MDA	<MDA	<MDA			
		<sup>208</sup> Tl					2614,53	16,86	<MDA
							583,19		
	860,56								
	<sup>228</sup> Ac	911,21	39,78	<MDA					
		968,97							
		338,32							
		<sup>137</sup> Cs	661,66	9,77			<MDA	1,2	<MDA
		<sup>40</sup> K	1461	214,28			<MDA	214,28	<MDA

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)



Tablo 4.14. 99973 saniye sayılan 19072017D15 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D15						
Seri	İzoto p	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	21,67	4,47	22,5	3,02
		295,21				
		241,98				
	<sup>214</sup> Bi	609,31	23,29	4,1		
		1764,49				
		1120,29				
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	16,25	4,01	15,3	3,2
		2614,53				
		583,19				
	<sup>208</sup> Tl	860,56	4,92	9,41		
		911,21				
		968,97				
<sup>228</sup> Ac	338,32	17,78	6,4			
	<sup>137</sup> Cs	661,66	0,72	0,003	0,72	0,003
	<sup>40</sup> K	1461	160,75	<MDA	160,75	<MDA

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.15. 146578 saniye sayılan 22022019DEK1 toprak numunesi

Numune Kodu: 22022019DEK1						
Seri	İzoto p	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	25,83	3,43	25,2	2,3
		295,21				
		241,98				
	<sup>214</sup> Bi	609,31	24,68	3,15		
		1764,49				
		1120,29				
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	29,9	3,26	30,04	2,3
		2614,53				
		583,19				
	<sup>208</sup> Tl	860,56	6,96	9,3		
		911,21				
		968,97				
<sup>228</sup> Ac	338,32	33,11	3,31			
	<sup>137</sup> Cs	661,66	0,74	0,002	0,74	0,002
	<sup>40</sup> K	1461	294,30	<MDA	294,30	<MDA

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.16. 119536 saniye sayılan 19072017D2 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D2									
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)			
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	0,02	3,61	0,02	2,4			
		295,21							
		241,98							
	<sup>214</sup> Bi	609,31	0,02	3,17					
		1764,49							
		1120,29							
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	0,02	3,31	0,02	2,2			
		<sup>208</sup> Tl					2614,53	0,006	9,21
							583,19		
	860,56								
	<sup>228</sup> Ac	911,21	0,02	3,25					
		968,97							
338,32									
	<sup>137</sup> Cs	661,66	0,001	<MDA	0,001	<MDA			
	<sup>40</sup> K	1461	321,97	<MDA	321,97	<MDA			

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.17. 87836 saniye sayılan 22022019DEK2 toprak numunesi

Numune Kodu: 22022019DEK2									
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)			
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	23,33	6,01	23,5	4,2			
		295,21							
		241,98							
	<sup>214</sup> Bi	609,31	23,67	5,78					
		1764,49							
		1120,29							
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	24,5	4,34	22,7	3,6			
		<sup>208</sup> Tl					2614,53	7,65	10,43
							583,19		
	860,56								
	<sup>228</sup> Ac	911,21	25,15	7,83					
		968,97							
338,32									
	<sup>137</sup> Cs	661,66	1,1	0,004	1,1	0,004			
	<sup>40</sup> K	1461	370,04	<MDA	370,04	<MDA			

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.18. 106115 saniye sayılan 19072017D4 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D4									
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)			
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	14,28	4,13	14,1	2,9			
		295,21							
		241,98							
	<sup>214</sup> Bi	609,31	13,86	3,99					
		1764,49							
		1120,29							
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	12,33	3,8	11,5	3,1			
		<sup>208</sup> Tl					2614,53	4,06	9,04
							583,19		
	860,56								
	<sup>228</sup> Ac	911,21	12,93	6,33					
		968,97							
338,32									
	<sup>137</sup> Cs	661,66	0,18	0,006	0,2	0,006			
	<sup>40</sup> K	1461	334,41	<MDA	334,41	<MDA			

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.19. 99767 saniye sayılan 19072017D6 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D6									
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)			
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	20,36	4,03	19,8	2,7			
		295,21							
		241,98							
	<sup>214</sup> Bi	609,31	19,35	3,69					
		1764,49							
		1120,29							
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	20,36	3,73	18,1	2,8			
		<sup>208</sup> Tl					2614,53	5,66	10,07
							583,19		
	860,56								
	<sup>228</sup> Ac	911,21	17,32	4,6					
		968,97							
338,32									
	<sup>137</sup> Cs	661,66	8,96	0,4	9,0	0,4			
	<sup>40</sup> K	1461	208,83	<MDA	208,83	<MDA			

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.20. 230541 saniye sayılan 19072017D6BTN toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D6BTN						
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	21,99	3,64	21,9	2,4
		295,21				
		241,98				
	<sup>214</sup> Bi	609,31	21,85	3,23		
		1764,49				
		1120,29				
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	17,96	3,44	18,3	2,5
		2614,53				
		583,19				
	<sup>208</sup> Tl	860,56	5,93	8,8		
		911,21				
		968,97				
<sup>228</sup> Ac	338,32	20,97	3,84			
	<sup>137</sup> Cs	661,66	1,31	0,1	1,3	0,1
	<sup>40</sup> K	1461	268,30	<MDA	268,30	<MDA

