

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TUZ GÖLÜ CİVARINDAN ALINAN TOPRAK**  
**ÖRNEKLERİNDE DOĞAL RADYONÜKLİDLERİN**  
**BELİRLENMESİ**

Suat KESKİN

**FBE Fizik Anabilim Dalı Fizik Programında**

**Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı:** Yrd. Doç. Dr. AYŞE DURUSOY (YTÜ)

**İSTANBUL, 2008**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ .....	iv
KISALTMA LİSTESİ .....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ .....	vii
ÖNSÖZ.....	viii
ÖZET .....	ix
ABSTRACT .....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. TEMEL BİLGİLER.....	4
2.1 Radyasyon Nedir?.....	4
2.2 İyonlaştırıcı Radyasyon .....	4
2.2.1 Alfa Parçacıkları: .....	4
2.2.2 Beta Parçacıkları:.....	5
2.2.3 Nötronlar:.....	7
2.2.3.1 Nötron Kaynakları .....	8
2.2.4 X Işınları: .....	8
2.2.5 Gama Işınları .....	9
2.2.6 İzomerik Geçiş.....	11
2.3 Gama Işınlarıyla Etkileşme.....	12
2.3.1 Fotoelektrik Olay .....	15
2.3.2 Compton Saçılması.....	16
2.3.3 Çift Oluşumu .....	18
2.4 İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon.....	19
2.5 Radyoaktivite ve Çeşitleri.....	19
2.5.1 Doğal Radyoaktivite ve Radyoaktif Seriler.....	20
2.5.2 Yapay Radyoaktivite .....	24
2.6 Radyoaktif Bozunma Kanunu.....	25
2.6.1 Yarılanma Süresi ve Ortalama Ömür: .....	26
2.7 Doğal Radyasyon ve Topraktaki Doğal Radyoaktivite .....	27
3. DENEY DÜZENEGİ.....	29
3.1 Gama Spektrometre Yöntemi .....	29
3.1.1 Detektör Sistemi: .....	30
3.1.2 Çok Kanallı Analizör Sistemi:.....	34
3.2 Gama Spektrometrik Analiz İçin Ön Çalışmalar.....	35

3.2.1	Tüm Enerji Pik Alanı.....	35
3.2.2	Enerji Kalibrasyonu.....	38
3.2.3	Detektör Verim Kalibrasyonu.....	41
3.2.4	Örnek Spektrumunun Alınması.....	42
3.2.4.1	Nitel Analiz.....	43
3.2.4.2	Nicel Analiz.....	44
3.2.5	Sayım Hatalarının Hesaplanması.....	45
4.	DENEYSEL ÇALIŞMA VE HESAPLAR.....	46
4.1	Toprak Örneğinin Alınması Hazırlanması Ve Sayılması.....	46
4.2	Hesaplar.....	51
5.	TARTIŞMA VE SONUÇ.....	73
	KAYNAKLAR.....	76
	ÖZGEÇMİŞ.....	77

## SİMGE LİSTESİ

$R$	Çekirdek yarıçapı
$\nu^-$	Antinötrino
$\nu$	Nötrino
$\alpha$	Alfa Parçacığı
$\beta$	Beta Parçacığı
$\gamma$	Gama Parçacığı
$T$	Ortalama Ömür
$d$	Döteron
$\lambda$	Bozunma Sabiti
$h$	Planck Sabiti
$f_\gamma$	Gama Yayınlanma Olasılığı
$\varepsilon_\gamma$	Detektör Verimi

## KISALTMA LİSTESİ

TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
ÇNAEM	Çekmece Nükleer Araştırma Ve Eğitim Merkezi
UNSCEAR	United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
HpGe	High Purity Germanium
ADC	Analog-to-Digital Converter
MCA	Multi Channel Analyser

## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Coulomb potansiyel kuyusu .....	5
Şekil 2.2 Tipik bir beta bozunumu .....	6
Şekil 2.3 Tipik bir X-ışını spektrumu .....	9
Şekil 2.4 Ra- 226'nın bozunma şeması .....	10
Şekil 2.5 İzomerik durumların oluşumu .....	12
Şekil 2.6 Gama ışınlarının madde ile etkileşmesi.....	13
Şekil 2.7 Üç tip gama etkileşmesinin alanları .....	15
Şekil 2.11 (4n+2) Uranyum serisi dönüşümü.....	21
Şekil 2.12 (4n) Toryum serisi dönüşümü .....	22
Şekil 2.13 (4n + 3) Aktinyum serisi dönüşümü.....	22
Şekil 2.14 (4n + 1) Neptinyum serisi dönüşümü .....	24
Şekil 3.1 Gama spektrometre sistemi diyagramı. ....	30
Şekil 3.2 Tipik bir germanyum detektör.....	32
Şekil 3.3 Canberra Model 747E Zırhlı, Canberra Model 7500 HpGe detektör.....	33
Şekil 3.4 Canberra Model 7500 HpGe detektör kristali, üstten görünüm. ....	34
Şekil 3.5 NİM –BİM Model 2000 Kasa, PA, A, HV, ADC ve PC .....	35
Şekil 3.6 Gama pik alanının hesaplanmasında kullanılan parametrelerin gösterimi.....	37
Şekil 3.7 Canberra Model 7500 HpGe Detektör için Enerji-Kanal Kalibrasyon Grafiği.....	41
Şekil 3.8 Canberra Model 7500 HpGe Detektörün Verim Eğrisi.....	42
Şekil 3.9 Marinelli sayım geometrisi.....	43
Şekil 3.10 11 Numaralı örneğe ait spektrum .....	44
Şekil 4.1 Tuz Gölü sınırında yer alan Şereflikoçhisar ilçesi haritası [1].....	46
Şekil 4.2 Örneklerin alındığı noktalar .....	48
Şekil 4.3 Metal halka, metal çubuk, özel kürek.....	49
Şekil 4.4 Marinelli kabı boş halde. ....	50
Şekil 4.5 Örneklerin detektöre yerleştirilmesi.....	51
Şekil 4.7 Ra-226 Aktivite değerleri .....	68
Şekil 4.8 K-40 Aktivite değerleri.....	69
Şekil 4.9 Cs-137 Aktivite değerleri .....	70
Şekil 4.10 U-238 Aktivite değerleri .....	71
Şekil 4.11 Th-232 Aktivite değerleri.....	72

## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1 Enerji ve verim kalibrasyonu için önerilen izotoplar .....	38
Tablo 4.1 Örneklerin koordinatları .....	47
Tablo 4.2 1 Nolu örnek .....	53
Tablo 4.3 2 Nolu örnek .....	54
Tablo 4.4 3 Nolu örnek .....	55
Tablo 4.5 4 Nolu örnek .....	56
Tablo 4.6 5 Nolu örnek .....	57
Tablo 4.7 6 Nolu örnek .....	58
Tablo 4.8 7 Nolu örnek .....	59
Tablo 4.9 8 Nolu örnek .....	60
Tablo 4.10 9 Nolu örnek .....	60
Tablo 4.11 10 Nolu örnek .....	61
Tablo 4.12 11 Nolu örnek .....	62
Tablo 4.13 12 Nolu örnek .....	63
Tablo 4.14 13 Nolu örnek .....	64
Tablo 4.15 Tuz örneği .....	65
Tablo 4.6 Radyonüklidlerin aktivitelerinin örneklere göre değişimi .....	67
Tablo 5.1 Dünyanın değişik bölgelerinde ölçülen, topraktaki ortalama radyonüklid konsantrasyonu .....	73
Tablo 5.2 Türkiye de çeşitli bölgelerinde ölçülen radyonüklidlerin aktiviteleri .....	74
Tablo 5.3 Karadeniz bölgesi çeşitli yörelerde Cs-137 değerleri .....	74

## ÖNSÖZ

“Tuz Gölü Civarından Alınan Toprak Örneklerinde Doğal Radyonüklidlerin Belirlenmesi” adlı bu yüksek lisans tezi, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Çekmece Nükleer Araştırma Ve Eğitim Merkezi, Radyoaktivite Ölçüm Ve Analiz Biriminde gerçekleştirilmiştir. Çalışmam süresince bana yol gösteren yoğun işlerine rağmen yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Dr. Ahmet VARİNLİOĞLU ve Sayın Abdullah KÖSE beylere içtenlikle teşekkür ederim.

Tez danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. Ayşe DURUSOY’ a tez çalışmamı yürütebilmem için sağlamış olduğu destek ve yardımları adına teşekkürü bir borç bilirim.

Bana çalışma imkânı ve çalışma ortamı sağlayan Yıldız Teknik Üniversitesi Rektörü Prof. Dr. Durul ÖREN, Fen Edebiyat Fakültesi Dekanı Prof. Dr. Metin SUBAŞI, Fizik Bölüm Başkanı Prof. Dr. Kubilay KUTLU ve Fizik Bölümü eski Başkanı Prof. Dr. Emel ÇINGI hocamıza ayrıca teşekkür ederim.

Çalışmamı yürüttüğüm ve gerektiği zamanlarda bilgilerini benimle paylaşan Ç.N.A.E.M Radyoaktivite Ölçüm Ve Analiz Birimi çalışanları sayın Nurdan GÜNGÖR ve sayın Ayhan YÜKSEL ile değerli çalışanlarına teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans dönemimde bana desteğini esirgemeyen ve nükleer fizikle ilgilenmemi sağlayan sayın Ç.N.A.E.M Nükleer Mühendislik bölümünden Sayın İbrahim ARIKAN hocama ayrıca teşekkür ederim.

Benden her türlü maddi ve manevi desteklerini ve sevgilerini hiç esirgemeyen bu çalışmada da bana yardımcı olan sevgili ailem; babam Fuat KESKİN, annem Müşerref KESKİN ve kardeşim Tayyar KESKİN’ e teşekkürler.

Suat KESKİN



## ÖZET

Bu çalışmada, Ankara ili, Şereflikoçhisar ilçesindeki Tuz Gölü civarından alınan tuz ve toprak örneklerinde, gama spektrometre yöntemi kullanılarak, Ra-226, U-238, Th-232, K-40 izotoplarından kaynaklanan doğal radyoaktiviteler ile Çernobil kazası kaynaklı olan Cs-137 elementinin radyoaktivitesi belirlenmiştir. Aktivite ölçümlerinden önce tuz örneği ve 13 farklı yerden alınan toprak örnekleri homojen toz haline getirilerek Marinelli kaplarına konuldu. Sonra,  $4\pi$  geometrisinde HpGe detektör ile her bir örnek için gama aktivitesi ölçülmüştür.

Her bir örnek için, nükleer verilerden( yarı ömür, gama bolluğu, ...) yararlanıp detektör verimi ve fotopik alanları değerlendirilerek aktiviteler hesaplanmıştır.

Ölçülen aktiviteler, birbirleriyle ve Türkiye ile dünyanın farklı bölgelerindeki benzer çalışmalarda elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi, Radyoaktivite Ölçüm ve Analiz Birimi laboratuvarlarında yapılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Radyasyon, radyoaktivite, gama spektrometre, Ra-226, U-238, Th-232, K-40, toprak örneği, tuz örneği, doğal radyoaktivite

## ABSTRACT

In this study, natural radioactivities due to the Ra-226, U-238, Th-232, and K-40 isotopes and the Cs-137 activity due to Chernobyl accident were determined by gamma ray spectrometry method in the soil and salt samples taken in the vicinity of Salt Lake (Tuz Gölü) in Şereflikoçhisar, Ankara. Before the activity measurements, salt and soil samples taken from 13 different locations were processed to homogeneous powder form and filled in Marinelli pots. Then, the gamma activity of each sample was measured by a HpGe detector in  $4\pi$  geometry.

Activities were calculated for each sample by evaluating the photopeak areas and the detector efficiency along with using the associated nuclear data (half-life, gamma abundances etc.).

The measured activities were compared with each other and also with the results of similar studies carried out for different parts of Turkey and the world.

This study was performed in Çekmece Nuclear Research and Education Center, Radyoactivity Measurement and Analising Department, İSTANBUL.

**Key words:** Radiation, radioactivity, gamma spectrometry, Ra-226, U-238, Th-232, K-40, soil sample, salt sample, natural radyoactivity

## 1. GİRİŞ

İnsanların maruz kaldığı karasal kaynaklı radyasyon Uranyum, Toryum, Aktinyum, Neptünyum radyoaktif serileri elementleri ve bozunum ürünlerinden kaynaklanır. Radyoaktif elementlerin konsantrasyonlarının belirlenmesi açısından, yaşadığımız çevreyi bir bütün olarak düşünürsek, bu bütünü oluşturan parçalardaki aktivite tayinleri ayrı ayrı yapılmalıdır. Radyasyonun karasal kaynakları dünyanın oluşumundan beri var olan radyonüklidlerdir. Bu radyonüklidlerin en önemlileri U-238, Th-232 ve K-40, Ra-226 dir. K-40'nın izotopik bolluğu küçüktür, sadece doğal olarak oluşan potasyumun %0,012' sidir. Bununla birlikte, toprak yoğunlukları; özellikle potasyum taşıyan gübre uygulamaları ile tarımsal aktivitelerle fark edilebilir şekilde değiştirilebilir. Toryum veya 4n serileri aynı zamanda çevresel olarak önemli radyonüklidleri kapsar. Uranyum serilerinde olduğu gibi, toryum aynı zamanda 220 kütle numarası ile asal gaz radonun radyoaktif izotoplarını kapsar. Uranyum, doğada doğal olarak bulunan üç izotopa sahip olan bir elementtir. Uranyumun bu üç izotopu, U-238 %99,27 bolluğa, U-235 %0,72 bolluğa ve U-234 %0,0057 bolluğa sahiptir. (KATHREN 1984)

Bu çalışmada, çevresel örneklerden olan toprak ve tuz da, bulunan doğal radyoaktif elementlerin (Ra-226, U-238, Th232, K-40) ve Çernobil kaynaklı radyonüklid olan Cs-137 elementinin gama spektrometre yöntemiyle aktiviteleri belirlenmiştir. Bu çalışmanın yapılmasındaki en önemli neden, Türkiye için büyük öneme sahip olan Tuz Gölü bölgesindeki doğal radyoaktiviteyi belirlemektir. Bu çalışmada seçilen 13 istasyona ait toprak örnekleri konum olarak bakıldığında Tuz gölü kıyısında bulunan Şereflikoçhisar ilçesi sınırları dahilindedir (Şekil 4.1). Ayrıca bir istasyondan alınan tuz örneği için de aynı ölçümler yapılmıştır.

Şereflikoçhisar ilçesi, İç Anadolu Bölgesi'nde, Tuz Gölü'nün kuzeydoğusunda bulunur. Ankara ilinin en uzak ilçelerinden olan Şereflikoçhisar, Tuz Gölü ile Hirfanlı Barajı arasında sıkışmıştır. Kuzeyinde Bâlâ, doğusunda Evren, Sarıyahşi ve Ağaçören, batısında Tuz gölü ve Kulu ilçeleri ile çevrilidir.

İlçede hüküm süren iklim İç Anadolu'nun bariz iklimi olan sert step iklimidir. Yazlar sıcak ve kurak, kışlar soğuk ve karlıdır. Yıllık ortalama sıcaklık 12,6 derece, yıllık ortalama yağış miktarı 357 mm.dir.

Memleketimizin ikinci büyük tabii gölü olan Tuz Gölü, Şereflikoçhisar ilçesini batıdan ve güneyden çevirir. Havzasına düşen yağışın azlığı, buharlaşmanın şiddetli oluşu ve gölün derinliğinin az olması sebebiyle yazın suları buharlaşarak yerinde kalın bir tuz tabakası kalan gölde mutfak tuzu karakterinde tuz elde edilir. Yıllık tuz üretimi bakımından ülkemizin en önemli kaynağı olan Tuz Gölü, Türkiye tuz üretiminin yüzde 60'ını gerçekleştirir.

Ancak Tuz Gölü'nde bir çevre katliamı yaşanmakta, Konya'nın atık suları bir kanalla Tuz Gölü'ne boşaltılmaktadır. Bu durum gölde bazı zararlı minerallerin birikmesine ve su seviyesini yükselterek etrafındaki tarım arazilerinin çoraklaşmasına sebep olmaktadır.

Tuz Gölü Türkiye'nin ikinci büyük gölü olup meydana gelmesi tektoniktir. Tuz Gölü tüm yağışlarını kış aylarında alırken yazın göle giren su yoktur. Göl içinde suyun tuz konsantrasyonu çok yüksek olduğu için suda yaşayan bitkilere rastlanmaz. Göl çevresinde geniş bir alanda çok zayıf tuzcul floraya rastlanır. Tuz Gölü'nü besleyen sular doğuda Şereflikoçhisar'dan geçen Peçenek Suyu, güneyde Eskiil'den göle giren Bağlıca ve Kırkdelik suları ile Eşmekaya kaynakları, güneybatıda Tersakan ayağı ile batıda Cihanbeyli'den gelen İnsuyu'dur. Buğday, arpa, şeker pancarı türü ürünler yörenin tarım varlığını oluşturmaktadır.

Konya Ovası kapalı bir havzadır, dışarıya akıntısı yoktur. Konya Ovası'nda biriken ve tuzlanmaya neden olan fazla sular drenaj kanalı açılarak Tuz Gölü'ne akıtılmıştır. Drenaj amaçlı inşa edilen bu kanala Konya'nın kanalizasyonu başta olmak üzere çevredeki tüm fabrikaların ve küçük sanayi sitelerinin atıkları da bu kanala bağlanmıştır.

Türkiye'nin tuz ihtiyacının yüzde 60'ının karşılandığı Tuz Gölü'nün evsel atıklarla kirlenmesi insan sağlığını da tehdit etmektedir. Ayrıca Tuz Gölü ve onunla ekolojik etkileşim içerisinde bulunan alandaki nüfusun çok yoğun olması nedeniyle kontrol edilemeyen kentsel atıklar bölgenin biyolojik değerlerini tehdit etmektedir.

Türkiye için büyük öneme sahip olan Tuz Gölü ve çevresinde bulunan Şereflikoçhisar ilçesinde, toprak kaynaklı radyoaktivitenin varlığı ve miktarının belirlenmesi adına ayrıca bölgede bu amaçlı bir araştırmanın olmaması nedeniyle, bu çalışma yapılmıştır.

Bu tezin 2. bölümü olan temel bilgiler kısmında radyasyon ve kaynaklarından bahsedilmiş, gama radyasyonu detaylı bir şekilde ele alınmıştır. 3. bölümde ise yapılan çalışmanın deney düzeneği ve bu çalışmada kullanılan gama spektrometre yöntemi anlatılmıştır. 4. bölümde deneysel

Çalışma, veriler ve hesaplar yer almaktadır. Son bölümde ise yapılan çalışmayla ilgili elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

## 2. TEMEL BİLGİLER

### 2.1 Radyasyon Nedir?

Radyasyonu en temel anlamda, “ortamda yol alan enerji” olarak tanımlamak mümkündür ve bu kapsamda doğal ya da yapay radyoaktif çekirdeklerin kararlı yapıya geçebilmek için dışarı saldıkları hızlı parçacıklar ve elektromanyetik dalga şeklinde taşınan fazla enerjileri de “radyasyon” olarak adlandırılır. Radyasyon esas olarak iki kısımda incelenebilir; “parçacık” ve “dalga” tipi radyasyon. Parçacık radyasyonu; belli bir kütle ve enerjiye sahip çok hızlı hareket eden parçacıkları ifade eder. Dalga tipi radyasyon; belli bir enerjiye sahip ancak kütsüz radyasyondur. Dalga tipi radyasyon, titreşim yaparak ilerleyen elektrik ve manyetik enerji dalgaları gibidir. Bütün dalga tipi radyasyonlar ışık hızıyla ( $3 \times 10^8$  m/saniye) hareket ederler. Parçacık ve dalga tipi radyasyonları da yine iki gruba ayırmak mümkündür. Bunlar, “iyonlaştırıcı” ve “iyonlaştırıcı olmayan” radyasyonlardır. Radyasyon sınıflaması aşağıda olduğu gibidir.(TAEK 2007)

### 2.2 İyonlaştırıcı Radyasyon

İyonlaştırıcı Radyasyonlar (elektromanyetik veya parçacık tabiatlı radyasyonlar) maddeden geçerken onun atomlarını doğrudan veya dolaylı olarak iyonlaştıran ışınlardır. Bu ışınlar maddeden geçerken iyonlar meydana getirmekte olduğundan “İyonlaştırıcı Radyasyonlar” adını almaktadır.