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.21. 89242 saniye sayılan 19072017D7 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D7						
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	20	3,94	19,1	2,8
		295,21				
		241,98				
	<sup>214</sup> Bi	609,31	18,21	3,92		
		1764,49				
		1120,29				
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	21,79	3,48	22,02	2,3
		2614,53				
		583,19				
	<sup>208</sup> Tl	860,56	5,4	9,38		
		911,21				
		968,97				
<sup>228</sup> Ac	338,32	24,05	3,12			
	<sup>137</sup> Cs	661,66	0,97	0,002	1,0	0,002
	<sup>40</sup> K	1461	280,08	<MDA	280,08	<MDA

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.22. 89054 saniye sayılan 19072017D8 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D8						
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	18,18	4,52	18,1	3,3
		295,21				
		241,98				
	<sup>214</sup> Bi	609,31	18	4,82		
		1764,49				
		1120,29				
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	12,13	4,55	11,8	3,5
		2614,53				
		583,19				
	<sup>208</sup> Tl	860,56	3,85	9,88		
		911,21				
		968,97				
<sup>228</sup> Ac	338,32	15,05	6,92			
	661,66					
	<sup>137</sup> Cs	661,66	0,14	<MDA	0,14	<MDA
	<sup>40</sup> K	1461	1,66	<MDA	291,98	<MDA

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.23. 86744 saniye sayılan 19072017D9 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D9						
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	16,13	4,45	16,1	3,06
		295,21				
		241,98				
	<sup>214</sup> Bi	609,31	16,14	4,21		
		1764,49				
		1120,29				
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	13,34	3,98	12,7	3,01
		2614,53				
		583,19				
	<sup>208</sup> Tl	860,56	4,83	9,05		
		911,21				
		968,97				
<sup>228</sup> Ac	338,32	14,32	5,38			
	661,66					
	<sup>137</sup> Cs	661,66	4,59	0,006	4,6	0,006
	<sup>40</sup> K	1461	161,83	<MDA	161,83	<MDA

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.24. 88450 saniye sayılan 19072017D12 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D12									
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)			
238U	214Pb	351,92	18,56	4	18,3	2,8			
		295,21							
		241,98							
	214Bi	609,31	18,04	3,85					
		1764,49							
		1120,29							
232Th	212Pb	238,63	20,37	3,5	20,3	2,5			
		208Tl					2614,53	5,25	9,52
							583,19		
	860,56								
	228Ac	911,21	22,64	3,89					
		968,97							
338,32									
	137Cs	661,66	6,94	0,05	7,0	0,05			
	40K	342,91	1,67	<MDA	342,91	<MDA			

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.25. 99824 saniye sayılan 19072017D16 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D16									
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)			
238U	214Pb	351,92	22,21	3,76	21,6	2,6			
		295,21							
		241,98							
	214Bi	609,31	21,05	3,65					
		1764,49							
		1120,29							
232Th	212Pb	238,63	27,56	3,35	28,3	2,3			
		208Tl					2614,53	8,2	9,66
							583,19		
	860,56								
	228Ac	911,21	31,48	3,32					
		968,97							
338,32									
	137Cs	661,66	2,5	0,007	2,5	0,007			
	40K	1461	235,08	<MDA	235,08	<MDA			

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.26. 82520 saniye sayılan 19072017D17 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D17									
Seri	İzoto p	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)			
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	34,55	4	34,03	2,7			
		295,21							
		241,98							
	<sup>214</sup> Bi	609,31	33,63	3,55					
		1764,49							
		1120,29							
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	36,29	3,48	36,9	2,7			
		<sup>208</sup> Tl					2614,53	8,93	9,57
							583,19		
	860,56	44,66	4,69						
	<sup>228</sup> Ac			911,21					
				968,97					
338,32									
	<sup>137</sup> Cs	661,66	8,57	0,06	8,6	0,06			
	<sup>40</sup> K	1461	524,06	<MDA	524,06	<MDA			

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.27. 82607 saniye sayılan 19072017D20 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D20									
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)			
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	23,66	3,95	23,8	2,6			
		295,21							
		241,98							
	<sup>214</sup> Bi	609,31	23,83	3,55					
		1764,49							
		1120,29							
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	30,47	3,38	30,3	2,3			
		<sup>208</sup> Tl					2614,53	7,18	9,34
							583,19		
	860,56	33,18	3,35						
	<sup>228</sup> Ac			911,21					
				968,97					
338,32									
	<sup>137</sup> Cs	661,66	3,14	0,08	3,14	0,08			
	<sup>40</sup> K	1461	256,51	<MDA	256,51	<MDA			

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.28. 84715 saniye sayılan 19072017D23 toprak numunesi

Numune Kodu: 25072017D23									
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)			
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	28,05	3,66	27,5	2,5			
		295,21							
		241,98							
	<sup>214</sup> Bi	609,31	27,04	3,43					
		1764,49							
		1120,29							
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	36,31	3,29	35,3	2,2			
		<sup>208</sup> Tl					2614,53	9,31	9
							583,19		
	<sup>228</sup> Ac	860,56	37,54	3,14					
		911,21							
		968,97							
		338,32							
	<sup>137</sup> Cs	661,66	9,41	0,004	3,14	0,004			
	<sup>40</sup> K	1461	265,35	<MDA	265,35	<MDA			

\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)