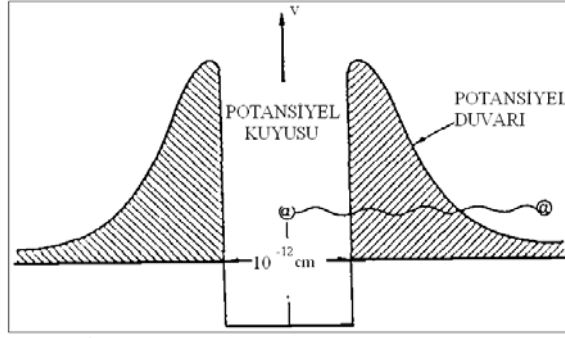
#### 2.2.1 Alfa Parçacıkları:

Alfa ışınları uranyum, toryum polonyum ve radyum gibi çeşitli radyonüklitlerden yayınlanan 4–9 MeV enerjilerinde bulunan Helyum ( $\text{He-4}$ ) çekirdekleridir. Alfa parçacıkları elektronlardan daha ağırdır. Bu nedenle havada ancak birkaç cm gidebilir. Enerjileri çarptıkları atomları iyonize ederek veya uyararak azalır. Parçacık tabiatında olmalarına karşın “Alfa Işınları” olarak ta tanımlanırlar.

Her alfa parçacığında iki proton ve iki nötron bulunmaktadır. Alfa parçacıkları, herhangi bir radyonüklitten bir, iki veya daha çok ve farklı enerjilerde yayınlanır. Radyonüklitler için karakteristik olup sürekli olmayan (Ayrık) enerjilere sahiptir.

Ağır ve kararsız halde bulunan çekirdek, kararlı duruma geçebilmek için içerisinde bulunan

nötron fazlasını atmak zorundadır. Bunu fisyon yoluyla veya iki proton ve iki nötrondan meydana gelen Helyum çekirdeklerini yani, alfa parçacıklarını, atarak ta yapabilir. Kuanta teorisine göre, yükü  $Z.e$  olan parçacık çekirdek yarıçapı “R” den uzakta iken elektrostatik kuvvetlerin etkisindedir. Alfa parçacıkları, büyük kararlılıkları nedeniyle, az çok çekirdeğin içinde oluşmuş durumdadır. Fakat kolayca dışarı çıkamazlar. Zira kinetik enerjileri, içinde buldukları “Coulomb Potansiyel Kuyusu” denilen engeli aşmaya yeterli değildir. Şekil 2.1



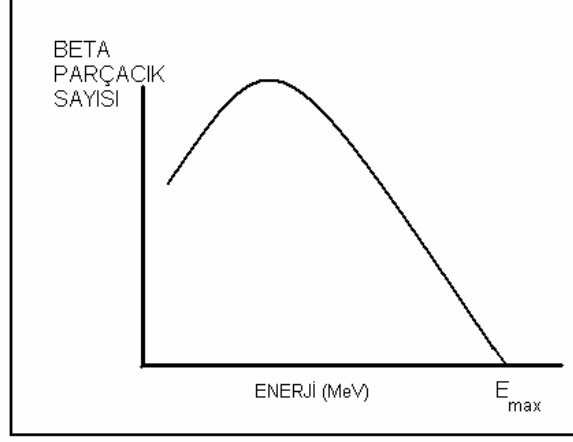
Şekil 2.1 Coulomb potansiyel kuyusu

Alfa parçacıkları çekirdek içinde sürekli hareket halindedir. Bu hareketleri esnasında alacakları oldukça büyük bir enerji ile potansiyel duvarında bir miktar yükselebilir ve çekirdekten çıkışını “Rezonans Düzeyleri” denilen belirli enerji düzeylerinde yapar.( SOYBERK 1998)

Alfa parçacıkları yük sayıları  $Z > 200$  den yüksek olan radyonüklitlerde kendiliğinden meydana gelir. Bir alfa ışımının çekirdekten atılmasıyla kütlesi 4, yükü ise 2 azalır.

### 2.2.2 Beta Parçacıkları:

Beta parçacıkları kararsız atom çekirdeklerinden yayınlanan yüksek enerjili elektron ve pozitronlardır. Kararsız çekirdeklere protonlar ve nötronlar daha yakından incelendiğinde, enerji fazlalığından kurtulmak için nükleonlarda bazı değişiklikler olmaktadır. Bu değişiklikler protonların nötronlara, nötronlarında protonlara dönüşmesi şeklindedir. Çekirdeğin enerjisi ayrıca yükleri nötrino ve antinötrino denilen iki parçacık tarafından bölüşülmektedir. Bu nedenle sürekli spektrum gösterir. Şekil 2.2 de tipik bir beta spektrumu görülmektedir. Betaların maksimum enerjisi her radyonüklit için kendine özgüdür.



Şekil 2.2 Tipik bir beta bozunumu

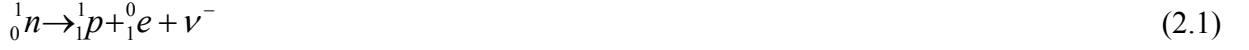
Beta parçacıklarına radyoaktif olan tüm periyodik sistemde rastlanır. Aslında iki cins enerjileri vardır. Bunlardan biri kesikli, diğeri sürekli spektrumdur. Kesikli spektrumun da birçok enerli grubu vardır ve bunlar ayrı enerjilerdedir. Bu elektronların çekirdekten çıkması söz konusu olmayıp tam tersine ikincil gama ışınları tarafından atomun elektron yörüngelerinde oluşturulur. Sürekli beta spektrumu da çekirdekten çıkar. Böylece spektrum sıfırdan en yüksek enerjilere kadar çeşitli enerjilere sahip olur ve her beta parçacığı için karakteristiktir.

Yapılan deneyler atomdan yayınlanan beta parçacıklarını farklı enerjilere sahip olduğunu göstermektedir. Belirli bir enerji değerine sahip beta parçacıklarının değişimini gösteren eğri sürekli bir değişim göstermekte ve bu nedenle beta parçacıkları sürekli spektruma sahip bulunmaktadır.

Beta parçacıklarının yayınlanmasında çekirdeğin belirli bir enerjisi ve serbest hale geçen tüm enerjinin belirli bir miktarı olmalıdır. Beta parçacıklarının en yüksek enerjisi ile beta parçacıklarının enerjileri arasındaki fark “Nötrino” ve “Antinötrino” adı verilen parçacıklar tarafından alınmaktadır. Nötrino yüksüz bir parçacıktır.

Bir çekirdekte nötron fazlası varsa, nötron bir beta ve bir Antinötrino çıkarır. Bu esnada parçacığın yükü +1 artar. Böylece çekirdekten bir “Beta parçacığı” ile bir “antinötrino” yayınlanır ve nötron protona dönüşür.





Çekirdekte proton fazlası olması halinde ise proton bir pozitron yayınlarken nötrona dönüşür. Bu esnada radyonüklidin yükü “-1” azalır.



Beta parçacıkları radyoaktif izotopların çoğunluğu tarafından, genellikle gama ışınlarıyla birlikte yayınlanır. Pozitronların ömürleri mikro saniyeler civarındadır. Bunlar serbest elektronlarla buluşarak belirli enerjilerle ve aksi yönlerde giden iki gama kuantı yayınlarken meydana gelirler. Proton fazlası olan özellikle yapay ve kararsız çekirdeklerde çekirdeğe yakın bulunan elektronların çekirdek içine girme olasılığı az da olsa mümkündür. Bu olaya ”Elektron Yakalanması” denir. Çekirdeğe giren elektronlar protonlarla birleşip nötron oluşturarak kararlı hale gelirler. Artık kalan enerjiyi paylaşmak üzere de bir nötrino oluşur.



### 2.2.3 Nötronlar:

Nötron elektrikçe yüksüz ve kütlesi, elektronun 1839 katı olan bir parçacıktır. Nötronlar kararsız halde bulunan çekirdeklerden 7–8 MeV ‘lik bağ enerjisinden daha yüksek olan enerjilere sahip oldukları zaman yayınlanır. Doğada nötron yayınlarken bir radyonüklid yoktur.

Chadwick 1932 yılında Berilyum’u Polonyum’un alfa ışınlarıyla bombardıman ederek nötronun varlığını saptamıştır.



Bu reaksiyonda oluşan nötronların 0,5 – 10 MeV’ lik geniş bir spektrumu vardır. Nötronlar fisyon olayı esnasında, nükleer reaksiyonlarla ve hızlandırıcılar aracılığıyla elde edilirler. Atom çekirdeğinin nötron ve protonlardan oluşması nedeniyle bazı nükleer reaksiyonlar, çekirdeğin parçalanması ve hızlandırıcılarla yüksek enerji uygulanması nötronların açığa çıkmasını sağlar.

Nötron, enerjisini yüklü parçacıklar gibi doğrudan kaybetmez. Elastik ve inelastik çarpışmalarla dolaylı olarak iyonizasyon ve çekirdek reaksiyonları oluşturur.

Nötron radyoaktif olup yaklaşık 13 dakikalık bir yarı ömrü vardır. Atom numarası sıfır olup serbest nötronlar kararsızdır. Nötron bir beta ışını yayınlamaya protona dönüşür.

Nötronlar gama ışınlarına benzer olarak dış radyasyon tehlikeleri en fazla olan radyasyonlardır. Nötronlar yüksüz olduklarından vücut içersine kolayca nüfuz edebilir ve dolaylı olarak dokularda iyonizasyonla zararlar oluştururlar.

### **2.2.3.1 Nötron Kaynakları**

Nötronlar istenilen nitelik ve nicelikte çeşitli enerji ve kaynak şiddetlerinde üç ana yolla elde edilir.

#### **i. Radyonüklitler Kullanılarak (Küçük Kaynaklar Oluşturularak)**

Hafif elementlerin alfa parçacıklarıyla bombardıman edilmesidir. Bu kaynaklardan elde edilen nötronların enerjileri 0,5 MeV ile 10 MeV arasındadır. Bu alanda kullanılan alfa kaynakları genellikle Ra-226, Po-210, Pb-210 ve Pu-239 gibi kaynaklardır.

$Li^7 (\alpha, n) B^{10}$ ,  $B^9 (\alpha, n) C^{12}$  gibi reaksiyonlar örnek verilebilir.

#### **ii. Nükleer Reaktörler Kullanılarak**

En önemli nötron kaynağıdır. Reaktörlerde elde edilen nötronlar fisyon (n,f) esasına dayanır. Bu nötronlar değişik enerji ve yüksek akıya sahiptirler.

#### **iii. Hızlandırıcıdan Elde Etme**

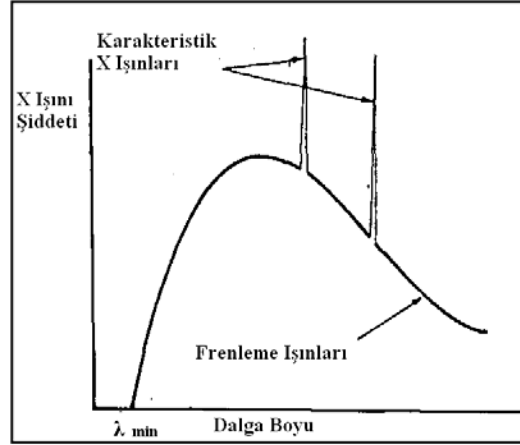
Bu yolla nötron elde etme için bir hedef maddesinin yeterli enerjiye sahip parçacıklarla bombardımanı esasına dayanır. Reaktörlerden elde edilen nötronların enerjilerine oranla çok daha küçük enerjilere sahiptirler.

$Be^9 (d, n) Be^{10} + 4,31 \text{ MeV}$  reaksiyonu örnek verilebilir.

### **2.2.4 X Işınları:**

X ışınları elektromanyetik tabiatlı ışınlardır. X ışınları atomun elektron uzayında meydana gelen ışınlardır. Elektron enerjileri, yüksek ve atomun içine kadar girerek iç yörünge elektronlarını

yerinden çıkaracak kadar enerjiye sahipse, boşalan yörünge elektronları üst yörünge elektronları tarafından doldurularak elementin “Karakteristik X Işınları” meydana gelir. Elektronun yerinden ayrılması için aldığı enerji, yörünge elektronu enerjisi ile karşılanacağından enerji düzeyleri arasındaki fark bir ışın kuantı halinde yayınlanır.



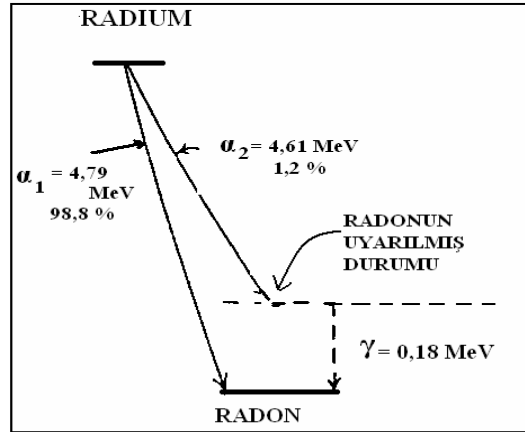
Şekil 2.3 Tipik bir X-ışını spektrumu (SOYBERK 1998)

X ışınları üretilmesi için,

- i. Elektron kaynağına,
- ii. Hedef maddesine,
- iii. Elektronları hızlandıracak enerjiye gereksinim vardır.

### 2.2.5 Gama Işınları

Gama ışınları, X ışınları gibi elektromanyetik ışınlardır. Ancak, meydana geliş şekilleri ve enerjileri yönünden ayrılırlar. Gama ışınları çekirdekten çıkan ışınlardır. Çekirdek yüksek enerji durumunda ve uyarılmış halde iken düşük enerji durumuna geçmeye çalışır. Düşük enerji durumuna geçerken bir alfa veya beta parçacığını dışarı atar. Ancak hemen kararlı duruma geçemez. Çekirdek fazla enerjisini kuantum mekaniği kanunlarına göre elektromanyetik ışınlar, fotonlar yani, gama ışınları yayınlamakla kararlı hale gelir.



Şekil 2.4 Ra- 226'nın bozunma şeması

Gama ışınları kısa sürede uyarılmış çekirdeğin meydana gelmesi sonucunda ortaya çıkarlar. Meydana gelişleri şu şekilde açıklanır:

Çekirdekte kalan bu enerji fazlası, çekirdeğin tabaka modeline göre üç ayrı hareketten ileri gelmektedir.

- i) Çekirdek içinde yüksek enerjili bir yörüngede bulunan nükleonlardan birinin düşük enerjili yörüngeye inmesi.
- ii) Çekirdeğin yüksek olan titreşim enerjisini değiştirerek daha düşük titreşim düzeyine düşmesi.
- iii) Çekirdeğin yüksek olan dönme enerjisini değiştirmesi ve daha düşük dönme düzeyine inmesi.

Olay çok kısa sürelidir. Daha çok, enerji değişimleri için  $10^{-6}$  saniye gibi kısa süre yeterli olmaktadır.

Gama ışınları radyoaktif bozunmalar, çekirdek fisyonu, elektron ve nötron yakalanması izomerik geçişler ve konversiyon olayları esnasında meydana gelir.

Atomun elektron uzayından yayınlanan elektromanyetik radyasyonlara “X veya röntgen ışınları”, çekirdekten yayınlanan sert ışınlar da “Gama Işınları” denir.

Radyoaktif maddelerden yayınlanan gama fotonlarının enerji bandı yaklaşık olarak 30 keV ile 7 MeV arasındadır. Daha yüksek gama fotonlarına kozmik ışınlar veya çok uyarılmış çekirdeklere

rastlanır. Bununla beraber fisyon olayı esnasında oluşan ani gamalar  $10^{10}$  MeV ve daha yüksek enerjilere kadar çıkabilmektedir. Genel olarak uygulamada kullanılan gama fotonlarının enerji bandı 0,1 ile 3 MeV arasında bulunmaktadır. Radyasyon dozimetrisi ve radyasyon korunması alanlarındaki enerji bandı 10 keV ile 7 MeV, dalga boyları da  $0.25 \text{ \AA}$  ile  $0.025 \text{ \AA}$  arasındadır.

Çekirdek, bir enerji durumundan, düşük bir enerji durumuna geçerken, bir gama ışını yayımlar. Gama fotonunun kesikli bir enerji spektrumu olur. Bu kesikli enerji değeri, nükleer enerji düzeyleri arasındaki enerji farkıdır

Gama ışınları, kısa dalgalı ışınlar olmaları nedeniyle maddeye girici kabiliyetleri çok yüksek olan ışınlardır. Beta parçacıklarından 100 defa, alfa parçacıklarından 10000 defa daha giricidir.

Gama ışınları maddeye nüfuz edebildiklerinden insan vücudundan rahatça geçebilirler. Bu geçiş esnasında dokularda yüksek derecede hasarlar oluşturur. Bu ışın kaynaklarından ancak uzakta durmak ve zırhlanma yöntemleriyle korunabilir. Yüksek atom numaralı maddelerden, saçılma olasılığı nedeniyle, saçılan ışınlardan da korunmak gerekir. Alfa ve beta ışınlarına oranla menzilleri büyük olan gama ışınlarının küçük bir doku hacmine verdiği enerji küçüktür.

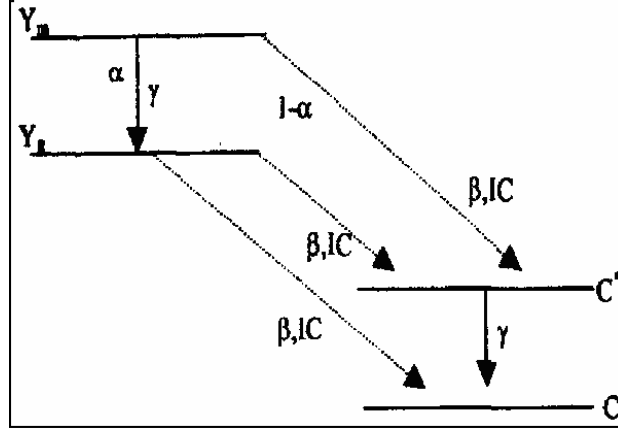
Gama ışınları ancak etkileşme yaptıkları zaman enerjilerini verirler. Dolayısıyla alfa ve beta ışınları gibi sürekli iyonizasyon yolu oluşturmaz. Bu nedenle vücuttaki küçük organ ve dokular, eşdeğer alfa ve beta parçacıklarına oranla daha az etkilenir.

### 2.2.6 İzomerik Geçiş

Kütle sayıları ve atom sıra numaraları aynı fakat yarı ömürleri ile radyoaktiviteleri farklı olan atomlara “izomer atomlar” denir. İzomer atomlara radyoaktif bozunmalarda sıkça rastlandığından önemleri büyüktür. İzomer çekirdeği, uyarılmış durumda olan ve açısal momentumu düşük enerji düzeyinden kararlı hal dâhil, birkaç birim farklı olan bir atomdur. Gama ışınlarının teorik olarak yarı ömürleri ölçülebilir değerdedir. Bununla beraber bazı gamaların yarı ömürleri çok kısa bulunmuştur. 250’den fazla radyonüklidin yarı ömrü saniyeden başlayarak yıllara kadar uzanmaktadır. Bu geçişler “İzomerik Geçişler” adını alır. Bir enerji durumunun izomerliği, mutlak olmayıp, düşük enerji durumunun bir özelliğidir.

Bir radyonüklidin izomerlik durumu kütle sayısına eklenen ve kararsız (metastabil) anlamına gelen “m” harfi ile belirtilir.  $\text{In}^{113\text{m}}$ ,  $\text{In}^{113}$  ün izomerik halini belirtir.

Yapay radyoaktivitenin nötron bombardımanı ile elde edilmesi, birçok izomer çiftlerin bulunmasına yol açmıştır.



Şekil 2.5 İzomerik durumların oluşumu.

Bir X ana çekirdeğin nötronlarla bombardımanı sonucu bir Y ürün çekirdeğin oluşma olasılığı iki durum göz önüne alınarak incelenebilir (Şekil 2.5). Y ürün çekirdeğinin oluşumu ya Yg temel (g:ground) durumu ile ya da Ym (m: izomer) izomerik durumu ile oluşabilir. Oluşan Ym izomerik durumun radyoaktif bozunma sabiti  $\lambda_m$  ve dallanma oranı  $\alpha$ 'yı izleyerek Yg temel duruma ve buradan  $\lambda_m$  radyoaktif bozunma sabiti ile  $\lambda_g$  yayılımı ile son çekirdek olan C' ye bozunabilir. Şekil 2.5

### 2.3 Gama Işınlarıyla Etkileşme

Gama ışınları bir maddeden geçtiklerinde fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkiler meydana getirirler. Radyasyon enerjisi maddede soğurulursa değişiklikler meydana gelir. Radyasyon soğurulmadan maddeden geçerse herhangi etki oluşmaz. Radyasyonun soğurulması bu enerjinin bir kısmının madde atomlarına verilerek azalması demektir.

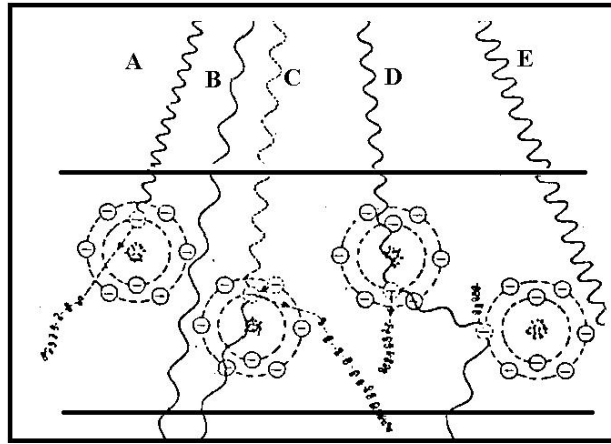
Elektromanyetik ışınlar maddeden geçtiklerinde oluşan iyonlar ve etkileşmeler radyasyon enerjisine bağlıdır. Düşük enerjilerde fotonlar atomların zayıf bağlarla bağlı dış elektronlarını fırlatabilir, yüksek enerjili fotonlar ise daha sıkı bağlarla atoma bağlı iç elektronları yerinden

atabilir. Çok yüksek enerjili fotonlar da atomun çekirdek alanı içerisinde etkileşme yaparlar.

Alfa ve Beta parçacıkları enerjilerini maddelerin atomlarına birincil iyonizasyon meydana getirerek doğrudan vermektedir. Gama gibi elektromagnetik radyasyonlar ise iyonizasyonu maddenin içinden geçerken enerjilerinin bir kısmını çarptıkları elektronlara vererek onların etkileşmeleriyle oluşturmaktadır. Yani iyonizasyon ikincil yahut dolaylı olarak elde edilmektedir. Çok az sayıda foton birincil iyonizasyon meydana getirmektedir.

Gama ışınlarının çarpmasıyla fotonların enerjisini alan elektronlar madde içerisinde hareket eder. Bu esnada yörünge elektronlarına defalarca çarparak pozitif ve negatif elektronlar oluşturur. Bu elektronlar da diğer elektronlara çarparak olayı arttırır. Meydana gelen bu iyonlar fiziksel ve kimyasal olaylar oluşturarak radyasyon etkilerini meydana getirir. Tüm radyasyon etkileri meydana gelen iyon sayısı ve dağılımının bir sonucudur. Şayet ışınlanan madde bir doku ise sonuç olarak biyolojik etkiler oluşur.(SOYBERK 1998)

Gama ışınlarıyla bir madde arasındaki etkileşmenin incelenmesi için elektromagnetik radyasyonlar değil, fakat foton veya kuantaların göz önüne alınması daha uygundur. Bir fotonun enerjisi vardır fakat kütlesi yoktur. Bu nedenle bir madde içerisinde önemli mesafeler alabilir.



Şekil 2.6 Gama ışınlarının madde ile etkileşmesi

Şekilde 2.6 (A) görüldüğü gibi, foton atomun (K) yörünge elektronuna çarpar ve enerjisinin büyük bir kısmını ona vererek büyük bir kinetik enerji almasına neden olur. Fotonun bu şekilde soğurulmasına “Foto Elektrik Soğurma” ve fırlatılan elektrona da “Foto Elektron” denir. Foto elektron madde içersinden geçerken geçtiği yol boyunca, durduruluncaya kadar, iyon çiftleri

oluşturur.

Şekilde 2.6 (B)'de görüldüğü gibi bazı fotonlar madde içerisinde hiç bir değişiklik meydana getirmeden doğrudan geçebilir.

Şekilde 2.6 (C)'de görüldüğü gibi bir foton (A) daki gibi (K) yörüngesinden bir elektron koparabilir. (K) yörüngesinde boşalan elektronun yeri derhal (L) yörünge elektronu tarafından doldurulur ve bu esnada karakteristik X ışınları veya fotonlar şeklinde açığa çıkar.

Şekilde 2.6 da (D) ışını ise (K) yörüngesinde bir elektrona çarpar. Enerjisinin bir kısmını ona vererek elektronu hızlandırır. Bu bir saçılma olayıdır.

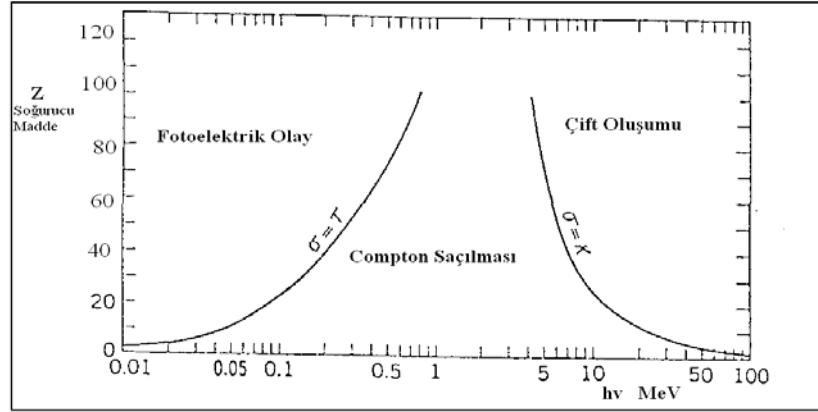
Foton azalan enerji ile başka yöne doğru hareket eder. Bu olaya “Compton Soğurması”, fırlatılan elektrona “Compton veya Recoil Elektronu” denir.

Bu saçılma olayındaki foton başlangıçtaki foton yönünden çeşitli yönlerde ikincil saçılma soğurulması oluncaya kadar hareketine devam eder. Bu olay birincil ve ikincil saçılma veya kısaca “Compton Saçılması”dır.

(E) ışını ise (B) ışını gibi hareket eder. Meydana gelen olaylar radyasyon enerjisine ve maddenin atom numarasına bağlıdır. Enerji arttıkça bilinen “Klasik Saçılma”, “Fotoelektrik ve Compton Saçılması”, “Çift Oluşumu” ve “Foto Nükleer Reaksiyonlar” gibi etkileşimler olur.

X ve Gama ışınlarının enerjilerinin zayıflaması bu ışınların bir maddeden geçerken miktar ve şiddetlerinin azalması demektir. Radyasyon enerjisinin zayıflaması, radyasyonların maddeden geçerken sadece engel kalınlığına değil, aynı zamanda maddede saçılan radyasyon miktarına da bağlıdır. Yani zayıflama olayı, Fotoelektrik, Compton ve Çift oluşumu ile meydana gelen soğurulma ve saçılma olaylarının kombinasyonudur (Şekil 2.7).

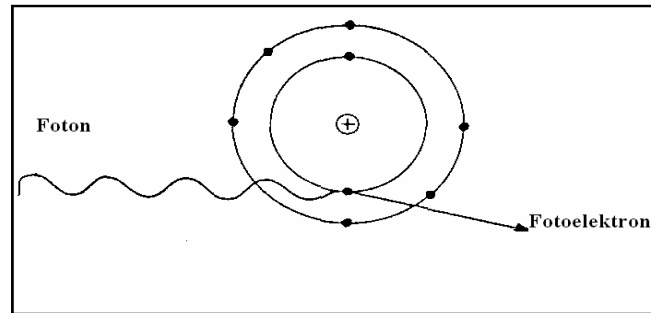




Şekil 2.7 Üç tip gama etkileşmesinin alanları (SOYBERK 1998)

### 2.3.1 Fotoelektrik Olay

Düşük enerjili fotonlar madde atomlarının yörünge elektronlarıyla etkileşme yapabilir. Etkileşme genellikle atomun “K” ve “L” yörüngelerinde olur. Foton tamamen soğurulur ve gelen fotonun  $E=hf$  kinetik enerjisi elektrona verilir. Bu esnada momentum korunur ve elektron yörüngeden fırlar. Şekil 2.8



Şekil 2.8 Fotoelektrik olay

Bu olayın oluşması için, fotonun kinetik enerjisinin, elektronun bağlanma enerjisinden büyük olması gerekmektedir. Ancak, etkileşme olasılığı fotonun  $hf$  enerjisi arttıkça azalmaktadır. Bu olasılık, foton enerjisi ve elektronun bağlanma enerjisi eşit olduğu zaman en yüksektir.

Foton enerjisinin bir kısmı elektronu atomdan koparmak için harcanır. Elektron böylece “ $E_e$ ” enerjisine sahip olarak atomu terk eder. “ $E_i$ ” elektronun bağlanma enerjisini gösterirse atomdan kopan elektronun enerjisi

$$E_e = hf - E_i \quad (2.5)$$

olur.

Kopan elektronların yeri yörünge elektronları ile doldurulur ve bu nedenle X ışınları oluşur. Bunlara Fluoresan Radyasyon da denir.

Fotoelektrik etkileşme oluşabilmesi için önce, foton enerjisi özel yörünge elektronunun bağlanma enerjisinden büyük olması gerektiğinden düşük enerjili fotonlar sadece zayıf bağlarla bağlı elektronlarla etkileşme yapabilir. Foton enerjisi sıkı bağlarla bağlı elektronların bağlanma enerjisini aşacak kadar enerjiye sahipse, enerjinin fonksiyonu olarak etkileşme olasılığında hemen hemen sürekli olmayan atlamaların gözlenmesi mümkündür.

### 2.3.2 Compton Saçılması

Bir fotonu, çok gevşek bağlarla atoma bağlı ve serbest elektron olarak kabul edilen bir elektrona çarpması halinde meydana gelen olaya “Compton Saçılması” denir. Bu olay, inelastik ve inkohorent saçılma tipindedir. Elektronun saçılması için küçük bir enerji yeterli olmakta ve saçılan elektron serbest elektron haline gelmektedir. Compton olayının meydana gelmesi için foton enerjisinin elektronun bağlanma enerjisinden büyük olması gerekmektedir. Şayet, foton enerjisi elektron bağlanma enerjisine göre çok yüksek enerjiye sahipse, elektron serbest elektron olarak kabul edilir. Bu durum 1 keV üzerindeki enerjilerde ve küçük atom numaralı maddeler ve doku için yeterlidir. Ancak yüksek atom numaralı maddeler için elektronu serbest olarak kabul etmek üzere bir düzeltme faktörüne gereksinim vardır.

Compton saçılmasında foton ile elektron arasında oluşan açı foton enerjisine bağlıdır. Küçük saçılma açıları için foton enerjisi kaybı küçüktür. Saçılma olasılığı, saçılmayı yapan maddenin “Z” atom numarası ile değişir. Compton saçılması orta foton enerjilerinde en çok olan bir etkileşme olasılığıdır. Compton olayı ile etkileşme olasılığı yüksek ve düşük foton enerjilerinde azalır. Ancak çift oluşumu ve fotoelektrik olayda bu olasılık mümkündür. Şekil 2.7 de eğrilerden görüldüğü gibi fotoelektrik olay küçük “hv” ve büyük “Z” lerde önemlidir. Çift oluşumu büyük “hv” ve büyük “Z” ler için başlıca olaydır. Compton saçılmaları ise orta “hv” ve tüm “Z” ler için mümkündür.

Elektron bağlanma enerjilerinin foton enerjisinden küçük olması halinde “hv” enerjisiyle yörünge elektronuna çarpan foton, enerjinin bir kısmını bağ enerjisine harcadıktan sonra geliş doğrultusuyla bir “θ” açısı yaparak “hv’”enerjisiyle saçılır. Bu esnada elektronda geliş

doğrultusuna göre bir “ $\varphi$ ” açısı yaparak saçılır. Enerji ve momentum korunum kanununa göre elektronun kinetik enerjisi “ $E_e$ ” gelen ve saçılan foton enerjileri farkına eşittir.

$$E_e = hv - hv' \quad (2.6)$$

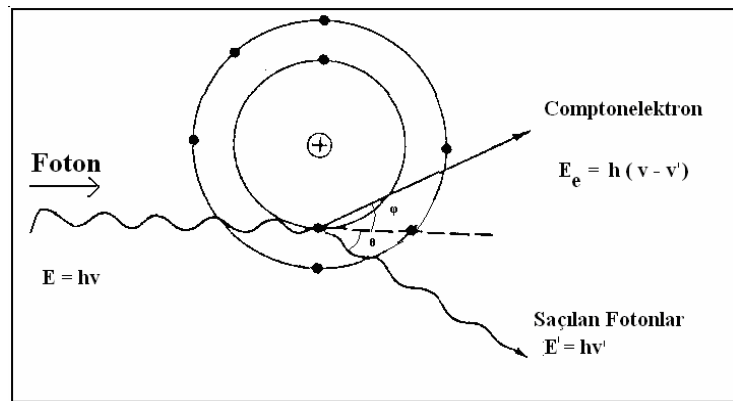
Saçılan fotonun “ $E'$ ” enerjisi, gelen fotonun  $hv$  enerjisi ve elektronun “ $E_i$ ” bağlanma enerjisi bilirse

$$E' = hv - E_i \quad (2.7)$$

bağıntısıyla bulunur.

Gelen fotonun enerji kaybı karakteristik olarak saçılma açısına şiddetle bağlıdır ve artan sapma açısıyla bulunur. Saçılan fotonun enerjisi daha küçük ve dalga boyu daha uzundur. Gelen fotonun enerjisi “ $hv$ ”, “ $mc^2 = 0,51 \text{ MeV}$ ” ile karşılaştırıldığında, ihmal edilemez büyüklükte ise karışık bir olay meydana gelir ve fotonun “ $hv/c$  momenti” ihmal edilemez. Fotonun gelen momenti saçılan foton ve çarpılan elektron arasında korunmalıdır. Sıfır derece gibi önemsiz saçılma hariç saçılan fotonun yönü gelen fotonun yönüne paralel değildir. Bu nedenle saçılan fotonun gelen fotona göre daha küçük momenti ve daha küçük foton enerjisi olmalıdır. Geri kalan moment ve enerji elektrona verilir.

Şekil 2.9 da gelen “ $hv$ ” foton enerjisine göre saçılan “ $hv'$ ” enerjisindeki fotonlar görülmektedir.



Şekil 2.9 Compton etkileşmesi

Şekilde foton bir “ $\theta$ ” açısıyla, “ $hv$ ” enerjisiyle saçılmakta ve elektron bir “ $\varphi$ ” açısı,  $p$  moment ve “ $E$ ” kinetik enerjisiyle fırlatılmaktadır, Gelen ve saçılan fotonların yörüngesine “Saçılma Düzlemi” adı verilir. Bu nedenle saçılan elektronun yörüngesi de, aynı düzlemedir. Yani üç yörüngede

aynı düzlemedir. (SOYBERK 1998)

### 2.3.3 Çift Oluşumu

Foton enerjileri 1,02 MeV' i aştığında önemli olan üçüncü bir etkileşme meydana gelir. Bu etkileşmeye “Çift Oluşumu” denir. Bu etkileşmede foton çekirdeğin elektrostatik alanında tamamen soğurulur ve pozitif ve negatif elektronlar meydana gelir.

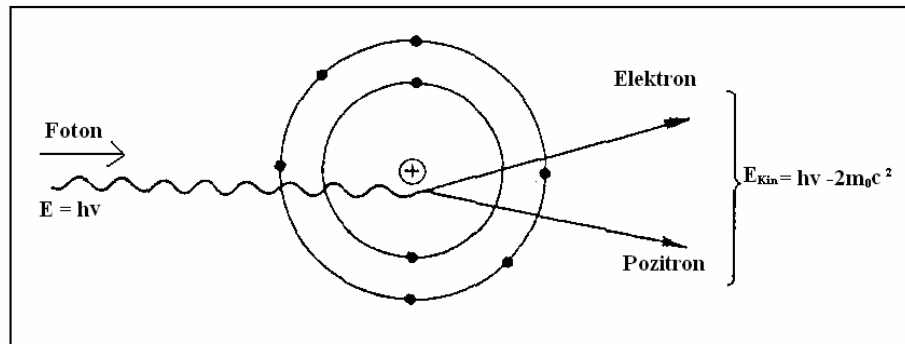
Böylece “  $E_e^-$  ” ve “  $E_e^+$  ” elektron ve pozitron enerjilerini göstermek üzere,

$$h\nu = (E_e^- + m_0c^2) + (E_e^+ + m_0c^2) \quad (2.8)$$

bağıntısı yazılabilir. Fotonun 1,02 MeV üzerindeki enerjisi de elektron pozitron çiftine verilir. Üstteki bağıntıda yer alan enerjilerin toplamı,

$$E_e^- + E_e^+ = h\nu - 2m_0c^2 \quad (2.9)$$

olur. Her iki parçacıkta enerji momentum korunur. Böylece çekirdeğin elektrostatik alanında çift oluşumu meydana gelmesi için gerekli en küçük enerjinin  $h\nu = 2m_0c^2 = 1,02$  MeV ve atomik elektronların bulunduğu elektrostatik alanda da  $h\nu = 4m_0c^2 = 2,04$  MeV' lik enerjiye gereksinim vardır. Bazen çift oluşumu çekirdek yakınından çok elektron yakınında meydana gelir. Şekil 2.10 da çift oluşumu şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.10 Çift oluşumu

Çift oluşumunun elektron alanında oluşması esnasında aynı koşullarda üç elektron oluşabilir. Bunlar, orijinal elektron gibi pozitif ve negatif çiftler oluşturabilir. Bu olaya “Triplet Oluşumu”

denir. Triplet oluşmasında momentin korunumu için eşik  $4m_0c^2$  'dir. Tripletin, çift oluşumuna oranı gelen fotonun enerjisiyle artar, atom numarası ile azalır. Çift oluşumunda meydana gelen elektron ve pozitronlar iyonizasyon meydana getirir.

Çift teşkilinde pozitif elektronun meydana gelmesi radyasyon dozimetrisini yakından ilgilendirir. Zira bu olay sonunda tüm kinetik enerji, pozitif elektronla, elektronun birleşerek bir annihilasyon radyasyonu oluşturması sonunda kaybolmaktadır. Bu olayda oluşan yüksek enerjili foton toplam enerjisi 1,02 MeV olan iki düşük enerjili fotona ayrılmaktadır. Böylece, çift oluşumunda soğurulan gerçek gama radyasyonu “ $h\nu=1.02 \text{ MeV}$ ” olmaktadır.

#### 2.4 İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon elektromanyetik radyasyondur ve dalga tipidir. Radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi dalgalar, görünebilir ışık olarak sınıflandırılır. Dalga tipi radyasyon, titreşim yaparak ilerleyen elektrik ve manyetik enerji dalgaları gibidir. Bütün dalga tipi radyasyonlar ışık hızıyla ( $3 \times 10^8 \text{ m/saniye}$ ) hareket ederler. (YAREN 2005)

#### 2.5 Radyoaktivite ve Çeşitleri

Bir maddeyi meydana getiren atomların çekirdekleri dışardan hiçbir etki olmaksızın kendiliğinden bozunuma uğrar veya bir takım ışınlar yayımlayarak niteliklerini değiştirip başka bir çekirdeğe dönüşürse bu maddeye radyoaktiftir denir. Bu dönüşüm çeşitli parçacık veya ışınların yayılması halinde olabilir. Bu şekilde kararsız olan bir çekirdek daha kararlı hale gelir. Böylece meydana gelen olaya da radyoaktif bozunum denir. Bir atomun nötron sayısının proton sayısına yaklaşık eşit olduğu durumda, genelde çekirdek kararlıdır. Atom numarası 83 'ten büyük olan elementler için nötron/proton sayısı büyüdükçe kararsızlık artar. Radyoaktif bir kaynaktan birim zamanda yayımlanan parçacık sayısı veya hızı, aktivite olarak bilinir. Dolayısıyla birimi Bequerel (bozunum/s) dir. Aktivitenin diğer bir birimi de Curie (Ci) dir. Başlangıçta bir gram radyumun aktifliği olarak ifade ediliyordu. Fakat şimdi basitçe,  $1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10}$  bozunma/s şeklinde tanımlanır. Bir milicurie (mCi),  $10^{-3}$  Curie'e ve bir mikrocurie ( $\mu\text{Ci}$ )  $10^{-6}$  Curie'e eşittir.

Laboratuarlarda kullanılmakta olan birçok radyoaktif kaynağın aktivitesi mCi veya  $\mu\text{Ci}$  mertebesi civarındadır.

### 2.5.1 Doğal Radyoaktivite ve Radyoaktif Seriler

Çoğunlukla doğal çekirdekler kararlıdır. Ancak, yeryüzünün oluşumundan beri birçok çekirdek de kararsız yani radyoaktiftir. Bu uzun süre içerisinde çok uzun yarı ömürlü olan Potasyum-40 ve Toryum-232 Uranyum-235 ve Uranyum-238 gibi çok uzun yarı ömürlü radyoaktif maddeler bozunarak kararlı çekirdeklere dönüşmektedir. Karbon-4 ve Tritiyum gibi radyoaktif çekirdekler atmosfer tabakalarında sürekli oluşur. Böylece doğada bulunan radyoaktif maddelere “Doğal Radyoaktivite” denilmektedir.

Çekirdeklerde parçalanma sonucu oluşan yeni çekirdeklere “Kız Ürünler” denir. Bunlar da, kararsız olabilir ve radyasyonlar yayınlamaya parçalanabilir. Sonuç olarak bir radyoaktif çekirdek bir seri değişimden sonra kararlı çekirdeğe dönüşebilir. Böyle serilere “Parçalanma Serileri” (Bozunma Serileri) veya “Parçalanma Zinciri” (Bozunma Zinciri) denir.

#### Radyoaktif Seriler

Doğada atom numarası 83 ten daha büyük olan elementler radyoaktiftir. Doğada üç büyük radyoaktif aile vardır Bunlar:

- (i) Uranyum Ailesi,
- (ii) Toryum Ailesi,
- (iii) Aktinyum Ailesi, dir.