Tablo 4.29. 99881 saniye sayılan 19072017D18 toprak numunesi

Numune Kodu: 19072017D18									
Seri	İzotop	Enerji (keV)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Belirsizlik (%)	Ağırlıklı Ortalama Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Ağırlıklı Belirsizlik (%)			
<sup>238</sup> U	<sup>214</sup> Pb	351,92	23,6	3,85	23,7	2,8			
		295,21							
		241,98							
	<sup>214</sup> Bi	609,31	23,76	4					
		1764,49							
		1120,29							
<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Pb	238,63	30,5	3,5	30,07	2,4			
		<sup>208</sup> Tl					2614,53	5,5	9,35
							583,19		
	<sup>228</sup> Ac	860,56	33	3,45					
		911,21							
		968,97							
		338,32							
	<sup>137</sup> Cs	661,66	3,04	0,009	3,04	0,009			
	<sup>40</sup> K	1461	390,74	<MDA	390,74	<MDA			

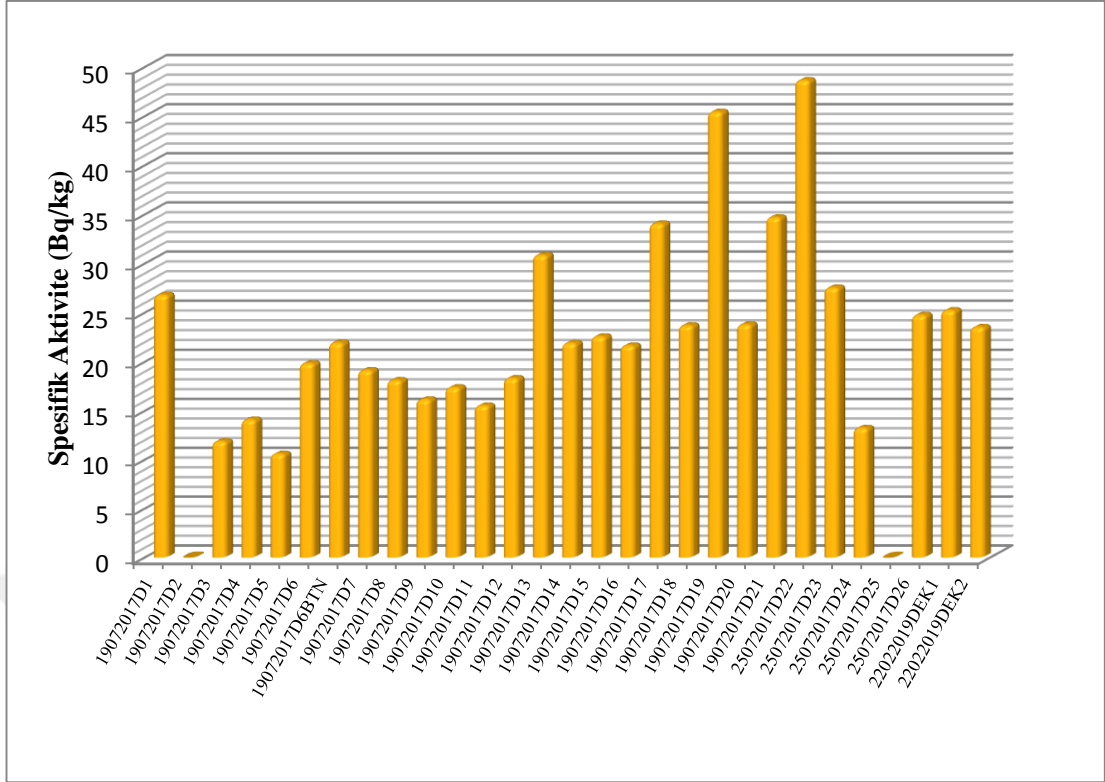
\*MDA: Minimum Detectable Activity (Minimum Ölçülebilir Aktivite)



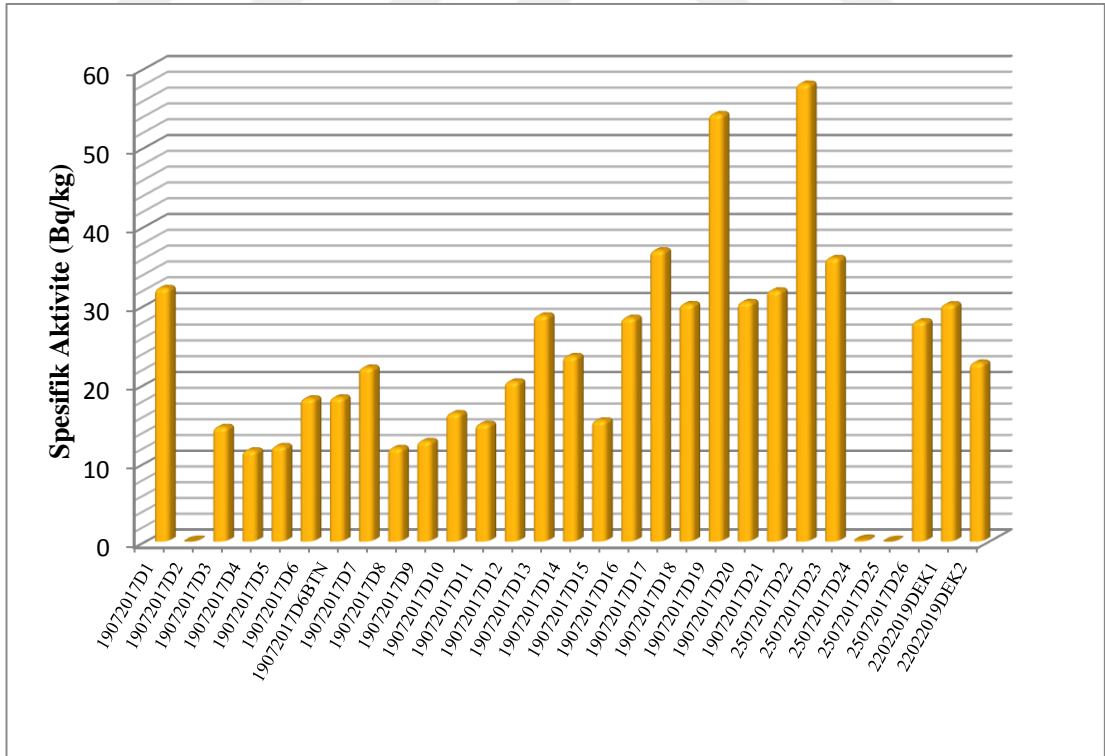
Tablo 4.30. Her toprak için hesaplanan spesifik aktivitelerinin değerleri