Uranyum serisinde Uranyum-238 ana elementtir. Bu element, birim alfa ve betalar yayınlamaya Ra G' ye yani Pb-206' ya dönüşür. Bu seriye “Radyum Serisi” de, denilmektedir.

Birbirine bağlı olmayan yalnız 4 parçalanma serisi bulunmaktadır. Serilerin kütle sayısı, “n” her üyenin kütle sayısını belirtmek üzere “ $4n$ ,  $4n+1$ ,  $4n+2$  ve  $4n+3$ ” ile gösterilmektedir.  $4n+2$  Serisi Uranyum serisidir. Bu nedenle bu seriye “ $4n+2$  Serisi” adı da verilir. Bu seri en uzun seri olarak bilinir. Doğada bulunan en ağır element U-238 dir.

URAN-RADIUM $A = 4n + 2$										
								Th 234 OX: 24,1 d $\beta^-$	U 238 U: $4,5 \cdot 10^9$ a	
								Pc 234 OX: 1,2 s UZ: 5,7 h $\beta^-$ 99,99% $\beta^-$ 0,01%		
		Pb 214 RaB: 26,8 m $\beta^-$	$\alpha$ 99,98%	Po 218 RaA: 3,05 m $\beta^-$ 0,02%	$\alpha$	Rn 222 Rn: 3,8 d	$\alpha$	Ra 226 Ra: 1600 a	Th 230 lo: $8 \cdot 10^4$ a	U 234 U: $2,5 \cdot 10^5$ a
		Tl 210 RaC: 1,3 m $\beta^-$	$\alpha$ 0,04%	Bi 214 RaC: 19,8 m $\beta^-$ 99,96%	$\alpha$	At 218 $\sim 2$ s				
Hg 206 8,1 m $\beta^-$		Pb 210 RaD: 22 a $\beta^- \sim 100\%$	$\alpha$ $0,75 \cdot 10^{-3}\%$	Po 214 RaC: 162 $\mu$ s	$\alpha$					
		Tl 206 RaE: 4,3 m $\beta^-$	$\alpha$ $5 \cdot 10^{-3}\%$	Bi 210 RaE: 5,0 d $\beta^- \sim 100\%$	$\alpha$					
		Pb 206 RaC: stc bil	$\alpha$	Po 210 RaF: 138,4 d	$\alpha$					

Şekil 2.11 (4n+2) Uranyum serisi dönüşümü (KARLSRUHER NUKLIDKARTE)

Toryum serisinin atom ağırlığı  $4n$  ile gösterilmekte ve seriye “4n Serisi” denilmektedir. Aktinyumun atom ağırlığı da  $4n+3$  ile gösterilmekte ve seriye “4n+3 serisi” denilmektedir. 4n serisi Th-232 den başlayarak Toryum-D’de yahut Pb-208’ de kararlı hale gelmektedir. 4n+3 Aktinyum serisi yani Aktinouranyum Ac U veya U-235 ‘den başlar ve Pb-207 ‘ye dönüşerek kararlı hale gelir. Doğada 4n+1 ile gösterilen doğal radyoaktif seri yoktur.

Şekil 2.11-13 te Uranyum, Toryum ve Aktinyum serilerinde atom numarası ve kütle sayılarındaki değişimler görülmektedir.

THORIUM				A = 4n			
						Ra 228 MsTh: 5,7 a $\beta^-$	Th 232 Th: $1,4 \cdot 10^{10}$ a
							Ac 228 MsTh: 6,13 h $\beta^-$
		Pb 212 ThB: 10,6 h $\beta^-$	Po 216 ThA: 0,15 s	Rn 220 Th: 5,5,6 s		Ra 224 ThX: 3,64 d	Th 228 RaTh: 1,9 a
	Tl 208 ThC: 3,1 m $\beta^-$		Bi 212 ThC: 60,6 m $\beta^-$ 63,8%				
		Pb 208 ThD: stabil	Po 212 ThC: 0,3 $\mu$ s				

Şekil 2.12 (4n) Toryum serisi dönüşümü (KARLSRUHER NUKLIDKARTE)

ACTINIUM				A = 4n + 3				
							Th 231 UY: 25,6 h $\beta^-$	U 235 AcU: $7 \cdot 10^8$ a
			Bi 215 7,4 m $\beta^-$	At 219 0,9 m $\beta^-$ 3%	Fr 223 AcK: 22 m $\beta^-$ ~100%	Ac 227 Ac: 22 a $\beta^-$ 98,8%		Pa 231 Po: $3,3 \cdot 10^4$ a
		Pb 211 AcB: 36,1 m $\beta^-$	Po 215 AcA: 1,8 ms $\beta^-$ $5 \cdot 10^{-4}$ %	Rn 219 An: 3,9 s		Ra 223 AcX: 11,4 d	Th 227 RaAc: 18,7 d	
	Tl 207 AcC: 4,8 m $\beta^-$		Bi 211 AcC: 2,15 m $\beta^-$ 0,32%	At 215 $\sim 100$ $\mu$ s				
		Pb 207 AcD: stabil	Po 211 AcC': 0,52 s					

Şekil 2.13 (4n + 3) Aktinyum serisi dönüşümü (KARLSRUHER NUKLIDKARTE)

Bazı radyonüklidler için alfa parçacıkları mono enerjilidir. Ancak, bazı alfa parçacıkları çeşitli enerjiler içerir. Bu gibi alfa parçacıklarının en yüksek enerjileri tablolarda “m” ile gösterilmiştir. Hatırlanacağı gibi bir alfa parçacığı yayınında çekirdek yükü 2 birim ve kütle sayısı 4 birim azalmaktadır. Beta parçacığı yayınında da, çekirdek yükü 1 birim artmakta ve kütle sayısı değişmemektedir. Bu nedenle, şekillerde alfa yayını sola aşağı bir okla, beta yayını da sağa doğru bir okla gösterilmiştir. Böylece, herhangi bir sütundaki elementlerin tümü periyodik tabloda aynı



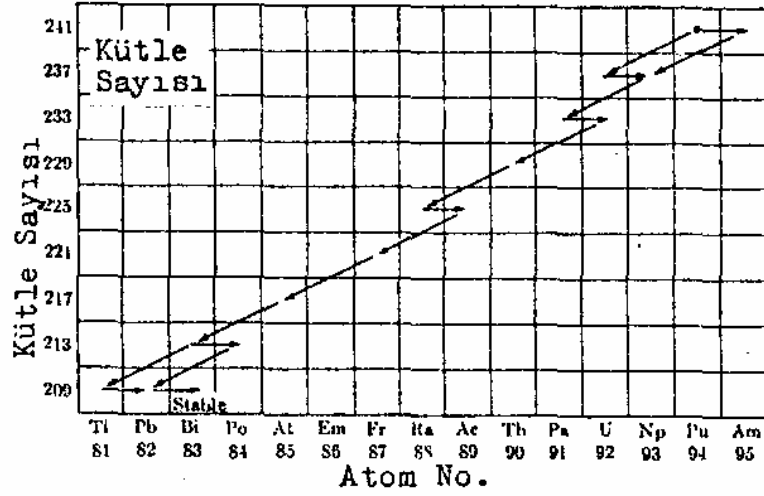
atom numarasını içererek yer almaktadır. Örneğin RaA, RaC, RaF, AcA, ThA ve ThC' elementlerinin tümü 84 atom numaralı Polonyumun izotopudur. Aynı şekilde RaB, RaD, RaG, AcB, AcD, ThB ve ThD de 82 atom numaralı Kurşunun izotopudur.

Radyoaktif seriler birçok hallerde radyoaktif üründe alfa veya beta parçacıkları yayınlayarak bozunur. Bazı hallerde farklı özelliklere sahip iki ayrı ürünün yayınladığı parçacıklara göre bozunurlar. Bu bozunma şekline “Dallanma Bozunması (branching decay)” denir. Örneğin, Uranyum serisinde, Po, 3,05 dakikalık alfa parçacıkları yayınlayarak Pb-214'e, Pb-214, 26,8 dakikalık beta parçacıkları yayınlayarak Bi-214 (HaC)'ye, Bi-214, 19,8 dakikalık betalar yayınlayarak Pb-214' e, Pb-214, 164 µs'lik alfalar yayınlayarak Pb-210'a ve Pb-210, 2,3 yıllık betalar yayınlayarak Bi-210 (RaE)'ye dönüşür.

Yukarıda sözü edilen radyoaktif seriler yanında yapay olarak elde edilen bir seri de vardır. Örneğin, Uranyumun nötronlarla bombardımanından Neptinyum-237 elde edilmektedir.

Neptinumun yarı ömrünün 220 y gibi çok uzun olması nedeniyle bu seriye “Neptinyum Serisi” veya “4n+1 Serisi” denilmektedir. Şekil 2.14 te Neptinyum Serisi ve dönüşümü görülmektedir

Neptinyum serisi Pu-241'den başlayarak kurşunun bir izotopu olan Bi' a bozularak kararlı hale dönüşmekte ve Neptinyum veya 4n+1 serisini oluşturmaktadır. Neptinyum dallı bir seri oluşturur. Alfa yayınlayıcılarla zincirleme olarak ağır radyoaktif serileri meydana getirir.



Şekil 2.14 (4n + 1) Neptinyum serisi dönüşümü (SOYBERK 1998)

### 2.5.2 Yapay Radyoaktivite

Bir alüminyum levha, bir Polonyum numunesi ile ışınlandığında pozitronların yayınlanması aktif numunenin kaldırılmasına rağmen hemen sona ermemektedir. Levha orada kalmakta ve herhangi bir radyoaktif element gibi radyasyon yayınlaması üstel olarak azalmaktadır. Bu azalma, doğal radyoaktivitede olduğu gibi meydana gelmektedir. Bu tespitle Curie ve Joilot ekibi çeşitli denemelerden sonra çeşitli bombardıman parçacıkları kullanarak pek çok radyoaktif izotop elde etmişlerdir. Bugün, bütün elementler için radyoaktif izotop elde edilmiş ve bütün elementlerin radyoaktif izotopları mevcuttur.

Dolayısıyla kararlı bir çekirdekten kararsız bir çekirdeğin elde edilmesi, kararlı bir çekirdeğin uygun bir parçacıkla bombardıman etmekle sağlanır. Kararsız çekirdeğin bir enerji fazlalığı vardır. Bu enerji fazlalığını genellikle bir nötronu protona veya protonu nötrona dönüştürerek veya elektron yakalamasıyla kaybeder. Kararsız çekirdeğin kararsızlığı nötron fazlalığından ileri geliyorsa böyle çekirdek  $\beta^-$  bozunmasıyla kararlı hale geçer (1). Proton fazlalığından meydana gelen kararsızlık durumunda çekirdek  $\beta^+$  bozunmasıyla kararlı hale geçer (2).

$$1) n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu} \quad 2) p \rightarrow n + \beta^+ + \nu \quad (2.10)$$

Bir yapma radyonüklidin radyoaktifliği ile o çekirdeğin oluşması biçimi arasında bir bağıntı vardır.

Doğal radyoelementlerin  $\alpha, \beta, \gamma$  ışınları yaymasına karşın yapay radyoelementler  $\beta^+, \beta^-$  ve seyrek olarak  $\alpha$  ışını yayarlar. Doğal radyoelementlerin nötron fazlalığı olduğu için ( $n/p > 1,5$ ) pozitron yayamazlar. Yapay radyonüklitler  $\alpha$  parçacıkları ile protonlarla, dötronlarla ve gama ışınları ve nötronlarla elde edilir. Bugün radyoizotoplar reaktörlerde nötron bombardımanı ile elde edilir. Yapay radyonüklitlerin bozunma şekilleri de pozitron veya elektron yayınlanması ile elektron yakalamasıyla ve çekirdek izomerisiyle olur.

## 2.6 Radyoaktif Bozunma Kanunu

Bir radyoaktif elementin değişim halinde bulunan atom sayısı her an bu elementten mevcut olan atom sayısı ile orantılıdır. Radyoaktivite üstel olarak azalır. Bir radyoaktif elementte t anında bulunan atom sayısı N ve dT zamanı içinde değişime uğrayan atom sayısı dN olsun. Birim zamanda değişime uğrayan atom

$$\frac{dN}{dT} = -\lambda N \quad (2.11)$$

t=0 anında  $N=N_0$  alınarak üstteki bağıntının integrasyonundan

$$\lambda N = \lambda N_0 - \lambda t$$

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

elde edilir.

Bozunma sahibi radyoaktif elementin bir karakteristiği olarak bilinir ve radyoaktif elementin saniyedeki bozunma olasılığı olarak bilinir.

Maddenin başlangıç aktivitesi  $A_0$  ve bir t anındaki aktivitesi A ise 2.12 bağıntısı yerine

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.13)$$

Yazılabilir ve sayım hızı bakımından

$$R = R_0 e^{-\lambda t} \quad (2.14)$$

bağıntısında kullanılabilir.

### 2.6.1 Yarılanma Süresi ve Ortalama Ömür:

Bir radyoaktif elementin aktivitesi sabit kalmaz exponansiyel olarak azalır. Aktivitenin yarıya düşmesi için geçen zamana, göz önüne alınan elementin periyodu veya **yarılanma süresi** denir.

$t_{1/2}$  yarılanma süresi,

$$\frac{N}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \quad \Rightarrow \quad e^{-\lambda t_{1/2}} = \frac{1}{2} \quad (2.15)$$

$$t_{1/2} = \frac{1}{\lambda} \ln 2 \quad \text{veya} \quad \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad \text{olarak bulunur} \quad (2.16)$$

Bir radyoaktif elementi oluşturan atomlar arasında bazıları çok kısa, bazıları ise çok daha uzun ömürlüdür. Bu nedenlerden, ortalama ömür düşünülür. Ortalama ömür, mevcut olan bütün atomların ömürleri toplamının başlangıçtaki atom sayısına bölmekle elde edilir.  $t=0$  anında mevcut olan  $N_0$  atomdan  $t$  ile  $t+dt$  arasında değişime uğrayan atom sayısı,

$$dN = \lambda N dt = \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt \quad (2.17)$$

olarak ifade edilebilir.

Bu atomların her biri  $t$  zamanı kadar yaşamış oldukları düşünülecek olursa göz önüne alınan bütün atomların ortalama ömrü;

$$T = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda t N_0 e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2.18)$$

olarak bulunur.

Ortalama ömür bozunma sabitinin tersine eşit olup, bir radyoelementin atom sayısının, başlangıçta mevcut olan atom sayısının ilerisine düşmesi için geçen süreyi gösterir.

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \frac{0,693}{t_{1/2}} \quad (2.19)$$

## 2.7 Doğal Radyasyon ve Topraktaki Doğal Radyoaktivite

Dünya üzerinde yaşayan canlılar hem yer kabuğu kökenli hem de uzay kökenli doğal radyoaktif kaynaklardan çıkan radyasyonlara yaşamları boyunca sürekli olarak maruz kalmaktadırlar. Doğal radyoaktif kaynaklar genel olarak, kara ve uzay kökenli olmak üzere iki ana grupta toplanırlar. Bunlara ek olarak uzaydan gelen kozmik ışınların dünya atmosferinde bulunan gazlar ve yerkabuğu orijinli bazı radyoaktif elementler ile reaksiyona girmeleri sonucu üretilen bazı radyoaktif izotoplarda vardır. Bunların en önemlileri olarak C -14 ve H-3 verilebilir. Kozmik radyasyonlar, farklı enerjilerde yayınlanan ve değişik yüklerde olan partikül veya elektromanyetik ışınlardandır. Bu radyasyonların yoğunlukları atmosferin üst tabakalarında yüksek deniz seviyesinde ise daha düşüktür. Kozmik radyasyonlar kökenlerine göre hapsolmuş partikül radyasyonlar ve solar radyasyonlar olarak sınıflandırılırlar. Partikül radyasyonlar elektronlar ve protonlardır.

Yerkabuğunun oluşumunda doğal olarak mevcut olan radyonüklidler ve bunların bozunma ürünleri, yayınladıkları gama ışınları ile çevresel radyasyonların büyük kısmını oluştururlar. İnsanların bu gama ışınlarından etkilenmeleri, buldukları bölge toprağındaki radyoaktif elementlerin konsantrasyonlarına bağlıdır. Bu nedenle maruz kalınan gama radyasyon her yerde aynı değildir. (KARAHAN 1997)

Karasal kökenli radyasyon kaynaklarının başında U-238, Th-232 ve K-40 gibi uzun yarı ömürlü radyonüklidler gelmektedir. Uranyum, kaya ve toprak katmanları boyunca düşük konsantrasyonlarda dağılmıştır. Uranyum-238 birçok elementin uzun radyonüklid bozunma serisinin başlangıç kaynağı olup, kararlı Pb-206 haline gelinceye kadar bozunur. Ra-226 nın bozunumu sonucu oluşan ve radyoaktif gaz olan radon radyoizotopu (Rn-222) atmosfere dağılır ve bozunmaya devam eder. Renksiz, kokusuz, tatsız, 86 atom numarası ile periyodik cetvelin soy gazlar sınıfında yer alan Radon, kaya, toprak ve sudaki doğal Uranyumun radyoaktif bozunması sonucunda oluşur. Bu bozunma zincirinin ana atomları bütün doğal malzemelerde bulunabilir. Bu yüzden Radon, tüm yüzey kaya ve toprak parçalarından ve yapı malzemelerinden ortama salınır

Toryum da benzer şekilde yeryüzüne dağılmıştır ve Toryum-232, başka bir radyoaktif serinin başlangıç kaynağıdır.(TAEK 2007)

Yeryüzündeki radyonüklidlerin yaydığı gama ışınları nedeniyle tüm vücut radyasyona maruz kalır. Yapı malzemeleri taş ve topraktan üretildikleri için düşük oranda radyoaktivite içerebilirler. Böylece insanlar bina dışında olduğu gibi bina içinde de radyasyona maruz kalırlar. Alınan radyasyon bölgenin taşına, toprağına ve yapı malzemesine bağlıdır.

### 3. DENEY DÜZENEĞİ

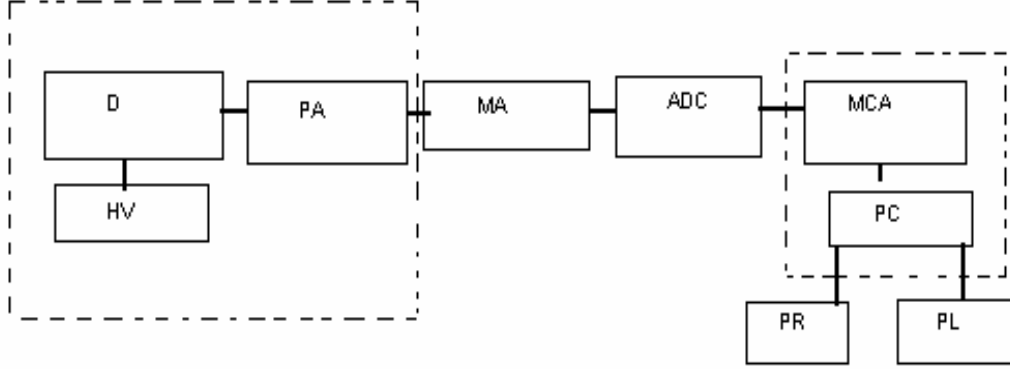
#### 3.1 Gama Spektrometre Yöntemi

Çevremizdeki maddelerin radyoaktif olup olmadığı, eğer radyoaktif ise bu radyoaktivitenin hangi izotoptan kaynaklandığı ve aktivitenin ne kadar olduğu gama spektrometre yöntemiyle belirlenebilmektedir.

Bu yöntemde, 40 keV–2000 keV enerji aralığında gama ışını yayınlayan radyonüklitler herhangi bir ön işlem uygulanmaksızın, genellikle örnek matrisinden (hava, su, toprak, sediment, bitki, bitkisel ve hayvansal gıdalar vb. gibi birçok çevre ve biyolojik örnek) ayrılmalarına gerek kalmaksızın doğrudan gama spektrometresi ile tayin edilir. (AYÇIK 1992)

Tipik bir gama spektrometre sistemi, Şekil 3.1 de görüldüğü gibi Nal(Tl) gibi sintilasyon veya Ge(Li) ve HPGe gibi yarı-iletken bir detektör (D), beraberinde ön-yükseltici (PA) ve yüksek voltaj (HV), yükseltici (MA), örneksel-sayısal dönüştürücü (ADC), çok kanallı analizör (MCA) ve bilgisayar (PC) bağlantılı yazıcı/çiziciden (PR/PL) oluşur. Gama ışınlarının detektör kristalinde algılanması sonucu ortaya çıkan darbeler detektörün bağlı olduğu elektronik modüllerin uygun bir kombinasyonu yardımıyla analiz edilir ve gama ışını yayyan izotopların nitel ve nicel tanımlanması yapılır. Gama spektrometresi çeşitli radyoaktif örneklerdeki radyoizotopların tanımlanmasında en çok kullanılan tekniktir, çünkü gama ışınlarının enerjisi her bir çekirdek için kesikli ve karakteristiktir. Gama spektrometresinin bazı üstünlükleri şöyle özetlenebilir:

1. Aynı örnekte farklı radyoaktif çekirdekler tek tek ve aynı anda analiz edilebilir.
2. Malzeme, emek ve zaman kaybına neden olan kimyasal ayırma işlemleri gerekmediğinden örnek hazırlanması kolay ve hızlıdır.
3. Ölçümlerdeki yüksek kararlılık, bilgi işlemedeki doğruluk ve analiz edilen bilgilerin güvenilirlik düzeyleri yüksektir.
4. Düşük tayin sınırı nedeniyle özellikle çevre örnekleri analizinde kullanılırlar.