	<sup>238</sup> U (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>40</sup> K (Bq/kg)	<sup>137</sup> Cs (Bq/kg)
19072017D1	26,76 ± 2,3	32,1 ± 2,2	407,63 ±	1,06 ± 0,001
19072017D2	0,02 ± 2,4	0,019 ± 2,2	321,97 ±	<b>0,001 ±</b>
19072017D3	11,84 ± 3,2	14,49 ± 2,7	213,22 ±	0,64 ± 0,002
19072017D4	14,1 ± 2,9	11,51 ± 3,1	334,41 ±	1,13 ± 0,006
19072017D5	10,57 ± 3,2	12,06 ± 2,8	345,37 ±	0,28 ± 0,003
19072017D6	19,81 ± 2,7	18,12 ± 2,8	203,83 ±	8,96 ± 0,4
19072017D6BTN	21,91 ± 2,4	18,25 ± 2,5	268,30 ±	1,31 ± 0,1
19072017D7	19,1 ± 2,8	22,02 ± 2,3	280,08 ±	0,97 ± 0,002
19072017D8	18,09 ± 3,3	11,82 ± 3,5	291,98 ±	0,14 ±
19072017D9	16,1 ± 3,06	12,7 ± 3,01	161,83 ±	4,59 ± 0,006
19072017D10	17,36 ± 2,9	16,24 ± 2,8	242,06 ±	3,26 ± 0,07
19072017D11	15,5 ± 2,8	14,88 ± 2,5	165,26 ±	1,54 ± 0,11
19072017D12	18,29 ± 2,8	20,26 ± 2,5	342,91 ±	6,94 ± 0,05
19072017D13	30,82 ± 2,3	28,62 ± 2,4	382,64 ±	7,76 ± 0,04
19072017D14	21,87 ± 2,1	23,48 ± 2,08	349,90 ±	1,39 ± 0,08
19072017D15	22,54 ± 3,02	15,32 ± 3,2	<b>160,75 ±</b>	0,72 ± 0,003
19072017D16	21,61 ± 2,6	28,33 ± 2,3	235,08 ±	2,5 ± 0,007
19072017D17	34,03 ± 2,7	36,87 ± 2,7	<b>524,06 ±</b>	<b>8,57 ± 0,06</b>
19072017D18	23,67 ± 2,8	30,07 ± 2,4	390,74 ±	3,04 ± 0,009
19072017D19	45,4 ± 2	54,11 ± 1,9	376,09 ±	5,34 ± 0,04
19072017D20	23,75 ± 2,6	30,33 ± 2,3	256,51 ±	3,14 ± 0,08
19072017D21	34,66 ± 1,5	31,8 ± 2,0	459,98 ±	8,7 ± 0,02
25072017D22	<b>48,61 ± 2,2</b>	<b>57,96 ± 2,07</b>	463,32 ±	1,17 ± 0,002
25072017D23	27,51 ± 2,5	35,9 ± 2,2	265,35 ±	3,14 ± 0,004
25072017D24	13,21 ± 1	0,24 ±	225,91 ±	0,17 ± 0,002
25072017D25	<MDA	<MDA	214,28 ±	1,17 ±
25072017D26	24,72 ± 2,5	27,89 ± 2,3	323,47 ±	1,28 ± 0,01
22022019DEK1	25,2 ± 2,3	30,04 ± 2,3	294,30 ±	0,74 ± 0,002
22022019DEK2	23,5 ± 4,2	22,66 ± 3,6	370,04 ±	1,1 ± 0,004

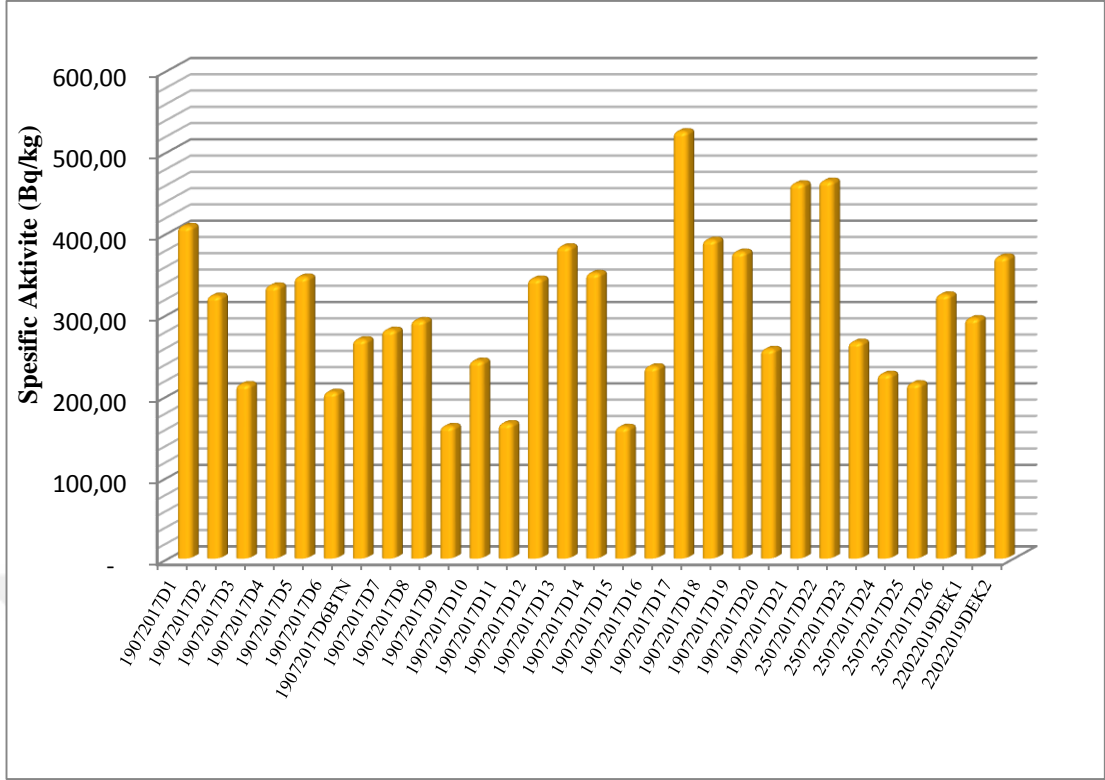
\*Spesifik aktivite değerlerinin yüksek ve düşük değerleri koyu renklidir.



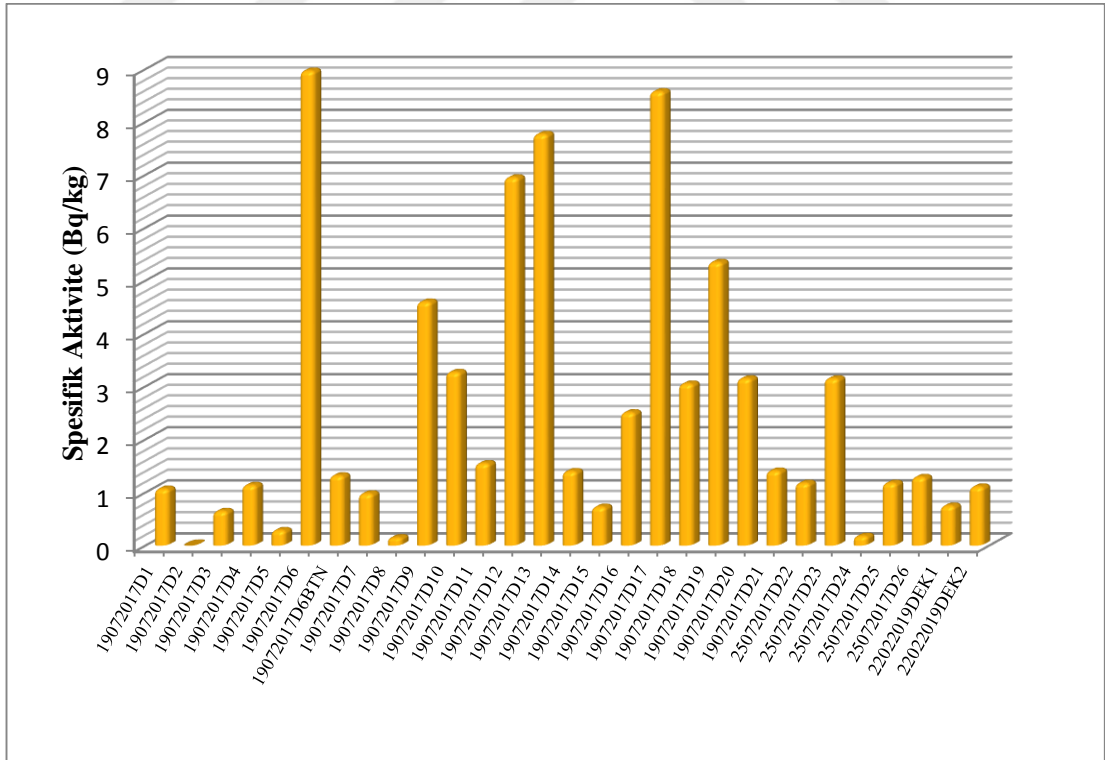
Şekil 4.1. Tüm toprak numuneleri için  $^{238}\text{U}$  spesifik aktiviteleri