Şekil 3.1 Gama spektrometre sistemi diyagramı.

### 3.1.1 Detektör Sistemi:

#### Detektör(D):

Gama ışınlarının deteksiyonunda yarı iletken katı hal detektörleri geniş oranda kullanılmaktadır. Yarı iletken detektörler, kristal yapısı içersine ya yapay olarak sokulmuş veya kendiliğinden yabancı atomlar bulunan detektörlerdir. Kristal bünyesinde iyonların yerinden çıkarak arkalarında boşluklar bırakması sıkça rastlanan kusurlardır. Bu kusurlara ek olarak kristal bünyesine girmiş olan yabancı atomların oluşturduğu kusurlar da vardır. Bu kusurlar çeşitli pozitif ve negatif yükleri tutan tuzakların oluşmasına neden olurlar.

Böyle bir kristalin iyonlaştırıcı ışınlarla ışınlanması sonucunda geçici olarak boşluk ve atom kusurları, serbest elektronlar, delikler oluşur ve iyon boşlukları, pozitif yüklerin lokalize olduğu bölgeler meydana gelir. Fotonlarla yapılan ışınlamalarda serbest kalan elektronlar bu lokalize olmuş tuzaklar tarafından çekilir ve yakalanır.

Ancak yasak enerji bandı yarı iletken maddelerde oldukça dardır, Germanyumda 0.72 eV civarındadır. Yasak enerji bandının dar olması valans bandındaki elektronların dış uyarmalarla iletkenlik bandına atlamasına olanak verir. Ancak iletkenlik bandına geçen elektronlar çok sayıda olmadığından cismin iletkenliği küçüktür.

Yarı iletkenlerde, iletkenlerden farklı olarak delikler de elektrik iletiminde yardımcı olur. Böyle bir durumun olması her atomun iletkenlik bandına eşit sayıda elektron vermesi ve her atomda



aynı sayıda delik bulunmasıdır. Durumun daha iyi anlaşılması için 4 valans elektronu bulunan Germanyum atomuna göz atalım. Germanyum atomunun yapısında her atomun 4 elektronu komşu atomun 4 elektronu ile kovalent bağ yapar. Ancak bir elektronunu kaybeden atom pozitif bir yük gösterir. Kovalent bağın ortadan kalkmasıyla ortaya bir delik çıkar. Komşu atomlardan birinin valans elektronunun bu deliği doldurmasıyla delik komşu atoma geçer. Böylece aslında elektronlar hareket ettiği halde delik hareket etmiş gibi olur. Böylece elektronlarla doldurulan boşluklar nedeniyle kristal içinde iki tür taşıyıcı oluşur. Bunlar serbest elektronlar ve deliklerdir. Ancak serbest elektronlar, deliklerden katkı maddesinin verdiği elektronlar kadar daha fazladır. Serbest elektronların deliklere göre daha fazla olduğu bu tip yarı iletkenlere n tipi yarı iletken denir. Bir de “p” tipi yarı iletkenler vardır. Bunda delikler, serbest elektronlardan katkı maddesinin verdiği delikler kadar fazladır. Delikleri elektronlardan fazla olan yarı iletkenlere “p” tipi yarı iletken denir.

Yarı iletken detektörlerde ışınlanma ile iletkenlik bandına çıkan elektronlar tuzaklarda tutulamayıp aktivator merkezleriyle rekombinasyon yaparak fazla enerjilerini ışık kuantları halinde yayımlar.

Yarı iletken detektörlerin “n” veya “p” tipi olması, yarı iletkenin atomları içersine sokulmuş katkı maddesine bağlı olarak değişmektedir.

Yarı iletkenlerden bir foton geçerse, elektronlar ile delikler serbest kalır ve elektrik alanında uygun olan elektrotlarda toplanır. Sonuç olarak, yükler hassas bir yükselticide toplanır ve foton enerjisine orantılı amplitutta voltaj pulslarına dönüştürülür. Bunlar bir analizörden geçirilerek aynı enerjideki pulslar toplanır ve bir yazıcı veya grafik çizici ile grafik haline getirilir.(SOYBERK 1998)

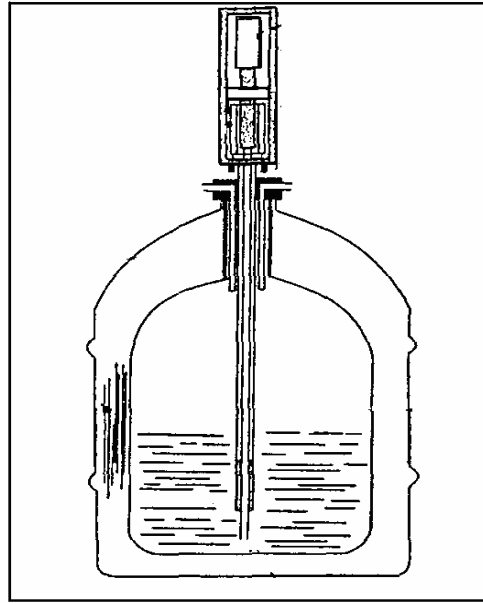
Bir gama spektrumunun faydası, fotopikleri ölçme ve ayırt etme olanağına ve böylece detektörün rezolüsyonuna bağlıdır. Rezolüsyon, fotopik yarı yükseklikteki genişliğinin, bu genişliği karşılayan enerjinin yüzdesidir. Yarı iletken detektörler çok gelişmiş enerji rezolüsyonuna sahiptir. Sonuç olarak aynı foton enerjisi için diğer detektör tiplerine oranla büyük çıkış sinyali verir. Örneğin 3 eV / Elektron-delik çifti oluşması için, Ge’da meydana gelen yük taşıyıcıları sayısı, sintilasyon detektöründen iki kat daha yüksektir.

Fotonların madde ile etkileşmelerinde de görüldüğü gibi detektör maddesinin fotonlara olan

hassasiyeti, atom numarasının şiddetli fonksiyonudur. Silikonun atom numarası 14 ve Germaniyumun 32'dir. Böylece Silikonunun neden nispeten yumuşak X ışını alanında kullanıldığı anlaşılmaktadır. Yüksek atom numaralı bileşik yarı iletken detektörler yüksek gama enerjili alanlarda kullanılabilir.

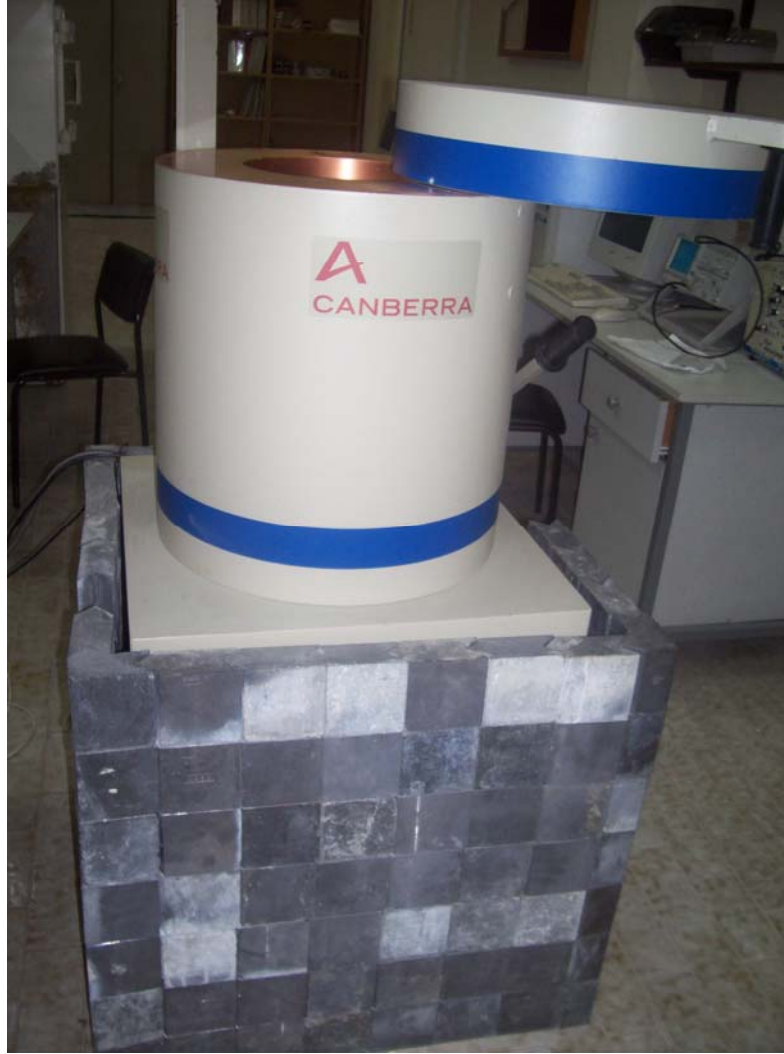
Bir fotopikin ayırt edilmesi detektörün fotoelektrik cevabına, geometri faktörüne, Compton spektrumlarının karışmamasına, detektörün seçiciliğine veya rezolüsyonuna, dış radyasyon fon sayımına ve detektörde oluşan gürültüye şiddetle bağlıdır.

Detektörün özelliğine göre kullanım yerleri de farklıdır. Örneğin yarı iletken detektörlerin enerji ayırma gücü sintilasyon detektörlerine göre yaklaşık 30 kat daha iyiyken; sintilasyon detektörlerinin sayım verimi yarı-iletken detektörlerinin sayım veriminden, detektör hacmine bağlı olarak yaklaşık 5–10 kat daha yüksektir.

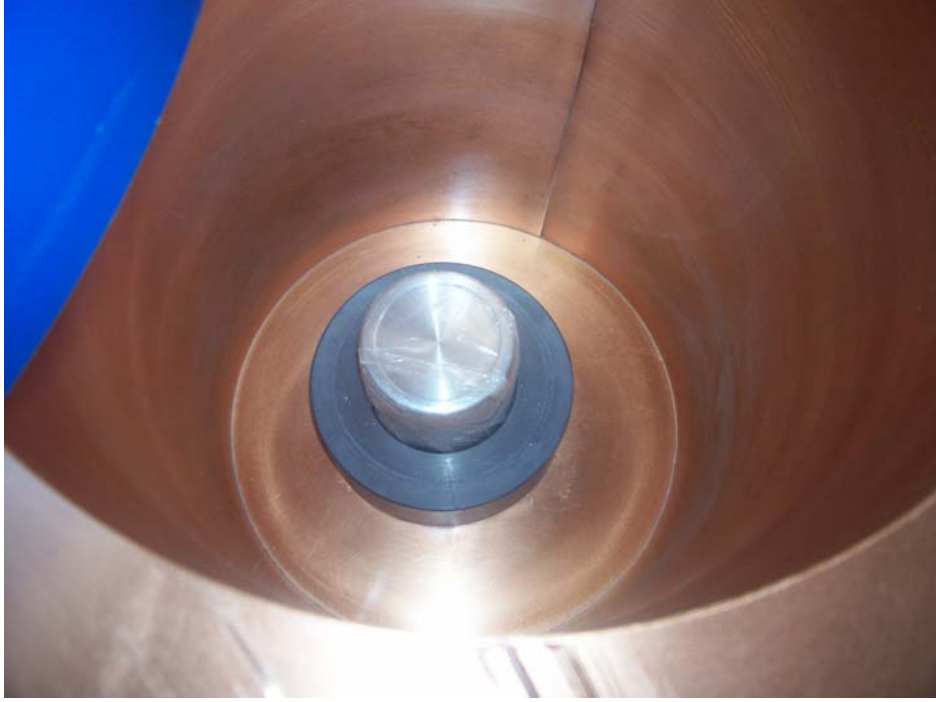


Şekil 3.2 Tipik bir germaniyum detektör.(GILMORE 1995)

Detektör etrafına çevreden gelecek radyasyonu engellemek amacıyla belirli kalınlıkta kurşun zırlama yapılmalıdır. Bu çalışmada zırlı (Canberra Model 747E Zırh) Canberra Model 7500 HpGe detektör kullanılmıştır.



Şekil 3.3 Canberra Model 747E Zırhlı, Canberra Model 7500 HpGe detektör



Şekil 3.4 Canberra Model 7500 HpGe detektör kristali, üstten görünüm.

**Ön-yükseltici (PA):** Detektörden gelen pulsları depolanan enerji ile orantılı olarak voltaj sinyaline dönüştürür. Elektronik katlar için pulsları şekillendirir ve büyütür. Çalışmada kullanılan önyükseltici Canberra, Model 2001 Spectroscopy Preamplifier dir.

**Güç Kaynağı (HV):** Detektörün çalışması için gerekli negatif veya pozitif gerilimi devreye sağlar. Deney düzeneğinde kullanılan Güç kaynağı Canberra, Model 3105 dir.

**Yükseltici (MA):** Ön yükselteçten gelen pulsları büyütür, sinyallere ayırır, puls yüksekliğini ayarlar. Gelen ve çıkan pulslar arasında doğrusal bir ilişki kullanarak sinyalleri büyütür. En iyi sinyal/gürültü oranını elde etmek için, detektör çıkışındaki darbeleri yükseltip şekillendirir. Kullanılan yükseltici Canberra, Model 2021 Spectroscopy Amplifier dir.

### 3.1.2 Çok Kanallı Analizör Sistemi:

Çok kanallı analizör (MCA): Yükseltici çıkış sinyalleri çok kanallı bir darbe yüksekliği analizörü (MCA) ile analiz edilir. MCA'yı çalıştıracak bilgisayar bağlantısı ve yazılım programı gerekir. Bu birim ADC (Canberra Model 8075) deki verileri depolayıp, spektrum olarak gösteren; verilerin hafızada saklanması, analizini ve rapor olarak verilmesini sağlayan, enerji

kalibrasyonu yapan bir programdır.

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

Kaydedici: MCA'dan veya MCA bağlantılı bilgisayardan alınan bilgilerin kaydedilmesi için yazıcı ve/veya grafik çizici kullanılır. (AYÇIK 1992)



Şekil 3.5 NİM –BİM Model 2000 Kasa, PA, A, HV, ADC ve PC

## 3.2 Gama Spektrometrik Analiz İçin Ön Çalışmalar

### 3.2.1 Tüm Enerji Pik Alanı

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

Fotopik alanı, ilgilenilen enerjideki pikin sürekli Compton fonunun (background) üstündeki toplam sayım olarak tanımlanır (Canberra, 1986). Covell metodu olarak da bilinen bu pik alanı hesaplama metodunda, önce pikin uç noktalarındaki kanal sayısı tespit edilir. Sonra, her bir kanalda biriken sayımların toplamından tabii fon alanı çıkarılarak net pik alanı ( $N_p$ ) belirlenir. Pik alanının hesabı şekilde verilen örnek tek bir pik üzerinde açıklanmıştır.

Net Pik Alanı ( $N_p$ ) = Toplam Alan – Tabii Fon Alanı

$$\text{Toplam Alan} = \sum_{i=u}^v x_i$$

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

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

(3.1)

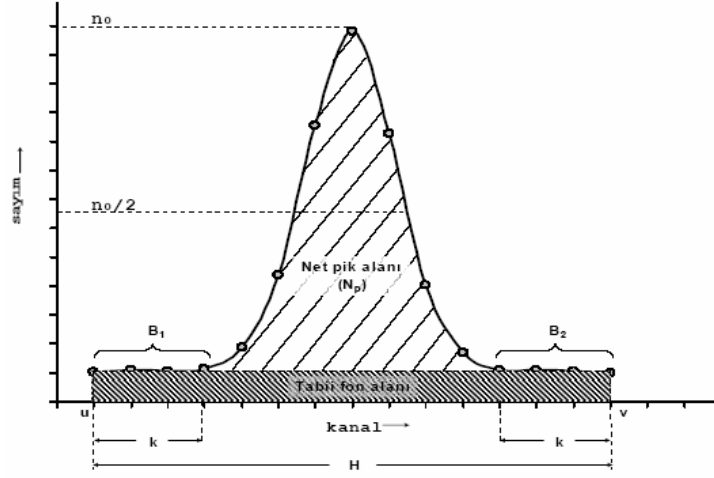
şeklinde hesaplanabilirler. Burada;

u : pikin başlangıç kanal numarasını,

v : pikin bitiş kanal numarasını,

H : piki oluşturan tüm kanalların sayısını ( $H = v - u + 1$ ),

$x_i$  : i. kanaldaki sayım miktarını ifade etmektedir.



Şekil 3.6 Gama pik alanının hesaplanmasında kullanılan parametrelerin gösterimi.(KARADAĞ 2004)

B1, B2: sırasıyla pikin sol ve sağ taraflarındaki tabii fon ortalama sayım miktarlarını;

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

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

(3.2)

k: pikin sağ ve sol uç taraflarında devam eden ve süreklilik gösteren kanalların sayısını ifade eder. Bu çalışmadaki pik alanı hesaplamalarında; k, pikin sağ ve sol taraflarındaki süreklilik gösteren kanalların durumuna göre genellikle 2 – 4 arasında seçilmiştir.

Çok yüksek sayım hızlarında, bulunan pik alanının ölü zaman düzeltmesi yapılır.

Bunun için yukarıda bulunan “compton düzeltmesi yapılmış net pik alanı” değerinin (TT/LT) ile çarpılması gereklidir. Yani compton ve ölü zaman düzeltmesi yapılmış net pik alanı P dersek, P’;

$$P' = P.(TT/LT)$$

(3.3)

olur. Burada

TT’; gerçek zaman

LT; sistemin faaliyette bulunduğu zaman olarak tanımlanmıştır.

Pik Alanı Hata Hesabı

Hesaplanan net alan üzerindeki sayım istatistiğinden ileri gelebilecek % hata:

$$\% \text{ Hata} = (m\sigma / \text{Net Alan}) * 100$$

ile ifade edilir. Burada;

m: 1–3 arasındaki bir tamsayıdır ve güvenilirlik katsayısı adı verilir.

$\sigma$ : Net Pik Alanındaki belirsizliktir ve

$$\sigma = \sqrt{I_p + (v / 2K)^2 (B_1 + B_2)} \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilir.  $I_p$ : Pikin integral alanıdır.(AYÇIK 1998)

### 3.2.2 Enerji Kalibrasyonu

Dedektöre gelen fotonların enerjisini tam olarak belirleyebilmek için sayım sisteminin enerji kalibrasyonunun yapılması gereklidir. Enerji kalibrasyonu ile çok kanallı analizör (MCA) kalibre edilir. Sayım sisteminin enerji kalibrasyonu, değişik enerjilere sahip standart gama kalibrasyon kaynakları kullanılarak yapılır. En çok kullanılan kalibrasyon kaynakları tabloda verilmiştir. Kullanılacak standart kaynakların seçiminde 50–1500 keV enerji aralığında ve olabildiğince tek veya az sayıda gama enerjili (enerji kalibrasyonu için değil ama verim kalibrasyonu için önemli), uzun ömürlü kaynaklar tercih edilir.



Tablo 3.1 Enerji ve verim kalibrasyonu için önerilen izotoplar

Gama Enerjisi (keV)	Nüklid Adı	Yarı Ömrü $t_{1/2}$	Bolluk h(%)
60	Am-241	432 yıl	36
88	Cd-109	462 gün	3.63
122	Co-57	272 gün	85.6
392	Sn-113	115 gün	64.9
662	Cs-137	30.2 yıl	85.2
898	Y-88	106.6 gün	94
1173	Co-60	5272 yıl	99.89
1333	Co-60	5272 yıl	99.99
1836	Y-88	106.6 gün	99.4

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

$$\langle K \rangle = \frac{\sum_{k=1}^N k \cdot (C_k - C_c)}{\sum_{k=1}^N (C_k - C_c)}$$

ifadesinden belirlenerek kaydedilir. Burada  $\langle K \rangle$ ; pikin ağırlık merkezi, N; pikin başlangıcından bitiş kanalına kadar olan kanal sayısı,  $C_k$ , k kanalındaki sayım değeri,  $C_c$  ise kanal başına

ortalama compton zemin sayım değeridir. Ancak pratikte pik ağırlık merkezi yerine, pikin tepe noktasına (en yüksek 2–3 sayımın alındığı kanalların ortalamasına) karşı gelen kanal numarası da kullanılabilir. Sonra bu kanallardaki enerji değerleri bir fonksiyona fit edilerek kalibrasyon eğrisinin denklemi elde edilir. Bu şekilde MCA'nın tüm kanalları kalibre edilmiş olur. Temelde kalibrasyon eğrisinin mükemmel bir doğru olması gerekir. Ancak gerek yükselticide gerekse doğrusal yükselticideki çevirme ve yükseltmelerin tam doğrusal olmaması nedeniyle standart kaynaklarla elde edilen enerji değerleri doğrusallıktan sapabilir. Kalibrasyon eğrisinin denklemi logaritmik, üssel veya eksponansiyel bir denkleme eşitlenir.

$$E = a_0 + a_1\langle K \rangle + a_2\langle K \rangle^2 + \dots \quad (3.5)$$

ifadesiyle verilir. Burada;

E : ilgililenilen pikin enerjisi (keV)

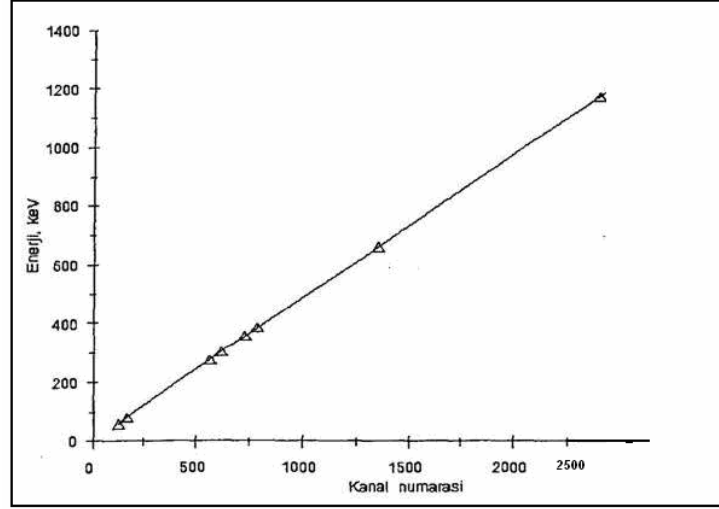
$\langle K \rangle$  : kanal numarası

$a_0$  : başlangıç kanalındaki enerji

$a_1$  : eğim (keV/kanal)

$a_2$  : doğrusallıktan sapma katsayısı (keV/kanal<sup>2</sup>)

Bilinen enerjilere karşı gelen pik ağırlık merkezleri yukarıdaki ifadede yerine konarak [Kanal] vs [Enerji] grafiğinden detektörün enerji kalibrasyonunu belirleyen  $a_0$ ,  $a_1$  ve  $a_2$  sabitleri hesaplanır. Böylece enerjinin kanal numarasına göre değişimini gösteren birinci ( $E = \alpha_0 + \alpha_1\langle K \rangle$ ) veya ikinci dereceden ( $E = \alpha_0 + \alpha_1\langle K \rangle + \alpha_2\langle K \rangle^2$ ) polinom denklemi bulunmuş olur. Şekil 3.7 de HPGe detektörün enerji-kanal kalibrasyon grafiği görülmektedir.



Şekil 3.7 Canberra Model 7500 HpGe Detektör için Enerji-Kanal Kalibrasyon Grafiği

### 3.2.3 Detektör Verim Kalibrasyonu

Radyoaktiviteyi nicel olarak tayin etmek için en basit yöntem örneğin sayım hızı ile aynı radyoaktif izotopa sahip standart kaynağın sayım hızının karşılaştırılması esasına dayanan karşılaştırma yöntemidir. Standart kaynağın hazırlanamaması veya teminindeki güçlükler nedeniyle bu yöntemin uygulanabilirliği her zaman mümkün değildir. Ancak çeşitli standart radyoaktif kaynaklar kullanılarak ( $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{88}\text{Y}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{113}\text{Sn}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ...) deneysel olarak fotopik verimlerinin enerjiyle değişimi bulunabilir. Enerji fotopik verimi grafiğinin elde edilmesi için aşağıdaki işlemler uygulanır:

Belirli geometri ve yoğunluklarda, gama aktiviteleri (A) bilinen standart kaynaklarla alınan spektrumdan detektör verimi, aşağıdaki ifadeden yararlanarak, değişik gama enerjileri için belirlenir.

Verim = (İlgilenilen pikin net gama sayım hızı) / (Standart kaynağın gama yayılım hızı)

$$\epsilon_{\gamma} = (P/t) / A \cdot f_{\gamma}$$

(3.6)

eşitliği ile ifade edilebilir. Burada

$\varepsilon_\gamma$ : enerjisi için sayım verimi,

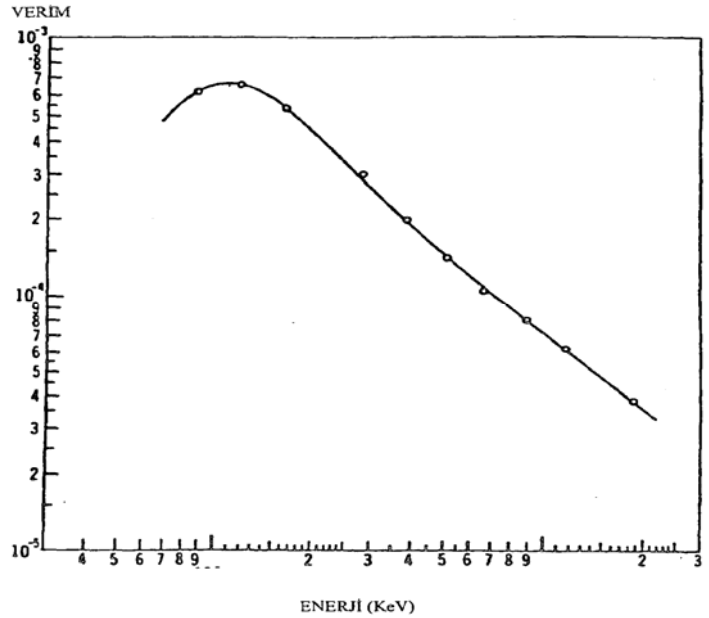
A: Standartta bulunan radyoizotopun bilinen aktivitesi, Bq,

$f_\gamma$ : Radyoizotopun bozunumunda  $E_\gamma$  enerjili fotonun bağıl şiddeti,

P:  $\varepsilon_\gamma$  enerjili fotonun oluşturduğu pik alanı

t: Standart kaynağın detektördeki sayım zamanıdır.

Bu işlem çok sayıdaki değişik gama enerjileri için yapılarak elde edilen verim değerleri ile enerji grafiği çizilir. (AYÇIK 1992). Şekil 3.8de bu deneyde kullanılan Canberra Model 7500 HpGe detektörün mutlak verim eğrisi görülmektedir.



Şekil 3.8 Canberra Model 7500 HpGe Detektörün Verim Eğrisi

### 3.2.4 Örnek Spektrumunun Alınması

Örnekler, mutlak verimin belirlenmesinde kullanılan standartların yoğunluğunda, ölçüm kabını homojen dolduracak şekilde hazırlanır. Ölçüm kabı hacminin homojen olarak doldurulmasını sağlamak amacıyla örnekler yeterli tanecik büyüklüğüne getirilir. 1–5 mL hacmindeki örnekler için kullanılan kuyu tipi geometrisinde toz haline getirilmiş örneklerin kullanılması gerekirken, 1L hacmindeki örnekler için kullanılan Marinelli geometrisinde ise böyle bir zorunluluk olmayıp

daha büyük tanecik büyüklüğünde hazırlanmış örnekler kullanılabilir. Örneklerin homojen hazırlanmış olması gereklidir. Burada kullanılan geometri sayesinde katı açı hesabı yapmaya gerek kalmamaktadır. Çünkü örneği koyduğumuz Marinelli kabı  $4\pi$  geometrisindedir.(Şekil 3.9) Standart kalibrasyon kaynağı ile aynı yapıdadır.

Verim kalibrasyonu için kullanılan standartla yaklaşık aynı tanecik büyüklüğü ve yoğunlukta hazırlanan örnek, mutlak verimin elde edildiği geometride sayılır.

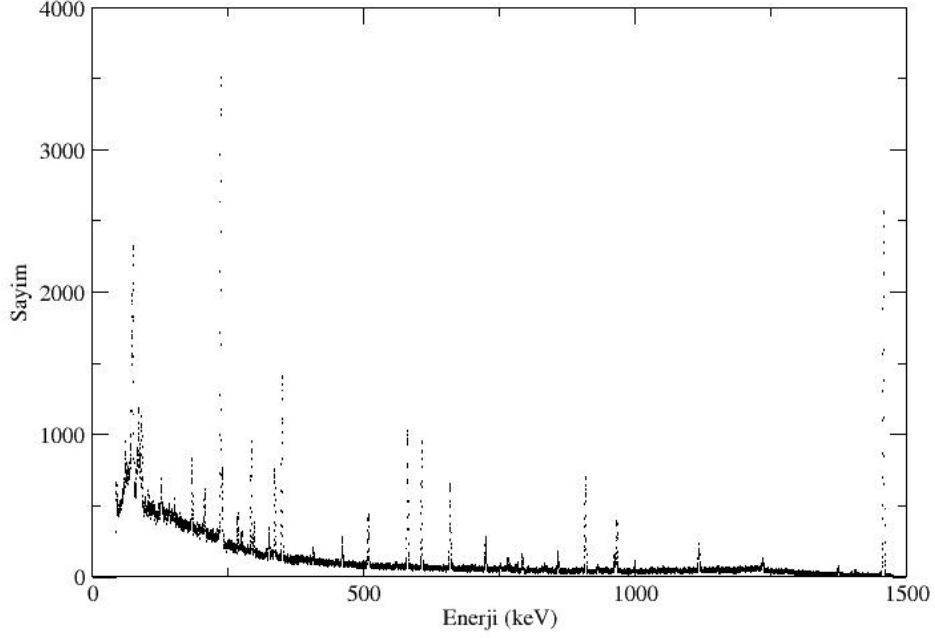


Şekil 3.9 Marinelli sayım geometrisi

Örnek hacmi: 500 – 1000 mL'dir.

#### 3.2.4.1 Nitel Analiz

Elde edilen spektrumda bulunan pikler belirlenir. Enerji kalibrasyonundan yararlanarak, aynı kazanç değerinde çalışmak şartıyla, piklerin tepe noktalarına veya daha doğru olarak pik ağırlık merkezlerine karşı gelen enerjiler belirlenir. Belirlenen enerjilerin ait oldukları radyoizotoplar bozunum şemaları ve bağlı şiddetleri göz önüne alınarak bu amaçla hazırlanmış nükleer veri tabloları yardımıyla tanımlanır.



Şekil 3.10 11 Numaralı örneğe ait spektrum

### 3.2.4.2 Nicel Analiz

Nicel analiz kısmında enerjileri tanımlanan piklerin net alanları, tüm enerji pik alanında anlatıldığı şekilde, Compton ve tabii alan sayım düzeltilmesi yapılarak bulunur. Detektör verim kalibrasyonu kısmında bulunan verim grafiği yardımıyla ilgilenilen enerjilerdeki “mutlak verim” bulunur.

Belirli bir radyoizotopun gama aktivitesi;

$$A = (P/t) / [\epsilon_{\gamma} \cdot f_{\gamma}] \quad (3.8)$$

Bq olur. Bu eşitliklerde

A: örnek içindeki belirli bir radyoizotopun gama aktivitesi,

Bq; birim zamanda bozunan parçacık sayısı,

t: örneğin sayım süresi, saniyedir.

Bulunan aktivite değerinin ölçümde kullanılan örnek ağırlığı veya hacmine bölünmesiyle de Bq/kg veya Bq/L olarak spesifik aktiviteleri bulunur.

Radyoizotopun birden fazla gama enerjisi varsa, uygun bulunan diğer enerjiler için de aynı aktivite hesaplamaları yapılarak radyoizotopun ortalama aktivitesi bulunur. (AYÇIK 1992)

### 3.2.5 Sayım Hatalarının Hesaplanması

Toplam belirsizlik değerlendirilmesinde göz önüne alınması gereken hata kaynaklarından bazıları;

1. Örnek ağırlığının belirlenmesinde hata ( $\Delta w$ )
2. Net Pik Alanının belirlenmesindeki hata ( $\sigma$ )
3. Nükleer verilerdeki hata (Radyoizotopun gama yayınlanma olasılığında  $\Delta f$  yarılanma süresinde  $\Delta T_{1/2}$  veya bozunma faktörü üzerindeki hata  $\Delta D$ )
4. Belirli enerjilerdeki fotopik verimlerindeki hata ( $\Delta \epsilon$ ), olarak sayılabilir. Sonuç olarak bir radyoizotopun tek bir sayımla bulunan aktivitesindeki toplam belirsizlik,  $\Delta A$ ,

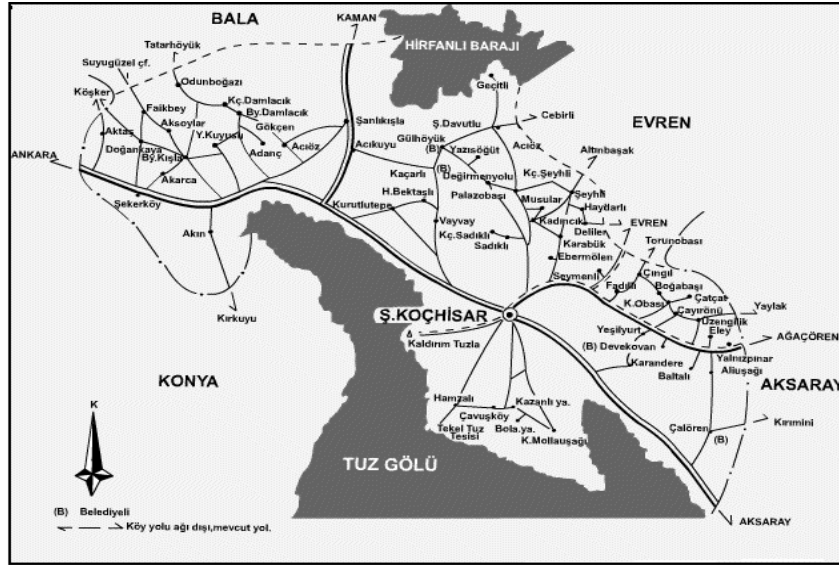
$$\frac{\Delta A}{A} = \sqrt{\left(\frac{\Delta w}{w}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\sigma}{\text{Pikalani}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \epsilon_\gamma}{\epsilon_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2} \quad (3.9)$$

ifadesinden hesaplanır.

#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE HESAPLAR

##### 4.1 Toprak Örneğinin Alınması Hazırlanması Ve Sayılması

Bu çalışma için gerekli olan toprak örnekleri, Ankara iline bağlı Şereflikoçhisar ilçesi sınırlarında yer alan Tuz Gölü civarından temin edildi. Şekil 4.1 de Gölün sınır olduğu Şereflikoçhisar ilçesi görülmektedir.



Şekil 4.1 Tuz Gölü sınırında yer alan Şereflikoçhisar ilçesi haritası [1]

Örnekler istasyon denilen, aralarında yaklaşık 5 metre kadar mesafe bulunan üç ayrı noktanın içerisinde bulunan bir yerden alındı. Aralarında 5–10 km mesafeler olan toplam 13 istasyon bulunmaktadır. Ayrıca bu çalışmada bir istasyondan alınan tuz örneği de incelenmiştir. Bu istasyonların koordinatları, GPS cihazı ile bir istasyonu oluşturan üç farklı noktanın ortasına geçilerek E (doğu) ve N (kuzey) Koordinatlar olarak tespit edildi. Belirlenen noktalar Tablo 4.1 de yer almaktadır. Aynı zamanda toprak örneklerinin alındığı yerler harita üzerinde Şekil 4.2 de görülmektedir.

Toprak örnekleri alınırken, metal halka, çekiç, özel kürek (Şekil 4.3), naylon poşet, etiket, ip, eldiven ve kalem aparatları kullanıldı.



Tablo 4.1 Örneklerin koordinatları

NUMUNE	İSTASYON	E KOORDİNAT	N KOORDİNAT
TOPRAK	1.İSTASYON	33°28'45.58020"	38°59'21.83035"
TOPRAK	2.İSTASYON	33°27'38.79905"	39°00'15.49526"
TOPRAK	3.İSTASYON	33°25'05.57776"	39°04'19.36940"
TOPRAK	4.İSTASYON	33°23'30.85899"	39°05'41.38072"
TOPRAK	5.İSTASYON	33°20'43.55180"	39°07'48.42276"
TOPRAK	6.İSTASYON	33°19'16.64866"	39°08'56.50146"
TOPRAK	7.İSTASYON	33°37'52.23555"	38°47'22.00888"
TOPRAK	8.İSTASYON	33°38'45.95125"	38°46'35.77920"
TOPRAK	9.İSTASYON	33°37'16.80600"	38°48'01.32227"
TOPRAK	10.İSTASYON	33°36'34.08803"	38°48'57.53984"
TOPRAK	11.İSTASYON	33°28'21.64820"	38°56'47.02730"
TOPRAK	12.İSTASYON	33°26'59.81585"	38°57'00.68360"
TOPRAK	13.İSTASYON	33°27'30.09102"	38°56'52.71530"
TUZ	14.İSTASYON	33°24'39.93016"	39°04'24.29407"



Şekil 4.2 Örneklerin alındığı noktalar [2]

Seçilen istasyonun bulunduğu bölgenin çeşitli özellikleri taşıması gerekmektedir. Meyilli ve erozyona uğramayan, düz bir arazi olmalıdır. Ayrıca kullanacağınız toprağın, su geçirgenliği iyi, yüzeyi yüksek otlarla kaplı olmayan, ağaçlarla kaplanmamış, dal ve yapraklarıyla gölgelenmemiş bir arazide yer alması gerekir. Bu özellikleri taşıyan yerlerden örnekler şu şekilde alındı: Şekil 4.3 de görülen, 10 cm çapındaki metal halka, metal çubuk ile çekiç kullanılarak 5cm derinlikte zemine çakıldı. Halkanın içerisine dolan toprak, özel kürek ile alınarak poşetlere konuldu. Aynı istasyonda bulunan üç farklı noktadan alınan örnekler, aynı poşete konuldu. İstasyon numarası ve GPS cihazında okunan koordinat değerleri poşet üzerine işlendi. Bu işlemler 13 farklı istasyon

için tekrar edildi. Örnek miktarı, Marinelli geometrisinde çalışılacağı için 1- 3 kg arasında alındı.



Şekil 4.3 Metal halka, metal çubuk, özel kürek

Örnekler alındıktan sonra İstanbul'a ÇNAEM' e getirildi. Toprak sayıma hazır hale getirilebilmesi için bir dizi işlemden geçirildi. Öncelikle topraktaki otlar ve büyük taşlar ayıklandı. Yaş olarak tartılan örnekler, kapalı mekânda, doğal koşullarda, naylon poşetler üzerine serildi ve tamamen kurutuldu.

Kuruyan örnekler tartılıp, kuru ağırlığı tespit edildi. Bu aşamadan sonra örnekler kırılıp küçük parçalar haline, kırma makinesinde homojen duruma getirildi. Sayım yapılacak kabın darası alınıp, örnek kaba konularak brüt ağırlığı tespit edildi. Nem tayini de yapıldığından net ağırlığı bulunup ve örnek kodu ile beraber cam kalemlerle, Şekil 4.4 te gösterilen sayım kaplarına (Marinelli kabı) yazıldı. Uranyum serisi elementleri doğru tespit edebilmek için, radonun dengeye gelmesi gerektiğinden sayım kaplarının hava alış verişini önleyecek şekilde bantlarla kapatıldı. Kaplardaki numune hava ile alış veriş yapmaksızın 4 hafta boyunca bekletildi. Tuz örneği de kurutulup ezilerek Marinelli kabına konulacak şekilde hazırlandı.



Şekil 4.4 Marinelli kabı boş halde.

Dört hafta süre sonunda, kaplarda bekleyen toprak örnekleri ve tuz örneği, 2 numaralı detektöre konularak sayımlar yapıldı.





Şekil 4.5 Örneklerin detektöre yerleştirilmesi.