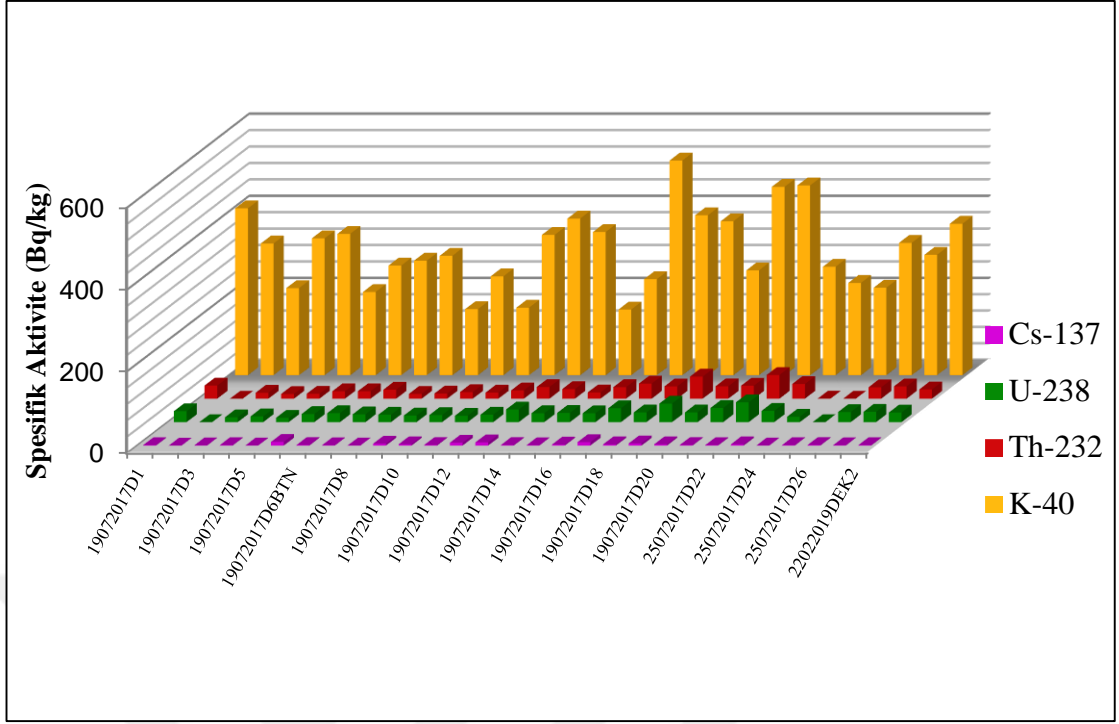
Şekil 4.2. Tüm toprak numuneleri için  $^{232}\text{Th}$  spesifik aktiviteleri



Şekil 4.3. Tüm toprak numuneleri için  $^{40}\text{K}$  spesifik aktiviteleri



Şekil 4.4. Tüm toprak numuneleri için  $^{137}\text{Cs}$  spesifik aktiviteleri



Şekil 4.5. Tüm toprak numuneleri için  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  spesifik aktivite değerlerinin gösterimi

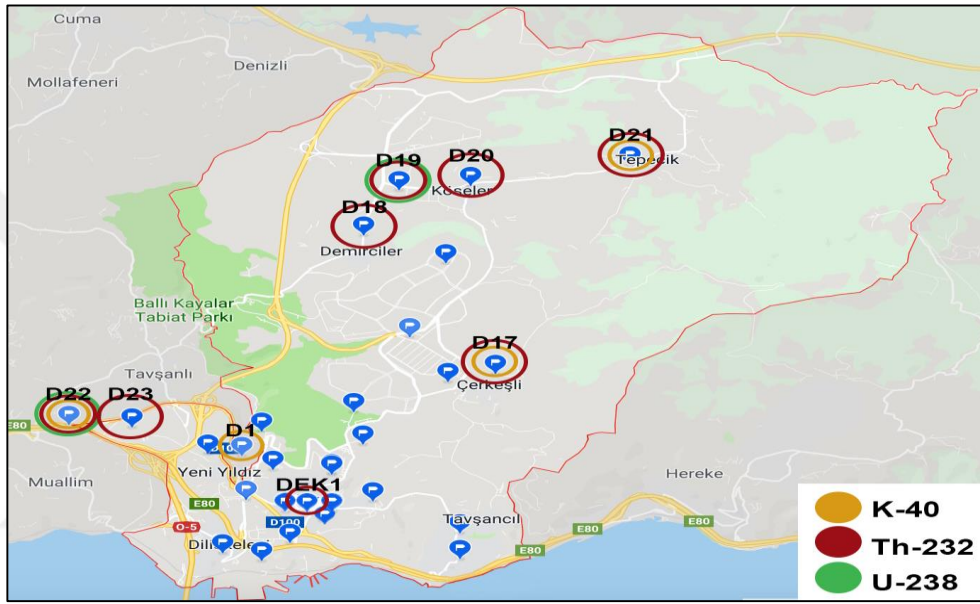
#### 4.2. Yorum

Bu çalışmada, Kocaeli ilinin Dilovası ilçesine bağlı topraklarından 29 adet toprak numunesi incelenmiştir.  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve yapay radyonüklid olan  $^{137}\text{Cs}$  radyoaktivite seviye ölçümleri HPGe dedektörü kullanılarak belirlenmiştir. Burada ölçülen toprak numunelerinin, aktivite, spesifik aktivite, ağırlıklı belirsizlikleri, ve ağırlıklı ortalamaları ORTEC GammaVision-32 programı ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak tablolar ve grafikler halinde verilmiştir.

$^{238}\text{U}$  en yüksek spesifik aktivite değeri  $48,61 \pm 2,2 \text{ Bq kg}^{-1}$  (D20),  $^{232}\text{Th}$  en yüksek spesifik aktivite değeri  $57,96 \pm 2,07 \text{ Bq kg}^{-1}$  (D22),  $^{40}\text{K}$  en yüksek spesifik aktivite değeri  $160,75 \pm 0,01 \text{ Bq kg}^{-1}$  (D17) ve  $^{137}\text{Cs}$  en yüksek spesifik aktivite değeri  $8,57 \pm 0,06 \text{ Bq kg}^{-1}$  (D17) olarak belirlenmiştir.

UNSCEAR raporunda dünya genelinde yüzey toprağı için spesifik aktivite değerleri belirtilmiştir. Bu değerler,  $^{238}\text{U}$  için  $35 \text{ Bq kg}^{-1}$ ,  $^{232}\text{Th}$  için  $30 \text{ Bq kg}^{-1}$  ve  $^{40}\text{K}$  için  $400 \text{ Bq kg}^{-1}$ 'dir [1].

$^{238}\text{U}$  için bulunan spesifik aktivite değerleri, D19 ve D22 toprak örneklerinde dünya genelinde belirtilen referans değerine yakın değere rastlanmıştır.  $^{232}\text{Th}$  için bulunan spesifik aktivite değerleri, D17, D18, D19, D20, D21, D22, D23 ve DEK1 toprak örneklerinde dünya genelinde belirtilen referans değerine yakın değere rastlanmıştır.  $^{40}\text{K}$  için bulunan spesifik aktivite değerleri, D1, D17, D21 ve D22 toprak örneklerinde dünya genelinde belirtilen referans değerine yakın değere rastlanmıştır.



Şekil 4.6.  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  için yüksek ve düşük olan bölgelerin grafikte gösterimi

Bu çalışma ile Dilovası bölgesinde günümüzdeki radyoaktivite değerleri belirlenmiştir. Daha öncesinde bu radyoaktivite değerleri belirlenmemiş olması ileride oluşacak herhangi bir nükleer kaza sonrasında bölgede hangi oranda olduğunun belirlenmesi açısından önem taşımaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Exposures From Natural Radiation Sources, *Sources And Effects Of Ionizing Radiation*, United Nations, New York, 89-133, 2000.
- [2] [www.dogainsanisbirligidernegi.org.tr/.../radyasyon\\_ve\\_yasam\\_1.doc](http://www.dogainsanisbirligidernegi.org.tr/.../radyasyon_ve_yasam_1.doc)
- [3] Knoll G. F., *Radiation Detection and Measurement* , 3, John Wiley and Sons, New York,70-400,(2000).
- [4] [http://www.zamandayolculuk.com/html-3/em\\_spektrum.html](http://www.zamandayolculuk.com/html-3/em_spektrum.html)
- [5] Arya A. P. , Editör: Şahin Y., *Çekirdek Fiziğinin Esasları*, Aktif Yayınevi, İstanbul, 427 s, 1999.
- [6] <https://acikders.ankara.edu.tr> (Ziyaret tarihi: 10 Eylül 2016)
- [7] <https://www.fmo.org.tr/> (Ziyaret tarihi: 12 Ekim 2016)
- [8] (<http://www.taek.gov.tr/>) (Ziyaret tarihi: 12 Ekim 2016)
- [9] International Atomic Energy Agency (IAEA), Radiation Safety, *IAEA Office of Public Information*, 96-00725, 1996.
- [10] National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), Guidance on Radiation Received in Space Activities, 97, 1988.
- [11] Krane K. S., *Nükleer Fizik I*, Editör: Şarer B., Palme Yayıncılık, Ankara, 2001.
- [12] Yülek G., *Radyasyon Fiziği (İyonlayıcı ve İyonlayıcı olmayan) ve Radyasyondan Korunma*, SEK Yayınları, Ankara, 1992.
- [13] Wang Y., *CRC Handbook of Radioactive Nuclides*, Chemical Rubber Company, ABD, 1969.
- [14] Korklu Z., Kocaeli İli Karadeniz Sahil Kumlarının Doğal Radyoaktivite Seviyelerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2010.
- [15] Önen S., *Radyasyon Fiziği (İyonlayıcı ve İyonlayıcı olmayan) ve Radyasyondan Korunma*, SEK Yayınları, Ankara, 1992.