## 4.2 Hesaplar

İncelenen örneklerde, doğal radyonüklidler olan Ra-226, U-238, Th-232, K-40 ve yapay radyonüklid olan Cs-137 için aktivite değerleri hesaplandı. Aktiviteler hesaplanmasında 2 bölümde yer alan aktivite ifadesi kullanıldı. Burada P net sayım, bulunan pik alanından background sayımları çıkartılıp, detektör verimine ( $\epsilon_\gamma$ ), radyonüklidin yayınlanma olasılığına ( $f_\gamma$ ), sayım süresine (t) ve örnek miktarına (m) bölünerek aktivite hesaplanmıştır. Örneklerin yoğunluğu yaklaşık  $1,0 \text{ g/cm}^3$  tür. Sadece 1 örneğin yoğunluğu  $1,7 \text{ gr/cm}^3$  tür bu değer için detektör verimi hesaplanmıştır. Verim denklemi  $1,0 \text{ g/cm}^3$  için  $y = 1,3958x^{-0,6698}$  alınırken,  $1,7 \text{ gr/cm}^3$  için  $y = 1,9716x^{-0,7258}$  olarak alındı. Aktivite belirlemede, Ra-226 için 186 keV, Cs-137 için 661,6 keV, K-40 için 1460,8 keV gama enerjileri kullanılırken, U-238 için 352 keV (Pb-214), 609,4 keV (Bi-214) ve Th-232 için 583,1 keV (Tl-208), 911.1 keV (Ac-228) gama enerjilerine göre aktivitelerinin ağırlıklı ortalamaları alındı. Burada U-238 ve Th-232 için alınan

gama enerjileri yayınlanma olasılıkları büyük olan çekirdeklerdir.1 numaralı örnekte K-40 elementinin hesabı örnek olarak aşağıda gösterilmiştir.

$$A = (P/t) / [\epsilon_{\gamma} \cdot f_{\gamma} \cdot m]$$

1460,8 keV enerjisinde alınan sayım 28607, background sayım 283, net sayım  $P = 28324$ , sayım süresi 50000 saniye, detektör verimi ( $1\text{gr}/\text{cm}^3$  yoğunluklu örnek için) 0,0106, yayınlanma olasılığı 0,107,miktarı 1193,6 g dır. Payda 1000 ile çarpılırsa aktivite kg cinsinden bulunacaktır. Buradan aktivite,

$$A = 28324 / (0,0106) \cdot (0,107) \cdot (50000) \cdot (1193,6)$$

$$A = 418,44 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ olarak bulunur.}$$

Ra-226 elementinin aktivitesi hesaplanırken, 186 keV deki pik birleşik bir piktir. Yani 185,7 keV U-235 e ait olan ve 186 keV de Ra-226 ya ait olan iki pik görmekteyiz. Bu pikin %58'i Ra-226 ve % 42'si U-235 olduğu için aktivite hesaplarken bulunan değer %58 i alınır.(KAHN 1983)

Aktivitelerin hesaplanmasından sonra toplam belirsizlikler değerlendirildiğinde;

Ağırlıkta  $\Delta w = 0,01$ , pik alanı hesabında  $\sigma = 0,02$ , dedektör veriminde  $\Delta\epsilon = 0,03$  oranda belirsizlik ile her bir radyonüklid için nükleer datalardan alınan  $\Delta f_{\gamma}$  lara göre aktivitelerdeki belirsizlikler bulundu. 1 numaralı örnek için yapılan belirsizlik hesabına göre, örneğin ağırlığından, pik alanının hesabından, gama yayımlanma olasılığından, detektör veriminden, kaynaklanan belirsizlikler;

$\Delta w = 11,96$ ,  $\sigma = 46,56$ ,  $\Delta f_{\gamma} = 0,0019$ ,  $\Delta\epsilon = 0,00084$  olarak alındığında denklem 3.9 dan aktivitedeki belirsizlik  $\Delta A = 1,3264$  olarak hesaplarız. Aktivitedeki belirsizliğin hesabı tüm örnekler için yapıldı. Tablo 4.6 da tüm örnekler için hesaplanan aktivite ve belirsizlikler yer almaktadır.

Hesaplanan değerler ile örnek numaralarına ve radyonüklidlerin aktivitelere göre aşağıdaki tablo elde edilmiştir.

Tablo 4.2 1 Nolu örnek

İNOLU ÖRNEK	SAYIM	BG SAYIM	NET SAYIM	$\epsilon_{\gamma}$	$f_{\gamma}$	t (sn)	m (g)	RADYONÜKLİD	A (Bq/kg)
186 Kev	3013	685	2328	0,042	0,033	50000	1193,6	Ra-226	16,32
352 Kev	8030	256	7774	0,027	0,371	50000	1193,6	U-238	13,00
583 Kev	5506	136	5370	0,0206	0,309	50000	1193,6	Th-232	14,14
609 Kev	6166	238	5928	0,019	0,461	50000	1193,6	U-238	11,34
662 Kev	14121	0	14121	0,018	0,852	50000	1193,6	Cs-137	15,43
911 Kev	3802	35	3767	0,0145	0,29	50000	1193,6	Th-232	15,01
1461 Kev	28607	283	28324	0,0106	0,107	50000	1193,6	K-40	418,44
AĞIRLIKLI ORTALAMA (352 Kev-609 Kev)								U-238	12,08
AĞIRLIKLI ORTALAMA (583 Kev-911Kev)								Th-232	14,78

Tablo 4.3 2 Nolu örnek

2 NOLU ÖRNEK	SAYIM	BG SAYIM	NET SAYIM	$\epsilon_{\gamma}$	$f_{\gamma}$	t (sn)	m (g)	RADYONÜKLİD	A (Bq/kg)
186 Kev	3782	685	3097	0,042	0,033	50000	1147,7	Ra-226	22,58
352 Kev	10324	256	10068	0,027	0,371	50000	1147,7	U-238	17,51
583 Kev	6267	136	6131	0,0206	0,309	50000	1147,7	Th-232	16,78
609 Kev	7781	238	7543	0,019	0,461	50000	1147,7	U-238	15,01
662 Kev	10951	0	10951	0,018	0,852	50000	1147,7	Cs-137	12,44
911 Kev	4314	35	4279	0,0145	0,29	50000	1147,7	Th-232	17,73
1461 Kev	26172	283	25889	0,0106	0,107	50000	1147,7	K-40	397,77
AĞIRLIKLI ORTALAMA  (352 Kev-609 Kev)								U-238	16,13
AĞIRLIKLI ORTALAMA  (583 Kev-911Kev)								Th-232	17,48



Tablo 4.4 3 Nolu örnek

3 NOLU ÖRNEK	SAYIM	BG SAYIM	NET SAYIM	$\epsilon_{\gamma}$	$f_{\gamma}$	t (sn)	m (g)	RADYONÜKLİD	A (Bq/kg)
186 Kev	4860	685	4175	0,042	0,033	50000	1264,7	Ra-226	27,63
352 Kev	13965	256	13709	0,027	0,371	50000	1264,7	U-238	21,64
583 Kev	8911	136	8775	0,0206	0,309	50000	1264,7	Th-232	21,80
609 Kev	10454	238	10216	0,019	0,461	50000	1264,7	U-238	18,44
662 Kev	2121	0	2121	0,018	0,852	50000	1264,7	Cs-137	2,19
911 Kev	6211	35	6176	0,0145	0,29	50000	1264,7	Th-232	23,23
1461 Kev	40217	283	39934	0,0106	0,107	50000	1264,7	K-40	556,80
AĞIRLIKLI ORTALAMA (352 Kev-609 Kev)								U-238	19,87
AĞIRLIKLI ORTALAMA (583 Kev-911Kev)								Th-232	22,85

Tablo 4.5 4 Nolu örnek

4 NOLU ÖRNEK	SAYIM	BG SAYIM	NET SAYIM	$\epsilon_{\gamma}$	$f_{\gamma}$	t (sn)	m (g)	RADYONÜKLİD	A (Bq/kg)
186 Kev	4467	685	3782	0,044	0,033	50000	1411,2	Ra-226	21,41
352 Kev	13100	256	12844	0,0279	0,371	50000	1411,2	U-238	17,59
583 Kev	8442	136	8306	0,0194	0,309	50000	1411,2	Th-232	19,64
609 Kev	9915	238	9677	0,0188	0,461	50000	1411,2	U-238	15,82
662 Kev	1737	0	1737	0,01768	0,852	50000	1411,2	Cs-137	1,63
911 Kev	6208	35	6173	0,014	0,29	50000	1411,2	Th-232	21,55
1461 Kev	60790	283	60507	0,00995	0,107	50000	1411,2	K-40	805,45
AĞIRLIKLI ORTALAMA (352 Kev-609 Kev)								U-238	16,61
AĞIRLIKLI ORTALAMA (583 Kev-911Kev)								Th-232	21,04

Tablo 4.6 5 Nolu örnek

5 NOLU ÖRNEK	SAYIM	BG SAYIM	NET SAYIM	$\epsilon_{\gamma}$	$f_{\gamma}$	t (sn)	m (g)	RADYONÜKLİD	A (Bq/kg)
186 Kev	4543	685	3858	0,042	0,033	50000	1162,8	Ra-226	27,77
352 Kev	15055	256	14799	0,027	0,371	50000	1162,8	U-238	25,41
583 Kev	8118	136	7982	0,0206	0,309	50000	1162,8	Th-232	21,57
609 Kev	11591	238	11353	0,019	0,461	50000	1162,8	U-238	22,29
662 Kev	7846	0	7846	0,018	0,852	50000	1162,8	Cs-137	8,80
911 Kev	5758	35	5723	0,0145	0,29	50000	1162,8	Th-232	23,41
1461 Kev	33301	283	33018	0,0106	0,107	50000	1162,8	K-40	500,71
AĞIRLIKLI ORTALAMA (352 Kev-609 Kev)								U-238	23,68
AĞIRLIKLI ORTALAMA (583 Kev-911Kev)								Th-232	22,92

Tablo 4.7 6 Nolu örnek

6 NOLU ÖRNEK	SAYIM	BG SAYIM	NET SAYIM	$\epsilon_{\gamma}$	$f_{\gamma}$	t (sn)	m (g)	RADYONÜKLİD	A (Bq/kg)
186 Kev	6568	685	5883	0,042	0,033	50000	1054	Ra-226	46,71
352 Kev	18179	256	17923	0,027	0,371	50000	1054	U-238	33,95
583 Kev	11549	136	11413	0,0206	0,309	50000	1054	Th-232	34,02
609 Kev	13807	238	13569	0,019	0,461	50000	1054	U-238	29,40
662 Kev	11188	0	11188	0,018	0,852	50000	1054	Cs-137	13,84
911 Kev	8154	35	8119	0,0145	0,29	50000	1054	Th-232	36,64
1461 Kev	33523	283	33240	0,0106	0,107	50000	1054	K-40	556,11
AĞIRLIKLI ORTALAMA (352 Kev-609 Kev)								U-238	31,43
AĞIRLIKLI ORTALAMA (583 Kev-911Kev)								Th-232	35,94

Tablo 4.8 7 Nolu örnek

7 NOLU ÖRNEK	SAYIM	BG SAYIM	NET SAYIM	$\epsilon_{\gamma}$	$f_{\gamma}$	t (sn)	m (g)	RADYONÜKLİD	A (Bq/kg)
186 Kev	4732	685	4047	0,042	0,033	50000	1148,3	Ra-226	29,50
352 Kev	13743	256	13487	0,027	0,371	50000	1148,3	U-238	23,45
583 Kev	7736	136	7600	0,0206	0,309	50000	1148,3	Th-232	20,80
609 Kev	10673	238	10435	0,019	0,461	50000	1148,3	U-238	20,75
662 Kev	9115	0	9115	0,018	0,852	50000	1148,3	Cs-137	10,35
911 Kev	5582	35	5547	0,0145	0,29	50000	1148,3	Th-232	22,98
1461 Kev	90971	283	90688	0,0106	0,107	50000	1148,3	K-40	1392,63
AĞIRLIKLI ORTALAMA (352 Kev-609 Kev)								U-238	21,95
AĞIRLIKLI ORTALAMA (583 Kev-911Kev)								Th-232	22,40

Tablo 4.9 8 Nolu örnek

8 NOLU ÖRNEK	SAYIM	BG SAYIM	NET SAYIM	$\epsilon_{\gamma}$	$f_{\gamma}$	t (sn)	m (g)	RADYONÜKLİD	A (Bq/kg)
186 Kev	9459	685	8774	0,042	0,033	70000	1280,4	Ra-226	40,97
352 Kev	28997	256	28741	0,027	0,371	70000	1280,4	U-238	32,01
583 Kev	22573	136	22437	0,0206	0,309	70000	1280,4	Th-232	39,33
609 Kev	20450	238	20212	0,019	0,461	70000	1280,4	U-238	25,75
662 Kev	6675	0	6675	0,018	0,852	70000	1280,4	Cs-137	4,86
911 Kev	12428	35	12393	0,0145	0,29	70000	1280,4	Th-232	32,88
1461 Kev	65687	283	65404	0,0106	0,107	70000	1280,4	K-40	643,39
AĞIRLIKLI ORTALAMA (352 Kev-609 Kev)								U-238	28,54
AĞIRLIKLI ORTALAMA (583 Kev-911Kev)								Th-232	34,60

Tablo 4.10 9 Nolu örnek

9 NOLU ÖRNEK	SAYIM	BG SAYIM	NET SAYIM	$\epsilon_{\gamma}$	$f_{\gamma}$	t (sn)	m (g)	RADYONÜKLİD	A (Bq/kg)
186 Kev	4274	685	3589	0,044	0,033	50000	1419,6	Ra-226	20,20
352 Kev	11789	256	11533	0,0279	0,371	50000	1419,6	U-238	15,70
583 Kev	7578	136	7442	0,0194	0,309	50000	1419,6	Th-232	17,49
609 Kev	9030	238	8792	0,0188	0,461	50000	1419,6	U-238	14,29
662 Kev	22429	0	22429	0,01768	0,852	50000	1419,6	Cs-137	20,98
911 Kev	5213	35	5178	0,014	0,29	50000	1419,6	Th-232	17,97
1461 Kev	35247	283	34964	0,00995	0,107	50000	1419,6	K-40	462,68
AĞIRLIKLI ORTALAMA (352 Kev-609 Kev)								U-238	14,92
AĞIRLIKLI ORTALAMA (583 Kev-911Kev)								Th-232	17,84

Tablo 4.11 10 Nolu örnek

10 NOLU ÖRNEK	SAYIM	BG SAYIM	NET SAYIM	$\epsilon_{\gamma}$	$f_{\gamma}$	t (sn)	m (g)	RADYONÜKLİD	A (Bq/kg)
186 Kev	5237	685	4552	0,042	0,033	50000	1339,5	Ra-226	28,44
352 Kev	16603	256	16347	0,027	0,371	50000	1339,5	U-238	24,37
583 Kev	9599	136	9463	0,0206	0,309	50000	1339,5	Th-232	22,20
609 Kev	12841	238	12603	0,019	0,461	50000	1339,5	U-238	21,48
662 Kev	6821	0	6821	0,018	0,852	50000	1339,5	Cs-137	6,64
911 Kev	6826	35	6791	0,0145	0,29	50000	1339,5	Th-232	24,11
1461 Kev	44044	283	43761	0,0106	0,107	50000	1339,5	K-40	576,08
AĞIRLIKLI ORTALAMA (352 Kev-609 Kev)								U-238	22,77
AĞIRLIKLI ORTALAMA (583 Kev-911Kev)								Th-232	23,60



Tablo 4.12 11 Nolu örnek

11 NOLU ÖRNEK	SAYIM	BG SAYIM	NET SAYIM	$\epsilon_{\gamma}$	$f_{\gamma}$	t (sn)	m (g)	RADYONÜKLİD	A (Bq/kg)
186 Kev	4889	685	4204	0,042	0,033	50000	1251,1	Ra-226	28,12
352 Kev	13895	256	13639	0,027	0,371	50000	1251,1	U-238	21,77
583 Kev	11050	136	10914	0,0206	0,309	50000	1251,1	Th-232	27,41
609 Kev	10360	238	10122	0,019	0,461	50000	1251,1	U-238	18,47
662 Kev	6520	0	6520	0,018	0,852	50000	1251,1	Cs-137	6,80
911 Kev	8028	35	7993	0,0145	0,29	50000	1251,1	Th-232	30,39
1461 Kev	36774	283	36491	0,0106	0,107	50000	1251,1	K-40	514,32
AĞIRLIKLI ORTALAMA (352 Kev-609 Kev)								U-238	19,94
AĞIRLIKLI ORTALAMA (583 Kev-911Kev)								Th-232	29,59

Tablo 4.13 12 Nolu örnek

12 NOLU ÖRNEK	SAYIM	BG SAYIM	NET SAYIM	$\epsilon_{\gamma}$	$f_{\gamma}$	t (sn)	m (g)	RADYONÜKLİD	A (Bq/kg )
186 Kev	18137	685	17452	0,042	0,033	200000	1124,4	Ra-226	32,48
352 Kev	53952	256	53696	0,027	0,371	200000	1124,4	U-238	23,84
583 Kev	36236	136	36100	0,0206	0,309	200000	1124,4	Th-232	25,22
609 Kev	40635	238	40397	0,019	0,461	200000	1124,4	U-238	20,51
662 Kev	47537	0	47537	0,018	0,852	200000	1124,4	Cs-137	13,78
911 Kev	25254	35	25219	0,0145	0,29	200000	1124,4	Th-232	26,67
1461 Kev	130896	283	130613	0,0106	0,107	200000	1124,4	K-40	512,09
AĞIRLIKLI ORTALAMA (352 Kev-609 Kev)								U-238	21,99
AĞIRLIKLI ORTALAMA (583 Kev-911Kev)								Th-232	26,28

Tablo 4.14 13 Nolu örnek

13 NOLU ÖRNEK	SAYIM	BG SAYIM	NET SAYIM	$\epsilon_{\gamma}$	$\hat{f}_{\gamma}$	t (sn)	m (g)	RADYONÜKLİD	A (Bq/kg )
186 Kev	17619	685	16934	0,042	0,033	200000	1138,9	Ra-226	31,11
352 Kev	47445	256	47189	0,027	0,371	200000	1138,9	U-238	20,68
583 Kev	37576	136	37440	0,0206	0,309	200000	1138,9	Th-232	25,82
609 Kev	35471	238	35233	0,019	0,461	200000	1138,9	U-238	17,66
662 Kev	33849	0	33849	0,018	0,852	200000	1138,9	Cs-137	9,69
911 Kev	27028	35	26993	0,0145	0,29	200000	1138,9	Th-232	28,18
1461 Kev	154042	283	153759	0,0106	0,107	200000	1138,9	K-40	595,16
AĞIRLIKLI ORTALAMA  (352 Kev-609 Kev)								U-238	19,01
AĞIRLIKLI ORTALAMA  (583 Kev-911Kev)								Th-232	27,55

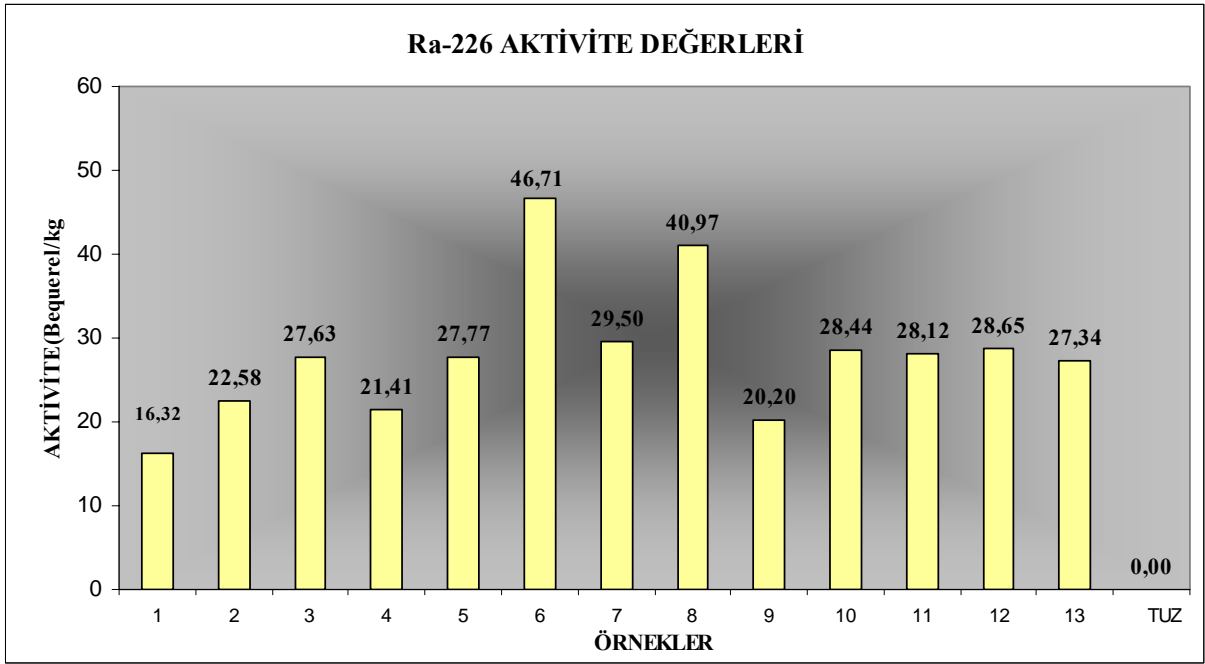
Tablo 4.15 Tuz örneği

TUZ	SAYIM	BG SAYIM	NET SAYIM	$\epsilon_\gamma$	$f_\gamma$	t (sn)	m (g)	RADYONÜKLİD	A (Bq/kg)
186 Kev	564	586	0	0,042	0,033	50000	1005,1	Ra-226	0,18
352 Kev	467	256	211	0,027	0,371	50000	1005,1	U-238	0,42
583 Kev	218	136	82	0,0206	0,309	50000	1005,1	Th-232	0,26
609 Kev	457	238	219	0,019	0,461	50000	1005,1	U-238	0,50
662 Kev	231	0	231	0,018	0,852	50000	1005,1	Cs-137	0,30
911 Kev	87	35	52	0,0145	0,29	50000	1005,1	Th-232	0,25
1461 Kev	1531	283	1248	0,0106	0,107	50000	1005,1	K-40	21,90
AĞIRLIKLI ORTALAMA (352 Kev-609 Kev)								U-238	0,46
AĞIRLIKLI ORTALAMA (583 Kev-911Kev)								Th-232	0,25