- [16] Mızrak E., Çevresel Radyoaktivite Ölçüm Amaçlı Gama Spektroskopi Sisteminin Kalibrasyonu ve Test Amaçlarının Yapılması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2007,
- [17] Gilmore G. R., *Practical Gamma-Ray Spectrometry*, 2, John Wiley and Sons, New York, 2-38, 2008.
- [18] Apaydın G.,  $65 \leq Z \leq 92$  Bölgesinde Bazı Elementlerin K ve L X-ışını Floresans Parametrelerinin Ölçülmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2006.
- [19] Dikici M., *Kathal Fiziğine Giriş*, 71, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Yayınları, Samsun, 1993.
- [20] Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Çekmece Nükleer Araştırma Ve Eğitim Merkezi (TAEK), Tıp ve Biyolojik Bilimlerde Radyasyon Korunması Kurs Notları, Rapor No:32, 1985.
- [21] <http://laboratuar.kocaeli.edu.tr/> (Ziyaret tarihi: 8 Eylül 2018)
- [22] <http://www.canberra.com/products/detectors/si-li-detectors.asp> (Ziyaret tarihi: 12 Ağustos 2018)
- [23] <http://www.ortec-online.com/Products-Solutions/RadiationDetectors> (Ziyaret tarihi: 11 Ağustos 2018)
- [24] <https://tr.wikipedia.org/wiki/Dilovası> (Ziyaret tarihi: 2 Temmuz 2018)
- [25] [https://www.turkcebilgi.com/dilovas%C4%B1,\\_kocaeli](https://www.turkcebilgi.com/dilovas%C4%B1,_kocaeli) (Ziyaret tarihi: 5 Ağustos 2018)







1380 Seaboard Industrial Blvd.  
Atlanta, Georgia 30318  
Tel 404-352-8677  
Fax 404-352-2837  
www.analytiscinc.com

**CERTIFICATE OF CALIBRATION**  
Standard Radionuclide Source

85548A-443

170 mL High Density Solid in 0.2 L PP Bora Jar

**Customer:** EZN/NEL Elektronik Cihazlar  
**P.O. No.:** P622276, Item 1 (QCRA18256)  
**Reference Date:** 01-Aug-2011 12:00 PM EST **Grams of Master Source:** 0.019226

This standard radionuclide source was prepared gravimetrically from a master radionuclide solution. The master radionuclide solution was prepared gravimetrically by addition of radionuclides calibrated by an ionization chamber or a liquid scintillation counter. Calibration and purity were checked using a germanium gamma spectrometer system. At the time of calibration no interfering gamma-ray emitting impurities were detected. The gamma-ray emission rates for the most intense gamma-ray lines are given. Eckert & Ziegler Analytics (EZA) maintains traceability to the National Institute of Standards and Technology through a Measurements Assurance Program as described in USNRC Regulatory Guide 4.15, Revision 1, February, 1979, and compliance with ANSI N42.22-1995, "Traceability of Radioactive Sources to NIST." EZA is accredited by the Health Physics Society (HPS) for the production of NIST-traceable sources, and this source was produced in accordance with the HPS accreditation requirements. Customers may report any concerns with the accreditation program to the HPS Secretariat, 1313 Dolley Madison Blvd., Ste. 402, McLean, VA 22101.  
Density of solid matrix 1.6 g/cc.

Nuclide	Gamma-Ray Energy (keV)	Half-Life, Days	Activity, Bq	Branching Ratio	γps	Uncertainty, %		
						U <sub>A</sub>	U <sub>B</sub>	U
Am-241	59.5	1.580E+05	2.160E+03	0.3590	7.753E+02	0.1	1.7	3.4
Cd-109	88.0	4.626E+02	1.918E+04	0.0363	6.963E+02	0.5	2.3	4.7
Co-57	122.1	2.718E+02	4.735E+02	0.8556	4.051E+02	0.5	2.0	4.1
Ce-139	165.9	1.376E+02	6.896E+02	0.7989	5.509E+02	0.5	1.9	3.9
Hg-203	279.2	4.661E+01	1.627E+03	0.8146	1.325E+03	0.4	1.9	3.9
Sn-113	391.7	1.151E+02	1.091E+03	0.6497	7.091E+02	0.5	1.9	3.9
Cs-134	604.7	7.542E+02	2.407E+03	0.9762	2.349E+03	0.1	1.7	3.4
Cs-137	661.7	1.098E+04	5.693E+02	0.8510	4.844E+02	0.6	1.9	4.0
Cs-134	795.9	7.542E+02	2.407E+03	0.8546	2.057E+03	0.1	1.7	3.4
Mn-54	834.9	3.121E+02	1.358E+03	0.9998	1.358E+03	0.1	1.7	3.4
Y-88	898.0	1.066E+02	2.489E+03	0.9370	2.332E+03	0.4	1.9	3.9
Zn-65	1115.6	2.441E+02	3.639E+03	0.5060	1.841E+03	0.1	1.7	3.4
Y-88	1836.1	1.066E+02	2.489E+03	0.9920	2.469E+03	0.5	1.9	3.9

\* Master Source refers to Analytics' TCC mixture which is calibrated three times a year.

**Uncertainty:** U - Relative expanded uncertainty, k = 2. See NIST Technical Note 1297, "Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results."

(Certificate continued on reverse side)

ANA Form005 Rev. 11/01

TCC Certificate, Rev 1 10-01-2009

Corporate Office  
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355



Page 1 of 2

Laboratory  
1380 Seaboard Industrial Blvd. Atlanta, Georgia, 30318

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

**Güneş S. S.** and Özkan N., Natural and Artificial Radioactivity Concentrations of Soil Samples of Dilovası District of Kocali, Turkey, *33<sup>rd</sup> International Physics Congress*, Turkish Physical Society, Bodrum, 6-10 September 2017.



## ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında İzmit'te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İzmit'te tamamladı. 2011 yılında Kocaeli Üniversitesi Fizik Bölümünü kazandı. 2015 yılında Fizik Bölümünden mezun oldu. 2011-2019 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisansını yaptı.