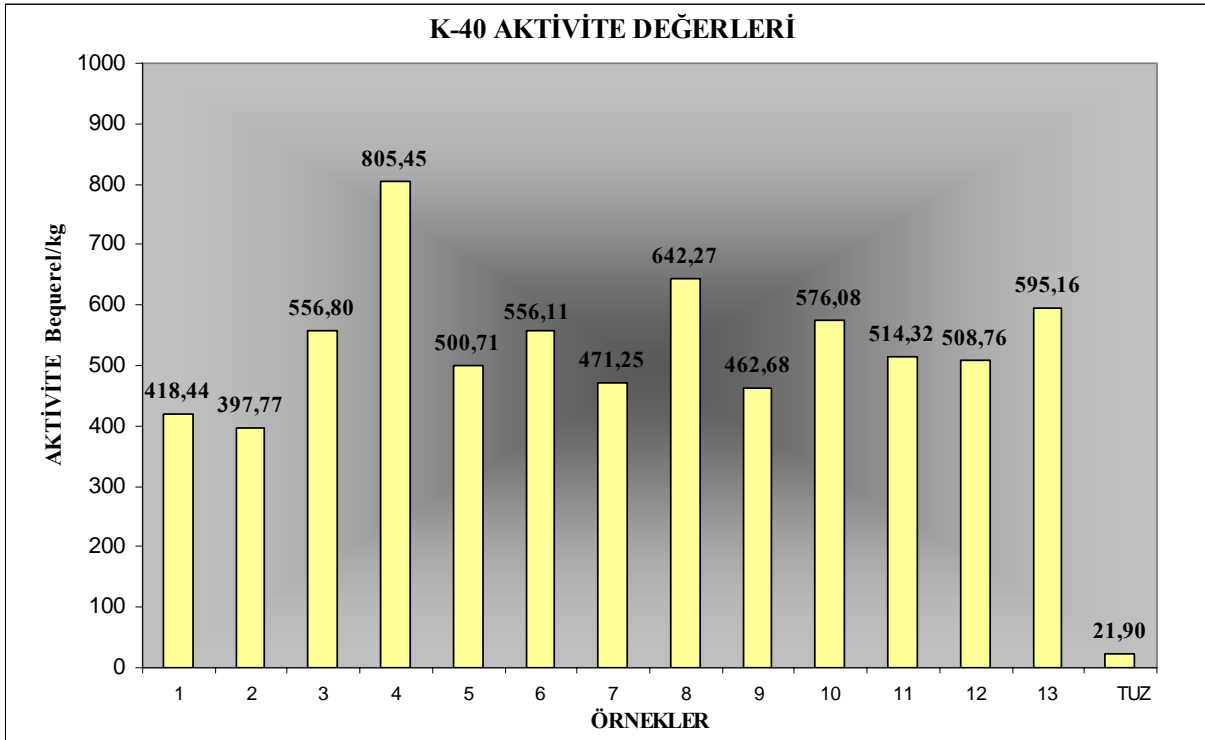
Tablo 4.6 Radyonüklidlerin aktivitelerinin örneklere göre değişimi

ÖRNEKLER	AKTİVİTE (Bequerel/Kg)				
	Ra-226	Cs-137	K-40	U-238	Th-232
	186 Kev	662 Kev	1461 Kev	352-609 Kev	583-911 Kev
1	16,32 ± 1,32	15,43 ± 1,1	418,44 ± 25,53	12,08 ± 0,11	14,78 ± 0,79
2	22,58 ± 1,28	12,44 ± 0,9	397,77 ± 25,12	16,13 ± 1,23	17,48 ± 1,1
3	27,63 ± 1,42	2,19 ± 0,1	556,80 ± 32,76	19,87 ± 1,25	22,85 ± 2,22
4	21,41 ± 1,26	1,63 ± 0,1	805,45 ± 45,97	16,61 ± 1,13	21,04 ± 1,18
5	27,77 ± 1,35	8,80 ± 0,3	500,71 ± 28,35	23,68 ± 2,62	22,92 ± 1,20
6	46,71 ± 2,43	13,84 ± 0,7	556,11 ± 29,38	31,43 ± 2,88	35,94 ± 2,31
7	29,50 ± 1,29	10,35 ± 0,5	471,63 ± 22,83	21,95 ± 1,26	22,40 ± 1,21
8	40,97 ± 2,41	4,86 ± 0,01	643,39 ± 36,27	28,54 ± 2,33	34,60 ± 2,80
9	20,20 ± 1,06	20,98 ± 1,25	462,68 ± 27,50	14,92 ± 1,12	17,84 ± 1,19
10	28,44 ± 0,128	6,64 ± 0,03	576,08 ± 30,41	22,77 ± 1,22	23,60 ± 1,25
11	28,12 ± 1,33	6,80 ± 0,04	514,32 ± 27,92	19,94 ± 0,10	29,59 ± 2,18
12	28,65 ± 0,21	13,78 ± 0,08	508,76 ± 7,12	21,64 ± 0,25	26,13 ± 1,21
13	27,34 ± 0,22	9,69 ± 0,02	595,16 ± 8,02	18,66 ± 0,14	27,40 ± 2,23
TUZ	0 ± 0,00	0,30 ± 0,0	21,90 ± 0,0	0,46 ± 0,0	0,25 ± 0,0

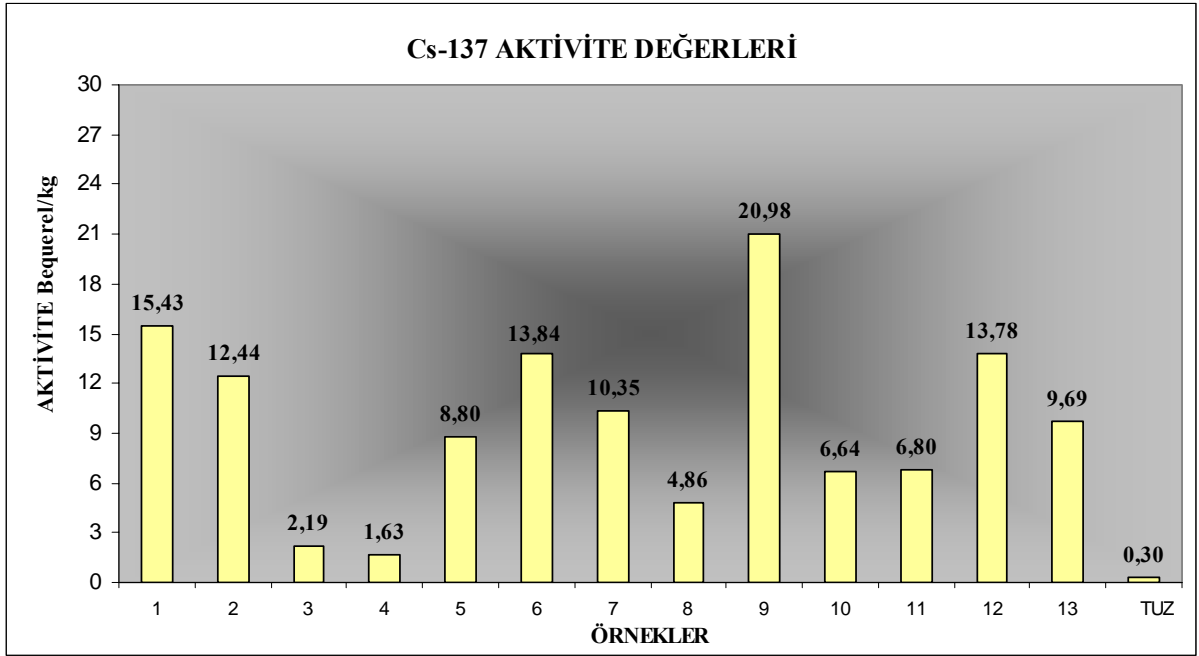
Tablodaki değerler göz önüne alınarak 5 ayrı radyonüklidin, örneklere göre grafikleri çizilmiştir.



Şekil 4.7 Ra-226 Aktivite değerleri

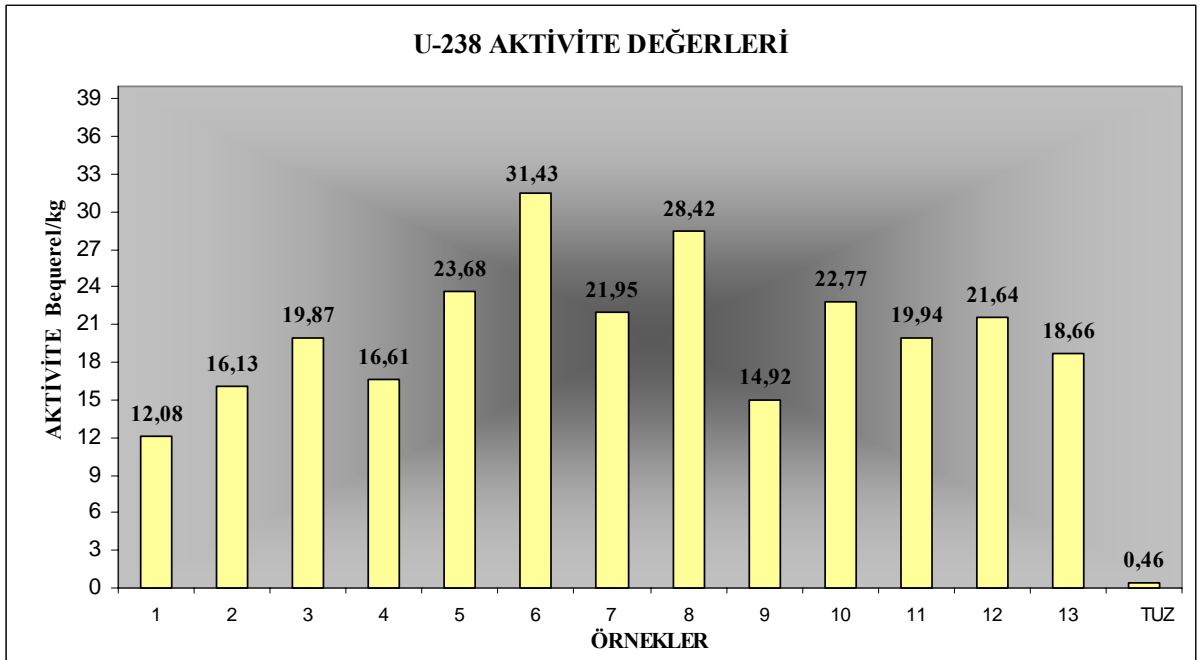


Şekil 4.8 K-40 Aktivite değerleri

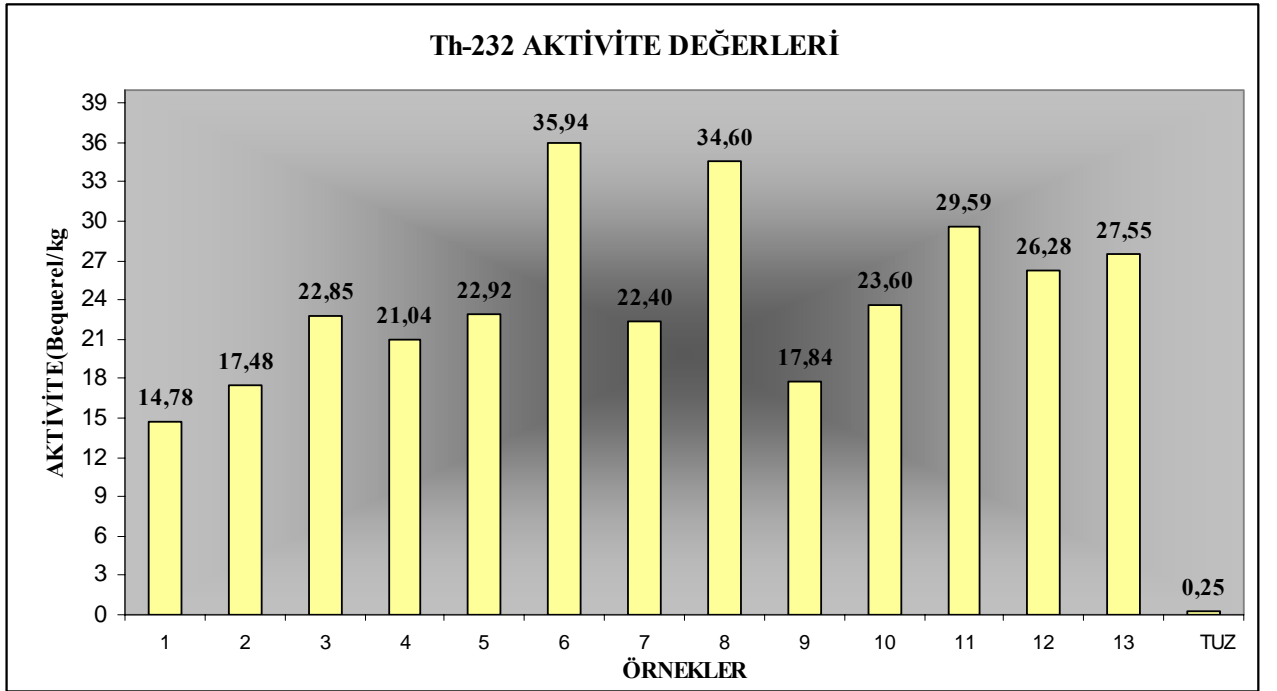


Şekil 4.9 Cs-137 Aktivite değerleri





Şekil 4.10 U-238 Aktivite değerleri



Şekil 4.11 Th-232 Aktivite değerleri

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

13 istasyondan alınan toprak örnekleri ve bir istasyondan alınan tuz örneğinde yapılan ölçümler ve hesaplamalar ile elde edilen aktiviteler değerlendirildiğinde şu sonuçlar ortaya çıkmıştır. Ra-226, U-238, Th-232 doğal radyonüklidlerinin aktivitelerinin 6 numaralı istasyondan alınan toprak örneğinde en yüksek değerlerde olduğu, 1 numaralı istasyonda ise aktivite değerlerinin en düşük düzeyde olduğu tespit edilmiştir. 6 numaralı istasyonda değerlerin en yüksek olması, o bölgede bulunan toprağın, killi toprak olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla killi toprağın suyu geçirgenliği az olması, radyonüklidlerin suyla taşınması mümkün olmamakta ve doğal radyonüklidler toprak tarafından tutulmaktadır. Bir numaralı istasyon ele alındığında ise üç radyonüklidin aktiviteleri en düşük değerlerdedir. Bu durumun, o bölgede kumlu toprağın bulunmasının bir sonucu olabileceği düşünülmektedir.

K-40 doğal radyonüklidi ele alındığında ise, en yüksek değere 4 numaralı istasyonda en düşük değere ise 2 numaralı istasyonda rastlanılmaktadır. Aktivitenin bu oranda değişim göstermesini, yüksek değerlerin ortaya çıktığı toprağın, bitki kalıntılarının bulunduğu, önceki yıllarda suni gübreyle maruz kalmış olabileceği veya hayvan leşi içeren bir yerde olduğu söylenebilir.

Bu çalışmaya paralel olarak dünyada ve Türkiye de pek çok çalışma yapılmaktadır. Tuz gölü civarında yapılan bu çalışmada elde edilen değerlerin kıyaslanması açısından, Tablo 5.1 de dünyanın 42 ülkesinde, topraktaki doğal radyonüklidlerin ortalama konsantrasyonu ve Tablo 5.2 de ise Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde yapılan çalışmada doğal radyonüklidlerin topraktaki aktiviteleri incelenebilir.

Tablo 5.1 Dünyanın değişik bölgelerinde ölçülen, topraktaki ortalama radyonüklid konsantrasyonu (UNSCEAR 2000)

Radyonüklid	K-40	U-238	Th-232	Ra-226
Aktivite (Bq/kg)	400	35	35	30

Tablo 5.2 Türkiye de çeşitli bölgelerinde ölçülen radyonüklidlerin aktiviteleri (ÇNAEM 2006)

Aktivite Bq/kg	BURDUR	GÜMÜŞHANE	HATAY	TEKİRDAĞ	UŞAK
Ra-226	25,3	27,6	15	44	16,7
Th-232	26,2	27	6,5	33,2	43,6
U-238	19,3	31,4	16,2	49,3	21,5
K-40	270	381	146	442	379
Cs-137	13,7	4,2	58,7	0,6	3

Çernobil kaynaklı Cs-137 radyonüklidinin en yüksek değeri 9 numaralı istasyonda en düşük değeri ise 4 numaralı istasyonda görülmektedir. 9 numaralı istasyon bölgesinin açık ve rüzgar alan bir yerde olmasından dolayı burada rüzgar ile taşınım olabileceği sonucuna varılabilir. 4 numaralı istasyonda ise Cs-137 değeri daha yüksek çıkmaktadır. Burada ise yağmurla taşınım olabileceği düşünülebilir. Yalnız buradaki Cs-137 değerleri yüksek değildir. Çernobil kazasına en fazla maruz kalan Karadeniz bölgemize baktığımızda ( Tablo 5.3 )aktivitenin kilo bequerel mertebesinde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla burada ölçülen değerler Karadeniz bölgesine oranla oldukça düşüktür.

Tablo 5.3 Karadeniz bölgesi çeşitli yörelerde Cs-137 değerleri (VARİNLİOĞLU 1996)

Örnek	Borçka	Arhavi	Fındıklı	Pazar	Rize	Çaykara	Of
Aktivite(kBq/m <sup>2</sup> )	11,31	73,78	134,79	134	65,71	26,50	37,03

Bir istasyondan alınan tuz örneğinde ise, doğal radyonüklidlerin toprak örneğine kıyasla çok az oranda olduğu K-40 dışındaki radyonüklidlerin özellikle değerlerinin düşük olduğu görülmektedir. Bu durumun tuzun yapısından kaynaklandığı düşünülebilir.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, ölçülen aktivitenin belirli istasyonlarda yüksek çıkması yada düşük değerde olması o bölgede yer alan toprağın yapısına, yağmur veya rüzgara ne kadar maruz kaldığına, toprağın tuzlu olmasına bağlı olarak değişim gösterdiği düşünülmektedir. Tuz gölü civarında yapılan ölçümler, dünya ve Türkiye ortalamaları ile kıyaslandığı takdirde, aktivite değerlerinin çok yüksek olmadığı bu civardaki topraklarda doğal radyonüklidlerin normal seviyede olduğu söylenebilir.

## KAYNAKLAR

Ayçık, G.,A., “Çevre Radyoaktivitesinin İzlenmesinde Örneklem Ölçme Ve Analiz Yöntemleri ” Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, 1992.

ÇNAEM 2006, Köse, A., Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Çekmece Nükleer Araştırma Ve Eğitim Merkezi, Radyoaktivite Ölçüm Ve Analiz Birimi, Burdur, Gümüşhane, Hatay, Tekirdağ, Uşak, Doğal Radyoaktivite Ölçüm Raporları.

Gilmore, G., Hemingway, J.,D., Practical Gama Ray Spectrometry, P57, 2005

KAHN, B., Search for Building Materials as Sources of Elevated Radiation Dose, p351, School of Nuclear Engineering and Health Physics, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1983

Karadağ, M., GÜ, Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi, Cilt 24, Sayı 1 (2004) 115-124

Karahan, G., “İstanbulun Çevresel Doğal Radyoaktivitesinin Tayini ve Doğal Radyasyonların Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri ” Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul, 1997.

Kathern, R. “ Radioactivity in the Environment: Sources, Distribution and Surveillance” Harwood Academic Publisher, OPA, Amsterdam, 1984.

Pfennig, G., Klewe-Nebenius, H., Seelmann-Eggebert, W., Karlsruher Nuklidkarte, 6. Auflage 1995.

Soyberk, Ö., Radyasyon Fiziği, Türkiye Enerjisi Kurumu Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi Sağlık Fiziği Bölümü, Cilt 1-2, İstanbul, 1998.

TAEK 2007, www.taek.gov.tr, Doğal Radyasyon Kaynakları (Erişim Tarihi 20 Mayıs 2007).

UNSCEAR 2000, United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and Effects of Ionizing Radiation Volume 1: Sources, United Nations New York, P116.

Varinlioğlu, A., Köse, A., “One Decade After Chernobyl: Summing up the Consequences of Presentation-Volume 2, International Conference Held in Vienna, 8-12 April 1996.

Yaren, H., Karayılanoğlu, T., “Radyasyon ve İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri”, Ankara, 1995.

## İNTERNET KAYNAKLARI

[1] www.sereflikochisar-bld.gov.tr (Erişim tarihi 10 Mayıs 2007).

[2] www.googleearth.com (Erişim tarihi 15 Mayıs 2007).

www.nndc.bnl.gov/chart (Erişim tarihi 16 Mayıs 2007).

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	25.04.1981	
Doğum yeri	Ankara	
Lise	1995-1999	Şereflikoçhisar Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi
Lisans	1999-2003	Yıldız Üniversitesi Fen Edebiyat Fak. Fizik Bölümü